عالم الذرة

مجلة هيئة الطاقة الذرية السورية

مجلة دورية تصدر ستّ مرّات في السنة عن هيئة الطاقة الذرّية في الجمهورية العربية السورية. وتهدف إلى الإسهام في نشر المعرفة العلمية باللغة العربية في الميدانين الذرّي والنووي وفي كل ما يتعلق بهما من تطبيقات.

العدد الثامن والستون | السنة الخامسة عشرة | تموز/آب 2000

المدير المسؤول

الدكتور إبراهيم عثمان

المدير العام لهيئة الطاقة الذرّية

هيئة التحرير

الدكتور توفيق قسّام (رئيس هيئة التحرير)

الدكتور محمد قعقع — **الدكتور فؤاد العجل**

الدكتور أحمد الحاج سعيد — **الدكتور محمد فؤاد الرباط**

الإخراج الفني والإشراف على الطباعة

رولا الخطيب

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

شروط الترجمة والتأليف للنشر في مجلة عالم الذرة

1- ترسل نسختان من مادة النشر باللغة العربية مطبوعتان بالآلة أو مكتوبتان بالحبر بخط واضح، على وجه واحد من الورقة، وبفراغ مضاعف بين السطور.

2- يُكتب على ورقةٍ مستقلة عنوان مادة النشر واسم الكاتب وصفته العلمية وعنوانه مع ملخصين لها أحدهما بالعربية والآخر باللغة الإنكليزية حصراً، في حدود عشرة اسطر لكل منهما، ويطلب من كل من المؤلف والمترجم كتابة اسمه كاملاً، باللغتين العربية والأجنبية، ولقبه العلمي وعنوان مراسلته.

3- يُقدم المؤلف أو المترجم في ورقة مستقلة قائمة بالعبارات التي تشكل الكلمات المفتاح «Key Words» (والتي توضح أهم ما تضمنته المادة من حيث موضوعاتها وغايتها ونتائجها والطرق المستخدمة فيها) وبما لا يتجاوز عشر عبارات باللغتين العربية والإنكليزية.

4- إذا سبق نشر هذا المقال أو البحث في مجلة أجنبية، ترسل الترجمة مع صورة واضحة عن هذه المادة المنشورة. ويستحسن إرسال نسخة الأصل المطبوع والأشكال (الرسوم) الأصلية، إن وجدت، ولو على سبيل الإعارة.

5- إذا كانت المادة مؤلفة أو مجمّعة من مصادر عدّة، يذكر الكاتب ذلك تحت العنوان مباشرة كأن يقول «تأليف، جمع، إعداد، مراجعة...» ويرفق المادة بقائمة مرقمة للمراجع التي استقاها منها.

6- إذا تضمنت المادة صوراً وأشكالاً، ترسل الصورة الأصلية وكذلك الأشكال مخططة بالحبر الأسود على أوراق مستقلة، إلاّ إذا كانت موجودة في المادة المطبوعة بلغة أجنبية (كما جاء في الفقرة «4»)، مرقمة حسب أماكن ورودها.

7- يرسل مع المادة قائمة بالمصطلحات العلمية العربية المستخدمة فيها مع مقابلاتها الأجنبية إذا لم تكن واردة في معجم الهيئة للمصطلحات العلمية والتقنية في الطاقة الذرية، الذي تم نشره في أعداد المجلة (2-18).

8- تكتب المصطلحات وكذلك أسماء الأعلام باللغتين العربية والأجنبية عند ورودها في النص أول مرة ومن ثم يُكتفى بإيراد المقابل العربي وحده سواء أكان هذا المقابل كاملاً أم مختزلاً. وتستعمل في النص المؤلَّف أو المترجَم الأرقام العربية 3, 2, 1 أينما وردت مع مراعاة كتابتها بالترتيب العربي من اليمين إلى اليسار. وإذا ورد في نص معادلةٍ أو قانون أحرف أجنبية وأرقام فتكتب المعادلة أو القانون كما في الأصل الأجنبي.

9- يُشار إلى الحواشي، إن وجدت، بإشارات دالّة (★ , + , x , o...) في الصفحة ذاتها، كما يشار في المتن إلى أرقام المصادر والمراجع المدرجة في الصفحة الأخيرة، وذلك بوضعها ضمن قوسين متوسطين [ ].

10- تُرقم مقاطع النص الأجنبي والنص العربي بترتيب واحد في حالة الترجمة.

11- يرجى من السادة المترجمين مراعاة الأمانة التامة في الترجمة.

12- تخضع مادة النشر للتقييم ولا تُرد إلى أصحابها نشرت أم لم تنشر.

13- يمنح كل من الكاتب أو المترجم أو المراجع مكافأة مالية وفق القواعد المقررة في الهيئة.

14- توجه المراسلات باسم رئيس هيئة التحرير إلى العنوان التالي:

الجمهورية العربية السورية – هيئة الطاقة الذرّية – مكتب الترجمة والتأليف والنشر – مجلة عالم الذرّة – دمشق – ص. ب 6091

رسوم الاشتراك

الاشتراك السنوي للطلاب (200) ل.س – الاشتراك السنوي للأفراد (300) ل.س – الاشتراك السنوي للمؤسسات (1000) ل.س

الاشتراك السنوي للأفراد من خارج القطر العربي السوري (30) دولاراً أمريكياً. وللمؤسسات (60) دولاراً أمريكياً – تتضمن الاشتراكات أجور البريد

بالنسبة للمشتركين من خارج القطر يُرسل رسم الاشتراك إلى العنوان التالي:

المصرف التجاري السوري فرع رقم 13
مزة – جبل – ص.ب 16005
رقم الحساب 2/3012

أو بشيك باسم هيئة الطاقة الذرّية السورية

يمكن للمقيمين داخل القطر دفع قيمة الاشتراك بحوالة بريدية على العنوان التالي:

مجلة عالم الذرّة – مكتب الترجمة والتأليف والنشر – هيئة الطاقة الذرّية السورية – دمشق – ص. ب 6091

مع بيانٍ يوضح عنوان المراسلة المفضل

أو تدفع مباشرة إلى مكتب الترجمة والتأليف والنشر في الهيئة – دمشق – المزة – شارع الخنساء – رقم 10

سعر العدد الواحد

سورية 50 ل.س / لبنان 3000 ل.ل / الأردن 2 دينار / مصر 3 جنيه / الجزائر 100 دينار / السعودية 10 ريال و6 دولارات في البلدان الأخرى.

تود مجلة عالم الذرّة إعلام الشركات والمؤسسات العاملة في قطاع التجهيزات العلمية والمخبرية كافة والصناعات المتعلقة بها عن فتح باب الإعلان التجاري فيها.

للمزيد من الاستفسار حول رغبتكم بنشر إعلاناتكم التجارية الكتابة إلينا على العنوان التالي:

هيئة الطاقة الذرّية السورية – مكتب الترجمة والتأليف والنشر

دمشق ص.ب6091 – الجمهورية العربية السورية

أو الاتصال على رقم الهاتف6111926/7 – فاكس 6112289

المقالات

- ولادة الليزر. . . . . فيليب هيل. 9
- مبدأ الليزر. . . . . جين كورنيو 15
  ترجمة مكتب الترجمة والتأليف والنشر
- ليزرات ما تحت الأحمر الغازية تغطي طيفاً عريضاً. . . . . جِف هخت 18
  ترجمة هيئة التحرير
- الأطوار الثلاثة لليزرات: الحالة الصلبة والسائلة والغازية. . . . . توماس ف. هيغنس 23
  ترجمة الدكتور محمد درغام زيدان
- عالم الديود الليزري الأسرع والأرخص والأصغر. . . . . توماس ف. هيغنس. 29
  ترجمة الدكتور شريف الحواط
- ديودات الليزر تنير الأقراص والاتصالات وعالم الطابعات. . . . . إيرك ي. ليرنر. 35
  ترجمة الدكتور حسن حمادة
- ديودات البوليميرات. . . . . ريتشارد فرند وآخرون. 40
  ترجمة هيئة التحرير
- ليزر نصف ناقل ثنائي الاتجاه . . . . . كلير جماشل وأخرون 47
  ترجمة هيئة التحرير
- الليزرات والضوئيات . . . . . فالِري جاميسون. 52
  ترجمة هيئة التحرير
- ليزرات الشلال الكمومي . . . . . فِدريكو كاباسو. 54
  ترجمة هيئة التحرير
- الديودات الليزرية الزرقاء–فوق البنفسجية: آخر ما تم التوصل إليه . . . إريك تورنيه. 63
  ترجمة الدكتور بسام المعصراني
- الوسم بالليزر. . . . . ريك ستيفنسون. 70
  ترجمة الدكتور محمد بهاء الصوص
- ليزرات صلبة تُضخّ بالديودات لفصل النظائر . . . . . بيرر–إيف ترو وآخرون 73
  ترجمة هيئة التحرير
- ليزر بخار النحاس ومصفوفة 3500 ترانزستور موسفِت: . . . . . د. شاترو. 78
  وثوقية في العمل
  ترجمة مكتب الترجمة والتأليف والنشر
- إغناء اليورانيوم بالليزر: طريقة سيلفا . . . . . آلكس روزنكارد، فيليب إلياس. 83
  ترجمة هيئة التحرير
- استخدام الليزر فمتوثانية في الصناعة. . . . . إريك اودوار. 88
  ترجمة هيئة التحرير

□ البصريات الطبية الحيوية. . . . . .بول فرنتش. 92
ترجمة هيئة التحرير
□ نبضات ليزرية تضغط المادة: تمثيل أعماق الكواكب في المختبر. . . . . ميشيل كوينغ وآخرون. 99
ترجمة الدكتور محمد بهاء الصوص
□ الليزرة في الأجواف المكروية المتشكلة في البلّورات الفوتونية. . . . . .بربارة غوص ليفي. 104
ترجمة هيئة التحرير

أخبار علمية

1 – من ديودات الليزر إلى الشلالات الكمومية. 109
2 – طريقة أرخص لفصل النظائر 110
3 – البحث من أجل حواسيب كمومية. 111
4 – الفيزياء النووية بالليزرات. 113

ملخصات باللغة الإنكليزية عن الموضوعات المنشورة في هذا العدد. 124

يُسمح بالنسخ والنقل عن هذه المجلة للاستخدام الشخصي بشرط الإشارة إلى المرجع، أما النسخ والنقل لأهداف تجارية فغير مسموح به إلا بموافقة خطية مسبقة من الهيئة.

المقالات

ولادة الليزر*

فيليب هيل

ملخص

إن تطور العلم والتقانة مرتبط بشكل وثيق بالناس، وهو ينبع من التآثر المتبادل والحافز المشترك فيما بينهما. فلم يولد الليزر من فكرة معزولة بل من بيئة علمية مُجِبة للاستطلاع ذات فضول علمي ومفعمة بالمنافسات.

يروي شارلز هـ. تاونز Charles H Townes فيمايلي قصة ولادة الليزر.

الكلمات المفتاحية: قصة الليزر، منظومةالرادار، الميزر، أطوال موجية قصيرة، إصدارمحثوث، ليزر الياقوت، ليزر الهليوم نيون.

ربما يستطيع المرء القول، بالرغم من صعوبة تحديد متى بدأ التطور، أنه في سنة 1945 تقريباً باشر الفيزيائيون في المسار الذي أوصل إلى الليزر. وباستعادة واستعراض الأحداث الماضية يبدو غريباً أن اختراع الليزر قد أخذ وقتاً طويلاً، فربما كان يمكن اختراعه قبل ثلاثين عاماً. فقد تبين أنه يمكن صنع الليزر من كل شيء تقريباً. وأراد آرثر سكاولو A. Schawlow، الذي لعب دوراً أساسياً في هذه القصة، توضيح وإثبات هذه النقطة فيما بعد بإيجاد أشعة ليزر يمكن أكلها، وذلك بخلط جلاتين مع صباغ مفلّور وقد عملت بصورة جيدة.

في عام 1939 ، انضممت إلى مختبرات بل Bell في مدينة كالتش Caltech لمتابعة دراسة الدكتوراه في مجال مطيافية الأمواج المكروية. ولكنني في عام 1940 انسحبت من العمل في الفيزياء الأساسية لأركز على منظومات الرادار وخصوصاً ذات طول الموجة 1.25 سم سيما أن الحرب العالمية الثانية وشيكة الحدوث. إن غاز النشادر شديد الامتصاص عند طول الموجة المذكور وهذا مادفعني للتفكير أن بعض المطيافية الجزيئية المحددة جداً تصبح ممكنة في الغازات المخلخلة بواسطة هزّازات الرادار.

الميزرات والليزرات

بعد الحرب كتبت لمخابر بِل تقريراً أوجزت فيه الطرق التي يمكن أن تطبّق فيها مطيافية الأمواج المكروية والتجاوب الجزيئي لكشف الإشارة والتحكم بالطور وبالتوهين وما إلى ذلك. وراودتني في عقلي فكرة أنه في الضغط المنخفض جداً يجب أن تكون عروض الخطوط الطيفية ضيقة إلى أبعد درجة، إضافة إلى اقتراح أن يكون الخط 1.25 سم لغاز النشادر أساساً لمعيار تواتر دقيق – وهو ماندعوه حالياً الساعة الذرّية.

لايوجد في تقريري ما يستدل به عن الميزر أو الليزر. في الواقع لاحظت في عرض القانون الثاني في الترموديناميك أن توليد أمواج قصيرة شديدة باستخدام الجزيئات غير عملي لأن ذلك ينطوي على درجات حرارة تسبب انفصال الجزيئات إلى ذرات مستقلة. غير أن عدد الطرق الممكنة التي يمكن أن تقود إلى تقانات مفيدة باستخدام مطيافية الأمواج المكروية، قد أقنعت مخابر بِل بمتابعة عملي في المشروع.

في عام 1948 انضممت إلى جامعة كولومبيا كأستاذ مساعد، وفي هذا الوقت زارني هـ. سكولز H. Schulz، الكيميائي في اتحاد الكربيد Union Carbide، حاملاً فكرة توليد تفاعلات جزيئية خاصة جداً بواسطة أشعة تحت الحمراء بطول أقصر من 1 ملم. فلقد لاحظ سكولز أنه بتوليف جيد يمكن للأشعة تحت الحمراء إثارة بعض الجزيئات بطريقة معينة بدون إحداث أية تغيرات مباشرة فيها، وهذا التبدل الانتقائي في طاقات الجزيئات المتفاعلة يوفر طريقة جديدة للتحكم بالتفاعلات الكيميائية. وهو بذلك يأمل أنه في خليط من الجزيئات المتفاعلة، يمكن للأشعة تحت الحمراء تحقيق تسريع انتقائي لبعض التفاعلات المختارة. من ناحية المبدأ الفكرة ممكنة، بيد أن مصادر الأشعة تحت الحمراء ذات الشدات الملائمة غير متوفرة.

وعندما قدّم اتحاد الكربيد عرضاً لتمويل أي شخص بـ 10 000$ لإنتاج مثل هذا الإشعاع – علماً أن هذا المبلغ أكثر مما يمكن أن يحصل عليه عالم مثلي لقاء عمله طوال العام – أخبرت سكولز أنه ما من طريقة مباشرة لإنتاج مثل هذا الإشعاع وأن قبول هذا التمويل بمثابة خداع بالنسبة لي. ومع ذلك فقد أعطاني التمويل الذي كان يجدَّد سنوياً طالما كنت مستمراً في جامعة كولومبيا، استخدمت نصفه لتغطية تكاليف منحة لدكتور مساعد شاب يعمل معي في المشروع – آرثر سكاولو، والنصف الآخر على المعدّات.

أطوال موجات أقصر

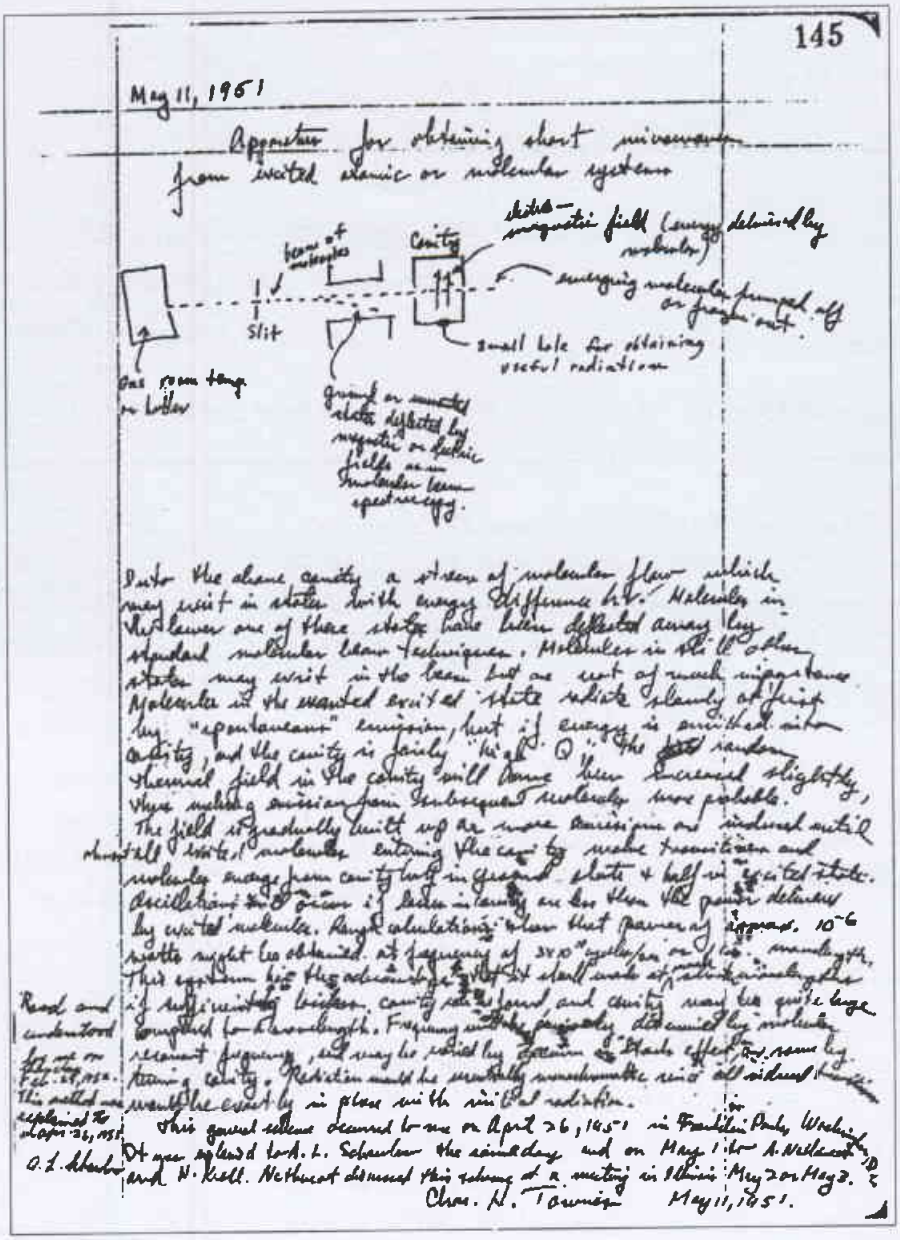
في ذلك الوقت كانت البحرية الأمريكية مهتمة في توليد موجات بأطوال من فئة المليمتر، وكنت بدوري أتابع بعناد مشروعي في توليد أمواج أقصر فأقصر لأنها تتفاعل مع الذرات والجزيئات بصورة أقوى، مع ثقتي الكبيرة أنها ستقودنا إلى مطيافية أكثر نجاحاً.

عقد اجتماع للبحرية في نيسان 1951 في ضواحي مدينة واشنطن والذي تزامن مع اجتماع للجمعية الفيزيائية الأمريكية. حضر سكاولو لتقديم ورقة بحث. وهكذا وتوفيراً للمصاريف تشاركنا غرفة في فندق Franklin Park. حينها أحسست أن عمر اللجنة المفيد قارب على

---

* نشر هذا المقال في مجلة *Opto & Laser Europe*, December 1999.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية



غلاف لدفتر ملاحظات: وضع ش . تاونز في عام 1951، أول وصف لميزر يعمل بالإضافة إلى تصريح شاهد هو أ. سكاولو يشير المخطط أنه لتحقيق الاختراع تمت الاستعانة بمبادىء مطيافية الحزمة الجزيئية، مجال بعيد جداً عن أية أفكار بدهية عن كيفية ولادة الليزر.

الانتهاء، وكنت و زملائي محبطين من القائمة الضئيلة نسبياً بالأفكار والتوصيات الجديدة التي قدمناها.

كنت استيقظ باكراً بعد الفجر بقليل، وكي لا أزعج سكاولو أنسلّ من الغرفة واستمتع بنزهة صباحية مبكرة، وفي حديقة الفندق المهجورة أقلّب المشكلة في عقلي: لماذا لانصل إلى نتيجة؟.

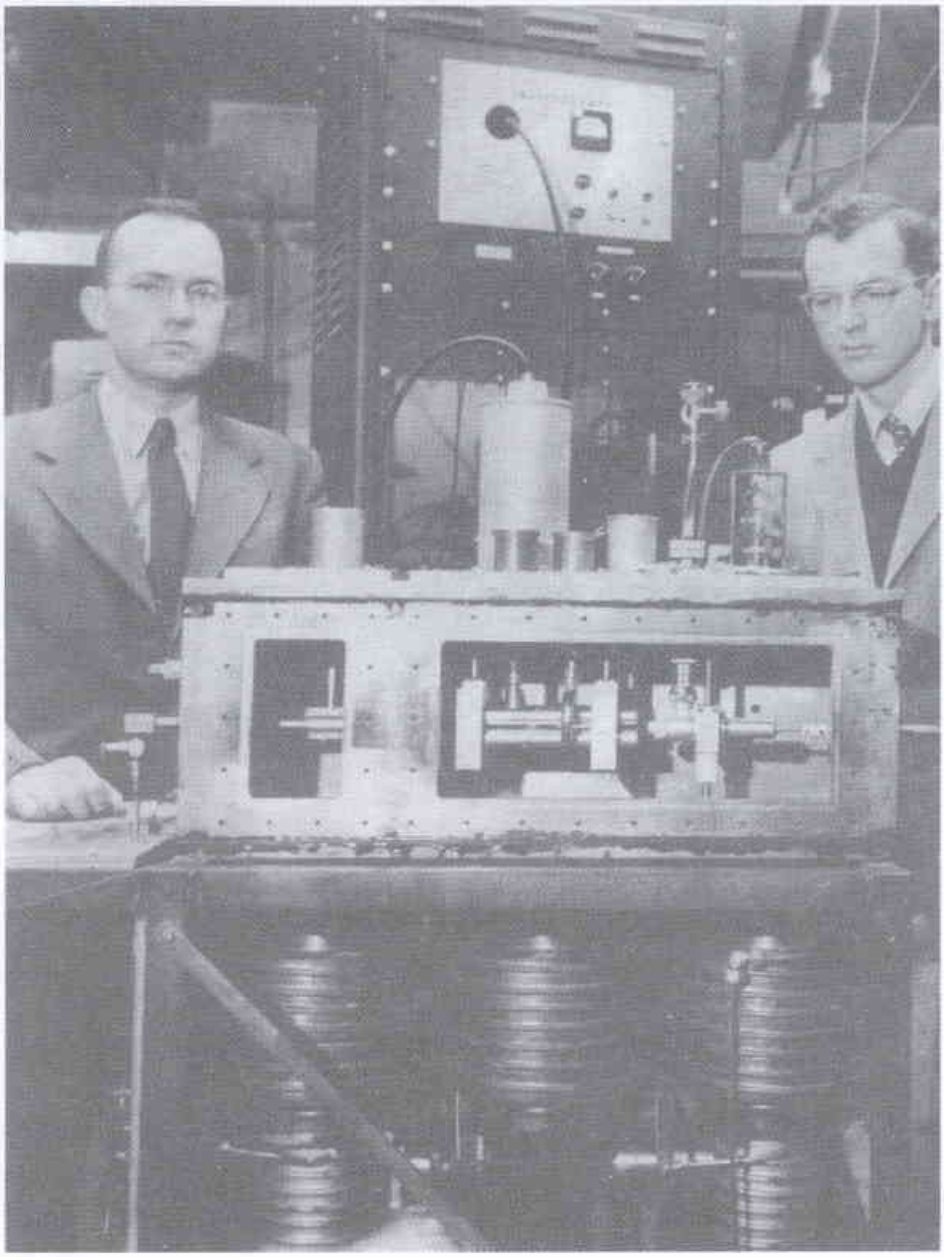
كانت أفكاري تنساق إلى مجال مريح ومألوف بالنسبة لي وهو الآليات الفيزيائية التي تستلزم أجساماً صلبة أو جزيئات - وخصوصاً الجزيئات - مثل النشادر - والتي كرستُ لها الكثير من حياتي العملية. كما تأملت فكرة الاستعاضة عن صنع مجاوبات صغيرة جداً بضرورة استخدام التجاوبات الجزيئية التي توفرها لنا الطبيعة.

التوازن الحراري

تبادر إلى ذهني الجدال المعتاد حول عدم إمكانية تنفيذ ذلك: وذلك لأن أية مجموعة من الجزيئات ستمتصّ طاقة أكثر مما ستنشر، عملاً بالقانون الثاني للترموديناميك. إن الإشعاع قادر، حتى في الغاز البارد، على تحفيز الذرة المُثارة أو الجزيء لإطلاق فوتونات في تواتر يماثل تواتر المحفز، وهكذا تتعزّز وتقوى الإشارة. ولكن إذا تمت العملية في توازن حراري فسيكون الإشعاع هو الخاسر في المحصلة - حيث ستمتص المادة فوتونات أكثر مما ستتخلى عنه.

لايمكنني إعادة ترتيب سلسلة الأفكار التي دفعتني لتجاوز المشكلة ولكنني أجزم أن الإلهام الرئيسي جاءني بغتةً. فالقانون الثاني يفترض توازناً حرارياً ولكنه ليس ضرورياً للتطبيق، فهنالك طريقة للتحايل على الطبيعة. حيث لا يشكل جعل كل المنظومات في وضع التوزان الحراري مطلباً لايمكن تجاوزه. فإذا كانت مجموعة مؤلفة كلياً من جزيئات مثارة، عندها من ناحية المبدأ لايوجد حدّ لكمية الطاقة التي يمكن إحرازها. كلما ازدادت كثافة الذرات أو الجزيئات المثارة وازدادت المسافة التي تجتازها موجة الإشعاع خلال هذه الذرات أو الجزيئات، ازداد عدد الفوتونات التي تلتقطها موجة الإشعاع وبالتالي أصبحت هذه أقوى.

وهنا ظهر السؤال عن كيفية تحقيق عدم التوازن للتركيب، وكانت الأجوبة أمامي وأمام جماعة الفيزيائيين لعدة لعقود. فلقد عالج زميلي من نفس الجامعة أي. رابي تيارات من الغازات وذلك بحرف الذرات من الحالات ذات الطاقة المنخفضة إلى الحالات المثارة. وكانت النتيجة عبارة عن حزمة غنية بالذرات المثارة. كما اقترح ن. رامسي Norman Ramsay و إ. بورسل Ed Purcell من جامعة هارفرد اسماً لوصف حالة الإسكان المعكوس هذه "الحرارة السالبة".



تُظهِر الصورة تاونز (في الجهة اليسارية) و ج. غوردن Jim Gordon في جامعة كولومبيا عام 1954 مع ثاني ميزر عامل، وهو في جوهره نبيطة مطابقة للجهاز الأول، تم تركيبه بعد فترة وجيزة لفحص نقاء إشارات الميزر وذلك بجعل الجهازين يعملان معاً لإنتاج إشارة صافية مسموعة

لابد أنها وسيلة مبتذلة وعادية للكاتب المسرحي أن يخربش أفكاره على ظهر ظرف، ولكن هذا ما فعلت. فلقد عرفت كم عدد الجزيئات التي يحتاجها صنع هزّار قادر على إنتاج وتضخيم أمواج مليمترية أو تحت المليمترية، فكل الأرقام المطلوبة عن صديقي جزيء النشادر موجودة في عقلي. وتبين لي مباشرة احتياجنا لمجاوب دون الحاجة إلى ضخ طاقة كهرطيسية خلاله، حيث يكفي إرسال تيار من الجزيئات المثارة خلاله ليقوم بالعمل، ذلك أنه بعد كسر عتبة معينة لاتكتفي الموجة بالمحافظة على ذاتها مرتدّة جيئة وذهاباً، بل تكتسب أيضاً طاقة عند كل مرور.

عقود من الأفكار القديمة

سمعت قبل شهر مضى فيزيائياً ألمانياً، و. باول W. Paul، يصف طريقة جديدة لتبئير الحزم الجزيئية بحقل رباعي الأقطاب بصورة أفضل من المنظومة التي اقترحها رابي. وبينما كنت جالساً على مقعد في الحديقة، قمت بحساب كم سيكون فقْد التجويف المجاوِب في الوقت الذي لاتزال فيه اهتزازات مولَّدة بحزمة من النشادر مبأرة بطريقة باول. إذن يمكن تطبيق الفكرة باستخدام النشادر.

وأعلم أيضاً أن الإشارة ستكون مترابطة، وستحافظ موجة المجاوبة على نفسها تماماً في الطور وبتواتر ثابت تقريباً.

وضعت الظرف في جيبي، وفي الفندق أخبرت سكاولو ما فكرت به، فما كان منه إلا أن قال: "كم هذا مشوِّق" ولكن بدا أنه متأثر قليلاً فقط. مما دعاني للتفكير ملياً بأن ذلك ممكن من ناحية المبدأ، ولكن هل من الممكن جعلها تعمل؟

ما أن عدت إلى جامعة كولومبيا قمت بالتحقق من الأساسيات، واتضح أن ملاحظاتي موجودة مسبقاً في المقرر التعليمي المقرر في ميكانيك الكم والذي درسته في كالتِش عام 1939 . وبالفعل فقد أظهرت المعادلات بوضوح أن الإصدار المحثوث للإشعاع سمح بالتضخيم، وينتج في الواقع إشارة على توافق في الطور أو مترابطة. فالمبادىء كانت موجودة مسبقاً في المنهاج الذي دُرّس قبل الحرب للطلاب المتخرجين. كما توجد أمثلة أخرى على هذا الموضوع تعود إلى عام 1917 عن أبحاث العالم ألبرت أينشتاين A. Einstein.

وهكذا راجت أفكار عديدة حول الإصدار المحثوث بيد أنها لم تتابع، فعلى الرغم من استيعاب الخواص الفيزيائية الرئيسية لم يأتِ أحدهم بأية فكرة مفيدة.

لقد بدا واضحاً أن دراسة أطياف الموجة المكروية للجزيئات هو العامل المحفِّز الأساسي لدمج الأفكار المتعددة الضرورية من أجل التوصل إلى تضخيم عملي، وذلك لاقتران المهارات والمبادىء المطلوبة - الناتجة من اتحاد الخبرة العملية في هندسة الأمواج المكروية والنبائط - مع الاعتياد على تأثيرات ميكانيك الكم.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

قررت خلال عملي مع الطالب المتخرج ج. غوردن، البدء في منطقة الأمواج المكروية النظامية بما أننا نمتلك الخبرة والمعدات المطلوبة لذلك، وبعدها يمكننا العمل على هدفنا نحو الأطوال الموجيّة الأقصر.

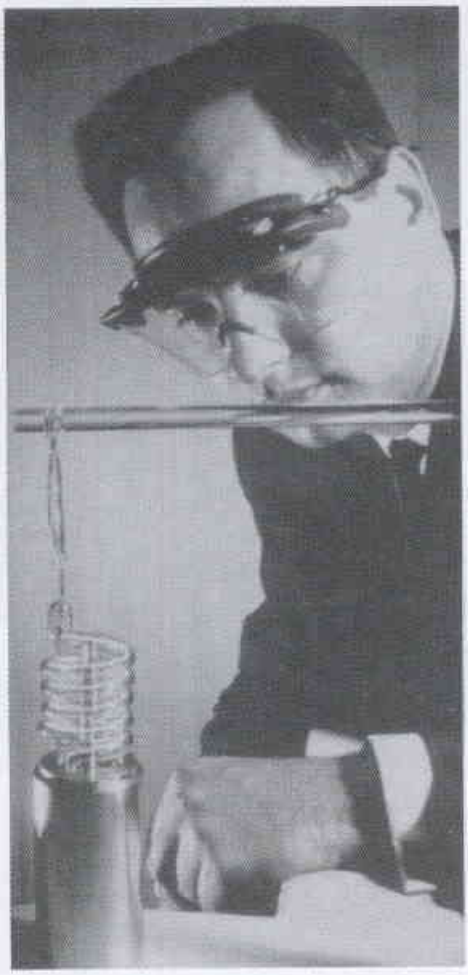
بدايةً وضعنا نصب أعيننا الانتقالات 1.25سم الأقوى لغاز النشادر وهو نفس مجال طول الموجة الذي عملنا عليه للرادار وقت الحرب والذي تاقت القوات المسلحة لاستخدامه.

سرعة متأنية

أنه لمن المضحك اليوم التفكير في سهولة بناء مُضخّم جزيئي أو ذرّي، مع أنه لم يَبدُ بهذه السهولة في البداية. فالمشروع كان أطروحة طالب ولذلك لم يتم تنفيذه بسرعة كبيرة: فقد تطلّب بناء المعدات وإجراء التعديلات والتحسينات عليها ما يزيد عن العامين.

قمنا في التجربة الأولى بإرسال حزمة جزيئية من أحد طرفي التجويف إلى الآخر. يمكن أن يَحدث التضخيم في الأمواج المكروية المنعكسة جيئة وذهاباً عبر التجويف بزيادة أو نقصان بزوايا قائمة مع اتجاه التدفق. لقد شعرنا أصلاً بضرورة جعل التجويف كله منغلقاً بقدر المستطاع، ولكن هذا يتضارب مع آلية إدخال وإخراج الجزيئات. فإذا كانت ثقوب التجويف التي تسمح بمرور الجزيئات عبرها كبيرة جداً، يمكن للإشعاع التجاوبي التسرب خارجاً بسرعة أكبر من تلك اللازمة لبنائه. وكان الحل، عند التوصل إليه، بسيطاً: وذلك بإزالة الأطراف تقريباً كلياً. وهكذا بدون أطراف يمكننا الحصول على الكثير من الجزيئات عبر التجويف، كما يصبح نمط الإشعاع في التجويف أكثر سهولة ومحتجزاً بفعالية أكبر.

خلال حلقة دراسية انعقدت في نيسان من عام 1954 ، دخل علينا ج. غوردن مندفعاً بقوة، فقد كان المضخّم 1.25 سم يعمل. أوقفنا الحلقة واندفعنا إلى المخبر لنشهد الحدث ونحتفل. وبعد فترة من الزمن اعتمدنا لفظة "ميزر" maser – المأخوذة من الأحرف الأولى – للتدليل على تضخيم الأمواج المكروية بواسطة الإصدار المحثوث للإشعاع Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation.



تظهر الصورة تيديمان T. Maiman في مخبر الأبحاث Hughes وأول جهاز ليزر ياقوتي في الصورة المشهورة التي ظهرت في الصفحة الأولى من صحيفة New York Times في عدد 8 / 7 / 1960. علماً أن الصورة تظهر البلّورة الياقوتية الخطأ، فالبلّورة الظاهرة هنا أطول بكثير. الوصف الذي نشر في عدد 7 آب من مجلة Nature يظهر أن البلّورة بطول 1سم.

وأوضح ميمان فيما بعد أن المصور، من قسم العلاقات العامة في Hughes، اعتقد أن بلّورة ميمان الياقوتية غير مناسبة فنياً ووضع بدلاً عنها بلّورة ياقوتية أكبر وأكثر ملاءمة. ومع ذلك فقد أنتج المخبر الفعّالية الليزرية من البلورة الياقوتية الأكبر وأصبحت التصميم السائد والشائع.

إنكار وشك

قَبل نجاح عمل الميزر لا بل بَعدَه أيضاً قوبل وصفنا لطبيعة أدائه بالإنكار من قِبل العديد من الفيزيائيين المعتبرين، مع العلم أن عمله لا ينطوي على أية مبادىء فيزيائية جديدة. فمثلاً أخبرني عالِم الفيزياء النظرية المعروف من جامعة كولومبيا ل. توماس L.Thomas بصراحة أن الميزر غير قادر، بالاعتماد على القوانين الفيزيائية الأساسية، على تحقيق تواتر نقي بالأداء الذي وصفته. لقد كان واثقاً لدرجة أنه رفض الاستماع إلى توضيحي. وبعد أن اشتغل الميزر بنجاح وقف متحدثاً إلي بشكل عام. ولدى زيارة نيلز بور N. Bohr – من الأوائل في ميكانيك الكم في الدانمارك – قال متعجباً "ولكن هذا غير ممكن".

وفي حفلة كوكتيل في ولاية نيوجيرسي صرّح العالم الرياضي الهنغاري John von Neumann "لا يمكن أن يكون ذلك صحيحاً. كانت هذه الاعتراضات والرفض مبنية على مبدأ – مبدأ الارتياب – وهو العقيدة الأساسية في ميكانيك الكم. وهكذا فإن أداء الميزر لم يكن يُشكّل أي معنى خصوصاً للفيزيائيين المنغمسين في مبدأ الارتياب. فالجزيئات تستهلك وقتاً قصيراً جداً – مايعادل عشرة من ألف جزء من الثانية – في تجويف الميزر وهو ما يبدو مستحيلاً لتحديد التواتر بدقة.

ومن ناحية أخرى، فإن مبدأ الارتياب كما يفهمه المتزمتون لا يمكن تطبيقه. حيث لا يُعلم الميزر شيئاً عن الطاقة أو التواتر لأي جزيء معين بشكل محدد واضح. فكل جزيء يبقى مجهولاً. ويمثل الإشعاع في ميزر هزّاز وسطيّ عددٍ كبيرٍ من الجزيئات العاملة مع بعضها.

إصدار محثوث

أما المهندسون، الذين لاتتطلب مهامهم مواجهة مثل هذه المواضيع، التي لا تفهمها سوى مجموعة قليلة، ومنها مبدأ الارتياب، لايواجهون مشكلة في استيعاب التواتر المحدَّد للميزر. فهم في تعامل مستمر مع الهزّازات والتجاويف المنتجة لتواترات محددة تماماً. والنقطة التي لم يألفوها هي الإصدار المحثوث. وهكذا فإن ولادة الميزر تطلبت اتحاد الموهبة الطبيعية والمعرفة في مجالَي الهندسة والفيزياء معاً.

يبدو أن الفيزيائيين العاملين في مجال الأمواج المكروية، والمطيافية الراديوية الذي يتطلب مهارات في الهندسة إضافة إلى الفيزياء، يمتلكون المعرفة اللازمة لتقدير وفهم الميزر مباشرة.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

ماذا يريد مخططو الأبحاث الذين يأملون في المزيد من الضوء الشديد في البدء لدى دراسة الجزيئات بالأمواج المكروية؟، والصناعيون المتشوقون إلى نبائط قطع لحام جديدة؟! والأطباء الباحثون عن معدات جراحية جديدة - كالليزر - في تشجيع دراسة مطيافية الأمواج المكروية؟ تكمن الإجابة في أن مجال الإلكترونيات الكمومية في مجمله يشبه أنموذجاً للكتاب المدرسي عن التقانة الممكن تطبيقها بشكل واسع علماً أنها نتجت بشكل غير متوقع من البحث الأساسي.

القبول: الطريق نحو الليزر

في أواخر الخمسينيات من هذا القرن وبعد إيجاد الميزر على أرض الواقع، انهال العديد من ورقات البحوث حول الميزر على مجلة The Physical Review، العديد منها تأملية وافتراضية الأمر الذي حذا بالمحررين إلى إصدار تعليق للنشر حول الميزر، وكانت هذه المرة الأولى التي تقوم فيها المجلة بمثل هذا الفعل. في الواقع كان الميزر شائعاً لدرجة أن طرفة شاعت عنه كونه: " وسيلة لاكتساب الدعم لبحث باهظ ومكلف".

ومع نهاية فصل الصيف من عام 1957، تملّكني الشعور بأن الوقت قد حان للعمل على الهدف الأساسي الذي أنشأ فكرة الميزر: هزّازات تعمل على أطوال موجية أقصر من 1سم.

كان الاتجاه الواضح لتقصير أطوال الأمواج خفض مستوى الميزر. ولكن، في تجويف أصغر، يمكن لجزيئات أقل العبور مستغرقة وقتاً أقصر. وهذا يجعل الاهتزاز قريباً من الحواف ويمنع تصغير أطوال الأمواج بدرجات كبيرة.

خلال السنوات الماضية كان تشاؤمي قائماً على حقيقة أن معدل طاقة الإشعاع المنطلقة من الجزيء يزداد مع القوة الرابعة للتواتر. ويتطلب الحفاظ على الإلكترونات أو الجزئيات مثارة حتى طول موجة مقداره 0.1 mm بدلاً من 1 cm، زيادة استطاعة الضخ لعدة مراتب.

وبينما كنت أتلاعب في تنوع الانتقالات الذرية والجزيئية الممكنة، وطرائق إثارتها والقوانين الرياضية المحددة لعمل الميزر، بدا لي فجأة وضوح ما أصبح معروفاً اليوم: أنه من السهولة بمكان بل وربما من الأسهل الحصول حقاً على أطوال أمواج قصيرة - حتى مجال الأشعة تحت الحمراء القصيرة أو حتى الأشعة الضوئية المرئية - توازي في سهولتها النزول درجة صغيرة كل مرة. كان ذلك بمثابة الوحي - مثل التوجّه عبر باب إلى غرفة لم أتوقع وجودها أصلاً.

حذف أنماط

لم تُظهِر هذه الطريقة أية مخالفة من جزاء القفز إلى أطوال أمواج أقصر، بل قدمت مزايا كبيرة. والدافع المغري الأساسي وجود الخبرة والمعدات اللازمة خاصة في المجال القريب من الأشعة تحت الحمراء والمجال المرئي. ومن جهة أخرى كانت الأطوال الموجية القريبة من 0.1 cm والتقنيات المسخّرة لها غير معروفة نسبياً. لهذا كان الوقت ملائماً لاتخاذ خطوة كبيرة في هذا المجال.

في ذلك الوقت كنت مستشاراً لمخابر بل التي يعمل فيها أيضاً سكاولو. لم نتناقش فقط في مجال عمله الحالي في الناقلية، بل أخبرته عما يجول في خاطري عن الميزر البصري، ولقد كان متحمساً جداً كون أفكاره تتجه في هذا المنحى أيضاً. تحدثنا عن مشكلة التجويف. لقد كنت أفكر من تجويف مغلق بإحكام تقريباً مع مرآتين على طرفيه وثقوب في الحواف كبيرة كفاية لضخ الطاقة عبر الغاز وخنق بعض الاتجاهات فترتد عنها الأمواج.

اقترح سكاولو أن نستخدم صفيحتين فقط - مرآتين بسيطتين فقط - وترك كل الحواف طليقة. إن هذه الترتيبات التي تعتمد على مرايا متوازية في علم الضوئيات، بالرغم من استخدامها في أغراض مختلفة وأبعاد مختلفة إلى حد ما، تدعى مقاييس التداخل Fabry-Perot - فالتصميم الأساسي معروف. قبل بضع سنوات مضت كان لدي طالب يعمل على نظام Fabry-Perot للأمواج المكروية. والآن يبدو لي من الصعب فهم عدم وصولي إلى هذه الفكرة في المنظومة الضوئية ولكنني لم أفعل ذلك، بعكس سكاولو، ربما لمعرفته في Fabry-Perot المكتسبة من عمله النظري السابق.

عندما أنهيت تدريبي كطالب متخرج، كان مجال البصريات يعتبر مفهوماً تماماً ومنتهياً - غير مثير للباحثين. وبعد أقل من 20 عاماً أعاد الليزر إحياءه من جديد.

فلقد رأى سكاولو أن العديد من الأنماط الاهتزازية التي تعتمد على الانعكاسات الداخلية ستحذف نفسها بنفسها بدون حواف وأي شيء يصطدم بإحدى المرآتين عند زاوية ما سيخرج من التجويف وبالتالي يختفي. والأنماط التي تبقى وتهتز هي فقط تلك التي تنعكس جيئة وذهاباً تماماً بين المرآتين.

اتفقت مع سكاولو على كتابة ورقة بحث مشتركة عن الميزر الضوئي. ولقد بدا واضحاً إمكانية بناء ميزر ضوئي، ولكن هذا يتطلب وقتاً. في حينها كان مجال العمل على الميزر نشيطاً فشعرت بضرورة نشر أفكارنا بالسرعة الممكنة خلافاً لسياستي في النشر لدى العمل على الميزر الأول حيث أجّلت النشر لمدة ثلاث سنوات حتى تمكّن ج. غوردن من صنع ميزر.

قررت قبلها أن حقوق براءة الاختراع المرافقة لورقة البحث ستصبح لصالح مخابر بل، وهكذا لم أخبر أحداً من خارج الشركة عن مشروعنا. وعندما أنهى المحامون براءة الاختراع لحماية أفكارنا، قمنا بتقديمها إلى مجلة Physical Review وتم نشرها في عدد 1958/12/15 . كان للورقة تأثيرها العميق على تطوير الليزر. وتداولت مسودات عنها في مخابر بل وفي كولومبيا، بينما كانت المطبوعات الرسمية بمثابة رصاصة البدء في سباق الليزر الكبير.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

ياقوت أحمر وردي صلب

ركزت الجهود الأولية على المواد ذات بُنى سويات طاقة معروفة عبر الأبحاث المطيافية. فقبل أن تنشر ورقتنا، كان ع. جافان A. Javan قد بدأ عمله حول ليزر غاز عنصر الهليوم في مخابر بِل، وكان باحثون آخرون في جامعة كولومبيا يتدارسون مشروع أبخرة البوتاسيوم الذي ناقشناه في ورقتنا.

اقترح مكتب أبحاث نافال Naval Research في عام 1959، أن أترأس مؤتمر حول الميزر وكانت هذه الخطوة الأولى في سلسلة طويلة من لقاءات دولية حول الإلكترونيات الكمومية مع 100 شخص مختص ومهتم من أصل حوالي 7000 شخص قابلتهم مؤخراً.

وفي اليوم الأخير من المؤتمر توصل سكاولو إلى أن الياقوت الأحمر الوردي الصلب لا يشكل مادة ليزرية مناسبة تماماً وذلك لأن سوية الحالة الأخفض له كانت أيضاً الحالة الأساسية مما يجعل عكس الطاقة صعباً، مفضلاً الياقوت الداكن. ولدى سماعه ذلك، خالفه الرأي ميمان من مخابر Hughes للأبحاث، وبدأ بناء ليزر بياقوت أحمر وردي. وخلال بضعة أشهر تمكن من توضيح أنه في السوية المنخفضة للطاقة سيفرغ على الأقل بشكل جزئي وذلك عن طريق الإثارة بالضوء الشديد.

وفي 16 أيار 1960 أشعل ميمان ، في مخابر Hughes – مدينة كولفر، ولاية كاليفورنيا، أول مصباح ومضي كامل الذي غلفه ولفّه ببلّورة ياقوتية بعرض 1سم وطول 1.5 سم. كان هذا أول جهاز ليزر. وهكذا كان دليل نجاحه نوعاً ما غير مباشر، فلا يوجد أية بقعة ضوء على الحائط أو أي شيء واضح. من ناحية ثانية أظهرت المعدات تغيراً جوهرياً في طيف فلورة الياقوت: فقد أصبح أضيق بكثير، فهو في الواقع جهاز ليزري نابض. وبعد وقت قصير، أثبتت مجموعة سكاولو و Hughes في مخابر بِل، كل على حدة، إمكانية تشكيل ومضات قوية للضوء الموجّه على الحائط.

ش. تاونز وهو مخترع الميزر، ساعد في اختراع الليزر. وحاز على جائزة نوبل لعام 1964 لإسهاماته في تحقيق الميزرات والليزرات . كما أنه أستاذ جامعي في مدرسة المتخرجين – جامعة كاليفورنيا – مقاطعة بركلي.

ورقة بحث أخرى عن الميزر

إن نجاح ميمان غير قابل للنقاش والجدال، ولكنه اصطدم بمشاكل مباشرة: فالمجلة الحديثة حينها Physical Review Letters رفضت نشر تقريره "ميزر ضوئي " لأنه " مجرد ورقة بحث أخرى عن الميزر". بعدها مباشرة أسرع في كتابة تقرير موجز مؤلف من 300 كلمة والذي قبل للنشر في مجلة Nature عدد 6 آب 1960 في المملكة المتحدة.

بينما كان الليزر الياقوتي في خطواته الأولى، تفجرت أنواع وطرائق لليزر. كانت المرحلة الثانية من العمل تنطوي على نوعين آخرين من منظومة الحالة الصلبة، تبعهما مباشرة ليزر غاز الهليوم الذي حققه جافان.

ومن الجدير بالملاحظة أن معظم أجهزة الليزر تم بناؤها – في البداية – في مخابر صناعية، والسبب الأكبر في ذلك يرجع إلى أن المخابر يمكنها – أكثر من الجامعة– استغلال مصادر وحشد جهود كثيرة في مواجهة أية مشكلة. أضف إلى ذلك أن اختراع وبناء أجهزة الليزر الأولى تمّ على يد علماء شبان وظفوا مباشرة بعد تحقيق أبحاث جامعية في مجال الأمواج المكروية و المطيافية الإشعاعية.

بالنسبة لي شارف عملي في مجال الليزر على النهاية، ولم أستطع تحديد أن المشاكل المتعلقة ببراءة الاختراع وقضايا في المحاكم، والتي فازت بها كلها مخابر بِل، كانت السبب في جعلي أستمر لسنوات في مجالي المهني متجاوزاً المرحلة الأولى لولادة الليزر.

تُرى كم من الوقت كان سيستغرق تطور الميزر والليزر لولا عملي المشترك مع سكاولو؟ أعتقد ما يتجاوز العقد من الزمن. ومع ذلك، فخلال مايزيد بقليل عن العقد بعد تحقيق أول ميزر من صنع الإنسان، عُرفت بعض أجهزة الميزر والليزر المستخدمة في الفضاء تحت مسار مختلف تماماً – علم الفلك الإشعاعي، أدى هذا المسار إلى اختراع الميزر ومن ثم الليزر.■

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

مبدأ الليزر*

ج. كورتيو
الشركة الصناعية للّيزرات (CILAS)، ماركوسّي - فرنسا

ملخص

تتألف كلمة الليزر LASER من الأحرف الأولى للعبارة باللغة الإنكليزية light amplification by stimulated emission of radiation" وتعني "تضخيم الضوء بالإصدار المحثوث للأشعة.

الليزر هو نوع من المنابع غير تقليدي، فهو لا يعمل كباقي المنظومات الإلكترونية النشِطة (الأنابيب المخلاة، الترانزستورات) بواسطة تفاعلات متبادلة بين حقول كهربائية مطبّقة وشحنات متحرّكة (الإلكترونات)، بل هو عبارة عن إصدار محثوث.

الكلمات المفتاحية: سويّات الطاقة، وسط نشِط، مرايا عاكسة، امتصاص، ذرات مُثارة، انعكاس سكاني، إصدار محثوث، فوتونات، إلكترونات، منابع ليزرية.

قبل ظهور الليزر، بكثير توصل آينشتاين عام 1917 إلى إثبات إمكانية الحصول على إصدار محثوث. ويمكننا أيضاً أن نذكر أعمال آ. كاستلر A. Kastler (1950) في الضخ الضوئي الذي لا يعمل بدونه أي ليزر جسم صلب، وكذلك أعمال فابري وبيرو على مقاييس التداخل ذات الموجات المتعددة، التي تُعَدّ قلب جميع التجاويف الليزرية.

ومن الناحية العملية وفي الحقبة ذاتها (منذ 1952)، تخيل باحثون من الولايات المتحدة: تاونز Townes،غوردن Gordon، زيغر Zeiger، وآخرون من الاتحاد السوفيتي: بازوف Basov وبروخوروف Prokhorov تجارب تضخيم محثوث على جزيئة الأمونياك (NH_3).

في عام 1957، قام أ. ل. شاولو Schawlow (الذي توفي في 28 نيسان الماضي)، وتاونز (وكلاهما يعمل في مختبرات بِل) بنشر أول مخطط من الليزر، ومن ثم أعلنا إمكانية صنع إشعاعات في المجال تحت الأحمر وفي اللامرئي، وحتى فيما وراء ذلك [1].

أما الليزرات الأولى فكانت: ليزر الجسم الصلب التحريضي الياقوتي [2] وبعده ليزر الغاز المستمر، وهو ليزر الهليوم - نيون [3].

المبادىء [4]

التوازن الترموديناميي

تقول النظرية الكمومية أن الإلكترونات في الذرّة لا يمكنها أن تتوضع حول النواة كيفما كان، بل تتبع مسارات دقيقة تتحكم بها الطاقات الإلكترونية التي تتعلق بطبيعة الوسط. وهذه المسارات الممكنة هي ما نسميه سويّات الطاقة (الشكل 1). وكلما كان هذا المسار بعيداً عن النواة، كانت الطاقة المقابلة مهمة.

إن توضّع هذه السويّات المختلفة للطاقة هو الصفة المميزة للذرة، ويمكن حسابه بدءاً من معرفة أعداده الكمومية.

ونسبة إلى السوية الأساسية، نُعبّر عن اختلاف الطاقة الموافقة كالتالي:

$$\Delta E = h\upsilon$$

حيث h هو ثابت بلانك، و υ هو تواتر الحقل الكهرطيسي. تُمثّل ΔE كمّ الطاقة، أي القيمة الصغرية لجميع التبادلات الطاقية: إنه الفوتون. مثل أي ظاهرة جيبية، يمكـن أن يرتبط تواتر الإشعاع بطوله الموجي λ بالعلاقة:

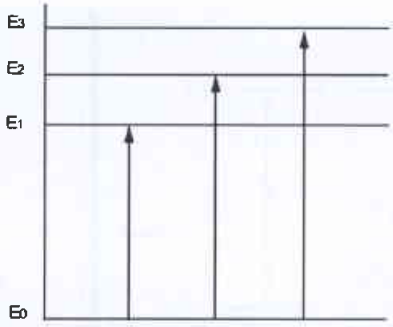
$$\lambda = c/\upsilon$$

حيث c سرعة الضوء.

في الحقيقة، إن سويّات الطاقة ليست بهذه السهولة. فهي مفككة إلى سويات فرعية بسبب التوسع الذي يحدث بصورة طبيعية، للأسباب التالية:

- أثر دوبلر،
- الضغط والتصادمات،
- الحقل المحيط، وعلى وجه الخصوص، الحقل البلّوري،
- التفاعلات المتبادلة مع الوسط أو بين الذرات النشطة،
- درجة الحرارة.

في حالة السكون، تسعى الإلكترونات إلى التجمّع حول النواة، تاركةً الأماكن الأبعد خالية. يجب جلب الطاقة إلى الذرة



الشكل 1- سويّات الطاقة.

* نشر هذا المقال في مجلة *Optique Et Photonique*, April 1999 - ترجمة مكتب الترجمة والتأليف والنشر - هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

لإبعاد إلكتروناتها إلى سويّات عليا، ونرى أن هذه الطاقة تصبح أكثر فأكثر كبيرة عندما نبتعد عن الأساس.

إن التوازن الطبيعي يتبع قانون بولتزمان المعبّر عنه بالعلاقة:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{KT}\right]$$

حيث N_1 و N_2 هما عددا الإلكترونات في السويتين E_1 و E_2. K هو ثابت بولتزمان، و T هي درجة الحرارة المطلقة للجسم.

عندما يكون الاختلاف بين هذه السويات كبيراً بحيث يتوافق التواتر υ للكمّ $h\upsilon$ مع طول موجة قريب من المجال المرئي، تكون السويّة العليا عملياً غير مشغولة بالإلكترونات، وتتركز كل الإلكترونات على السويّة المنخفضة المسماة الأساسية ($N_2/N_1 \approx 10^{-21}$ من أجل $\lambda = 1\mu m$).

الامتصاص

إذا تلقّت الذرة إشعاعاً طول موجته يوافق انتقالاً ممكناً، يتم امتصاص هذا الإشعاع. زد على ذلك أن تجارب الامتصاص في الغازات هي التي أتاحت فهم هذه الظواهر ووضع قوانين الضوئيات الكمومية.

تعتمد دينامية ظاهرة الامتصاص على التجمّع السكاني N_1 في السويّة المنخفضة وعلى الشدة $g(\upsilon)$ للحقل الموجود.

الإصدار التلقائي

يوصف الإصدار الطبيعي للأجسام بصيغة بلانك:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1}$$

حيث تُمثل $\rho(\upsilon)$ كثافة إشعاع الجسم الأسود، بوحدة مجال التواترات.

لنتأمل الآن حالة ذرة مثارة. بما أن الإلكترونات يجب أن تكون بشكل طبيعي أقرب ما يمكن من الحالة الأساسية، فمن الطبيعي أن نفكر أنه إذا توقف منبع الإثارة، فلن تبقى، هذه الإلكترونات على سويتها المُثارة. تتناسب سرعة التثبيط desexcitation مع التجمع السكاني للسوية العليا.

إن هذا الإصدار التلقائي تابع إحصائي للزمان والمكان. إذا تم إصدار فوتونات كثيرة بآن واحد، لن يكون هناك أي علاقة طورية بينها. ويقال بأنها غير مترابطة.

الإصدار المحثوث

رأينا أن امتصاص فوتون طول موجته λ، حيث $\lambda = hc/\Delta E$، يُحدث انتقال إلكترون واحد إلى السويّة العليا، الأمر الذي يتوافق مع إثارة الذرة المعنية. وإذا سقط فوتون له نفس طول الموجة على هذه الذرة المثارة، فإنه سيثبطها، وعندها يعود الإلكترون إلى حالته الأساسية، منتجاً فوتوناً آخر له نفس التابع الموجي الذي يملكه الفوتون الوارد. والإصدار هنا مترابط. وبعكس ما يحدث في حالة الإصدار التلقائي، يكون الإصدار المحثوث متناسباً مع الحقل $g(\upsilon)$.

شروط التضخيم

إذا كانت المنظومة متوازنة، تكون السويّات الأكثر انخفاضاً هي دائماً الأكثر اكتظاظاً بالسكان وإذا حسبنا الاختلاف بين تجمعات السويّة المنخفضة وتجمعات السويّة الواقعة فوقها تماماً وجدناه إيجابياً. وتصبح الاستجابة التحريضية عند وصول إشارة، امتصاصاً.

إذا اعتبرنا الآن أننا تمكنّا من إزاحة هذا التوازن وحشد السوية العليا إلى درجة تكون فيها تجمعاتها السكانية أعلى بشكل واضح من تجمعات السويّة المنخفضة، فإن وصول الإشارة نفسها سيحدث إصداراً محثوثاً. ويصبح ثمة تضخيم للإشارة الواردة. يدعى هذا الشرط الانعكاس السكاني.

وللحصول على التضخيم، وهو الخطوة الأولى نحو مفعول الليزر، ينبغي إذن أن نكون قد حققنا شرطين هما:

- تهيئة وسط نشيط (فعّال)،
- الحصول على انعكاس سكاني.

أنماط النقل من أجل الانتقالات الذرية

يجب التوصل إلى تخزين إلكترونات على السويّة العليا. وآلية التخزين هذه تحدث عملياً بعدة طرق مختلفة.

الضخ الضوئي

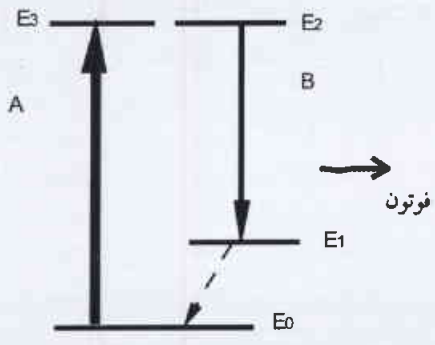
الضخ الضوئي هو إثارة الوسط النشيط بواسطة الضوء. إنها طريقة ضخ ليزرات الأجسام الصلبة [5]. وبشكل عام نميز منظومات بثلاث سويّات وأخرى بأربع سويّات.

الضخ الإلكتروني

يُستعمل هذا النمط من الضخ عادةً في ليزرات الغاز. وبما أن الغاز بالأساس عازل، ينبغي إرسال انفراغ لتأيين الوسط وجعله ناقلاً. وبعد ذلك نحصل على تيار بتطبيق حقل كهربائي بين إلكترودَين مغمورَين في الغاز. تتخلى الإلكترونات الجارية، عن طاقتها الحركية لذرات الوسط النشيط وتُحدِثُ الانعكاس السكاني المنشود.

إذن يحدث الانتقال غالباً بتصادم تجاوبي، لأننا بوجه عام نواجه مزيجاً من الغاز. والمبدأ مبيَّن في الشكل 2. تنتمي السويّة E_3 إلى الغاز الأول (A)، في حين تنتمي السويتان E_2 و E_1، اللتان ينتج بينهما الانتقال الإشعاعي، إلى الغاز الثاني (B).

إن السويتين العلويتين E_2 و E_1 المتجاورتين مأهولتان بنفس الطريقة بواسطة الضخ الكهربائي. إذا كانت السويّة E_3 شبه مستقرة /مُقَلْقلة، فإنها تعمل كخزان للطاقة وتنقل هذه الطاقة إلى الغاز B، خلال



الشكل 2- الانتقال بالتصادم التجاوبي.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

التصادمات بين ذرات أو جزيئات الغازين. يمكن إذن أن يكون المردود عالياً جداً، والعتبة منخفضة طالما يجري باستمرار إخلاء السويّة E_1 بطريقة لا إشعاعية.

هذه العملية تشبه عمل الليزر بأربع سويّات. وبهذه الطريقة أيضاً يعمل ليزر الهليوم - نيون الذي ابتكره جافان Javan.

الضخ الكيميائي

تستعمل التفاعلات الكيميائية التي تُزوّد أثناء حدوثها مباشرةً بالجزيئات المؤيَّنة. وميزة هذا النوع من الليزر أنه لا يستلزم منبعاً كهربائياً. وعملياً، تخصص هذه التقانات التي تسمح بالحصول على استطاعات عالية جداً، للتطبيقات العسكرية. ونذكر هنا ليزرات فلورور الهدروجين (HF) أو فلورور الدوتريوم (DF) في المجال تحت الأحمر المتوسط.

الضخ بحقن الحاملات

إنه ضخ ليزرات نصف الناقل، الذي ينتج بواسطة التيار المستمر الذي يَعبر وصلة من نوع p-n.

التجاويف

لا يكفي إحداث انعكاس سكاني للحصول على التأثير الليزري. بل يجب إجبار الفوتونات على الانطلاق بغالبيتها في اتجاه محدد تماماً، مما يسمح بزيادة تدفقها بالإصدار المحثوث، بصورة ملحوظة، إنه الدور الذي يلعبه التجويف.

يتشكل التجويف من مرآتين متوازيتين (الشكل 3)، تحيطان بالوسط النشِط وتحددان اتجاهاً مفضلاً، وهو الخط العمودي عليهما. تكون المرآة الخلفية عاكسة تماماً للأشعة، في حين تترك المرآة الأمامية جزءاً من الأشعة، وهذا يسمح بالإصدار الليزري.

في البداية، يُنتج الإصدار التلقائي الفوتونات الأولى، التي تستطيع المضي نحو أي اتجاه كان. ووحدها الفوتونات الصادرة تبعاً للمحور العمودي للمرآتين هي التي تصادف عدداً كبيراً من الذرات المثارة. وفي نهاية العبور الأول، يكون عدد الفوتونات المتوافقة في الطور قد أصبح لا بأس به. وتنعكس هذه الفوتونات على المرآتين منتجة فوتونات أخرى، بالإصدار المحثوث. نتخيل بسهولة أن بالإمكان الحصول على كسب مهم. وأخيراً لا بدّ أن ننوه إلى أن الظاهرة تحدث بسرعة نظراً إلى سرعة الضوء، وأن الإصدار التلقائي لا يقوم إلا بدور مهمل يقتصر على بداية الظاهرة.

إذا كان الكسب الحاصل في الذهاب والإياب أعلى من الفقد المصادَف، يتم عبور العتبة، وتصدر حزمة ليزرية.

يؤدي التجويف، إضافة إلى ذلك، دور مصفاة ضوئية شديدة الانتقائية. وهو عبارة عن مقياس تداخل متعدد الموجات، لا يزوّد بالتداخل البنّاء إلا إذا كان:

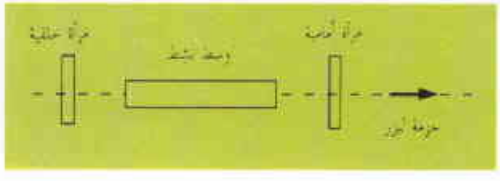
$$nL = p\lambda/2 \quad \text{(في حالة الورود الناظمي)}$$

حيث L هو طول التجويف، و n قرينة الانكسار، و p عدد صحيح.

تصدر أطوال الموجة إذن بطريقة منتظمة داخل عرض الخط الكلي، خط الفلْوَرة. وهو ما نسميه المشط. يعطى تباعد تواترين متتاليين بالعلاقة:

$$\Delta\upsilon = c\Delta\lambda/\lambda^2 = c/2L$$

ويمكن أن نلاحظ أن هذا التباعد يتناسب عكساً مع طول التجويف L. إذا أردنا الحصول على القليل من الأنماط، أو حتى على نمط واحد، علينا أن نأخذ تجويفاً قصيراً للغاية.



الشكل 3- تجويف ليزري.

والشيء الأساسي أخيراً هو أن الامتصاص الذاتي لهذا المرشح هو أضعف ما يكون. ولما كانت هذه المرشحات تؤدي دوراً مهماً في التجاويف الليزرية، فقد تم تجهيزها من موادَّ ذات خواص ضوئية متلائمة مع هذه المتطلبات.

كل هذا يشير إلى أن المنابع الليزرية تتميز بنوعية خاصة: أشعة صادرة شديدة النقاء (أُحادية اللون) بفضل ترابطها الزمني، وتوجُّهية كبيرة تُعزى إلى ترابطها المكاني.

المراجع REFERENCES

[1] A. L. Schawlow and C. H. Townes "Infrared and Optical Masers" Physical Review vol 112,n° 6, (15 Décembre 1958).

[2] T. H. Maiman "Stimulated optical radiation in ruby masers' - Nature vol 187 (Août 1960).

[3] A. Javan, W. B. Bennett, Jr, D. R. Herriott "Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He- Ne mixture" Phys. Rev. Lett. vol 6, (Février 1961)

[4] A.E. Siegman 'An introduction to lasers and masers' McGraw-Hill (1971).

[5] A. Brun "Les Lasers à solides" Optique et Photonique N°3/ 20.8.1998 (Mémo).■

☆ ★ ☆

ليزرات ما تحت الأحمر الغازية تغطي طيفاً عريضاً*

جف هخت
محرر مساهم

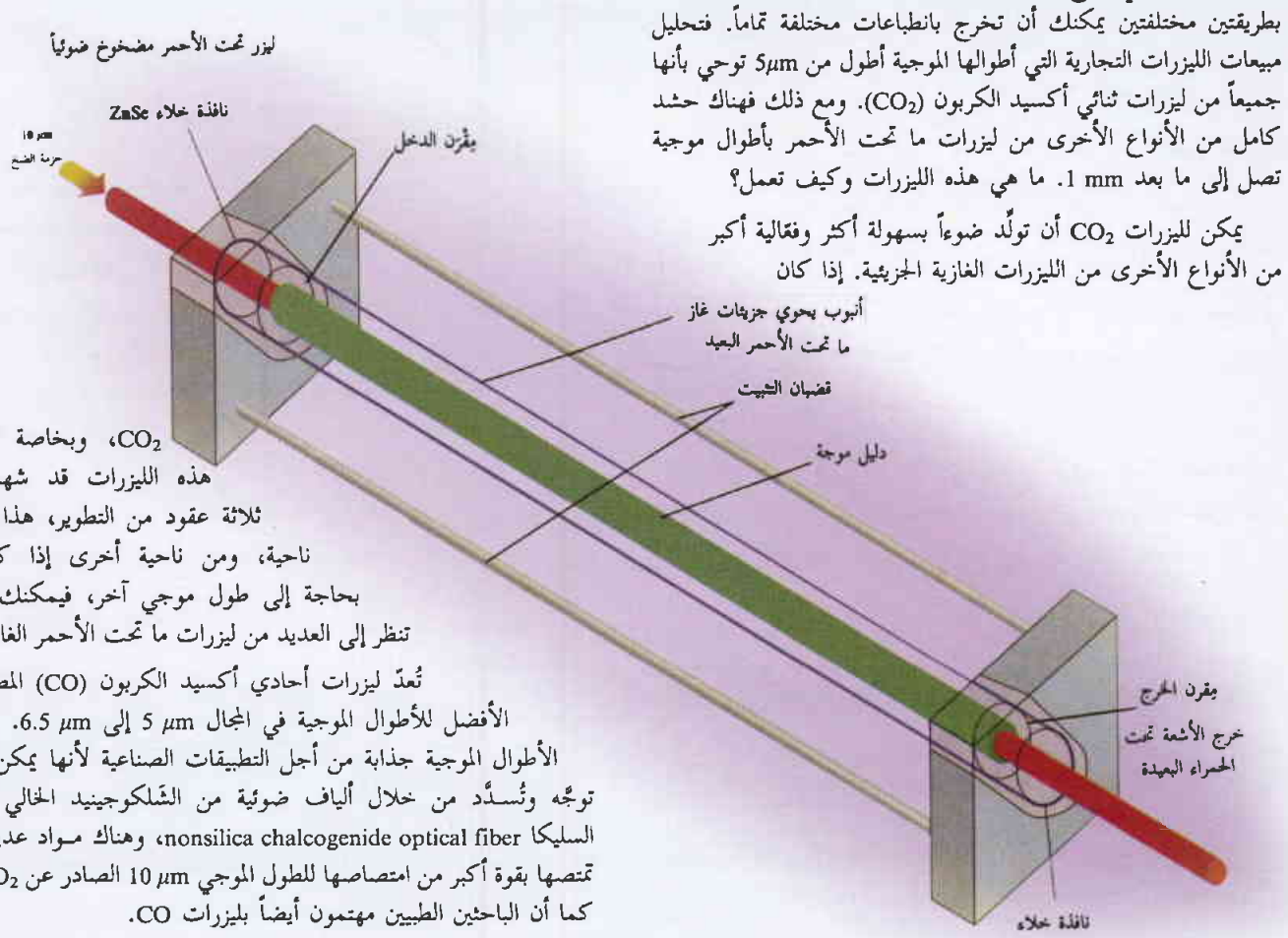
ملخص

على الرغم من أن ليزرات ثنائي أكسيد الكربون تعد الأكثر شيوعاً، لكن تتوفر الآن ليزرات غازية جزيئية عديدة أخرى تصدر أطوالاً موجيَّة تقع ما بين 5μm و 1 mm.

الكلمات المفتاحية: الليزر الغازي، الطيف تحت الأحمر، انتقالات اهتزازية – دورانية، ليزر CO_2، ليزر أكسيد النتروز.

إذا تأملت في تنوع ليزرات ما تحت الأحمر (IR) الغازية الجزيئية بطريقتين مختلفتين يمكنك أن تخرج بانطباعات مختلفة تماماً. فتحليل مبيعات الليزرات التجارية التي أطوالها الموجية أطول من 5μm توحي بأنها جميعاً من ليزرات ثنائي أكسيد الكربون (CO_2). ومع ذلك فهناك حشد كامل من الأنواع الأخرى من ليزرات ما تحت الأحمر بأطوال موجية تصل إلى ما بعد 1 mm. ما هي هذه الليزرات وكيف تعمل؟

يمكن لليزرات CO_2 أن تولِّد ضوءاً بسهولة أكثر وفعّالية أكبر من الأنواع الأخرى من الليزرات الغازية الجزيئية. إذا كان



CO_2، وبخاصة لأن هذه الليزرات قد شهدت ثلاثة عقود من التطوير، هذا من ناحية، ومن ناحية أخرى إذا كنت بحاجة إلى طول موجي آخر، فيمكنك أن تنظر إلى العديد من ليزرات ما تحت الأحمر الغازية.

تُعدّ ليزرات أحادي أكسيد الكربون (CO) المصدر الأفضل للأطوال الموجية في المجال 5 μm إلى 6.5 μm. هذه الأطوال الموجية جذابة من أجل التطبيقات الصناعية لأنها يمكن أن توجَّه وتُسدَّد من خلال ألياف ضوئية من الشَلكوجينيد الخالي من السليكا nonsilica chalcogenide optical fiber، وهناك مواد عديدة تمتصها بقوة أكبر من امتصاصها للطول الموجي 10 μm الصادر عن CO_2. كما أن الباحثين الطبيين مهتمون أيضاً بليزرات CO.

من أجل الأطوال الموجية الأطول قليلاً من 10 μm، هناك ليزر أكسيد النتروز nitrous oxide (N_2O) المشابه لليزر CO_2. أما من أجل أطوال الهدف هو مجرد قدرة عند 10 μm، فليس هناك ما يضاهي ليزرات

* نشر هذا المقال في مجلة *Laser Focus World*, March 1993. ترجمة هيئة التحرير – هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

موجية أطول بكثير، وهي التي تستخدم في قياسات وتجارب عديدة وفي التطبيقات البحثية، فهناك حشد هائل من ليزرات ما تحت الأحمر البعيد far-IR lasers تُصدِر أطوالاً موجية تقع ما بين 30 μm و 1 mm. ولا يوجد فيها ما هو الأفضل مبيعاً،لكن الكثير متوفر تجارياً. يحتوي المؤطر 1 على ملخص تطبيقات الليزرات الغازية الجزيئية.

مؤطر 1

تطبيقات ليزرات الغاز الجزيئي

ليزرات CO: عمليات صناعية ومعالجة المواد، في الطب/في طب الأسنان.

ليزرات N_2O: الليدار (رادار أشعة الليزر تحت الحمراء)، المطيافية، مزج التواترات، ضخ ليزرات ما تحت الأحمر البعيد.

ليزرات ما تحت الأحمر البعيد: التشخيص الطبي، قياسات البلازما (بصورة خاصة في أبحاث الاندماج النووي)، دراسات مواد أنصاف النواقل، المطيافية الجزيئية، منابع هيتيرودينية لعلم الفلك ما تحت الأحمر البعيد، التصوير والرادار وأبحاث قياسات الحقل الكهربائي والحقل المغنطيسي.

تصنف ليزرات ما تحت الأحمر الغازية الجزيئية في صنفين اعتماداً على نوع الانتقال الليزري، فليزرات الأطوال الموجية الأقصر، مثل ليزرات CO و CO_2 و N_2O تعمل على الانتقالات الاهتزازية–الدورانية.

عودة إلى المبادىء

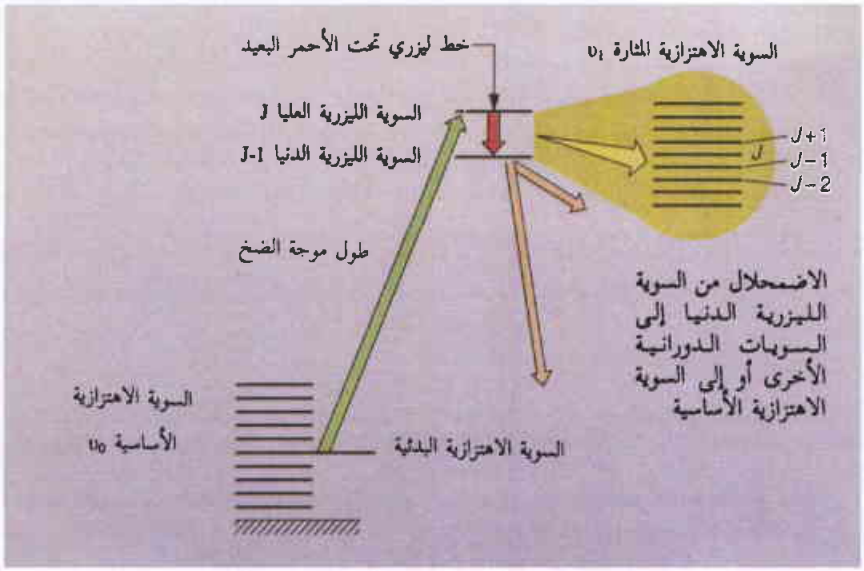
تعمل الليزرات ذات الأطوال الموجية الأطول على الانتقالات الدورانية، التي غالباً ما تكون للجزيئات العضوية البسيطة نوعاً ما مثل الميثانول (CH_3OH).

أما ليزرات الأطوال الموجية الأقصر فإنها تثار نموذجياً بواسطة انفراغ كهربائي أو بتواترات راديوية (RF) تمر عبر الغاز كما هو الحال في ليزرات CO_2. يمكن لليزرات N_2O وCO أن تعمل في أنابيب ليزرات CO_2، وإن تكن الضوئيات المطبقة عليها مختلفة بسبب قصر الطول الموجي لـ CO. ومثل ليزرات CO_2 تصدر هذه الليزرات خطوطاً منفصلة عديدة ولّدتها الانشطارات (الانفلاقات) الدورانية للانتقال الاهتزازي الرئيسي. أي إن الجزيئات تغيّر الحالة الدورانية عندما تُغيّر الحالة الاهتزازية وتستطيع أن تنتقل بين العديد من الحالات الدورانية المختلفة.

إن الليزرات الدورانية ذات الأطوال الموجية الأطول تثار ضوئياً في العادة بواسطة طول موجي قريب من 10 μm، وبصورة نموذجية من ليزر CO_2 أو N_2O. إن الإثارة لحالة أولية محدّدة مهمة لأن الانتقالات الدورانية تحت الحمراء البعيدة تتضمن طاقة أقل بشكل ملحوظ من الطاقة الحرارية للذرات عند الدرجة 300 K. (تقع قمة الجسم الأسود في درجة حرارة الغرفة عند 10 μm تقريباً، وعليه فإن الأطوال الموجية تكون تحت الطاقة الحرارية الوسطى). وبصورة نموذجية فإن الضخ بخط ليزري وحيد في المجال 10 μm يثير الجزيئات إلى حالة دورانية معينة من حالة اهتزازية مثارة (انظر الشكل 1). وبعدئذ يحدث الفعل الليزري بين سويتين دورانيتين من الحالة الاهتزازية المثارة. ونحن بحاجة إلى منبع ضخ ذي عرض خط ضيق narrow - linewidth وذلك لتجنب إسكان سويات دورانية أخرى.

ليزرات أحادي أكسيد الكربون

يلقي التاريخ الضوء على التشابهات بين ليزرات CO و CO_2. وقد شغّل كومار باتِل K. Patel أول ليزر من CO في مختبرات بِلْ (Murray Hill, NJ) في عام 1964 مباشرة بعد أن عرض ليزر CO_2. ومثل ليزرات CO_2، فإن انفراغ ليزرات CO المضخوخة يمكن أن يولّد استطاعات عالية. كان المطورون العسكريون للأسلحة الليزرية مهتمين بليزرات CO حتى منتصف السبعينيات. عرض الباحثون كفايات مثيرة، محوّلين 63 % من طاقة التفريغ إلى ضوء ليزر. إن تلك الكفاية العالية ممكنة على كل حال فقط في درجات حرارة قرّية (شديدة البرودة) cryogenic temperature، وإن الجو المحيط يمتص خرج CO في مجال الطول الموجي 5 μm إلى 6.5 μm امتصاصاً قوياً جداً ليكون مفيداً للإرسال إلى مسافات طويلة.



الشكل 1– يتطلب ضخ الليزر الدوراني تحت الأحمر البعيد منبعاً ذا خط ضيق جداً لإثارة سوية ليزرية عليا نوعية. يأخذ الانتقال مكاناً بين سويتين دورانيتين لسوية اهتزازية مثارة υ. السويتان الليزريتان العليا والدنيا تم توسيعهما للتوضيح، وتباعدهما الفعلي يماثل تباعد السويات الأخرى.

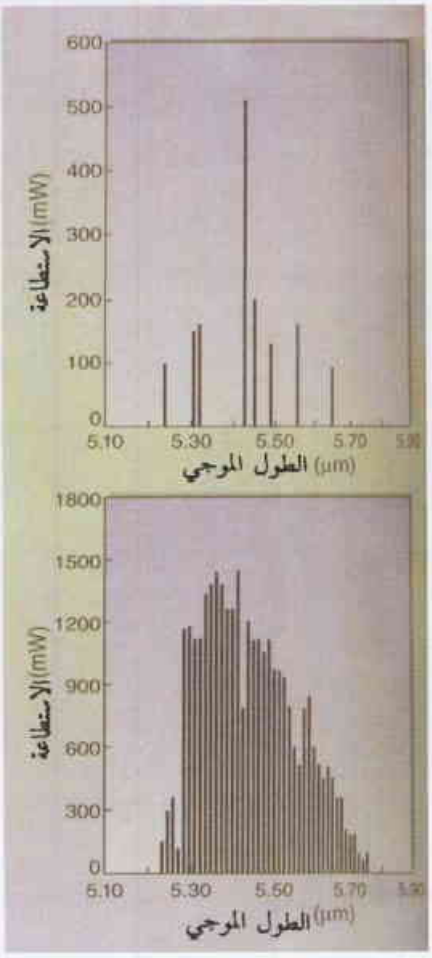
http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

وعلى الرغم من أن هذه القيود تجعل ليزرات CO غير جذابة كأسلحة لكنها تبقى منبعاً ليزرياً مفيداً عند الأطوال الموجية الواقعة في منتصف تحت الأحمر القريب. تستطيع ليزرات CO غير المولّفة أن تهتز بصورة متزامنة على عدة خطوط (انظر الشكل 2 الجزء الأعلى). وبدلاً من ذلك يمكن توليف ليزرات CO التي تعمل في النمط CW على خطوط مختلفة عديدة (انظر الشكل 2 الجزء الأسفل). يحتوي المزيج الغازي على CO ونتروجين وهليوم غالباً بالإضافة إلى الأكسجين أو الكزينون. تبلغ الضغوط الكلية حوالي 35 torr (4500 Pa) في أنماط CW، وتكون أعلى في ليزرات جوية مثارة عرضانياً transverse - excited - atmospheric lasers.

إن كلا النوعين من التشغيل سواء التشغيل بالغاز المحكم الإغلاق أو الغاز الجاري ممكنان في حالة ليزرات CO. وعلى الرغم من أن تصاميم الغاز الجاري تتمتع بجاذبيات تشغيلية، فإنها تطرح أخطاراً محتملة لأن الغاز المنفلت منها يحتوي على CO الذي هو عديم الرائحة ولكنه قاتل. تعتبر التراكيز من قيمة 50 جزءاً في المليون من CO غير صحية، أما التراكيز الأعلى فيمكن أن تسبب الإغماء والموت، لذا يجب على المستخدمين أن يتخذوا الحيطة والحذر لضمان انفلات مناسب. (الليزرات المحكمة الإغلاق تحتوي على قدر ضئيل جداً من CO، حيث لا يسبب خطراً، حتى ولو تسرب الغاز إلى الهواء).

إن معظم ليزرات CO هي نسخ معدّلة من ليزرات CO_2 في النمط CW ذات تصاميم تقليدية أو أدلة موجية، وتشمل التغيرات لتشغيل CO تعويضاً (تبديلاً) للضوئيات للاستعمال عند الطول الموجي 5 μm إلى 6.5 μm وإدخال الخليط الغازي المناسب. وتضاف أجهزة التبريد أحياناً. إن استطاعة الخرج على الخطوط CO أدنى - تبلغ 20 % من سوية CO_2 في ليزرات محكمة الإغلاق ومثارة بتواتر راديوي. تستطيع تصاميم CO معيارية أن تولّد حتى حوالي 40 W في النمط CW. إن سويات الاستطاعة الأخفض وحجوم الإنتاج الأصغر، تساهم، على كل حال، بسعر لكل واط من أجل ليزرات CO هو بحدود 10 مرات أعلى مما هو عليه من أجل ليزرات CO_2.

إن إمكانية إتاحة وتوفر ألياف تشالكوجينيد اللّينة بانتقال (بنفوذ) جيد في منطقة ما تحت الأحمر المتوسط، قد حثّت على الاهتمام بليزرات CO من أجل التطبيقات في كل من الصناعة والطب. لقد وصلت النسخ المتطورة إلى الاستطاعات العالية اللازمة للتطبيقات الصناعية، وقد قام معهد البحث والابتكار في تشيبا، في اليابان ببناء ليزر CO في نمط CW



الشكل 2- ليزر أحادي أكسيد الكربون ذو مجاوب غير انتقائي يمكن أن يهتز بالتزامن على عدة خطوط (في الأعلى) ويمكن توليفه تتابعياً ليصدر عدداً من الخطوط المفردة المختلفة (في الأسفل).

باستطاعة 1kW، وبجريان محوري سريع ومثار بانفراغ عرضاني [1]. هناك ليزر طوّره فريق في جامعة هيريوت واط (إدنبرة بسكو تلندا) ولّد مئات الواطات [2]. كما بيّن باحثون آخرون في اليابان أليافاً ضوئية من تشالكوجينيد بمركبات من $As_{40}S_{60}$ و $Ge_{10}As_{30}S_{60}$ يمكنها أن ترسل أكثر من 100 W من الاستطاعة عند الطول الموجي لـ CO [3]. تبدو سويات الاستطاعة للنسخ التجارية كافية وملائمة للطب، وإن ليزرات CO تُدرس الآن للتطبيقات في طب الأسنان وفي علم أمراض النساء.

ليزرات أكسيد النتروز

أكسيد النتروز جزيء ثلاثي الذرات خطي يشبه في بنيته CO_2. بعد أن حقق باتل ليزر CO بقليل لدى مختبرات بل، صنع أول ليزر من N_2O. وكما كانت الحال مع CO_2، فإن N_2O يستطيع أن يصدر سويات فرعية تصل إلى 100 سوية فرعية من الانتقال الاهتزازي بالقرب من 10 μm. يقع الطول الموجي للمركز الاسمي للانتقال الاهتزازي في N_2O عند 10.65 μm،الذي هو أطول قليلاً من الطول الموجي 10.4 μm لانتقال CO_2.

[إن الانتقال الدوراني يزيح قمة إصدار ليزر CO_2 إلى 10.6 μm، لكن الطول الموجي للانتقال الاهتزازي الحقيقي هو 10.4 μm.] تحدث خطوط ليزر N_2O عند أطوال موجية عديدة بين 10.3 و 11.1 μm، ممتدة إلى طول موجي أطول قليلاً من CO_2 وتملأ بعض الفرجات في طيف CO_2 الخطي.

تحتوي مزائج الغازات النموذجية في ليزرات N_2O على N_2O و N_2 و CO و He عند ضغط كلي يبلغ حوالي 10 torr (1300 Pa). وكما هي الحال مع ليزر CO، فإن غاز الانفلات هذا عديم الرائحة وفيه إمكانية الهلاك والموت، لذلك فإن الانفلات المناسب يعد أمراً جوهرياً في ليزرات الغاز الجاري. يستطيع أكسيد النتروز أن يعمل في بعض أنابيب ليزر CO_2 مع تعديلات ثانوية فقط. إن سويات الاستطاعة في نمط CW لليزر N_2O نموذجي هي فقط حوالي شُبع سوية الاستطاعة التي تم الحصول عليها من CO_2 في منظومات ليزرية مكافئة، لكن الأطوال الموجية المختلفة المتوفرة من N_2O مهمة لتطبيقات تشمل تجارب الليدار الجوي atmospheric lidar experiments والمطيافية ومزج التواترات وضخ ليزرات ما تحت الأحمر البعيد.

ليزرات ما تحت الأحمر البعيد الدورانية

إن ليزرات الغازات الجزيئية لما تحت الأحمر البعيد والتي تعمل على الانتقالات الدورانية هي من بعض النواحي تأسّل (تشبّه) بالأيام المبكرة

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

جداً لبحث الليزر، عندما كان المطورون يبحثون عن خطوط ليزر جديدة بواسطة اختبار غازات مختلفة عديدة في الأنبوب نفسه. تبنى نماذج تجارية حول تجاويف ليزرية مضخوخة ضوئياً معتمة كي تحتجز (تحمل) غازات مختلفة عديدة. يقوم المستخدمون بتحويل الغازات عندما يرغبون بتحويل خطوط الليزر. ويمكن أن تكون الخروجات بطول موجي محصور بين 40 µm و2000 µm (أي 2mm). تستخدم ليزرات ما تحت الأحمر البعيد في البحث والتطوير وفي تطبيقات القياسات.

إن الغازات الجزيئية التي لها عزوم ثنائيات أقطاب دائمة هي الأوساط الفعالة في ليزرات ما تحت الأحمر البعيد. والمواد الكحولية والمركبات الكربونية البسيطة الأخرى هي الجزيئات الأكثر أهمية المستخدمة في النسخ التجارية. فسويات الطاقة الدورانية تتأثر بقوة بكتل الذرات التي تُكوّن الجزيء. وعليه فإن الاستبدال النظائري - وبصورة نموذجية الدوتريوم من أجل الهدروجين - يمكن أن يعطي خطوطاً ليزرية جديدة. يحتوي الجدول على خطوط ما تحت الأحمر البعيد الأساسية التي تعطيها الليزرات التجارية، لكن جرى عرض وتحقيق عدد كبير غيرها [4-6]. تتراوح استطاعات الخرج من أقل من ملّي واط على بعض الخطوط إلى مجال الـ W-1 على أخرى، تبعاً لاستطاعة ليزر الضخ.

الخطوط الليزرية تحت الحمراء البعيدة متاحة من الليزرات الغازية الجزيئية التجارية

الغاز	الطول الموجي
CD_3OD	41.0
CH_3OD	46.7
CH_3OD	57.0
CH_3OH	70.6
CH_3OH	96.5
CH_3OH	118.8
CH_3NH_2	148.5
CH_3OH	163.0
CD_3OD	184
CH_3NH_2	198.0
CH_3OD	229.1
CD_3OD	255
$C_2H_2F_2$	375
HCOOH	433
CD_3I	460
CH_3F	496.1
CH_3OH	570.5
CH_3OH	699.5
$C_2H_2F_2$	764.1
$C_2H_2F_2$	890.0
$C_2H_2F_2$	1020.0
$^{13}CH_3F$	1222.0

يحتوي ليزر ما تحت الأحمر البعيد على دليل موجي من المعدن أو العازل يتراوح قطره ما بين 25 إلى 50 ملّيمتر وطوله 1 إلى 3 متر. تولّد الأدلة الموجية العازلة حزماً مستقطبة استقطاباً خطياً لكنها تعاني من ضياع عالٍ أثناء انتشارها إذا كان طول الموجة أكبر من حوالي 2% من قطر الدليل الموجي. يمكن استخدام الأدلة الموجية المعدنية من أجل أطوال موجية في كل مكان من منطقة ما تحت الأحمر البعيد ولها عتبة ضخ أخفض من الأدلة الموجية المصنوعة من العوازل. إلا أن الأدلة الموجية المعدنية تولّد بصورة نموذجية حزم استقطاب مختلّط وأنماطاً ليزرية عالية المرتبة.

يُضخ الأنبوب بصورة طولانية من إحدى نهايتيه بواسطة ليزر ذي خط وحيد من CO_2 أو N_2O يصدر بالقرب من الطول الموجي 10 µm، كما هو مبين في الشكل الموجود في الصفحة 115. يجب أن يكون التركيب الضوئي للجوف الخلفي بحيث ينفذ الطول الموجي 10 µm ويعكس معظم الاستطاعة الجارية من إشعاع تحت الأحمر البعيد. وبصورة نموذجية فإن نافذة من سيلينيد الزنك تؤمن سداداً خلائياً محكماً، بينما يوجد في المرآة الخلفية ثقب قطره من 1 إلى 2 ملّيمتر هو الذي يسمح لضوء الضخ المبأر بإحكام بالدخول لكنه يدع قليلاً فقط من إصدار ما تحت الأحمر البعيد يهرب. ينبغي أن تمرر النافذة الخلائية عند طرف الخرج معظم إشعاع ما تحت الأحمر البعيد، وعليه فإن الاختيارات المعتادة هي السليكون النقي وأصناف خاصة من الكوارتز البلوري.

يتم اقتران الخرج من خلال ثقب مركزي قطره من 3 - 10 ملّيمتر في مرآة الجوف الأمامية؛ وتقوم أحياناً شبكة سلكية شفافة جزئياً في مجال تحت الأحمر البعيد مقام مِقْرن الخرج.

إن مرآتي الجوف يجب أن تعكسا بدءاً من إشعاع الضخ الذي طوله الموجي 10 µm وحتى كل مجال إشعاع تحت الأحمر البعيد. إن الانعكاس عند الطول الموجي للضخ مهم لأن غاز الليزر رقيق ويمتص امتصاصاً ضعيفاً فقط عند الطول الموجي للضخ، جاعلاً بذلك أطوال المسارات أساسية لانتقال الطاقة الكافي. تحدد المرآتان وأنبوب الدليل الموجي الجوف المجاوب. وتكون إحدى المرآتين مثبتة لكن المرآة الأخرى ينبغي أن تكون قابلة للحركة خطياً مما يجعل طول الجوف قابلاً للتحكم كي يتوافق مع مضاعف صحيح من نصف الطول الموجي للخرج.

هذه المواصفات حرجة لأن منحني الربح أضيق بكثير من تباعد نمط الجوف، وتساعد هذه الآلية أيضاً على انتقاء خط واحد من الخطوط العديدة التي تصدرها معظم الغازات.

توجد خطوط ليزر ما تحت الأحمر البعيد بين 10 µm و 40 µm، لكن المشاكل التقنية في هذا المجال والطلب المحدود لا يشجعان على التطوير التجاري. تتركز المشاكل التقنية على التركيبة الضوئية للجوف: يمكن جعل التركيبة الضوئية بحيث تفصل حزمة الضخ 10µm عن الأطوال الموجية الأقصر من 40 µm، لكن عن طول موجي خاص واحد فقط، وبذلك تلزم تراكيب ضوئية مختلفة من أجل التشغيل عند أطوال موجية مختلفة. وهذا يخلق مشكلة لأن الطلب على أي خط ليزري واحد محدود جداً. لكن تبرز الحاجة إلى جملة ضوئية واحدة فقط لفصل حزمة الضخ عن مجال عريض من خروجات أطول من 40 µm، مما يُمكن من إنشاء ليزر متعدد الأغراض قابل للتطبيق.

إن خواص المادة تكون مختلفة جداً في مجال تحت الأحمر البعيد عنها في مجال ذي أطوال موجية أقصر. فخطوط الامتصاص الشديدة الواقعة بين حوالي 30 µm و 50 µm توقف بصورة فعالة النفوذ (الانتقال) لمسافات طويلة في الهواء. إن معظم مواد تحت الأحمر الشائعة عاتمة عند أطوال موجية أطول من 50 µm، وتمتد بضعة منحنيات نفوذ (تمرير) إلى ما بعد 50 µm أو 100 µm. ويُعدّ السليكون والجرمانيوم والكوارتز البلوري والألماس من بين الجوامد اللاعضوية القليلة الشفافة فيما وراء 50 µm؛ كما

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

أن البلاستيك، مثل البولي إيتلين، يمكن أن يستخدم من أجل نوافذ في منطقة ما تحت الأحمر البعيد. ويمكن للشبكات (الأنسجة) المعدنية الدقيقة أن تلعب دور مرايا لما تحت الأحمر البعيد لأن سطوحها تبدو مستمرة عند أطوال موجية طويلة بما فيه الكفاية.

لم يحقق أي من ليزرات الغازات الجزيئية بعد النجاح الذي حققته ليزرات CO_2. ولكن بالرغم من أن CO يَعِدُ بتطبيقات صناعية وطبية، إلا أن هناك أنواعاً أخرى تنجح في تطبيقات تخصصية أفضل مما تستطيعه ليزرات CO_2.

المراجع REFERENCES

[1] M. Taniwaki et al., Technical Digest, Conference on Lasers and Electro- Optics, paper CW 10, Optical Society of America, Washington,DC (1991), p. 248.

[2] H. J. Baker, D. R. Hall, and N. A. S. Rodrigues, Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics, paper CWG14, Optical Society of America, Washington, DC (1992), p. 266.

[3] S. Sato, K. Igarashi, and M. Taniwaki, Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics, paper CWJ5, Optical Society of America, washington, DC (1992), p. 322.

[4] Reviews of Infrared and Submillimeter Waves Vol. 2, Optically Pumped Far-Infrared Lasers, K. J. Button, M. Inguscio, and F. Strumia, eds., Plenum, New York, NY (1984).

[5] D. J. E. Knight, Ordered list of far-infrared laser lines, National Physical Laboratory, Teddington, UK (1984, but updated periodically).

[6] M. S. Tobin, Proc. of the IEEE 73(1), 61 (January 1985).■

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

الأطوار الثلاثة لليزرات: الحالة الصلبة والسائلة والغازية*

توماس ف. هيغنس

ملخص

اكتشف الباحثون الفعل الليزري في آلاف من المواد، بعد بناء أول ليزر من بلّورة الياقوت. يمكن تصنيف الليزرات إلى صلبة وسائلة وغازية اعتماداً على حالة المادة الفعّالة المستخدمة. يغطي خرج هذه الليزرات المنطقة الطيفية الممتدة من الأشعة ما فوق البنفسجية إلى ما تحت الحمراء.

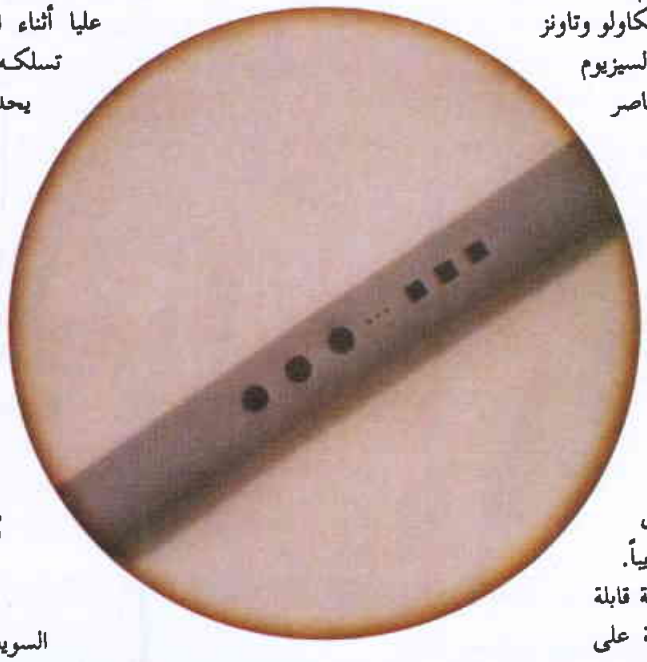
الكلمات المفتاحية: الفعل الليزري، ليزرات الحالة الصلبة، الليزرات الصباغية، الليزرات الغازية.

عندما نشر كل من سكاولو A. Schawlow و تاونز C. Townes مقالتهما الشهيرة "الليزرات الضوئية والأشعة ما تحت الحمراء" في مجلة The Physical Review عام 1958، لم يكن أحد يعرف كيف سيكون شكل أول ليزر. اقترح سكاولو وتاونز في تلك المقالة، أن أبخرة البوتاسيوم والسيزيوم أو حتى البلّورات الصلبة لأملاح العناصر النادرة ربما تُصدر ضوء الليزر إذا تم تشعيعها بضوء قوي ذي طول موجة مناسب، المعروف حالياً بالضخ الضوئي. لكن شاء القدر بناء ميمان T. Maiman أول ليزر في العالم مستخدماً بلّورة الياقوت ruby التي تنبأ سكاولو بعدم صلاحيتها كمادة ليزرية.

اكتشف الباحثون آلاف المواد التي يحدث فيها الفعل الليزري بعد بناء أول ليزر ياقوت، بأطوار المادة الثلاثة تقريباً. حيث صنع سكاولو وآخرون مادة ليزرية قابلة للأكل من الجلاتين. تركز هذه المقالة على شرح تصميم بعض الليزرات الصلبة والسائلة والغازية الأكثر نجاحاً.

ليزرات الحالة الصلبة

تشمل ليزرات الحالة الصلبة كل الليزرات التي تضخ ضوئياً حيث تكون المادة الفعّالة الليزرية صلبة في درجة حرارة الغرفة. لا تنتمي ليزرات أنصاف النواقل إلى هذا النوع لأنها تُضَخُّ كهربائياً وتتضمن عدة عمليات فيزيائية مختلفة (انظر مجلة Laser Focus, April 1995, P. 65). في مواد ليزرات الحالة الصلبة، تُثار الذرات المسؤولة عن توليد ضوء الليزر إلى سويّات طاقية عليا أثناء امتصاصها للفوتونات، والطريق الذي تسلكه أثناء هبوطها من السويات المثارة يحدد خواص ضوء الليزر المتولد (لمراجعة شاملة لهذه العمليات انظر مجلة Laser Focus, June1994.



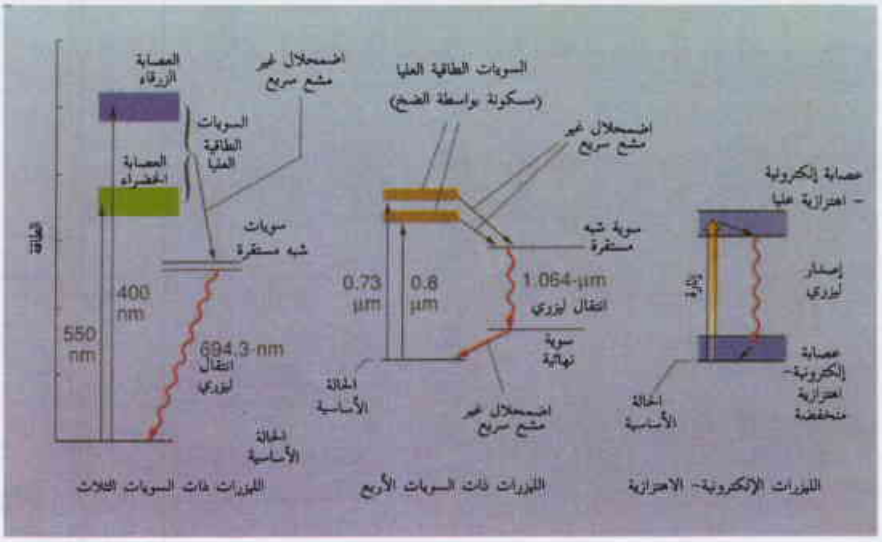
تم استخدام الإشعاع فوق البنفسجي من ليزر الإكسايمر لتثقيب دوائر بأقطار 825μm و 150μm، ومربعات ضلعها 550μm في أنبوب التفلون المصنوع من أجل استخدام طبي.

كمثال على ذلك، عندما تمتص ذرات الكروم (Cr) في بلّورة الياقوت فوتونات الضوء الأزرق أو الأخضر من مصباح الكزينون الوميضي، تقفز بعض الإلكترونات المدارية من مدارات السوية الأساسية إلى مدارات ذات طاقة أعلى (الشكل 1).

تتخلى الإلكترونات أثناء وجودها في السويات المثارة عن جزء من طاقتها الزائدة إلى الشبكة البلّورية المحيطة بسرعة، لتهبط إلى إحدى السويتين المتقاربتين طاقياً و هما سويتان شبه مستقرتين. وإذا مكثت الإلكترونات في هاتين السويتين شبه المستقرتين لوقت كافٍ لتحقيق الانقلاب السكاني، سيحدث إصدار محثوث عندما تعود الإلكترونات نهائياً إلى الحالة الأساسية من أخفض حالة شبه مستقرة.

* نشر هذا المقال في مجلة *Laser Focus World*, July 1995. ترجمة الدكتور محمد درغام زيدان – قسم الفيزياء – هيئة الطاقة الذرّية السورية – مراجعة هيئة التحرير – هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية



الشكل 1– في الليزرات ذات السويات الثلاث مثل الياقوت (اليسار)، تشغل إلكترونات العنصر الفعال سويات الطاقة الثلاث في انتقالات من السوية المثارة إلى السوية الأساسية، بينما تحتوي الليزرات ذات السويات الأربع مثل Nd- YAG أربع سويات طاقية عامة (الوسط). وفي الليزرات الإلكترونية – الاهتزازية القابلة للتوليف، تتضمن الانتقالات الإلكترونية عصابات طاقية عريضة (اليمين).

يُمثّل الانتقال الإلكتروني المشع النهائي من السوية شبه المستقرة الأدنى إلى الحالة الأساسية للكروم هبوطاً طاقياً بمقدار 1.79 eV، ليتولد ضوء ليزر الياقوت الأحمر ذي الطول الموجي $\lambda = 694.3nm$. عندما تعود الإلكترونات إلى الحالة الأساسية، سيحدث امتصاص آخر لفوتونات الضوء الأزرق والأخضر من قبل بلّورة الياقوت، وهكذا تتكرر العملية السابقة.

بما أن الدورة الكاملة لعمليتي الإثارة والاسترخاء في ذرة الكروم تتضمن انتقالات بين ثلاث سويات طاقية إلكترونية، يُعرّف الياقوت كمادة ليزرية ذات ثلاث سويات. يُصنع من هذه المواد ليزرات غير فعّالة نسبياً لأن الانتقال الليزري ينتهي في الحالة الأساسية، لهذا يجب ضخ عدد كبير من الإلكترونات خارج السوية الأساسية لإنجاز فعل الانعكاس السكاني. لا تكفي الطاقة العالية اللازمة لحدوث عملية الانعكاس السكاني في بلّورة الياقوت لتشغيل ليزر الياقوت كليزر يعمل في النمط المستمر (CW).

حالما يحدث الانقلاب السكاني يمكن تخزين طاقة ضخمة في بلّورة الياقوت. فمثلاً، يمكن أن يخزن قضيب ياقوت (أبعاده 1x10 cm مُطعَّم بنسبة 0.05% وزناً من الكروم) طاقة تصل إلى 17 J عندما تحدث عملية انعكاس سكاني كلي لجميع ذرات الكروم. يمكن إصدار الطاقة المخزنة في نبضة ليزرية ذات استطاعة عالية في شروط ضوئية مناسبة. إحدى أفضل الطرق لإنجاز هذه العملية هي استخدام مفتاح ضوئي – إلكتروني (Pockel cell) في التجويف الليزري لحجب الفعل الليزري حتى إتمام عملية الانعكاس السكاني. إذا كان المفتاح الضوئي – الإلكتروني مفتوحاً عند اللحظة المناسبة، سوف يصدر الليزر نبضات عملاقة.

يمكن الحصول على كفاءات ضخ عالية من الوسط الليزري ذي السويات الطاقية الأربع. يبدو هذا من المخطط ذي السويات الطاقية الأربع لـ بلورة Nd- YAG (نيوديميوم- إيتيريوم، ألمنيوم، غيرنيت)، الذي يعتبر أحد أفضل مواد ليزرات الحالة الصلبة (انظر الشكل 1 – وسط).

في بلورة Nd- YAG، تثار إلكترونات عنصر النيوديميوم الفعّال إلى سويات طاقية عليا بواسطة امتصاصها لفوتونات الأشعة ما تحت الحمراء القريبة الواقعة في مجال الأطوال الموجية ما بين 730 - 800 nm. كما في الياقوت، تمنح الإلكترونات طاقتها الفائضة إلى الشبكة البلّورية لتتوضع في السوية شبه المستقرة الأخفض. تمكث الإلكترونات في السوية شبه المستقرة حوالي 230 مكرو ثانية، وبدلاً من أن تعود مباشرة إلى السوية الأساسية تعود إلى سوية طاقية متوسطة قصيرة العمر (سوية انتهاء الفعل الليزري) أعلى من السوية الأساسية ثم تهبط إلى السوية الأساسية.

يؤثر هذا الانعطاف بشدة على مردود الضخ للمادة لأنه لا حاجة لإثارة عدد كبير من الإلكترونات من السوية الأساسية لحدوث عملية الانعكاس السكاني. والمعيار الوحيد هو إسكان أكبر عدد ممكن من الإلكترونات في السوية شبه المستقرة وليس في السويات التي ينتهي فيها الفعل الليزري. إن فرق الطاقة بين هاتين السويتين حوالي 1.17 eV الموافق لطول موجة الليزر $\lambda = 1064$ nm. لكن مثل معظم الليزرات، يُحتمل وجود انتقالات أخرى في Nd- YAG تشمل انتقالاً موافقاً لطول الموجة $\lambda = 1.3\mu m$.

لا تستطيع قضبان Nd- YAG تخزين طاقة عالية مثلما يحدث في الياقوت، لكن يمكن تشغيل ليزرات Nd- YAG في النمط النبضي pulse mode أو المستمر CW mode. تتم عملية الضخ الضوئي لهذا النوع من الليزرات عادة بواسطة مصابيح الكريبتون ذات القوس الكهربائي لأن خطوط إصدار غاز الكريبتون تتوافق مع خطوط الامتصاص القوية لبلّورة Nd- YAG. على كل حال، إن مجيء صفيفات الديودات الليزرية مثل بلورة زرنيخيد- ألمنيوم- غاليوم (GaAlAs) قدم منابع ضوئية ذات مردودية عالية لضخ بلورة Nd- YAG، مما أدى إلى تطوير ليزرات الحالة الصلبة أكثر ارتصاصاً وأصغر حجماً.

يسلك النيوديميوم سلوكاً مختلفاً في مواد مضيفة أخرى غير بلورة الـ YAG. فعند إدخاله في مادة لا بلورية مثل زجاج الفسفات على سبيل المثال ينزاح خط ليزر النيوديميوم $\lambda = 1064nm$ إلى $\lambda = 1053nm$ ويصبح أعرض بـ 60 مرة منه في حالة بلورة YAG. يرفع خط الإصدار العريض كلاً من عتبة الليزرة وسعة التخزين الطاقية في ليزرات Nd- glass، كما تسهل خطوط الامتصاص الأعرض المقابلة عملية الضخ بواسطة المصابيح الوميضية. كل هذه المعاملات وزيادة تركيز عنصر Nd في المضيف (الزجاج) يجعل من ليزرات Nd- glass منابع مثالية للحصول على طاقات عالية في النمط النبضي. على كل حال، لا يمكن تشغيل ليزر Nd- glass في النمط المستمر.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

هناك مواد أخرى مضيفة لعنصر Nd مثل (yttrium- lithium- YLF fluoride) و GSGG (gadolinium scandium gallium garnet) و YALO (yttrium aluminates). عند تطعيم هذه المواد بـ Nd، تظهر البلّورات خواص ضوئية وميكانيكية وحرارية وإصداراً محثوثاً مختلفة عن Nd- YAG. وكمثال على ذلك، يمكن أن تعمل بلورة Nd- YLF في كلا النمطين النبضي والمستمر مثل Nd- YAG، لكن الخواص الضوئية لحزمة ليزر Nd- YLF أفضل من Nd:YAG. تقوم بلورة Nd- YLF بدور كاسر مضاعف فريد من نوعه، ويؤدي هذا الأمر إلى إصدار حزمتين ليزريتين بطولين موجيين مختلفين (1.047 µm و 1.053 µm)) وباستقطابين متعامدين.

يمكن تطعيم المادة المضيفة بعنصرين فعّالين لتحسين كفاءة الضخ الضوئي. بهذه الطريقة، تُمتص الطاقة بواسطة جملة ذرية واحدة لتنتقل إلى الجملة الذرية الأخرى. مثلاً، إذا طُعّمت بلّورة GSGG بذرات الكروم والنيوديميوم (Cr Nd: GSGG) وتم ضخها ضوئياً بمصباح الكزينون الوميضي، ستمتص ذرات الكروم الضوء الأخضر والأزرق من المصباح (كما في ليزر الياقوت) وتنتقل الطاقة الممتصة إلى ذرات Nd خلال عملية الفلورة المنزاحة نحو الأحمر. تعتبر هذه المنظومة فعالة أكثر بثلاث مرات من ليزر Nd- YAG الذي يضخ بمصباح وميضي.

تؤدي المواد الليزرية المطعّمة بعناصر ترابية نادرة غير Nd مثل إربيوم erbium و توليوم thulium و هوليوم holmium إلى تشكيل مجموعة من الليزرات الصلبة مثل Er: YAG و Er: glass و Tm: YAG و Tm: YLF و Ho:Tm: YAG. تستخدم بعض هذه الليزرات في التطبيقات الطبية والاتصالات.

تصدر كل ليزرات الحالة الصلبة ضوءاً عند أطوال موجية متقطعة مثل λ=694.3nm لليزر الياقوت و λ=1064nm لليزر Nd- YAG. ولكن هناك نوعاً هاماً من ليزرات الحالة الصلبة -الليزرات الإلكترونية الاهتزازية (vibronic lasers)- التي تصدر ضوءاً ذا مجال عريض من التواترات. في هذه الليزرات، تتأثر سويات الطاقة الإلكترونية للعنصر الفعال بقوة بسويات الطاقة الاهتزازية للذرات المحيطة في الشبكة البلورية. وكنتيجة لذلك، تصبح السويات الطاقية للذرة الفعالة، التي تدخل في الفعل الليزري، أعرض في عصابات الطاقة (الشكل 1- إلى اليمين).

إن أول ليزر إلكتروني- اهتزازي* تجاري ناجح وهو ليزر ألكسندريت (Cr: chrysoberyl)، يتمتع بعصابتي امتصاص في منطقتي الضوء المرئي الأزرق والأحمر لذلك يمكن أن تُضخ بمصباح الكزينون الوميضي أو بليزرات أنصاف النواقل الحمراء. وكما هو حال الياقوت، تُخزّن بلّورة ألكسندريت كمية ضخمة من طاقة الضخ من أجل العمليات النبضية عالية الاستطاعة لذا يمكن أن يعمل ليزر ألكسندريت في النمط النبضي أو المستمر.

يعمل ليزر ألكسندريت وحده وفق نظام ليزري ذي ثلاث أو أربع سويات. حينما يعمل وفق نظام ثلاث سويات يصدر خطاً أحمر واحداً عند 680.4 nm، أما في حالة العمل وفق أربع سويات فيصبح ليزراً إلكترونياً - اهتزازياً بخرج يقع في المجال من 700 إلى 830 nm في درجة حرارة الغرفة. يستخدم تجويف ضوئي تجاوبي انتقائي لاختيار تواتر موجة الخرج المرغوبة.

إن أنجح الليزرات الإلكترونية- الاهتزازية التجارية هو ليزر تيتان- سفير (Ti: sapphire). ويعود هذا النجاح إلى أنه يتمتع بخرج طيفي عريض جداً يمتد من 670nm إلى 1070nm وخواص حرارية وميكانيكية ممتازة. يعطي ليزر تيتان-سفير نسبة ربح عالية لذلك يمكن أن يعمل في كلا النمطين المستمر والنبضي. على كل حال يجب أن تُستخدم مجموعة تجاويف ضوئية تجاوبية منفصلة لإجراء عملية توليف تشمل كامل المجال الطيفي.

تتركز عصابة الامتصاص الرئيسية لـ تيتان-سفير في منطقة ما بين الأزرق والأخضر قريبة من λ=490nm، وبما أن عمر السوية شبه المستقرة لـ تيتان-سفير قصيرة (3.2µs)، فإن استخدام المصباح الوميضي لإجراء عملية الضخ غير فعال، لذلك يستخدم ليزر آخر لضخ ليزر تيتان-سفير. فمثلاً يستخدم ليزر الأرغون أو ليزر بخار النحاس (ليزرات أبخرة المعادن) لإجراء عملية الضخ أثناء تشغيل ليزر تيتان-سفير في النمط المستمر، وتستخدم ليزرات Nd- YAG أو Nd- YLF المضاعفة التواتر في حالة التشغيل في النمط النبضي.

تستخدم تقنيات الضوء اللاخطي مثل مضاعفة التواتر (المدروج الثاني) لتوسيع طيف الخرج لليزرات الحالة الصلبة، ومنها القابلة للتوليف. أدت هذه التقنيات بالإضافة إلى تطوير النمنمة في تصميم الضخ بواسطة ليزرات أنصاف النواقل، إلى جعل ليزرات الحالة الصلبة نوعاً حيوياً وهاماً جداً في المنابع الضوئية الليزرية (انظر الجدول 1).

الليزرت الغازية

بالطبع، يكون وسط الكسب (وسط التضخيم) gain medium في الليزرات الغازية هو الغاز، وتضخ غالبية هذه الليزرات بطريقة الانفراغ الكهربائي، لكن يمكن ضخ بعضها بالأمواج الراديوية (RF) أو بالفوتونات أو حتى بالحزم الإلكترونية.

يضخ ليزر الهليوم- نيون، كمعظم الليزرات الغازية، بواسطة الانفراغ الكهربائي مع أن الإثارة بالأمواج الراديوية ممكنة أيضاً. يتألف وسط الكسب من أنبوب زجاجي ضيق مملوء بمزيج من غازي الهليوم والنيون. يُثبت الأنود بالقرب من إحدى نهايتي الأنبوب والكاتود بالقرب من النهاية الأخرى التي يتولد منها تيار الانفراغ المستمر، بينما تثبت المرايا العاكسة في نهايتي الأنبوب لحدوث عملية التغذية الضوئية الراجعة اللازمة للإصدار المحثوث. تتصادم الإلكترونات الناتجة من الانفراغ مع عدد كبير من ذرات الهليوم (نسبة ذرات الهليوم إلى النيون تساوي 10 إلى 1) لتثار إلى سوية عليا شبه مستقرة. عندئذ من خلال التصادمات التجاوبية بين ذرات المزيج، تنتقل طاقة ذرات الهليوم المثارة إلى ذرات النيون، لإثارتها إلى سوية شبه مستقرة متطابقة تقريباً في الطاقة مع السوية المثارة لذرات الهليوم.

* (vibronic laser) الليزرات الإلكترونية- الاهتزازية: الليزرات التي تصدر الضوء نتيجة انتقالات إلكترونية تصاحبها انتقالات اهتزازية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

الجدول 1 ــ الأطوال الموجية الأولية لليزرات الحالة الصلبة.

النوع	الطول الموجي (nm)
Ruby	694.3
Nd:YAG	1064
Nd:glass	
Phosphate	1054
Silicate	1061
Nd:YLF	1047
	1053
Nd:GSGG	1061
Er:YAG	2940
Er:glass	1540
Er:YLF	850
	1230
	1730
	2800
Ho:YAG	2127
Ho:YSGG	2088
Ho:YALO	2850
	2920

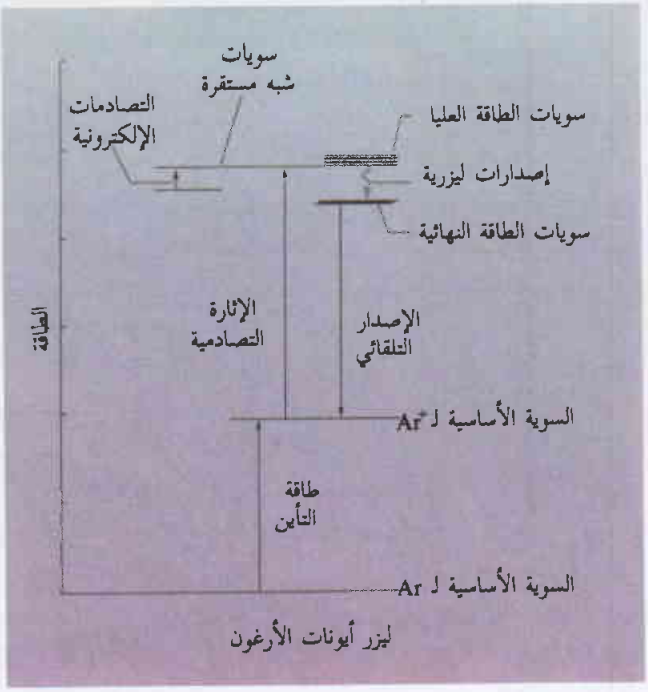
الليزرات الإلكترونية الاهتزازية

النوع	مجال الأطوال الموجية (nm)
Ti:sapphire	670–1070
Alexandrite	700–830
Li:CAF	720–840
Cr: emerald	729–842
Nd:GSGG	740–850
Li:SAF	780–920
Cr:fosterite	1167–1345
Co:MgF_2	1750–2500
Tm:YAG	1870–2160

تعود الإلكترونات من السوية شبه المستقرة للنيون إلى السوية الأساسية بعدة طرائق، وحسب كل طريقة يتولّد طول موجة ليزرية مختلفة لخرج ليزر الهليوم- نيون حالما يتحقق الانعكاس السكاني. على كل حال، صممت غالبية ليزرات الهليوم- نيون لتعطي طول موجة 632.8nm (انظر مجلة Laser Focus, June 1994). وبسبب كسبها القليل ومردودها المنخفض (0.01-0.1%) فإن عدداً قليلاً من هذه الليزرات يمكن أن يتجاوز 100 mW في النمط المستمر عند هذا الطول الموجي، وتستخدم هذه الليزرات في التطبيقات التي تحتاج إلى طاقات منخفضة مثل مسح الكودات الملصقة على البضائع في المحلات التجارية وفي عمليات التراصف والتداخل الضوئي وعلم القياس.

يمكن الحصول على طاقة عالية من الليزرات الغازية التي تعمل وفق النمط المستمر في المجال المرئي وما فوق البنفسجي باستخدام أيونات الغازات النادرة كوسط ليزري فعّال، مثل غاز الأرغون والكريبتون ومثل ليزر الهليوم-نيون. يتم ضخ هذه الليزرات الغازية وفق نظام الانفراغ الكهربائي بتطبيق فولطية عالية على طرفي الأنبوبة التي تحوي المادة الفعالة. يكون تيار الانفراغ في الليزرات الأيونية مرتفعاً بشكل كافٍ لتأيين الغاز.

تثار أيونات الغازات النادرة من السوية الأساسية إلى سويات شبه مستقرة نتيجة مجموعة معقدة من التفاعلات بين الإلكترونات و أيونات الغاز النادر، ثم تعود الأيونات المثارة إلى سوية دنيا ليتولّد الإصدار الليزري (الشكل 2).



الشكل 2- في ليزرات أيونات الأرغون، يجب أن تؤين ذرات الأرغون الحيادية قبل أن تضخ الإلكترونات من الحالة الأساسية إلى سويات طاقية عليا للأرغون المؤين.

تظهر عدة انتقالات محتوثة في الغازات النادرة المؤينة أحادياً وثنائياً، لينتج المزيد من خطوط إصدار ليزرية. ففي التأيين الأحادي للأرغون (Ar^+)، تظهر خطوط الإصدار الليزري الأهم في المجال المرئي في منطقة اللون الأزرق $\lambda=488nm$ وفي منطقة اللون الأخضر عند $\lambda=514.5nm$ من الطيف. وفي ليزرات أيونات الكريبتون (Kr^+) تظهر خطوط الإصدار في المناطق الطيفية، الأحمر ($\lambda=647.1nm$) والأصفر والأخضر والبنفسجي.

في منطقة الأشعة ما تحت الحمراء، تؤمن الليزرات الجزيئية ولا سيما ليزر ثنائي أكسيد الكربون CO_2 طاقات عالية. يتولد الإصدار المحتوث في ليزر CO_2 نتيجة انتقالات طاقية متقاربة بين السويات الاهتزازية والدورانية للروابط الجزيئية. يملك الجزيء الثلاثي الذرّة CO_2 على سبيل المثال ثلاثة أنماط اهتزازية، نمط شدٍّ تناظري ونمط شدٍّ (امتطاط) لا تناظري ونمطاً انحنائياً (الشكل 3). توافق طاقات الأنماط الاهتزازية الثلاثة في جزيء CO_2 أطوالاً موجية في منطقة الأشعة ما تحت الحمراء حول 10.6μm. ونتيجة للأنماط الدورانية المنخفضة الطاقة المصاحبة للأنماط الاهتزازية تتولد خطوط ليزرية متقاربة جداً في الطاقة ضمن العصابة الطاقية الاهتزازية 10.6μm.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

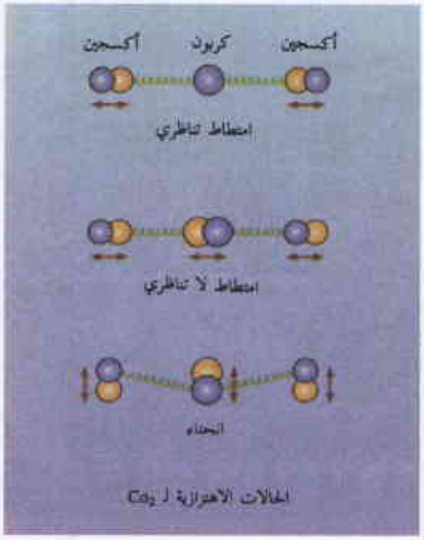
تضخ معظم ليزرات CO_2 بطريقة الانفراغ الكهربائي (كما يمكن ضخها بالأمواج الراديوية) . إذا وضع غاز CO_2 (يُمزج معه غازا الآزوت والهليوم) في أنبوب مغلق، فيجب عندئذٍ تجديده باستمرار لأن جزيئات CO_2 تتفكك. من أجل الحصول على استطاعات خرج عالية، يتدفق الغاز بشكل طولاني أو مستعرض داخل التجويف الضوئي (المجاوب). ويمكن أن تحدث عملية الانفراغ المستعرض. تدعى ليزرات CO_2 النبضية التي تعطي أعلى استطاعة خرج بـ ليزرات TEA المثارة عرضياً تحت الضغط الجوي (transversely excited atmospheric- pressure). تستطيع هذه الليزرات إصدار نبضات ليزرية تصل استطاعة الذروة فيها إلى بضعة ميغا واط أثناء الإثارة العرضانية لغاز CO_2 تحت الضغوط الجوية.

إن طول موجة ليزر CO_2 10.6µm مثالي من أجل إجراء عمليات الثقب والقطع واللحام لعدد كبير من المواد. إن عامل الربح الجيد والمردودية العالية لهذه الليزرات (تصل إلى 30%) جعل منها حصان عمل صناعي. كما وتستعمل في العمليات الجراحية لقص ولحم النسيج الحي.

هناك نوع هام من الليزرات الغازية التي تستخدم في التطبيقات التي تحتاج إلى أطوال موجية في نهاية منطقة طيف الأشعة ما فوق البنفسجية، تدعى هذه الليزرات بـ ليزرات الإكسايمر excimer laser. تصدر ليزرات الإكسايمر نبضات ذات شدة عالية من الضوء نتيجة تفاعلات غير عادية بين ذرات الهالوجين وذرات الغاز النادر. عندما تمرر نبضة كهربائية ذات طاقة عالية على المزيج، تصبح هذه العناصر في حالة طاقية مثارة وترتبط فيما بينها لتشكل جزيئات تسمى إكسيبلكس "exciplex" (تدعى أكسايمر عندما تكون الذرّتان من نفس النوع). بعد بضع نانوثانية تتفكك الجزيئات إكسيبلكس إلى الذرات الأصلية وتعود إلى السوية الأساسية مُصدِرة طاقة على شكل ضوء ليزري في مجال الأشعة ما فوق البنفسجية (UV). يتم تشكيل جزيئات إكسيبلكس أيضاً بواسطة الإثارة بالتواتر الراديوي أو بالحزمة الإلكترونية.

تشبه ليزرات الإكسايمر ليزرات TEA في التصميم، كما يجب الانتباه إلى أثر التآكل الذي تسببه الهالوجينات للأنبوب الليزري. لهذه الليزرات عامل ربح عالٍ، لذلك تستخدم في تطبيقات عديدة تبدأ من الطباعة الحجرية الضوئية وتنتهي في الاجتثاث الضوئي (انظر صورة الصفحة الأولى من هذا المقال).

تعرف ليزرات الهليوم- نيون والغازية الجزيئية وأيونات الغازات النادرة والإكسايمر كأهم أربعة أنواع ليزرات غازية تجارية تستخدم اليوم. وهناك أيضاً ليزرات غازية ناجحة مثل ليزر هليوم- كادميوم وأبخرة المعادن والآزوت، كل هذه الليزرات مع بعضها تغطي المنطقة الطيفية الممتدة من الأشعة ما فوق البنفسجية إلى ما تحت الحمراء (انظر الجدول 2).



الشكل 3- تستخدم الليزرات الغازية الجزيئية مثل ليزر CO_2 أنماط الطاقة الدورانية والانحنائية والامتطاطية للجزيئات لتوليد ضوء الليزر في مجال الأطوال الموجية تحت الحمراء.

الليزرات الصباغية السائلة

الليزرات السائلة هي الليزرات التي تُضَخّ ضوئياً ووسط الكسب فيها (وسط التضخيم) سائل في درجة حرارة الغرفة. وأكثرها نجاحاً الليزرات الصباغية. تولد هذه الليزرات ضوءاً ليزرياً واسع الطيف من سويات الطاقة المثارة للأصبغة العضوية المحلولة في مذيبات سائلة. وتكون هذه الليزرات إما نبضية أو مستمرة، ويمتد طيف الإصدار من منطقة الأشعة مافوق البنفسجية إلى ما تحت الحمراء معتمداً على نوع الصباغ المستعمل.

تثار جزيئات الصباغ الكبيرة إلى سويات طاقية عليا بواسطة مصابيح القوس الكهربائية أو مصابيح وميضية أو ليزرات أخرى مثل الليزر Nd-YAG المضاعف التواتر أو ليزرات بخار النحاس أو ليزرات أيونات الأرغون أو ليزر الآزوت وحتى ليزرات الإكسايمر. عادة يضخ المحلول الصباغي بطريقة عرضانية في التجويف الليزري بعد وضع المحلول في حجرة شفافة للضوء تدعى خلية تدفق.

الجدول 2- الأطوال الموجية الأولية لليزرات الغازية.

النوع	طول الموجة (nm)	النوع	طول الموجة (nm)
ذرّي		جزيئي	(many lines)
HeNe	544	CO	5000-6500
	594	CO_2	9000-11,000
	612	N_2O	10,300-11,100
	633	إكسايمر	
	730	F_2	157
	1150	ArF	193
	1523	KrCl	222
	3390	KrF	249
XeNe	2026	XeCl	308
	3506	XeF	350
أيون		بخار - معدن	
Ar-ion	275-477 (many lines)	Gold-vapor	628
	488	Copper-vapor	510
	514.5		578
Kr-ion	413.1		
	468	آخر	
	520.8	N_2	337
	530.9	HeCd	325
	647.1		442
Ne-ion	330-380 (many lines)		534
Xe-ion	526		538
	535	Iodine	1315
	540		

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

nm			3		
اسم الصبغ	مجال الأطوال الموجية (nm)	منبع الضخ	اسم الصبغ	مجال الأطوال الموجية (nm)	منبع الضخ
(Rhodamine 590)	563-625	Flashlamp	Polyphenyl 2	~383	Short-UV Ar
	563-607	Cu, 511 nm	Stilbene 1	~415	UV Ar
	566-610	XeCl	Stilbene 3	408-453	Nitrogen
	568-605	Nitrogen	(Stilbene 420)	410-454	XeCl
	573-640	Ar, 455-514 nm		412-444	Nd:YAG, 335 nm
Dicyanomethylene	598-677	Cu, 511 nm		414-465	UV Ar
	600-677	Flashlamp	Coumarin 102	~477	Kr, 407-415 nm
	600-695	Nitrogen	(Coumarin 480)	454-510	Ar, ultraviolet
	607-676	Nd:YAG, 532 nm		457-520	Flashlamp
	610-709	Ar, 455-514 nm		457-517	XeCl
Styryl 9	775-865	Nd:YAG, 532 nm		459-508	Nd:YAG, 335 nm
	784-900	Ar		453-495	Nitrogen
	810-860	Flashlamp	Coumarin 30	~518	Kr, 407-415 nm
Infrared dye 140	866-882	Nd:YAG 532, nm	Rhodamine 110	529-585	Ar, 455-514 nm
	875-1015	Kr, 753-799 nm	(Rhodamine 560)	529-570	Cu, 511 nm
	876-912	XeCl		530-580	Flashlamp
	900-995	XeCl		541-583	Nd:YAG, 532 nm
	906-1018	Nitrogen		542-578	XeCl
			Rhodamine 6G	546-592	Nd:YAG, 532 nm

ينشأ الإصدار الليزري ذو المجال العريض من تفاعلات بين السويات الطاقية الاهتزازية والإلكترونية لجزيئات الصباغ، حيث تنقسم سويات الطاقة الإلكترونية إلى عصابات طاقية عريضة مشابهة للعصابات الموجودة في ليزرات الحالة الصلبة الإلكترونية- الاهتزازية. تستخدم عناصر ضوئية انتقائية لطول الموجة مثل الموشور أو شبكة انعراج في المجاوب الضوئي لإجراء عملية توليف وانتقاء طول موجة الخرج المرغوبة.

إن المردودية العالية وإمكانية التوليف والترابط العالي لليزرات السائلة الصباغية جعلت من هذه الليزرات أداة مثالية هامة تستخدم في البحوث العلمية والتطبيقات الطبية والمطيافية، وبالإضافة إلى ذلك فإن إصدارها ذا الطيف العريض جعلها بصورة خاصة ملائمة جيداً لتوليد نبضات فوق قصيرة (انظر الجدول 3).

يبدو من النظرة المختصرة لأنواع الليزرات الرئيسية الثلاثة أنه لا يوجد شيء مشترك بينها. شملت ليزرات اليوم مناحي كثيرة جداً مختلفة لدرجة لا يمكن تصنيفها. لكن يوجد سبب للاستمرار في تطور تقانة الليزر.

عالم الديود الليزري الأسرع والأرخص والأصغر*

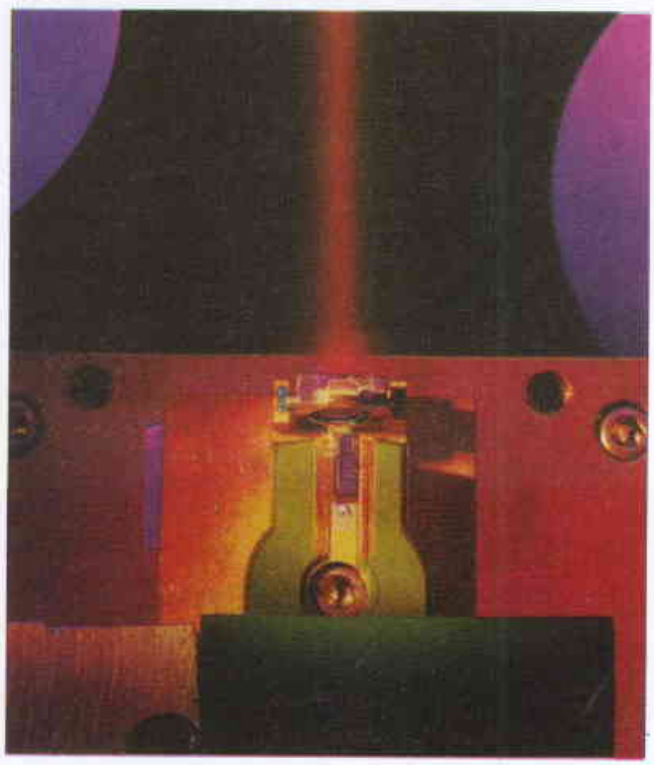
لقد حولت تقنيات أنصاف النواقل الديود الليزري البالغ الصغر
إلى محرّك فعّال في سبيل المعلومات المتصاعد.

توماس ف. هيغنز
محرر مشارك

ملخص

تطورت ليزرات أنصاف النواقل من الديودات المصدرة للضوء (LED) عبر إحداث إسكان معكوس وتغذية راجعة ضوئية فيها. ولقد تطلب الليزرات الأوائل كثافات عالية من التيار لذا توجب تشغيلها في نمط نبضي ولم يصبح التشغيل المستمر لها ممكناً حتى عام 1970، عندما ظهرت إلى الوجود البنى المتغايرة المزدوجة. وبغية الحصول على مردود أكبر جرى استخدام الهندسة الشريحية في تصنيع الديودات الليزرية. ثم ظهرت ليزرات البئر الكمومي الوحيد SQW والمتعدد MQW التي تتمتع بكسب أعلى وتيار عتبة أخفض . كل هذه الأنواع تميزت بالإصدار الحافّي للضوء الليزري ولكن تطور تصاميم التجويف الليزري أدى إلى اختراع ليزرات الإصدار السطحي بتجويف أفقي PCSEL وأخرى بتجويف شاقولي VCSEL وهذا يجعلها ذات إمكانيات هائلة لاستخدامها في تطبيقات كثيرة في الإلكترونيات الضوئية كالتخزين الضوئي والمعالجة السريعة للمعلومات وفي الاتصالات بالألياف الضوئية وغيرها من التطبيقات الواعدة.

الكلمات المفتاحية: ديود ضوئي، ديود مُصدِر للضوء، ديود ليزري، ليزر نصف ناقل.



ليزر نصف ناقل مؤلف من هزاز DBR (انعكاس براغ الموزّع) ومضخّم مستدق الطرف على جذاذة متراصة ينتج استطاعة ليزرية حتى 1 W.

في عام 1962 وبعد مرور عامين فقط على انتشار أول ليزر من قبل تيودور هـ. مايمان Theodore H. Maiman في مخابر هيوجس Hughes للبحث في ماليبو، كاليفورنيا، أومضت ليزرات أنصاف النواقل ضوءها إلى الوجود بهدوء.

حصلت الولادة في الواقع في ثلاثة مخابر مختلفة في نفس الوقت وهي: مركز التطوير والأبحاث الكهربائي العام (شينيكتادي، نيويورك)، ومركز أبحاث ت ج واطسون التابع لـ IBM (يوركتاون، نيويورك)، ومخبر لينكولن التابع لـ MIT (ليكسينغتون، ماساتشوسيتس). ولكن حوالي ثمانية عشر عاماً انقضت قبل أن تنضج التقانة بشكل كاف كي تلبي الطلب عليها في عالم التطبيقات الفعلي.

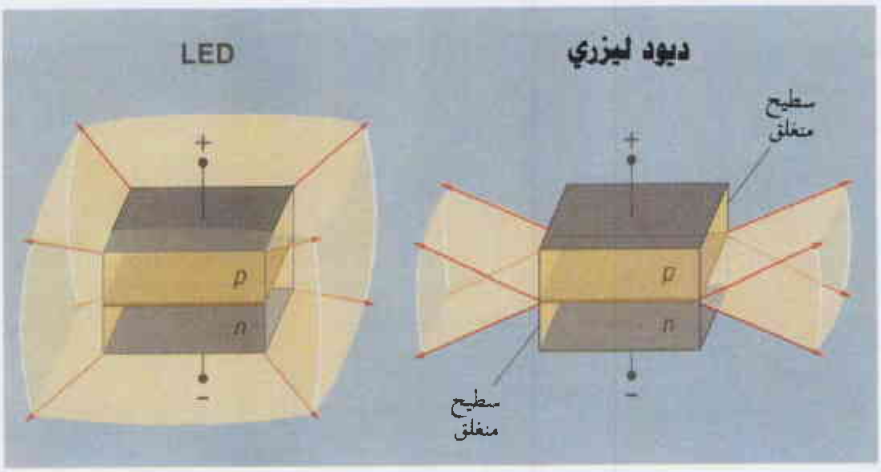
لم تعد اليوم ليزرات أنصاف النواقل ناضجة فحسب بل إنها أصبحت في الواقع تُستخدم من قِبل كل شخص تقريباً. فكل مسجل أقراص متراصة CD أو ذاكرة قراءة لهذه الأقراص تكون مزودة بليزر منها وهو ما يكون أيضاً لدى كل ماسح قراءة شيفرة محمول باليد، ومن غير الممكن تقريباً إجراء مكالمة بالهاتف لمسافة طويلة من دونها، كما أن توصيل المعلومات بسرعة عالية يتعلق بها أيضاً. ففي عام 1994 فقط تم بيع حوالي ثمانين مليون من ليزرات أنصاف النواقل في أنحاء العالم كافة، وبشكل تقريبي يفوق هذا العدد بمقدار 230 مرة العدد الكلي لليزرات الأخرى مجتمعة، وتستمر الفجوة بين هذه الليزرات بالاتساع طالما أن سبيل المعلومات يتعاظم ويتسع وأن التقانات الليزرية العتيقة تتراجع بالتدريج

* نشر هذا المقال في مجلة *Laser Focus World*, April 1995. ترجمة الدكتور شريف الحواط – قسم الفيزياء – هيئة الطاقة الذرّية السورية – مراجعة هيئة التحرير – هيئة الطاقة الذرّية السورية.

تاركة المجال لعالم منابع أنصاف النواقل الضوئية الأسرع والأرخص والأصغر.

الديودات الضوئية المعكوسة

تطورت ليزرات أنصاف النواقل من منابع الضوء الأبسط لأنصاف النواقل، الديود المصدر للضوء (LED). يتكون أساس هذا الديود من وصلة p-n منحازة، تماماً مثل كاشف الثنائي الضوئي. ولكن على العكس من الديود الضوئي فإن وصلة الثنائي المصدر للضوء تكون ذات انحياز أمامي بدلاً من أن تكون ذات انحياز عكسي (انظر الشكل 1 على اليسار). في الواقع إن الديودات المصدرة للضوء هي في جوهرها عبارة عن ديودات ضوئية معكوسة.



الشكل 1– ضوء منتشر في كافة الاتجاهات صادر عن وصلة مستوية للديود LED (على اليسار) في حين يولد تجويف فابري–بيرو المتشكل عن سطحين متوازيين ملصوقين حزمة ضوء أكثر اتجاهية وترابطاً وذلك من وصلة مستوية في ديود ليزري.

يتجه الحقل الكهربائي المطبق خارجياً نحو المنطقة n في شرط الانحياز الأمامي، وهو يجبر الثقوب على التحرك من المنطقة p إلى المنطقة n والإلكترونات الناقلة من المنطقة n نحو المنطقة p، هذا يخلق تياراً كهربائياً عبر النبيطة ويعرقل مرور الإلكترونات والثقوب عند الوصلة، وسط هذا الازدحام، تتحد الإلكترونات والثقوب وهذا يحرر طاقة من الوصلة. ويتعلق نوع الطاقة ببنية الفرجة العصابية لمادة نصف الناقل.

وعلى سبيل المثال إذا كانت وصلتا الفولطية للثنائي الضوئي السليكوني معكوستين أي انحياز أمامي للوصلة p-n، فإن الطاقة المحررة سوف تكون حرارية بمعظمها، هذا لأن السليكون ذو فرجة عصابية غير مباشرة. ولكي يتم توليد طاقة معظمها ضوئية في الوصلة، يجب أن تكون مادة نصف الناقل ذات فرجة عصابة مباشرة.

يعود التباين بين النوعين من أنصاف النواقل إلى حقيقة أن إلكترونات النقل والثقوب تخضع لديناميك مختلف في مواد مختلفة. لا تتغير الطاقة والاندفاع لحوامل الشحنة هذه من مادة إلى أخرى فحسب بل إنهما يتعلقان أيضاً باتجاه الحركة داخل المادة المعطاة.

في أنصاف النواقل ذات فرجة العصابة المباشرة، عندما يسقط إلكترون من قعر عصابة النقل إلى قمة عصابة التكافؤ، يتغير اندفاعه بمقدار قليل جداً وتتحرر الطاقة على شكل ضوء بطول موجة متناسب عكساً مع طاقة فرجة العصابة (حيث $\lambda = hc/E_g$). ولكن في أنصاف النواقل ذات فرجة العصابة غير المباشرة، فإن نفس انتقال الإلكترون يكون مصحوباً بانزياح ملموس في الاندفاع وبالتالي يتحرر الكثير من الطاقة على شكل حرارة. وهذا يفسر لماذا يتألف معظم أنصاف النواقل المصدرة للضوء من مواد ذات فرجة عصابية مباشرة من أمثال زرنيخيد الغاليوم GaAs. وكانت أولى الديودات المصدرة للضوء العملية قد صنعت من وصلات p-n لمادة GaAs. وهكذا كانت أوائل ليزرات أنصاف النواقل.

من حيث المبدأ، تصبح القفزة من الديودات المصدرة للضوء LED إلى ليزرات أنصاف النواقل أمراً بسيطاً، وهذا يتطلب انعكاساً سكانياً ونوعاً ما من التغذية الراجعة الضوئية. يمكن بلوغ الانعكاس السكاني في الثنائي المصدر للضوء بواسطة تطعيم المنطقتين p و n تطعيماً عالياً، ومن ثم تطبيق انحياز أمامي قوي عبر النبيطة بحيث يتم حقن كثافة عالية من الإلكترونات والثقوب إلى داخل الوصلة. يمكن من أجل التغذية الراجعة الضوئية تشكيل تجويف فابري– بيرو من سطحين صغيرين متقابلين ملتصقين بشكل متعامد على مستوي الوصلة (انظر الشكل 1 على اليمين). هذه الطريقة أخذت من فريق بحث روبرت ن. هول من مركز الأبحاث والتطوير التابع لشركة جنرال إلكتريك في عام 1962.

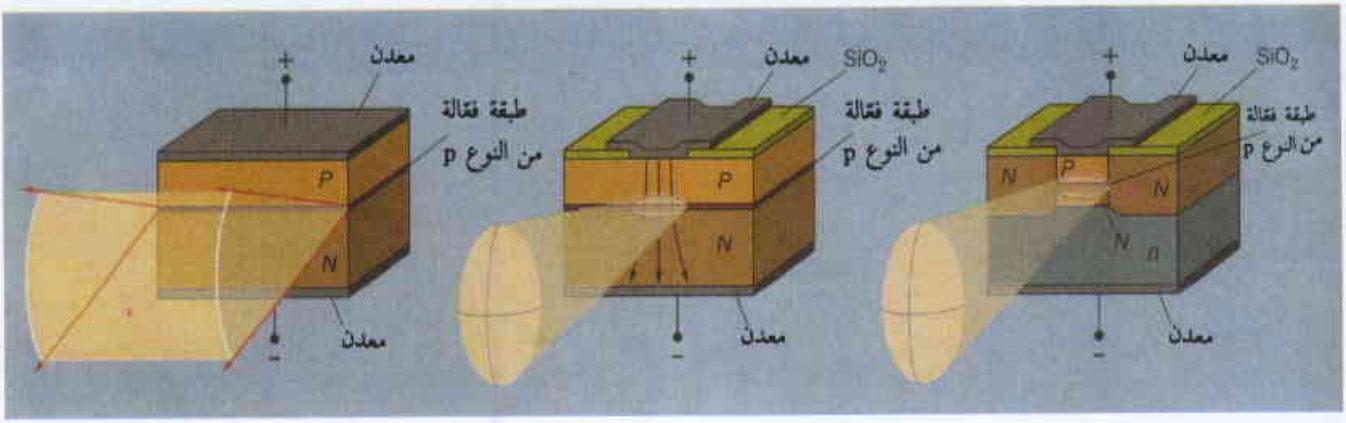
البنى المتغايرة المزدوجة

تطلبت ليزرات أنصاف النواقل الأولى (المعروفة أيضاً بالديودات الليزرية وليزرات الوصلة أو ليزرات الحقن) كثافات تيار عالية إلى حد خيالي لبلوغ عتبة الليزر، وبالتالي توجّب تشغيلها في نمط نبضي لتتجاوز الانهيار المربع الذي يحصل من جرّاء اشتداد التسخين. فالتبريد حتى درجة حرارة منخفضة وانخفاض التسخين الكافي كلاهما كان إلزامياً. في الواقع لم يصبح التشغيل المستمر تحت درجة حرارة الغرفة حتى عام 1970 ممكناً وذلك عبر تطوير البنى المتغايرة المزدوجة.

على خلاف الوصلات المتجانسة p-n البسيطة الموصوفة أعلاه، تتألف وصلة البنية المتغايرة المزدوجة من طبقة لمادة نصف ناقلة ذات فرجة عصابية مباشرة رقيقة جداً (حوالي 0.2 µm) متوضعة بين طبقتين أكثر سماكة من مادة نصف ناقلة (انظر الشكل 2 على اليسار).

إن المفتاح إلى هذا التصميم هو أن الطبقة الرقيقة من النوع p – المعروفة بالطبقة الفعّالة– مصنوعة من مادة ذات فرجة عصابية أصغر من الطبقتين من النوعين p و n الأكثر سماكة على جانبيها. عندما يطبّق انحياز أمامي على هذه البنية، تقوم الفولطية بحقن ثقوب وإلكترونات من المنطقتين p و n الخارجتين إلى الطبقة الفعالة المركزية، حيث تصبح محتبسة بين حاجزي الطاقة الكامنة من المادتين ذواتي الفرجة العصابية الأوسع.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy



الشكل 2– تدخل هندسة بناء البنى المتغايرة المزدوجة الأساسية (على اليسار) في هندستين شريحيتين هما: هندسة الكسب الموجّه (في الوسط) وهندسة الدليل الموجّه (في اليمين)، ويشار إلى المواد نصف الناقلة ذات فرجة عصابية عريضة من النوعين n,p بالحرفين الكبيرين N,P على التوالي. يلاحظ جريان التيار الضيق (بالأسهم) عبر بنية ذات كسب موجّه وأشكال الحزمة لكافة البنى الثلاث.

ففي البنية المتغايرة المزدوجة ذات الانحياز الأمامي، تستطيع عندئذ الإلكترونات والثقوب أن تدخل المنطقة الفعّالة، ولكنها لاتستطيع أن تهرب بنفس السهولة التي كانت تستطيع فيها الخروج من الوصلة المتجانسة p-n.

إن ما يدعى بحصر الحامل هذا يمكّن عدداً كبيراً من الإلكترونات والثقوب كي تصبح محملة في حجم صغير، الذي يترجم في الديود الليزري إلى كسب أكبر وتيار عتبة أخفض ومردود أعلى. وبالطبع مردود أعلى يعني ضوءاً أكثر وتسخيناً أقل.

هندسة الشريحة

لبلوغ مردود أعظم أيضاً يمكن تضييق الطبقة الفعّالة للديود الليزري للبنية المتغايرة المزدوجة في بعدين عوضاً عن بعد واحد فقط. هذا يُعرّف الطريقة الأساسية للديودات الليزرية ذات الهندسة الشريحية، التي تشكّل الغالبية العظمى من الديودات الليزرية التجارية المستخدمة في يومنا هذا، وتدخل ديودات هندسة الشريحة في نوعين أساسيين هما: الكسب الموجّه والدليل الموجّه.

إن عدداً من التقنيات يحدّ من السطح الجانبي لجريان التيار عبر الطبقة الفعّالة في ديودات الليزر ذات الكسب الموجه.تقوم طريقة بسيطة واحدة على وضع طبقة محزّزة من عازل مثل ثنائي أكسيد السليكون (SiO_2) بين تماس معدني موجب الشحنة والجزء المتبقي من البنية (انظر الشكل 2، في الوسط). هذا يعرض شريطاً رقيقاً من المعدن الذي يمكن أن يمر منه التيار عبر الطبقات نصف الناقلة. إن شريط التيار المار عبر الطبقة الفعّالة يُنشئ منطقة كسب الليزر، التي تعمل كدليل موجة ضيق للضوء.

وتستخدم ديودات الليزر ذات الدليل الموجّه بنية دليل موجة حقيقية من أجل حصر ضوئي لضوء الليزر في منطقة ضيقة من الطبقة الفعّالة. إن الثنائي الليزري ذا البنية المتغايرة الدفينة، الذي يُعدّ أحد التصاميم الأكثر فعّالية، يكتسب ميزة فضلى من قرينة انكسار منخفضة القيمة طبيعياً للمواد ذات فرجة عصابة واسعة باحتوائها ضوء الليزر عبر الانعكاس الداخلي الكلي.

في هذه النبيطة تُحاط منطقة فعّالة ضيقة من جهات أربع بمادة ذات فرجة عصابية واسعة وقرينة منخفضة، تعمل لاحتواء كل من الضوء وحوامل الشحنة (انظر الشكل 2، على اليمين). كما يمكن أن يُستخدم أيضاً الكسب الموجّه مع هذه البنية لتركيز جريان التيار عبر الشريحة الفعّالة.

لقد تم تطوير عشرات من بنى الديود الليزري ذات الكسب الموجّه، والدليل الموجّه من أجل تطبيقات مختلفة. وعلى سبيل المثال يمكن حصر التيار الكهربائي في ديودات ذات كسب موجّه بواسطة طبقات عازلة ومناطق مزروعة بالبروتونات أو حتى وصلات ذات انحياز عكسي. من أجل الديودات ذات الدليل الموجّه تحتوي البُنى الأكثر أهمية على بنية متغايرة دفينة، وبنية هلالية الشكل دفينة وبنية متغايرة دفينة مسطحة ذات قناتين ودليل موجة حرفي ومسطح ركازة ذي قنوات.

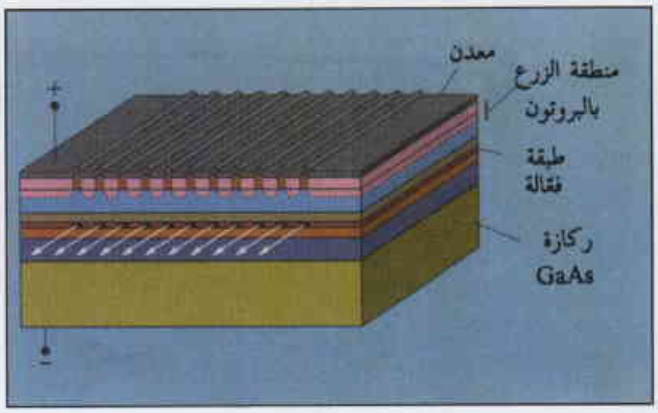
وبسبب الحصر الضيق لحوامل الشحنة والضوء الممكن بواسطة بنى ذات دليل موجّه (شرائط فعالة 1 µm من حيث العرض غير معروفة سابقاً) تكون الديودات الليزرية القائمة على هذه الهندسة المعمارية فعالة جداً.

تولّد المنطقة الفعالة الضيقة أيضاً حزمة ضوئية ضيقة ومترابطة، وإليها يعود الفضل في أن الديودات ذات الدليل الموجه هي الأكثر استعمالاً في الاتصالات الضوئية، وفي التخزين الضوئي، والطباعة الليزرية.

وتولّد الديودات ذات الكسب الموجّه حزمة ضوء أوسع وأقل ترابطاً، لكن هذا يسمح ببلوغ استطاعات أعلى مما هي عليه في الديودات ذات الدليل الموجّه. ومن أجل استطاعات عالية جداً ينبغي أن تُجمع الديودات الليزرية المنفردة على شكل صفيفات. وتصنع حالياً صفيفات حديثة من ديودات متراصّة قائمة على الهندسات المعمارية ذات الدليل الموجّه الشريحي أو الكسب الموجّه الشريحي.

يبين الشكل 3 صفيفة ذات كسب موجّه مقفلة الطور والتي يكون فيها الفاصل بين شريحتين فعّالتين مساوياً فقط حوالي 10 µm. وإن قرب كل شريحة يسهل الاقتران الضوئي بينهما، مما يساعد في المزامنة أو قفل الأطوار لحزم الضوء المتجاورة ويؤثر على جودة الحزمة لمجمل الصفيفة.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية



الشكل 3- تستخدم صفيفة الديود الليزري ذي الكسب الموجه منطقة مزروعة دورياً بالبروتونات لعزل جريان التيار عبر مناطق الكسب المنفصلة.

لقد تم بلوغ قفل الطور في صفيفات ذات دليل موجّه وكذلك في صفيفات غير موجهة، ففي الصفيفات غير الموجّهة تكون قرينة الانكسار للشرائح الفعالة أخفض قيمة مما هي عليه في المادة المحيطة، والتي تسمح بالتداخل الضوئي بينها.

إذا كان الفاصل بين هذه الشرائح مساوياً لعدد فردي من أنصاف طول الموجة فإن تسرب الإشعاع بينها يصبح مقترناً (في الطور) بشكل تجاوبي، وتدعى صفيفة الثنائي عندئذ صفيفة دليل موجة ضوئي تجاوبي أو صفيفة ROW، لقد بلغت صفيفات ROW سويات استطاعة مستمرة CW حوالي 0.5 W (2.1 W نبضية) محدودة بالانعراج.

إن صفيفات الديود الأعلى استطاعة هي عبارة عن قضبان متراصة مؤلفة من تجمعات من الشرائح الفعالة مرتبة وفق خط طوله حوالي 1 cm. لقد بلغت هذه النبائط سويات استطاعة مستمرة CW حوالي 100 W عند درجة حرارة الغرفة. وتجعل الارتفاعات الشاقولية لهذه القضبان المتراصة منها منابع ضخ ضوئية عالية الكفاءة من أجل ليزرات الجسم الصلب من أمثال ليزر العقيق المطعّم بالنيوديميوم Nd-YAG.

بُنى الآبار الكمومية

مع تطور تقنيات تصنيع أنصاف النواقل المتقدمة من أمثال التنضيد بالحزمة الجزيئية والتوضيع الكيميائي لأبخرة معدن عضوي (MOCVD)، أصبح بالإمكان تنمية بنى غاية في الرقة، فعلى سبيل المثال وباستخدام طريقة MOCVD أصبح من الممكن تنمية طبقات ذات سماكة لاتتجاوز بضع ذرات.

والآن، إذا ما هبطت سماكة الطبقة الفعّالة في بنية متغايرة مزدوجة إلى ما دون 50 nm تقريباً، فإن حركة الإلكترونات والثقوب تنحصر بشكل خطير في ذلك البعد الوحيد. وهذا يغيّر من الطاقة والاندفاع الكليين لحوامل الشحنة داخل المادة التي تعدِّل من الخواص الضوئية بطرق مهمة.

إن المفعول المهم في ذلك هو أن كلاً من عصابة النقل وعصابة التكافؤ تنقسمان إلى عصابات فرعية بتوزّعات طاقة تتعلق بثخانة المادة. ونتيجة أخرى هي أن احتمال الانتقال يمكن أن يتغير بين عصابة نقل فرعية وعصابة تكافؤ فرعية. يقتضي المفعول الأول أن طول موجة الضوء الصادر يمكن ضبطه بتغيير ثخانة الطبقة الفعالة، والمفعول الثاني يجعل عملية بلوغ الانعكاس السكاني أسهل.

يدعى الديود الليزري المصنّع من وصلة ذات بنية متغايرة مزدوجة وحيدة مع طبقة فعالة ذات ثخانة أقل من 50 nm بليزر البئر الكمومي المفرد (SQW). يشير هذا الاسم ضمناً إلى السلوك شبه الكمومي للطبقة الفعالة. تتمتع ليزرات SQW بكسب أعلى وتيارات عتبة أخفض بكثير من أجهزة البنية المتغايرة المزدوجة التقليدية. كما أن ضوء الخرج يكون فعلياً أكثر ترابطاً، ويمكن أن يولّف طول الموجة بشكل دقيق عبر تغيير ثخانة الطبقة الفعّالة.

ومن أجل كسب أعلى باستطاعة عالية، يمكن أن تصفف طبقات بنية SQW بما يشبه سطح بطاقات مجمعة، يعطي بئراً كمومياً متعدداً (MQW). تبلغ ليزرات MQW أداء أعلى عبر ضم حصر حامل بالغ الضيق SQW مع حصر ضوئي فائق لطبقات متعددة.

وكالبنى المتغايرة المزدوجة التقليدية تستطيع بنى البئر الكمومي أن تُوفّق هندستي البناء لكل من الكسب الموجّه والدليل الموجّه. لقد أنتج تطبيق تقانة البئر الكمومي تصاميم ديودات عالية الكفاءة من ليزرات الطبقة الفعالة المفردة إلى صفيفات عالية الاستطاعة.

تتضمن الأبحاث الأخيرة الأكثر حداثة في مجال بنى البئر الكمومي الآن الأسلاك الكمومية (حصر حامل ببعدين)، والنقاط الكمومية (حصر حامل بثلاثة أبعاد) وليزرات الشلال الكمومي (QC)، حيث تستخدم ليزرات QC انتقالات الإلكترون بين عصابات فرعية لعصابة النقل من أجل خلق ضوء ليزر في منطقتي طول الموجة المتراوحتين بين تحت الأحمر الأوسط وتحت الأحمر البعيد.

خرج الليزر

باستثناء ليزر الشلال الكمومي فإن طول موجة الضوء الصادر عن ديود ليزري يتعلق بشكل نهائي بطاقة فرجة العصابة لمادة نصف الناقل المستخدمة. فلأنصاف النواقل ثنائية العنصر طاقة فرجة عصابة ثابتة، بينما تغطي فرجة العصابة للمركبات ثلاثية ورباعية العنصر مجالاً من الطاقات معيناً بواسطة نسبة المزيج للعناصر المكونة (انظر الجدول). وعلى سبيل المثال كانت ديودات الوصلة المتجانسة الأولى GaAs ذات طول موجة خرج قريبة من 900 nm، في حين يمكن لطول موجة ديود الوصلة المتغايرة المزدوجة المزودة بطبقة فعّالة من GaAlAs أن تقع في أي مكان من 620 إلى 895 nm، بحسب نسبة العناصر إلى بعضها (تصدر فعلياً الديودات الليزرية العملية GaAlAs ما بين 750 إلى 850 nm)، وتصدر ديودات GaAlAs المستخدمة في مسجلات الأقراص المتراصة ضوءاً على طول موجة 780 nm تقريباً.

باستخدام مواد نصف ناقلة مختلفة يمكن للديودات الليزرية أن تغطي طيفاً من الأزرق (مركبات ZnSe) وحتى تحت الأحمر (مركبات ملح الرصاص)، لكن ومهما يكن المركّب البلّوري المستخدم في تنمية البنى للديودات الليزرية الحديثة، فإن كل طبقة يجب أن تكون ذات انسجام

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

مواد أنصاف النواقل الهامة

المركب	طول الموجة (μm)
AlGaInP	0.65–0.68
$Ga_{0.5}In_{0.5}P$	0.67
$Ga_{1-x}Al_xAs$	0.62–0.90
GaAs	0.90
$In_{0.2}Ga_{0.8}As$	0.98
$In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$	1.10–1.65
$In_{0.73}Ga_{0.27}As_{0.58}P_{0.42}$	1.31
$In_{0.58}Ga_{0.42}As_{0.9}P_{0.1}$	1.55
InGaAsSb	1.7–4.4
PbEuSeTe	3.3–5.8
PbSSe	4.2–8.0
PbSnTe	6.3–29
PbSnSe	8.0–29

شبيكي مع الركازة التي عليها تحدث التنمية. في الواقع، إن الأبعاد ما بين الذرات لكل طبقة بلّورية يجب أن تنسجم مع الركازة بحدود 0.1%.

يجعل هذا القيد في التصنيع من الصعب جداً صنع ديودات ذات خرج يقع ضمن مناطق طول موجة معينة، من أمثال المجال ما بين 0.9 إلى 1.1 μm.

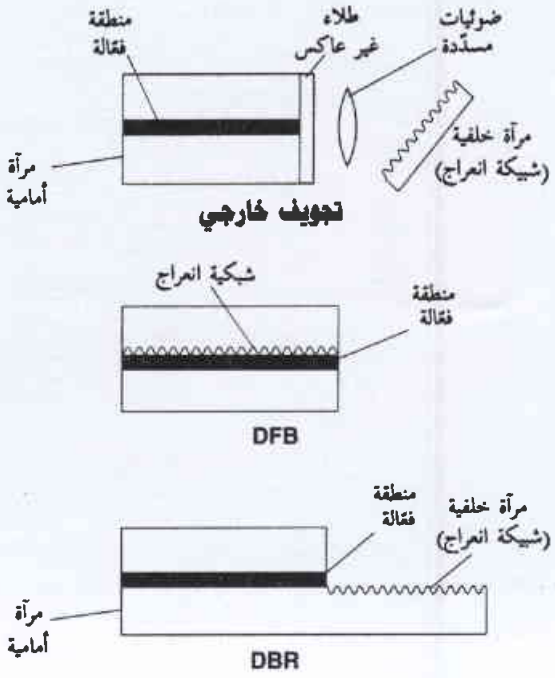
من ناحية ثانية إن التقدم الأخير في مجال ما يدعى هندسة بناء طبقة متوترة strained layer يجعل من الممكن بواسطة الطبقات المرنة الفائقة الرقة من الآبار الكمومية تخفيض طلب الانسجام الشبيكي إلى نحو 1%، وهذا يقدّم للمصممين مجالاً أوسع من المواد التي يمكن أن يختاروا منها حاجتهم.

يمكن للديودات الليزرية المعمولة على أساس بنى طبقة متوترة أن تُفصّل بحيث تشتغل على أطوال موجية غير متوافرة في ديودات مولّفة بشكل تركيبي، وأنها ذات موثوقية على نحو مدهش.

إنّ واحدةً من أولى التعدّيات التي قام بها الديود الليزري، والتي دخل على إثرها إلى منطقة طيفية ممنوعة تقع حوالي 1 μm، جاءت من تصميم طبقة متوترة مؤلفة من طبقات فعالة فائقة الرقة InGaAs وطبقات الحصر GaAlAs، وكلها نمت على ركازة GaAs – كبنية ممكنة بغية التصنيع مع طبقات بلّورية أكثر سماكة، واستخدم الليزر في ضخ مضخّمات ضوئية من الإربيوم المطعّم عند طول الموجة 980 nm.

لقد تم عبْر السنين، تطوير تصاميم عديدة لتجويف ضوئي من أجل إخراج الضوء من الديودات الليزرية، والتشكيلة الأوسع استخداماً هي تجويف فابري–بيرو الكلاسيكي المذكور أعلاه.

وقد تم تصميم تجاويف تجاوبية أخرى للتطبيقات التي تتطلب حزمة من الضوء عالية الترابط مع عصابة ضيقة من التواترات (انظر الشكل 4)،



الشكل 4– ثلاثة تصاميم لتجويف مفيد لضوء خرج ضيق العصابة ناتج من ديودات ليزرية هي: تجويف خارجي (في الأعلى)، تغذية عكسية موزعة (DFB في الوسط)، وانعكاس براغ الموزع (DBR في الأسفل).

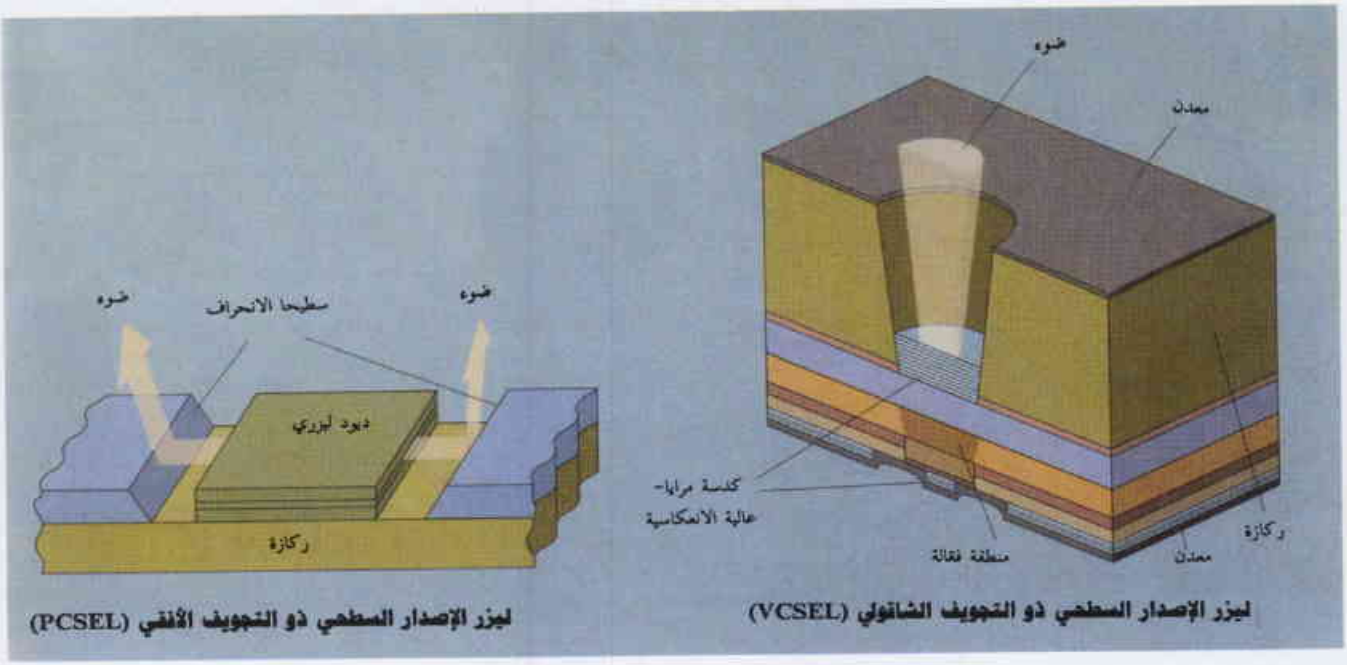
وأحد البدائل الأبسط هو في استخدام شبكة انعراج كمرآة خلفية خارجية، وإن طلاء غير عاكس على الوجه الخلفي يجنّب مزيداً من الضياع بانعكاس فرينل وبإمالة الشبكة يمكن توليف تواتر الخرج الليزري.

هناك تصميمان آخران مهمان لتجويف الديود الليزري، يستخدمان شبكات انعراج ويتضمنان: ليزر التغذية الراجعة الموزعة (DFB) وليزر انعكاس براغ الموزّع (DBR)، ففي ليزر DFB تتوضع بنية الشبكة على طول جانب واحد من الطبقة الفعالة لتؤمن تغذية كلية بانعكاس خلفي (انعراج) فقط من أجل طول موجة معينة.

وأما بقية أطوال الموجة الأخرى فتعاني من ضياعات تجويف عالية ولا تستطيع بلوغ حد العتبة. يطبّق ليزر DBR نفس المفهوم، ولكن الشبكة فيه تتوضع خارج الطبقة الفعالة وتتطلب طبقة ذات دليل موجّه من أجل ربطها ضوئياً مع منطقة الكسب في التجويف. إن نظامي التجويف هذين مستخدمان تجارياً (خاصة DFB) من أجل الاتصالات بالألياف الضوئية في المنطقتين الطيفيتين 1.3 و 1.55 μm. تُصدر كافة بنى الديود الليزري التي نوقشت حتى الآن إشعاعاً من حوافها. ولكن نوعاً آخر مهم إلى حد كبير من الديودات الليزرية يشع من سطحه.

يأتي التجويف الضوئي لهذا النوع من الليزر من تشكيلين أساسيين هما: ليزر الإصدار السطحي ذو التجويف الأفقي (PCSEL)، وليزر الإصدار السطحي ذو التجويف الشاقولي (VCSEL). وكلاهما مناسب بشكل جيد من أجل تشكيل صفيفات ديودات ليزرية ببعدين (انظر الشكل 5).

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية



الشكل 5– سطيحات مائلة بزاوية يمكنها حرف الضوء شاقولياً من ديود ليزري ذي إصدار حافي، محوّلة إياه إلى PCSEL (على اليسار). مقطع عرضي من VCSEL (على اليمين) يكشف تجويفاً ليزرياً شاقولياً مع مرايا مبنية من أفلام رقيقة منضدة (عالية الانعكاسية).

يتألف ليزر PCSEL بشكل جوهري من ليزر إصدار حافي مع بنية ضوئية كي تعيد توجيه حزمة الليزر عبر سطح الجذاذة، وبالتالي فإن هذه الليزرات هي على الأقل كتشكيلة الإصدار الحافي التقليدي، لها نفس نماذج القطوع الناقصة للحزمة ذات الحقل البعيد.

غير أنه في ليزرات VCSEL يكون التجويف الليزري متعامداً مع الطبقة الفعّالة، والذي يُنتج نموذجاً دائرياً للحزمة ويجعل النبيطة بكاملها مدمجةً إلى حد كبير، حيث يبلغ قياس تجويف VCSEL نموذجياً حوالي 6 µm، التي تولد ضوءاً مترابطاً جداً.

تتمتع صفيفات VCSEL, PCSEL المتراصة ذات البعدين بكمون هائل من أجل تطبيقات الإلكترونيات الضوئية، من أمثال المعالجة المتوازية الضخمة، والتخزين الضوئي عالي السرعة، وفي الربط الداخلي في شبكة الألياف البصرية. إن تطويرها وتطوير كافة الديودات الليزرية الحديثة هي تقدمة رائعة لتبيان الإمكانيات الخارقة لتقانة أنصاف النواقل. ■

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

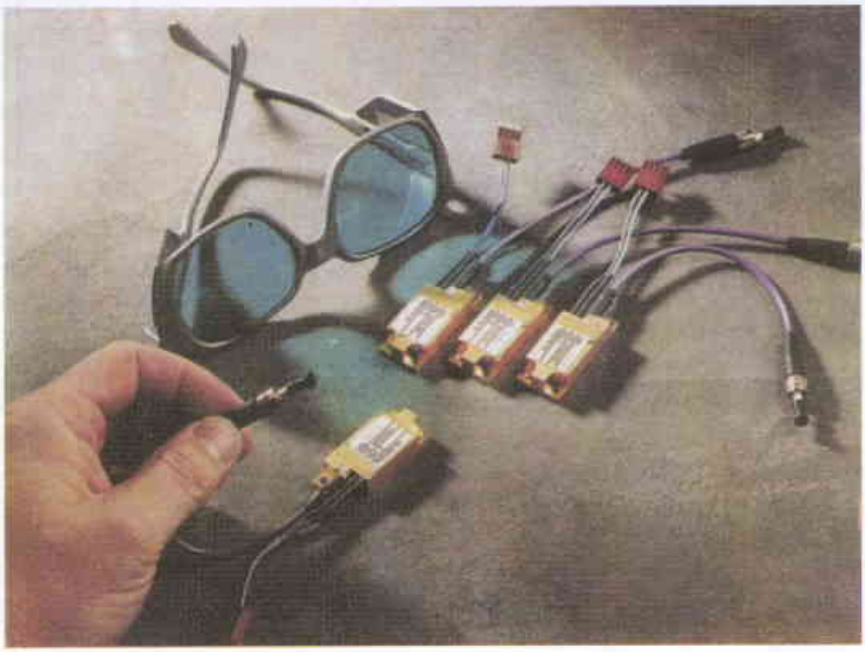
ديودات الليزر تنير الأقراص والاتصالات وعالم الطابعات*

إيرك ي. ليرنر
عضو هيئة التحريرفي مجلة Laser Focus World

ملخص

شهد ليزر أنصاف النواقل تطورات كبيرة في العقود الأخيرة جعلت منه لبّ وجوهر كثير من الصناعات الإلكترونية، والتي لم تعد ممكنة بدونه هذا اليوم. هذا الليزر صغير الحجم وقليل الكلفة وذو مواصفات تسمح بدمجه ضمن أبسط الأجهزة. يقدم هذا المقال مراجعة مختصرة عن أهم استخدامات هذا الليزر، ويتطرق بعد ذلك إلى مبدأ عمله وإلى الأنواع المختلفة منه. في النهاية يتم استعراض أهم التقنيات المستعملة في صناعته.

الكلمات المفتاحية: الديود الليزري، الديودات المُصدِرة للضوء، الطباعة الحجرية، تضيد موجّه، شريط ليزري، بنية لامتجانسة مضاعفة.



يُستخدم الديود الليزري بشكل متزايد في الطابعات ذات النوعيات العالية لنقل الصورة إلى المواد الناقلة ضوئياً.

بعد عقود من الزمن على اختراعه، وبعد جيل خلا كان يبدو كأداة عالية التقانة تبحث عن الطريق إلى التطبيقات وإلى السوق. لم يعد الليزر تلك الأشعة القاتلة المستخدمة في أفلام الخيال العلمي، إنما أصبح حقيقة معتادة تستخدم يومياً في المنزل، وفي المكتب وفي المصنع. وفي يومنا هذا يُشكّل الليزر القلب النابض للصناعتين الأكثر نمواً في العالم، صناعة الحواسب وصناعة الاتصالات.

يَنقل ضوء الليزر اليوم ملايين المكالمات الهاتفية ومعظم تيار المعلومات في شبكة الإنترنت. وديودات ليزرية صغيرة laser diode: LD تقرأ المعلومات والألحان الموسيقية المخزّنة على أقراص الـ CD التي تشكل الوسط الأكثر أهمية لتخزين المعلومات على نطاق واسع، كما أن الليزرات حققت ثورة في عالم الطباعة المتقدمة المعتمدة على الحاسب (انظر الصورة).

تلك الديودات الليزرية هي التي سمحت بإحداث النقلة من عالم الخيال إلى عالم التطبيق. واستفادت هذه الديودات من تقنيات الإنتاج العملاق المعتمدة في صناعات الإلكترونيات المكروية ومن السعر الزهيد للديود الواحد.

في هذا المقال، ضمن سلسلة العودة إلى أساسيات الليزر وتطبيقاته، سوف نتطرّق إلى استخدامات الديودات الليزرية، ومبدأ عملها، والمواد المصنوعة منها، وصناعتها، وفي نهاية عام 1988 تم نشر مقالات حول ليزرات من أنواع مختلفة مثل الليزر الأيوني، ليزر الإكسايمر، ليزر الجسم الصلب، ليزر ثنائي أكسيد الكربون، الليزرات القابلة للتوليف tunable laser، الليزرات المضخوخة بالديودات diode-pumped laser والليزرات الفائقة السّرعة ultrafast laser.

الديودات المصدرة للضوء ذات المرايا

تعتمد الديودات الليزرية في فكرتها على الديودات المُصدِرة للضوء LED. وكما هو الحال في الديود الضوئي photodiode: PD، تتكون البنية الأساسية للديودات المصدِرة للضوء من وصلة p-n p-n junction

* نشر هذا المقال في مجلة *Laser Focus World*, Jan. 1998, Vol. 34, No. 1. ترجمة الدكتور حسن حمادة- قسم الفيزياء- هيئة الطاقة الذرّية السورية-مراجعة هيئة التحرير-هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

ولكن فرق الكمون المطبق هنا يعاكس فرق الكمون المُطبّق لدى الديود الضوئي*.

تتكون وصلة p-n عند نصف الناقل السليسيوم من طبقة مُطعّمة بعنصر مانح يحتوي على إلكترون تكافؤي زائد مقارنة مع ذرة السليسيوم مشكّلة بذلك طبقة نصف ناقل من النوع السالب n تعلوها طبقة من السليسيوم مُطعّمة بعنصر متقبل يحتوي على إلكترون تكافؤي أقل من السليسيوم مشكّلة بذلك طبقة من نصف الناقل من النوع الموجب p.

تولّد هجرة الشحنات عند مكان الوصلة طبقة نفاد depletion layer من حوامل الشحنات الحرّة، الإلكترونات والثقوب، مع حقل كهربائي باتجاه المنطقة p لا يسمح بمرور التيار الكهربائي إلا باتجاه واحد.

في حالة الديودات الضوئية يتم تطبيق فرق كمون وفق الانحياز العكسي reverse bias potential يمنع مرور التيار في حال غياب الضوء، ولكن عند التعرض للضوء (ضوء مناسب) تتولد أزواج من الثقوب والإلكترونات تشكل تياراً كهربائياً. أما عند الديودات المصدرة للضوء فتكون العملية معكوسة، هنا يطبق فرق كمون موجب (انحياز أمامي) يولد تياراً كهربائياً. وبما أن الإلكترونات تجري من نصف الناقل من النوع n- نحو نصف الناقل من النوع p- فإنها تعيد الاتحاد recombine مع الثقوب الآتية من نصف الناقل من النوع p- عند الوصلة مصدرة بذلك طاقة على شكل ضوء. وبما أن الوصلة تستطيع امتصاص الضوء الذي يملك نفس التواتر الذي تصدره، فينبغي تصميم الوصلة بحيث يحدث الإصدار بالقرب من السطح مما يقلل من إعادة الامتصاص. وبشكل عام تكون فعالية الديودات المُصدِرة للضوء منخفضة ولا تتجاوز الـ 10%. وكما هو الحال في ضوء التوهج وضوء الفلورة، يصدر هذا الضوء في جميع الاتجاهات بشكل متساوٍ.

ومن أهم وجوه الاختلاف بين الديودات الليزرية والديودات المُصدِرة للضوء أن الإصدار يكون محثوثاً لدى الديودات الليزرية وليس تلقائياً مما يقود إلى كفاءة إصدار أعلى بكثير مما هي عليه في الديودات المصدرة للضوء.

كي تكون عملية الحث على الإصدار الضوئي فعّالة يجب أن تُحوّل الطاقة التي تعطيها الإلكترونات الهابطة من عصابة النقل إلى فوتونات وأن لا يضيع جزء منها على شكل حراري، مما يجعل طاقة الفوتونات غير كافية من أجل حث إصدار جديد من إلكترونات أخرى. هذا الأمر يحصر الفعالية الليزرية بالمواد ذات الفرجة الطاقية المباشرة direct energy gap كما هو الحال لدى زرنيخيد الغاليوم GaAs مثلاً، عندما تنتقل طاقة الإلكترون الهابط من عصابة النقل إلى عصابة التكافؤ كاملة إلى فوتون دون فقد من الاندفاع إلى الشبكة على العكس من حالة السليكون ذي الفرجة الطاقية غير المباشرة حيث ينتقل جزء من الاندفاع والطاقة إلى فونون phonon أي إلى حرارة مما يجعل هذه المواد غير مناسبة لصناعة الديودات الليزرية.

هناك وجه آخر من وجوه الاختلاف هو أن الديودات الليزرية تحتاج إلى تيارات أعلى تتجاوز عتبة محددة، تحت هذه العتبة يكون إسكان الحالات المُثارة منخفضاً إلى حدٍ لا يسمح بدعم التضخيم الليزري. في هذه الحالة يكون احتمال امتصاص الفوتون وتوليد إلكترون وثقب أعلى من احتمال الحثّ على الإصدار من الحالة المثارة. مع ارتفاع التيار يزداد إسكان الحالات المُثارة مقارنة مع حالات الاسترخاء مما يقود لتحقيق الشرط الأساسي المعروف في عملية الليزرة ألا وهو الانعكاس السكاني population inversion، عندها تبدأ عملية التضخيم الليزري لأن كل فوتون يولّد في المتوسط أكثر من فوتون جديد قبل مغادرة وسط الليزر أو قبل امتصاصه.

عند الوصول إلى مرحلة التضخيم هذه ترتفع الكفاءة الكمومية للنبيطة بتحويل الطاقة الكهربائية إلى ضوء إلى قيم أعلى بكثير من تلك السائدة لدى الديودات المصدِرة للضوء والتي قد تصل إلى 78% تقريباً، بينما تصل الكفاءة إلى 43% في الديودات الليزرية.

تحتاج عملية الليزرة إلى حصر الضوء وتكرار انعكاسه جيئة وإياباً في مكان محدد حتى تتشكل حزمة موجّهة، مما يدفع إلى جعل الطبقة النشيطة لدى الديود الليزري، كما هو الحال لدى الديود المُصدِر للضوء، محصورة بين طبقتين تمتلكان قرينة انكسار تختلف (أصغر) عن تلك التي تملكها الطبقة النشيطة. ويعمل الوجه المفلوق cleaved face عند النهاية المُصدِرة كمرآة عاكسة للضوء جزئياً، بينما تكون النهاية الأخرى عامة مطلية بطلاء عاكس لتنتج مرآة عاكسة كلياً.

مواد لمنابع ليزر الديود

المنظومة	الطبقة النشطة	الطبقة المغطية	ركازة	الطول الموجي المُصدر (μm)
III-V	AlGaAs	AlGaAs	GaAs	0.67–0.89
	GaInAsP	GaInP	GaAs	0.67–0.9
	GaInAsP	GaInP	GaAsP	0.60–0.89
	GaInAsP	AlGaInP	GaAs	0.67–0.89
	AlGaInP	AlGaInP	GaAs	0.56–0.66
	GaInAsP	AlGaAs	GaAs	0.65–0.89
	GaInAsP	InP	InP	0.90–1.8
	AlGaAsSb	AlGaAsSb	GaSb	1.1–1.8
	InAsSbP	InAsSbP	InAs	1.9–3.7
IV-VI	PbSnSeTe	PbSnSeTe	PbTe	4.0–10.5
II-VI	ZnSSe		GaAs	0.4–0.52

صغير، سريع وغير مكلف

الحجم الصغير، والتكاليف المنخفضة تجعل الديودات الليزرية مناسبة للكثير من التطبيقات، وتعطيها عملية التغذية بالتيار الكهربائي قابلية سريعة للتعديل وكفاءتها العالية تجعل منها الركيزة الأساسية للاتصالات الضوئية، فمثلاً يستطيع ضوء الليزر المترابط ذو الطول الموجي 1510 nm نظرياً حمل عشرات من التيرابت terabits في الثانية بواسطة الألياف الضوئية. وهناك تطبيق آخر هام لضوء الليزر في قراءة المعلومات المخزّنة على أقراص

* الديودات المصدرة للضوء تعمل فقط في حالة الانحياز الأمامي (المترجم).

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

الـ CD المستخدمة في الحواسب وأجهزة التسجيل الصوتي audio systems. إذ أن صِغر حجم الديودات الليزرية وسهولة تحريك الشعاع الليزري من مسار track إلى مسار آخر، يجعلان منها أدوات مثالية لمثل هذه التطبيقات علماً أن التوجّه هنا إلى أطوال موجية أقصر فأقصر لا يزال قيد البحث والتطوير أملاً برفع كثافة المعلومات المخزنة، لأن الأطوال الموجية الأقصر يمكن أن تُبأر على بقعة أصغر.

تقوم الديودات الليزرية بقراءة المعلومات الداخلة إلى الحاسب وبتصدير المعلومات الخارجة من الحاسب (إلى الورق مثلاً). تستخدم الطابعات الليزرية الديودات الليزرية لمسح الصور على مادة ناقلة ضوئياً photoconductive material وفي هذه التطبيقات تساعد تكاليفها المنخفضة وجودتها في العمل على إثبات جدارتها وتفوقها في هذا المجال.

لقد وسّعت هذه الميزات الفائقة للديود الليزري مجال استخداماته في المحسّات المتنوعة مثل الجيروسكوبات الليزرية المحمولة على كل طائرة حديثة. وبالإضافة إلى ذلك تستخدم الديودات ذات الاستطاعة العالية في معالجة المواد (قطع البلاستيك)، وفي الطب (التخثير الضوئي في جراحة العيون)، وفي مجالات أخرى.

مواد الديودات الليزرية

يعتمد طول موجة الليزر في الدرجة الأولى على الفرجة الطاقية للمادة المستعملة في بنية الليزر. وبما أن هذه الفرجة الطاقية ثابتة لدى المركّبات الثنائية binary compounds (على الأقل عند درجة حرارة معينة) فقد تم التوجه إلى المركّبات الثلاثية والرباعية والتي تسمح من خلال تغير نسب التركيز بتغيير الفرجة الطاقية وبالتالي طول موجة الليزر المُصدر. يعرض الجدول المرافق بعض هذه المواد وبعض خواصها.

من أجل أطوال موجية تحت المكرومتر كان الـ AlGaAs على ركازة من الـ GaAs من بواكير المركّبات المستخدمة، وكذلك المركّب GaInAsP على ركازة GaAs أو على ركازة GaAsP يمكن استخدامه أيضاً في هذا المجال. ومن أجل أطوال موجات في المجال من 1-1.67μm يمكن تنمية المركب GaInAsP على ركازة من الـ InP أو تنمية المركب AlGaInAs على الركازة InP نفسها.

إن ما يؤخذ على الديود الليزري المصنوع من الـ GaInAsP/InP هو حاجته للتبريد الكهرحراري لأنه لا يعمل بشكل فعّال في درجة الحرارة العادية، مما دفع إلى حل المشكلة عن طريق استخدام مادة الـ InGaAsN الموضّعة على ركازة من الـ GaAs والتي تعمل في نفس المجال الموجي وفي درجة الحرارة العادية. وقد قام بتطوير ذلك باحثون من مختبر هيتاشي المركزي للبحوث في اليابان وتمكّنوا من إصدار ليزر بأطوال موجية حتى 1.3 μm وربما أطول وفي درجة حرارة عادية. ومن أجل أطوال موجية فوق 2 μm يمكن استخدام المركبات الحاوية على الرصاص مثل الـ PbSnSeTe على ركازة من الـ PbTe أو مادة الـ InGaAsSb على ركازة من InAs أو الـ GaSb.

في كل هذه المواد يجب الحفاظ على نوعية عالية للشبكة البلّورية وإلا فإن عمر ومواصفات الليزر سوف تتردّى. ومن أجل الوصول إلى نوعية عالية للبلّورة يجب أن يكون هناك انسجام في ثوابت الشبكة المستخدمة حتى لا يتجاوز التشنج بين الطبقات والركازة أكثر من 0.1%، لكن تقانة صناعة الطبقات المتشنجة تحسنت في الفترة الأخيرة وسمحت برفع قيمة التشنج حتى 1% تقريباً مما جعل توسيع مجال المواد والأطوال الموجية ممكناً. تقع الطبقة المتشنجة الرقيقة جداً (بضعة نانومترات) بين بلّورتين مختلفتين وتمتص التشنج بدون تشكيل عيوب بلّورية.

البنى الليزرية

إن أكثر بنى الديودات الليزرية شيوعاً هو من النوع الشريطي البسيط ذي الإصدار الحافّي stripe edge-emitting type. هنا تتكون الطبقة النشِطة من وصلة p-n على شكل شريط (أو شريحة) ضيق بحيث يخرج الضوء بعد الانعكاسات الداخلية من الحافة. توضع هذه الطبقة النشِطة بين طبقتين مختلفتين من أنصاف النواقل تملكان قرائن انكسار أصغر من الطبقة النشِطة مما يقود إلى وصلة غير متجانسة مزدوجة. في هذه الحالة وبسبب اختلاف قرينتي انكسار هاتين الطبقتين تشكل الطبقة النشطة دليلاً موجياً كما يوضح ذلك الشكل 2 في الصفحة 31.

عندما تكون الفرجات الطاقية للطبقات المغطّية أكبر من الفرجة الطاقية للطبقة النشطة (كما هي العادة) لا يتم امتصاص الضوء الناتج في تلك الطبقات المغطية.

تُشكّل عملية فلق البلّورة عند النهاية المصدِرة للضوء مرآة ذات قدرة عاكسة جزئية، ويتم طلاء الطرف الآخر بحيث يشكل مرآة عاكسة تماماً، ويحدد سطحا المرآتين المجاوب الليزري.

وحسب حصر الطبقة النشِطة من الجوانب تُقسّم الليزرات إلى نوعين: الأول يسمى موجّه بالكسب gain guided والآخر يسمى موجّه بالقرينة index guided. في حالة التوجيه بالقرينة تحاط الطبقة النشِطة من الجوانب والأعلى والأسفل بمواد ذات قرينة انكسار أصغر كما يبدو في الشكل 2 في الصفحة 31. في حالة التوجيه بالكسب تُحدَّد الطبقة النشطة بواسطة توزيع التيار الكهربائي (بأن يكون محدوداً مكانياً) مثلاً عن طريق منع التيار من الوصول إلى باقي الديود بواسطة مواد عازلة.

يمكن صناعة شريط موجّه بالقرينة بثخانة 1 μm مما يجعل كل الضوء محصوراً وموجّهاً ضمن هذا المكرومتر، إلا أن ظواهر الانعراج تقود إلى تعريض الحزمة الخارجة. بشكل عام تقع القيم الدارجة لطول الديود الليزري حول 300 μm ولعرضه حول 100 μm بينما تكون ثخانة الطبقة النشطة 2 μm تقريباً.

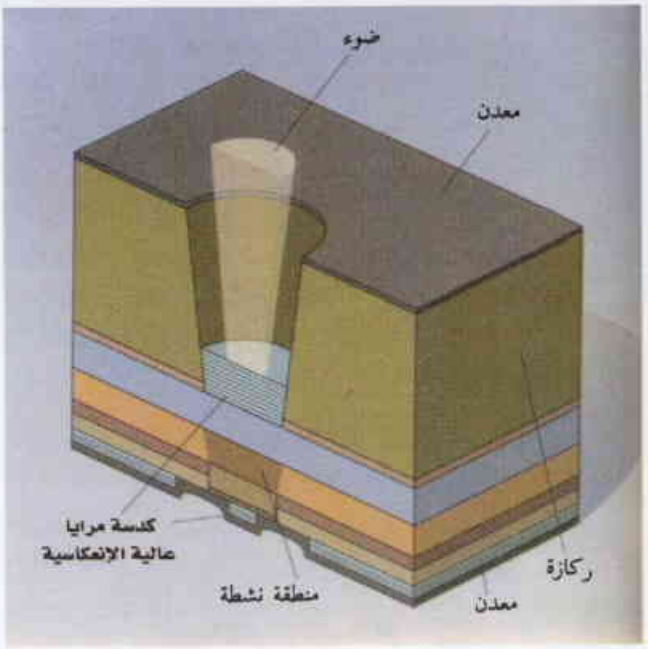
من أجل الحصول على استطاعات عالية وحزمة ضوئية رفيعة يمكن وضع عدة شرائط ليزرية على شكل مصفوفة من الديودات الليزرية. في هذه النبائط تتناوب الطبقات النشِطة مع الطبقات غير النشِطة بأبعاد فاصلة تبلغ 10 μm على سبيل المثال. وفي المصفوفات الليزرية الأكثر تعقيداً يمكن وضع عدة طبقات نشِطة على شكل مصفوفة ثنائية الأبعاد.

تستطيع المصفوفات الديودية الليزرية إنتاج استطاعات أكثر من 10 واط. يساهم تعريض هذه المصفوفات أيضاً في تخفيض آثار الانعراج بحيث تصبح الحزمة ضيقة. كل هذه الميزات ترفع من كفاءة الديودات الليزرية من أجل استخدامها في الألياف البصرية.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

هناك نوع جديد العهد من الديودات الليزرية لا يصدر من الحافة إنما من السطح ويسمى الليزر السطحي ذا المجاوب العمودي vertical cavity surface emitting laser VCSEL. هنا يتكون المجاوب من طبقتين: سفلية عاكسة تماماً وعلوية عاكسة جزئياً تحصران الطبقة النشطة كما يبدو في الشكل 1*.

هذا النوع من الليزرات ذو محاسن جمّة أهمها إمكانية تصغيره ووضعه بطريقة سهلة على الجذاذة chip وبعدد كبير (ملايين)، كما يملك عموماً عتبة ليزرية صغيرة مما يجعلها مناسبة للربط الضوئي والحاسب الضوئي.



الشكل 1- ليزر مصدر سطحياً ذو مجاوب عمودي يتكون من طبقة نشيطة محاطة بكدسات عالية الانعكاس high reflection stacks من الأعلى ومن الأسفل والتي تشكل المجاوب العمودي بحيث يتم الإصدار من السطح.

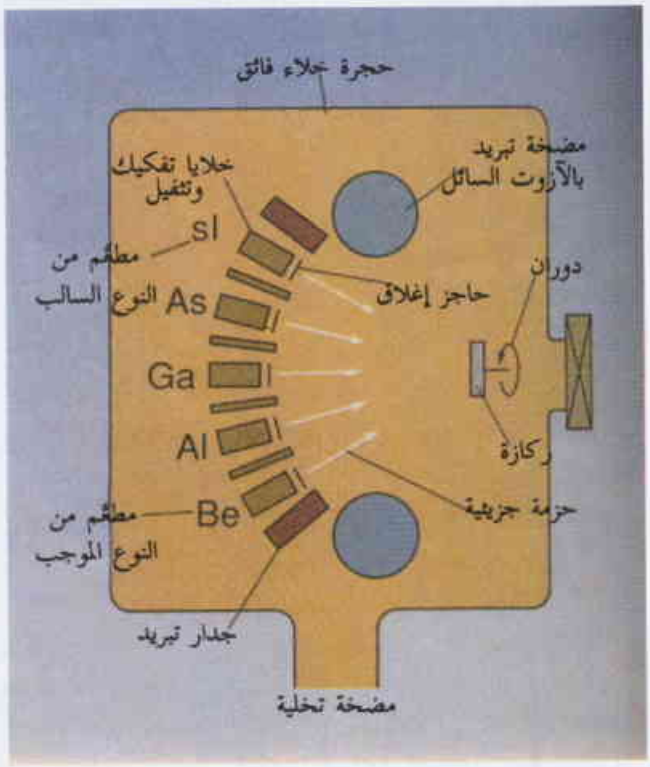
صناعة الديود

تُستخدم في صناعة الديودات الليزرية نفس التقنيات المستخدمة في صناعة الإلكترونيات المكروية. في البداية تصنع الطبقات المتلاحقة بواسطة طريقة التنضيد الموجّه epitaxy وبعدها ترسم أهداب المخطط البنيوي بواسطة الطباعة الحجرية الضوئية photolithography (أحياناً غير ضوئية) على طبقة المقاوم الضوئي photoresist، بعدها تُجرى عملية حل للمقاوم الضوئي المُعالج ضوئياً بواسطة محاليل كيميائية وأحياناً يضطر إلى إعادة هذه الخطوات عدة مرات.

يمكن أن يجرى التنضيد الموجّه بعدة طرائق، فمثلاً طريقة التنضيد الموجّه في الطور السائل liquid phase epitaxy تنطلق من محلول مشبع، وتكون الركازة محمولة على قارب كربوني نقي جداً يمرّر على بوتقات تحتوي على مصهور العناصر الداخلة في تركيب نصف الناقل، مثلاً بوتقة تحوي الألمنيوم وأخرى تحتوي على الـ GaAs المصهور. توضع الركازة على تماسّ مع هذه البوتقات وعندها تخفض درجة الحرارة حتى تتبلور هذه المادة بسماكة محددة على الركازة.

في طرائق التنضيد الموجّه في الطور البخاري vapour phase epitaxy تنقل العناصر الداخلة في تركيب نصف الناقل على شكل غازات مثل المركبات الهالوجينة ($GaCl_3$) أو معدنيات عضوية organometallic مثل الـ trimethyl gallium [$(CH_3)_3Ga$]. عندما تلامس هذه الغازات الركازة تتفكك بالفعل الحراري** وتبقى الذرات المطلوبة.

في طريقة التنضيد الموجّه باستخدام الحزمة الجزيئية molecular beam epitaxy يتم توجيه حزمة من المادة المراد توضيعها إلى الركازة الموجودة في مجال من الضغوط المنخفضة جداً كما يوضح ذلك الشكل 2.



الشكل 2- التنضيد الموجّه بالحزمة الجزيئية كما هو مبين لبلّورة AlGaAs/GaAs، هذه الطريقة تسمح بتوضّع دقيق لطبقات رقيقة جداً.

تمكّن طرائق التنضيد الموجّه من صناعة طبقات رقيقة جداً (في مجال النانومتر) كذلك صناعة سطوح بينية بسماكة ذرة واحدة.

* عادة تكون هذه الطبقات العاكسة مكونة من عاكسات براغ الموزعة distributed Bragg reflector: DBR التي تستطيع إعطاء قدرات عاكسة عالية جداً.

** يقول الكاتب -تتفاعل- ولكن الحقيقة هي تفكك حراري بالقرب من الركازة الساخنة (المترجم).

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

الطباعة الحجرية الضوئية هي الخطوة اللاحقة لعملية الإنماء، يُستخدم الضوء فوق البنفسجي بصورة نموذجية لإضاءة قناع يحمل المخطط البنيوي المطلوب الذي يُسقط على رقاقة مع إمكانية التصغير من خمس إلى عشر مرات. وللحصول على عمل ذي ميز أعلى، يمكن استخدام أشعة X أو حزم إلكترونية أو أيونية بدون قناع حيث يمكن توجيهها على السطوح المختارة. تُحدد مادة المقاوم الضوئي بحيث يُحدث تعريضها للضوء أو لإشعاع آخر تغيراً كيميائياً في تركيبها يجعلها قابلة للحلّ في محلول التنميش الكيميائي.

عند معالجة جملة البنية الديودية، بما فيها المقاوم الضوئي المشعَّع، بالمحاليل الكيميائية المناسبة تُحلّ الطبقة التي كانت عارية تحت القناع (أو العكس وذلك حسب الطلب) مما يؤدي إلى ظهور مادة نصف الناقل مباشرة إلى السطح، بينما يحمي المقاوم الضوئي باقي سطح نصف الناقل من المحاليل الكيميائية.

يمكن أن يكون التنميش بالمحاليل الكيميائية متناحياً isotropic بحيث تتم الإذابة أيضاً باتجاه المقاوم الضوئي وتحته، وقد يكون لا متناحياً anisotropic بحيث تعتمد سرعة الإذابة على الاتجاه ضمن البلورة، والطريقة الأخيرة واسعة الانتشار.

توجد أيضاً طرائق تنميش جافة dry etching تعتمد على الرشرشة الفيزيائية physical sputtering.

في بعض الحالات تستخدم شبكات انعراج للتحكّم بطول الموجة الصادرة من الديود وذلك باستخدام أهداب تداخل هولوغرافية من أشعة الليزر، وهذا يُجنب استخدام الأقنعة ويساعد في الحصول على دقة عالية.

تتضمن الخطوات الأخيرة في صناعة الديود الليزري عملية التغليف packaging وفي بعض الحالات إضافة ألياف بصرية تسمح بتوجيه الشعاع (ذيل الخنزير).

أخيراً ما تزال الصناعة تحاول بكل جهدها تحسين مواصفات الديودات الليزرية، ورفع مردودها وتخفيض تكاليفها من أجل زيادة استخدامها. ■

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

ديودات البوليميرات*

ريتشارد فرند
مختبر كافنديش - كامبردج - المملكة المتحدة
جيرمي بيروغس
تقانة عارضات كامبردج - كامبردج - المملكة المتحدة
تاتسويا شيمودا
شركة سايكو - ايسون - سوا-شي - ناغانو - اليابان

ملخص

تستخدم البوليميرات نصف الناقلة كعنصر فعّال في الديودات المصدرة للضوء (LEDs). وأكثرها استعمالاً هو متعدد فنلين الفينيلين poly phenylene vinylene أو PPV. كانت الكفاية الكمومية للنبائط المبكرة منخفضة وكان عدد الفوتونات التي تصدرها قليلاً بالنسبة إلى عدد الشحنات التي تحقن بها. طورت هذه النبائط بعد زيادة فهمنا لكيمياء السطوح البينية بين الإلكترود والبوليمير مما سمح للنبائط الجديدة بحقن كل من الإلكترونات والثقوب في طبقة نصف الناقل بسهولة. تقدّم أداء بوليميرات LEDs بسرعة إذ أصبحت فعّالية كل من الديودات المصدرة للضوء حالياً، العضوية منها واللاعضوية، كفعّالية مصباح التنغستين الكهربائي التقليدي. سينتشر استعمال بوليميرات LEDs إذا أمكن استعمالها في العارضات المكتملة الألوان وتقدر مبيعاتها سنوياً بمالايزيد عن أربعين بليون دولار أمريكي. تمّ أخيراً لدمج الألوان الرئيسة الثلاثة معاً على شاشة واحدة تطوير طريقة جديدة تعتمد على النفث الحبري.

الكلمات المفتاحية: ديودات مصدرة للضوء، فولطيات ضوئية، طلي دوّامي، كفاية، مصفوفة منفعِلة، مصفوفة فعّالة، وصلة متغايرة.

تنتقل البوليمرات نصف الناقلة من مختبرات البحوث الى أسواق البيع عندما تدرك الصناعة بوضوح الإمكانية التجارية للديودات المصدرة للضوء القائمة على البوليمير والعارضات والفولطيات الضوئية.

البوليميرات رغم أنها مرنة فهي مواد قوية من الناحية الميكانيكية وهي مشهورة جداً لدى كل إنسان بدءاً من صادّات السيارات وحتى اللباس المقاوم للرصاص . أما الشيء الأقل شهرة فهو حقيقة أن بعض البوليميرات تستطيع أيضاً أن تنقل الكهرباء وأن تصدر الضوء. إن هذه البوليميرات التي أثارت اهتمام الباحثين في العشرين سنة الماضية مهيأة الآن لدخول عالم التجارة. يوجد أحد أهم تطبيقاتها المتقدمة في العارضات حيث يمكن استخدام البوليميرات نصف الناقلة كعنصر فعّال في الديودات المصدرة للضوء (LEDs). لقد كانت فيليبس وهي شركة الإلكترونيات الهولندية العملاقة، أسرع الشركات بدخول السوق وستعمل في نهاية هذا العام على إقامة خط إنتاج محدود للديودات المصدرة للضوء في مصنعها في هيرلن في هولندة. ومن المحتمل أن تستعمل النبائط كأضواء خلفية من أجل الهاتف النقّال والمنتجات الإلكترونية المحمولة الأخرى. هنالك تطبيق واعد آخر للبوليميرات نصف الناقلة في حقل الفولطيات الضوئية حيث يمكن استخدامها كمكاشيف أو خلايا شمسية.

السبب الرئيس لكل هذا الاهتمام هو أن البوليميرات نصف الناقلة سهلة المعالجة. تتألف نبائط أنصاف النواقل من سلسلة طبقات - إلكترودات، مادة نصف الناقل الفعال، عوازل، وهكذا - وسيكون الأمر جذاباً إذا أمكن تجميعها في محلول، كما تستطيع أن تقوم به البوليميرات.

ميزة أخرى من ميزات النبائط نصف الناقلة القائمة على البوليمير هي أن هندسة السطوح البينية بين مختلف الطبقات عند تصنيع النبائط سهلة.

روائع البلاستيك: عارضة من ديودات بوليميرية مصدرة للضوء تملك العنصورات فيها متعدد (فنلين الفينيلين) كعنصر فعّال.

* نشر هذا المقال في مجلة *Physics World*, June 1999. ترجمة هيئة التحرير - هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

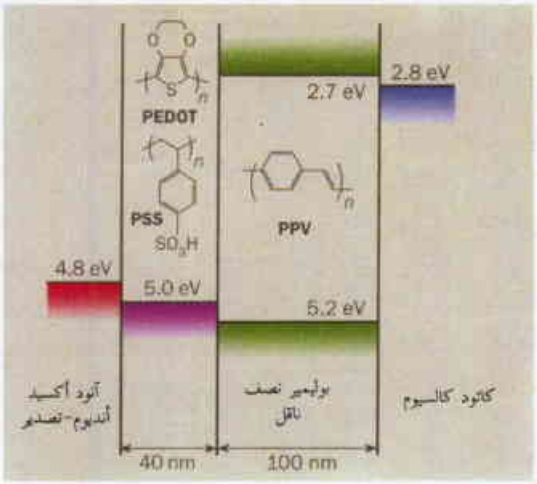
وبالمقابل، من الأهمية بمكان أن تكون سطوح أنصاف النواقل اللاعضوية منتظمة بنيويا على المستوى الذري. إن أياً من الروابط الكيميائية المقطوعة على سطح هذه المواد سيؤدي إلى مدارات غير رابطة يمكن أن توقف عمل النبيطة، لكن هذه المشكلة لا تحصل في البوليميرات نصف الناقلة التي لاتملك إلا رابطتين تشاركيتين فقط ضمن كل جزيء. وهذه ميزة هامة لأنها تسمح غالباً باستعمال أي تجميع من المواد البوليميرية نصف الناقلة في بناء نبيطة طبقة فطبقة. وكذلك، فإن البوليميرات نصف الناقلة مفيدة من وجهة النظر الأساسية لأن خواصها الإلكترونية تقع على مفترق الطرق بين المواد اللاعضوية التقليدية كالسليكون والمواد الجزيئيةالحيوية الفعّالة ضوئياً.

أسس الربط

تشكل الروابط الأحادية والروابط كربون - كربون المضاعفة المتناوبة المظهر المشترك في جميع أنصاف النواقل الجزيئية القائمة على الكربون. يقال على مثل هذه المواد أنها مترافقة إذا كان من الممكن تبادل مواقع الروابط الأحادية مع الروابط المضاعفة لتنتهي ببنية تفي بمتطلبات الربط الكيميائي للكربون. تتشكل الروابط كربون - كربون المضاعفة عندما يتّحد مداران من المدارات الثلاثة 2p في كل ذرة كربون مع المدار 2s لتشكيل المدارات الثلاثة الهجينة sp^2. تقع هذه المدارات في مستو صانعة بين مدار وآخر زاوية 120° وتشكل ثلاثة مدارات "جزيئية" σ مع الذرات المجاورة على أن يكون أحدها مع الكربون. يتجه المدار p الثالث p_z، في ذرة الكربون بشكل عمودي مع المدارات الهجينة الأخرى، ويتراكب مع المدار p_z في ذرات الكربون المجاورة ليشكل زوجاً من ما يسمى المدارات الجزيئية π التي تنتشر "أو اللامتموضعة" فوق سلسلة البوليمير. يشكل المدار π الأقل طاقة (أو الرابط) عصابة التكافؤ، بينما يشكل المدار الأعلى طاقة π* (أو مضاد الربط) عصابة النقل. تعطي "الفرجة العصابية" هذه للبوليمير سلوكه نصف الناقل.

ولكن يجب على البوليمر أيضاً أن يفي بشرطين آخرين ليعمل كنصف ناقل. أولهما: يجب أن تكون روابط σ أقوى بكثير من روابط π إلى حد أنها تستطيع إبقاء الجزيء سليماً حتى في حالات الإثارة - مثل الإلكترونات والثقوب - في روابط π . (إن إثارات أنصاف النواقل هذه تضعف روابط π وتؤدي إلى انفصام الجزيء إلى أجزاء فيما لو لم يكن هنالك روابط σ). وأما المتطلب الآخر فهو أن تتراكب مدارات π في جزيئات البوليمير المجاورة مع بعضها البعض بحيث تتحرك الإلكترونات

الشكل 1- بوليميرات LEDs



ديود بوليمير مصدر للضوء مصنع من متعدد (فنلين فينيلين) أو "PPV" محصور بين كاثود كالسيوم وآنود مصنع من بوليمير ناقل على أكسيد الإنديوم - القصدير (ITO). يحقن الكالسيوم الإلكترونات إلى داخل فلم البوليمير، بينما يحقن الآنود الثقوب. وعندما يأسر الإلكترون والثقب كل منهما الآخر ضمن الـ PPV يشكلان إكسيتونات محايدة - حالات ربط مثارة تضمحل بإصدار فوتون ضوئي. تُشكل طبقة ITO عادة على ركازة من الزجاج، وتصنع النبيطة بتوضع الطبقات المختلفة كل منها في دورها على هذه الركازة. البوليمير الناقل المبين في الشكل هو مشتق متعدد (ايتيلين ثنائي اوكسي) تيوفين (PEDOT) مطعّماً بـ متعدد (ستيارين حمض السلفونيك) (PSS).

والثقوب في الأبعاد الثلاثة بين الجزيئات. ومن حسن الحظ فإن العديد من البوليميرات تحقق هذه المتطلبات الثلاثة.

تملك معظم البوليميرات المترافقة فرجات عصابية نصف ناقلة قيمتها 3-1.5 إلكترون فولط مما يعني أنها مثالية لنبائط الإلكترونيات الضوئية التي تصدر الضوء المرئي. يمكن أيضاً تعديلها كيميائياً بطرائق متنوعة، وقد بذل الكثير من الجهد لإيجاد مواد يمكن معالجتها بسهولة من المحلول - سواء كبوليميرات منحلة مباشرة أو كبوليميرات "طليعية" تعالج أولاً في محلول ثم تحول في موقعها لتشكل بنية نصف ناقلة.

أكثر البوليميرات استعمالاً هو متعدد (فنلين الفينيلين) أو PPV الذي له فرجة عصابية تبلغ حوالي 2.5 eV ويصدر ضوءاً أصفر - أخضر. يحضّر الـ PPV من حلقات بنزينية - ترتبط وحدات الفنلين مع بعضها البعض عبر ذرتي كربون كل منهما مرتبطة أيضاً مع ذرة هدروجين مفردة، أو وحدة فينيلين (الشكل 1). يعدل الباحثون كثيراً PPV وذلك بوصل سلاسل جانبية للألكيل مثل $(CH_2)_n CH_3$ إلى حلقات الفنلين. يجعل هذا الأمر البوليمير ذوّاباً في مذيبات مناسبة مثل الكسايلين. يمكن معالجتها بعدئذ بسهولة من المحلول باستعمال تقنيات مثل الطلي الدوّامي الذي توضع فيه قطرة من محلول البوليمير على ركازة دوّارة بسرعة لتشكيل فلم رقيق منتظم.

ديودات بوليمير مصدرة للضوء

يمكن أن تصنع ديودات بوليمير مصدرة للضوء فعّالة (LEDs) من بنى بسيطة جداً. صنّعت النتيجة أو الثمرة الأولى، التي نشر عنها اثنان من مؤلفي المقال RF و JB عام 1990، باستخدام طبقة رقيقة من البوليمير مُقْحَمة بين إلكترودين. يحقن الإلكترود السالب الإلكترونات إلى داخل فلم البوليمير بينما يحقن الإلكترود الموجب الثقوب. وعندما يأسر الإلكترون والثقب كل منهما الآخر في داخل البوليمير يشكلان "إكسيتوناً" معتدلاً، "الذي هو عبارة عن حالة ربط مثارة تستطيع أن تتفكك بإصدار فوتون. تعرف هذه العملية بـ"التألق الكهربائي" نظراً لأن إصدار الضوء يكون بسبب الحقل الكهربائي بين الإلكترودين. يتم اختيار الإلكترود السالب بأن يكون تابع عمله منخفضاً إذ يمكن عندها حقن الإلكترونات بسهولة، بينما يتم اختيار الإلكترود الموجب بأن يكون تابع عمله مرتفعاً إذ يستطيع عندها امتصاص الإلكترونات من البوليمير. يُصنع الإلكترود الحاقن للثقب عادةً من أكسيد الإنديوم - القصدير الشفاف ضوئياً مما يسمح للضوء بأن يترك النبيطة.

لم تكن هذه النبائط المبكرة جيدة، فهي تصدر عدداً قليلاً جداً من الفوتونات بالنسبة إلى عدد الشحنات التي تحقن بها، أي أن "كفايتها الكمومية "كانت منخفضة. على كل حال، فقد جرى على ما يظهر، صُنع نبائط ذات بنى مماثلة تصل كفاياتها إلى 10% (الشكل 1). ويعود الفضل في هذا التطوير إلى زيادة فهمنا لكيمياء السطوح البينية بين الإلكترود والبوليمير مما سمح للنبائط الجديدة بحقن كل من الإلكترونات والثقوب في طبقة نصف الناقل بسهولة.

يبدو أيضاً بأن أكسيد الإنديوم – القصدير هو الخيار الواضح للإلكترود الموجب الحاقن للثقب لأنه استعمل على نطاق واسع في عارضات البلورات السائلة وله تابع عمل عالٍ نسبياً. على كل حال، إن أكسيد الإنديوم – القصدير مادة مشهورة بتغيرها، إذ يعتمد تابع العمل فيه بشكل كبير على كيفية تحضير المادة. وبالرغم من أن تابع عمله يمكن أن يصل إلى 4.8 إلكترون فولط فإن هذه القيمة أقل من القيمة المثالية لأن كمون تأين PPV يبلغ حوالي 5.2 eV، ولهذا فإن الثقوب من طبقة الإنديوم – القصدير يجب أن تتجاوز حاجز طاقة يبلغ 0.4 eV لكي تدخل طبقة البوليمير.

على كل حال، وجدت فرق بحث عديدة بأن وضع طبقة من البوليمير الناقل بين أكسيد الإنديوم – القصدير والبوليمير المصدر للضوء يساعد على تحسين حقن الثقوب . (تُجعل الطبقة الإضافية رقيقة بشكل تحافظ النبيطة على شفافيتها). أحد الأمثلة الجيدة هو متعدد (إثيلين ثنائي أكسي) ثيوفان أو "PEDOT"، وهو المادة التي طورتها باير، الشركة الألمانية. يمكن مزج PEDOT مع متعدد (حمض ستايرين السلفونيك) أو "PSS" لتشكيل معقد انتقال شحنة عالي الناقلية، ويمكن أن يرسب هذا من محلول السائل لتشكيل طبقة على أكسيد الإنديوم – القصدير (الشكل 1). إن تابع عمل PEDOT / PSS عالٍ (5.0 eV) مما يسمح بحقن الثقوب في PPV بسهولة لأن الحاجز الآن أصغر بكثير. ومن الميزات الأخرى لطبقة PEDOT / PSS أنها تُنعّم السطح الخشن نسبياً لأكسيد الإنديوم – القصدير مما يمنع بذلك تشكل أي دارة قصيرة موضعية تؤدي إلى فشل النبيطة. الشيء المضاف هو أن سطح الـ PPV المتماس مع PEDOT / PSS يكون من النوع -p المطعّم بـ PPS الذي يتشكل تدريجياً على السطح البيني مما يجعل حقن الثقب أسهل.

ولكن ماذا عن الإلكترود الحاقن للإلكترون؟ يجب أن يكون هذا من الناحية المثالية معدناً له تابع عمل منخفض يجاري "ألفة الإلكترون" أي فرق الطاقة بين أسفل عصابة النقل وسوية الخلاء لـ PPV. استعمل الكالسيوم بشكل كبير لهذا الغرض. فتابع عمله البالغ 2.8 إلكترون فولط قريب جداً من ألفة الإلكترون لـ PPV (2.7 الكترون فولط) ولهذا يكون الحاجز من أجل حقن الإلكترون صغيراً. وكما هو الحال مع الأنود، فإن كيمياء السطح البيني مع طبقة البوليمير نصف الناقل شيء مهم. يشكل الكالسيوم معقد انتقال شحنة أيونياً مع الطبقات السطحية لـ PPV الذي يُطعّم البوليمير بالنوع -n. درس بيل سالانيك B. Salaneck وزملاؤه من جامعة لنكوبنغ في السويد هذا السلوك بمطيافية الإلكترونات الضوئية، وذلك بترسيب طبقات أحادية تحتية من ذرات معدنية في الموضع على سطوح بوليمير نظيفة في الخلاء فوق العالي. استعملت مواد أخرى بما فيها سبائك من الألمنيوم والليتيوم. يمكن تخفيض الحاجز من أجل حقن الإلكترون إلى حد أبعد وذلك بإدخال طبقة من فلوريد معدن قلوي، ثخانتها عدة أنغستروم، بين الطبقة العضوية والإلكترود.

وأما بالنسبة للبوليمر النصف ناقل نفسه، فله عدة أدوار لتأديتها، فعليه أن يسمح للإلكترونات والثقوب بالانتقال. عليه أن يسمح للإلكترونات والثقوب أن تتلاقى ويأسر بعضها بعضاً لتشكل الإكسيتونات. وعليه أيضاً أن يسمح للإكسيتونات أن تصدر فوتونات. إحدى المبادرات الهامة التي جرت في هذا الحقل في السنوات القليلة الماضية هي تطوير البوليميرات التي لها كفايات تألق عالية. على كل حال، لقد كان اكتشافها مثيراً للإعجاب. كثير من الجزيئات المترافقة يكون لها تألق عالٍ عندما تكون ممددة – أي عندما تكون، مثلاً، في محلول. (الحقيقة أن الأصباغ المستعملة في الليزرات الصبغية والتي هي أيضاً عبارة عن جزيئات مترافقة، تبلغ كفاياتها 100% غالباً). على كل حال، إن معظم هذه الجزيئات لاتبقى متألقة في الحالة الصلبة، فأصباغ ليزر في الجسم الصلب باهتة، وهي مساحيق غير واعدة تعطي ملامح قليلة عن الفلورة المهتزة التي تعطيها في محلول.

يُعرف هذا الفقد من التألق بـ "إطفاء الجسم الصلب" ويحدث نتيجة التآثرات بين الجزيئات في الجسم الصلب، التي تغير طبيعة الإكسيتون. على كل حال، لايشكل إطفاء الجسم الصلب مشكلة في كثير من البوليميرات المترافقة بما فيها PPV ومشتقاته والتي يمكن أن تكون كفاية التألق فيها أكثر من 50%. سمحت هذه الكفايات المتطورة لمثل هذه البوليميرات باستعمالها كمواد رابحة للضوء في بنى دليل الموجة وتجويف الليزر. على كل حال، إن نتائج دراسات الإطفاء هذه بقيت قيد المناقشة الحادة حتى وقت قريب جداً، ومن المحتمل أن لا يكتمل تفسيرها حتى الآن.

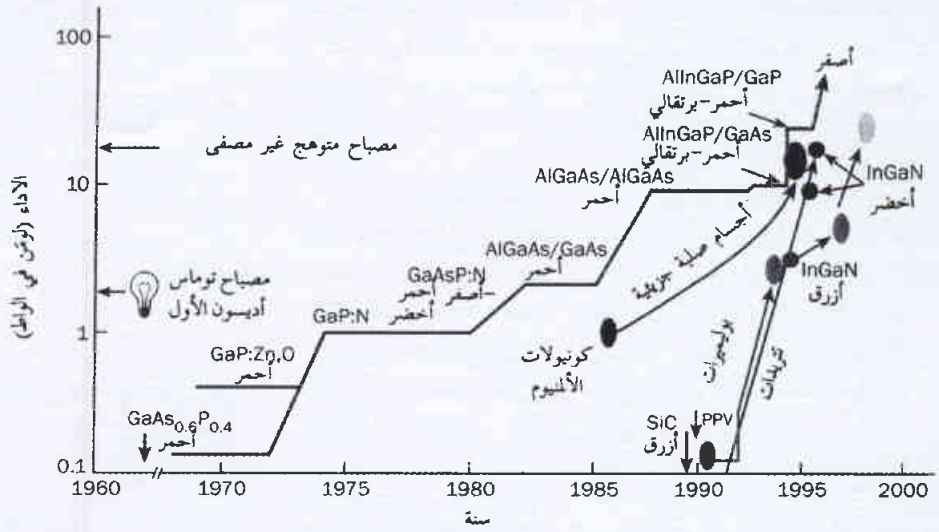
أكثر نصوعاً وجودة

بفضل جميع هذه الجهود، فقد تقدم أداء بوليميرات LEDs على مدى العامين الأخيرين بسرعة (الشكل 2). إن فعّالية كل من الديودات المصدرة للضوء – العضوية منها واللاعضوية – كفعّالية مصباح التنغستين الكهربائي التقليدي، ويعني هذا بوضوح أن من الممكن استعمالها في تطبيقات الإضاءة بالإضافة إلى العارضات. يبين الشكل 3 أداء العمل لـ PPV.

إذن مامدى التحسين الذي يمكن أن نتوقع رؤيته من هذه النبائط؟ يُعتقد بأن حدود كفاية التألق في بوليميرات LEDs تعيّن بميكانيك الكم للإكسيتونات التي تتشكل عندما تتحد الإلكترونات والثقوب. على أي حال سيكون هذا الأمر موضوع النقاش المركّز الآن. نعلم أنه عندما تأسر الإلكترونات والثقوب بعضها بعضاً لتشكل إكسيتوناً، فإن هذا الإكسيتون يمكن أن يكون في حالة سبينية، أحادية أو ثلاثية. على كل حال، إن الانتقالات المشعّة من الحالة الثلاثية ممنوعة ممايعني عدم الحصول على إصدار ضوء من الحالات الثلاثية. ولما كانت طاقة الثلاثيات أخفض بكثير من الأحاديات فإن من غير الممكن أيضاً أن ينتقل إكسيتون من الحالة الثلاثية صاعداً إلى الحالة الأحادية ليصدر بعدئذ فوتوناً. (إن سبب كون

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

الشكل 2- كفايات LED



يظهر أن أداء الديودات المصدرة للضوء العضوية واللاعضوية (LEDs) في هذا الشكل بدلالة "كفاية التألق" باللومن بالواط الواحد يتحسن بمرور السنين بشكل ثابت. يمكن أن تكون المادة نصف الناقلة في LEDs العضوية إما بوليميراً أو فلماً متصعداً من جزيئات صغيرة. طوّر الأخير شركات كوداك وبيوتير وشركات يابانية أخرى. تملك أعظم بوليميرات LEDs البوليميرية حالياً كفايات تنافس مصابيح الغتيلة المتوهجة التقليدية، وهي بصورة عامة أقل من 20 لومن بالواط. وبالمقابل فإن كفايات عارضات البلورة السائلة التخطيطية ذات اللون الكامل والضوء الخلفي، لاتتجاوز 2 لومن / الواط.

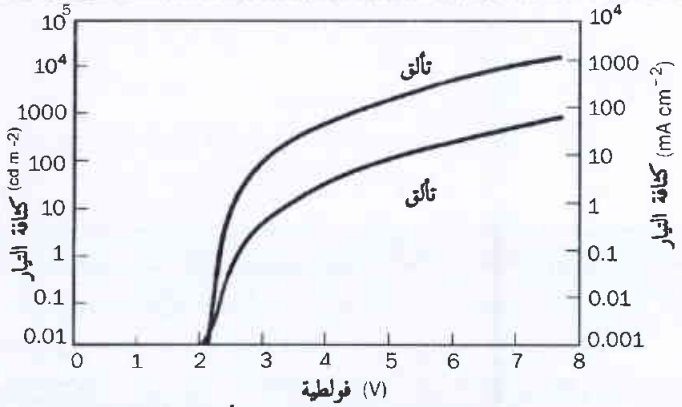
الثلاثيات أخفض طاقة بكثير هو أن الإكسيتونات في البوليمير متوضعة ضمن 10 إلى 15 مونومير اً على طول سلسلة وحيدة). وبالإضافة إلى ذلك، فإن إحصائيات السبين تعني بأن عدد الثلاثيات المتشكلة يبلغ ثلاثة أضعاف الأحاديات، ولهذا فإن الكفاية الكمومية لديود البوليمير المصدر للضوء لا يمكن أن تكون أكبر من 25%. ونحصل على هذا الحدّ عندما يصدر كل إكسيتون في الحالة الأحادية فوتوناً، وعندما يكون أسر كل زوجين من الإلكترونات والثقوب كاملاً. إن أعلى كفاية أمكن التوصل إليها حتى الآن تبلغ 10%، وهي التي تحصل عندما تصدر نصف الأحاديات فقط فوتونات وعندما لا يأسر كل إلكترون ثقباً بشكل كامل. إن هذه الكفاية تعتبر مسبقاً مرتفعة جداً حتى يمكن تفسيرها بواسطة نموذج يفرض بأن تشكل ثلاث ثلاثيات يقابله تشكل أحادية واحدة. ولهذا يبدو من المقبول أن هنالك حاجة لنماذج جديدة لكي تفسر كيف تعمل ديودات البوليمير المصدرة للضوء، ومن المحتمل أن تتضمن هذه النماذج أسر إلكترون - ثقب تابعاً للسبين.

عارضات بوليميرية

بفضل كفاياتها العالية، فإن الديودات البوليميرية المصدرة للضوء تناسب بشكل جيد مجالاً واسعاً من التطبيقات بدءاً من الأضواء الخلفية وحتى العارضات التخطيطية. ستبنى أولى النبائط - كتلك التي تطورها شركة فيليبس - على ركازات زجاجية وستستعمل في الأضواء الخلفية للنبائط الإلكترونية المحمولة كالهواتف النقّالة. على كل حال، سيصبح السوق أكبر بكثير عندما يمكن بناء هذه النبائط على ركازات بلاستيكية. من المستحيل في الوقت الحاضر استعمال ركازات بلاستيكية لأن طبقات الحاجز تتطلب إدخالها بين الركازة والنبيطة لمنع الماء والأكسجين من الدخول، رغم أن الباحثين لدى دوبونت في ديلاوير في الولايات المتحدة يعملون حالياً لحلّ هذه المشكلة.

ستنتشر الديودات البوليميرية المصدرة للضوء حقاً إذا أمكن استعمالها في العارضات المكتملة الألوان، ويقدّر تسويقها بما يزيد عن أربعين بليون دولار أمريكي سنوياً. على كل حال، لايزال هنالك الكثير من العمل لتطوير بوليميرات جديدة (أو تعديل نسخ البوليميرات الموجودة) تستطيع إصدار ضوء أحمر وأخضر وأزرق. إحدى هذه المشاكل هي أن طيف إصدار البوليميرات والجزيئات العضوية الأخرى واسع وعريض نسبياً مما لا يسمح بالحصول على ألوان نقية تماماً من الديودات البوليميرية. ومن حسن الحظ، على أي حال، أن مستقبلات الضوء في شبكية أعيننا هي عبارة عن جزيئات مترافقة مما يعني أن لها طيف امتصاص واسعاً مشابهاً، كما أن التوافق بين الإصدار والامتصاص في الشبكية مُرضٍ. ولهذا لن نلاحظ عدم نقاء الألوان. حقق إيد وو E. WOO وزملاؤه في مصانع دو الكيميائية في الولايات المتحدة تطوراً مهماً في تصنيع

الشكل 3- السماح بحدوث الضوء

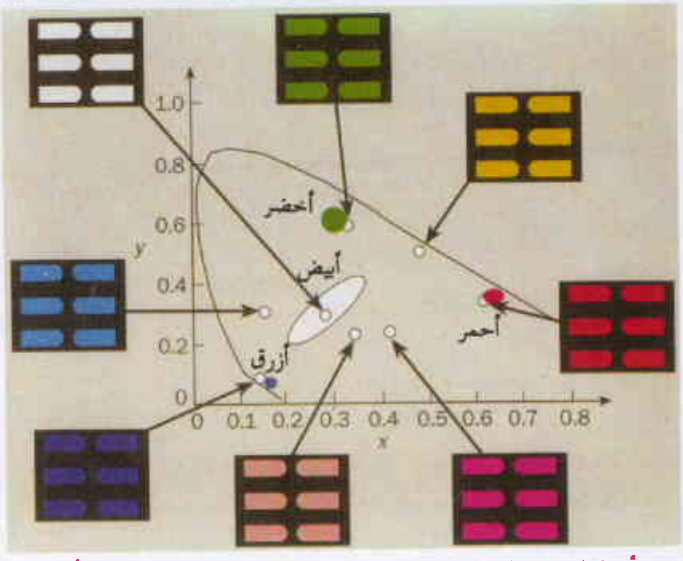


رسم بياني يبين خرج التيار والضوء مقابل فولطية الانحياز من أجل ديود بوليمير مصدر للضوء الأخضر على أساس PPV بنيته تشبه البنية في الشكل 1 . يشتغل الديود عندما تكون الفولطية تساوي 2V ويصل في تألقه إلى سوية تألق شاشة عارضة ($100\ cd\ m^{-2}$) عندما تزداد الفولطية إلى 3V . تكون كفاية الاستطاعة عندئذ فوق 20 لومن W^{-1} . تشير الطريقة المشابهة بشكل ظاهر، والتي يتغير فيها الضوء وكثافة التيار مع ازدياد الفولطية، بأن للديود كفاية كمومية ثابتة، حوالي $20\ cdA^{-1}$ ، فوق مدى الفولطية المبينة في الشكل. يمكن استعمال هذه النبائط في كل شيء بدءاً من الأضواء الخلفية البسيطة في النواتج الإلكترونية المحمولة وحتى العارضات التخطيطية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

البوليميرات، إذ صنّعوا سلسلة من البوليميرات ترتكز حول وحدة الفلورين. حققت فرق أخرى أيضاً تقدماً في هذا الميدان، فقد تم في كامبردج، في قسم تقانة العارضات، الحصول على سلسلة كاملة من البوليميرات المصدرة للضوء الأحمر والأخضر والأزرق (الشكل 4). تم الحصول على كل لون من نوع مختلف من البوليمير مزود بفرجة عصابية يجري تعديلها لتعطي اللون المطلوب. وقد وُجد بأنه إذا صُنّعت النبيطة وفق قواعد التصميم التي ذكرت سابقاً، فإن الكفاية والفولطية اللازمة لتشغيل النبيطة متساوية في كل لون.

الشكل 4- تشكل اللون على اللصيفة



وجد أن البوليميرات القائمة على متعدد الفلورين تصدر الضوء على مجال من ألوان. يبين "مثلث اللون" هذا بعض الألوان التي تم الحصول عليها باستعمال مشتقات مختلفة من البوليمير. تكون الألوان النقية الحمراء والخضراء والزرقاء على قمة المثلث، واللون الأبيض قرب المركز. كما يبين الشكل الألوان "هدف" حمراء وخضراء وزرقاء الخاصة بمنظومة إحداثيات ألوان بال PAL.

تتألف العارضات التخطيطية - كشاشات التلفزيون و الحاسوب والنبائط الحضنية - من عدة ملايين من العنصورات التي يجب أن تخاطب كل منها بشكل إفرادي. إن مخطط "المصفوفة المنفعلة"، حيث تنظم الإلكترودات العليا والسفلى فيها لتشكل الصفوف والأعمدة، جذابٌ بسبب سهولة الحصول عليه. تخاطب كل عنصورة بتطبيق فولطية ثابتة على كل صف بالتتالي، بينما نطبق على كل عمود "فولطية معطيات" خصوصية. تلغي مميزات التنقيح في هذه الديودات اللمّع وتعطي أداءً جيداً من أجل العارضات التي لاتحتاج لإراءة أكثر من محتوى إعلام "متوسط" كما هو الحال في شاشات منظمي العاملين. تحوي هذه النبائط بشكل نموذجي أقل من 100 000 عنصورة.

وسوى ذلك، فإن الحاجة إلى دفع كل صف لأزمان أقصر نحو التيارات العالية القمة يصبح عاملاً محدِداً بالنسبة لعارضات المصفوفة المنفعلة، وهنالك في الوقت الحالي اهتمام باستعمال مخططات "المصفوفة الفعّالة" التي توجد في عارضات البلّورة - السائلة العالية النوعية (LCDs). تستعمل هذه العارضات دارات ترانزستور رقيقة الفلم مصنوعة من السليكون اللابلّوري لتأمين دارة رتاجية latch circuit عند كل عنصورة تحافظ عل الكمون الصحيح عند خلية البلّورة - السائلة على طول "دورة الانتعاش" - الزمن بين الأطر المتعاقبة.

وإذا ما وسّعنا هذا الأسلوب على الـ LED العضوية، فإن على دارة الترانزستور أن تدفع التيار خلال الـ LEDs. ومن سوء الحظ، فإن تحقيق هذا العمل ليس سهلاً مع ترانزستورات السليكون اللابلّوري لأن الإلكترونات والثقوب تتحرك ببطء. على كل حال، يمكن إعادة تبلور السليكون اللابلّوري في الموقع ليتشكل سليكون متعدد التبلور الذي يملك حركية أفضل بكثير. إن النبيطة المصنوعة من هذه المادة تكون لذلك أسرع وتستطيع حمل تيار أكبر.

جرى تطوير هذا النوع من النبائط سابقاً من أجل عارضات البلّورة السائلة، وبيّن مؤلفو المقال حالياً مع زملاء آخرين من مركز بحوث Seiko - Epson Base Technology في سووا في اليابان - أن من الممكن أيضاً تطوير هذا النوع من أجل ديودات بوليميرية مصدرة للضوء. لكل عنصورة ترانزستوران: يقدم الأول رتاج الفولطية من أجل شاشة LCD، ويقدم الثاني التيار لإثارة الديود البوليميري . يجري تشكل طبقات البوليمير بالطلي الدوّامي لتشكيل فلم رقيق منتظم. تكون العارضة وحيدة اللون ويعتمد لونها على البوليمير المستعمل. ورغم أن دارة الاختبار كانت، للسهولة، عبارة عن بنية صغيرة قطرها حوالي إنشين فقط، فإنها تحوي مع ذلك حوالي 180 000 عنصورة من الممكن مخاطبة كل منها على حدة . وتعمل النبيطة حتى في سرعات الانتعاش العالية (مثلاً 85 هرتز) إذ أن LED البوليمير يملك زمن تجاوب سريع من مرتبة أقل من المكروثانية.

إن الخطوة الأخيرة في تطوير شاشة LED البوليمير مكتملة اللون تكون بدمج الألوان الرئيسة الثلاثة معاً على شاشة واحدة. وهذا يتطلب "تمذجة" العنصورات الحمراء والخضراء والزرقاء، ورغم أنه من الممكن استعمال تقنية الطباعة الحجرية التقليدية، فإن الأمر معقد ومكلف. ولهذا طوّر المؤلفون طريقة جديدة تعتمد على تقنيات النفث الحبري لسايكو - إبسون حيث تجري طباعة الطبقات المكونة لكل لون LED - الأحمر والأخضر والأزرق - مباشرة على الركازة. وأما الفصل والاتساق فهما متاحان الآن في أفضل طابعات النفث الحبري الحالية. والتحدي الحالي هو في تشكيل محاليل بوليمير نصف ناقلة وتطوير رؤوس طبع يمكن أن تنتج هذه المحاليل.

وبالرغم من التقدم السريع في ديودات البوليمير المصدرة للضوء في السنتين الماضيتين، فإن سرعة قبول النبائط في السوق ستعتمد على كل من الأداء والسعر. إن معظم متطلبات النبائط القابلة للتسويق هي في مكانها الملائم الآن، فقد بينت شركة فيليبس مثلاً أن الـ LEDs الخاصة بها تبقى صالحة لمدة آلاف من الساعات قبل أن تتخرب. ولكن يجب على الديودات البوليميرية فوق ذلك أن تكون رخيصة التصنيع. وسيكون هذا الأمر بصورة خاصة مهماً في التطبيقات المتقدمة مثل العارضات

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

التخطيطية حيث أن استخدام الطباعة بدلاً من الطباعة الحجرية لتصنيع النبائط سيكون أمراً حيوياً.

ديودات الفولطيات الضوئية

ديودات الفولطيات الضوئية تطبيق آخر على البوليمرات نصف الناقلة. والفولطيات الضوئية مواد نصف ناقلة تمتص الضوء عند الطاقات فوق الفرجة العصابية مما يؤدي إلى الانفصال بين حوامل الشحنات السالبة والموجبة. تُجمّع هذه الشحنات عند الإلكترودات المتقابلة مسببة فولطية دارة مفتوحة، أو مع حمل خارجي، تياراً ضوئياً. لايبدو للوهلة الأولى أن البوليميرات فولطيات ضوئية ملائمة. وكما بيّنا، يتم تشكل الإكسيتونات عند ارتباط الإلكترون والثقب الآسر كل منهما الآخر، وتحرّض هذه الإكسيتونات إما بامتصاص فوتون أو بالتحريض الكهربائي. الآن كيف يمكن تشجيع انقسام الإكسيتون؟ لقد ثبت بأن وضع جزيئات لها ألفات إلكترونية مختلفة بجانب بعضها البعض يؤدي من الناحية الطاقية إلى تهيئة الإلكترون للانتقال من جزيء ما إلى جزيء آخر. يطلق على هذه العملية اسم "انتقال الشحنة المثارة ضوئياً والتي تؤدي إلى انفصال الشحنات. يمكن أن ينظر إلى هذا الجمع-مانح-متقبل، حيث يمنح أحد البوليميرين إلكتروناً، والآخر يمتص هذا الإلكترون، كوصلة متغايرة نصف ناقلة (الشكل a 5).

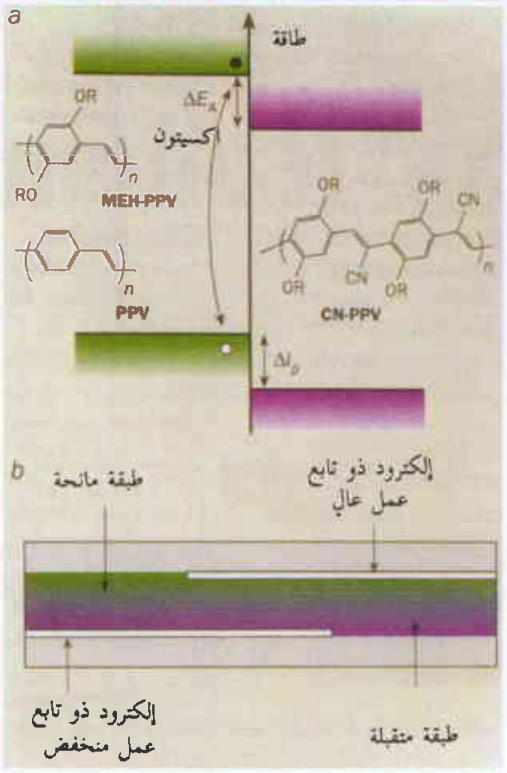
أحد البوليمرين الذي استعمل كمتقبل للإلكترون، هو سيانو-PPV أو "CN-PPV"، الذي طوره ستيفن موراتي S. Moratti وأندرو هولمز A. Holmes في جامعة كامبردج. يملك CN - PPV مجموعات سيانو متقبلة للإلكترون مربوطة إلى حلقات الفنلين مما يساعد على تخفيض طاقة كل من عصابتي التكافؤ والنقل. ولهذا تصبح من الناحية الطاقية أكثر تهيؤاً لينتقل الإلكترون من البوليمير إلى الـ CN-PPV. ويستعمل MEH-PPV في الوقت نفسه كمانح للإلكترون. هذا البوليمير مشتق من PPV الذي حلّت فيه بدل الذرتين من الهدروجين الكائنتين على كل حلقة فنلين المجموعتان O - CH_3 و $O - CH_2 CH (C_2 H_5)C_4 H_9$. وتسبب الوصلة المتغايرة المشكلة من CN-PPV وMEH-PPV انقسام الإكسيتونات، وذلك بتحرك الثقوب نحو MEH-PPV والإلكترونات نحو CN-PPV. تشكل هذه المنظومة، مع تجمع مناسب للشحنات، ديوداً ضوئياً فعّالاً. لقد نمّطَ جان - لوك بريداس J - L. Brédas وزملاؤه في جامعة مون - هيناوت في بلجيكا طاقيات هذا النوع من الوصلات المتغايرة.

على كل حال، يستطيع هذا النوع من الديود أن يعمل فقط عندما يكون فرق الألفة الإلكترونية بين عصابتي النقل أكبر من طاقة الربط للإكسيتون عندما يكون في أحد البوليميرين أو في البوليمير الآخر. يستبعد هذا القيد استعمال PPV نقي كمانح إلكترون. من حسن الحظ أن لهذه الشائبة بطانة فضية، إذ يمكن استعمال الوصلة المتغايرة المصنّعة من CN - PPV و PPV في إجبار الأسر الفعال إلكترون - ثقب عند الوصلة المتغايرة ليعطي LEDs فعّالة جداً.

تقدم الوصلة المتغايرة MEH-PPV/CN-PPV أسلوباً لفصل الشحنة على المستوى الجزيئي، وتصلح بشكل جيد للإكسيتونات التي تشكلت في داخلها. لسوء الحظ لاتدوم حياة الإكسيتونات لفترة طويلة، والمسافة المميزة التي تنتشر فيها قبل اضمحلالها أقل من ثخانة البوليمير اللازمة لامتصاص جميع الضوء الوارد. وهذا ما يحدد إلى حد كبير كفاية ديودات الفولطيات الضوئية البوليميرية. فالديود مثلا الذي يستخدم أكسيد الانديوم - القصدير كإلكترود لـ MEH-PPV، والألمنيوم كإلكترود من أجل CN-PPV يستجيب فقط للفوتونات الممتصة ضمنه حوالي 10 نانومتر من الوصلة المتغايرة. وأما بقية الفوتونات الأخرى فتذهب هدراً.

هل توجد هنالك طريقة لتطوير ديود فولط ضوئي أكثر فعّالية يملك أكثر من مجرد طبقة إلكترونية متقبلة وطبقات إلكترونية مانحة ظهراً لظهر؟ يتضّح أن الطبيعة قد طورت بنى معقدة لتحقيق ذلك، مثل ما هو الحال في شكل الهوائي "حصاد الضوء" الذي يجلب الإكسيتونات إلى مركز تفاعل الاصطناع الضوئي في المواد النباتية الخضراء . جرى تطوير أسلوب لذلك

الشكل 5- البوليميرات كفولطيات ضوئية



a) تولد ديودات الفولطيات الضوئية فلطات بجعل أزواج الإكسيتونات - إلكترون - ثقب المتشكلة بعد امتصاص الفوتون تنقسم وتعيد توزيع شحناتها. ولكن الإكسيتونات في البوليميرات مربوطة وتنقسم فقط إذا وُجد جزيئان من البوليمير لهما ألفتان إلكترونيتان مختلفتان متقاربان من بعضهما البعض في "وصلة متغايرة". وعندها تصبح من الناحية الطاقية ملائمة لأن يتنقل إلكترون من أحد النوعين واحد من البوليمير إلى النوع الآخر. إن لهذا الديود CN - PPV كمادة متقبلة للإلكترون و MEH - PPV كبوليمير مانح للإلكترون. ΔE_A هو الفرق في الألفة الإلكترونية بين عصابتي النقل للمادتين. و ΔL_b - هو الفرق بين كموني التأين لعصابتي التكافؤ للمادتين. سينقسم الإكسيتون فقط عندما تكون ΔE_A أكبر من طاقة الربط للإكسيتون. يتحقق هذا الشرط من أجل MEH - PPV ولكن ليس من أجل PPV نفسه. b) تم الحصول على أفضل ديود بوليمير فولط ضوئي بحصر طبقتي البوليمير بعضهما مع بعض، حيث تشكل شبكة متداخلة تساعد الإكسيتون على الانقسام. تم الحصول على نتائج ممتازة باستعمال مشتق من متعدد التيوفن الذي يمتص الضوء عند 450- 700 nm و CN - PPV. يمكن الحصول على دارة مفتوحة عالية الفولطية تزيد فولطيتها عن 2V بكاثود من الكالسيوم وطبقة من PEDOT - PSS بين أنود من أكسيد الإنديوم - القصدير و- CN PPV.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

أقل تعقيداً بكثير (وآخر يحتاج للتوصل إليه إلى وقت أقل من جهود الطبيعة) في كامبردج وكذلك من قبل آلان هيجر A. Heeger وزملائه في جامعة كاليفورنيا في سانتا بربارة. الفكرة هي في إنتاج شبكة متداخلة من بوليمير متقبل للإلكترون وبوليمير آخذ للثقب بحيث تكون الوصلة المتغايرة في هذه الحال موزعة عبر ثخانة الفلم. أمكن التوصل إلى هذا الأمر بخلط البوليميرين في محلول مشترك بحيث يتم، عند إزاحة المُحِلّ، انفصال البوليميرين لتشكيل مناطق من البوليمير الأول ومناطق أخرى من البوليمير الآخر. لقد تم الحصول على النتائج الأفضل من تصفيح البوليمير المتقبل للثقب مع البوليمير المتقبل للإلكترون (الشكل5B). وباستعمال مشتق متعدد الثيوفين كمتقبل ثقب تمتص هذه النبيطة ضوء الشمس بشكل جيد نسبياً وبكفاية كمومية عظمى - الشحنات المتجمعة للفوتون الوارد الواحد - مقدراها 28%. والكفاية العظمى لتحويل الطاقة، عندما يكون لون الضوء الوارد على الديود أخضر، هي 7%، وتنخفض بـ 2% عندما يكون الضوء هو ضوء الشمس.

ورغم التقدم الذي تم حتى تاريخه، لاتزال خلايا الفولطيات الضوئية البوليميرية بحاجة كبيرة لإجراء البحوث ، إذاً يجب أن يتحسن أداؤها بشكل كبير قبل أن تتمكن من مجاراة الخلايا الضوئية اللاعضوية. على كل حال، فالنتائج التي أمكن الحصول عليها تكشف عن خاصتين مشجعتين جداً. الأولى أن الديود يتجاوب خطياً حتى ولو وصلت شدة الضوء الوارد إلى السويات الشمسية، مما يبين بأن فصل الإلكترونات والثقوب فعّال. والثانية هي أن هذه الديودات الفوتو فولطية البوليميرية تنتج فولطيات دارة مفتوحة عالية جداً. يتحكم في الحد الأعظمي للفولطية الفرقُ في توابع العمل للإلكترودين، الذي يمكن أن يزيد عن 2 فولط عندما يكون الأنود من الكالسيوم والكاتود من أكسيد الإنديدم-القصدير المطلي بـ PEDOT / PSS. (تملك خلايا السليكون في المقابل فولطية دارة مفتوحة أقل من فولط واحد). يبين هذا بوضوح، بالرغم من طرائق العمليات البدائية، أن البوليميرات نصف الناقلة في هذه النبائط خالية بشكل ملحوظ من العيوب التي تقع طاقاتها في فرجة نصف الناقل. وهذا يعاكس بشكل ملحوظ خواص أنصاف النواقل اللاعضوية اللامنتظمة المقابلة، حيث يمكن للعيوب أن تحدد أداء النبيطة.

التوقعات المستقبلية

لقد حققت بحوث ديودات البوليمير، التي شملت كل شيء بدءاً من الكيمياء ووصولاً إلى فيزياء النبائط، تطوراً سريعاً خلال العامين الماضيين. يبشر العلم الذي تتضمنه هذه البحوث حالياً بتطبيقات في المستقبل أكثر مما كان متوقعاً سابقاً، وقد مكّن الجهد المبذول في تصنيع مواد جديدة، من بناء نبائط تتمتع بمميزات ممتازة. وستشهد السنوات القليلة القادمة انتقال هذا الأساس العلمي إلى مرحلة التقانة على نطاق واسع، ويتطلب الوصول إلى ذلك استثمارات كبيرة في التقانة والتسويق.

وعلى خلفية توقع منتجات جديدة، فإن الجهود التي بذلت في المواد وهندسة النبائط قد أعطت أرباحاً مهمة. وبصورة خاصة، فقد أتاح إجراء عمليات المواد الكهربائية في المحلول الفرصة لنماذج جديدة من أجل التصنيع. فنرى "الطباعة المباشرة" (البديل للطباعة الحجرية الضوئية) كنموذج جديد من أجل الإلكترونيات البوليميرية. الحقيقة أن طباعة النفث الحبري ليست إلاّ البداية: ستؤدي التطورات في "الطباعة الحجرية الناعمة" أيضاً إلى تأثيرات ضخمة. وبالمشاركة مع التحكم المحسّن لـ "التجميع الذاتي" للبنى الجزيئية المنتظمة أو البوليميرية من المحلول، كما هو الحال في الشبكة ثنائية الاتصال من أجل الخلايا الشمسية، فإن إمكانية إيجاد تقانة أنصاف نواقل مختلفة جذرياً في المستقبل كبيرة جداً.■

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

ليزر نصف ناقل ثنائي الاتجاه*

كلير جماشل - اليساندرو ترديكوسي- دبوراه سيفكو-
ألبرت هتشنسون-فديريكو كاباسو-الفرد تشو
مختبرات بل - موراي هيل - الولايات المتحدة الأمريكية

ملخص

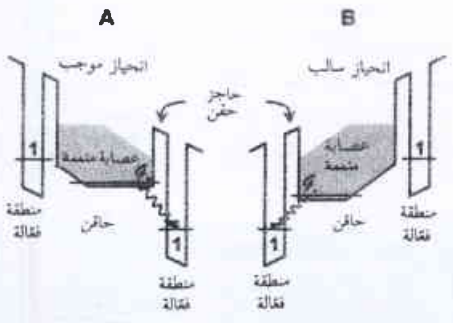
نُشر تقرير عن ليزر نصف ناقل قادر على العمل تحت كل من فولطية الانحياز الموجبة والسالبة. تسلك منطقته الفعّالة من الناحية الوظيفية كمادتي ليزر مختلفتين، تُصدران طولين موجيين مختلفين، يتعلقان بالتصميم، عندما تخضعان لانحياز بقطبيتين متعاكستين. استخدم هذا المفهوم لتوليد طولين موجيين مختلفين (6.3 و 6.5 مكرومتر) في المنطقةالمتوسطة من الأشعة تحت الحمراء من الطيف من بنية ليزر شلال كمومي وحيد. يُثار الطولان الموجيّان بصورة مستقلة كل منهما عن الآخر ويكونان مفصولين زمنياً. ويمكن لهذا الأمر أن يكون له تأثير جدير بالاعتبار على التطبيقات المختلفة للّيزر نصف الناقل بما فيها تطبيقات الاستشعار عن بعد في تحليل غاز الأثر مع مطيافية الامتصاص التفاضلية.

الكلمات المفتاحية: ليزر ثنائي الاتجاه، فولطية انحياز موجبة، فولطية انحياز سالبة، قطبية موجبة، قطبية سالبة، نمط نبضي، استطاعة ضوئية، فعل نفقي مدعوم بالفوتون، ربح العتبة.

معظم نبائط أنصاف النواقل الإلكترونية الضوئية، مثل ليزرات أنصاف النواقل التقليدية والديودات المُصدِرة للضوء والخلايا الشمسية، ثنائية القطب، يعني أنها تحوي توليفة من طبقات نصف ناقلة مطعّمة بشوائب مانحة (تطعيم من النوع -n) وبشوائب متقبّلة (تطعيم من النوع -p). يعطي الكمون الكهراكدي المبني داخلياً الناتج اتجاهية أصيلة لهذه النبائط ويجعلها فعّالة من أجل قطبية فولطية نوعية. وبالمقابل، تُقدّم النبائط الإلكترونية الضوئية الوحيدة القطب إمكانية الاستخدام الثنائي الاتجاه.

نقدم هنا ليزراً نصف ناقل وحيد القطب ثنائي الاتجاه. يعمل هذا الليزر كمنبع ضوئي تحت كل من فولطية الانحياز الموجبة والسالبة، بعكس ليزرات أنصاف النواقل الأخرى بما فيها ليزرات QC المصنعة حتى الوقت الحاضر [2]. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن جعل طول موجة التشغيل مختلفاً في القطبيتين. تقدم هذه الملامح وظيفية غير متوفرة في ليزرات أنصاف النواقل التقليدية فاتحة بذلك الباب إلى العديد من التطبيقات المفيدة [6].

لقد جذب اختراع وتطوير الليزرات المعروفة باسم ليزرات الشلال الكمومي quantum cascade (QC) [1,2] انتباهاً كبيراً لأنه من الممكن تصميمها لتعمل في منطقة طيف عريضة جداً (كامل طيف المنطقة المتوسطة من الأشعة تحت الحمراء). ويمكن تحقيق ذلك بالتحكم بشخانة الطبقة أكثر من التركيب المادي، مع هندسة بنية العصابة [3]، وتنضيد بالحزمة الجزيئية [4]. وزيادة على ذلك، فإن توليد العديد من فوتونات الليزر بكل إلكترون محقون فوق العتبة، بسبب تشليل cascading المناطق الفعّالة، يكون مسؤولاً عن القدرة التي لا سابق لها في ليزرات QC [2,5].



الشكل 1- رسم بياني تخطيطي للطاقة من أجل عملية الليزر QC الثنائي الاتجاه.
(A)- يُظهر قسماً من بنية عصابة النقل تحت تطبيق انحياز موجب. تجتاز الإلكترونات البنية من اليسار إلى اليمين.
(B)- بنية العصابة التخطيطية لليزر QC نفسه تحت تطبيق انحياز معاكس (سالب). تجتاز الإلكترونات البنية من الاتجاه المعاكس.

يتم الانتقال الضوئي في ليزرات QC بين الحالات المكمّمة في عصابة النقل لبنية البئر الكمومي المتعدد [1,2]. يُحدّد طول موجة الإصدار بفرق سوية الطاقة التي يمكن التحكم بها بشخانة البئر والحاجز وبالحقل الكهربائي المطبّق. بصورة عامة، يغير عكس الانحياز المطبق في ليزرات QC المعيارية بنية سوية الطاقة مما يمنع فعل الليزر. تعمل النبيطة البديلة المقدمة في هذا المقال كليزر QC مختلف في كل قطبية.

يُظهر المخطط الذي يصف المبدأ الأساسي لعملية ليزر الشلال الكمومي ثنائي الاتجاه (الشكل 1) قسماً من بنية عصابة النقل، ومنطقتين فعّالتين مع منطقة وصل حاقنة. تتضمن ليزرات QC بصورة نموذجية عدداً كبيراً N يساوي تقريباً 30 دوراً من المناطق الفعّالة المتناوبة

* نشر هذا المقال في مجلة *Science*, Vol 286,22 October 1999. ترجمة هيئة التحرير - هيئة الطاقة الذرية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

والحاقنات [2,5]. يحدث فعل الليزر، في التصميم الحالي تحت انحياز موجب مطبق مناسب (الشكل 1A)، من السّويّة G_+ إلى السويّة 1 ، من خلال فعل نفقي بدعم فوتوني أو انتقال قطري (سهم مموّج) لأن لكلتا الحالتين تراكباً فضائياً مخفضاً [7]. السوية 1 هي الحالة الأساسية للبئر الكمومي للمنطقة الفعّالة، بينما G_+ هي الحالة الأساسية للعصابة المصغرة – مَشْعَب كثيف من السّويّات الإلكترونية في الحاقن ذي الشبيكة الفائقة. تُصَمّم العصابة المصغّرة هذه بحيث تتوضع G_+ فضائياً قريبة من حاجز الحقن عند تطبيق حقل كهربائي مناسب. G_+ تكون متوضعة فضائياً قريبة من حاجز الحقن [7]. يتم التحكم بطاقة الفوتون الصادر من أجل بئر كمومي لمنطقة فعّالة محددة بثخانة طبقات الحاقن في الجوار القريب من حاجز الحقن وبالحقل الكهربائي المطبق. إن عكس قطبية الانحياز (الشكل 1B) سيوضّع الحالة الأساسية للحاقن -G في النهاية المقابلة لعصابة الحاقن المصغّرة. وبحاقن متناظر تماماً حول مركزه ستكون G_+ و G_- متكافئتين وسيكون طول الموجة نفسه في كلا القطبيتين. وعلى كل حال، إذا تم تصميم منطقتي الحاقن بصورة لا متناظرة، فإن موقع الطاقة G_- سيكون مختلفاً عن موقع G_+، مما يؤدي إلى أطوال موجية ليزرية مختلفة $\lambda_\pm$.

يبين الشكل 2 التصميم الدقيق للطبقة وجزءاً من بنية العصابة وتربيع طويلات التوابع الموجية المناسبة للعينة D2520. يناقش المقال باختصار وسطاء التصميم التي هي مهمة من أجل عملية ثنائية طول الموجة ثنائية الاتجاه. يمكن في المرجع [7] أن نجد وصفاً معمقاً للّيزرات QC القائمة على أساس فعل نفقي بدعم فوتوني بما في ذلك تضمينات التراكب الفضائي المخفّض لتوابع موجة الإلكترون المرتبطة بفعل الليزر. إن الكمية المهمة في حساب ربح العتبة لليزرات QC هي $k_\pm = Z^2_\pm E_\pm \tau_\pm$.

إن جداء العاملين الأولين، ونعني مربع عنصر المصفوفة الضوئية $Z_\pm$ وطاقة الانتقال $E_\pm$ متناسب مع قوة الهزاز $f_\pm$. $\tau_\pm$ هو عمر السوية $G_\pm$ وتحدد بشكل أساسي بزمن الاسترخاء من $G_\pm$ إلى السوية 1 الناجم عن إصدار الفونون الضوئي الطولي. تقتضي القرائن (الدلائل) أن من الممكن وضع هذه القيم كل على حدة من أجل كل اتجاه انحياز. وإذا كان المرء مهتماً في نبيطة لها طولا موجة إصدار مختلفان، ويعني ذلك أن $E_+ \neq E_-$، ولكن تياري وفولطيتي عتبتيهما يمكن مقارنتها [8]، عندئذ يتطلب الأمر تعديل $z_\pm$ و $\tau_\pm$ حتى تتحقق المساواة $k_- = k_+$ عند تطبيق الحقل الكهربائي ذاته بغض النظر عن القطبية.

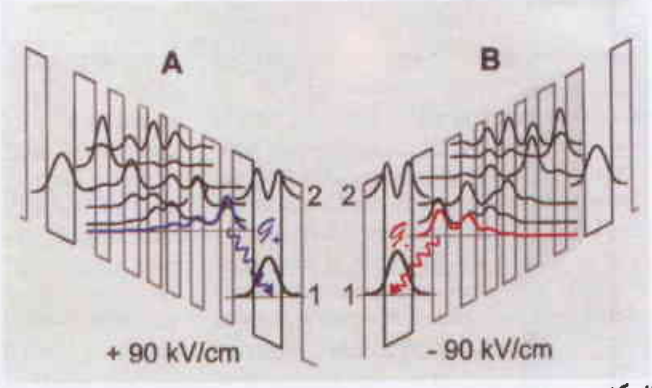
فمن أجل العينة D2520، المبيّنة في الشكل 2، والخاضعة لحقل كهربائي يساوي $\pm 90\ kV\ cm^{-1}$ المطابق للعتبة، حسبنا $z_+ = 0.35$ nm، $E_+ = 198$ meV ، $\tau_- = 64$ ps ، $\tau_+ = 46$ ps ، $z_- = 0.32$ nm $E_- = 173$ meV بالترتيب. وينتج عن ذلك أن $k_+ = 1.12\ nm^2\ ps\ eV$ و $k_- = 1.14\ nm^2\ ps\ eV$ وهي قيم قريبة من بعضها البعض بكفاية بحيث يمكن اقتراح تيارات عتبة مماثلة تماماً. يمكن تأمين الانعكاس السكاني اللازم من أجل فعل الليزر بواسطة طول العمرين $\tau_\pm$ بين سويتي الليزر الأعلى والأخفض بسبب الانفصال الفضائي الكبير للحالتين ($G_\pm$ و 1) لانتقال الليزر القطري. وبالمقارنة، فقد حسب الزمن من أجل الإلكترونات للمرور في النفق بشكل تجاوبي من السوية 1 إلى حالة المنطقة الحاقنة فوجد أنه يساوي 0.5 بيكو ثانية، وكان عمر $G_\pm$ العائد إلى سرعات تبعثر الفونون الضوئي الطولي المشتركة في كل حالات منطقة الحاقن المساير للتيار التالية حوالي 380 بيكوثانية.

يعطي معامل الربح ، المعرّف بالكمية التي إذا ضربت بكثافة التيار J تعطي الربح الذروي للمادة، بالعلاقة:

$$g_\pm = (2e)/[\varepsilon_o \hbar c L_p n_{eff} (2\gamma)] k_\pm$$

بفرض مبسّط إلى حد ما وهو أن مجمل التيار يمر من خلال السّويتين $G_\pm$ و 1 [1] $L_p = 35.4$nm وهو طول مرحلة واحدة (منطقة واحدة فعّالة وحاقن)، حيث e شحنة الوحدة، وε_o ثابت العزل الكهربائي للخلاء، و$\hbar$ ثابت بلانك المخفّض، وc سرعة الضوء في الخلاء $n_{eff} = 3.26$ قرينة الانكسار الفعّالة لدليل الموجة و$2\gamma \approx 35$ meV عرض خط التألق.

جرى قياس الأخيرة من طيوف إصدار تحت العتبة. ينتج من إدخال القيم المذكورة أعلاه في العلاقة من أجل معامل الربح أن $g_+ \approx g_- \approx 32\ cm\ kA^{-1}$. وهذه القيمة من نفس مرتبة مقدار ليزرات QC وحيدة الاتجاه المثلى [7,9,10] ونعني ليزرات QC المصممة لكي تعمل وحدها تحت قطبية انحياز واحدة.



الشكل 2– بنية عصابة نقل لقسم من العينة D2520، ليزر QC ثنائي الاتجاه بطول موجة إصدار تابعة لقطبية الانحياز.

(A)– تحت حقل كهربائي موجب مطبق من مرتبة $90\ kV\ cm^{-1}$، متطابق تقريباً مع عتبة الليزر.

(B)– تحت حقل كهربائي سالب مطبق من المقدار نفسه.

تكون الثخانة الحقيقية للطبقة (بالنانومتر) من اليسار إلى اليمين لكل من (A) و (B)، بدءاً من طبقة الحقن الأولى /**3.5**/4.8/**3.5**/2.4/**2.5**/2.6/**1.5**/2.2/**1.0**/2.2/**1.9**/2.2/**2.9**/2.2/ **3.5**/4.8/**3.5** $Al_{0.48}In_{0.52}As$ كطبقات (حواجز طاقة) بالحبر (حرف ثخين) متبادلة مع $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ كآبار. الطبقات التي تحتها خط تكون مُطعمة لـ $n = 4x10^{17} cm^{-3}$. تدل الحروف المائلة على طبقة الحقن. يظهر في الشكل تربيع طويلات توابع الموجة في الطبقات الفعّالة والحاقنة. تبين الأسهم المتموجة (الزرقاء) انتقال الليزر من أجل حالة القطبية الموجبة (A)، والأسهم المتموجة الحمراء تدل على انتقال الليزر من أجل القطبية السالبة (B). العينتان D2488 و D2498، ليزران QC ثنائيا الاتجاه متناظران، مصممان للعمل عند طول الموجة نفسه تحت قطبية انحياز متعاكسة، غير مبينين في الشكل 2 ولكنهما من الناحية البنيوية متماثلان.

تتابع الطبقات هو:

3.5/4.8/**3.5**/2.4/**2.5**/2.6/**1.5**/2.2/**1.0**/2.2/**1.5**/2.6/**2.5**/2.4/**3.5**/4.8/**3.5**($n = 3X10^{17}$ cm^{-3}) و **3.5**/4.8/**3.5**/2.4/**2.5**/2.6/**1.5**/2.2/**1.0**/2.2/**1.5**/2.6/**2.5**/2.4/**3.5**/4.8/**3.5** ($n = 4x10^{17}$ cm^{-3}) من أجل D2488 وD2498 بالترتيب مع الترميزات نفسها كما في العينة D2520.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

هنالك عوامل أخرى يجب أخذها بعين الاعتبار في تصميم الليزرات الثنائية الاتجاه أولها أنه في ليزر QC ذي الانتقال القطري، يتغير عنصر مصفوفة الانتقال وطاقة الفوتون بشكل واضح مع الحقل الكهربائي المطبّق [1] حتى يتم التوصل إلى عتبة الليزر.

يجب أخذ هذا التغير مع الانحياز المطبق بعين الاعتبار عندما تقاس $Z_{\pm}$ و $\tau_{\pm}$ لحساب الاختلاف المرغوب في طاقة الفوتون بين القطبيتين المتقابلتين.

وثانيها وهو أنه، بالرغم من أن المرء يتوقع أن الخسارة مستقلة عن قطبية الانحياز، إلا أنه من الضروري تحليل التصميم الخاص بكلٍ من القطبيتين لتجنب امتصاص ضوئي عرضي مجاوب تحت العصابة البيني.

وثالثها وهو أن مناطق الحاقن تكون مُطعّمة في آبارها المركزية وحواجزها تطعيماً يبلغ من أجل العينة D2520 كثافة سطحية مقدارها $3.5 \times 10^{11}\ cm^{-2}$. بصورة عامة، فإن الإلكترونات غير الأصيلة و الكمون الكهربائي لأيوناتها المانحة ستعدل من بنية العصابة [11]. نؤكد أن هذا التأثير يمكن إهماله خلال الحسابات المنسجمة ذاتياً لبنية العصابة بما فيها الشحنات غير الأصيلة ومن خلال القياسات على عينتي ليزر QC ثنائيتي الاتجاه متناظرتين (D2488 و D2498) تظهران بروفيلين للتطعيم مزاحين قصداً بالنسبة لبعضهما البعض.

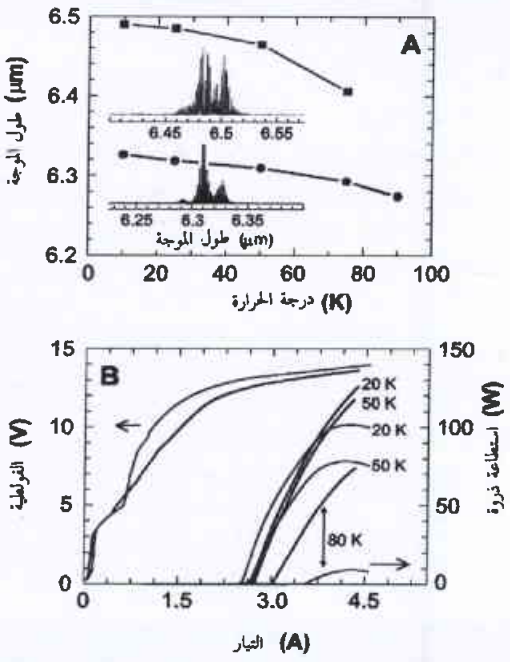
أخيراً، تحتاج طبقات دليل الموجة المُغلّفة وسطوحها البينية وتماساتها الكهربائية أن تكون ذات وظيفية متساوية في كلا اتجاهي الانزياح. لقد أكدنا هذه العينة المستعملة D2453 بطبقات تغليف متطابقة ودارئة ومتماسة ولكن بدون مناطق فعّالة وحواقن [5]. والمميزات فولط تيار (I-V) متساوية في كل من القطبيتين في حدود نسبة مئوية قليلة.

تحوي جميع عينات الليزر ثنائي الاتجاه شلالاً من 36 منطقة فعّالة تتناوب بحاقنات الإلكترون. يكون هذا المكدس مطموراً في دليل موجة عازل كهربائياً شبيه جداً بما استعمل سابقاً مع ليزرات QC [5,12]. يقدّر الفقدان بدليل الموجة بـ $\alpha_w \approx 20\ cm^{-1}$. عوملت هذه الليزرات كليزرات دليل الموجة التقليدية ذات الحافة العميقة التنميش [5] بعرض شريحة يتراوح من 10 إلى 20 مكرومتر. تقسم هذه الشرائح إلى قضبان طولها حوالي 3 mm وتترك السطيحات بدون غطاء مما يؤدي إلى فقدان اقتران خارجي (مرآة) قدره $\alpha_m \approx 4.2\ cm^{-1}$.

تكون الليزرات الفردية مربوطة السلك ملحومة إلى حوض حراري نحاسي ومركبة على إصبع بارد متحكّم به حرارياً من مصفّعة دفق هيليوم. تعمل الليزرات بنمط نبضي بطول نبضات تيار يبلغ 50 نانوثانية بسرعة تكرار مخفّضة (من 5 إلى 100 كيلوهرتز). يكشف الضوء بمكشاف HgCdTe سريع في درجة حرارة الغرفة. تنجز القياسات الطيفية بمطياف تحويل نيكولت فوريه تحت الأحمر.

تُعرض في الشكل 3 مميزات نبيطة لليزر منتخب من رقاقة D2520. يبين الشكل 3A طول موجة الإصدار كتابع لدرجة الحوض الحراري من أجل القطبيتين. والطولان الموجيان في درجة الحرارة المنخفضة هما $\lambda_- \approx 6.5\ \mu m$ و $\lambda_+ \approx 6.33\ \mu m$. وهذان الطولان الموجيان، بالرغم من أنهما متميزان تماماً بعضهما عن بعض فإنهما متقاربان أكثر من الطولين الموجيين المصممين $\lambda_- \approx 7.17\ \mu m$ و $\lambda_+ \approx 6.25\ \mu m$.

يمكن تعليل هذا التضارب بسهولة بملاحظة أن طاقة الانتقال هي منزاحة – شتارك Stark - shifted بشكل خطي بواسطة تغيير الحقل الكهربائي ولأن النبيطة تملك فولطية عتبة ليزر أعلى عند الانحياز السالب (الشكل 3B) [13]. يبين الشكل الفولطية (V) بدلالة خصائص تيار السوق (I) في الدرجة 20 كلفن واستطاعة خرج ضوئية (L) بدلالة خصائص I في درجات حرارة عديدة للحوض الحراري. إن منحنيات L-I-V في كلتا القطبيتين متشابهة إلى حد كبير في الشكل والقيمة، عند كثافات تيار عتبة منخفض درجة الحرارة $J_{th} \approx 3.5\ kAcm^{-2}$. يجب مقارنة هذه النتيجة مع العتبة المحسوبة $J_{th} = (g_{\pm}\Gamma)/(\alpha_m + \alpha_w) \approx 1.7\ kA\ cm^{-2}$، مع قيم α_m و α_w و $g_{\pm}$ المعطاة سابقاً وقيمة عامل حصر النمط Γ المساوية



الشكل 3– مميزات نبيطة العينة D2520، ليزر QC ثنائي الاتجاه بطولي موجتي إصدار مختلفتين من أجل قطبيتي انحياز متعاكستين.

(A)– تُبيّنت ذروة طول موجة إصدار كتابع لدرجة حرارة الحوض الحراري من أجل القطبية الموجبة (الأزرق) والقطبية السالبة (الأحمر). تبين الأشكال في الداخل أمثلة على أطياف الإصدار المطابقة. الذروات المتباعدة المتساوية هي الأنماط الطولية للجوف الضوئي المعرّف بالسطيح المتشطّر لشريحة الليزر.

(B)– خرج الضوء (L) – تيار (I) وفولط – تيار (I-V) هي مميزات ليزر دليل الموجة ذات الحافة العميقة التنميش بطول 3 ملم وعرض 17 مكرومتر يعمل بنمط نبضي. قيست المنحنيات المميزة (I-V) عند الدرجة 20 كلفن. تُبيّنت المنحنيات L-I في درجات الحرارة الظاهرة في المخطط. تدل الخطوط الزرقاء على القطبية الموجبة والخطوط الحمراء على القطبية السالبة. قيست الاستطاعة الضوئية من سطيحة مفردة بكفاية جمع 60%.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

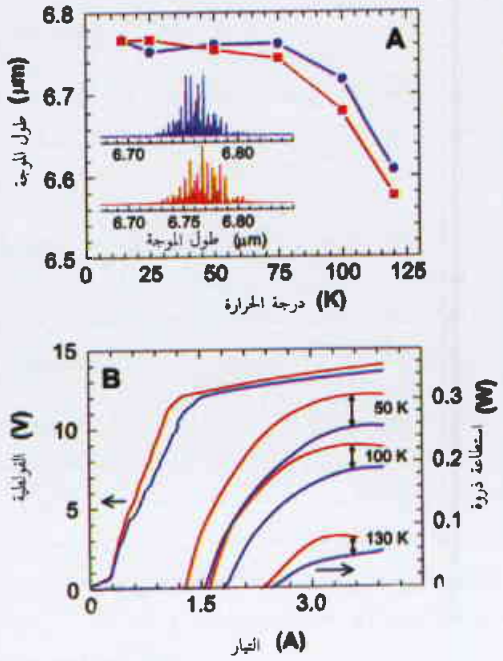
0.45 . يُعتقد بأن الفرق بين قيمتي J_{th} المقيسة والمحسوبة يعود إلى كفاية الحقن المتناقصة في داخل سويات انتقال الليزر. يمكن للإلكترونات أن تمر في النفق من منطقة الحاقن إلى الحالة المثارة الأولى 2 من البئر الكمومي ذي المنطقة الفعّالة (الشكل 2). ويمكن للإلكترونات من هناك إما أن تمر في النفق إلى المنطقة المتصلة لعصابة النقل أو أن تتبعثر في الحالة الأساسية للمنطقة الفعّالة. وكلا الممرين ضاران لفعل الليزر إذ أنهما يخفضان العمر $\tau_{\pm}$ للحالة $G_{\pm}$ وفي الحالة الأخيرة يضيفان بشكل مؤقت إلكتروناً إلى سوية الليزر الدنيا. وهذا بدوره يؤدي إلى كسب مخفَّض وانقلاب أضعف مما قُدِّر سابقاً.

لقد عرّفنا هذه العملية بأنها المنبع الرئيس من أجل عتبة ليزر متزايدة باستعمال طيوف التألق تحت العتبة. يشير التوافق الجيد لذروة الإصدار الواضحة المساوية حوالي 254 meV مع الفصل الطاقي بين الحالتين من البئر الكمومي ذي المنطقة الفعّالة إلى الحشد الإلكتروني الكبير في الحالة المُثارة. ومع ذلك، تعرض الليزرات استطاعة خرج ذروة ضوئية أكبر من 100 mW وكفاية انحدار (ويعني زيادة استطاعة ضوئية في وحدة التيار فوق العتبة) أكبر من $120\ mWA^{-1}$.

قبل تصنيع النبيطة اللامتناظرة، جرى اختبار فكرة الثنائي الاتجاهية على بنية متناظرة. هذا ماسمح بالتأكد من أن ليزرات QC تستطيع في الحقيقة أن تُشغَّل بالتساوي في كل من اتجاهي الانحياز وبطول موجة إصدار اختيارية قريبة. إن الطول الموجي الأخير بصورة عامة غير ممكن من أجل منابع ضوء أخرى نصف ناقلة متعددة الطول الموجي بسبب الامتصاص المتبادل أو بسبب تجزؤ متانة الهزّاز غير القابلة للدوام بين الانتقالين [14].

نوقشت بنية الطبقة لعينات الليزر الثنائي الاتجاه المتناظر (D2488 وD2498) في شرح الشكل 2. لقد جرى، عند تطبيق حقل كهربائي $\pm 90\ kV\ cm^{-1}$، حساب قيم لـ $Z_{\pm}=0.29\ nm$ و$\tau_{\pm}=75\ ps$ و$k_{\pm}=1.12\ nm^2\ ps^{-1}\ eV^{-1}$ التي تعطي $E_{\pm}=174\ meV$ ($\lambda_{\pm}=7.15\mu m$) ووسيط مُعامل كسب $g_{\pm} \approx 32\ cm\ kA^{-1}$.

تبين مميزات النبيطة لعينة الليزر D2488 (الشكل 4) أن كلا قطبيتي الانحياز تفضي إلى إصدار عند طول الموجة نفسه $\lambda_{\pm} \approx 6.75\ \mu m$ في درجات الحرارية القرّية. إن الانزياح الأزرق للإصدار عند زيادة درجة حرارة الحوض الحراري يكون بسبب انحياز العتبة الأكبر الذي يجب أن يُطبق لحقن كثافة التيار الأعلى بشكل متطابق J_{th}. يبين الليزر كثافة تيار عتبة جيدة مقدارها حوالي $3.1\ kA\ cm^{-2}$ (الشكل 4B). يمكن تحقيق استطاعات ذروة ضوئية $\geq 300\ mW$ عند درجات الحرارة القرّية بالإضافة إلى كفاية ميل عظمى $\geq 480\ mW\ A^{-1}$. النتيجة الأخيرة رائعة، حتى عند مقارنتها مع بعض ليزرات QC الأحادية الاتجاه التي نشر عنها حتى الآن [7,9,10] مع أطوال موجية قابلة للمقارنة. تساوي درجة حرارة التشغيل النابضة العظمى في الوقت الحاضر حوالي 150 كلفن. يُعزى الانخفاض السريع نسبياً في أداء النبيطة مع درجة حرارة الحوض الحراري



الشكل 4– مميزات نبيطة العينة D2488، ليزر QC ثنائي الاتجاه متناظر.
(A)– بُيّنت ذروة طول موجة الإصدار كتابع لدرجة الحوض الحراري من أجل القطبية الموجبة (الأزرق) والقطبية السالبة (الأحمر). تبين الأشكال في الداخل أطياف الإصدار المطابقة في الدرجات المنخفضة من الحرارة. يعوّض فقدان الغلاف الأملس لجميع أنماط فابري – بيروت Fabry-Perot إلى تراكب طيف الإصدار مع عصابات الامتصاص الرئيسة لبخار الماء في مسار الحزمة.
B– L-I و (I-V) هي مميزات ليزر دليل الموجة ذات الحافة العميقة التنميش بطول 3 ملم وعرض 16 مكرومتر يعمل بنمط نبضي. قيست المنحنيات المميزة I-V عند الدرجة 50 كلفن. بُيّنت المنحنيات في درجات الحرارة الظاهرة في المخطط. تدل الخطوط الزرقاء على القطبية الموجبة والخطوط الحمراء على القطبية السالبة. قيست الاستطاعة الضوئية من سطيحة مفردة بكفاية جمع 60%.

إلى الإثارة الحرارية للحوامل في الحالة المُثارة للبئر الكمومي للمنطقة الفعّالة.

إلى جانب التطبيقات الأخرى، يمكن لهذا الليزر أن يُقدِّم بديلاً عن استخدام ليزرين، أحدهما متجاوب مع انتقال جزيئي أو ذرّي خاص من نوع غاز أثر، والآخر بعيد عن التجاوب في الامتصاص التفاضلي LIDAR (كشف الضوء وإحكامه) والذي يُعرف أيضاً بـ DIAL [15,16]. من أجل هذا التطبيق، يجب تشغيل الليزر بتغيير نبضات تيار القطبية المعاكسة (أي تعديل التيار الجيبي)، ويجب تنسيب إشارات العودة عند الطولين الموجيين. وأخيراً، وجد أن مبدأ تصميم هذا الليزر قابل للتطبيق أيضاً على ليزرات الشلال ذات العصابة البينية [مع بنى غير متجانسة من النوع II] [17,18].

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

REFERENCES المراجع

[1] J.Faist et al., Science 264, 553 (1994).

[2] F.Capasso, C. Gmachl, D. L. Sivco. A. Y. Cho, Phys. World 12, 27 (1999(

[3] F. Capasso, Science 235, 172 (1987).

[4] A. Y. Cho Ed., Molecular Beam Epitaxy (AIP Press, Woodbury, NY, 1994).

[5] C. Gmachl et al., IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., 5, 808 (1999).

[6]. Certain bipolar semiconductor lasers, when biased in reverse polarity, can function as photodetectors, as has recently been demonstrated (19).

[7] J. Faist et al., Nature 387,777 (1997).

[8] This requirement makes the task of designing the bidirectional laser more difficult, as in general the applied electric field across any QC laser scales lin-early with the energy of the optical transition.

[9] J. Faist et al., Appl. Phys. Lett. 68, 3680 (1996).

[10] J. Faist et al., IEEE J. Quantum Electron. 34, 336 (1998).

[11] A. Tredicucci et al., Appl. Phys. Lett. 72, 2388 (1998).

[12] C. Sirtori et al., ibid. 66, 3242 (1995).

[13] The discrepancy in λ_+ (λ_-) corresponds to an applied bias 0.09 V (0.64 V) higher than the design value, which results in a relative difference in the threshold voltage of only 0.55 V. This is in reasonable agreement with the experiment and its uncertainties.

[14] A. Tredicucci et al., Nature 396, 350 (1998), and references (3-7) therein.

[15] M. W. Sigrist, Air Monitoring by Spectroscopic techniques (Wiley, New York, 1994) , chap. 3 and 5.

[16] For applications of QC lasers in general, a high operating temperature is highly desirable. Although operation up to room temperature is readily achieved in a pulsed, low-duty-cycle mode (5), continuous wave operation is at present limited to temperatures below 175 K (20). Promising proposals for improvements exist, for example, through suppression of the non- radiative recombination pathways (21, 22).

[17] B. H. Yang et al., Appl. Phys. Lett. 72, 2220 (1998).

[18] L. Olafsen et al., ibid., p. 2370.

[19] D. A. Louderback, O. Sjolund, E. R. Hegblom, J. K0, L. A. Coldren, IEEE Photonics Technol. Lett. 11, 304 (1999).

[20] C. Gmachl et al., ibid., in press.

[21] C.F.Hsu, J.S.O.P.S.Zory,D.Botez, Proc. SPIE 3001, 271 (1997).

[22] K. W. Berryman, S. A. Lyon, M.Segev,J.R.Engholm, in IEEE/OSA CLEO'99 Conference (Optical Society of America, Washington, DC, 1999), p. 52.

[23] We are grateful to S. N. G. Chu for his help with material characterization, in particular transmission electron microscopy, and to H. Kogelnik for stimulating discussions. This work has been supported in part by the Defense Advanced Research Projects Agency/ U.S.Army Research Office under contract DAAG55-98-C-0050.

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

الليزرات والضوئيات*

فاليري جاميسون

ملخص

أدّت التحسينات التي طرأت على الليزرات والضوئيات إلى تطبيقات واسعة الانتشار في العلوم والتقانة والطب، والتي ستستمر بالازدهار والتقدم في القرن الحادي والعشرين.

يؤثّر الضوء على أسلوب الحياة التي نعيشها اليوم بطرق لم تكن لتخطر على بالنا منذ بضعة عقود فقط. فاكتشاف الليزر أدى إلى الاتصالات التي تتم عن طريق الألياف الضوئية، وإلى الأقراص المدمّجة لتخزين المعطيات (البيانات)، وإلى الجراحة الليزرية، وقد كان للتحسينات الأخرى التي طرأت على الضوئيات تأثير أقل وضوحاً من ذلك لكنه يساويه في العمق. وكأمثلة على ذلك نذكر تقانات الطباعة الحجرية (الليثوغرافيا) الضوئية المستخدمة لصنع جذاذات الحاسوب، والمجاهر ذات الفصل الشديد، وحساسات أشعة ماتحت الأحمر ومنابع إضاءة شديدة الفعالية.

وعندما ندخل في القرن القادم سيكون للضوء دور أكثر خطورة في الطريقة التي نتواصل فيها، وفي الطريقة التي نمارس فيها الطب، وفي الأدوات التي نستخدمها لاستكشاف آفاق علمية جديدة، وبحلول عام 2005 ، على سبيل المثال، يُقدَّر أن يبلغ طول كبل الألياف الضوئية التي ستركّب لأغراض الاتصالات بحوالي 600 000 km تقريباً، أي خمسة عشر ضعف محيط الكرة الأرضية.

الاستفادة من المواد

مثلما مكّنت الضوئيات من إحداث تقدم علمي في فروع عديدة ثم انتقل تأثيرها إلى الصناعة بأكملها، كذلك فإن التقدم المفاجئ الذي حصل في علم المواد قد أمكن من إحداث تقدم في الضوئيات.

في مكان آخر من هذا العدد يصف فِدريكو كاباسو F.Capasso، والعاملون معه في تقانات لوسنت Lucent Technology كيف أن التقدم في تقنيات إنماء الأفلام الرقيقة قد قاد إلى جيل جديد من ليزرات أنصاف النواقل يُعرف باسم ليزرات الشلال الكمومي quantum cascade lasers.

إن المبدأ الفيزيائي الذي يقوم عليه عمل هذه النبائط يختلف اختلافاً كلياً عن الأنواع الأخرى من ليزرات أنصاف النواقل. إضافة إلى ذلك، فإن ليزرات الشلال الكمومي تتمتع بقدرة أعلى من القدرة التي تعطيها ليزرات الديودات عند الطول الموجي ذاته لأن كل إلكترون يُحقن إلى النبيطة يخلق فوتونات عديدة، بدلاً من فوتون واحد في الليزرات العادية.

هناك مظهر جذري آخر لهذه الليزرات، وهو أن الطول الموجي الصادر يعتمد على ثخانات الطبقات المختلفة ضمن النبيطة بدلاً من اعتماده على الخواص الذاتية للمواد، وبعبارة أخرى نقول، إنه من الممكن هندسة ليزرات الشلال الكمومي. بحيث تُصدر الضوء في مجال واسع من الأطوال الموجيّة، وذلك باستخدام التركيبة نفسها من المواد.

في الوقت الراهن تصنع ليزرات الشلال الكمومي كي تعمل ما بين منتصف تحت الأحمر وحتى تحت الأحمر البعيد، وهو مجال من الطول الموجي لم توفر له المنابع الموجودة متطلباته، قد فتح هذا مجالاً من التطبيقات الجديدة، كالتحسّس البيئي والمطيافية ذات الدقة العالية.

أحد التحدّيات البارزة هو بناء ليزر شلال كمومي يعمل عند الطول الموجي 1.3μm أو 1.55 μm، وهما طولان موجيّان ذواتا أهمية في الاتصالات بواسطة الألياف الضوئية.

إن إصدار الضوء ليس حِكراً على أنصاف النواقل اللاعضوية، ففي مكان آخر من هذا العدد يصف ريتشارد فريند R.Friend وجِرمي بَرّوغز J.Burroughes وتاتسويا شيمودا T.Shimoda كيف أن النبائط القائمة على البوليمرات العضوية تتهيأ لدخول السوق. على الرغم من أن التقارير عن الديودات المُصدرة للضوء (LEDs) المصنوعة من البوليمير تعود إلى عام 1990 ، إلّا أنّ هذه النبائط المُبكّرة لم تكن فعّالة بما فيه الكفاية.

إن أداء الديودات البوليميرية المصدِرة للضوء تقدمت بسرعة على مدى السنتين الماضيتين، نظراً للتقدم الملحوظ في فهم الخواص الفيزيائية والكيميائية للمواد.

إن باستطاعة الديودات LEDs البوليميرية الآن أن تصدر ضوءاً له سطوع مصابيح التنغستين التقليدية وتتمتع بعمر يصل إلى آلاف الساعات مما يجعلها مثالية لتطبيقات الإنارة.

---

* نشرت هذه المقدمة في مجلة *Physics World*, June 1999. ترجمة هيئة التحرير - هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

إن أول نبائط يتم إنتاجها تجارياً ستستخدم كأضواء خلفية back-lights للهواتف المتحركة، وللمنتجات الإلكترونية المحمولة الأخرى. أما عن سوق العارضات الملونة فتشير التقديرات إلى أنه يبلغ 40 bn $ أربعون بليون دولار سنوياً، وإنه لمن المدهش أن تسير عظمة صناعة الإلكترونيات جنباً إلى جنب مع التقانة.

هناك تطبيق هام آخر للبوليميرات سيكون في مجال الخلايا الشمسية، وعلى الرغم أنه ما يزال في طور البحث، فإن الخلايا ذات الفولطية الضوئية تستطيع أن تؤدي إلى لوحات شمسية بمقاييس كبيرة ومحمولة ورخيصة، يبدأ مفتاح النجاح في السوق عند إيجاد طريقة قليلة الكلفة لتصنيع النبائط.

الليزرات والطب

في السنوات الأخيرة وجدت ليزرات الحالة الصلبة والفائقة السرعة تطبيقات واسعة النطاق عندما بدأت تكاليف تصنيعها بالانخفاض. (في الصفحة 92) من هذا العدد يصف باول فرنش P.French كيف تُستخدم الليزرات فائقة السرعة للتصوير الطبي الحيوي. بالفعل، فإن التقانات الجديدة لتحسين تجميع وتحليل المعلومات الطبية والحيوية، قد يكون لها تأثير على الطب في القرن الحادي والعشرين أعظم من الاختراقات، والتقدم المفاجئ كما في نقل الأعضاء. إن الليزرات فائقة السرعة ستمكّن من دراسة العمليات الحيوية في ثلاثة أبعاد وبفصل أفضل من المجاهر التقليدية.

إن الصعوبات التي حالت دون التطبيقٌ واسع الانتشار للضوئيات في الطب السريري هي كون النسيج يُعثِر الضوء، ولكن بفضل التقدم في الليزرات والضوئيات والقدرة على الحساب، بدأ الباحثون في التغلب على هذه الصعوبات، إن المقدرة على التصوير من خلال عدة سنتمترات من النسيج ستقود إلى وقفة تأمل في الأساليب التي تعمل بها الأعضاء، بما فيها الدماغ.

هذا ليس سوى غيض من فيض عن الأمثلة التي تبين كيف ستبدو الليزرات، والضوئيات في حياتنا في القرن القادم. تشمل التطورات في الضوئيات عملياً كل حقل من حقول العلم والتقانة، بينما تسيِّر صناعة الضوئيات نفسُها كثيراً من البحوث الأساسية في علم المواد، وفي الفيزياء الذرية وفيزياء المادة الكثيفة. وفي السنوات القادمة ستتقدم التطورات في الضوئيات وفي علم المواد بسرعة لم يسبق لها مثيل، مُغيّرةً حياتنا بطرق لم تكن سوى محض خيال.■

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

ليزرات الشلال الكمومي*

فِدريكو كاباسو، كلير غماشل،
قسم بحوث فيزياء أنصاف النواقل
دِبوراه ل سيفكو وألفرِد ي تشو
مختبر بحوث أنصاف النواقل – مخابر بل – موراي هيل
– NJO 7974 – الولايات المتحدة الأمريكية

ملخص

إن التحسينات التي طرأت على المواد المصنّعة وفق ميكانيك الكم قادت إلى ليزرات أنصاف نواقل عالية الاستطاعة بشكل أساسي، وهي ملائمة لمجال واسع من التطبيقات.

الكلمات المفتاحية: ليزر، ليزر شلال كمومي، ليزر حاجز كمومي، شبيكة فائقة، تطبيقات، تحسّس كيميائي، ليزر التغذية الراجعة المتوزعة.

تُستخدم ليزرات أنصاف النواقل بكثرة في الحياة العصرية. ففي الاتصالات تقوم بإرسال الإشارات لآلاف الكيلومترات على طول الألياف الضوئية. في الإلكترونيات الاستهلاكية، تستخدم ليزرات أنصاف النواقل لقراءة البيانات على الأقراص المتراصة compact disks والـ CD-ROM، وتشمل التطبيقات الأخرى الطابعات الليزرية والمؤشرات الليزرية. على الرغم من كونها بحجم حبة الملح، فمقطعها العرضي بضعة مكرونات وطولها بضع مئات من المكرونات بصورة نموذجية، فإن ليزرات أنصاف النواقل تشكل جزءاً متكاملاً من العالم المعاصر.

إن الحزمة المخفية (غير المرئية) من ليزر شلال كمومي عالي الاستطاعة تضيء عود ثقاب يضعه في طريقها واحد من المؤلفين (ك.غ). الليزر الذي طوله 2.25 mm وعرضه 17μm، موضوع في جهاز قرّي (كريوستات) عند درجة حرارة الآزوت السائل ويبدر استطاعة ضوئية تفوق 200 mw من كل سطيح بطول موجي يبلغ 8.0μm. وفي النمط النبضي تصدر نبائط مماثلة استطاعات تصل حتى 600 mW في درجة حرارة الغرفة.

إن قلب هذه النبائط، التي عُرضت لأول مرة من قِبل علماء من الاتحاد السوفيتي السابق والولايات المتحدة في عام 1969 وعام 1970، هو "منطقة فعّالة" تتألف من شطيرة من مادتين نصف ناقلتين مختلفتين في ما ندعوه بنية لا متجانسة مضاعفة double heterostructure. يمتصّ نصف الناقل الضوء عندما تُثار الإلكترونات من عصابة التكافؤ إلى عصابة النقل بواسطة الفوتونات. تترك هذه العملية "ثقباً" موجباً في عصابة التكافؤ. أما إصدار الضوء فيتم بعملية معاكسة، عندما تهبط الإلكترونات إلى عصابة التكافؤ وتجمل الثقوب معتدلة. يدعى فرق الطاقة بين قمة عصابة التكافؤ، وقاع عصابة النقل "طاقة فجوة العصابة" band-gap-energy. تُشكّل هذه الخاصة الصفة المميزة الأساسية لنصف الناقل وتؤدي دوراً أساسياً في فهم عمل الليزرات المصنّعة من أنصاف النواقل.

المنطقة الفعّالة هي شطيرة مُقحَمة في وسط وصلة p-n. فأحد جانبي الوصلة، وهو الجانب p، يُطعَّم إيجابياً ويحتوي على ثقوب زائدة. أما الجانب الآخر من الوصلة، وهو الجانب n، فمُطعَّم سلبياً ويحتوي على إلكترونات زائدة. عندما تطبق فولطية ذات قطبية مناسبة على النبيطة، تُحقَن الإلكترونات والثقوب الإضافية إلى المنطقة الفعّالة، حيث "تعود للاتحاد" recombine هناك وينتج من هذه العملية فوتونات. إن طاقة هذه الفوتونات تكاد تكون مساوية لطاقة فرجة العصابة للطبقة المركزية في المنطقة الفعالة.

كي يتولد الإشعاع الليزري يلزم قيمة دنيا لتيار كهربائي، تدعى "تيار العتبة" I_{th}، وذلك للتغلب على كل الفَقْد الضوئي. يتحدد المجاوب اللازم لعمل الليزر بواسطة السُطَيْحات المشقوقة على امتداد المستويات البلورية والعمودية على شريط الليزر. يبلغ طول هذا المجاوب النموذجي بضع مئات المكرونات، أما عرضه وارتفاعه فيبلغ كل منهما بضعة مِكرونات.

لمّا كانت فرجةالعصابة للطبقة المركزية تعيّن الطول الموجي لليزر λ، فإن المواد التي لها فرجات عصابة منخفضة نسبياً، كسبائك زرنيخيد الغاليوم (GaAs) وفسفيد الإنديوم (InP)، تُستعمل في ليزرات تحت الأحمر القريب، الليزرات التي أطوالها الموجية 1.3μm و 1.55μm المستخدمة في الاتصالات الضوئية. تستخدم سبائك نتريد الغاليوم إنديوم، التي لها فرجات عصابة أكبر، في ليزرات الضوء الأزرق ذي الطول

* نشر هذا المقال في مجلة *Physics World*, June 1999. ترجمة هيئة التحرير – هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

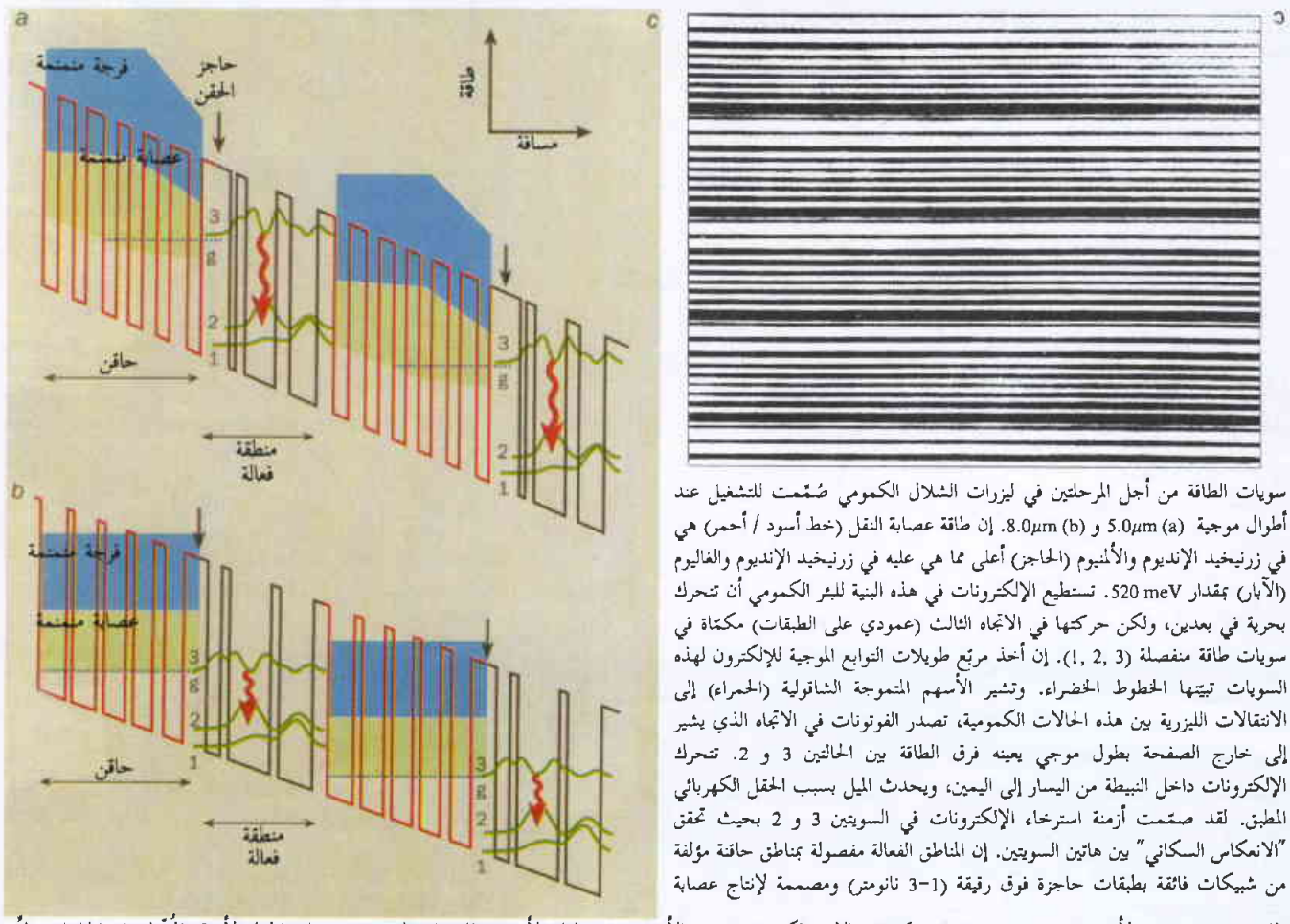
الموجي الأقصر [1]. على كل حال، إن هذا "الانصياع المطلق لفرجة العصابة" يصبح قيداً شديداً في منطقة تحت الأحمر المتوسط (أي بين 2μm إلى 20μm) من الطيف. إن أنصاف النواقل التي تتمتع بفرجات عصابة صغيرة، كأملاح الرصاص مثلاً، تكون أقل صلابة، وأقل وثوقاً وتكون عند المعالجة أكثر صعوبة من السبائك القائمة على الـ GaAs و InP.

يُعرف قسم تحت الأحمر المتوسط من الطيف بمنطقة "البصمة الجزيئية" molecular fingerprint لأن الغازات والأبخرة لها مظهر امتصاص دليلي tell-tale ترافقه اهتزازات جزيئية في هذا الجزء من الطيف. كما أنه يحتوي على نافذتين مهمتين (3-5μm و 8-13μm)، حيث المحيط الجوي شفاف نسبياً فيهما. يمكن استخدام هاتين المنطقتين لكشف آثار قليلة من غازات وأبخرة بيئية وسامّة حتى حساسيات تبلغ أجزاء بالبليون في الحجم في تطبيقات بيئية وصناعية مختلفة. تشمل هذه المركبات ثنائي أكسيد الكربون، والماء، وأحادي أكسيد الكربون، وثنائي أكسيد الكبريت، والميثان، والأمونيا، وحمض كلور الماء وحمض فلور الماء، وجزئيات أخرى عديدة من التي تساهم في التلوث، ولها آثار عميقة على الظواهر الجوية المتنوعة كطبقة الأوزون والمطر الحمضي.

هناك قيد مهم على ليزرات الديودات وهو أن فوتوناً واحداً فقط من الليزر يتشكل مقابل حقن كل زوج مؤلف من إلكترون وثقب إلى المنطقة الفعّالة. لذلك فإن خرج الاستطاعة من سُطيح واحد هو $P=1/2\ \eta h\nu_L\ (I-I_{th})/e$، حيث $h\upsilon_L$ هي طاقة الفوتون، و I هو تيار الشوق، و I_{th} هو التيار العتبة، و e هي شحنة الإلكترون.

إنّ العامل 1/2 يُمثّل حقيقة أن الخرج يتوزع بالتساوي بين الوجهين (السطيحين)، و η عدد يعتمد على خواص الجوف الضوئي مثل الفقْد الداخلي، وطول الجوف وانعكاسية الوجهين. العدد η أقل من الواحد دوماً.

الشكل 1- الأصول الكمومية للضوء



سويات الطاقة من أجل المرحلتين في ليزرات الشلال الكمومي صُمّمت للتشغيل عند أطوال موجية (a) 5.0μm و (b) 8.0μm. إن طاقة عصابة النقل (خط أسود / أحمر) هي في زرنيخيد الإنديوم والألمنيوم (الحاجز) أعلى مما هي عليه في زرنيخيد الإنديوم والغاليوم (الآبار) بمقدار 520 meV. تستطيع الإلكترونات في هذه البنية للبئر الكمومي أن تتحرك بحرية في بعدين، ولكن حركتها في الاتجاه الثالث (عمودي على الطبقات) مكمّاة في سويات طاقة منفصلة (1, 2, 3). إن أخذ مربّع طويلات التوابع الموجية للإلكترون لهذه السويات تبيّنها الخطوط الخضراء. وتشير الأسهم المتموجة الشاقولية (الحمراء) إلى الانتقالات الليزرية بين هذه الحالات الكمومية، تصدر الفوتونات في الاتجاه الذي يشير إلى خارج الصفحة بطول موجي يعينه فرق الطاقة بين الحالتين 3 و 2. تتحرك الإلكترونات داخل النبيطة من اليسار إلى اليمين، ويحدث الميل بسبب الحقل الكهربائي المطبق. لقد صمّمت أزمنة استرخاء الإلكترونات في السويتين 3 و 2 بحيث تحقق "الانعكاس السكاني" بين هاتين السويتين. إن المناطق الفعالة مفصولة بمناطق حاقنة مؤلفة من شبيكات فائقة بطبقات حاجزة فوق رقيقة (1-3 نانومتر) ومصممة لإنتاج عصابة طاقة منمنمة (مبينة بالأخضر) وفرجة منمنمة ذات كثافة حالات إلكترونية (مبينة بالأزرق). إن الحالة الأساسية للعصابة المنمنمة g، ممثلة بالخط الأزرق المُنقّط. إن الحاقنات تلقّن الإلكترونات إلى السوية العليا من سويات انتقال الليزر من خلال عبور نفقي مجاوب، وتقتلعها من السويات الدنيا التي تساعد على قيام الانعكاس السكاني اللازم لعمل الليزر. ويتعيّن طول موجة الليزر بصورة رئيسية بواسطة عرض أعرض طبقتين من GaInAs في المنطقة الفعالة والحاجز السابق. يبلغ عرض الحواجز الواسعة 4.7 nm و 4.0 nm من أجل ليزر بطول موجي 5.0 μm، و 6.5 nm و 5.3 nm من أجل نبيطة تُصدر ليزراً بطول موجي 8.0 μm. (c) صورة بالمجهر الإلكتروني النافذ ذي الفصل العالي ذات مراحل أربع لليزر طول موجته 5.0 μm. تمثل الخطوط البيض GaInAs والخطوط السود AlInAs ويمكن أن نرى بوضوح الطبقتين الثخينتين GaInAs في كل طبقة.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

من الواضح أنه عند بقاء η و I_{th} بدون تغيير فإن استطاعة الليزر تتناقص مع كبر الطول الموجي. فمثلاً إن ليزر ديود يُصدر عند الأطوال الموجية الحمراء حيث طاقة الفوتون فيها $h\upsilon_L$ تساوي 2eV تقريباً سيكون أكثر استطاعة بعشرين مرة من ليزر يصدر ضوءاً عند منتصف المجال تحت الأحمر (12μm) والذي يصدر فوتونات طاقتها $h\upsilon_L \approx 0.1$ eV. إضافة إلى ذلك فإن η تصبح أصغر عند اقترابنا من الأطوال الموجية الأطول لأن الفقد الضوئي يزداد هناك.

شلال من الإلكترونات والفوتونات

يعتمد ليزر الشلال الكمومي على مبدأ مختلف تماماً عن مبدأ الليزر العادي.

لقد اخترع، وعُرِض لأول مرة في عام 1994 من قبل ثلاثة من مؤلفي هذا المقال (هم كاباسو وسيفكو وتشو) مع جيروم فيست J.Faist وكالو سيرتوري C.Sirtori وألبرت هَتشينسون A.Hutchinson [2] في مختبرات بِل في مورّاي هيل، بنيوجرسي. يَستخدِم ليزر الشلال الكمومي نوعاً واحداً من حاملات الشحنة، هي الإلكترونات، لذا فإنه يُدعى الليزر أحادي القطبية unipolar laser. إن ليزرات الشلال الكمومي أكثر استطاعة من ليزرات الديودات التي تَصدُر عند الطول الموجي نفسه، لأن كل إلكترون محقون يخلق فوتونات عديدة، بدلاً من فوتون واحد فقط. يعمل الأثر الشلالي هذا كما يلي: بعد أن يصدر الإلكترون المحقون فوتوناً في المرحلة الأولى من النبيطة، فإنه لا يفنى (أي العودة للاتحاد) بثقب في عصابة التكافؤ، كما الحال في ليزرات الديود، لكن يُعاد حقنه إلى المرحلة الثانية، حيث يصدر فوتوناً آخر، وهكذا [3, 4].

إن ليزر الشلال الكمومي في جوهره يعمل كالشلال الإلكتروني، فالإلكترونات تهبط متعاقبة بسلسلة من خطوات الطاقة المتماثلة تنشأ في المادة أثناء إنماء البلّورة، مصدرة فوتوناً عند كل خطوة. تعطى الاستطاعة بـ $P = N^{1/2}\eta h\upsilon_L(I-I_{th})/e$، حيث N تمثل عدد المراحل في النبيطة.

تنص هذه المعادلة بكل بساطة على أن كل إلكترون يساهم في التيار فوق العتبة يصدر N فوتوناً ليزرياً، وفي نبائطنا نحن فإن N تقع في المجال 25–75 ، ولكننا عرضنا أيضاً الفعل الليزري في نبائط ذات مرحلة واحدة فقط. من الناحية العملية فاقت ليزرات الشلال الكمومي أداء ليزرات الديودات التي تعمل عند الطول الموجي ذاته بعوامل أكبر من 1000 بعبارات الاستطاعة نظراً للأثر التعاقبي (الشلالي) والمقدرة على جريان تيارات كبيرة. تتمتع المواد المستعملة في ليزرات الشلال الكمومي بفرجات طاقة عريضة مما يسمح لها أن تنقل تيارات يمكن لها أن تتلف نبائط مصنوعة من مواد ذات فرجة طاقة ضيّقة.

إن المظهر الثوري الآخر لليزر الشلال الكمومي هو أنه بالإمكان تصميمه كي يصدر الليزر عند أي طول موجي وفي مجال واسع جداً باستخدام تركيبة المواد ذاتها في المنطقة الفعّالة. ويتم ذلك لأن طول موجة الليزر λ، يتعين بثخن الطبقات بدلاً من فرجة عصابة المواد، ولفهم كيف يجري ذلك نحتاج إلى النظر في عصابة النقل لليزر الشلال الكمومي بشيء من التفصيل.

في ليزر الشلال الكمومي، لا تهبط الإلكترونات في عصابة التكافؤ، كما أُشير آنفاً، بل إنها تصدر فوتوناً بالقفز من سوية طاقة منفصلة عالية في عصابة النقل إلى سوية منفصلة أخفض تقع في عصابة النقل أيضاً (الشكل 1). تنشأ هذه الحالات المنفصلة من استكمام حركة الإلكترون العمودية على مستوي الطبقات في المنطقة الفعالة. تُعرف هذه الظاهرة باسم "أثر الحجم الكمومي" quantum size effect. إن أنصاف النواقل المختلفة في المنطقة الفعالة لها فرجات عصابية مختلفة، وهذا يؤدي إلى خلق آبار كمومية. وهذه الآبار الكمومية ذات سويات طاقة منفصلة تتعين بثخانتها، مشابهة لمسألة الجسيم في صندوق الشهيرة التي تُدرَّس في مقررات تدريس ميكانيك الكم التمهيدية. إن الأصل الذي جاء منه ليزر الشلال الكمومي هو بنية مصخَّم اقترحها في عام 1971 رودي كازارينوف R.Kazarinov وروبرت سوريس R.Suris [5]، وبعدئذ في معهد أيوفي Ioffe في الاتحاد السوفييتي السابق، حيث يتم الانتقال الضوئي بين سويات طاقة الآبار الكمومية المتجاورة، والتي تُضخ بالعبور النفقي بصورة متعاقبة.

في ليزرات الآبار الكمومية التقليدية، يؤدي الحصر الكمومي للإلكترونات والثقوب في منطقة البئر الكمومي للنبيطة إلى إنقاص كثافة التيار اللازم للفعل الليزري. وفيما يتعلق بطاقة الفوتونات، فإن تعيينها يتم، على كل حال، بصورة رئيسية عن طريق طاقة فرجة العصابة، ويكون لأثر الحجم الكمومي تأثير ضئيل جداً على طاقة الفوتون. وفي ليزرات الشلال الكمومي من جهة ثانية تنجم طاقة الفوتون الكلية عن استكمام سويات الطاقة.

الهندسة الكمومية لمواد ليزرية جديدة

إن وجود سويات طاقة في آبار كمومية أوحت به التجارب الضوئية وتجارب النقل الإلكتروني الرائدة التي أنجزها في عام 1974 ريموند دينغِل R.Dingle، ويل ويغمان B.Wiegmann وتشارلز هنري Ch.Henry في مختبرات بِل، وكذلك من قبل ليروي تشانغ L.Chang، وليو إيساكي L.Esaki ورافائيل تسو R.Tsu لدى IBM في يورك ثاون هايتز، بنيويورك. أضحى هذا العمل الفذ ممكناً بواسطة تقانة لإنماء الأفلام الرقيقة تسمى التنضيد بواسطة الحزمة الجزيئية MBE، التي أُخترعت وطوّرت لدى مختبرات بِلْ من قِبل أحد كاتبي هذا المقال (ألفرد تشو) في أواخر الستينيات.

إن طريقة التنضيد بواسطة الحزمة الجزيئية MBE هي تقانة للترسيب في الخلاء الشديد، حيث يتم تبخير حزم من عناصر مختلفة مُعدَّة للترسيب من بوتقات موضوعة في درجات حرارة مرتفعة وتوجه نحو ركازة بلّورية. كما أن هذه الركازة محفوظة في درجة حرارة عالية لتسمح للذرات التي تضرب السطح أنْ تكرّر البنية البلورية التي تحتها وكذلك توجهها، ويتعين ثخن الفلم المنّمى بفتح وغلق مصاريع ميكانيكية يمكن التحكم بها حاسوبياً، موضوعة أمام البوتقات، وبهذه الطريقة يمكن إنماء طبقات رقيقة بثخن جزيء واحد (طبقة أحادية). يبلغ معدل الإنماء النموذجي 1μm في الساعة.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

واليوم تُستخدم MBE بصورة روتينية في صناعة نبائط أنصاف النواقل التجارية ليزرات الديود المستخدمة لتشغيل الأقراص المتراصّة CD players، وفي محسّات هول Hall sensors من أجل السواقات الصلبة في الحواسب الشخصية، وفي ترانزستورات زرنيخيد الغاليوم منخفضة الضجيج وعالية السرعة التي تستخدم في الاتصالات من بعد. تبين صور المجهر الإلكتروني النافذ لليزرات الشلال الكمومي الاستواء الهائل الذي يمكن تحقيقه في السطح الفاصل بين الطبقات المختلفة (الشكل 1c).

إنّ حقيقة إمكان التحكم مكانياً في تركيب الطبقات المنمّاة بطريقة MBE مع بلوغ دقة ذرية قادت إلى تصميم مواد صنعية لها خواص إلكترونية وضوئية يمكن تفصيلها. يمكن تصميم الطبقات وهندستها بطريقة تكاد تكون كيفية، وذلك من أجل تطبيقات معينة، وهذه الطريقة، التي تدعى هندسة البنية العصابية band-structure engineering ابتدعها أحد كاتبي هذا المقال فِدريكو كاباسو في أوائل الثمانينيات، وقادت إلى جيل جديد من المواد المركبة صنعياً، ونبائط من أنصاف النواقل. يُعد ليزر الشلال الكمومي مثالاً توضيحياً رائعاً للقدرة المشتركة بطريقة MBE وهندسة البنية العصابية.

يمكن أن يُفهم تشغيل ليزر الشلال الكمومي بدلالة تغير طاقة عصابة النقل داخل النبيطة (الشكلان 1a و b). كما سبق وألمحنا، فإن سويات الطاقة تنشأ من استكمام الحركة العمودية على الطبقات، وهذه السّويات هي في الواقع قيعان عصائب الطاقة الفرعية: الإلكترونات تتحرك بحرّية كأمواج مستوية في مستوي الطبقات، وتتغير هذه الطاقة E بصورة تربيعية مع الشعاع الموجي في هذا المستوي. يتعين فاصل الطاقة بين السويتين 3 و 2 بسماكة البئرين الأعرض في المنطقة الفعّالة، والبئر الضيقة السابقة.

تسترخي الإلكترونات، التي هي في حالة مثارة إلى حالات أدنى بعمليات تبعثر يتحكم فيها في المقام الأول إصدار فونون ضوئي. (الفونونات هي اهتزازات مُكمّاة للشبيكة البلورية؛ والفونونات الضوئية هي فونونات مقترنة بفوتونات). في أنصاف النواقل القائمة على زنيخيد الغاليوم والإنديوم تحمل الفونونات الضوئية طاقة تقارب 34 meV. فالإلكترون الذي حقن إلى الحالة 3 بالعبور النفقي من خلال الحاجز الموجود بين الحاقن والآبار الكمومية الثلاثة للمنطقة الفعالة سيتبعثر إلى حالات تنتمي إلى العصابة الفرعية الثانية والأولى. تتميز هذه العملية بزمن تبعثر طويل نسبياً (بضع بيكو ثانية) لأنه يتضمن انتقالاً محدوداً للاندفاع في مستوي الطبقات إلى الفونون.

إن الإلكترون في الحالة 2 سيتبعثر بسرعة كبيرة (0.3 ps ~) إلى السوية 1 لأن ثخن الحاجز المتوسط قد اختير بحيث يكون فاصل الطاقة بين السويتين 1 و 2 ، عند تطبيق حقل كهربائي معين، مساوياً لطاقة الفونون الضوئي ولايوجد انتقال للاندفاع. (إن انتقال الاندفاع ضروري عندما يكون فاصل الطاقة بين العصابتين الفرعيتين المشمولتين بحادثة التبعثر أكبر من طاقة الفونون الضوئي)، ومن الواضح بعدئذ أن السوية 2 تكون في الحالة المستقرة فارغة من الإلكترونات بصورة أساسية لأن "زمن الاسترخاء" من السوية 2 أقصر بكثير من زمن الاسترخاء من السوية 3، وهذا هو بالضبط شرط "انعكاس الإسكان" بين الحالات المُثارة المطلوب للحصول على تضخيم كافي للضوء.

يبين الشكل (1a) البنية العصابية لليزر شلال كمومي يعمل عند الطول الموجي 5.2 μm الذي صُمّم وفق هذه المعايير.

والمظهر الهام الآخر لليزر الشلال الكمومي هو تصميم منطقتي الحاقن/الاسترخاء. وتتألف هذه من بنية "شبيكة بلورية فائقة" superlattice تنفصل فيها الآبار الكمومية بحواجز رقيقة بحيث تمتد الحالات الإلكترونية الناتجة فوق طبقات عديدة، وتتوسع إلى "عصائب" من سويات الطاقة ذات الفواصل الضيقة. الشبيكة البلورية المثالية هي نوع خاص من البنى متعددة الطبقات- درسها لأول مرة إيساكي و تسو في IBM عام 1970- وفيها تصنع كل الطبقات من مادة واحدة ولها ثخن واحد، كما هي الحال في كل طبقات المادة الثانية. الشبيكات البلورية الفائقة هي في الأساس بلورات صنعية تمتاز بدورية أكبر بكثير من الدورية الذريّة. تفصل بين عصائب الطاقة في الشبيكات الفائقة، عصائب منمنمة مُمَلَّسة dubbed minibands، فرجات طاقة صغيرة (بين بضعة أعشار من الـ meV وحوالي 200meV)، تدعى فرجات منمنمة minigaps، تكون كثافة الحالات الإلكترونية فيها منخفضة (تساوي الصفر في الحالة المثالية) في اتجاه الإنماء.

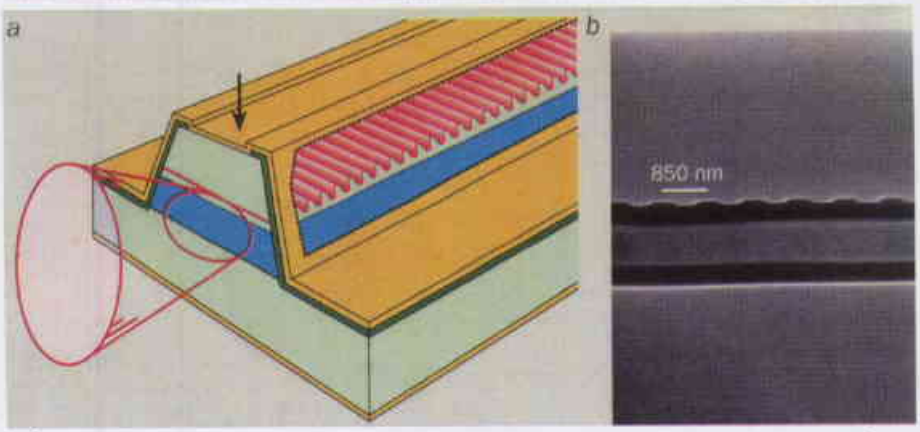
لاحظ بأن منطقتي الحاقن/الاسترخاء مصممتان بحيث تواجه العصابةُ المنمنمة سويةَ الطاقة الأعلى لمرور الليزر على أحد الجانبين، كي يسمح بحقن الإلكترونات، بينما توجد فرجة منمنمة على الجانب الآخر. إن وجود هذه الفرجة المنمنمة يزيد كثيراً زمن حياة السوية الأعلى لأنها توقف العبور النفقي للإلكترونات خارج هذه السوية. وهذا يجعل من الممكن إقامة انعكاس سكاني كبير لدرجة يتغلّب فيها الكسب الضوئي على الفقد الذي يحدث في النبيطة فيحدث الفعل الليزري عند كثافات تيار معقولة. إن منطقتي الحاقن/الاسترخاء مصممتان أيضاً بحيث توجد عصابة طاقة عريضة تواجه السوية الأخفض، والتي تسمح باستخلاص سريع للإلكترونات من المنطقة الفعالة.

إن هذا الكُدْس من المناطق الفعالة والحاقنات مكسوّ بطبقتي نصف ناقل سميكتين لهما قرينتا انكسار أخفض، وهاتان الطبقتان توجهان الإشعاع الليزري على طول المنطقة الفعالة (الشكل 2a). إن هندسة هذا الدليل الموجي مماثلة للهندسة المستخدمة في ليزرات أنصاف النواقل التقليدية.

يمكن تكييف التصميم الأساسي ليلائم أطوالاً موجية أطول بجعل الطبقات في المنطقة الفعالة أثخن وبتعديل منطقة الحاقن من أجل جريان أمثلي للتيار. إن التحدي هو جعل التصميم أمثلياً بحيث تصبح كثافة تيار العتبة منخفضة واستطاعة الخرج عالية. بالإضافة إلى تغيير سويات الطاقة، من المهم الإبقاء على تجاوب الفونون الضوئي بين السويتين 1 و 2، وعنصر المصفوفة الضوئي الكبير (بين 3 و 2) وأزمنة الاسترخاء اللازمة للانعكاس السكاني. وبالمثل فإن طبقات الحقن/الاسترخاء وطبقات الدليل الموجي يجب أن يعاد تصميمها أيضاً.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

الشكل 2- داخل ليزر شلال كمومي



(a) شكل تخطيطي لجزء من ليزر شلال كمومي وحيد النمط وذي تغذية راجعة متوزعة يجري التيار خلال النبيطة من الأعلى إلى الأسفل. تقع الطبقات الموجودة في اللبّ الفعّال (باللون الأزرق) في المستوي الأفقي. إن الضوء المتولّد في اللبّ الفعّال يُوجَّه موازياً للطبقات وذلك بواسطة مناطق مكسوّة (أخضر فاتح) لها قرينة انكسار أخفض. يُبيّن السهم واحداً من أوجه الليزر المنشقّة، الذي يعرّف جوف الليزر (يتراوح طوله بصورة نموذجية ما بين 0.5 mm و 3 mm). إن ليزراً كهذا يستطيع أن يعمل في عدد كبير من الأنماط ، تقع الأطوال الموجية لها جميعاً حول الطول الموجي الذي يتعين بفرق الطاقة بين الحالتين 3 و 2 في الشكل 1. تختار الشبكة (باللون الأحمر) نمطاً وحيداً يحقق شرط براغ (انظر النص). تُشكّل الشبكة بصنع نموذج وتنميشه على الطبقة الدارئة buffer layer مباشرة على أعلى اللب الفعّال، يليها إعادة إنماء الطبقة المكسوّة. تُبيّن الصورة المكروية لمقطع من الليزر (b) الشبكة الناتجة ذات قرينة الانكسار. لهذه الشبكة دور يبلغ 850 nm ويعمل الليزر عند طول موجي قريب من 5.4 μm.

معالم كمومية

لقد كانت مجموعتنا تقوم فيما مضى ببناء ليزرات الشلال الكمومي المبنية على ألمنيوم إنديوم زرنيخ/غاليوم إنديوم زرنيخ (AlIn As/GaIn As) وذلك لتغطي مجال الطول الموجي الكائن بين 3.4μm و 17μm (الشكل 3).

إن الليزرات النبضية التي تصدر في المجال 5-11μm كانت تُشغَّل في درجة حرارة الغرفة باستطاعات ذروة تصل إلى مئات المللي واط وباستطاعات وسطى تبلغ 15mW لكل وجه.

إن أعظم درجة حرارة تشغيل في نمط الموجة المستمرة (CW هي 175 K، وإن أعلى استطاعة في النمط CW (700mW~ لكل وجه)، تم الحصول عليها من نبيطة تصدر عند طول موجي 8.0μm وهي تعمل في الدرجة 30 K. هذا وقد تمّ الحصول على استطاعات في النمط CW تبلغ 200 mW لكل وجه في نبائط تصدر إشعاعاً ليزرياً (تتلازر) عند طول موجي 5.0 μm و 8.0μm وتعمل عند درجة حرارة الآزوت السائل (حوالي 77 K).

إن أدنى كثافة لتيار العتبة قيست تبلغ $5.2\ kAcm^{-2}$ في درجة حرارة الغرفة و $0.75\ kAcm^{-2}$ عند درجة حرارة الآزوت السائل وفي شروط نبضية. على كل حال، لم يكن بمقدورنا تحقيق التشغيل عند درجة حرارة الغرفة فيما وراء 11μm، نظراً لزيادة السرعة في تيارات العتبة مع الطول الموجي. ويبقى هذا تحدياً مهماً للمستقبل.

تضم المجموعات الأخرى، التي بنت ليزرات الشلال الكمومي بمنظومة المواد AlInAs/GaInAs، مانيجه رازيغي M.Razeghi والعاملين معه في جامعة نورثويسترن بـ إيلينويز [6]، وتشارلي إيرونسايد Ch.Ironside وزملاءه في جامعة غلاسكو في المملكة المتحدة، ومجموعة إيزهن لي A.Li من جامعة شانغهاي في الصين.

على كل حال، يمكن صنع ليزرات الشلال الكمومي من مواد أخرى. فقد عرض كارلو سيرتوري C.Sirtori، والعاملون معه في شركة تومسون CSF بباريس وفي جامعة نيوشاتل Neuchatel بسويسرا أول ليزر لشلال كمومي (يعمل على الطول الموجي ($\lambda = 9.5\ \mu m$) مصنوع من زرنيخيد الغاليوم ألمنيوم وزرنيخيد الغاليوم، وهي أنصاف النواقل المستخدمة كثيراً لصنع ليزرات البئر الكمومي [7]. هذا وقد أعلن فريق، يضم جامعة باريس الجنوبية Paris-Sud، وجامعة فيينّا التقنية، وجامعة لينز في النمسا وتومسون CSF عن ليزرات أحادية الاستقطاب بيعصابية فرعية unipolar inter-sub-band laser، أيضاً مصنوعة من AlGaAs / GaAs تصدر ضوءاً ليزرياً بطول موجي 14.5 μm [8]. إن المناطق الفعّالة في هذه النبائط تماثل تماماً المناطق الفعّالة المبينة في الشكل 1 . ويعمل على ليزرات الشلال الكمومي من النوع AlGaAs/GaAs كل من جون كوكبرن J.Cockburn وموريس سكولنيك M.Skolnick وزملاؤه في جامعة شِفيلْد في المملكة المتحدة، بينما عرض إيريش غورنيك E.Gornik والعاملون معه في فيينّا نبائط ذات شبيكات بلّورية فائقة مبنية على زرنيخيد الألمنيوم وزنيخيد الغاليوم.

أما النظريون الذين يعملون في موضوع ليزرات الشلال الكمومي، فمنهم كارل بيدجيون C.Pidgeon من جامعة هِريوت-واط Heriot-Watt بأدنبرغ وألن شور A.Shore من جامعة ويلز Wales في بانغور Bangor.

كما أثبتت مجموعتنا أن ليزرات الشلال الكمومي ذات المناطق الفعّالة من شبيكات فائقة لها بعض المزايا [9]. يحدث الانتقال الضوئي في هذه الليزرات بين قاع وقمة عصابتين منمنمتين متجاورتين، مما يجعل الطول الموجي لليزر محكوماً بالفرجة المنمنمة الفاصلة بين العصابتين المنمنمتين. هذه الفرجة الطاقية حساسة لثخن حاجز الشبيكة الفائقة وللبئر الكمومي. إن لليزر الشلال الكمومي الذي يصدر ليزراً طول موجته 17μm والمبين في الشكل 3 منطقة فعالة في شبيكة فائقة. إحدى حسنات ليزرات الشبيكات الفائقة هي أنها تستطيع أن تنقل تيارات كهربائية أعلى من التيارات التي تنقلها ليزرات الشلال الكمومي التقليدية، ولذا فإنها تمتلك المقدرة على إعطاء استطاعات خرج عالية جداً. وكان فيما سبق أن حققت هذه النبائط استطاعات ذروة أعلى (0.5 W) في درجة حرارة الغرفة من النبائط التي تشبه النبائط المبينة في الشكل 1 من أجل نفس العدد من المراحل (أي 28).

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

وأخيراً صُمِّم ليزر شلال كمومي يُصدر إشعاعاً ليزرياً بطولين موجيّين متباعدين جداً (6.6 μm و7.9 μm) وبصورة متواقتة، وقد جرى عرضه في مختبرات بِل من قِبل مجموعتنا [10]. لهذا الليزر منطقة فعّالة من شبيكة فائقة، لكنه صُمِّم بحيث لا تكون الحالات الإفرادية موسَّعة إلى عصائب بصورة كلية. هذا يسمح بتحقيق الانعكاس الإسكاني بين عدة تشكيلات من سويات الطاقة، وبهذا يؤمن فعلاً ليزرياً متواقتاً عند طولين موجيين.

ومما تجدر ملاحظته أن خطة الشلال ليست مقصورة على ليزرات أحادية القطب. ففي ما يسمى البنية اللامتجانسة من النوع II، تتراكب عصابة النقل في أحد نصفي الناقلين، مثلاً، مع عصابة التكافؤ لنصف الناقل المجاور (أنتيمونيد الإنديوم والغاليوم على سبيل المثال). إن الإلكترون الذي يعبر النفق بين بئر كمومي في عصابة النقل للأول وعصابة التكافؤ للثاني يستطيع أن يصدر فوتوناً، ومن ثم يعاد حقنه في مرحلة مماثلة حيث يمكنه أن يُصدر فوتوناً آخر وهكذا. ففي جوار درجة حرارة الغرفة سُجِّل حديثاً الفعل الليزري في مجال ما تحت الأحمر المتوسط في هذه الأنواع من الليزرات الشلالية من قِبل فريق من مختبر الأبحاث البحرية في وشنطن وجامعة هوستون [11].

من التحديات الواضحة بناء ليزر شلال كمومي يعمل على الطول الموجي 1.3 μm أو 1.5 μm، وهي المنطقة المهمة بالنسبة للاتصالات بواسطة الألياف الضوئية. وإذا انتقلنا إلى أطوال موجية أقصر فإن الأمر يتطلب آباراً كمومية أعمق ومن ثمّ مواد مختلفة. ويبدو أن التركيبة نتريد الغاليوم والإنديوم / نتريد الغاليوم، هي المادة المنظومة الطبيعية من المواد لمواجهة هذا التحدي، مع أنه ربما ستنقضي سنوات عديدة قبل أن يُبنى مثل هذا الليزر.

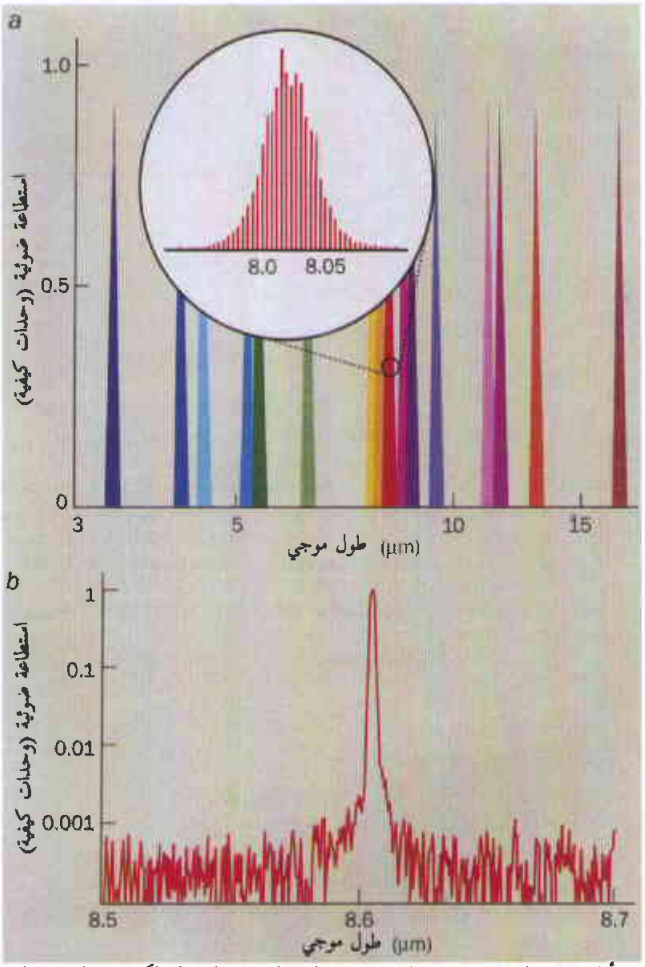
تطبيقات على التحسّس الكيميائي

تستطيع معظم المواد الليزرية تضخيم الضوء في مجال من الأطوال الموجية يعرف باسم "طيف الربح" gain spectrum. إن ليزرات الشلال الكمومي، ككل الليزرات التي تعتمد على جوف فابري - بيرو Fabry Perot، تعمل فعلاً عند عدد من أنماط الأطوال الموجية المنفصلة ضمن طيف الربح هذا. وهذا يرجع إلى أن الضوء داخل جوف الليزر ينتقل جيئة وذهاباً بين مرآتي الوجهين اللذين يحددان الجوف. إن شرط الفعل الليزري هو أن يعيد الحقل الضوئي بناء نفسه، في كل من السعة والطور، بعد كل جولة. وهذا يعني أن الجوف "ينتخب" بفعالية أنماطاً منفصلة من ضمن طيف الربح. كلما كان الزمن الذي تستغرقه جولة الضوء في الجوف أقصر كلما كان الفرق في الطول الموجي بين الأنماط المتجاورة أكبر. إن فاصل التواتر بين الأنماط هو في الحقيقة مساوٍ لمقلوب زمن الجولة. وإن ليزر شلال كمومي نموذجي قد يكون قادراً على دعم 20 نمطاً مختلفاً من الأطوال الموجية.

وعلى كل حال، هناك العديد من التطبيقات، كالمطيافية، تتطلّب القدرة على انتقاء نمط موجي مفرد. ويتم إنجاز ذلك في ليزرات أنصاف النواقل بإضافة شبكة (مشبك) grating يُؤمّن تغذية راجعة ضوئية معزّزة قريبة من طول موجي $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$، حيث ($n_{eff}$ (≅3.25 هي قرينة الانكسار الفعالة للدليل الموجي، وΛ هو دور المشبك (الشكل 2). هذا هو شرط براغ وهو ينصُّ على أن نصف الطول الموجي في المادة، أي $\lambda_B/2n_{eff}$، يجب أن يساوي دور المشبك.

من البدهي أن الطول الموجي لبراغ λ_B، ينبغي أن يكون واقعاً ضمن طيف الربح. تسمح مشابك براغ لمصممي الليزر بانتقاء نمط واحد فقط من الأنماط العديدة الممكنة، أما الأنماط الأخرى فيتم إخمادها بعوامل تبلغ الألف أو أكثر من ذلك (الشكل 3b). يمكن أن يترجم عرض هذه الذروة على أنه "العرض الخطي" line width لليزر. ويُعرّف الليزر الناتج باسم ليزر التغذية الراجعة المتوزّع distributed-feed back laser. تستخدم ليزرات أنصاف النواقل ذات التغذية الراجعة المتوزعة، التي تصدر الطولين الموجيين 1.3μm و 1.55μm، على نطاق واسع في الاتصالات الضوئية.

الشكل 3- الطول الموجي لاختيارك

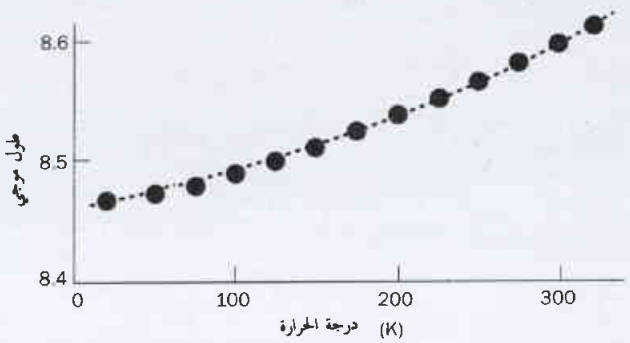


(a) أطياف تخطيطية ذات فصل منخفض لخرج ليزرات الشلال الكمومي النبضية النموذجية الـ 16 بدون شبكات. جرى التحكم في طول موجة الإصدار بواسطة تغيير عرض الطبقات في المنطقة الفعالة لكل ليزر. يتضمن مجال الطول الموجي نوافذ جوية في المجالين 3-5 μm و 8-13 μm. بين الشكل المقحم طيفاً حقيقياً ذا فصل عالٍ من أجل ليزر مصمم للإصدار في جوار 8 μm ويعمل في درجة حرارة الغرفة. يتعين الفاصل بين الأطوال الموجية للأنماط بزمن الجولة التي يقوم بها الضوء في الجوف. إن تضمين شبكة مناسبة في الجوف يُجبر الليزر على العمل في نمط وحيد (b). جُعل تدريج المحور y في هذا الطيف لوغاريتمياً ليُبيّن شدة التخميد الذي أصاب الأنماط الأخرى.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

يمكن "توليف" طول موجة الليزر بتغيير درجة حرارة الليزر. وهذا يُغيّر قرينة الانكسار الفعّالة، ومن ثم الطول الموجي الذي يتحقق عنده شرط براغ، ومع زيادة درجة الحرارة تزداد قرينة الانكسار، وعندها يعمل الليزر عند أطوال موجية أطول (الشكل 4). يمكن توليف ليزرات الشلال الكمومي في مجال عريض من الأطوال الموجية، وتستمر في العمل في نمط مفرد على امتداد المجال، إن ليزرات الديودات التقليدية المصدِرة لليزر تحت الأحمر المتوسط، كليزرات- ملح الرصاص، تتمتع بمجال توليف أصغر من أجل التشغيل في نمط مفرد.

الشكل 4- توليف بدرجة الحرارة



يمكن "توليف" طول موجة الليزر بتغيير درجة حرارته، فتغيّر درجة الحرارة يُغيّر قرينة انكسار مادة الليزر ومن ثم الطول الموجي الذي يتحقق معه شرط براغ. إن هذا المثال (وهو الليزر في الشكل 3b) هو المجال الأوسع لتوليف مستمر تم الحصول عليه حتى الآن بواسطة ليزر نصف ناقل وحيد النمط في مجال تحت الأحمر المتوسط.

لقد كان ستيف شارب S.Sharpe وجيمس كيلي J.Kelly وجون هارتمان J.Hartman من مختبرات شمال غرب الباسيفيك الوطنية (PNNL) في ولاية واشنطن، يقومون بتقييم ليزرات الشلال الكمومي ذات التغذية الراجعة المتوزعة التي صنعناها بغية استعمالها في تطبيقات التحسّس الكيميائي خلال السنتين الماضيتين [12]. وقد أثبتت اختباراتهم عدة أمور هامة تتعلق بهذه النبائط:

إصدار أطوال موجية قابل للتكرار إلى أبعد حد، وذلك من أجل درجة حرارة معينة وشروط تيار سوق معينة،

إصدار أطوال موجية قابل للتكرار من أجل ليزرات مُعدَّة بعمليات إنماء مختلفة بطريقة MBE

تشغيل قوي

عرض خطي ضيق

إصدار بخط مفرد

تعديل موثوق للطول الموجي. كما أنهم بيّنوا أنه من الممكن أن نحصر خرج استطاعة ضوئية لابأس بها في بضعة أنماط مكانية، وهذه الأنماط ستسمح بإجراء قياسات "طريق مفتوح" open path على مدى أطول (3 كيلومتر أو أكثر) في الجو.

من أجل تطبيقات تجارية عديدة، كالتحسس البيئي، تعدّ قابلية الحمل والتكلفة المنخفضة أمرين هامين، مثل التشغيل عند درجة حرارة الغرفة، وعليه يجب أن تستخدم هذه الليزرات أجهزة تبريد متوفرة تجارياً، كالمبرّدات الكهرحرارية، لتأمين توليف للطول الموجي. لقد كان إدوارد ويتّاكر E.Whittaker ومجموعته في معهد ستيفن للتقانة في نيوجرسي، بالتعاون مع مجموعتنا، أوّل من أنجز تحسّساً كيميائياً قرب درجة حرارة الغرفة بنبائط نبضية ذات تغذية راجعة متوزعة [13]. لقد تمكن ويتّاكر، والعاملون معه من كشف آثار من أكسيد النتروز (N_2O) في الآزوت بحساسية تُقدّر بـ 250 جزءاً في البليون في عرض عصابي يساوي $1H_z$ (الشكل 5a).

هذه التقنية مقصورة على كشف معالم طيفية عريضة نسبياً، كالتي تُشاهد في الغازات والأبخرة في شروط محيطية. وهذا يرجع إلى أن التسخين الذي يحدث أثناء نبضة التيار يجعل الطول الموجي الصادر يتغير تغيراً ضئيلاً، وهذا يساهم في العرض الخطي للّيزر. فمن أجل أفضل ليزر شلال كمومي بطول موجي $8\mu m$، يبلغ هذا العرض الخطي التحريكي بضع مئات ميغا هرتز MHz من أجل نبضات بعرض 10 نانوثانية ويزداد مع دور (فترة بقاء) النبضة.

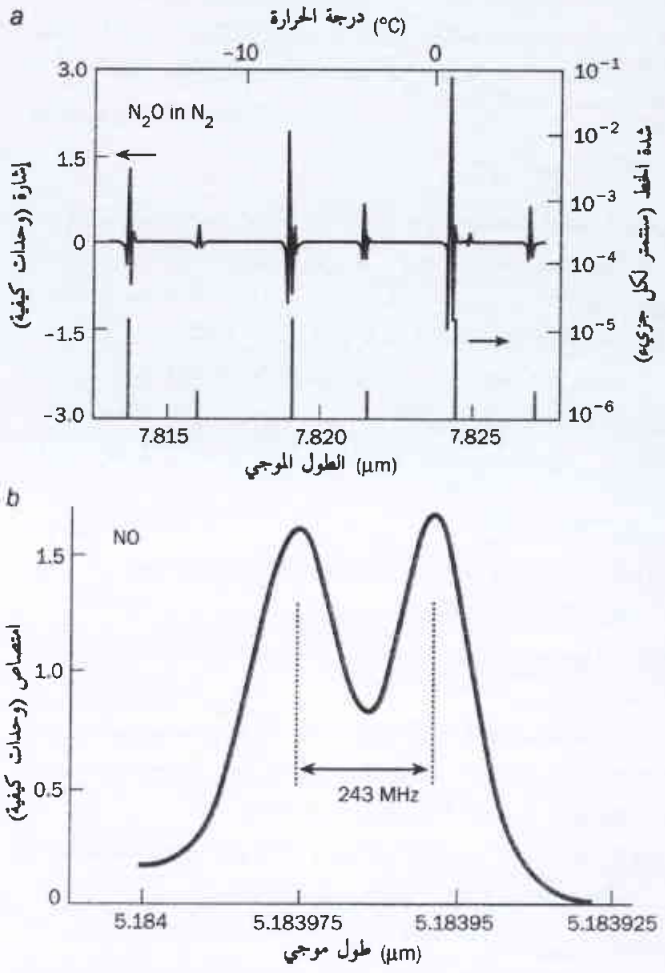
يمكن الحصول على العرض الخطي الليزري الضيّق الضروري للمطيافية ذات الفصل العالي، بتشغيل النبيطة في نمط الموجة المستمرة (CW). لقد قاس شارب والعاملون معه طيف الامتصاص المباشر لأكسيد النتروز عند ضغط منخفض <2 تور بالقرب من $\lambda = 5\mu m$ وذلك بكنس الليزر عبر التجاوب بتيار سوق على شكل "أسنان المنشار" تواتره 10kHz وأخذ المتوسط لأطياف امتصاص عديدة (الشكل 5b). إن انشطار الامتصاص المقيس (243 MHz) وموضع الذُرى على وفاق ممتاز مع القيم المأخوذة من قواعد البيانات الطيفية. لقد قُدِّر المتوسط الزمني لعرض خط الليزر أثناء فحوص الامتصاص هذه ووجد أنه يساوي بضع عشرات ميغا هرتز، ويمكن إنقاصه إلى بضعة ميغا هرتز باستعمال منابع تيار منخفضة الضجيج. من المحتمل أن يكون العرض الآني لخط الليزر أقل من ذلك بكثير، ويجب أن يكون من الممكن إنقاصه إلى حد سكولو - تاونس Schawlow-Townes الذي يطبق على الليزرات الذرية أو الجزيئية. وسيكون هذا من رتبة 1kHz من أجل 100 mW من الخرج الضوئي.

لقد أعلن مؤخراً كل من باربرا بالدوس B.Paldus [14] وتوم سبنس T.Spence وريتشارد زير R.Zare من جامعة ستانفور في كاليفورنيا، وجوس أومنز J.Oomens وفرانس هارِن F.Harren وديف باركر D.Parker من جامعة نيجميغن في هولندا وكذلك مجموعتنا عن أولى تجارب المطيافية الضوئية الصوتية باستخدام ليزرات الشلال الكمومي ذات التغذية الراجعة المتوزعة. تستطيع هذه التقنية المستخدمة كشف الأمواج الصوتية المتولدة بالتسخين عندما يمتص الغاز الموجود في خلية صوتية حزمة من ليزر موجة مستمرة CW كانت قد "قُطّعت" عند تواترات سمعية. لقد تم كشف الأمواج بواسطة ميكرفون عند موضع أمثلي بالقرب من جدار الخلية الغازية. وقد تم تبريد الليزر تبريداً قرّياً cryogenically ووُلّف طوله الموجي على طول موجي يقارب $8.5\ \mu m$. استعمل بالدوس والعاملون معه هذه التقانة للكشف عن الأمونيا في النتروجين عند تراكيز خفيفة تبلغ

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

حوالي 100 جزء في البليون عند درجة حرارة وضغط نظاميين من أجل عرض عصابي قدره 1 Hz.

الشكل 5- تطبيقات ليزرات الشلال الكمومي



(a) مطيافية تعديل الطول الموجي لأكسيد النتروز (N_2O)، ويُعرف أيضاً باسم غاز الضحك laughing gas، الممدّد بالآزوت بمعدل 10%، تم الحصول عليها بواسطة ليزر شلال كمومي نبضي ذي تغذية راجعة متوزعة يعمل بالقرب من درجة حرارة الغرفة. إن كشف N_2O مهم جداً في كيمياء الجو. إن صور الامتصاص في الطيف على وفاق ممتاز مع تلك التي أخذت من قاعدة بيانات HITRAN النموذجية (الخطوط الخضر الشاقولية). لقد تم الحصول على حد للكشف يبلغ 250 في البليون في خلية ضوئية بطول 1m وبعرض عصابي 1Hz من قياسات مماثلة عند تمديدات مختلفة. جرى ترتيب درجة حرارة الليزر بهذه القياسات بطريقة كهرحرارية، بحيث كان خط الليزر بجوار تجاوب N_2O ذي الأهمية. وبعدئذ جرى توليف الطول الموجي توليفاً دقيقاً بتراكب "منحدّر" تيار current ramp و"تعتيب" عالي التواتر high - frequency dither (أي اهتزاز) مع التيار النبضي الذي يسوق الليزر. إن المنحدر والتعتيب يجعلان درجة حرارة الليزر، ومن ثم الطول الموجي، يتغيران بأسلوب محدّد تماماً، مما سمح بالقيام بقياس دقيق جداً للامتصاص بدلالة الطول الموجي [13].

(b) طيف الامتصاص المباشر لأكسيد النتريك (NO) ذي الضغط المنخفض (أقل من 2 تور) مقيساً بواسطة ليزر شلال كمومي ذي تغذية راجعة متوزعة مبرّد بالآزوت السائل ومن نوع الموجة المستمرة (CW). يُصدر عند الطول الموجي 5.2μm.

يُبيّن الطيف عالي الفصل، الموسّع بأثر دوبلر، ثنائية الاهتزاز المعروفة جيداً من هذا المركب. إن كشف NO مهم في التشخيصات الطبية والاحترافية.

تبين هذه الأمثلة أن ليزرات الشلال الكمومي ذات التغذية الراجعة المتوزعة، لها بكل وضوح إمكانية استعمال كبيرة لعدد من تطبيقات التحسّس الكيميائي، مثل مراقبة التلوث والتحسس البيئي، والتحكّم بالعمليات الصناعية، والتشخيص الطبي، والتطبيقات الآلية (ذاتية العمل) والعسكرية.

توجّهات وتطبيقات بحثية أخرى

هناك العديد من فرص الإثارة الأخرى بخصوص أبحاث النبائط في ليزرات الشلال الكمومي. وإحدى هذه الفرص، التي انشغل بها جيروم فيست J.Faist من جامعة نيوشاتل بسويسرا كما انشغلت بها مجموعتنا وآخرون، هي بناء ليزر نصف ناقل يعمل بين الطولين الموجيين 60 μm و 100 μm الواقعين في مجال تحت الأحمر البعيد. لقد بنى الباحثون السويسريون حديثاً بنية شلال كمومي غير مُلَيْزَرة - non lasing تصدر إشعاعاً منخفض الاستطاعة عند الطول الموجي 88 μm [15]. يعد ليزر ما تحت الأحمر البعيد تحدياً أساسياً وقد يتناول إعادة تصميم جوهرية لليزر نظراً للفقد الضوئي العالي عند هذه الأطوال الموجية. وقد يلزم أيضاً أدلّة موجية جديدة، أو بُنى غير موجّهة تستعمل شبكات ومرايا خارجية.

هناك مجالات هامة أخرى تجرى متابعتها حالياً في مختبرات بل منها الليزر ذو الأنماط المحصورة mode-locked laser وفيه تُغْلق أنماط فابري – بيرو العديدة على بعضها بعضاً بطور ثابت. يكون خرج الليزر الناتج قطاراً من نبضات فائقة الضيق ذات استطاعة ذروة عالية جداً. ومع زيادة عدد الأنماط المحجوزة معاً، تغدو النبضات أقصر فأقصر وتغدو استطاعة الذروة أعلى فأعلى. وفي الوقت الراهن لا توجد ليزرات من ديودات محصورة الأنماط تصدر في ما تحت الأحمر المتوسط.

إن توجيه الحزمة الإلكترونية غير ممكن في ليزرات الديودات لأن المنطقة الفعالة معتدلة بصورة أساسية. أما في ليزر الشلال الكمومي فيمكن استعمال بوابات كهرساكنة لحرف الإلكترونات التي تجتاز المنطقة الفعالة. وهذا يسمح بتوجيه حزمة الخرج في الفضاء. لقد حصلنا على براءة اختراع نبيطة كهذه عام 1995 (براءة اختراع أمريكية رقم US 5457709).

والتحدي الآخر هو فهم عرض الخط في ليزرات الشلال الكمومي عند سوية أساسية. وقد عمل عدد من الباحثين في مختبرات شمال غرب الأطلسي الوطنية PNNL مع باحثين في JILA وجامعة كولورادو والمعهد الوطني للمعايير والتقانة، وجميعهم في بولدِر بكولورادو، على تثبيت تواتر الإصدار لليزرات الشلال الكمومي ذات الطول الموجي 8.5 μm والتغذية الراجعة المتوزعة الخاصة بنا إلى أفضل من 50 kHz.

وتشمل التطبيقات المستقبلية لليزرات الشلال الكمومي الكشف عن غازات الأثر في الجو، والقضائيات الكيميائية chemical forensics، ومراقبة العمليات البيئية والصناعية، وكشف عمليات المعالجة الكيميائية المحظورة ((كالمخدّرات والمتفجرات) والغازات السامة (الأسلحة الكيميائية) والتكسينات الحيوية (الأسلحة البيولوجية). ومن الاستخدامات الممكنة تشخيص الاحتراق ومحوّل الحفز في

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

السيارات؛ إنّ مراقبة نسبة ثنائي أكسيد الكربون إلى أكسيد النتريك ذات أهمية خاصة في هذه التطبيقات. كما يمكن استخدام ليزرات الشلال الكمومي على المسابر الفضائية لكشف غازات الأثر في أجواء الكواكب الأخرى.

إن التشخيص الطبي غير الاجتياحي في الزمن الحقيقي من أجل الاكتشاف المُبكر للقرحات، أو سرطانات الكولون أو السكري diabetes ليس سوى واحد من أكثر تطبيقات ليزرات الشلال الكمومي المحتملة روعة وسحراً. وعلى سبيل المثال، إن زيادات طفيفة في تركيز الأمونيا بتحريض من Helicobacter Pylori، وهي البكتيريا المسؤولة عن كثير من القرحات، يمكن كشفها عند سويات منخفضة جداً (جزء واحد في البليون جزء من الحجم) في نَفَس المرضى.

إن الاستخدامات الأخرى لليزرات الشلال الكمومي لا تتطلب بالضرورة عملية وحيدة النمط، بل تستفيد من نوافذ الجو الموجودة في المجال 3-5 μm والمجال 8-13μm ومن حقيقة أن بعثرة الحلالات الهوائية aerosols والجسيمات الموجودة في الهواء للضوء عند هذه الأطوال الموجية يكون أقل بكثير من بعثرتها له إذا كان بأطوال موجية أقصر من ذلك. تشمل هذه التطبيقات رادارات تفادي الاصطدام collision - avoidance radars والتحكّم بالتطواف cruise control (لتأمين أقصى قدر من الاقتصاد أو السرعة أو الكفاية) في السيارات (وكل المركبات ذاتية الحركة) والاتصالات الضوئية اللاسلكية optical wireless communications. كما أن الاستطاعة الناتجة من ضم عدة ليزرات شلال كمومي قد تكون ملائمة للتطبيقات العسكرية مثل "كَتْم" blinding الحسّاسات في الصواريخ المقتفية للحرارة heat-seeking missiles.

إن تطوير ليزرات الشلال الكمومي على مدى السنوات الخمس الماضية كان مثالاً تقليدياً للتفاعل بين البحث الأساسي والتطبيقات، وبالتحكّم بسلوك الإلكترونات على المقياس النانوي صرنا قادرين على تطوير نوع جديد تماماً من الليزر الذي يعمل في مجالات للأطوال الموجية التي لم تصل إليها المنابع الموجودة حالياً. وقد فتح هذا مجالاً من التطبيقات متنوعة بقدر تنوع التحسس البيئي والمطيافية ذات الفصل العالي، وتطبيقات أخرى كثيرة لاشك أنها آتية في المستقبل.

المراجع REFERENCES

[1] S Nakamura 1997 Light emission moves into the blue Physics World February pp31-35.

[2] J. Faist et al. 1994 Quantum cascade laser Science 264 553-555.

[3] F Capasso and A Y Cho 1994 Band-gap engineering of semiconductor heterostructures by molecular beam epitaxy Surface Sci. 299/300 878-891.

[4] F Capasso et al. 1997 Infrared (4-11 μm) quantum cascade lasers Solid State Comm. 102 231-236.

[5] R F Kazarinov and R A Suris 1971 Amplification of electromagnetic waves in a semiconductor superlattice Sov. Phys. Semicond. 5 707-709.

[6] S Slivken et al. 1999 High-temperature continuous-wave operation of λ~8μm quantum cascade lasers Appl. Phys. Lett. 74 173-175.

[7] C Sirtori et al. 1998 GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$ quantum cascade lasers Appl. Phys. Lett. 73 3486-3488.

[8] O Gauthier-Lafaye et al. 1999 High-Power GaAs/AlGaAs quantum fountain unipolar laser emitting at 14.5 μm with 2.5% tunability Appl. Phys. Lett. 74 1537-1539.

[9] G Scamarcio et al. 1997 High-power infrared (8 μm) superlattice lasers Science 276 773-776.

[10] A Tredicucci et al. 1998 A multiwavelength semiconductor laser Nature 396 350-353.

[11] L. J. Olafsen et al. 1998 Near-room-temperature midinfrared interband cascade laser Appl. Phys. Lett. 72 2370 - 2372.

[12] S W Sharpe et al. 1998 High-resolution (Doppler limited) spectroscopy using quantum-cascade distributed-feedback lasers Opt. Lett. 23 1396-1398.

[13] K Namjou et al. 1998 Sensitive absorption spectroscopy with a room temperature distributed-feedback quantum cascade laser Opt. Lett. 23 219-221.

[14] B A Paldus et al. 1999 Photoacoustic spectroscopy using quantum-cascade lasers Opt. Lett. 24 178-180.

[15] M Rochat et al. 1998 Far-infrared (λ = 88 μm) electroluminescence in a quantum cascade structure Appl. Phys. Lett. 73 3724-3726.

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

الديودات الليزرية الزرقاء – فوق البنفسجية: آخر ما تم التوصل إليه*

إريك تورنييه
مركز بحوث البنى اللامتجانسة التضيدية وتطبيقاتها
– المركز الوطني للبحوث العلمية – فرنسا

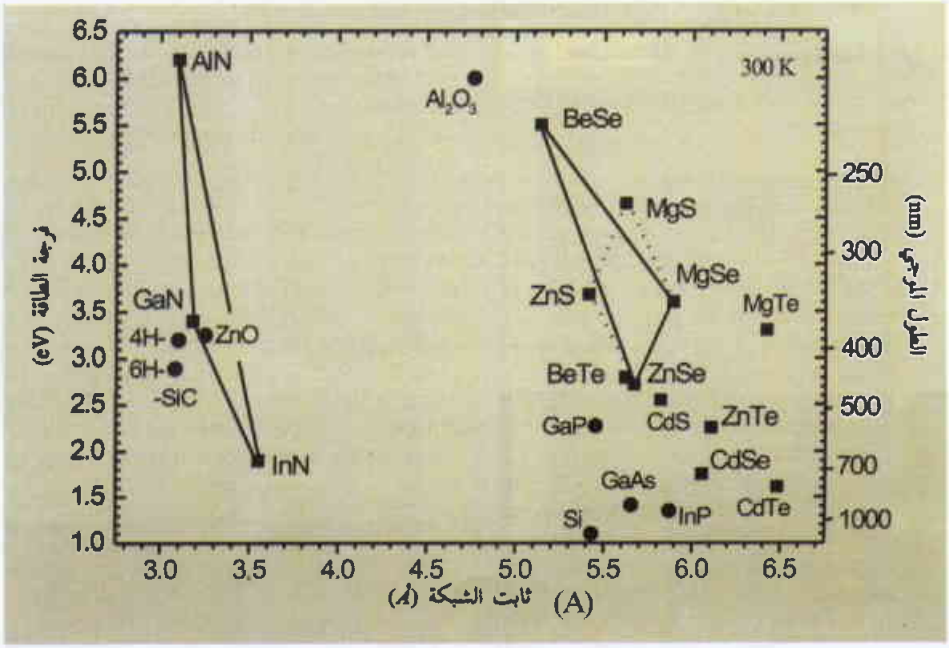
ملخص

تنتظر الليزرات صغيرة الحجم التي تصدر ضوءاً أزرق أو فوق بنفسجي تطبيقات كثيرة منها بصورة خاصة ما يهم الجماهير الواسعة. وهذا ما أدى إلى بذل جهود كبيرة في مجال البحث ترمي إلى الحصول على مثل هذه الليزرات. وإحدى الطرق الواعدة هي صنع ديودات ليزرية من أنصاف النواقل. هناك عائلتان من المواد، أساسهما ZnSe و GaN، من المحتمل أن تتيحا صنع مثل هذه الديودات الليزرية. سوف نستعرض النتائج التي تم الحصول عليها في هذين المجالين، وسنوضح لماذا تبقى كفاءات الديودات الليزرية المبنية على أساس ZnSe تراوح مكانها بينما أنجز تقدم سريع في الديودات الليزرية المبنية على أساس GaN، وهو الاتجاه الذي أثبت أنه الواعد فعلاً.

الكلمات المفتاحية: ديود ليزري، بنية لامتجانسة، ركازة تنضّدية، تماسّ أومي، بئر كمومي، فرجة طاقية.

يوجد في الوقت الحاضر طلب شديد على ليزرات صغيرة الحجم تصدر الضوء الأزرق أو فوق البنفسجي (UV) وذلك من أجل تطبيقات مختلفة مثل اللوحات الضوئية وآلات النسخ الملونة وبثّ الصور بواسطة الإسقاط وتخزين المعطيات. وهذا المجال الأخير هو في الواقع أحد الدوافع الرئيسية للأعمال الجارية. فعلى سبيل المثال تتيح أقراص CD التي تُقرأ بواسطة ليزرات الأشعة تحت الحمراء القريبة تخزين 0.65 جيغابايت وأقراص DVD التي تقرأ بواسطة ليزرات الأشعة الحمراء تخزين 4.7 جيغابايت، بينما يتيح استخدام الليزر البنفسجي تخزين 15 جيغابايت. ويعكس كون كل الشركات الكبرى اليابانية والأمريكية، وبصورة أقل الأوربية، رائدة في أعمال البحث أهمية هذا الموضوع.

يبقى صنع ديودات ليزرية هو الحل الأكثر قبولاً من بين الحلول الأخرى الممكنة لصنع ليزرات صغيرة الحجم زرقاء – فوق بنفسجية (مثل مضاعفة التواتر، ديودات ليزرية، ...). لذلك فقد اتجه جهد بحثي هام نحو دراسة أنصاف النواقل التي يحتمل أن تصنع منها هذه الديودات الليزرية. يبين الشكل 1 المخطط المألوف الذي يمثل "فرجة الطاقة" energy gap لأنصاف النواقل بدلالة ثابت الشبكة البلّورية، أما الأطوال الموجيّة للإصدار فهي محمولة على المحور الشاقولي الأيمن في هذا الشكل. وقد ذكرت كذلك الركازات التنضّدية



الشكل 1– الفرجة الطاقية لأنصاف النواقل II-VI وتروراتها بدلالة ثابت الشبكة البلورية لها. أشير إلى المواد المستخدمة في الديودات الليزرية الزرقاء – فوق البنفسجية بالإشارة (■). بينما أشير إلى المواد المستخدمة كركازات تنضّدية بالإشارة (●). حملت الأطوال الموجية للإصدار المقابل على المحور الأيمن.

* نشر هذا المقال في مجلة *Optique Et Photonique*, 4/1999. ترجمة الدكتور بسام المعصراني – قسم الفيزياء – هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

epitaxial substrates المستخدمة غالباً مع البُنى اللامتجانسة heterostructures لأنصاف النواقل. إن المكوّنات الأساسية لصناعة ديودات ليزرية على أساس بنى لا متجانسة نصف ناقلة هي آبار كمومية quantum wells مُصدرة وسبائك ذات فرجات طاقية كبيرة لتأمين الحصر confinement وركازة تنضّدية. وعدا عن ذلك ينبغي أن تكون المواد قابلة لأن تطعَّم (doped) بالنوعين n و p وأن يكون ذلك كله، إن أمكن، بتوافق بين الخلايا البلّورية بأمل الوصول إلى نوعية مثلى. ويبين الشكل 1 السبائك المرشحة للاستخدام.

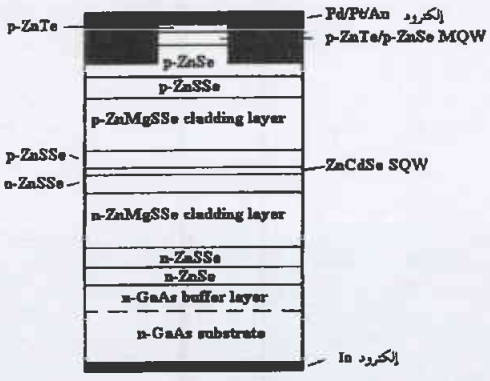
توجد، بين أنصاف النواقل ذات الفرجة المباشرة، عائلتان من المواد هي المركبات II-IV على أساس ZnSe والمركبات III-V على أساس GaN تتيح الوصول إلى المنطقة الزرقاء – فوق البنفسجية (الشكل 1). ومن المهم أن نلاحظ أنه على الرغم من أن الاتجاهين ZnSe و GaN يُدرسان منذ عدة عقود إلا أن التقدم الحاسم نحو صناعة الديودات لم يتم إلا في التسعينيات. فمن بين العقبات المشتركة يمكن ذكر مايلي: اختيار الركازة التنضّدية ونقاوة مصادر المواد وصنع التماسّات الأومية المنخفضة المقاومة.

سوف نستعرض فيما يلي من المقالة النتائج التي تم التوصل إليها في الاتجاه ZnSe بينما سنوجز تلك التي تم التوصل إليها في الاتجاه Ga. وفي النهاية سوف نعرض الآفاق المستقبلية في المدى القصير والمدى المتوسط.

الديودات الليزرية التي أساسها ZnSe

كانت مجموعات الشركات فيلبس Philips و 3M وسوني Sony هي الرائدة في هذا المجال الذي لا تزال تسيطر عليه Sony. وبشكل موازٍ قامت مخابر أكاديمية عديدة بمتابعة دراسات أكثر تخصصاً حول نقاط مختلفة لها تأثير على كفاءات المكوّنات.

بسبب عدم توفر مادة ZnSe حجمية تتمتع بجودة كافية لأن تستخدم كركازة للتنضيد، فقد توبع تطور هذا الاتجاه على ركازات من GaAs الذي يقرب ثابت شبكته البلّورية من ثابت شبكة ZnSe (الشكل 1). وقد كانت في أساس الديودات الليزرية التي صنعتها الشركة الأمريكية 3M عام 1991 البنى اللامتجانسة البسيطة جداً $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnS_{0.06}Se_{0.94}$. أما المنطقة الفعّالة فكانت مؤلفة من بئر كمومي قسري constrained (أو عدة آبار) من $Zn_{1-x}Cd_xSe$ حيث تتراوح x بين 0.03 و 0.35. وقد اشتغلت هذه الديودات الليزرية خلال عدة دقائق في النمط النبضي في درجات الحرارة المنخفضة جداً (القرّية). وبعد هذه الأعمال أنجز تقدم كبير. فأحسن الكفاءات يتم الحصول عليها حالياً بواسطة بُنى معقدة مماثلة لتلك المرسومة في الشكل 2، وهي التي اقترحتها ونفّذتها بصورة أساسية شركة سوني [1]. إن المنطقة الفعالة للديود الليزري هي بئر كمومي قسري من ZnCdSe يحوي من 30 إلى 35 % من Cd. أما الدليل الموجي فمؤلف من طبقتين من السبيكة الثلاثية $ZnS_{0.07}Se_{0.93}$ المتوافقة مع الركازة GaAs. أما السبيكة الرباعية ZnMgSSe فهي تؤمّن حصر حوامل الشحنات المحقونة في البنية. وأخيراً تؤمن الاتصال الأومي من الناحية p بنية تدرجية متعددة الآبار الكمومية ZnSe/ZnTe المعدنة. وتحضَّر البنية الكلية بواسطة التنضيد بالحزم الجزيئية molecular beam epitaxy (MBE) وهي الطريقة الوحيدة التي تتيح الحصول على ديودات ليزرية بصورة قابلة للتكرار. وتعمل هذه الديودات في النمط المستمر في درجة الحرارة 300 K مدة تقرب من 500 ساعة وهي تولّد استطاعة ضوئية تقرب من 1 mW عند طول الموجة 515 nm. تبقى هذه النتائج متواضعة جداً لا يمكن معها طرح هذه الديودات تجارياً. وسوف نستعرض فيما يلي المشاكل الرئيسية التي ما زالت تحدّ من الكفاءات.



الشكل 2– بنية ديود ليزري أساسه ZnSe طورته شركة سوني.

التطعيم من النوع p

كي نتمكّن من حقن حوامل الشحنات بسهولة في الديود الليزري، يجب أن تكون طبقتا الحصر مطعمتين تطعيماً قوياً: إحداهما من النوع n والأخرى من النوع p. لكن معظم أنصاف النواقل II-VI لا تطعّم بسهولة إلا من نوع واحد n أو p، دون أن تكون أسباب هذا السلوك معروفة بشكل واضح. أما فيما يتعلق بـ ZnSe وسبائكه فقد كان التطعيم من النوع p مشكلة خلال عقود من الزمن. فالمواد الآخذة (المتقبلة) acceptors الممكنة هي عناصر العمودين I و V (من الجدول الدوري للعناصر) حيث تحل الأولى محل Zn والثانية محل Se. فمن بين عناصر العمود I هناك Li الذي يطعم ZnSe من النوع p، لكن ذراته صغيرة تنتشر بسهولة في البنى اللامتجانسة ولا يمكن إذن استخدامه لتحضير المركبات المطلوبة. ومن بين عناصر العمود V يبدو الآزوت مرشحاً جيداً لكن إقحامه صعب بسبب كونه غازاً. ولم يمكن إلا في بداية التسعينيات بيان أن N_2 المنشَّط في انفراغ البلازما يمكن بالفعل أن يطعم ZnSe من النوع p في التنضيد بواسطة الحزم الجزيئية MBE [2]. فالبلازما من نوع التواتر الراديوي RF أو التجاوب الإلكتروني السكلوتروني ECR تكسر جزيئات N_2 وتفصلها إلى ذرات N قد تكون متأينة أو مثارة، وهذه تدخل في المادة أثناء نموها.

وعلى الرغم من ذلك فقد تبين منذ الأعمال الأولى أن فاعلية هذا التطعيم محدودة. وبالفعل لم يكن تركيز حوامل الشحنات الحرة التي يمكن الوصول إليه في ZnSe:N يتجاوز $1\text{-}2\times10^{18}$ cm^{-3}. وقد ساهمت مجموعات عديدة في دراسة ZnSe:N وعينت بنيته الإلكترونية. حين تدخل N في ZnSe يُخلق مستوي الطاقة الآخذ قليل العمق، وهو المطلوب للتطعيم من النوع p، ولكن يُخلق بصورة موازية عيبان مانحان donors معوِّضان compensators [3]. وتكون النتيجة المؤسفة لهذا السلوك هو أن الشائبة N "تعوّض نفسها" وهذا ما يفسر التطعيم الأعظمي المحدود الذي لا يمكن تجاوزه في ZnSe:N.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

أما عناصر العمود V الأخرى مثل As و P فهي كذلك آخذات محتملة. لكننا بيّنا أنها لا تتيح الحصول على ناقلية من النوع p [4]. ويبدو الآن واضحاً أن الشائبة الوحيدة التي يمكن استخدامها لتطعيم ZnSe وسبائكه بصورة فعالة تطعيماً من النوع p هي N المنشَّط بالبلازما، إضافة إلى أن التطعيم الصرف الأعظمي الذي يمكن الوصول إليه يبقى من رتبة 10^{18} cm^{-3} في ZnSe.

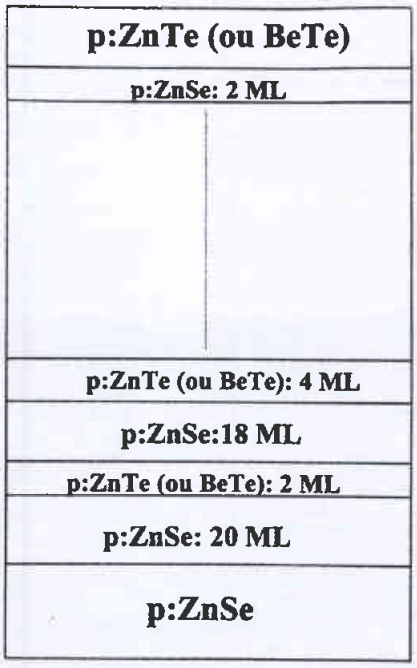
التماسّات الأومية على ZnSe من النوع p

تُحقن حوامل الشحنة في الديود الليزري عبر تماس ينبغي أن يكون أومياً أكثر ما يمكن بحيث لا يضيف حاجزاً كمونياً. وهناك معادن مختلفة تتيح الحصول على تماسّ أومي كاف على ZnSe من النوع n. لكن المشكلة تطرح فيما يتعلق بالنوع p. وفي الحقيقة فإن عصابة التكافؤ في ZnSe عميقة جداً. وليست لأي معدن طاقة خروج (تابع عمل) كافية لتشكيل تماس أومي مباشر على ZnSe:N. إضافة إلى ذلك، رأينا في الفقرة السابقة أن التطعيم الأعظمي الذي يمكن الوصول إليه يبقى ضعيفاً، فليس من الممكن إذن زيادة تطعيم السطح بهدف الحصول على تماس بواسطة أثر النفق. والحل الوحيد هو اللجوء إلى تقنيات تماسات أكثر تعقيداً.

يُطعَّم ZnTe و BeTe، من بين أنصاف النواقل II-VI، تطعيماً من النوع p بسهولة بالغة تصل إلى 10^{19} cm^{-3} أو 10^{20} cm^{-3}. فيمكن إذن تشكيل تماس أومي جيد جداً. لقد كان الحل المقترح لتشكيل تماس على ZnSe:N هو توضيع شبه شبكة من ZnTe أو (BeTe)\ZnSe مثل تلك الممثلة في الشكل 3. تتغير النسبة داخل الدور بصورة يتم فيها الانتقال تدريجياً من ZnSe:N إلى ZnTe:N أو (BeTe:N).

ويوجد في حالة التماس ZnSe\ZnTe عدم توافق في ثابت الشبكة مقداره 7 % بين ZnTe و ZnSe مما يؤدي حتماً إلى توليد عيوب بنيوية في منطقة التماس حتى وإن لم تكن هذه العيوب هي السبب في قصر عمر الديودات الليزرية فإنها تساهم بلا شك في عدم تكرارية كفاءات التماسات التي تشير إليها الأدبيات. وتتراوح في الواقع قيم مقاومات التماس النوعية المنشورة بين $5x10^{-4}$ Ω cm و 10^{-2} Ω cm بالنسبة للجامعتين الأمريكيتين Brown و Purdue، بينما هي $5x10^{-2}$ Ω cm بالنسبة لشركة سوني [5].

إن الفائدة من استخدام BeTe في بنية التماس تعود إلى عدم التوافق الضئيل في ثابت الشبكة (0.8 %) مع ZnSe. ومع ذلك فإن حبه الشديد للرطوبة يقتضي تحييد سطحه بطبقة رقيقة من ZnTe. لقد درسنا هذا النوع من التماس وقسنا مقاوميات من رتبة $5x10^{-2}$ Ω cm، أي مساوية تقريباً لتلك التي يُحصل عليها باستخدام ZnTe [6]. وهذه المقاوميات ما زالت عالية بالنسبة لمكونات كالديودات الليزرية التي ينبغي أن تمرر فيها كثافات تيار ذات شأن. وهذا يوضح الصعوبات المرتبطة بصنع أشباه الشبكات التدرجية هذه حين لا تكون للطبقات أية ذرة مشتركة. ويمكن مع ذلك الاعتقاد بأن عدم وجود العيوب الممتدة يمكن أن يحسن استقرار التماسات في الأجل الطويل.



الشكل 3– بنية تتيح الحصول على تماسّ أومي على الجانب p من الديودات الليزرية (1ML= طبقة ذرّية واحدة، أي نحو 2.8 Å).

سبائك الحصر Zn(Mg)SSe و Zn(Mg)BeSe

لا بد لكي تعمل الديودات الليزرية بصورة جيدة في درجات الحرارة العادية من أن يكون الفرق في الفرجة الطاقية ΔE_g بين سبيكة الحصر ومنطقة الإصدار أكبر من نحو 350 meV. فدون هذه القيمة يهرب جزء لا بأس به من حوامل الشحنة المحقونة في البئر ويُفقد. وفي الديودات الليزرية من الجيل الأول كانت الآبار الكمومية ZnCdSe ذات فرجة الطاقة القريبة من 2.5 eV محصورة بواسطة $ZnS_{0.07}Se_{0.93}$ ذي الفرجة 2.83 eV وهذا لا يتيح تشغيل الديود الليزري في درجات الحرارة العادية. ولذلك اقترحت شركة سوني استخدام السبيكة الرباعية ZnMgSSe، التي يمكن أن تنضد بصورة متوافقة في ثابت الشبكة على GaAs، وهي ذات فرجة طاقية أكبر من 4 eV (الشكل 1). وقد أتاح إدخال سبيكة الحصر هذه وتنفيذ تماسّات أومية نوعية (انظر الفقرة السابقة) الحصول بسرعة على ديودات ليزرية تعمل بصورة مستمرة في الدرجة 300 K.

إلا أن أمرين أساسيين ظهر أنهما معيقان. فالسبيكة الرباعية ZnMgSSe ليست مستقرة ترموديناميكياً. إن التنضيد بواسطة الحزم الجزيئية MBE هي تقنية تنمية خارج التوازن تتيح، من حيث المبدأ، تجاوز بعض الشروط الترموديناميكية وتنضيد مواد شبه مستقرة أو غير مستقرة. ومع ذلك تبقى النوعية البلّورية لمثل تلك الطبقات سيئة بصورة عامة. وهذا ما أكدته الدراسات التي أجرتها شركتا فيلبس و3M بواسطة المجهر الإلكتروني النافذ، والتي بينت أن تركيب الطبقات ZnMgSSe معدَّل modulated دورياً. وتظهر هذه الدراسات كذلك بداية تفكك (تحلل) يجعل من الصعب السيطرة على خواص هذه السبائك. والمشكلة الأخرى، وهي تعيدنا إلى فقرة سابقة، هي التطعيم من النوع p لهذه السبائك. فكما هو الحال بالنسبة إلى ZnSe فإن التطعيم p الوحيد الفعال هو التطعيم بالآزوت المنشَّط بالبلازما. إلا أن التطعيم الصرف للسبيكة ZnMgSSe يتناقص بسرعة كبيرة عندما تزداد فرجة الطاقة. فهذه يجب ألا تزيد عن 2.85 eV في الدرجة 300 K إذا أردنا الحصول على تطعيم من رتبة 10^{17} cm^{-3} وهو الحد الأدنى المقبول لتحضير ديود ليزري [7].

لقد قادتنا هذه القيود إلى دراسة خواص سبيكة أخرى يمكن أن تستخدم للحصر، وهي السبيكة الرباعية ZnMgBeSe التي يمكن الحصول عليها كذلك بفرجة طاقة أكبر من 4 eV على ركازة GaAs (الشكل 1). وهناك ميزة مباشرة هامة مفادها

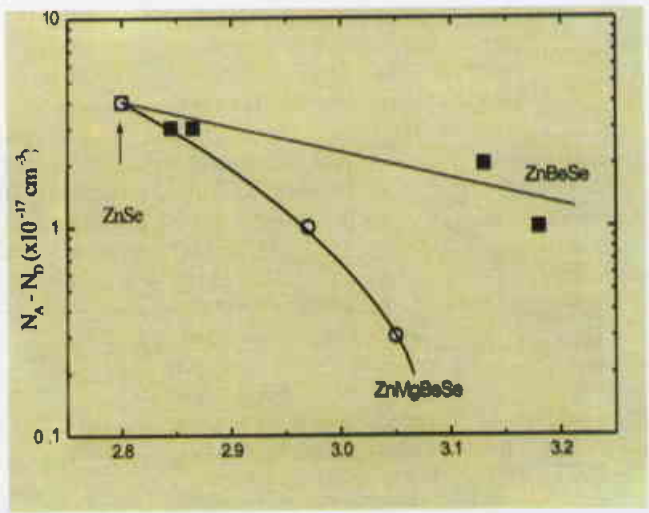
هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

أن هذه السبيكة لا تحتوي إلا على عنصر واحد من العمود VI مما يجعل التحكم بتركيبها أكثر سهولة بكثير من منافستها ZnMgSSe. وبالفعل يمكن الحصول على نوعية بلّورية مثيلة لنوعية الركازة المنضدة بصورة روتينية. وعدا عن ذلك لا تبين المشاهدات بالمجهر الإلكتروني النافذ أية دلائل يمكن أن تشير إلى عدم استقرار السبيكة. ولكن تبقى مع ذلك، للأسف، المشكلة المستعصية السابقة المتعلقة بالمواد التي أساسها ZnSe وهي التطعيم من النوع p. ويبين الشكل 4 تطور التطعيم الصرف للسبيكة الثلاثية ZnBeSe والرباعية ZnMgBeSe بدلالة فرجة الطاقة في درجات الحرارة المنخفضة. ويتبين أن التطعيم الصرف يتناقص ببطء في حالة السبيكة الثلاثية، بينما نراه يتناقص بسرعة كبيرة في حالة السبيكة الرباعية. وكما هو الحال بالنسبة إلى ZnMgSSe لا ينبغي تجاوز الفرجة 2.85 eV في الدرجة 300 K من أجل الحصول على تطعيم من رتبة 10^{17} cm^{-3}. ويبين هذا الشكل كذلك التأثير الضار لـ Mg على إمكان تطعيم السبائك تطعيماً من النوع p [8].

إذا عدنا إلى الشكل 1 الذي يبين أنه يمكن الحصول على السبيكتين ZnMgSSe و ZnMgBeSe بتوافق في ثابت الشبكة على GaAs في مجال واسع من قيم فرجة الطاقة تبين لنا أن التطعيم من النوع p هو وحده الذي يضع حدوداً للتراكيب (وبالتالي للفرجات) التي يمكن استخدامها عملياً. ولهذه القيود تبعات هامة تتعلق بتشكيل الديودات الليزرية. وبالفعل، ونظراً للقفزة الضرورية في الفرجة لتأمين حصر الحوامل حصراً جيداً في البئر الكمومي ($\Delta E_g > 350$ meV) فإن فرجة البئر يجب أن تكون من رتبة 2.4 إلى 2.5 eV وهذا يقابل 30 إلى 35 % من Cd في ZnCdSe. وبما أن الفرق في ثابت الشبكة بين ZnSe و CdSe هو 7 % (الشكل 1)، فإن هذه الآبار الكمومية مقسورة قسراً شديداً.

العيوب وعمر الديودات الليزرية التي أساسها ZnSe

قادت الصعوبات التي تواجه تحسين عمر الديودات الليزرية التي أساسها ZnSe إلى دراسة العيوب الموجودة في البنى اللامتجانسة على أساس ZnSe دراسة تفصيلية. وسرعان ما تبين أن الديودات الليزرية يمكن

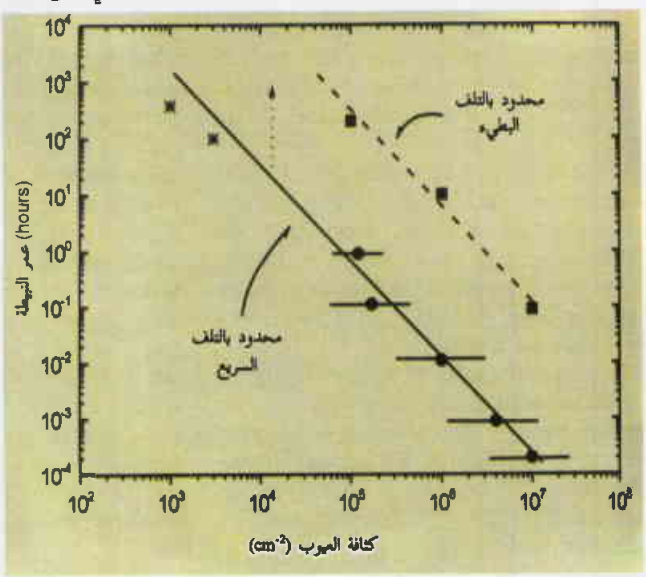


الشكل 4- تطور التطعيم الصرف بدلالة فرجة كل من السبيكتين: ZnBeSe و ZnMgBeSe.

أن تقتلها العيوب الموجودة أصلاً قبل التشغيل أو العيوب التي تنشأ أثناء التشغيل.

إن التلف الذي تسببه العيوب الموجودة أصلاً في الديودات الليزرية هو تلف سريع. وأصل هذه العيوب يقع في المنطقة بين البنى اللامتجانسة II-VI والركازة GaAs. فالعناصر VI مثل Se معروفة بتحييدها سطح GaAs. وتنضيد ZnSe على سطح GaAs المحيَّد يؤدي إذن إلى تشكل جزر نمو، مصادر أخطاء التراكم التي تولّد العيوب. وعلى أية حال فلدى تنضيد طبقة دارئة من GaAs أولاً حيث يتم التحكم بدقة بتركيب سطحها، وبجعل تشكل نوى التبلور (نقاط النمو) لـ ZnSe على GaAs مثلى، يمكن الحدّ من كثافة العيوب الموجودة أصلاً في البنى اللامتجانسة وجعلها بحدود 10^3 عيباً في cm^2. وفي هذه الشروط لا يبقى إحصائياً عيب واحد في ديود ليزري أبعاده 20 x 1000 مكرون مربع قبل تشغيله.

أما التلف الذي تسببه العيوب المتولدة أثناء التشغيل فهو أبطأ. ومصدر هذه العيوب لا يزال أقل وضوحاً. وقد اقترحت شركة Sony أن هذه العيوب تنشأ من الهجرة التي تتبع تجمع العيوب النقطية مثل الشواغر الذرّية vacancies أو الذرّات في المواقع الحشوية (البينية) interstitials. إن ما يسهل هذه التحولات هو طاقة الإشعاع الذي تصدره البنية. يبين الشكل 5 التنبؤات التي قامت بها سوني في العام 1995 [9]. يمثل المستقيم المتصل التطور التجريبي لعمر الجهاز طالما أن كثافة العيوب أعلى من 10^4 في cm^2، أي طالما وجدت أصلاً عيوب في الديودات الليزرية. أما المستقيم المتقطع فيمثل التطور التجريبي لعمر الديودات المصدرة للضوء (LED). وحيث أن هذه تخضع لحقن تيارات ضعيفة فيفترض أن مصدر تلفها هو هجرة العيوب النقطية شأنها في ذلك شأن الديودات الليزرية الخالية من العيوب الأصلية. والتحليل الذي أجرته سوني هو أنه عندما تحتوي الديودات الليزرية إحصائياً أقل من عيب واحد في كل ديود



الشكل 5- تطور عمر الديودات الليزرية (•) والديودات المصدرة للضوء (■) بدلالة كثافة العيوب في البنى اللامتجانسة حسب إيشياشي مجلة J. Cryst. Growth 159 (555) (1996). أضفنا النتيجتين الأخيرتين المنشورتين من أجل الديودات الليزرية (*).

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

ليزري فإن النقطة الممثلة لعمرها يجب أن تترك مستقيم التلف السريع (المستقيم المتصل) وتنتقل إلى مستقيم التلف البطيء (المتقطع) كما يشير إلى ذلك السهم الشاقولي. لكن النتائج المعروفة حتى يومنا هذا تنفي هذا التحليل. وبالفعل فقد وضعنا القيمتين الأخيرتين المعروفتين للعمر (النجمتين) ووجدنا أنهما لا تقعان فقط أسفل مستقيم التلف البطيء وإنما أسفل مستقيم التلف السريع كذلك، وهذا ما يثير الدهشة. فضلاً عن ذلك يمكن من هذا الشكل إدراك ظاهرة أن للعمر إشباعاً (حداً أعلى).

والتفسير المحتمل لهذا السلوك هو القسر الشديد جداً (نحو 2.5 %) الموجود في هذه الديودات الليزرية. وهذا يتأتى من التطعيم الضعيف p للسبائك الرباعية ومن الفرق في الفرجة الضروري لحصر الحوامل في البئر الكمومي المصدر حصراً فعالاً. وهذا القسر يفوق ذلك الذي يمكن أن نصادفه في الديودات الليزرية التي أساسها أنصاف النواقل III-V كما في الجملة (Al)GaAs\GaInAs حيث لا يفوق القسر 1.5 % إلا نادراً. وبما أن المواد II-VI بصورة عامة، وتلك التي أساسها ZnSe بشكل خاص، هي أكثر قبولاً لأن تتولد وتنتشر فيها العيوب من المواد III-V، فيمكن الظن أن الاسترخاء التدريجي للقسر، والذي يمكن أن يشتد نتيجة للإصدار الليزري، يقوم بدور هام في تلف الديودات الليزرية.

الديودات الليزرية التي أساسها GaN

واجه الاتجاه GaN، كما ذكرنا في المقدمة، صعوبات مماثلة لتلك التي واجهتها عائلة ZnSe، لكن التقدم هنا كان باهراً في التسعينيات حيث أن أول عرض للديودات الليزرية كان في كانون الأول من العام 1995. وقد صنعت شركة Nichia Chemical Industry نماذج وطرحتها تجارياً في العام 1999. وتتقدم هذه الشركة اليابانية على كل منافسيها الذين هم أساساً يابانيون (Sony, Fujitsu, Toshiba, ...) بعدة سنوات. أما في الولايات المتحدة فالشركات النشيطة هي Xerox و Hewlett-Packard. وفي أوربا أعلنت شركة Osram في آب 1999 عن صناعة ديود ليزري. وهناك جهود بحثية هامة تتابعها المخابر الأكاديمية في كل القارات من أجل التطبيقات في مجال الإلكترونيات الضوئية أو التواترات فوق العالية.

إن تقنية التنمية الوحيدة التي تتيح في الوقت الحالي تحضير ديودات ليزرية هي التنضيد في الطور البخاري بواسطة التحلل الحراري للمواد المعدنية - العضوية (MOVPE) باستخدام الأمونيا NH_3 كمصدر للآزوت. ومع ذلك فإن النتائج الحديثة التي تم الحصول عليها بواسطة التنضيد بالحزم الجزيئية MBE هي واعدة جداً. وإما أن يكون مصدر الآزوت في هذه الحالة هو N_2 المنشّط بالبلازما أو يكون NH_3.

إن المواد المستخدمة في ديود ليزري نموذجي هي InGaN من أجل البئر الكمومي المصدر وGaN من أجل دليل الموجة وAlGaN من أجل الحصر (الشكل 2). ولن أقدم هنا سوى ملخص موجز جداً للنتائج المنشورة حول عدة نقاط خاصة. وقد تم الحصول على هذه النتائج كلها بطريقة MOVPE إلا إذا ذكر خلاف ذلك. وعلى القارىء المهتم أن يراجع المراجع 10-13 لمزيد من التفصيل حول خواص المواد التي أساسها GaN.

مشكلة الركازة

برزت مشكلة الركازة هنا بصورة أكثر حدة مما هي في الاتجاه ZnSe. وبالفعل لا يوجد في السوق GaN حجمي، وللبلورات الوحيدة المنتجة في مخابر البحوث أبعاد أعظمية من رتبة $1\ cm^2$. هناك مواد موافقة مثل SiC و ZnO (الشكل 1). لكن الإنتاج الصناعي لـ SiC لا يزال حكراً على شركة أمريكية واحدة (Cree). أما ZnO فقد بدأ يظهر في الأسواق مؤخراً. ومن الجدير بالملاحظة أن ازدياد دراسة هاتين المادتين نصف الناقلتين ناتج من اعتبارهما ركازات لتنضيد GaN أكثر مما هو نابع من الاهتمام بخواصهما الذاتية. وحيث أن البنية المستقرة لآزوت العناصر III هي سداسية، فقد كانت الركازة التي تم اختيارها هي السفير Al_2O_3 الذي يتصف رغم ذلك بعدم توافق في ثابت الشبكة مع GaN مقداره 13 %. إن المفتاح للحصول على طبقات صحيحة (سطح مرآتي وكثافة قليلة من العيوب المتبقية ...) هو التنمية في مرحلتين. فينبغي أولاً نترجة السفير لتحويل طبقاته السطحية إلى AlN ثم توضيع طبقة من GaN أو AlN، تدعى طبقة تشكل نوى التبلور، ذات سماكة مختارة بدقة، في "درجة حرارة منخفضة" (نحو 500 إلى 600 درجة مئوية). ثم يُنضد باقي البنية في درجة حرارة "عادية" (نحو 1000 إلى 1100 درجة مئوية) ولكن كثافة العيوب تبقى في مثل هذه الظروف عالية، من مرتبة 10^9 إلى 10^{10} في cm^2، علماً أن أول ديودات ليزرية اشتغلت في درجة الحرارة الاعتيادية كانت قد صنعت من مثل هذه البنى اللامتجانسة.

إلا أن تحسين الكفايات بصفة عامة، وإطالة العمر بصورة خاصة، يمران عبر إنقاص العيوب. وإن التنمية الزائدة بالتنضيد الجانبي Epitaxial Lateral Over-Growth (ELOG) هي تقنية تنمية انتقائية جانبية تقدم أول إجابة. يوضّع أولاً قناع، عادة من Si_xN_y أو من SiO_2، على طبقة تنضّدية من GaN. تحفر بعد ذلك فتحات على شكل أشرطة على هذا القناع خارج الجهاز بطريقة الطباعة الحجرية الضوئية photolithography الكلاسيكية. ثم تدخل العينة من جديد في جهاز التنضيد. وحين تكون الشروط مختارة بصورة ملائمة لا يحدث النمو إلا في فتحات القناع بسرعة نمو جانبية كبيرة. وسرعان ما تلتحم أشرطة GaN لتشكل طبقة منتظمة [14]. وتهبط بذلك كثافة العيوب فوق المناطق المحمية بالقناع إلى نحو 10^6 في cm^2.

أما مرحلة النمو الأخيرة فهي توضيع طبقات سميكة ثم إزالة الركازة الأولية من السفير بصورة يتم معها الحصول على GaN المحمول ذاتياً والذي يستخدم وكأنه ركازة حقيقية. وقد نشرت شركة Nichia نتائج بهذا الاتجاه. ولا شك أن استخدام SiC أو ZnO كركازة سيتطور كذلك.

التطعيم من النوع p

هنا أيضاً كان تنفيذ التطعيم p هو الذي أزال العقبة الأخيرة أمام تصنيع هذه المكونات. وكانت قد أجريت دراسات عديدة في السابق ولكن المشكلة لم تحل إلا في بداية التسعينيات. فمن بين المتقبلات المحتملة من العمود II ليس هناك سوى Mg الذي يتيح بالفعل التطعيم من النوع p. إلا أنه، في "طبقات التطعيم غير المعالجة"، المستحصل عليها بطريقة

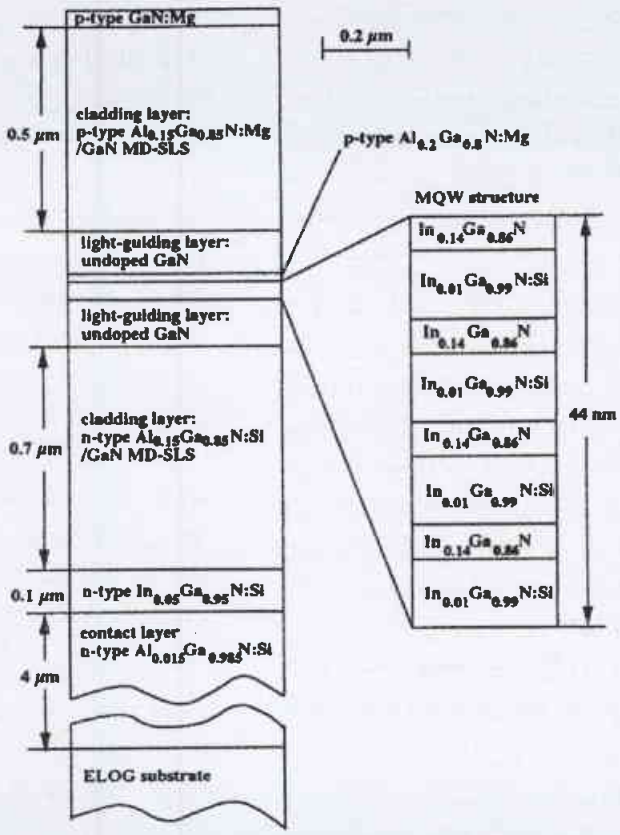
http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

MOVPE، يكون Mg بصورة طبيعية مهمَّداً بالهدروجين الآتي من تحلل NH_3، وينبغي إذن تنشيطه في مرحلة خاصة، مثل الإحماء إلى درجة حرارة أعلى من 700 °C في جو من N_2. ففي هذه الشروط يمكن الحصول على كثافات من الحوامل الحرة أعلى من 10^{18} في cm^3.

لنلاحظ أن لطريقة MBE هنا ميزات تتفوق بها على طريقة MOVPE. وبالفعل فإن مشكلة تهميد Mg لا تبرز فيها. فليست هناك إذن ضرورة للإحماء الذي يمكن دوماً أن يؤثر على خواص الطبقات التنضّدية في البنية اللامتجانسة.

السبيكة InGaN

وهي المادة ذات الفرجة الطاقية الصغيرة من عائلة النتروريات (الشكل 1) فهي إذن ما يشكل الآبار الكمومية المصدِرة أكان ذلك في الديودات المصدرة للضوء (LED) أو في الديودات الليزرية. إن لهذه السبيكة فجوة كبيرة في قابليتها للامتزاج miscibility في الحالة الصلبة مما يؤدي إلى تشكل طبقات غير متجانسة في التركيب. ومن قبيل المفارقة فإن ما يبدو من حيث المبدأ نقيصة يستثمر (ربما عن عمد!) في مصدِرات الضوء التي أساسها GaN. فقد بُرهن مؤخراً أنه في الديودات المصدرة للضوء التي تطرحها شركة Nichia في الأسواق لا تشكل مادة InGaN سبيكة وسطية ذات تأرجحات بنسب مئوية صغيرة كما كان مفترضاً حتى الآن. وفي الواقع فإن السبيكة تتفكك في طورين، شبكة $In_xGa_{1-x}N$ فقيرة في In ($x < 0.06$) وجزر صغيرة من InN شبه نقية تسلك سلوك صناديق كمومية [15]. إن طول موجة الإصدار يعتمد إذن على قدّ هذه الجزر فقط. وهذا يتيح كذلك تفسير لماذا تكون للديودات المصدرة للضوء مردودات إشعاعية عالية جداً. وبالفعل فإن حوامل الشحنة تكون مقتنصة في الصناديق الكمومية و"لا ترى" العيوب، وهي تتحد إذن مع بعضها داخل هذه الصناديق.



الشكل 6– مخطط ديود ليزري أساسه GaN طورته شركة نيشيا.

كفاءات الديودات الليزرية

يبين الشكل 6 بنية الديود الليزري المنضد على ركازة GaN المحضرة بطريقة ELOG. إن المنطقة المصدِرة مؤلفة من بئر كمومي متعدد [13].

وتركيب الآبار المذكور ($In_{0.14}Ga_{0.86}N$) هو التركيب الوسطي. أما في الواقع فهي مؤلفة بلا شك من صناديق كمومية كما ذكرنا سابقاً. لكن تأثير بنية السبيكة ليس معروفاً بالنسبة للديودات المصدرة للضوء. وبالفعل فلدى الحقن الكهربائي الشديد يمكن أن تخرج حوامل الشحنات من الصناديق وتصبح حساسة لوجود العيوب. وبالمناسبة فإن كفاءات الديودات الليزرية تعتمد اعتماداً كبيراً على كثافة العيوب.

بما أن الديودات الليزرية تُختبَر باستمرار فإن الكفاءات المعلنة تختلف دوماً من مؤتمر لآخر. ففي الوقت الحالي يمكن ذكر الأرقام التالية، والتي هي القيم الدنيا. إن كثافة تيار العتبة للديودات الليزرية المنضدة مباشرة على ركازات من السفير (كثافة العيوب تقرب من 10^{10} في cm^2) تتراوح بين 5 و 10 kA/cm^2، وتصدر ضوءاً طول موجته 405 نانومتر. ويبلغ عمرها نحو 3000 ساعة في نظام التشغيل المستمر في درجة الحرارة 300 K. أما إذا كانت منضدة على ركازات ELOG (كثافة العيوب نحو 10^6 في cm^2) فإن كثافة تيار العتبة تهبط إلى 3 kA/cm^2 ويرتفع عمرها حتى 10 000 ساعة (وهذه قيمة قدرت بناء على اختبارات التلف التي أجريت حتى 5000 ساعة)، وذلك من أجل استطاعة إصدار تبلغ 2 mW في الدرجة 20 °C. أما حين تكون استطاعة الإصدار 5 mW وتكون درجة حرارة التشغيل 50 °C، وهذا ما يقابل بصورة أفضل الشروط التي تفرضها تطبيقات الكتابة والقراءة الضوئيتين، فإن العمر المقدَّر يهبط إلى 3000 ساعة. وهو يهبط إلى 250 ساعة من أجل استطاعة 30 mW في الدرجة 50 °C [16,13].

وفي النهاية، حُضّرت مؤخراً ديودات ليزرية على ركازة GaN، وهي في الواقع طبقة سميكة (150 إلى 200 مكرون) من GaN موضّعة على GaN ELOG. أزيلت بعد ذلك ركازة السفير لكي تبقى طبقة GaN حرة تحمل نفسها وتصبح بذلك ركازة بنفسها. وقد بلغ عمر هذه الديودات 160 ساعة من أجل استطاعة 5 mW عند الدرجة 50 °C.

الآفاق المستقبلية

بعد أن سُبر الاتجاهان ZnSe و GaN في التسعينيات من أجل الإصدار الليزري يبدو الآن واضحاً أن كفاءات الديودات الليزرية التي أساسها ZnSe تراوح في مكانها. أضف إلى ذلك أن صعوبات تطعيم سبائك الحصر تحدّ من طول موجة الضوء الذي تصدره الديودات الليزرية التي أساسها ZnSe فتبقى عند الأخضر ($\lambda \sim 500$ nm). وبالفعل فإما أن الآبار الكمومية ليست محصورة بشكل كاف أو أن طبقة الحصر مطعَّمة

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

تطعيماً خفيفاً. وفي كلتا الحالتين لا يمكن للديودات الليزرية أن تعمل بصورة مرضية في درجة الحرارة العادية.

أما الديودات الليزرية التي أساسها GaN التي تصدر في المجال البنفسجي فهي على العكس من ذلك تتقدم تقدماً ثابتاً ومستمراً منذ العام 1995. ومعظم المخابر الصناعية نشيطة في هذا المجال. ولذلك لدينا كل الحق في أن نعتقد أن هذه الديودات الليزرية ستحتل معظم التطبيقات، بينما هناك إمكانية لأن يبقى الاتجاه ZnSe مصدراً للديودات الليزرية في مجال الضوء الأخضر.

وفي الوقت الحالي تحضَّر كل الديودات الليزرية بطريقة MOVPE، وقد حمت شركة Nichia معظم المراحل الضرورية لتصنيع الديودات الليزرية (والديودات المصدرة للضوء كذلك) ببراءات اختراع، وتجري الآن في اليابان محاكمات في هذا الشأن. وفي هذا الصدد فإن لطريقة MBE ورقة مهمة يمكن اللعب بها.

REFERENCES المراجع

[1] A. Ishibashi, IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron. 1,741 (1995); E. Kato, H. Noguchi, M. Nagai, H. Okuyama, S. Kijima, and A. Ishibashi, Electron. Lett. 34,282 (1998).

[2] R. M. Park, M. B. Troffer, C. M. Rouleau, J. M. DePuydt, and M. A. Haase, Appl. Phys. Lett. 57,2127 (1990); K. Ohkawa, T. Karasawa, and T. Mitsuyu, J. Cryst. Growth 111,797 (1991).

[3] I. S. Hauksson, J. Simpson, S. Y. Wang, K. A. Prior, and B. C. Cavenett, Appl. Phys. Lett. 61,2208 (1992); E. Tournié, C. Morhain, G. Neu, and J.-P. Faurie, Phys. Rev. B 56, R1657 (1997); E. Tournie, P. Brunet, and J.-P. Faurie, Appl. Phys Lett. 74,2200 (1999).

[4] G. Neu, E. Tournié, C. Morhain, M. Teisseire, and J.-P. Faurie, Phys. Rev. B, à paraitre.

[5] Y. Fan, J. Han, L. He, J. Sarai, R. L. Gunshor, M. Hagerott, H. Jeon, A. V. Nurmikko, G. C. Hua, and N. Otsuka, Appl. Phys. Lett. 61,3160 (1992);F. Hiei, M. Ikeda, M. Ozawa, T. Miyama, A. Ishibashi, and K. Akimoto, Electron. Lett. 29,878 (1993).

[6] F. Vigué, P. Brunet, P. Lorenzini, E. Tournié, and J. P. Faurie, Appl. Phys. Lett., à paraitre.

[7] K. Hirano, I. Suemune, and G. Sato, Jpn. J. Appl. Phys. 36,L37 (1997).

[8] E. Tournié, and J.-P. Faurie, Appl. Phys. Lett. 75,382 (1999).

[9] A. Ishibashi, J. Cryst. Growth 159,555 (1996).

[10] The Blue Laser Diode, S. Nakamura and G. Fasol (Springer, Heidelberg, 1997).

[11] Group-III Nitride Semiconductor Compounds, edited by B. Gil (Clarendon Press, Oxford, 1998).

[12] Nitride Semiconductors and Devices, H. Morkoc (Springer, Heidelberg, 1999).

[13] S. Nakmura, Semicond. Sci. Technol. 14, R27 (1999).

[14] S. Haffouz, B. Beaumont, and P. Gibart, MRS Internet J. of Nitride Semicond. Res. 3,8 (1998); B. Beaumont, V. Bousquet, P. Vennéguès, M. Vaille, A. Bouille, P. Gibart, S. Dassonneville, A. Amokrane, and B. Sieber, Proc. ICNS - 3, phys. stat. sol. à paraitre.

[15] K. P. O'Donnell, R. W. Martin, and P. G. Middleton, Phys. Rev. Lett. 82,237 (1999).

[16] S. Nakamura, Mater. Sci. Eng. B 59,370 (1999).■

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

الوسم بالليزر*

ريك ستيفنسون
رئيس خدمات الوسم لدى شركة منظومات التحكم المكروية في أورلندو

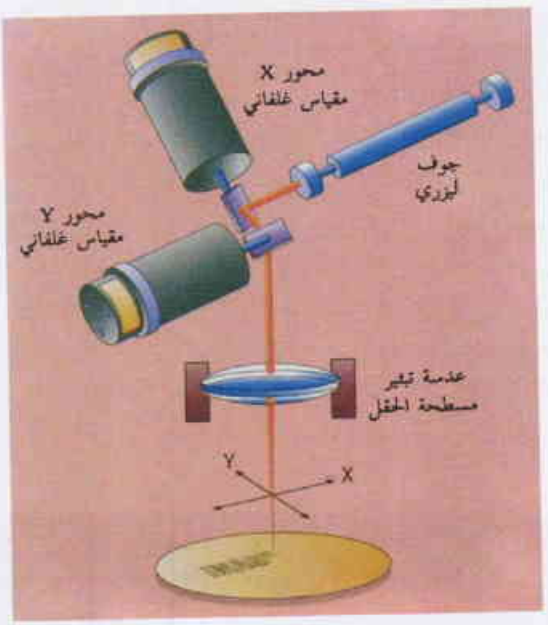
ملخص

يقدم منظومتا الوسم بالليزر، ذات الحزمة الموجّهة وذات القناع، مزيجاً من السرعة ومرونة تشكيل الصورة ومثالية الأداء أفضل من أية تقنية وسم أخرى. ويتفوق واسم الليزر ذو الحزمة الموجّهة بنوعية الصورة ونفوذية الحزمة، بينما يتميز الواسم ذو القناع بالسرعة الأعلى. يعرض ليزر Nd-YAG استطاعة ذروة أعلى ويمكّن من التحكم بمعاملات عملية الوسم بشكل يؤدي إلى إنجاز تغيرات نوعية في المواد، ولكن بكلفة ليزر أعلى من ليزر CO_2.

الكلمات المفتاحية: الوسم بالليزر، ليزر Nd-YAG، ليزر CO_2.

الوسم بالليزر هو عملية توليد علامات ظاهرة على السطوح باستخدام الأثر الحراري لأشعة الليزر المبأرة، حيث ترفع حزمة الليزر من درجة حرارة السطح فتغير لون مادته أو تؤدي إلى إزالتها بالتبخير مسببة نقش السطح.

يمكّن الواسم بأشعة الليزر الموجّهة من التحكم بصورة الوسم إلى أعلى حد (الشكل 1) حيث يتم تشكيل الصورة بتوجيه حزمة الليزر بواسطة مرآتين متوضعتين على مقياسين غلفانيين عاليي السرعة يتحكم بهما بالحاسوب، ومن ثم تقوم مجموعة عدسات مسطحة الحقل بتبئير حزمة الليزر للحصول على أكبر طاقة ممكنة على السطح المراد وسمه مع المحافظة على بقاء تنقل المحرق في مستو مسطح، ويُحجب خرج الليزر بين كل علامتي وسم على السطح. ومن مزايا هذا التصميم أنه يتيح للمستخدِم إمكانية وسم صورة رقمية مخزّنة في الحاسوب وأنه يستخدم كل حزمة الليزر للحصول على أكبر طاقة وسم ممكنة.



الشكل 1– منظومة الوسم ذات الحزمة الموجهة.

أما منظومة الوسم باستخدام القناع (الشكل 2) فهو يخفّض من جودة الصورة مقابل سرعة وسم أعلى، حيث تنتج الصورة الموسومة بتوسيع حزمة الليزر وإسقاطها على قناع نحاسي للصورة المطلوبة ومن ثم تبئير الحزمة على السطح المستهدف ليتم تعليم (إحداث) الصورة في مادته. وهكذا فإن نبضة ليزر واحدة تكفي لوسم كامل الصورة، وإذا كان من المفروض تبديل الأحرف أو الأرقام أثناء تكرار الوسم (كما في حالة ترقيم القطع)، فمن الضروري استخدام أقنعة دوّارة مقادة بالحاسوب لانتقاء الرقم أو الحرف. إن استخدام الوسم بالقناع يحدُّ من جمالية الوسم حيث تبدو الصورة فيه كقالب وتكون الخطوط فيه متقطعة. يضاف إلى ذلك أن طاقة الوسم وتغلغلها ضمن السطح محدودان لأن القناع يحجب نسبة عالية من حزمة الليزر.

الربط بين الليزر والتصوير

الليزر Nd-YAG ذو الحزمة الموجّهة: يمكّن الربط بين ليزر Nd-YAG (نيوديميوم: إيتريوم ألومنيوم عقيق) ومنظومة بصريات قيادة الحزمة من وسم أوسع مجال من المواد ويقدم صوراً غنية ومتنوعة مولدة عن طريق الحاسوب.

تضخّم ليزرات Nd-YAG الضوء في المجال تحت الأحمر القريب عند طول الموجة 1.064 μm وتمتص السطوح المعدنية نسبة عالية من الضوء من هذه المنطقة من الطيف. ينتج ليزر Nd-YAG ذو النمط النبضي استطاعة ذروة أعلى بكثير من خرج الموجة المستمرة العادية، فمثلاً يستطيع ليزر Nd-YAG المستمر باستطاعة 90 واط أن ينتج قطاراً من النبضات بتواتر 1 كيلو هرتز وباستطاعة ذروة تصل إلى 110 كيلو واط. إن قابلية ليزر Nd-YAG للعمل "كمكثّفة ضوئية"، تؤّمن الطاقة الكافية لتبخير المعادن والمواد الأخرى حيث أن هذه الاستطاعة العالية تؤدي إلى تبخير عمق 0.13 مم من المادة دفعة واحدة، أو تبخير أعماق أكبر من ذلك على دفعات متعددة. وأما المواد غير المعدنية فهي تبدي انعكاسات كبيرة عند طول

* نشر هذا المقال في مجلة *Industrial Laser Review, December 1998*. ترجمة الدكتور محمد بهاء الصوص– قسم الفيزياء– هيئة الطاقة الذرية السورية.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

موجة ليزر Nd-YAG ولهذا فإن وسمها يتوافق مع استخدام ليزر CO_2 الذي يصدر في المجال تحت الأحمر البعيد، ومع ذلك فإن استطاعة الذروة العالية لليزر Nd-YAG يمكنها غالباً التغلب على هذه الانعكاسية الأكبر. ويحدث بعض التداخل فيما بين طيوف امتصاص بعض المواد البلاستيكية بحيث تمتص كلا الطولين الموجيين على حدّ سواء.

يستطيع واسم الحزمة الموجّهة أن يكرر عملياً أي صورة أو رسوم تحتوي خطوطاً بعروض من رتبة 0.25 مم أو أقل. وإضافة إلى ذلك يمكن للحاسوب تعديل برنامج الوسم أو تغييره قبل وسم أية قطعة جديدة.

وهكذا فإن ليزر Nd-YAG يُمكّن من التحكم بمعاملات عملية الوسم بشكل يؤدي إلى إنجاز تغيرات نوعية في المواد، ولكن بكلفة ليزر أعلى من ليزر CO_2.

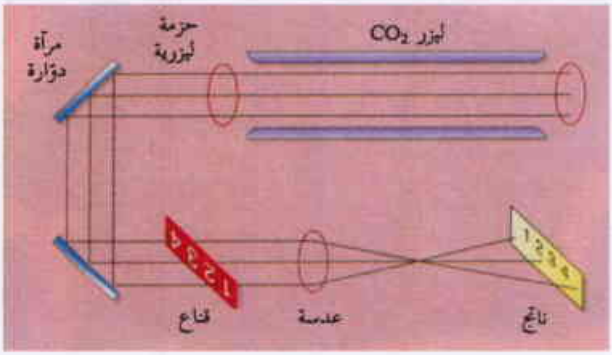
الليزر CO_2 ذو الحزمة الموجّهة: يُمكن لليزر CO_2 أن يرتبط أيضاً مع منظومة توجيه الحزمة الضوئية السالفة الذكر.

يُصدِر ليزر CO_2 طيفاً ضوئياً ضيقاً يقع في المجال تحت الأحمر البعيد عند طول الموجة 10.6 μm، وطول الموجة هذا هو الأنسب للمواد العضوية كالورق ومنتجات الخشب وكثير من المواد البلاستيكية ولإزالة طبقات الطلاء والحبر على ركازة، ولوسم السيراميك. ولكن لا يمكن لهذا الليزر أن ينتج استطاعات ذروة عالية في النمط النبضي.

تجمع منظومات الحزمة الموجهة التي تستخدم ليزر CO_2، باستطاعة 50 واط عادةً، بين طول الموجة في المجال تحت الأحمر البعيد ومرونة توليد الصور بالحزمة الموجّهة. ومن التطبيقات النموذجية لهذا النظام ترقيم وتعليم منتجات السيراميك والبلاستيك حين يتطلب ذلك إمكانات رسم عالية كشعارات الشركات والنصوص المنسّقة.

لا تُمكّن ليزرات CO_2 ذات الاستطاعات الأدنى من نحت الركازات ولكنها بفضل تصميمها البسيط أقل كلفة من ليزرات Nd-YAG النبضية.

CO_2 ذو القناع: يُستخدم واسم CO_2 ذو القناع في التطبيقات التي تتطلب سرعة عالية ولا تحتاج لاستطاعات كبيرة أو لتغيير أو تعديل صورة الوسم ما عدا أحرف النصوص (رقم، تاريخ، ..). يعطي ليزر CO_2 دفقات نبضية بمعدل 1200 نبضة في الدقيقة. إن معدل التكرار العالي هذا يؤمّن وسم أجزاء وسطوح يتم تبديلها بسرعة كبيرة (على الطاير)، وهكذا فإنه من الممكن، في حالة القناع المتحكم به حاسوبياً، تبديل ثلاثة أسطر من الكتابة لوسم سطوح بمعدل 720 سطح/د عند الحاجة لتغيير كود الوسم.



الشكل 2- منظومة الوسم ذات القناع.

محاسن ومساوىء

الليزر Nd-YAG ذو الحزمة الموجّهة: يقدم الواسم Nd-YAG ذو الحزمة الموجهة طاقة وسم أكبر ونوعية صورة أعلى من أي واسم ليزري آخر، حيث تستطيع استطاعة الذروة المتاحة وسم تشكيلة متنوعة من المواد بما فيها المعادن المقشاة، وتقدم تقانة الحواسيب الحالية رسوماً عالية التعقيد بعروض أقل من 0.03 مم. وبدقة عالية وبما أن وسم الصورة يتم برسمها بالحزمة الموجّهة، فإن زمن الوسم يتعلق بحجم النص وبتعقيدات الصورة. ويبقى واسم Nd-YAG هو الأكثر كلفة بين التشكيلات الثلاث.

غالباً ما يحل واسم Nd-YAG ذو الحزمة الموجّهة محل الحموض والتنميش الكهربائي، وبدلاً من أجهزة الختم والتعليم والأجهزة التي تقوم دوماً بوسم المنتجات بطباعتها أو حفرها. ويستعاض به أيضاً عن طابعات الحبر المنفوث أو الملونة. وتضم التطبيقات المعتمدة وسم المكابس ومسننات السرعة والصمامات وغيرها من المكوّنات في مجال صناعة السيارات، وكذلك بطاريات القلب ومفاصل الحوض الصناعية والأدوات الجراحية في الصناعة الطبية، وأيضاً علب الحواسيب والسواقات والدارات المتكاملة في صناعة الإلكترونيات، ومقابض الأدوات ولقم المثقب والمشاريط في صناعة الأدوات والعدد، وأقلام الكتابة واللوحات الاسمية ...

الليزر CO_2 ذو الحزمة الموجّهة: إن كلفة اقتناء وتشغيل واسم CO_2 ذي الحزمة الموجّهة أقل من واسم Nd-YAG نظراً لبساطة الليزر النسبية، وهو يقدم صوراً بنفس النوعية تقريباً إلا أن سرعة الوسم وعمق نفوذه أقل بشكل ملحوظ بسبب استطاعة ليزر CO_2 الأقل. ومع أن واسم ليزر CO_2 ذا الحزمة الموجهة أقل انتشاراً من منظومات الوسم الأخرى، إلا أنه يُستخدم بشكل متواتر لوسم البلاستيك والوصلات البلاستيكية والسيراميكية والعلب في صناعة الإلكترونيات.

الليزر CO_2 ذو القناع: على الرغم من أن الواسم CO_2 ذا القناع لا يتيح إمكانات الرسم التي تقدمها منظومة الحزمة الموجّهة، إلا أنه أكثر تفوقاً من حيث السرعة. وبما أن نبضة ليزر واحدة تكفي لوسم كامل صورة الوسم فإن سرعة الإنتاج تتوقف فقط على تواتر نبضات الليزر وسرعة منظومة تبديل ونقل القطع. وبينما تحتاج منظومة الوسم بالحزمة الموجّهة أن تكون القطع ثابتة أثناء الوسم، يتم وسم القطع وهي في حالة الحركة باستخدام الواسم ذي القناع. ويكون عمق نفوذ الليزر باستخدام القناع أقل منه في حالة الحزمة الموجهة لأن الحزمة الليزرية تُعرّض وتُفرش على عرض القناع بتركيز استطاعة أقل.

غالباً ما ينافس الواسم بالليزر ذو القناع الوسم بالحبر المنفوث، وينتخب عادة في عملية الترقيم المتتالي وطباعة التاريخ والتعليم للورق والبلاستيك وطبقات الطلاء والزجاج والمعادن المطلية والسيراميك.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

بينما يتفوق واسم الليزر ذو الحزمة الموجهة بنوعية الصورة ونفوذية الحزمة في المادة، ويتميز الواسم ذو القناع بسرعة أعلى فإن كلا النظامين يقدمان مزيجاً من السرعة والاستمرارية ومرونة تشكيل الصورة أفضل من أية تقنية وسم أخرى. كذلك فإن المستخدمين يستفيدون من قدرة الوسم بأشعة الليزر عن بعد ومن عدم الحاجة لمواد إضافية كالحبر أو الطلاء.

إن تطوير منظومة وسم ناجح يتطلب دراسة وافية لخصائص خرج الليزر ولمنظومة نقل الحزمة الليزرية وتوليد الصورة ولخصائص المادة المستهدفة، وأخيراً للخصائص الفنية والفيزيائية للقناع المراد استخدامه.■

☆ ★ ☆

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

ليزرات صلبة تُضخّ بالديودات لفصل النظائر*

بيير-إيف ترو، برونو لوغارك، فيليب دوبوي، ميشيل جلبر

ملخص

تطوّر ضخّ الليزرات الصلبة في السنوات الأخيرة تطوّراً كبيراً ارتبط بصورة أساسية بانخفاض أسعار الديودات الليزرية ذات الاستطاعة. كانت هذه الليزرات في البداية منحصرة في التطبيقات العسكرية والفضائية وهي مجالات يطغى فيها الأداء على التكلفة. أمّا في الوقت الحاضر فقد دخلت إلى أسواق التطبيقات الصناعية والطبية. وأحد هذه التطبيقات الخاصة هو برنامج تقانة سيلفا SILVA حيث يمكن أن تشكّل فيه الليزرات الصلبة بديلاً مهماً عن ليزرات بخار النحاس المستخدمة حالياً من أجل الضخ الضوئي لليزرات الصباغية في تقانة سيلفا.

الكلمات المفتاحية: فصل النظائر، ليزرات صلبة، الضخ الليزري، ديود ليزري، تجويف تجاوبي، ليزر نيوديميوم- ياغ، بلّورة مضاعفة للتواتر.

إنّ الميّزات التي تستجيب إلى الاحتياجات النوعية لتقانة سيلفا هي: استطاعة متوسطة أعلى من 100 W بطول موجة حول 530 نانومتر وزمن نبضة (العرض الكلي عند نصف الارتفاع) أقل من 100 نانوثانية ومعدّل تواتر10 كيلو هرتز. وبالإضافة إلى ذلك يجب أن يكون الليزر موثوقاً وفعّالاً وأن يستخدم، في حدود الإمكانية، تقانات مجرّبة.

يتألف التصميم المقترح، بعد أخذ هذه المتطلبات بالحسبان، من هزّاز ذي استطاعة قوية يرتكز إلى قضيب من النيوديميوم: ياغ YAG: Nd (عقيق الإتريوم والألمنيوم) يُضخّ بقضبان صغيرة (عيدان) من الديودات المستمرة والمنطلقة بحارفات deflectors صوتية- ضوئية. ومن أجل الوصول إلى طول الموجة المفيدة يضاعف تواتر الإشعاع الأساسي في داخل التجويف المجاوب بمساعدة بلّورة لاخطية.

مواد الليزر النيوديميوم: ياغ

إنّ مادة عقيق الإتريوم والألمنيوم (YAG) المطعّمة بأيون النيوديميوم (Nd^{3+}) هي مادة الليزر التي تمثّل الحل الأوسط الأمثل بين الأداء والمميزات الحرارية. وبصورة خاصة فإنّ الناقلية الحرارية الجيدة لهذه المادة ومعامل تكسّرها المرتفع يجعلانها مناسبة لتحمّل الاستطاعات الوسطية الكبيرة (عدة مئات من الواط من أجل قضيب قطره 5 mm وطوله 100 mm). ومن ناحية أخرى، وبفضل التقدّم الذي تمّ في تنمية البلورات، فقد تمّ اصطناع هذه المادة بصفات ضوئية ممتازة وكلفة معقولة. وأخيراً إنّها ملائمة لأن تُضخ بقضبان الديودات الليزرية الصغيرة باستخدام عصابة الامتصاص حول 808 نانومتر. إنّ كل هذه الخواص تجعل منها المادة الليزرية الأكثر استعمالاً من أجل التطبيقات الصناعية.

الضخّ بالديودات الليزرية

يقدّم ضخ ليزر صلب بعيدان من ديودات الاستطاعة مزايا متعددة بالنسبة إلى الضخ التقليدي بمصابيح الانفراغ. يتلاءم إصدار الديودات مع عصابة امتصاص المادة الليزرية وهذا ما ينقص كمية الحرارة المتولدة في القضيب وهي ظاهرة مسؤولة عن البعد البؤري الحراري. يصل مردود الديودات في الوقت الحاضر إلى 50 % وهذا ما يتيح أن نتصوّر منظومات متراصة تكون فعّاليتها أعلى بثلاث أو أربع مرات من فعالية الليزرات التي تُضخّ بالمصابيح.

مع الأخذ بالحسبان التكرارية الضرورية المرتفعة (10 كيلو هرتز) فإنّ الخيار يقع على عيدان الديودات المستمرّة على حساب العيدان "شبه المستمرة" التي تكون محدودة بوتيرة 1000 هرتز".

تُعطي عيدان الديودات الليزرية المستمرة في الوقت الحاضر استطاعات من 30 إلى 40 واط بالسنتيمتر عند 808 نانومتر. وبسبب التقدّم التقاني ازدادت مدة حياتها بشكل مستمر ووصلت في الوقت الحاضر إلى قيم تراوح من 10 إلى 20 000 ساعة مع نقصان كبير في أسعارها في الوقت نفسه. ويقع هذا السعر الآن بحدود 300 فرنك لكل واط من أجل العيدان المشتراة بكميات كبيرة (50 عوداً بصورة نموذجية).

وحتى نتمكّن من إيداع استطاعة الضخ الضرورية (1000 واط)، مع الحفاظ على بنية بسيطة نسبياً، يُجرى الضخ بصورة عرضانية على القضيب. ومن ناحية أخرى، من أجل الحدّ من الزيغ من الضروري إيداع استطاعة الضخّ هذه بصورة متجانسة في القضيب. ولقد حقّقنا الضخ الأمثل بالاستعانة بنموذج رقمي [1]. ومن أجل إعادة تدوير استطاعة الضخ التي لم يجر امتصاصها في المرور الأول جهّزنا بنية الضخ بعاكس دُرس شكله أيضاً رقمياً.

---

* نشر هذا المقال في مجلة *Optique Et Photonique*, 4/99. ترجمة هيئة التحرير- هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

كفايات ليزر Nd:YAG مضاعف التواتر

قياس البعد البؤري الحراري

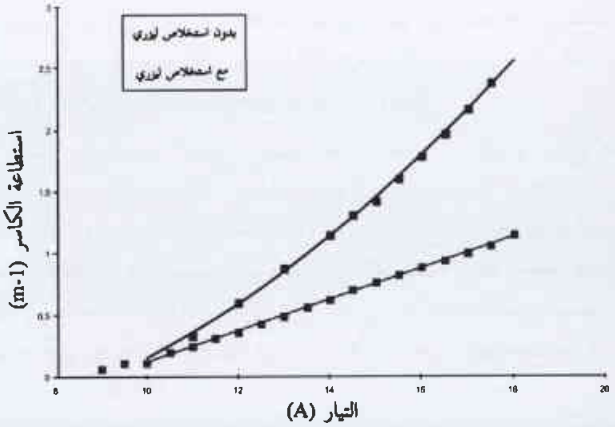
عندما نضخ قضيب النيوديميوم: ياغ يتحوّل جزء من الاستطاعة الممتصة إلى حرارة ولايحصل هذا التحوّل إلاّ بسبب الاختلاف بين طاقة الفوتون الممتص وطاقة الفوتون الصادر. ولذلك من الضروري تبريد القضيب، وعادة يتم ذلك بفضل جريان الماء. ويبقى هناك فرق في درجة الحرارة بين محور القضيب وسطحه الأمر الذي يحرّض تغيّراً في قرينة الانكسار n. وهذا ناتج، من جهة، من تابعية n لدرجة الحرارة ومن جهة أخرى لمفعول المرونة الضوئية (تغيّر n بدلالة الإجهادات الميكانيكية).

إذا كان توزّع الضخ في القضيب متجانساً تماماً ومع افتراض بقاء الناقلية الحرارية للقضيب ثابتة في مجال درجة الحرارة المعتبرة ،عندها نبيّن أنّ قرينة الانكسار تتغيّر بصورة تربيعية بين مركز القضيب وحافته: أي أنّ القضيب يسلك سلوك عدسة ثخينة (تدعى عدسة حرارية) يتناسب بعدها البؤري عكساً مع استطاعة الضخ [2].

يمكننا بدءاً من هذا التغيّر أن نتنبأ بمناطق استقرار التجويف التجاوبي وأن نحسب وسطاءه مثل مسافات المرايا من القضيب وأنصاف أقطار انحنائها المحتمل [3].

ويبيّن القياس الممثّل على الشكل 1 مقلوب البعد البؤري (استطاعة الكاسر) بدلالة التيار المطبّق في ليزرالديود. لقد أُنجز هذا القياس من أجل شرطين تجريبيين: من جهة عندما يوجد مفعول ليزري، ومن جهة ثانية عندما نزيل إحدى مرآتي التجويف أي عندما لايوجد إذاً استخلاص لليزر. لقد تحققنا أنّ القياس يعطي نتائج مختلفة جداً بحسب الحالات. إنّنا نقيس في الحالة الأولى، حيث يعمل الليزر بالصورة المستمرة، التغيّر الخطي لاستطاعة الكاسر.

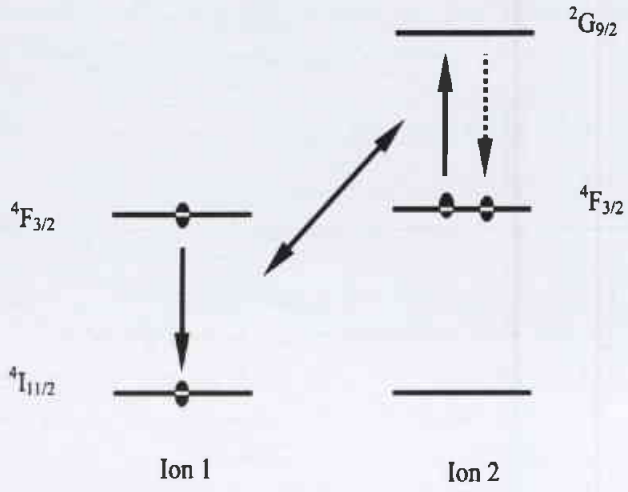
أمّا في الحالة الثانية، التي تمثّل ليس فقط الحالة حيث لايوجد استخلاص لليزر ولكن أيضاً العمل في نمط انطلاق أو في نمط تضخيم، فإنّ استطاعة الكاسر تنمو بصورة تربيعية وتصل بسرعة إلى قيم كبيرة جداً. وتظهر هذه الظاهرة التي تدعى ظاهرة إعادة ترتيب أوجيه Auger أو تحويل رافع [4]، عندما تصبح كثافة الذرّات المثارة كبيرة: تحوّل ذرة



الشكل 1– قياس استطاعة الكاسر (مقلوب البعد البؤري الحراري) بدلالة التيار المطبّق على الديودات من أجل شرطين تجريبيين (مع أو بدون استخلاص ليزري).

مثارة طاقتها إلى ذرة مثارة مجاورة. فالذرة الأولى "تهبط" إلى السوية الأساسية بينما الثانية "تصعد" نحو سوية طاقة أعلى. وبعد ذلك تعود فتهبط ثانية إلى سويتها الابتدائية مصدرة فوتوناً واحداً أو فوتونات تسخّن الركازة. في نهاية المطاف تساهم في مفعول الليزر إحدى الذرتين اللتين تكونان موجودتين في السوية المرتفعة لليزر (حالة مثارة). أمّا باقي الطاقة فتتحوّل إلى حرارة (انظر الشكل 2).

ونتيجة لذلك فإنّ هذه الظاهرة المشوّشة تُنقص الطاقة المختزنة "المفيدة"



الشكل 2– مخطط تقريبي لظاهرة تحويل رافع أوجيه: فالأيون 1 الذي يوجد في حالة مثارة $^4F_{3/2}$ يُحوّل طاقته إلى الأيون 2 الذي "يصعد" إلى سوية الطاقة $^2G_{9/2}$. وهذا الأيون يعود فيهبط ثانية إلى $^4F_{3/2}$ بصورة غير مشعّة.

وتزيد استطاعة الكاسر. بصورة عامة نعتبر أنّ استطاعة كاسر قدرها 10 (توافق بعداً بؤرياً حرارياً قدره 10 سم) هي حد لايجوز تجاوزه. فبعد هذا الحد تكون الزيوغ كبيرة بحيث يهبط الاستخلاص.

تمثّل ظاهرة إعادة ترتيب أوجيه إذاً الحدود الفيزيائية لاستقراء استطاعة الليزرات Nd: YAG المشغّلة بوتيرة عالية من التواتر.

اختيار التجويف

من أجل الحصول على إشعاع عند 532 نانومتر يجب مضاعفة تواتر الليزر (وهذا ما يعادل تقسيم طول الموجة على اثنين). ويتم الحصول على ذلك بمفعول لاخطي من المرتبة الثانية في بلّورة مضاعفة. والاختيار الذي تمّ هنا هو مضاعفة التواتر ضمن التجويف وفيه توضع بلورة مضاعفة مباشرة داخل التجويف التجاوبي. وتبدي هذه التقنية مزايا متعددة بالنسبة إلى الحل الذي يكمن بوضع البلورة خارج التجويف.

يكون المردود الكلي للتحويل في البداية جيداً جداً: فعلى الرغم من أنّ جزءاً صغيراً من إشعاع 1064 نانومتر يتحوّل عند كل مرور (نحو 10%)، فإنّ العدد الكبير من الذهاب والإياب يؤدّي إلى بلوغ المردود التراكمي نسبة 70%. ومن أجل الحصول على مردود معادل بمضاعفة التواتر خارج التجويف، عند مرور واحد،لابد وأن تتوفّر حزمة أساسية بمواصفات ممتازة.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

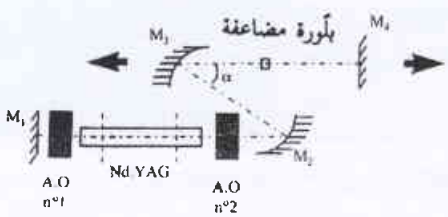
ومن جهة ثانية يجب أن لا تتعرّض البلورة إلاّ إلى شدات واردة ضعيفة حيث تكون مخاطر إتلافها أقل.

والبلورة المضاعفة المستخدمة حالياً في تجويفاتنا هي $KTiOPO_4$ (أو KTP). فهي تُستخدم كثيراً من أجل توليد المدروج الثاني في الليزرات المصدرة عند حوالي 1µm. إنّها تمتلك في الواقع مجموعة من الخواص الفيزيائية (مردود مضاعفة التواتر، زاوية التقبّل، الحفاظ على التدفق، الجودة الضوئية للبلورات) تجعل منها بلّورة متميّزة.

وعند استخدامها لمدة طويلة تتعرّض، مع الأسف، إلى تردّ تدريجي من الناحية الكيمياضوئية يُعرف بتتبّع غراي Gray-tracking. ويفضي هذا الأثر إلى زيادة امتصاص البلّورة الذي يؤدّي إلى انكسارها. وتتبّع غراي في البلورة KTP هو ظاهرة لاتزال غير مفهومة وتشكل موضوعاً لدراسات متعددة. وربّما تزودنا بعض تقنيات نماء البلّورات بتحسينات (وبصورة خاصة إنقاص الامتصاص المتبقّي عند 532 نانومتر) واستبعاد ظهور تتبع غراي.

يبيّن الشكل 3 مخططاً للتجويف المستخدم. ومن أجل الحد من تغيرات أبعاد الحزمة (الناجمة عن البعد البؤري الحراري) على البلورة المُضاعفة، يتيح مقراب ضمن التجويف تصوير أحد وجهي القضيب على KTP [5]، [6]. وهكذا نتحكّم تماماً بكثافات الاستطاعة على البلورة، وأبعاد الحزمة لا تعتمد بصورة خاصة على البعد البؤري الحراري.

ولتسهيل تشغيل جيد تمّ وضع حارفين صوتضوئيين acousto-optiques على جانبي قضيب النيوديميوم- ياغ. وهما ضروريان من أجل إغلاق التجويف بصورة صحيحة بين نبضتين وتجنّب كل تسرّب مستمر يجعل الليزر غير مستقر.



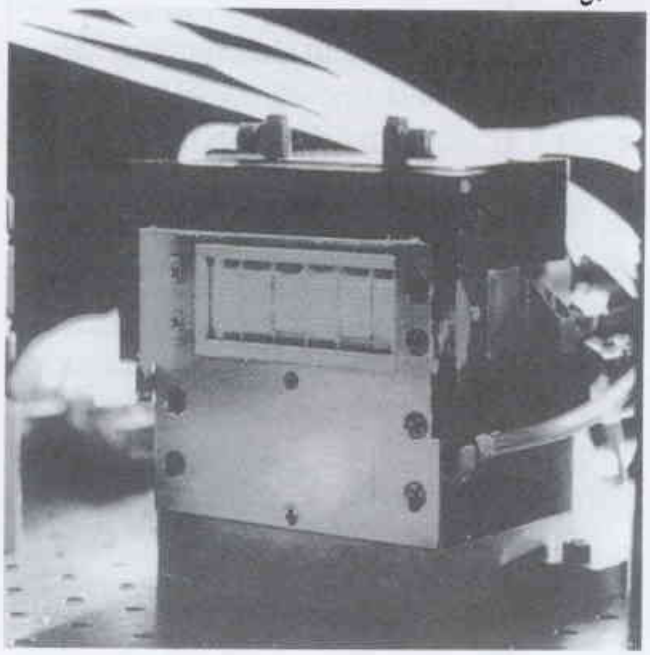
الشكل 3- تجويف لتصوير الحدقة الداخلية.

تكون المرآتان M3 وM4 لونانيتين dichroniques: فهما تُرسلان إشعاع 532 نانومتر الذي ينشأ في KTP (T532 = 95 %) وتعكسان إشعاع 1064 نانومتر (R1064=99.7%). أمّا المرآتان M1 و M2 فهما عاكستان أيضاً تماماً لإشعاع 1064 نانومتر.

كفايات الليزر

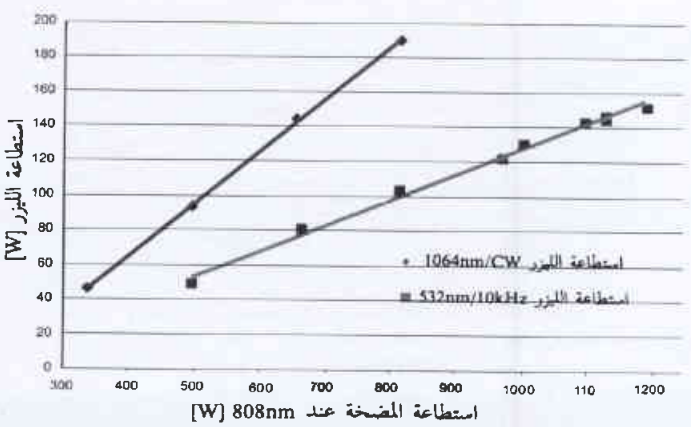
تُدرس حالياً في المختبر بنى متعددة للضخّ بالديودات. لقد اخترنا أن نقدّم واحدة منها التي أعطت نتائج مشجعة.

فهي تتألّف من 60 قضيباً صغيراً (عوداً) من ديودات الليزر القادرة على إصدار استطاعة كلية قدرها 1500W عند 808 نانومتر (الشكل 4). فإشعاع الضخّ الذي لم يمتصه القضيب في المرور الأول يعاد تدويره بالاستعانة بعاكس ناثر [7]. والاقتران (النسبة بين الاستطاعة التي يمتصها القضيب والاستطاعة الصادرة عن الديودات الليزرية) من أجل تجويف الضخّ قيد الدرس هو من رتبة 60%. فهو لم يصل بعد إلى النسبة المثلى ويشكّل حالياً موضوع التحسينات من أجل ليزرات معدّلة في المستقبل.



الشكل 4- تركيبة ثنائية الأبعاد لديود ليزري.

تظهر في الشكل 5 الاستطاعة المتوسطة لليزر 10 كيلوهرتز. يمكن أن يزوّد الليزر أكثر من 200W بإشعاع 1064 نانومتر و150W بإشعاع 532 نانومتر (أي 15mJ لكل نبضة). تكون فعّالية الضخّ التي تعرّف بالنسبة بين الاستطاعة الضوئية الصادرة عن الليزر وبين الاستطاعة الصادرة عن الديودات على التالي 33% و15% من أجل إشعاع 1064 نانومتر وإشعاع 532 نانومتر. أمّا المردود الضوئي/ الكهربائي (النسبة بين الاستطاعة الكهربائية المطبّقة على ديودات الليزر والاستطاعة الضوئية بإشعاع 532 نانومتر) فهو أعلى من 5%. هذا ويجب أن تتيح الليزرات المعدّلة في المستقبل الحصول على مردود إضافي أعلى من



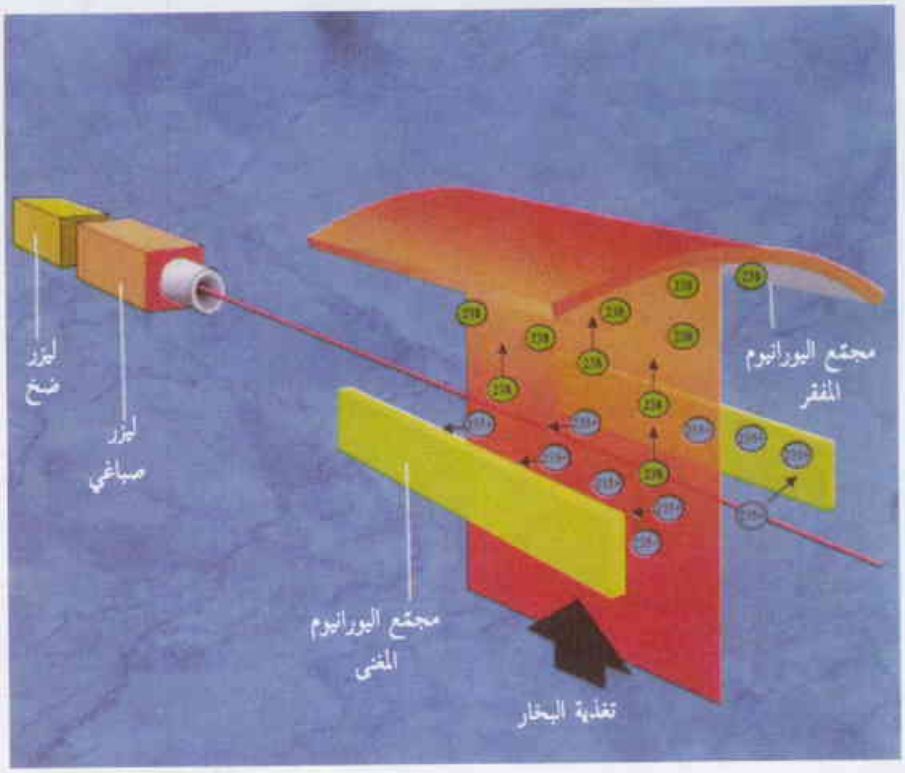
الشكل 5- استطاعة الخرج لليزر بدلالة استطاعة المضخّة.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

مؤطر

تقانة سيلفا SILVA (فصل النظائر بليزر بخار ذرّي)

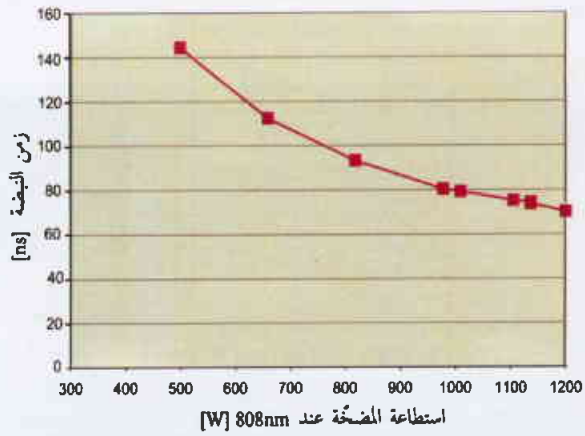
تقانة سيلفا هي طريقة فصل نظيري اليورانيوم. تستخدم اختلاف تواترات إثارة النظيرين U238 و U235 من أجل تأيين أحدهما انتقائياً (اليورانيوم 235). إنّ طاقة تأيين النظير 235 هي من مرتبة 6.2 إلكترون فولط وهي طاقة يمكن أن تقدمها ثلاثة فوتونات متتالية طاقة كل منها حوالي 2 إلكترون فولط (أي طول موجة 625 λ نانومتر).



نستخدم من أجل توليد الأطوال الموجية لهذه التقانة ليزرات صباغية متوافقة تضخّها ليزرات بخار النحاس (LVC). وترسل الحزم الضوئية، المتوافقة تماماً مع تواترات التجاوب للانتقالات المختارة، نحو جهاز الفصل الذي يتشكّل داخله بخار اليورانيوم. (ينشأ البخار من اليورانيوم المعدني الذي يتبخّر في درجة حرارة عالية جداً بعد رجمه بحزمة من الإلكترونات ذات طاقة عالية).

عندما تلتقي ذرات اليورانيوم 235 مع الحزم الليزرية تتأيّن وتنفصل عن ذرّات اليورانيوم 238 بحقل كهربائي. يُجمع فيما بعد النظيران كل على حدة بالتكثيف بالطور السائل (انظر مخطط مبدأ تقانة سيلفا).

تكون تقانة سيلفا، بالنسبة إلى تقانات الفصل النظائري الأخرى، تقانة انتقائية إلى حد بعيد تتيح الحصول على اليورانيوم المُغنى بمحتوى جيد (% 3-5 من النظير 235) في مرحلة واحدة. أمّا التقانتان المستخدمتان في الصناعة في الوقت الحاضر (طريقتا الانتشار الغازي والنبذ فائق السرعة) فترتكزان على فرق الكتلة البسيط بين النظيرين وتكون إنتقائيتهما بالمقابل قليلة: فمصنع الانتشار الغازي في تريكستان EURODIF يتضمّن 1400 مرحلة من الفصل من أجل الحصول على النسبة نفسها من اليورانيوم المُغنى.



الشكل 6– مدة النبضة (العرض الكلي عند نصف الارتفاع) عند 532 نانومتر و 10 كيلو هرتز بدلالة الضخ.

رتبة % 7-8. وعلى سبيل المقارنة فهذه الرتبة تقع بين 1 و 1.4% في حالة الضخ بالمصابيح الوميضية.

تختلف مدة النبضة بين 70 و 200 نانوثانية بحسب استطاعة المضخة (الشكل 6). فإذا غيّرنا طول البلورة المُضاعفة (أي بتغيير اقتران الليزر) يمكن تعديل الزوج الاستطاعة المتوسطة – مدةالنبضة. إنّه من الممكن بصورة خاصة الحصول على استطاعات أكبر على حساب مدد نبضة أطول.

لقد سمحت الحلول التقنية المأخوذة بالاعتبار ببناء ليزر صلب في المختبر يُضخّ بديودات تستجيب لأداءات مطلوبة. لا تزال التحسينات قيد الاهتمام، وبصورة خاصة من أجل زيادة المردود. ولكن ما تبقّى الآن هو التأكّد من أنّ هذا النوع من المنظومة يحقّق الآمال التي علقت عليه بشأن جودة عمله. وأخيراً فإنّ صلاحية التحسينات الاقتصادية لا يمكن أن تُضمن إلاّ بثمن تخفيض جديد لتكلفة إنتاج "الواط x مدة حياة" الديودات التي هي الآن بحدود 0.02 فرنك/ واط. ساعة.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

REFERENCES المراجع

[1] Logiciel SPIR vendu sous licence par la société OXALIS Laser, 45, avenue J. Moulin, 75014 Paris.

[2] Koechner, W., "Solid-State laser Engineering", 4ieme edition, Springer Verlag, 1996.

[3] Magni, V., "Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability", App. Opt., Vol. 25, N°1, 1986.

[4] Guy, S. et al., "High-Inversion Densities in Nd: YAG: Upconversion and Bleaching", IEEE J. Quant. Electro., Vol. 34, N°5, 1998.

[5] Ortiz, M. V. et al., High-Average-Power Second Harmonic Generation with KTiOPO4", OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers, 1992, Vol. 13.

[6] Le Garrec, B. et al., High-average-power diode-array-pumped frequency- doubled YAG laser,Opt. Lett., Vol.21, N°24, pp 1990-1992.

[7] Brandt, T. et al., "Design and Performance of a compact 600 W cw Nd: YAG rod laser system pumped by microchannel-cooled stacked diode laser arrays', CLEO Europe 1996, Technical Digest, CMA2, 1996.■

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

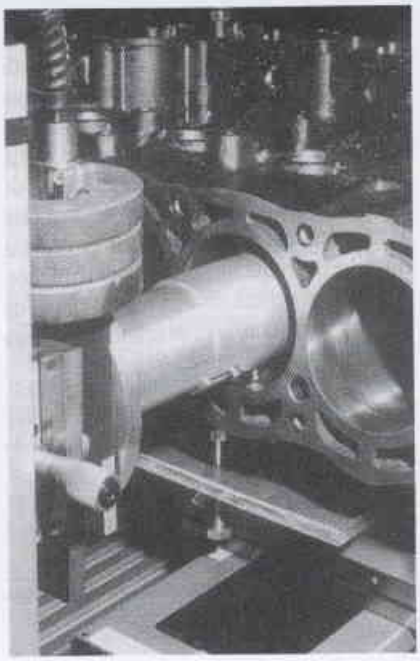
ليزر بخار النحاس ومصفوفة 3500 ترانزستور موسفِت: وثوقية في العمل★

د. شاترو
مفوضية الطاقة الذرية - بيرلات - فرنسا

ملخص

إن ليزر بخار النحاس Laser aVapeur de Cuivre هو ليزر غازي نبضي، يولّد طولَي موجة في مجالي الأخضر والأصفر (510nm و 578nm). ويسمح هذا الليزر بضخّ السلاسل الليزرية ذات الملوّنات عالية الاستطاعة على منشآت تقانة فصل النظائر بالليزر SILVA، التي تمّ تطويرها لدى مفوضية الطاقة الذرّية الفرنسية بالتعاون مع كوجيما COGEMA.

الكلمات المفتاحية: فصل النظائر بالليزر، ليزر بخار النحاس، تقانة سيلفا، التبديل بمصفوفة ترانزستورات، وحدة الهزّاز المحقون، رأس ليزري، نبضة كهربائية، وثوقية.



تطبيق ليزر بخار النحاس على معالجة سطح مغلاق المحرك

مقدمة

تعدّ ليزرات بخار النحاس، في وقتنا الحاضر، ليزرات صناعية عالية الوثوقية. تجري تغذيتها الكهربائية بواسطة مصفوفات تضم 3500 ترانزستور أثر الحقل موسفِت MOSFET ذات وثوقية أكثر بمئة مرة من التيراترونات التي حلّت محلها هذه المصفوفات، وبنفس الكلفة. يصل عمر بعض الرؤوس الليزرية إلى 6000 ساعة، في حين تصل مدة شحنة النحاس إلى ألف ساعة (علماً بأن السنة تحوي 8800 ساعة).

على غرار ليزرات بخار النحاس المنتشرة في فرنسا، يمكننا أن نذكر، بوجه أخصّ ليزرات أكسفورد الإنكليزية، الموزعة من قبل شركة SOPRA، وكذلك ليزرات الشركة الصناعية للّيزرات CILAS في ماركوسّي التي تعاونت معها بصورة خاصة مفوضية الطاقة الذرّية الفرنسية. سنذكر بالتفصيل آلية عمل ليزرات بخار النحاس ونركّز على التطور التقاني لأعمال مفوضية الطاقة الذرية والشركة الصناعية لليزرات CILAS، اللتين تؤمّنان حالياً تشغيلاً عالي الوثوقية لليزرات بخار النحاس.

★ نشر هذا المقال في مجلة *Optique Et Photonique*, 4/99. ترجمة مكتب الترجمة والتأليف والنشر - هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

تطبيقات ليزرات بخار النحاس

إن ليزر بخار النحاس هو ليزر غازي نبضي ذو تكرارية عالية التواتر، ويعمل في مجالي الأخضر والأصفر. تمتلك النبضة الضوئية ذروة استطاعة مقدارها بضع مئات الكيلو واط خلال 50 نانو ثانية.

وبفضل ذروة الاستطاعة العالية خلال مدة قصيرة، التي تسمح بانصهار السطح أو بالاجتثاث دونما تأثير حراري في الأعماق، وبسبب عمله في المجال المرئي، فإن استخدامات الـ LVC الممكنة هي:

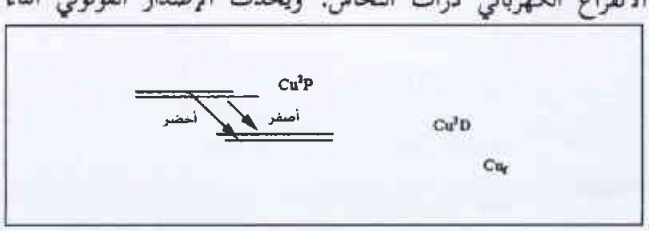
- الصقل؛
- إزالة تلوث السطح؛
- السقاية السطحية (بسماكة بضع عشرات المكرون)؛
- زيادة مقاومة التآكل؛
- التصنيع المكروي (عملية الثَّقْب بأقطار قدرها بضع عشرات المكرون)؛
- ثَقْب النحاس والألمنيوم (اللذين يعكسان الأشعة تحت الحمراء لليزرات CO_2)؛
- تحسين الخصائص الاحتكاكية للسطوح (الاحتكاك)؛
- ضخّ الليزرات الصباغية (القابلة لتعديل أطوالها الموجية).

جرى في مفوضية الطاقة الذرّية تطوير ليزر بخار النحاس، بالتعاون مع CILAS كليزر ضخ لليزرات الأصبغة عالية الاستطاعة من أجل تقانة SILVA. وتقانة إغناء اليورانيوم هذه تستخدم التأيين الضوئي الانتقائي للنظير 235 من بخار اليورانيوم الذري، بواسطة ليزرات ملوّنة.

عمل ليزرات بخار النحاس

إن ليزر بخار النحاس هو ليزر غازي يستعمل انفراغاً كهربائياً مدته 200 نانو ثانية في مزيج من النيون وبخار النحاس. ويولّد نبضة ليزرية عند 510nm وعند 578nm. والمردود عند مأخذ الليزرات LVC هو من مرتبة 1%. ويولّد ليزرٌ باستطاعة وسطية قدرها 100 واط ضوئي نبضة مدتها 50 نانو ثانية ولها ذروة استطاعة من مرتبة 400 كيلو واط ضوئي. والمدة بين نبضتين هي 200 مكرو ثانية، أي ما يعادل 5 كيلو هرتز من تواتر التكرارية.

يتألف رأس الليزر من وعاء يحوي غاز النيون بضغط منخفض، وفي داخله أنبوب من الألومين يُحمل إلى درجة حرارة 1500°C. وعلى طول الأنبوب ومن داخله، توضع كُريّات نحاسية. يصبح النحاس عند درجة الحرارة 1500°C في شكله السائل مع طور غازي. وتضخ إلكترونات الانفراغ الكهربائي ذرات النحاس. ويحدث الإصدار الفوتوني أثناء



مخطط طاقة مبسّط عن النحاس

الانتقال من الحالة المثارة نحو حالة شبه مستقرة (عابرة) قريبة من الحالة الأساسية ولكن عمر الحالة شبه المستقرة طويل، مما يفرض العمل النبضي للّيزر. وبالفعل هنالك سويتان مرتفعتان وسويتان شبه مستقرتين توافقان الانتقالين عند 510nm وعند 578nm.

الأجزاء الأساسية للّيزر

يتألف ليزر بخار النحاس بشكل أساسي من وحدتين فرعيتين وهما رأس الليزر، وتغذية كهربائية نبضية عالية الاستطاعة.

مخطط ليزر بخار النحاس

إن الرأس الليزري هو عبارة عن أنبوب انفراغ طوله ثلاثة أمتار، مكوّن من أنبوب من الألومين (1) مركزي محمول إلى درجة حرارة 1500°C، ومحاط بعوازل حرارية (2)، ضمن غلاف من السيليس (3) تحت ضغط منخفض من غاز النيون، وقد وُضعت إلكترودات (4) من جهتي أنبوب الألومين. يُزوَّد طرفا الأنبوب المصنوع من السيليس بحاملَي كُوّة (5). تخترق الحزمة الليزرية الكُوّتين. يتحقق الضغط المنخفض في مجمل الرأس الليزري بواسطة مضخة التخلية. وتتيح عملية كنس مستمر بغاز النيون إزالة تلوث الرأس باستمرار.

ويحيط غلاف أسطواني معدني متمحور (6)، مبرَّد بالماء، بأنبوب السيليس. ويؤمّن تبريد الرأس الليزري وعودة التيار الكهربائي.

وللحصول على نبضات كهربائية قصيرة المدة، يجب أن تكون التحريضية الطفيلية للدارة الكهربائية أضعف ما يمكن، ولهذا توجد هناك بنية متمحورة بين أنبوب البلازما والراجع الكهربائي الخارجي.

ذكرنا أن كُريات النحاس قد وُضعت في أنبوب الألومين. في درجة الحرارة 1500°C يُحقّق التوازن سائل/ بخار ضغطاً جزئياً ملائماً للنحاس. أما إلكترونات الانفراغ، التي يسرّعها الحقل الكهربائي، فتثير ذرات النحاس، مما يؤدي إلى إصدار فوتونات.

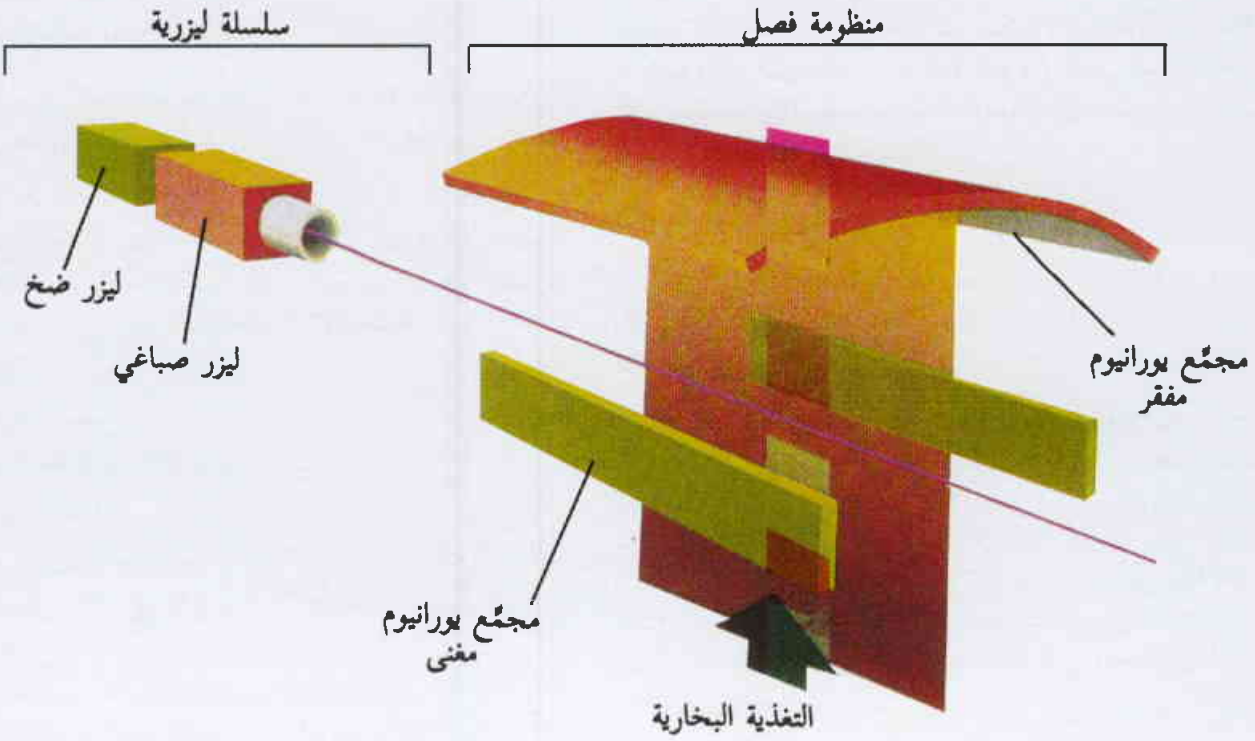
ينتشر النحاس تدريجياً مع مرور الوقت. لهذا يجب نزع ترسبات النحاس بصورة دورية من المناطق الباردة وإعادة شحن الأنبوب المركزي بالنحاس. تدعى المرحلة التي تتكرر فيها عمليات الشحن مدة شحن النحاس.

إن التغذية الكهربائية هي تغذية نبضية ذات توتر عالٍ واستطاعة قوية وتواتر مرتفع للتكرارية. ومن أجل ليزر استطاعته 100 واط ضوئي وسطي، تكون الاستطاعة الكهربائية الوسطية 10 كيلو واط تعطى على شكل نبضات استطاعتها 10 ميغا واط خلال 1 ملّي ثانية.

إن توتر الذروة المزوَّدة قريب من 25 كيلو فولط. ولنبضة التيار قيمة ذروة مقدارها 1600 أمبير، وتدوم 200 نانو ثانية. أما تواتر التكرارية فقيمته 5 كيلو هرتز.

اقتضى تطوير ليزرات بخار النحاس معالجة نقاط صعبة في كلا الوحدتين الفرعيتين للّيزر:

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية



مخطط لمبدأ طريقة سيلفا

رأس الليزر

- فيزياء الانفراغ.
- الأداء الكهرنافذي للرأس.
- الأداء الميكانيكي الحراري لأنبوب الألومين المحمول إلى درجة حرارة 1500°C ومقاومة التدوير الحراري.
- زيادة مردود الليزر.
- زيادة مدة شحن النحاس.
- وثوقية في التشغيل.

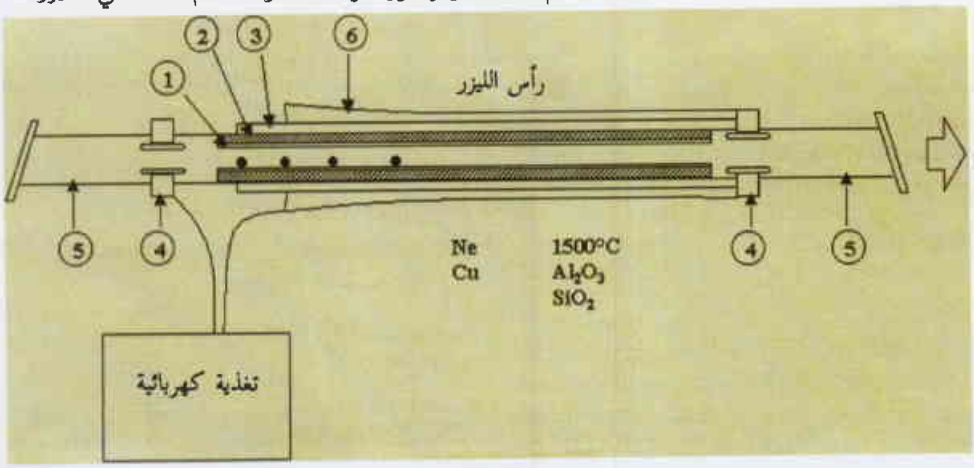
التغذية الكهربائية

- توليد نبضات كهربائية سريعة جداً، ذات توتر عالٍ وتيار شديد.
- وثوقية التشغيل

من بين النقاط الصعبة في هذا الليزر تأمين تغذية كهربائية ملائمة تقدم وثوقية كبيرة. وهذه الأعمال تنتمي إلى مجال إلكترونيات الاستطاعة العالية.

في الأصل، كانت التيراترونات، التي هي أنابيب غاز، تسمح وحدها بتبديل النبضات الكهربائية اللازمة من أجل ليزرات بخار النحاس. ولكن هذه المكونات أثبتت تعارضها مع التطور الصناعي لسيلفا، بسبب كلفتها العالية وعمرها القصير للغاية. إن نشاطاً في مجال إلكترونيات الاستطاعة العالية قد اقتضى تطوير تقانة استبدال مصفوفات ترانزستورات الموسفت بمبدّلات التيراترونات.

لقد تم تطوير تقانة مصفوفات ترانزستورات الموسفت المجدّدة، من أجل ليزرات تصل استطاعتها إلى 100W، بالتعاون مع مدرسة المهندسين العليا ESIM في مارسيليا. أتاحت هذه التقانة الاستعاضة عن مبدّلات التيراترونات الموجودة في الليزرات الحالية، من حيث المكان والموضع، بمبدّل يضم 3500 ترانزستور موسفت. وتُستخدم أيضاً في الليزرات



مخطط رأس الليزر

الهزّازة منخفضة الاستطاعة، حيث تبدو ذات أهمية من الناحيتين التقنية والاقتصادية.

وُكِل تصنيعُ وإنتاج هذه المبدِّلات، التي أساسها مصفوفات ترانزستورات موسفت، إلى شركة CENTRALP. ومن أجل MNT 100 - أي ليزر بخار النحاس، استطاعته 100 واط ضوئي، تتمتع النبضات الكهربائية المولَّدة بكفاءات الأداء التالية:

- التوتر: 25 kV
- سرعة التبديل (هبوط التوتر): 20 ns
- التيار الذروة: 1600 A
- زمن النبضة 200 ns

يستخدِم مبدِّل تيراترون مصمَّم لتأمين نفس الكفاءات تيراترونَين على التوازي. ويصل عمرهما الزمني في تطبيقنا إلى ألف ساعة. وهكذا، تبلغ كلفة الصيانة 50 000 فرنك فرنسي، خلال الألف ساعة، أي خلال شهر ونصف من التشغيل بمعدل 24 ساعة في اليوم.

إن تقانة المصفوفة المقدَّمة أعلاه هي أكثر وثوقية (جودة) بمئة مرة، لها نفس الكلفة من أجل تجهيزات حديثة، وتكون مربحة خلال 4000 ساعة إذا ما تم استبدال مبدِّل مصفوفة الـ MOS بمبدل التيراترون الموجود.

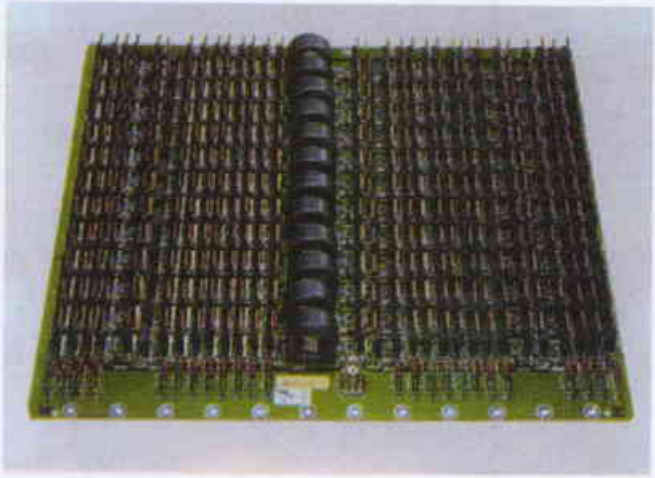
كان الزمن الوسطي بين الأعطال MTBF والمحسوب من أجل مبدِّل الـ MOS بحدود 20 000 ساعة عند التصميم. وبالفعل، جُمعت 70 000 ساعة من التشغيل دون أي عجز لبطاقات cards الـ MOS. لقد تمكنّا من إثبات أن هذا المبدِّل يتمتع بخاصية التحمّل للخلل. فوجود الضعف في ترانزستور موسفت لا يسبب ضعف المبدِّل الذي يستمر بالعمل بهدوء. وهذا يضمن لنا وثوقية عالية في العمل، وتحمّلاً للأعطال، وعمراً زمنياً يفوق المئة ألف ساعة.

لقد تم تطبيق تقانة المصفوفة ذات المكونات المعيارية الصغيرة جيداً على المبدِّلات السريعة تحت توتر عالٍ. وقدمت مفوضية الطاقة الذرّية بالتعاون مع كوجيما مستندات تحوي ثلاث عشرة براءة اختراع تحمي هذه التقانات. أما CENTRALP فقد حصلت على إذن للمتاجرة بالمنتجات الناتجة عن هذه الأبحاث.

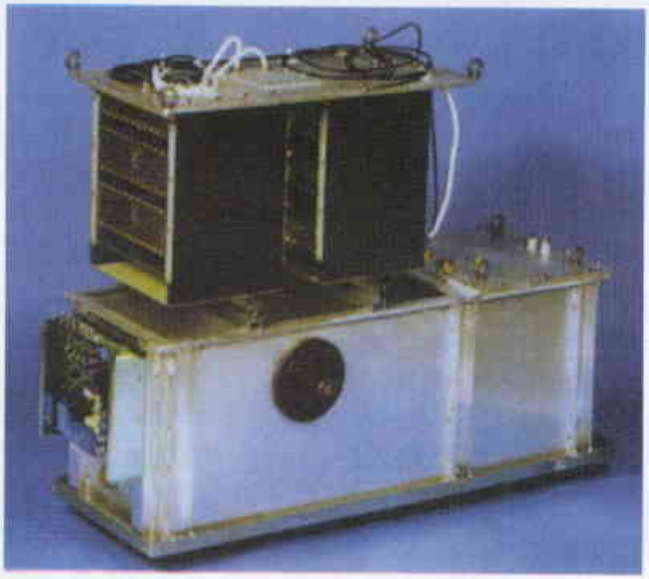
وتندرج هذه التقانة تحت سلسلة كاملة من المبدِّلات التي تشمل (بالإضافة إلى بطاقات MOS) بطاقات الـ IGBT، وبطاقات التيراستورات أو بطاقات الديودات. وجميع هذه البطاقات تشكل العناصر الأساسية للمبدِّلات عالية التوتر وذات الأداء العالي، والتي أصبحت تطبيقاتها الصناعية تزداد يوماً بعد يوم.

وهذه شركة CENTRALP، على سبيل المثال، تطلق في السوق هذه المنتجات من أجل التطبيقات التالية:

- تخريب البكتريات بالحقل الكهربائي النابض، لمعالجة الماء، أو الأغذية السائلة أو الأغذية الجامدة؛
- تحسين استخراج المواد النباتية بتقانة التثقيب المسامي الكهربائي electroporation للخلايا.



بطاقة MOS 800A 5 kV



مبدِّل 1600A 25 kV

- تحسين سرعات ونوعيات ترسُّب النحاس الإلكتروليتي؛
- عمليات تغذية نابضة لأفران البلازما؛ إلخ...

سلاسل LVC

تتألف سلاسل بخار النحاس، المستخدمة في منشآت SILVA، من وحدة إنشائية هزّازة محقونة ذات استطاعة ضعيفة تعطي حزمة ذات جودة قريبة من حدّ الانعراج، ومتبوعة بعدة مضخّمات عالية الاستطاعة. لقد تمّ تطوير الوحدة الهزّازة المحقونة، وكذلك الوحدة المضخّمة (ليزر بخار النحاس استطاعته 100 واط ضوئي MNT 100) بموجب عقد حصلت عليه شركة صناعة الليزرات CILAS. وهما عبارة عن منتَجين صناعيَّين تكفّلت شركة CILAS بتوريدهما.

زوِّد هذان الليزران بمبدل ذي ترانزستورات موسفت، مما يؤمّن لتغذيتهما الكهربائية زمناً وسطياً بين الأعطال يفوق 20 000 ساعة. حدِّد هدف مدة شحن هذين الليزرين بـ 1000 ساعة.

الهزّاز

تتألف الوحدة الإنشائية الهزّازة المحقونة، من رأسين ليزريين تُغذيهما نبضات كهربائية مُزاحة زمنياً بمقدار بضع عشرات النانو ثانية. يوضع الرأس الحاقن في تجويف ضوئي غير مستقر، وتغذّيه في أول الأمر نبضة كهربائية. تكون الحزمة في البداية متباعدة بشدة عندما تظهر النبضة الضوئية، ومن ثم يتضاءل هذا التباعد في الحزمة مع مرور الوقت. تخترق هذه الحزمة الليزر الهزّاز، الموضوع أيضاً في تجويف غير مستقر. وهكذا، مع نهاية نبضة الحاقن، تنطلق النبضة الضوئية للهزّاز - التي تظهر متأخرةً بالمقارنة مع نبضة الحاقن - وتبدي منذ ظهورها حزمة ذات جودة عالية. وبهذه الطريقة، تكون الحزمة التي يعطيها الهزّاز المحقون ضمن حدّ الانعراج خلال مدة استمرارها، أي خلال 50 نانو ثانية.

ويجب أن تتمتع تغذية الهزّاز المحقون بمبدّلين لتغذية الرأسين الليزريين بصورة منفصلة. في الأساس كانت المبدّلات تيراترونات. وقد تمت الاستعاضة عن هذه التيراترونات بمصفوفات من ترانزستورات الـ موسفِت في الليزرات الصناعية التي طُوِّرت في ذلك الحين. وهذا الحل يتلاءم جيداً مع الليزرات ذات الاستطاعة المنخفضة، وهو يؤمّن بالإضافة إلى ذلك هزهزة gigue زمنية (ارتعاشاً) ضعيفة جداً. وهذه الهزهزة هي المكوّن العشوائي للوضعية الزمنية للنبضة الضوئية. وبالنسبة لليزر الهزاز المحقون، يكون للهزهزة انحراف نوعي أدنى من 1.5 نانو ثانية.

وحدة إنشائية هزّازة محقونة

الخصائص الأساسية للوحدة الإنشائية الهزّازة المحقونة:

- حزمة استطاعتها 30 واط في 300 مكروراديان
- تواتر التشغيل 5 كيلو هرتز.
- استمرار النبضة بمنتصف الارتفاع 35 ns
- الأطوال الموجية 510 nm و 578 nm
- الارتعاش أدنى من 2 ns
- العلاقة أخضر/ أصفر أعلى من 1.5.
- وزن أقل من 1500 kg
- مدة بقاء المجموعة بأكملها 20 عاماً
- تبديل عالي التوتر بخزان ترانزستورات الموسفِت.
- الزمن الوسطي بين أعطال التبديل أعلى من 20 000 ساعة.
- إدارة الليزر من قبل مشرِف.

وحدة إنشائية MNT 100

إن هزهزةً ضعيفة هي معيار مهم جداً من أجل عملية التسلسل، والتي يجب فيها توقيت مضخّمات الـ LVC زمنياً بالنسبة إلى الهزّازات المحقونة، كما أنها تقتضي إيجاد توقيت زمني لحزم مختلف سلاسل الليزرات الملوَّنة فيما بينها.

مضخّم استطاعته 100 واط

إن عمل المضخّمات هو تضخيم الحزمة الناتجة عن الهزّازات المحقونة، مع الحفاظ على جودة الحزمة. وعلى سبيل المثال، في منشأة ASTER التابعة لـ SILVA، في ساكلي، تتألف السلاسل الليزرية من هزّاز محقون يتبعه ثلاثة مضخمات استطاعة كل منها 100 W.

إن أعمال تحسين جودة العمل، التي تجري منذ عدة سنوات في بيرلات، تسمح اليوم بالحصول على تشكيلة لرأس ليزري تصل شحنات النحاس فيه إلى 1000 ساعة. لقد تمت أمثَلة هندسة الرأس، وهي تسمح بمدة بقاء (لهذا الرأس) تفوق الـ 6000 ساعة.

الخاتمة

إن التقدم الذي تم التوصل إليه هذه الأيام، فيما يخص عمليات التغذية، أي التخلي عن التيراترونات والاستعاضة عنها بمصفوفات ترانزستورات الموسفِت، وكذلك في ما يتعلق بالرؤوس الليزرية، يتيح تقديم ليزر بخار النحاس بوصفه ليزراً صناعياً يتمتع بوثوقية عالية في التشغيل.

لقد أصبحت شركة CILAS جديرة بتوريد هذه الليزرات الصناعية، وقد حصلت على إذن لذلك، كما أنها تؤمّن إنتاجها. أما شركة CENTRALP AUTOMATISMES فهي تصنّع مبدلات أساسُها الـ MOS. وقد حصلت على إذن بتقييم براءات اختراع CEA-COGEMA المتعلقة بهذه المبدّلات. ■

☆ ★ ☆

إغناء اليورانيوم بالليزر
طريقة سيلفا*

آلكس روزنكارد - فيليب إلياس
مفوضية الطاقة الذرّية - ساكلي - فرنسا

ملخص

منذ 15 سنة قرّرت مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية CEA تطوير طريقة سيلفا لإغناء اليورانيوم التي تعتمد على التأيين الضوئي الانتقائي للبخار الذرّي بالليزر. أدّى هذا القرار إلى برنامج أبحاث مهم تم تنفيذه بتوجيه من مفوضية الطاقة الذرّية والمشغّل الصناعي كوجما COGEMA. سنقدّم، بعد أن نصف مبدأ الطريقة والأعمال المختلفة التي يجب أن تُنفّذها منشأة الإنتاج، مظاهر التفاعلات المتبادلة، بتفصيل أكبر، بين الفوتونات والذرّات وبين الليزر والضوء.

الكلمات المفتاحية: إغناء اليورانيوم، تأيين ضوئي انتقائي، بخار ذرّي، طريقة سيلفا، جهاز الفصل، مجمّع.

لابد، لكي نتمكّن من استخدام اليورانيوم كوقود في معظم محطات توليد الكهرباء بالطاقة الذرية، من إغنائه مسبقاً، أي زيادة نسبة النظير القابل للانشطار 235 الذي يحويه، من 0.7% (محتوى اليورانيوم الطبيعي) إلى 3.5% أو 4% من أجل الوقود الحالي وحتى 5% في المستقبل. ويقتضي هذا الإغناء اختيار الماء العادي كمهدّئ وحامل للحرارة ويقوم بتعويض هدروجين الماء الذي أسر بالنترونات. وهناك في الوقت الحاضر طريقتان تتقاسمان إنتاج اليورانيوم المُغنى عندما تُجريان على معقّد غازي من اليورانيوم، سادس فليورور اليورانيوم UF6:

طريقة الانتشار الغازي التي تطبقها كل من الولايات المتحدة وفرنسة حيث تستثمر شركة أورووديف EURODIF حالياً مصنع جورج بسّ (تريكاستان) الذي يمثّل 20% من قدرة الإغناء العالمية.

طريقة النبذ الفائق، وتقع مصانعها بمعظمها في روسية وأيضاً في المملكة المتحدة وألمانية وهولندة (شركة أورنكو) وفي اليابان.

في هاتين الطريقتين يتم الحصول على المحتوى النهائي للإغناء المرغوب بتكرار متعدّد للعملية الأولية في شلاّل من الفصل النظيري (1400 مرحلة من أجل طريقة الانتشار الغازي).

يتفق سوق الإغناء (25 مليار من الفرنكات من أجل نحو 7500 طن/سنة من اليورانيوم المُغنى) مع كمية الإنتاج الزائدة بالمقارنة مع الاحتياجات حيث يكون التنافس شديداً جداً ويميّز نمط الإنتاج الأكثر منافسة. وفي منظور طويل الأمد، قرّرت مفوضية الطاقة الذرّية ضمن هذا الإطار تطوير طريقة سيلفا: فصل نظيري لبخار اليورانيوم الذرّي بالليزر.

مبدأ الطريقة

تستخدم طريقة سيلفا الاختلاف بين تواترات إثارة طبقات إلكترونات (الانتقال الإلكتروني) نظائر أحد العناصر الكيميائية (اليورانيوم). يمكن للضوء المنبعث من ليزر أن يتوافق تماماً مع هذه التواترات مؤدياً إلى إثارة النظير المختار، في حالتنا اليورانيوم 235. تقود هذه الإثارة إلى التأيين الضوئي للذرّة. وهكذا بتصالب نفث من بخار ذرات اليورانيوم مع حزم ليزرية (الشكل 1) نحصل على أيونات اليورانيوم 235 التي انفصلت بحقل كهربائي وجُمّعت على مجمّعات المنتوج المُغنى، بينما يُستعاد معظم ما تبقّى من الذرّات على المجمّع المفقّر. أُقيم هذا النظام من أجل الحصول على مجمّعات المنتج المُغنى على خليط نظيري بالمحتوى المرغوب (5% مثلاً). وهكذا تقوم طريقة سيلفا بفصل نظيري في مرحلة واحدة (بدون شلاّل).

الوظائف الأساسية

تكمن الأصالة في منشأة سيلفا في المزاوجة بين منظومة إدارة اليورانيوم الذرّي ومنظومة ليزرية.

جهاز الفصل

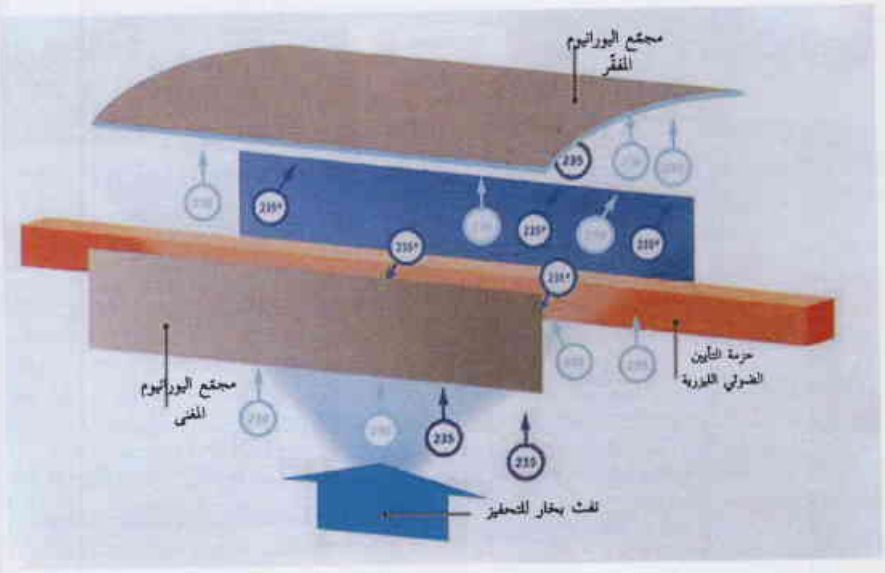
تُؤمّن منظومة إدارة اليورانيوم الذرّي الوظائف التالية (الشكل 2):

- تغذية جفنة باليورانيوم الطبيعي بشكله الصلب أو السائل.
- تبخير هذا اليورانيوم الطبيعي بالقذف الإلكتروني للمعدن الموجود في الجفنة.

---

* نشر هذا المقال في مجلة *Optique et Photonique*, 4/99. ترجمة هيئة التحرير- هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية



الشكل 1- مبدأ الطريقة.

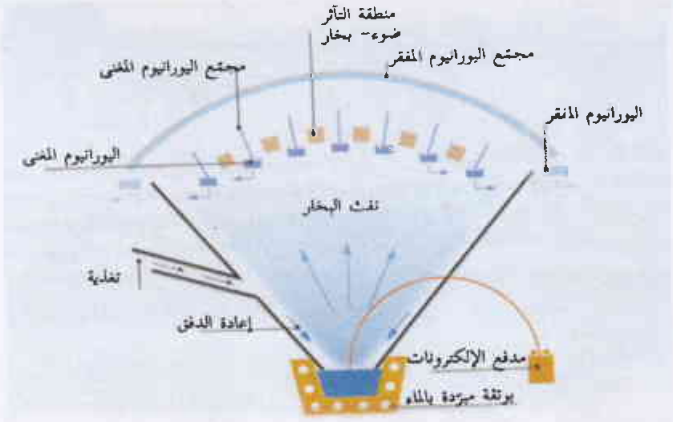
وحتى يتم التبخير بالقذف الإلكتروني توضع المنظومة في وعاء مخلّى من الهواء وفي وعاء منظّم حرارياً ليتيح جريان اليورانيوم في الطور السائل: ونظراً لأنّ درجة حرارة انصهار اليورانيوم مرتفعة (1130 درجة مئوية) من المفضّل تخفيض درجة الحرارة هذه باستخدام مزيج من اليورانيوم والحديد. وهذا يتيح فتح التشكيلة من المواد المستخدمة من أجل البنى الحارة بتماس اليورانيوم السائل.

منظومة الليزر

حتى يتأمّن إنتاج ونقل ومزاوجة الفوتونات مع بخار اليورانيوم الذرّي تتجزأ منظومة الليزر إلى أربع مجموعات ثانوية هي:

- الليزرات بصفتها مصادر الضخّ الضوئي لليزرات الصباغية.
- سلاسل الليزر الصباغي القابلة للضبط.
- المنظومة الضوئية لنقل الحزمة من مصنع الليزرات حتى جهاز الفصل.
- المنظومة الضوئية التي تعمل على انعكاس الحزمة الضوئية من أجل إنارة بخار اليورانيوم.

إن استطاعة الليزر الصباغي الكلية والضرورية عند مدخل جهاز الفصل تنتج من تحقيق الأمثلية التقنية والاقتصادية مع الأخذ بالحسبان كل وسطاء الطريقة كي نصل إلى أقل كلفة ممكنة للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم المُغنى. إلاّ أنّ هذه الأخيرة تُحسب بالكيلو واط.



الشكل 2- مقطع جهاز الفصل.

- التقاء الذرات والفوتونات في منطقة التأثر محدثاً التأيين الضوئي.
- الفصل (الاستخلاص) بحقل كهربائي لأيونات اليورانيوم 235 الضوئية.
- التكثيف على المجمّعين للدفقين المُغنى والمفقّر في الطور السائل.
- سَوْق كل دفق، عن طريق الجريان الثقالي بصورة رئيسة، إلى المسابك خارج جهاز الفصل.
- عودة اليورانيوم المكثف، الذي لم يمرّ في منطقة التأثر إلى الجفنة.
- الحصر العام لبخار اليورانيوم.

دراسات الفيزياء الذرية

الشكل 3- منشأة أستر ASTER (مفوضية الطاقة الذرية/ساكلي) منظرجهاز الفصل ألدباران ALDEBARAN. يُلاحظ في داخل نطاق التنظيم الحراري وعلى الجانبين الأذرع التي تجري في داخلها الحزم الليزرية.

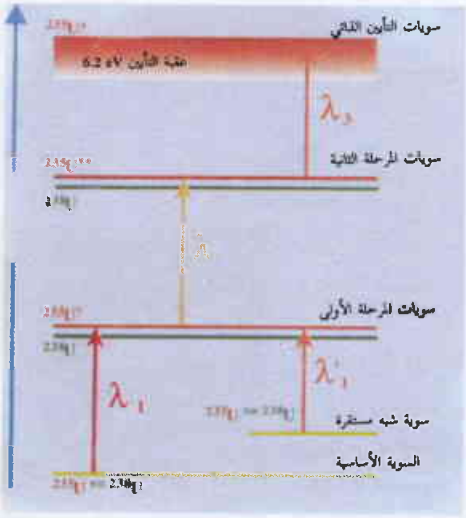
يكون التأيين الضوئي الاصطفائي لليورانيوم 235 ممكناً عندما تتوافق بدقة أطوال موجة الليزر مع تواترات إثارة الإلكترونات الخارجية لهذا النظير. وندعو "تسلسلات" الطرق المختلفة الممكنة لتزويد طاقة التأيين الضوئي للذرة، أي نحو 6.2 إلكترون فولط التي يتم الحصول عليها بالتأثر المتعاقب مع ثلاثة فوتونات تقع في مجال الضوء المرئي (الشكل 4).

يرتكز أحد الأهداف الرئيسة المختارة للدراسة الطيفية الذرية على قياس عزم ثنائي القطب الكهربائي للانتقال بين مختلف سويات طاقة اليورانيوم: أي أنّ التسلسلات المهمة لمصنع من المصانع هي التسلسلات التي تتطلب، من أجل ثلاثة مراحل إجمالاً، أقل استطاعة ليزرية

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

للوصول إلى إمكانية تأيين ضوئي مفترض.

إنّه من المهم أيضاً، من أجل اقتصاد الطريقة، إجراء تغطية طيفية جيدة لسويات طاقة الانتقالات المختارة التي لها عرض محدّد مرتبط ببنية النظير 235 فائقة النعومة وبمفعول دوبلر في البخار قيد التوسّع. ويرتكز المبدأ المأخوذ بالحسبان في الوقت الحاضر على التعريض الطيفي عن طريق تعديل كهرضوئي لحزمة أحادية النمط تنشأ من هزّاز صبغي. وهكذا ستكون وسطاء التعديل مرتبطة بسويات إلكترونية محددة بالتسلسل.



الشكل 4– مخطط مدرسي للتأين الضوئي لذرة من اليورانيوم في ثلاث مراحل. مرحلة رابعة "لون" ($\lambda 1$) يمكن أن تظهر مفيدة لحمل الذرات الواقعة في سوية غير مستقرة ($620\ cm^{-1}$) إلى سوية المرحلة الأولى. (سويات التأين الذاتي، عتبة التأين (6.2 إلكترون فولط)، سويات المرحلة الثانية، سويات المرحلة الأولى، سوية غير مستقرة، سوية أساسية).

ونظراً لكون دفق النبضات الليزرية (يُعبّر عنه بـ $mJ\backslash cm^2$) هو الوسيط الأساسي لتحديد احتمالية تأيين ذرة منارة من اليورانيوم، 235 فمن الطبيعي أن يؤدي ذلك من الناحية الاقتصادية إلى توليد أصغر حزمة ممكنة وإلى جعلها تنعكس مرات متعدّدة في جهاز الفصل لإنارة البخار. إنّه من المفترض أن تحدّد دراسات التآثر بين الليزر والمادة والانتشار المسافة المثلى التي يمكن أن تقطعها الحزمة (مقدرة بالكيلومترات) قبل أن تفقد قدرتها على التأيين الضوئي لليورانيوم 235 باحتمالية جيدة. وهكذا يجب أن يأخذ هذا التقدير بالحسبان الخلل الناجم عن منظومة إعادة انعكاس (إعادة انكفاء repliement) الحزمة (فقدان مرتبط بطبقات ضوئية رقيقة وبتنامي الزيوغ وبعمليات محتملة للتحكّم بحظار الحزمة والانعراج في الخلاء ومزاوجة أمواج الليزرالكهرطيسية مع بخار مكوّن من ذرات مجاوبة (أقلية) وذرّات غير مجاوبة (أكثرية).

تسمح دراسات الفيزياء الذرية إذاً بتثبيت المميزات الطيفية، والطاقية والفضائية والزمنية لنبضات الليزر المطلوبة عند مدخل جهاز الفصل. وسنبيّن فيما يلي الحلول المقبولة في الوقت الحاضر للإجابة على هذه المواصفات.

مصادر الضخ الضوئي لليزرات الصباغية

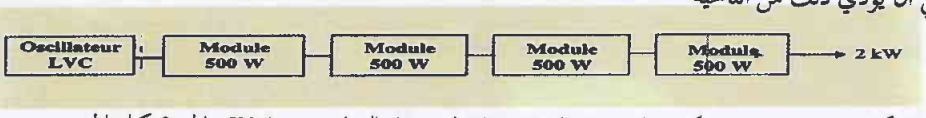
تمثّل ليزرات الضخ الجزء الأعظم من الاستثمارات المتعلقة بمختبر الليزر في مصنع سيلفا.

عهد ليزرات بخار النحاس LVC

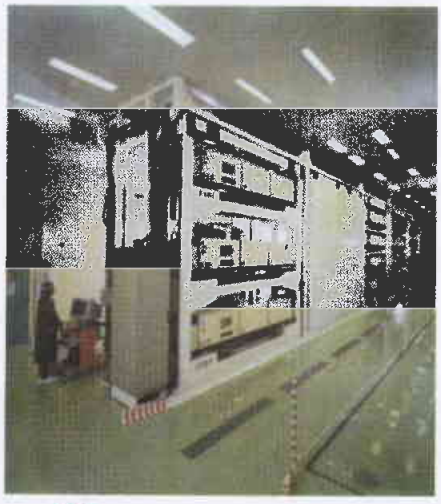
إنّ سرعة التوسع السريع للبخار الذرّي (1000 m/s <) تتطلّب وتيرة عالية من تكرار الحزمة المستخدمة (10 < كيلوهرتز). ارتكز خيار ليزرات الضخ لدى سيلفا في البداية على ليزرات بخار النحاس القادرة على إعطاء حزم ذات استطاعة قوية (بتكرارية أعلى من 5 كيلوهرتز) مؤلفة من إشعاعات صفراء اللون (578 نانومتر) وخضراء اللون (510 نانومتر).

تمّ تسويق ليزرات بخار النحاس بصورة رئيسة على شكل وحدات من 100 واط صنّعتها شركة اكسفورد لليزرات (تمثّلها شركة سوبرا) وشركة سيلاس، أمّا تطوير وحدة ليزرات بخار النحاس من 500 واط لدى سيلفا فقد أنجز بالمشاركة مع سيلاس.

من أجل استخلاص الطاقة بمردود جيد من مضخمات ليزرات بخار النحاس، من الضروري، أن نضع هذه المضخمات على التسلسل: حيث يتم التضخيم إذاً بمرور بسيط بدءاً من هزّاز محقون يمتلك عند المخرج حزمة ذات جودة عالية (الشكل 5).



الشكل 5– تسلسل من مضخّمات ليزر بخار النحاس (هزّاز ليزر بخار النحاس، وحدة 500 واط، 2 كيلوواط.



الشكل 6– سلاسل ليزر بخار النحاس في منشأة أستر في مفوضية الطاقة الذرية /ساكلي.

وهكذا يُعطي كل "ذراع bras" من ليزر بخار النحاس استطاعة متوسطة قدرها نحو 2 كيلو واط بتواتر 5 كيلو هرتز. وهناك جدار مُنظم يجب أن يضمن فيما بعد فصل اللون الأخضر عن اللون الأصفر، والدمج multiplexage الزمني حتى الوصول إلى تواتر التكرار المرغوب، وتوزيع الاستطاعة في شبكة الألياف الضوئية الموصولة مع القنوات الملوّنة. تُتيح المعالجة المنفصلة للونين الأخضر والأصفر استخداماً أفضل لاستطاعة الضخّ الضوئي،لأنها تتيح من تحقيق الأمثلية للمردودات اللونية بدلالة طول الموجة المراد اطلاقها (الشكل 6).

ظهور ليزرات صلبة تضخّها الديودات

إذا كانت كل منشآت العرض في مفوضية الطاقة الذرّية مجهّزة بصورة رئيسة بليزرات بخار النحاس، فإنّ التطوير الحديث لليزرات الصلبة من نمط نيوديميوم: ياغ Nd: YAG التي تضخّها ديودات ليزرية تجعلنا نتنبأ بأرباح محتملة كبيرة لسيلفا.

وهكذا أتاح نموذج مختبري، تمّ تطويره في مفوضية الطاقة الذرية واستخدم ستين ديوداً مستمراً استطاعة كل منها 25 واط، تجاوز 150 واط عند 532 نانو متر مع مدة نبضة أقل من 75 نانو ثانية من أجل تواتر تكرار قدره 10 كيلو هرتز. كان المردود الكهربائي الضوئي الملاحظ في هذه الشروط أعلى من 5% (الشكل 7).

الشكل 7- صورة فوتوغرافية موضحة لوسط تضخيم ليزري نيوديميوم: ياغ: على اليمين جدار من 60 ديودا ليزريا (شركة ديلاس)، على اليسار قضيب النيوديميوم: ياغ المحاط بعاكسه الضوئي.

وبالإضافة إلى ذلك فقد أنجزت مؤخراً شركة طومسون CSF وحدات ياغ الأولى التي تستجيب إلى احتياجات البحث والتطوير لدى سيلفا (الشكل 8) وذلك اعتماداً على تقانة ليزرات ليرا LYRA المصنوعة بترخيص من مفوضية الطاقة الذرية وكوجيما.

غيّر ظهور الليزرات الصلبة كثيراً من مظهر مختبر الليزرات في مصنع سيلفا المستقبلي: فقد اختفى في الواقع وضع المضخمات على شكل سلسلة وكذلك إدارة حزم ليزرات بخار النحاس لحساب اقتران مباشر بليف ضوئي بين كل من وحدة ياغ ومضخّم صبغي وعندها يتم إنجاز الدمج الزمني المحتمل في الموقع في المجرى الصبغي. وقد اقتضى تغيير طول موجة الضخ (532 نانو متر عوضاً عن 510 و 578 نانومتر أيضاً) القيام بتغييرات في اختيار أصبغة المصنع.

السلاسل الليزرية الصباغية

تنشأ الفوتونات المنتجة في هزّاز صبغي مضبوط بنمط وطول الموجة. ويقوم مقياس لامبدا ذو ميز عال (من 30 إلى 100 ميغا هرتز بحسب مصادر المعايرة المتوفرة) الذي طورته خصيصاً مفوضية الطاقة الذرية، بضمان الضبط الدقيق المطلق لطول الموجة الضرورية من أجل الطريقة. يعتمد هذا المقياس على تعداد أهداب التداخل في زاويتي فيزو Fizeau بشخانتين ضوئيتين مختلفتين. وقد صدّق وأجاز هذا المقياس المكتب الوطني للمقاييس وأصبح جاهزاً للتسويق بترخيص من مفوضية الطاقة الذرية وكوجيما.

تضخّم النبضة الصبغية الصادرة عن الهزّاز فيما بعد بإمرار بسيط، أولاً في مضخّمات أولية ثم في مضخّمات صبغية تعمل عند الإشباع (الشكل 9).

ويتم المرور من مضخّم إلى آخر بمنظومة لابؤرية تُكيّف أيضاً مقاس الحزمة الصبغية.

يصف الشكل 10 فيما يلي مبدأ التضخيم:

يجب أن يُجدّد الصباغ الموجود في خلية التضخيم، لأسباب حرارية، بين كل ليزر نبضي. وتكون استطاعة خرج المضخّم الأخير من السلسلة الصبغية محدودة الآن بسلوكية المعالجة المضادة للإنعكاس لكسيرة diopter المخرج أمام الدفق وبتقانة دارات الجريان الصبغي.

تتوفر في الوقت الحاضر نمذجة مكانية- زمنية طاقية لتضخيم النبضة الصبغية الداخلة بدلالة شروط الضخ الضوئي ونوع الصباغ وهندسة الخلية المضخّمة.

وتُحقن الحزم عند مخرج الذراع الصبغي في منظومة النقل الضوئي.

النقل الضوئي

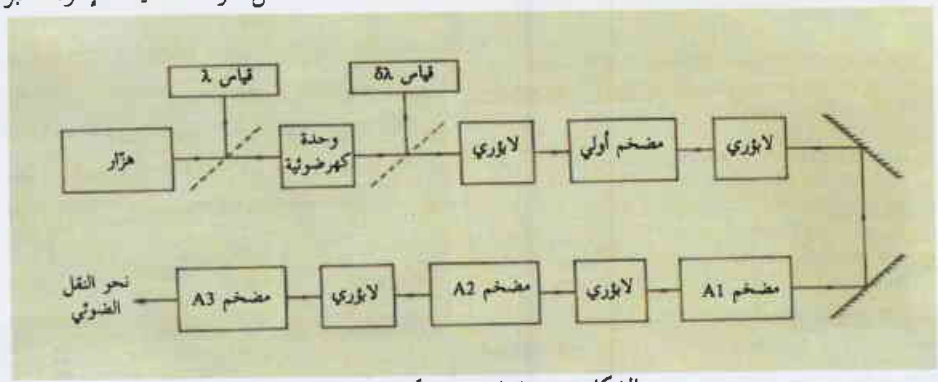
إنّ الأعمال الرئيسة التي يجب أن تؤمنها منظومة النقل الضوئي هي التالي:

- مزج الأطوال الموجية المختلفة لتعاقب التأيين الضوئي المختار.
- نقل هذه الحزمة من مختبر الليزر إلى جهاز الفصل.
- مراقبة المميزات المكانية للحزمة، خلال الزمن، لكي تستجيب إلى المواصفات المطلوبة في مدخل منظومة الانعكاس.

الشكل 8- صورة فوتوغرافية لوحدة ياغ أنجزتها شركة طومسون CSF ليزر. (خرج الاستطاعة الليزرية بليف ضوئي).

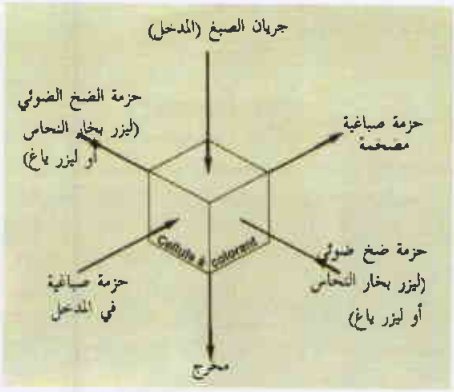
منظومة انعكاس الحزمة

تقوم منظومة انعكاس الحزمة، التي تتألّف بصورة رئيسة من مرايا تقع على جانبي جهاز الفصل، بوظيفة إعادة حقن حزمة، منتجة بأصغر مقطع ممكن، في جهاز الفصل مرات عديدة لإنارة أكبر



الشكل 9- تسلسل من مضخّمات صباغية.

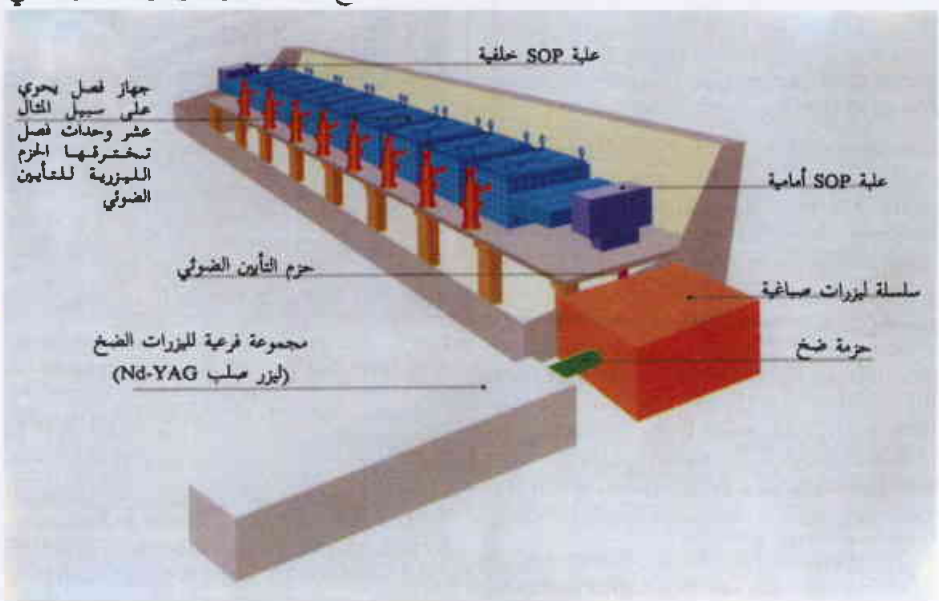
هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy



الشكل 10– المضخّمات الصباغية: على اليسار مخطط لمبدأ التضخيم وعلى اليمين صورة فوتوغرافية لمضخّم طورته مفوضية الطاقة الذرية.

إنّ التطوير الصناعي المستقبلي لطريقة سيلفا، الموضوعة في سوق إغناء منافس إلى حد بعيد، سيعتمد على كلفة اليورانيوم المغنى الذي يتم الحصول عليه بهذه الطريقة حيث يصل الجزء الذي يتدخل فيه الليزر إلى نحوالنصف.

تُستنتج الكلفة في الوقت الحاضر من الدراسات المتكاملة للطريقة التي قامت بها مفوضية الطاقة الذرية وجمعتها في "صورة مصنع" سيلفا (الشكل 11). إنّ صورة المصنع الآنفة الذكر، الموضوعة بالتعريف في حجم ممكن من بخار اليورانيوم، في كل نبضة ليزرية. وتُحسب المسافات التي تُقطع عند ذلك بالكيلومتر، والحالة المثلى، المراد إيجادها، والتي يُعتمد عليها في جزئها الأكبر اقتصاد الطريقة، يجب أن تأخذ بالحسبان في آن واحد الانطفاء التدريجي للحزمة (فقدان في الأشعة الضوئية، "استهلاك" البخار للفوتونات) بالإضافة إلى تدرّكها المكاني –الزمني المرتبط بالإنكسار وزيوغ المنظومات الضوئية والظواهر المختلفة لتآثر ليزر/ مادة مع البخار نفسه.



الشكل 11– منظر تخطيطي لما سيكون عليه مصنع سيلفا المكوّن من 10 وحدات فصل تخترقها الحزم الليزرية نفسها مع صناديق ضوئية يتيح تشغيلها في جهاز الفصل. يمكن أن يغذّي هذا المصنع نحو عشرة مفاعلات كهرنووية باليورانيوم المُغنى.

الاستنتاج: الرهانات الضوئية في طريقة سيلفا

بالنسبة إلى المنظومات الليزرية المتطورة صناعياً في الوقت الحاضر تأتي خصوصية طريقة سيلفا من الجمع بين متوسط الاستطاعة المطلوبة القوية جداً وبين الجودة الطيفية المكانية والزمنية المطلوبة.

الحالة الاقتصادية المثلى، تتطوّر بدلالة التقدم التقاني الناجم عن أعمال البحث والتطوير التي تقوم بها مفوضية الطاقة الذرية أو شركاؤها من الصناعيين حول المشروع. ■

☆ ★ ☆

استخدام الليزر فمتو ثانية في الصناعة*

إريك اودوار
جامعة جون مونه - سانت-إتين-فرنسا

ملخص

تتطوّر في الوقت الحاضر تقنيات الليزر في الوسط الصناعي تطوراً كبيراً وبصورة خاصة في مجالات اللحام وتصنيع القطع. فقد تمّ في مدينة سانت-إتين بفرنسة تطوير آلة ليزر فمتو ثانية مخصصة للتطبيقات الصناعية.

الكلمات المفتاحية: ليزر مستمر، ليزر نبضي، ليزر الفمتو ثانية، ليزر ضخ، تطبيقات صناعية.

إنّ الليزرات الموجودة في الوسط الصناعي هي بصورة خاصة ليزرات مستمرة ذات استطاعة وسطية عالية تُنتج إشعاعاً يقع طول موجته في مجال ما تحت الأحمر (مثلاً ليزر CO_2 باستطاعة 3.5 كيلو واط). وتوجد أيضاً ليزرات نبضية (مثل ليزرات الهيجان "الإكسايمر excimères" التي تُنتج إشعاعاً في المجال ما فوق البنفسجي).

تمّ تطوير آلات من هذا النوع وكذلك تطبيقاتها بصورة أساسية في ألمانية التي تُعدّ الدولة الأهم في العالم فيما يتعلّق بسوق التطبيقات الميكانيكية للّيزرات التقليدية. إنّه من الضروري أن يأخذ تطوّر التقانات في الميكانيك في وسط حوض سانت-إتين بالحسبان تقدّم هذه التقنيات من أجل الحفاظ على حصصه من السوق وتطويرها.

التطوير الحديث لمصادر الليزر:

النبضات القصيرة جداً (فمتو ثانية)

في النبضة الليزرية نركّز الطاقة المتاحة في زمن قصير جداً. وتكون الاستطاعة التي نبلغها أكبر بقدر ماتكون النبضة قصيرة جداً. ولذلك لابد من الاهتمام باستعمال نبضات قصيرة جداً، ومن الممكن في الوقت الحاضرالوصول إلى عِشر فمتو ثانية (الفمتو ثانية تساوي 10^{-15} ثانية أي واحد من مليون مليار جزء من الثانية). والطاقة التي يمكن أن تكون تحت تصرّفنا تكون قادرة على تصنيع أي نوع من المواد بعملية الإزالة، حتى المواد التي كانت مستعصية على التقنيات الليزرية. والميزة المهمة هي الفترة الفاصلة بين النبضات أي الزمن الذي ينقضي بين نبضتين متتاليتين. وعلى نحو نموذجي يمكن الوصول إلى وتيرة 1000 نبضة بالثانية.

الخواص

يتمتع التآثر بين الليزر والمادة في نمط الفمتو ثانية بخواص مدهشة، وبالدرجة الأولى مهمة في التطبيقات الصناعية. ويكون هذا التآثر لا حرارياً (أي لا توجد تأثيرات حرارية ترافق التآثر، وبالتالي لا يوجد تلف في المناطق المجاورة للمنطقة قيد المعالجة كما لا توجد شوائب أو نفايات من عملية تصنيع القطع). ونتيجة لهذه الخاصية فإنّ مثل هذا الإشعاع لايتلاءم مع اللحام الذي هوالمجال الممتاز لليزرات الاستطاعة.

الشكل 1- مثال أولي لتصنيع قطع مكروية بليزر فمتوثانية.(أنبوب قطره 1.5 مم مرئي بالمجهر الضوئي).

مفاتيح سر التطوير

يتم الحصول بسهولة على نبضات الفمتو ثانية ذات الاستطاعات الضعيفة (توجد آلات تجارية). ويكمن مفتاح سر التطوير التقني للآلات المؤهلة للتطبيقات الصناعية في تضخيم هذه النبضات الذي يتم الحصول عليه بفضل ليزر استطاعة آخر أو ليزر ضخ.

وهذا الليزر يولّد نبضات النانو ثانية (أي مليون مرة أطول من نبضات الفمتو ثانية) ولكن باستطاعة وسطية قوية جداً. يُطوّر مركزان في فرنسة وبصورة متزامنة نماذج أولية لليزرات مختلفة ومتكاملة وطرائق تطبيق بشراكة قوية:

مركز **بوردو** (آلة تهدف إلى أداء عالمي في الاستطاعة مع نبضات حتى 20 فمتو ثانية).

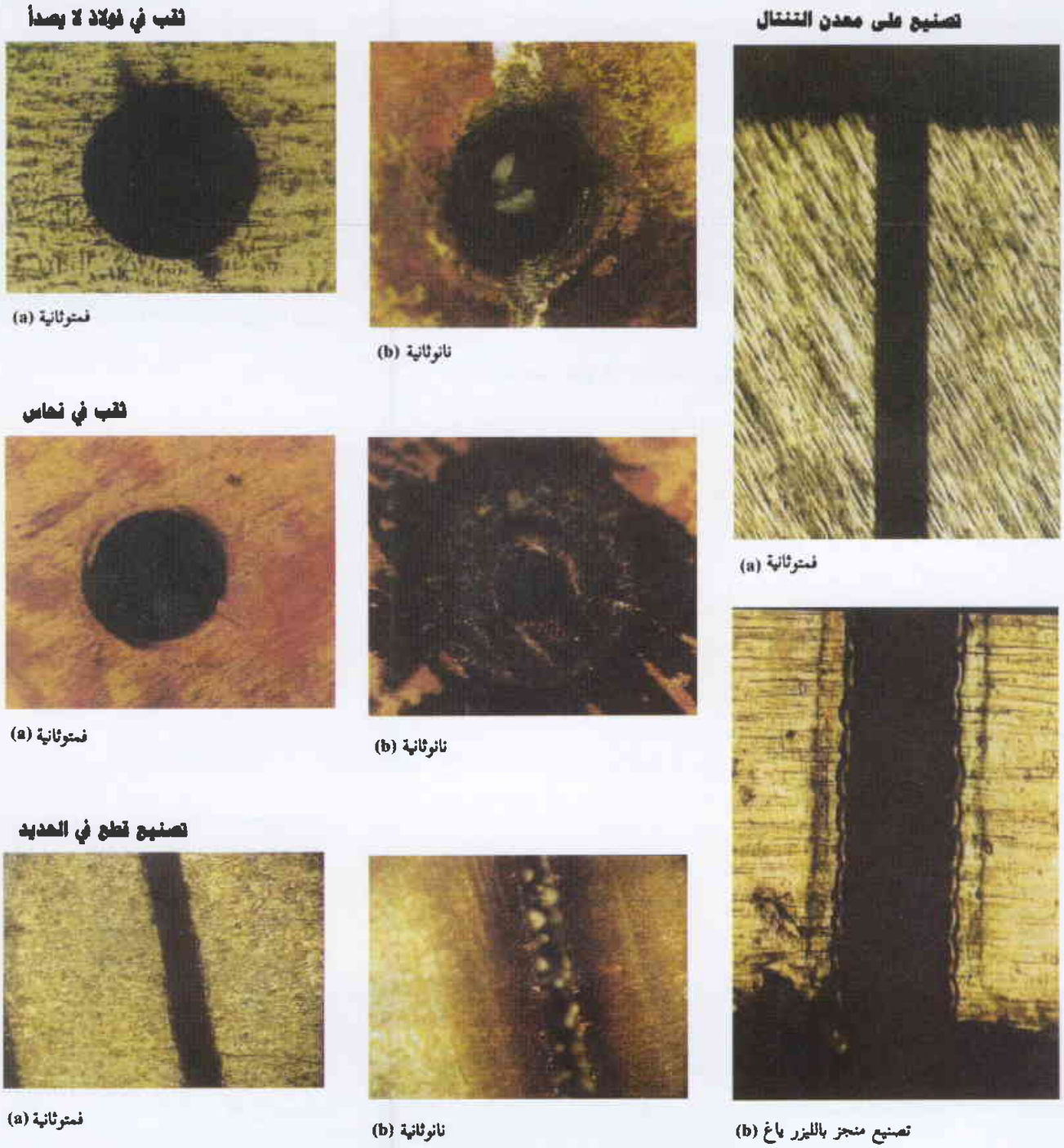
مركز **سانت إتيين** (آلة تهدف إلى أداء عالمي بوتيرة نبضية تصل حتى 20 000 نبضة بالثانية).

أصالة آلة سانت-إتين

أصبحت الزيادة في الوتيرة ممكنة باللجوء إلى ليزر ضخ أصيل، تمّ تطويره في مدينة غرونوبل بفرنسة: الليزر نانو ثانية CuHBr. وهكذا فإنّ

* نشر هذا المقال في مجلة *Optique Et Photonique*, 4/1999. ترجمة هيئة التحرير - هيئة الطاقة الذرية السورية.

A) صور بالمجهر الضوئي



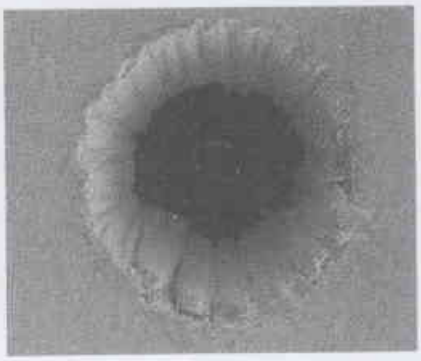
الشكل 2– يبلغ قطر أو عرض الثقوب أو أعمال التصنيع بصورة نموذجية 100 مكرومتر. الليزر المستخدم في إطار الإثباتات الواردة في هذه الصور هو نموذج BMI alpha 1000:800nm, 100fs 0.5mJ (0.5 واط الاستطاعة المتوسطة، 5 جيغا واط استطاعة الذروة). إنّ وتيرة 1 كيلوهرتز لهذه الآلة تجعلها مؤهلة بصعوبة للتطويرات الصناعية المستقبلية. يتم تطوير آلة من جيل جديد في المختبر، تفوق استطاعتها سابقتها بعشرين مرة: 100 فمتوثانية، 0.5 mJ، 20 كيلوهرتز. (استطاعة الذروة 5 جيغاواط، الاستطاعة المتوسطة 10 واط) والعنصر الأصيل في هذه الآلة الجديدة هو ليزر الضخ: أي ليزر CuHBr (الذي حلّ محل النموذج المذكور وسمّي بليزر بخار النحاس) يعطي نبضات نانوثانية من 5 –25 كيلو هرتز يمكن أن تتجاوز استطاعة متوسطة 100 واط. ستؤخذ بالحسبان إمكانية اللحام بهذا الليزر.
تمثيل للنتائج على شكل نوعين من المواصفات: A) صورة مأخوذة بالمجهر الضوئي. B) صورة مأخوذة بالمجهر الإلكتروني الماسح.

B) صور مأخوذة بالمجهر الإلكتروني الماسح

ثقب في فولاذ لا يصدأ

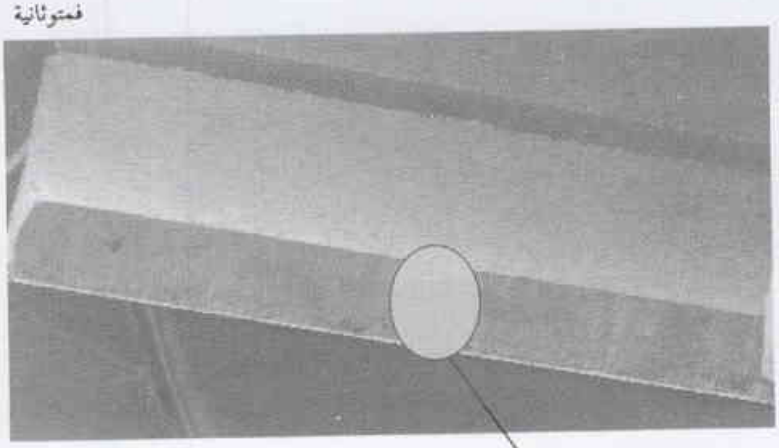
حزمة نانوثانية

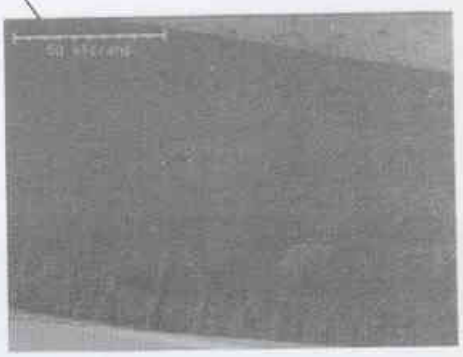
حزمة فمتوثانية



تصنيع قطع في فولاذ لا يصدأ

فمتوثانية





تفصيل مقطع في فولاذ لا يصدأ

نانوثانية

نموذج سانت-إتيين الأوّلي يمكن أن يقدّم مزايا فريدة من وجهة نظر التطبيقات الصناعية:

- وتيرة نبضات الفمتو ثانية عالية جداً من أجل كل تطبيقات التآثر اللاحراري ليزر- مادة (تصنيع مكروي دقيق لأي نوع من المادة بالإضافة إلى إزالة ليزرية لراسب طبقات قاسية).

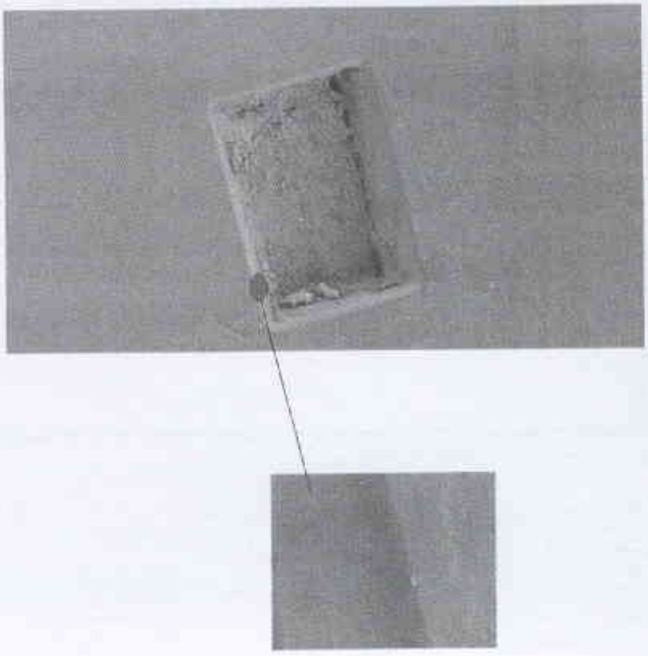
- الجاهزية في الآلة نفسها للحصول على حزمة نانو ثانية ملائمة لاستخدامها في تطبيقات تكون فيها التأثيرات الحرارية ضرورية مثل عمليات اللحام والمعالجة الحرارية.

وهذه الآلة وجهت الانتباه إلى أهمية مزدوجة في موقع سانت-إتيين:

- **الأهمية الصناعية:** وجود إشعاع فمتو ثانية ونانو ثانية معاً في الآلة نفسها وهذا ما يهم بصورة خاصة المؤسسات الصغيرة والمتوسطة في اللوار Loire والمكابول Mécapôle.

- **الأهمية العلمية:** تهتم مدرسة المناجم في سانت-إتيين بتطبيقات مثل هذه الآلة في مجال المواد، وخصوصاً سلوك المواد تحت تأثير الإجهاد الذي يشكل أحد مجالاتها المفضلة.

تصنيع خزفي فمتوثانية



تطوير سطيحة ليزر فمتوثانية

يمكن أن تُلاحظ في سانت-إتيين عناصر قوية لتطوير سطيحة ليزر فمتوثانية وتطبيقاتها:

- الأهمية الصناعية العالمية الواضحة من أجل تطبيقات بدأت تظهر في الوقت الحاضر.

- الفرصة السانحة لسانت-إتيين لكي تحتل الصدارة على المستوى العالمي من أجل:

- تأسيس اتحاد وطني يتضمن المؤسسات المتوسطة والصغيرة في منطقة اللوار.

- تطوير المصادر المؤهلة للجيل الأول من التطبيقات الصناعية في تصنيع القطع المكروية.

- اكتساب التقانات الأكثر تعقيداً التي تتيح تطوير مؤهلات ليزرية أوسع في سانت-إتيين لكي تستجيب إلى الاحتياجات الصناعية. ■

☆ ★ ☆

البصريات الطبية الحيوية*

بول فرنتش
قسم الفيزياء في الجامعة الملكية لتقانات العلوم والطب - المملكة المتحدة

ملخص

سوف تؤدي المنجزات الحديثة في مجال الليزرات، والبصريات، وتقانة المعلومات، إلى إجراء التصوير الطبي - الحيوي بشكل أسرع وبتكلفة أقل، كما ستقلل أيضاً من الحاجة للجراحة.

الكلمات المفتاحية: مطيافية ضوئية، تصوير بالفلورة، تصوير بالقياس النسبي لطول الموجة، التصوير بعمر الفلورة، تصوير طيفي ثلاثي الأبعاد، مجهرية الفلورة متحدة البؤر، مجهرية ثنائية الفوتون، مجهرية مسارية ماسحة، تصوير مقطعي بالترابط الضوئي، تصوير ضوئي للأنسجة الثخينة.

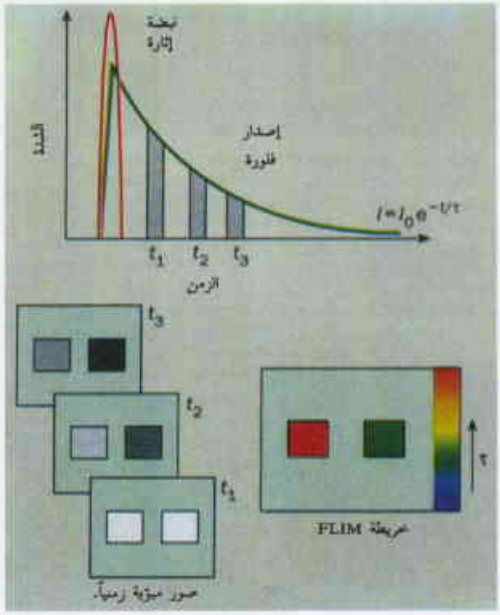
البصريات الطبية - الحيوية

كان لاختراع الجذاذات المكروية السليكونية، وللازدهار الذي نجم عنه في تقانة المعلومات، تأثير عظيم على تحديد الشكل المُميّز للقرن العشرين، كما تفوّق في سويته كثيراً على تأثيرات نجمت عن تطويرات أخرى فيزيائية الأساس في مجال المركبات الفضائية والمحطات النووية لتوليد الطاقة الكهربائية. وبطريقة مماثلة، قد يكون للتقنيات الحديثة الهادفة لجمع وتحليل المعلومات الحيوية والطبية تأثير على طب القرن الحادي والعشرين، وقد يتفوق كثيراً من حيث السويّة على تأثير اختراقات جوهرية في مجال اغتراس الأعضاء والغرسات الإلكترونية الحيوية bionic implants.

وقد استثمر المجتمع الطبي كثيراً من المكتشفات الهامة في حقل الفيزياء من أجل تشخيص ومعالجة مجموعة منوّعة من الأمراض . ويُعدّ التصوير بالأمواج فوق الصوتية، وبأشعة X، وبالتجاوب المغنطيسي بعضاً من أهم الأمثلة المعروفة في هذا المجال.

وفي الآونة الأخيرة، رُكّزت جهود بحثية على جعل التشخيص الطبي أسرع وأقل تكلفة وأكثر فعّالية من خلال تطوير تقنيات تصوير جديدة ذات أساس فيزيائي ومن خلال استعمال حواسيب جبّارة في معالجة وتحليل المعلومات الطبية - الحيوية.

الشكل 1- التصوير بعمر الفلورة



تُثار العيّنة الحيوية بسلسلة نبضات صادرة عن ليزر فائق السرعة، الأمر الذي يسبب تفلور الجزيئات في العينة. ويُقاس الاضمحلال الأُسّي للفلورة ($I = Io \exp(-t/\tau)$)، من سلاسل متوالية لصور مأخوذة بواسطة مقوٍ ذي بوابة - في فترات زمنية مختلفة ($t1, t2, t3,...$) ويستغرق كل تعرض فترة قدرها 90 بيكوثانية ويُحسب ثابت الاضمحلال τ، لكل عنصورة في الصورة، وتُرسم النتائج على خريطة عمر الفلورة.

وبشكل مضطرد، تُسخّر الاكتشافات التقانية الجديدة لتلبية احتياجات المهنة الطبية. وفي هذا السياق، تؤدي البصريات دوراً متزايد الأهمية.

التشخيص الطبي

حسب رأي البعض في المهنة الطبية، فإن "البحث الجاهد" من أجل اكتساب بيانات طبية يُعدّ مماثلاً لما يدعى "Star Trek tricorder"، وهو نبيطة محمولة يمكنها إعطاء تشخيص كامل عندما توجّه ببساطة نحو المريض. وهذا إلى حدٍّ ما ينأى عن المألوف، إذ يعمد الأطباء في الوقت الحاضر إلى موازنة المعلومات التي يحصلون عليها باستخدامهم أنواعاً مختلفةً من التقنيات تمتد مابين التصوير بأشعة X أو بالأمواج فوق الصوتية وبين التحليل المخبري لعينات أنسجة جرى انتزاعها من المرضى. ورغم إمكانية استخدام تقنيات التصوير التقليدية لإثبات وجود أذيّة جسمية أو شذوذ في بنية أنواع مختلفة من النسج، فهي، لسوء الحظ، لاتستطيع أن تُظهر عمليات حيوية تجري داخل الجسم أو تكشف بدء الإصابة لكثير من الحالات المرضية.

وكشف تغيرات فزيولوجية - كأكسجة الدم مثلاً - يعتمد غالباً على إمكانية تمييز سلوك كيميائي مغاير للأعضاء أو الأنسجة التي هي قيد الدراسة.

وتُعد المطيافية الضوئية أداة قياسية مألوفة في مجال التحليل المخبري تُستخدم لكشف ورصد تراكيز المواد، كالأكسجين مثلاً،وذلك إما بقياس

* نشر هذا المقال في مجلة *Physics World*, June 1999. ترجمة هيئة التحرير - هيئة الطاقة الذرّية السورية.

الامتصاص أو الفلورة أو أطياف رامان. لكن المطيافية الضوئية العالية الأداء في النسيج الحيوي تختلف كثيراًعن إجراء قياسات على المحلول في أنبوبة اختبار.

غالباً ما تتألف العيّنة النسيجية من عدد كبير من المكونات المختلفة - ليقال عنها بأنها عينة لامتجانسة. فإذا عمد المرء، ببساطة، إلى تشعيع هذه العيّنة بحزمة ضوئية ثم راقب "البصمة الضوئية" الناتجة فسوف تنجم في الحالة النموذجية إسهامات متعددة لمختلف أنواع الأنسجة التي تأثرت مع الحزمة، الأمر الذي سيؤدي بدوره إلى تشوش الصورة. إضافة إلى ذلك، يعد إجراء القياسات الضوئية الكمية في نسيج حيوي أمراً صعباً للغاية، ذلك أن النسيج يبعثر الضوء بشدة ولمسافة قد تصل في الحالة النموذجية إلى 100 ميكرومتر. وقد أدّت هذه الاعتبارات إلى الحد من تطبيقات واسعة النطاق للبصريات في الطب السريري.

وكبديل لما ذكر، ركّزت مجموعة كبيرة من الأعمال البحثية الأخيرة على التصوير بالتجاوب المغنطيسي magnetic resonance (MRI) imaging، وهي تقنية تكشف الإشارات المتولدة عن السبينات النووية للبروتونات الموجودة في الماء والدهن. لكن هناك حدوداً لتطبيق تقنية التصوير بالتجاوب المغنطيسي MRI لايمكن تجاوزها. فهي تتطلب حقلاً مغنطيسياً عالياً جداً، الأمر الذي يجعل جهاز التصوير ذا سعر باهظ جداً. وهناك أيضاً الكثير من الجزيئات التي لايستطيع الجهاز المذكور أن يكشفها بفصل يكفي لأن تكون مفيدة، كما يبقى التصوير عند السوية الخلوية تحدّياً هائلاً.

وإذا أمكن التغلّب على المشاكل المرافقة لتبعثر الضوء، يمكن عندئذ للتصوير الضوئي أن يقدّم تقانة أقل تكلفة تسمح لتصوير المصابين بأمراض، كسرطان الجلد والثدي، والفُصال العظمي osteoarthritis، وداء السكري، إضافة إلى إظهار المزيد فيما يتعلق بالعمل الوظيفي للأعضاء بمافي ذلك الدماغ.

التصوير بالفلورة fluorescence imaging

يُعدّ المجهر الضوئي واحداً من أعظم وسائط البحوث الطبية الحيوية انتشاراً، والتي أتاحت للباحثين دراسة العمليات الحيوية عند السوية الخلوية. وفي السنوات الأخيرة، تقدمت وبشكل عظيم المجهريات وذلك من حيث الفصل والقدرة على إيضاح عمليات وظيفية محددة داخل الكائن الحي. وفي التقنية الطيفية التي تعرف باسم المجهرية بالفلورة، تمتص العيّنة فوتونات واردة، ومن ثمّ تُصدر الضوء بأطوال موجية تختلف تبعاً لنوع الجزيئات الموجودة في العيّنة. لذلك، تتوافق الصورة الملونة لإشعاع التفلور مع خارطة التوزيع لمختلف جزيئات التفلور الموجودة في العينة والتي يطلق عليها اسم "حاملات الفلورة" fluorophores.

ورغم أن التبعثر القوي للضوء والطبيعة اللاتجانسية للعينات تجعلان التصوير بالتفلور داخل النسيج أمراً صعباً إلا أنه بالإمكان إجراؤه في حال استعمال تقنية تعرف باسم: "التصوير بالقياس النسبي للطول الموجي wavelength - ratiometric imaging"، وفيها يُعمد إلى تطعيم العيّنة النسيجية بحاملات فلورة ذات أطياف تتغير بطريقة يمكن التنبؤ بها. وبمقارنة صور شدة الفلورة عند طولين موجيّن أو أكثر، يغدو ممكناً، في أغلب الحالات، وضع خارطة التوزيع بحاملات فلورة خاصة على الرغم من وجود خلفية قوية صادرة عن جزيئات مفلورة طبيعية داخل النسيج.

ومن الممكن أن تُكيَّف التقنية من أجل تصوير الوسط الموضعي الفيزيائي أو الكيميائي داخل عينة نسيجية، كالـ pH أو تركيز أيونات الكالسيوم. فعوضاً عن ما ذكر أعلاه تلطخ العينة بصباغ فلورة ذي طيف إصداري يتغير بطريقة يمكن التنبؤ بها، وذلك حسب شدة اضطراب الوسط الموضعي. وتستخدم طريقة التصوير هذه في العديد من المجالات العلمية، وبخاصة علم الأحياء، ولو أنها تعد طريقة مقيدة بتوفر الأصبغة التي ستكون ملائمة لتطبيق محدّد.

وهناك اتجاه تكميلي للتصوير بالفلورة يستخدم العمر τ بدلاً من تابعية الطول الموجي للإصدار. وفي الحالة النموذجية، تتخامد إشارة الفلورة أسّياً بموجب المعادلة $I = I_0 \exp(-t/\tau)$، حيث τ صفة مميزة لجزيء الفلورة. ويستخدم "التصوير بعمر الفلورة fluorescence-lifetime imaging (FLIM)" للتمييز بين حاملات فلورة ذات طبيعة مختلفة ضمن حقل الرؤية أو لتوصيف تغيرات الصور التي تحصل في وسط حامل الفلورة الموضعي الذي يُغير τ. وهي طريقة للتصوير ذات قدرة على استعمال مجال واسع من أصبغة الفلورة وغالباً ما يمكن تطبيقها على حاملات فلورة تصادف طبيعياً في العينات الحيوية.

وعلى أية حال، يمكن لتغيرات مفيدة في أعمار الفلورة لجزيئات حيوية أن تكون قصيرة جداً لا تتعدى عدداً قليلاً من البيكو ثانية، كما أن للعديد من أصبغة الفلورة أعماراً تقدّر بالنانو ثانية أو أقصر . وحتى فترة وجيزة جداً، لم تتوفر لمعظم باحثي الطب الحيوي وسيلة استخدام التقانة اللازمة للتصوير ضمن هذه المقاييس الزمنية فائقة القِصر. لكن التحسينات التي طرأت مؤخراً على الليزرات فائقة السرعة وعلى مكاشيف التصوير ذات السرعة العالية، كآلات التصوير مقترنة الشحنة CCD cameras وأجهزة التقوية الضوئية ذات الصفيحة، متعددة الأقنية multichannel - plate optical intensifiers — تعني أن الباحثين في المجال الطبي أصبحوا على وشك استخدام تقنية "تصوير بعمر الفلورة FLIM من أجل تصوير المتعضيات الحية.

وقد طوّرت مجموعتنا العاملة لدى الكلية الملكية في لندن نظاماً يستطيع تصوير فروق عمر الفلورة تصل إلى أقل من 10 بيكوثانية. ويعمل هذا النظام من خلال الإثارة الدورية للعينة بواسطة سلسلة نبضات ضوئية من فئة 10 بيكوثانية صادرة عن ليزر فائق السرعة، ومن ثم تصوير خيال شدة الفلورة باستعمال مقوٍّ ضوئي ذي بوابة gated optical intensifier وآلة تصوير مقترنة الشحنة ذات فترة تعريض فعالة قدرها 90 بيكو ثانية (الشكل 1). ويجري تسجيل سلسلة متعاقبة من صور الفلورة بفترات تأخر مختلفة بعد كل إثارة. وطالما أن كل عنصورة pixel تقع ضمن حقل الرؤية، فإنه يغدو ممكنا حساب ثابت إضمحلال الفلورة τ، العائد لذلك الجزء المحدد من العينة. وترسم بيانياً النتائج ضمن صورة عمر الفلورة التي تقوم مقام خارطة التوزع لمختلف حاملات الفلورة أو كخارطة للتغيرات في الوسط الموضعي (انظر الشكلين 2 و 3).

كذلك، تتيح هذه التقنية، وبشكل مباشر، تحليل عينات تحتوي على مزيج من حاملات الفلورة ذات بروفيلات profiles مختلفة من

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

الاضمحلال الأُسّي. وعلى سبيل المثال، يُلجأ في التحليل التعاقبي لمركّب الـ DNA إلى وسم قواعده المختلفة بجزيئين مختلفين من حاملات الفلورة. وبملاءمة البروفيلين الملاحظين لاضمحلال الفلورة في المعادلة:

$$I = I_1 \exp(-t/\tau_1) + I_2 \exp(-t/\tau_2)$$

يستطيع المرء أن يحصل على النسبة I_1/I_2 والتي تكون متناسبة مع نسبة التركيزين.

التصوير الضوئي في ثلاثة أبعاد

في عام 1873 أدرك إرنست أبّي Ernest Abbe أن للمجاهر التقليدية ذات الحقل البعيد فصلاً محدوداً في المستويين المستعرض xy والعمودي (Z) كليهما. ويتغير الفصل في المستوي xy طرداً مع الطول الموجي للضوء، λ، وعكساً مع الفيمة العددية للفتحة والتي هي مقياس لكمية الضوء التي تجمعها عدسة المجهر. إضافة لماسبق، توفر المجاهر التقليدية درجة من التقسيم الضوئي في الاتجاه العمودي بواسطة عمق البؤرة. ولابد أن يكون الحد العملي للفصل حوالي 0.2 ميكرومتر في الاتجاه المستعرض وحوالي 0.7 مكرومتر في العمق، مع افتراض 1.4 حداً أقصى للقيمة العملية العددية للفتحة و5000 نانومتر للطول الموجي للضوء. ولسوء الحظ، لايمكن من الناحية العملية تحقيق هذه الدقة، ذلك لأن المجهر التقليدي يجمع أيضاً الضوء من خارج عمق البؤرة، وهذا يجعل، بشكل خاص، الصورة ذات الفصل (الميز) الواضح في العمق ضبابية.

وفي عام 1955 ، اخترع مارفن مينسكي Marvin Minsky – من جامعة هارفرد في الولايات المتحدة الأمريكية – المجهر الماسح متحد البؤر the scanning confocal microscope والذي تغلّب على المشكلة آنفة الذكر باستعمال منبع نقطي للضوء يتفحص الشيء المختبر عنصورة فعنصورة وباستعمال ثقب إبري متحد البؤر عند المكشاف، وذلك كي يضمن تجميع الضوء الصادر فقط عن عنصورة محددة. ويُحصل على صورة كاملة ثنائية البعد بمسح الإنارة عبر العنصورات كافة. ونظراً لأن الضوء خارج نطاق البؤرة يُرفض من قبل الثقب الإبري للمكشاف، يغدو بالإمكان فحص الشيء المختبر بأعماق مختلفة ومن ثم بناء صورة عالية الفصل ثلاثية الأبعاد.

وفي الحقيقة، بالإمكان استخدام المسح متحد البؤر مترافقاً مع التصوير بالفلورة من أجل إحراز صور طيفية ثلاثية الأبعاد لعينات حيوية، وهي تقنية أضحت بمثابة أداة قياسية مألوفة في البحث السريري. وعلى أية حال، هناك مأخذ واحد على هذه التقنية يتمثل بكونها تستغرق زمناً طويلاً عند فحصها لجميع العنصورات بالتتابع ومن ثم بناء الصورة. كذلك يغدو ضرورياً استعمال ليزر من أجل توفير قدر كافٍ من الإنارة الساطعة عبر الثقوب الإبرية والذي سيكون بحد ذاته مكلفاً وقاصراً من حيث مجال الطول الموجي. لكنه، وفي الآونة الأخيرة أضحت ليزرات الجسم الصلب قصيرة طول الموجة short-wavelength solid-state lasers قليلة التكلفة ومتوفرة على نطاق تجاري، كما توفرت وبشكل متسارع القدرات الحاسوبية الجبّارة الأمر الذي قلّل الزمن اللازم لرسم أوبناء الصورة.

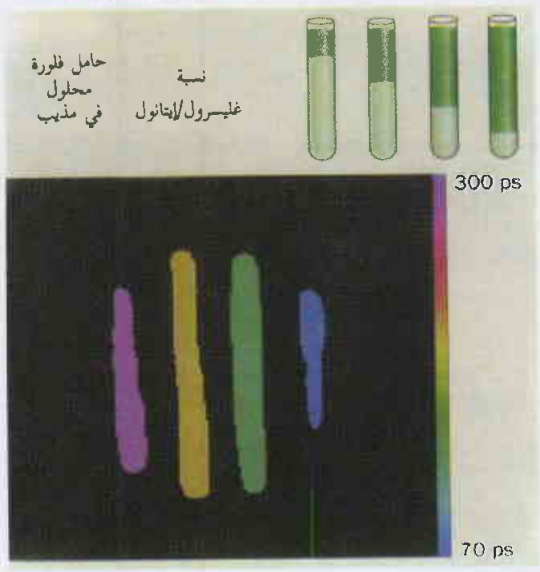
لكن هناك عائقاً أكثر جدّية في استخدام مجهرية الفلورة متحدة البؤر لتصوير العينات الحيوية. فبينما يجمع المجهر متحد البؤر فقط ذلك الضوء الصادر عن المستوى المقطّع للصورة، تُشعَّع مع ذلك العينة الواقعة خارج البؤرة في الحزمة. وقد يؤدي هذا التعرّض المطوّل لأشعة الليزر إلى الإضرار بالعينة أو تخريبها. وعلى أية حال، يمكن تجنّب هذه المشكلة باستعمال ليزر فائق السرعة يرسل نبضات ضوئية تثير الفلورة في العينة.

إن ليزراً باستطاعة وسطية منخفضة نسبياً يستطيع أيضاً أن يرسل نبضات ضوئية عالية الشدة تستمر لفترة جزء من البيكوثانية. وهذه الشدة تكون عالية بقدر كافٍ لكي يمتص الجزيء اثنين من الفوتونات في آن واحد ولكي يُحدِث إثارة تماثل تلك التي يحدثها فوتون مفرد له ضعف الطاقة. وبما أن سرعة امتصاص فوتونين متناسبة مع مربع شدة الضوء لذلك كان من الواضح نسبياً أن يُلجأ إلى تبئير الحزمة للتأكد من أن الإثارة تحدث فقط عند نقطة واحدة.

لذلك كان من الممكن لحاملات فلورة ذات حزم امتصاص فوق بنفسجية عالية الطاقة أن تُثار بطاقة أخفض كثيراً في مجال الأشعة المرئية أو تحت الحمراء، وهي بذلك تصبح أقل تخريباً. وبعبارة أخرى، يمكن للمجهرية ثنائية الفوتون أن تسمح، ولأول مرة، بإجراء تصوير ثلاثي الأبعاد للعديد من أنواع النسج الحيوية دون قتل الخلايا موضع الاختبار. وسوف يكون لهذه التقنية عميق التأثير على البحوث الطبية الحيوية.

وللمجهرية ثنائية الفوتون فائدة إضافية حيث تتيح إجراء تصوير بالفلورة كمّي لأعماق أبعد من تلك التي تسمح بها المجهرية متحدة البؤر التقليدية. وقد استثمر هذه الميزة واينفريد دينك W.Denk، الباحث لدى مختبرات شركة AT&T Bell في الولايات المتحدة الأمريكية، حيث

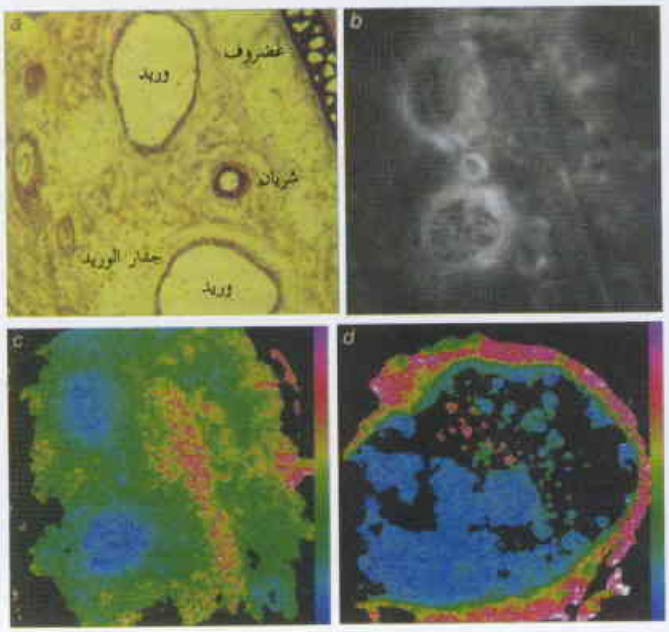
الشكل 2– تقييم الوسط المحيط



يستخدم التصوير بعمر الفلورة fluorescent - lifetime imaging (FLTM) لإظهار تغيرات في الخواص الفيزيائية للوسط المحتوي على مادة تفلورية. ويتعلق عمر الفلورة $\tau = 1/\Gamma + k$ بالسرعة التي يضمحل بموجبها حامل الفلورة عبر إصداره للضوء، Γ، وبسرعة اضمحلاله عبر عمليات أخرى لاتصدر الضوء، k. وبالنسبة لبعض حاملات الفلورة، تكون k حساسة للخواص الفيزيائية والكيميائية لوسط حامل الفلورة. تحتوي المائصات الأربع على محاليل حامل الفلورة نفسه مذابة في مزيج من الإيتانول والغليسرول. وهكذا فإن المحاليل الأربعة متماثلة باستثناء أن اللزوجة جرى تعديلها بتغيير الكميات النسبية للمذيبين المستخدمين. هذا، وتبين خريطة FLIM أن عمر الفلورة يتناقص من اليسار إلى اليمين متوافقاً مع تناقص اللزوجة من اليسار إلى اليمين عبر العينات ويمكن، بجودة موازية، تطبيق تقنية FLIM من أجل تصوير تركيز أيونات الكالسيوم أو من أجل تصوير التوزّع لجزيئات حيوية أخرى لها أهميتها.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

الشكل 3- معاينة حديثة للنسج



يمكن استخدام تقنية التصوير بعمر الفلورة FLIM لإعطاء معلومات بنيوية ووظيفية كتلك التي يتطلبها علم أمراض النسيج histopathology. (a) صورة مجهرية لمقطع نسيج مأخوذ من أذن فأر. تركز هذه الصورة الملوّنة على وريدين وشريان وغضروف.

(b) صورة لشدة الفلورة متحصل عليها من مقطع نسيج غير ملوّن مماثل مباشرة بعد إثارتها بضوء ليزري. من الممكن هنا أن تشاهد بوضوح بنية الوريدين والشريان فقط.

c) مُصوّر الـ FLIM الموافق لمقطع النسيج غير الملوّن، يبين الأنواع المختلفة للنسج الموجودة. يظهر الوريدان بلون أزرق (بحيث يتوافق ذلك مع أعمار أقصر) في حين يبدو الغضروف كخط أحمر يقع إلى اليسار من المركز.

(d) مُصوّر FLIM مكبّر لوريد يركز بوضوح على الجدار وبنية النسيج معطياً تبايناً لونياً بين الأنواع المختلفة للنسج دون حاجة إلى التلوين.

استخدم التقنية المنوّه بها في تصوير أيونات الكالسيوم من أجل دراسة نقل الإشارة بين الخلايا العصبية.

ورغم إدخال كثير من التحسينات على المجهرية الضوئية، يستمر هذا الحقل بالتطور سريعاً. لقد قامت مجموعة ستفان هِل S. Hell – العاملة لدى مؤسسة ماكس بلانك للكيمياء الفيزيائية الحيوية في مدينة غوتنغن بألمانيا – بتطوير نوع من المجاهر ثنائية الفوتون يعطي صورة مقطّعة متحدة البؤر في الزمن الحقيقي. كذلك، قامت مجموعة توني ويلسون T. Wilson – لدى جامعة أكسفورد في المملكة المتحدة – بتطوير مجهر كامل – الحقل ذي ضوء أبيض والذي يمتلك مقدرة التقطيع الخاصة بالمجهرية متحدة البؤر باستثناء السرعة والتكلفة الأكثر انخفاضاً والملازمة للمجاهر التقليدية.

وأفضل فصل يمكن الحصول عليه حالياً باستخدام مجهر متحد البؤر عند 543 نانومتر، هو حوالي 150 نانومتر باتجاه xy وحوالي 420 نانومتر باتجاه z. وللوصول إلى الفصل اللازم لسبر البنية داخل الخلايا، قام الباحث هل وزملاؤه بجمع مجهر ضوئي جديد مستعملاً لذلك عدستين جسميتين وعملية تصوير مطورة من أجل تحقيق فصل ضوئي أقل من 100 نانومتر. وفي الوقت الحالي، بدأت المجهرية الضوئية تقترب من الفصل الذي يمكن تحقيقه بالمجهرية المسبارية الماسحة.

التصوير عبر النسج

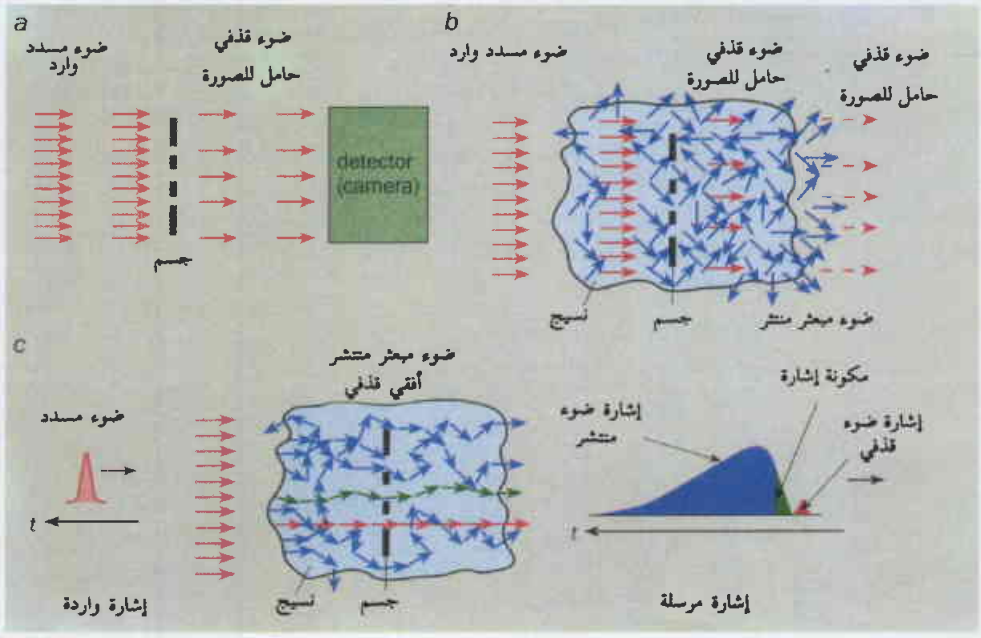
إن الطريقة المثلى التي يُعوّل عليها لكشف المرض هي النظر إلى التغيرات المميزة في عينات نسيجية تؤخذ من المريض أثناء عملية الاختزاع biopsy. لكن هناك طلباً متزايداً لإيجاد وسائط تشخيص طبية منخفضة التكلفة وقادرة على تصوير أجزاء من الجسم دون اللجوء إلى الجراحة. ويبدو أن "الاختزاع الضوئي" قد أصبح أداة واعدة من أجل تشخيص ورصد أمراض، كالسرطان مثلاً، لكن الحاجة تدعو إلى حل المشاكل المرتبطة بتبعثر الضوء. وهكذا، سوف تجد التقنيات الضوئية أول تطبيقاتها عند سطح النسج، إمّا خارج الجسم – كما هو الحال على سبيل المثال في الجلد والعينين والفم – أو داخله من خلال استعمال المنظار الداخلي endoscope. لكن التنظير الداخلي سيكون أشد فعّالية فيما لو أصبح إجراء التصوير تحت سطح النسج ممكناً.

وبالإمكان توضيح ظاهرتي امتصاص وتبعثر الضوء في نسيج حيوي من خلال توجيه ضوء مصباح الجيب نحو يد الشخص ، وفي هذه الحالة يمكن رؤية توهج محمر دون أن تكون هناك إمكانية لرؤية الخط الكفافي للعظام التي توجد في مسار الحزمة. هذا، ولايمكن رؤية العظام بسبب التبعثر المتعدد للضوء في النسيج. كما ويمكن فهم التوهج المحمر من سيماء الامتصاص من أجل أكثر المكونات شيوعاً في النسيج الحيوي. وتوجد قيمة دنيا للامتصاص في المجال تحت الأحمر القريب عند حوالي 830 نانومتر والتي تقوم تفضيلياً بنقل المكونات الحمراء للحزمة عوضاً عن الأطوال الموجية المرئية الأقصر طولاً. وغالباً ما توصف منطقة الطيف ذات النقل العالي نسبياً، الواقعة ما بين 650–1300 نانومتر، بأنها "النافذة الضوئية" للنسيج الحيوي. وفي الوقت الحالي، تستطيع ليزرات نصف ناقلة مع تقانة ليزر الجسم الصلب التي اكتشفت مؤخراً، أن توفر بسهولة ويسر أشعة ضوئية عالية القدرة وقابلة للتوليف في المجال تحت الأحمرالقريب، الأمر الذي أتاح للكثير من الباحثين معالجة التحدي الخاص بالتصوير عبر النسيج الخلوي.

وعند تصوير عينات نسيج رقيقة (بسماكة < 2 ملّيمتر) من الممكن استخدام فوتونات لم يسبق لها التبعثر والتي تعرف باسم "الفوتونات القذفية" وهي فوتونات يمكن استخدامها لتشكيل صور عالية الفصل. وعلى أية حال، تتناقص أسّيا أعداد الفوتونات القذفية مع مسافة الانتشار. وهكذا، فإن الإشارة القذفية تكون في الأحوال العادية مُغرقة بالفوتونات المتبعثرة تضاعفياً، والتي تعمل بدورها على تعتيم أي صورة كما تعمل على إشباع معظم أنواع المكاشيف (الشكل 4). ومن أجل أعماق للنسيج

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

الشكل 4- تصوير أجسام في أوساط مبعثرة



(a) عند غياب النسيج الحيوي تتشكل على المكشاف صورة واضحة للجسم، (b) لكن النسيج الحيوي الكثيف يُبعثر الفوتونات الواردة مما يؤدي إلى غباشة الصورة الناتجة. وتتناقص أسّياً شدة الضوء الذي لايتبعثر، والذي يعرف باسم الضوء القذفي (المبين بالأحمر) كلما زادت ثخانة العينة النسيجية. وفي الأحوال العادية، تصبح الإشارة مغرقة بالضوء المنتشر (المبين بالأزرق).
(c) يمكن تصوير العينات النسيجية ذات الثخانة المتوسطة (لغاية ~ 2 مليمتر) بفصل عالٍ (بضعة مكرونات) وذلك عن طريق إجراء قياس دقيق لزمن وصول الضوء النافذ عند المكشاف وباستخدام الضوء القذفي (غير المنتشر) الواصل أولاً عند المكشاف (المبين بالأحمر). وبعد انقضاء حوالي 50 بيكوثانية يصل ضوء الأفعى - الذي تبعثر قليلاً فقط عن مساره الأصلي (المبين بالأخضر)— إلى المكشاف حيث يمكن استخدامه لتشكيل صور عبر عينات نسيجية أعظم ثخانة (< 2 سنتيمتر)، ولو أن الفصل يتدهور في هذه الحالة إلى حوالي 0.5 ملّيمتر. أمّاالضوء المنتشر (المبيّن بالأزرق) الذي يصل لاحقاً بعد زمن أقصاه بضعة نانو ثانية فسوف ينتشر عشوائياً وينقل معلومات قليلة جداً حول الصورة.

ضحلة نسبياً، تستخدم أنواع مختلفة من تقنيات الترشيح لحجب الفوتونات المتبعثرة تضاعفياً. وفي الواقع، يهدف الكثير من البحوث الحالية إلى توسيع نطاق التصوير والاختراق الضوئيين لتشمل أعماقاً تصل إلى بضعة مليمترات وذلك باستخدام تقنيات الترشيح المنوه بها. وعلى سبيل المثال، ترفض المجهرية متحدة البؤر كثيراً من الضوء المتبعثر من خلال ترشيحها المكاني، ولهذا فإنها تستطيع تشكيل صور مفيدة لأعماق في النسيج تصل إلى 0.3 - 0.5 ملّيمتر.

لكنه، يبدو غير عملي استخدام المجهرية الضوئية مع الترشيح المكاني فقط من أجل تصوير أعماق في النسيج تزيد على 0.5 مليمتر. لهذا جرى تطوير تقنيات أكثر تعقيداً لتسهيل الكشف عن الفوتونات القذفية. وتعمد مثل هذه التقنيات إما إلى استثمار حقيقة أن فوتونات الإشارة القذفية تحتفظ بترابطها مع الضوء الوارد، أو أن الفوتونات القذفية تصل عند المكشاف في وقت أبكر من ذلك الخاص بأي من الفوتونات المنتشرة التي تبعثرت عائدة إلى مسارها الأصلي.

وتمكّن جيمز فوجيموتو J. Fujimoto وزملاؤه - العاملون لدى معهد ماسشوستس للتقانة (MIT) في الولايات المتحدة الأمريكية - من أن يطوّروا بنجاح تقنية التصوير بالضوء القذفي والتي تُعرف باسم "التصوير المقطعي الضوئي الترابطي optical coherence tomography (OCT)" والتي تجمع بين المجهرية متحدة البؤر والاستكشاف المغاير heterodyne detection وذلك باستخدام الضوء ذي الترابط المنخفض (الشكل 5). وفي هذه التقنية تجمع إشارة الضوء القذفي الضعيف المنعكسة من الطبقات المختلفة ضمن النسيج مع حزمة مترابطة مرجعية قوية، ومن ثم يجري كشف التداخل الناتج، أو الإشارة النبضية، بحساسية عالية باستخدام مضخّم ضمني. ويعني استخدام أشعة ذات طول الترابط المنخفض أن التداخل سيحدث فقط عندما تقطع الإشارة المرجعية والإشارة الضوئية القذفية المسافة الضوئية نفسها (ضمن طول الترابط). ومن خلال تعديل طول مسار الحزمة المرجعية، يستطيع المرء أن يكشف، عندئذ، الإشارة القذفية الصادرة من أعماق محددة داخل العينة، وبالتالي بناء صورة ذات ميز واضح في العمق. وقد ثبت بأن التقنية هذه مفيدة من الناحية السريرية حيث تمكن إحراز صور ذات ميز واضح في العمق داخل العين. وفي الوقت الراهن، يعمل العديد من المجموعات البحثية على تطوير التقنية للتصوير في أنسجة حيوية مبعثرة للضوء بشدة.

ورغم أن زمن استحواذ الصورة بطيء نسبياً(بسبب ضرورة المسح عنصورة فعنصورة) إلا أن استخدام ليزرات فائقة السرعة قادرة على توفير أشعة منخفضة الترابط وذات معدل قدرة عالية سيتيح لمنظومات الـ OCT أن تعطي صوراً ذات ميز واضح في العمق في الزمن الحقيقي. ويمكن استخدام هذه التقنية مقترنة مع المنظار المفصلي arthroscope - ونوع من المناظير الداخلية التي صممت خصيصاً من أجل فحص المفاصل. وقد ساهم مارك بريزنسكي M.Brezinski- من كلية طب جامعة هارفرد في الولايات المتحدة الأمريكية - مع مجموعة فوجيموتو البحثية في العمل من أجل تطبيق تقنية الـ OCT لكشف التغيرات الحاصلة في توجه النسيج المحيط بالمفاصل والتي تنبىء بالإصابة بحالة التهاب المفصل العظمي (الفُصال العظمي) osteoarthritis.

التصوير العميق

تستطيع التقنيات التي تعتمد استكشاف الضوء القذفي تصوير النسج لأعماق تصل إلى بضعة ملّيمترات فقط. ولكن كيف نتمكن من التصوير عبر العديد من السنتيمترات في النسيج عندما تكون الإشارة الضوئية

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

القذفية غير قابلة للكشف؟ وهل نستطيع استخلاص معلومات مفيدة من الفوتونات المتبعثرة تضاعفياً؟

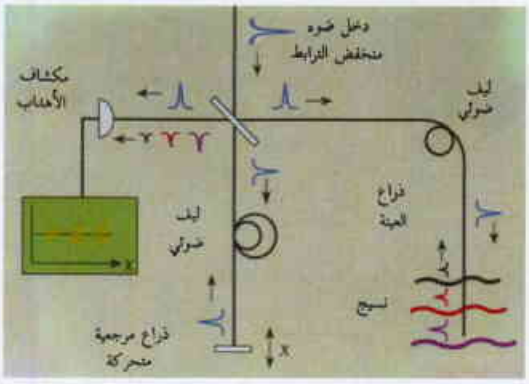
بالنسبة لأعماق متوسطة في النسيج، يمكن استثمار الحقيقة بأن النسيج الحيوي يميل نحو بعثرة الضوء في الاتجاه الأمامي، بمعنى أن معظم الفوتونات ستنحرف قليلاً فقط عن اتجاهها الأصلي. وبعد بضعة سنتيمترات داخل النسيج سيتبع عدد كبير من الفوتونات مساراً جيد التحديد نوعاً ما "أشبه بالأفعى" وذلك في محيط الاتجاه الأصلي عبر النسيج (الشكل 4 c). لذلك، سوف يتضمن الضوء النافذ ثلاثة مكونات هي: الفوتونات القذفية، والفوتونات ذات مسار الأفعى، والفوتونات المنتشرة. وسيصل "ضوء الأفعى" إلى المكشاف بعد الضوء القذفي ولكن قبل الفوتونات تامة الانتشار، ومع ذلك يظل محافظاً على شيء من الترابط مع الضوء الوارد. والصور المتشكلة باستخدام ضوء الأفعى ذي التبعثر الأقل، تتمتع بفصل أضعف مقارنة بصور الضوء القذفي، ومع ذلك تظل هناك إمكانية الحصول على فصل مكاني أدنى من المليمتر. وقد استثمر هوميو إينابا H. Inaba من معهد طوكيو للتقانة في اليابان - التقنية السابقة للتصوير عبر عينات نسيج حيوي أكثر سماكة، كالأصابع والأسنان البشرية. كذلك، تمكّن فريق روبرت ألفانو R. Alfano - من جامعة مدينة نيويورك - من وصف وشرح طريقة مطوّرة للتصوير باستخدام الاستقطاب بهدف انتقاء تفضيلي لضوء الأفعى.

وهناك اتجاه آخر يلجأ فيه إلى تقسيم الضوء الواصل عند المكشاف إلى نوافذ زمنية باستخدام ليزرات فائقة السرعة مع عدد منوع من آلات التصوير عالية السرعة أو منظومات عدّ الفوتونات تستطيع منح بوابات زمنية من رتبة البيكوثانية يتراوح مداها ما بين 1 - 100 بيكوثانية. وهذا يتيح بدوره انتقاء الضوء الأبكر وصولاً والأقل تبعثراً وبالتالي إعطاء معلومات حول بنى النسيج التي سببت توزيع الضوء المبعثر.

مشكلة عكسية تتيح التصوير لمسافات أعمق

بالنسبة للعديد من التطبيقات الطبية الحيوية الهامة، كتصوير الثدي أوالتصوير الوظيفي للدماغ، هناك حاجة لاختراق عدة سنتيمترات من النسيج يكون بعدها كامل الإشارة الملتقطة تقريباً منتشراً، وإشارة الضوء القذفي مهملة. لكن يمكن التغلب على هذه الناحية بمعالجة "المشكلة العكسية" التي تستلزم قياس إشارةالضوءالمبعثر، بشكل تام قدر المستطاع، ومن ثم حساب توزيع المادة التي أحدثت هذه الإشارة المقيسة. تستثمر

الشكل 5- تصوير مقطعي بالترابط الضوئي



التصوير المقطعي بالترابط الضوئي تقنية لكشف إشارة الضوء القذفي عند أعماق مختلفة داخل العيّنة النسيجية. فتُقسّم نبضة الضوء الليزري للدخل عند مجزء حزمة ثم يجري توجيه المكونة المنعكسة فوق العيّنة النسيجية عبر ليف ضوئي. وتعكس الطبقات المختلفة ضمن العينة النسيجية الضوء إلى الخلف عائداً إلى الليف ثم إلى مجزء الحزمة. وهنا، سيتداخل الضوء القذفي مع الضوء الذي انعكس من مرآة عند نهاية الذراع المرجعية القابلة للتعديل، لكن هذا سيحدث فقط إذا قطعت الإشارتان الضوئيتان المسافة الضوئية نفسها. وبتعديل طول الذراع المرجعية، يصبح بالإمكان، عندئذ، كشف إشارة الضوء القذفي الصادر عن أعماق محددة ضمن العيّنة، وبهذا تتشكل صورة ثلاثية الأبعاد.

الحسابات المذكورة نماذج إحصائية خاصة بنقل الفوتونات ويمكن أن تكون ذات درجات مختلفة من الدقة.

ومن خلال الأخذ بالاعتبار للمسارات الأكثر احتمالاً التي تسلكها الفوتونات من منبع محدد إلى مكشاف، يستطيع المرء أن يسبر حجماً من النسيج وأن يقدر كمياً التغيرات في الخواص الضوئية ضمن هذا الحجم. وبشكل عام، سيكون هناك حد أدنى من الرية في تحديد مسارات الفوتونات التي جرى كشفها مبكراً، وبالتالي يمكن أن نحدد بشكل أدق مواصفات الحجم الذي سارت عبره هذه الفوتونات. وتقدم هذه الطريقة وسيلة لإجراء تقدير كمي لوسطي الخواص الضوئية للنسيج الحيوي ولتشكيل صور مقطعية ذات فصل منخفض نسبياً.

وغالباً ماتستخدم الألياف الضوئية كوسيلة ملائمة لنقل الضوء من منبع ليزري إلى رقعة النسيج موضع الفحص والاختبار، كما تستخدم أيضاً لجمع الضوء المبعثر (الشكل 6a). ويمكن قياس زمن وصول الفوتونات المبعثرة في نوافذ زمنية مختلفة إما باستعمال مكاشيف عالية السرعة بالاقتران مع منابع ليزرية فائقة السرعة (طريقة المجال الزمني the time-domain approach) أو من تأخر طور الضوء المُجمّع المتعلق بحزمة واردة معدّلة جيبياً (مجال التواتر) (the frequency domain). و تتساوى الطريقتان من الناحية النظرية، أما من الناحية العملية فإن لطريقة المجال الزمني فصلاً أفضل عند مقارنتها بطريقة مجال التواتر التي تستخدم أجهزة أكثر تعقيداً وأعظم تكلفة.

استطاع دافيد دلبي D.Delpy وزملاؤه، العاملون لدى الكلية الجامعية University College في لندن، أن يطوّروا آلة سريرية تستخدم طريقة مجال التواتر لقياس درجة أكسجة الدم في أدمغة الأطفال الخدّج. وتتضمن هذه الآلة مكشافاً مفرداً ومنبعاً ليزرياً قابلاً للتوليف من أجل تقدير متوسط زمن طيران الفوتونات مابين المنبع والمكشاف، وبالتالي تقدير طول المسار الضوئي المتوسط. ومن قياسات سعة الإشارة الملتقطة يمكن إجراء تقدير كمي للتغيرات الحاصلة في امتصاص الضوء. ويستطيع المرء الحصول على بيانات طبية مفيدة إذا ما أعيد إجراء هذا القياس بعدد من الأطوال الموجيّة المختلفة.

وبإجراء مسح المنبع والمكشاف عبر العينة يمكن، من حيث المبدأ، بناء صورة ثلاثية البعد، لكن ذلك سيكون بطيئاً للغاية ومحبطاً. واستخدام صفيف من منابع ومكاشيف متزامنة يُعدّ طريقة بديلة أكثر تعقيداً لاكتساب أعظم قدر ممكن من المعلومات حول الضوء المبعثر (الشكل 6 b).

في الوقت الراهن، تستغرق عملية المعالجة الحاسوبية اللازمةلإجراء حسابات التبعثر العكسي المتكررة الخاصة بالتصوير ثلاثي البعد عِدّة

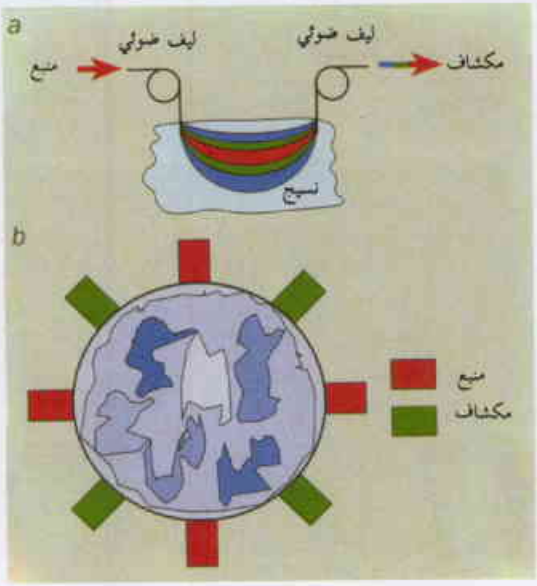
http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

ساعات، كما أن فصل التصوير الممكن تحقيقه في مجال تصوير الثدي سيكون من مرتبة 0.5 – 1 سنتيمتر، وهذا يُعدّ، إلى حد ما، إنجازاً ضعيفاً عند مقارنته بطرائق تصوير أخرى كطريقة التصوير بالتجاوب المغنطيسي (MRI). ومهما يكن من أمر، تزداد من شهر لآخر مقدرة المعالجات الحاسوبية، وسوف يتحسن الفصل مع التطور الحاصل في عملية اكتساب البيانات وفي الخوارزميات الخاصة بإعادة بناء الصور الضوئية.

ولعلّ آخر ماوصل إليه الوضع الفني في مجال تصوير الأنسجة الثخينة يتجسدفي آلة قام بتطويرها جرمي هبدن J. Hebden وزملاؤه – العاملون لدى الكلية الجامعية في لندن – وهي آلة تميزت على المكشاف متعدد الأقنية (32 قناة) المبوّب زمنياً، بفصل قدره 50 بيكوثانية إضافة إلى 32 منبعاً مستمداً من ليزر قابل للتوليف فائق السرعة. ولهذه الآلة قدرة القيام بتوصيف سريع لإشارة الضوء المبعثر وبدقة لم يسبق لها مثيل، كما تعطي بعض الدلالة على ما يمكن تحقيقه في العقد القادم.

ورغم أنه غير متوقع أن يتحسن الفصل المكاني إلى أبعد من ~ 0.5 مليمتر بالنسبة لتصوير الثدي أو الدماغ، إلا أن هذا لايُعدّ أمراً بالغ الأهمية حيث أن الدقة والسرعة هما المعياران الحاسمان في هذا المجال. وفي الأحوال العادية، يكون هدف التصوير الضوئي للأنسجة الثخينة هو الحصول على معلومات طيفية تؤدي إلى كشف وجود نوع محدد من النسج، كالورم مثلاً، وليس إعطاء خريطة تفصيلية لبنية النسيج. والأفضل أن يترك أمر معالجة الناحية الأخيرة لتقانة التصوير بالتجاوب المغنطيسي (MRI) وأن يقتصر استخدام التقنيات الضوئية على إعطاء معلومات تكميلية – كرصد التغيرات أو كشف الشذوذات التي تطرأ على خواص النسج. ومن الممكن تصور استخدام تقانة MRI المكلفة من أجل توفير خارطة أولية عالية الفصل للتوزع النسيجي ومن ثم تطبيق هذه المعلومات لتسهيل إعادة البناء الحسابي للصورة الضوئية. ويمكن، بعد ذلك، لآلة تصوير ضوئية منخفضة التكلفة أن تترك في موضعها على المريض لرصد تغيرات قد تحصل في المعايير الحرجة، أو لتسهيل دفع عجلة التطور في مجالي التشخيص والبحث العلمي.

الشكل 6- تصوير النسيج العميق



(a) تُستخدم بصريات الألياف بالترافق مع الليزرات فائقة السرعة ومع الفيزياء الإحصائية من أجل بناء صورة عبر عدة سنتيمترات داخل النسيج. هذا، وبحسب المسار الأكثر احتمالاً الذي ستسلكه الفوتونات من زمن وصول الضوء إلى المكشاف. وعبر أنسجة ثخينة (< 5 سنتيمترات)، يتطلب الأمر إجراء حسابات تبعثر عكسية لإعادة بناء صور لايتعدى فصلها سنتمتراً واحداً. (b) يعد استخدام عدة منابع ومكاشيف متوضعة حول العيّنة طريقة تصوير مقطعي أعقد وأرقى.

ويمكن للتصوير الوظيفي أن يوفر بشكل جيد القدرة على كشف الشذوذات النسيجية التي تكون أصغر من الحد الأقصى للفصل، ولهذا فإنه سيشكل أداة هامة للحماية من المرض أو لتشخيص مضاعفات قد تعقب الإصابة. وعلى أية حال، يعد التصوير في الزمن الحقيقي لنشاط الدماغ أعظم التوقعات إثارة لما يمكن الحصول عليه من تقانة تصوير الأنسجة الثخينة.

الخاتمة

إن التقدم المستمر في معالجة المعلومات وفي الإلكترونيات الضوئية سيجعل التقانة أقل تكلفة وأعظم فعّالية الأمر الذي سيؤدي بدوره لأن يتنامى أسياً التقدم في قطاع الطب الحيوي. ويبدو أن التحسينات التي شوهدت في القرن العشرين كانت متوقعة وتزايدية المنحى عند مقارنتها بالتحسينات التي سوف تتحقق خلال القرن المقبل.

وسوف تقود التحسينات التي طرأت على المجهرية إلى تحقيق اختراقات واكتشافات متوالية في حقلي الأحياء المجهرية والهندسة الوراثية. كما ستتيح التقنيات الضوئية الحديثة إجراء ما يسمى "بالاختزاع الضوئي" دون الحاجة إلى الجراحة، وسوف يؤدي هذا بدوره إلى زيادة الموثوقية في برنامج التشخيص وأساليب العلاج. كذلك سيؤدي الفهم الواعي والعميق للمرض وتأثيراته في النسيج إلى تطوير أساليب جديدة في المداواة والجراحة يمكن توليفها مع الاحتياجات المحددة للمريض. وفي الختام، يمكن القول بأن تصوير الأنسجة الثخينة سيقود إلى رؤىً مثيرة تنفذ إلى أعماق آليات عمل الأعضاء وبشكل خاص، سيكون تصوير النشاط الدماغي أمراً ممتعاً وساحراً، ولربما يغدو ممكناً حتى مراقبة الناس وهم يفكّرون.. ودعنا نأمل بأن يكون هنالك شيء يستحق التفكير به.■

☆ ★ ☆

نبضات ليزرية تضغط المادة*

تمثيل أعماق الكواكب في المختبر

م. كوينغ، أ. ينوزّي - مونيكس
مدرسة البوليتكنيك - باليزو - فرنسا
د. باتاني
جامعة ميلانو - بيكوكا - ايطاليا

ملخص

لا يمكن أن تُقارَن درجة الحرارة والضغط اللذان يسودان داخل الكواكب العملاقة، مثل زحل، بما نعرفه على الأرض، وتمتلك العناصر المكوّنة لهذه الكواكب خواص غير عادية. وهكذا يُعتقد بأن الهدروجين والماء هما في "الحالة المعدنية". وللتأكد من ذلك، يولّد الفيزيائيون ضغوطاً هائلة في المختبر بالتسديد على الأهداف بليزرات قوية جداً.

الكلمات المفتاحية: الحالة المعدنية للمواد، موجة الصدم، ليزرات عالية الاستطاعة، الاندماج بالحصر العطالي، معادلات Hugoniot-Rankine.

منذ حوالي عشر سنوات كشف المسبار الفضائي Voyager 2 وجود حقول مغنطيسية شديدة في جوار الكواكب العملاقة، مما يوحي أنها تحتوي على مواد ناقلة للكهرباء. وبما أن الهدروجين والماء من المكوّنات الأساسية لهذه الكواكب، فإن الفيزيائيين يتساءلون: هل سيكون الماء والهدروجين في حالة معدنية، ضمن شروط الضغط و درجة الحرارة الكبيرين اللذين يسودان داخل الكواكب (حتى 50 مليون ضغط جوي و بضعة آلاف درجة كلفن)؟ يتوق النظريون للاتفاق على الإجابة، ويرحبون بالتجارب للجزم بين مختلف الاقتراحات.

كيف نقارب في المختبر مثل هذه الحالة للمادة ضمن ضغوط مماثلة في الشدة؟ حتى عام 1950، كانت فيزياء الضغوط العالية مقتصرة على استخدام الطرائق الساكنة: تولّد المكابس المزوّدة بمطارق ماسية [1] ضغوطاً تصل إلى 1 ميغابار (مليون مرة الضغط الجوي) وهذه الضغوط لا تلائم تماماً العديد من المسائل التي كشفت في محيطنا الفلكي. وقد تم الحصول على ضغوط أكبر بكثير باستخدام الطرائق "الدينامية" التي تعتمد على توليد موجة صدم** تنتشر عبر المادة. وفي هذه الطريقة، تُسرّع "مدافع الغاز" قذيفة صلبة إلى سرعات تبلغ عدة كيلومترات في الثانية وتقذفها نحو المادة المدروسة. حتى عام 1970 كانت الانفجارات النووية هي الوحيدة التي سمحت بالوصول إلى ضغوط تتجاوز 10 ميغابار، ولكن الولوج المحدود إلى هذه النتائج وعدم إمكانية استخدام هذه الطريقة في المخابر لم يجعلا منها أداة ملائمة للعلماء.

تُولّد في المختبر اليوم، وبفضل الليزرات عالية الاستطاعة، ضغوطٌ مشابهة لتلك الناتجة من الانفجارات النووية. عندما تُبأر حزمة ليزرية شديدة على هدف موضوع في حجرة خلاء، سرعان ما تتبخر المادة على شكل بلازما حارة بدرجة حرارة بضع عشرات ملايين كلفن وتنفلت في الخلاء. وكما أن الغاز الذي تنفثه أنابيب الصواريخ يدفعها إلى الأعلى، فإن البلازما المتمددة تدفع مادة الهدف التي لم تتبخر بعد لداخل هذا الهدف. هذا الدفع السريع والعنيف يولّد موجة صدم داخل الهدف. منذ حوالي عشر سنوات، بينت مجموعتا بحث R. Fabbro في مختبر استخدام الليزرات الشديدة LULI و J. P. Romain في المدرسة الوطنية العليا للميكانيك المتقدم ENSMA في بواتييه [2]، أنه يمكن إنتاج ضغوط أعلى من 100 ميغابار بهذه الطريقة.

إضافة إلى التطبيقات المكرّسة لخدمة العلوم الأساسية وفيزياء الفلك، فإن هذه الأدوات وما تؤمّنه من قياسات ضرورية لتقدم الأبحاث حول الاندماج بالحصر العطالي*** . وفي هذا المضمار، تُخصّص جهود كبيرة حالياً لتصوّر وتصميم الأهداف التي يتم تسليط أشعة الليزر عليها: ومن أجل ذلك يجب أن نعرف بدقة عالية، سلوك المادة المكونة لهذه الأهداف عند ضغوط عالية تتجاوز 1 ميغابار. وستكون الليزرات الضخمة المستخدمة في برامج محاكاة التجارب النووية، مثل ليزر الميغاجول mégajoule في بوردو وليزر National Ignition Facility في ليفرمور بكاليفورنيا، أدواتٍ هائلة تتيح الحصول على ضغوط أعلى (تُذكر الآن

---

* نشر هذا المقال في مجلة *La Recherche*, 330, April 2000. ترجمة الدكتور محمد بهاء الصوص-قسم الفيزياء-هيئة الطاقة الذرّية السورية.

** موجة الصدم هي عدم الاستمرارية في الضغط ودرجة الحرارة والكثافة في الوسط.

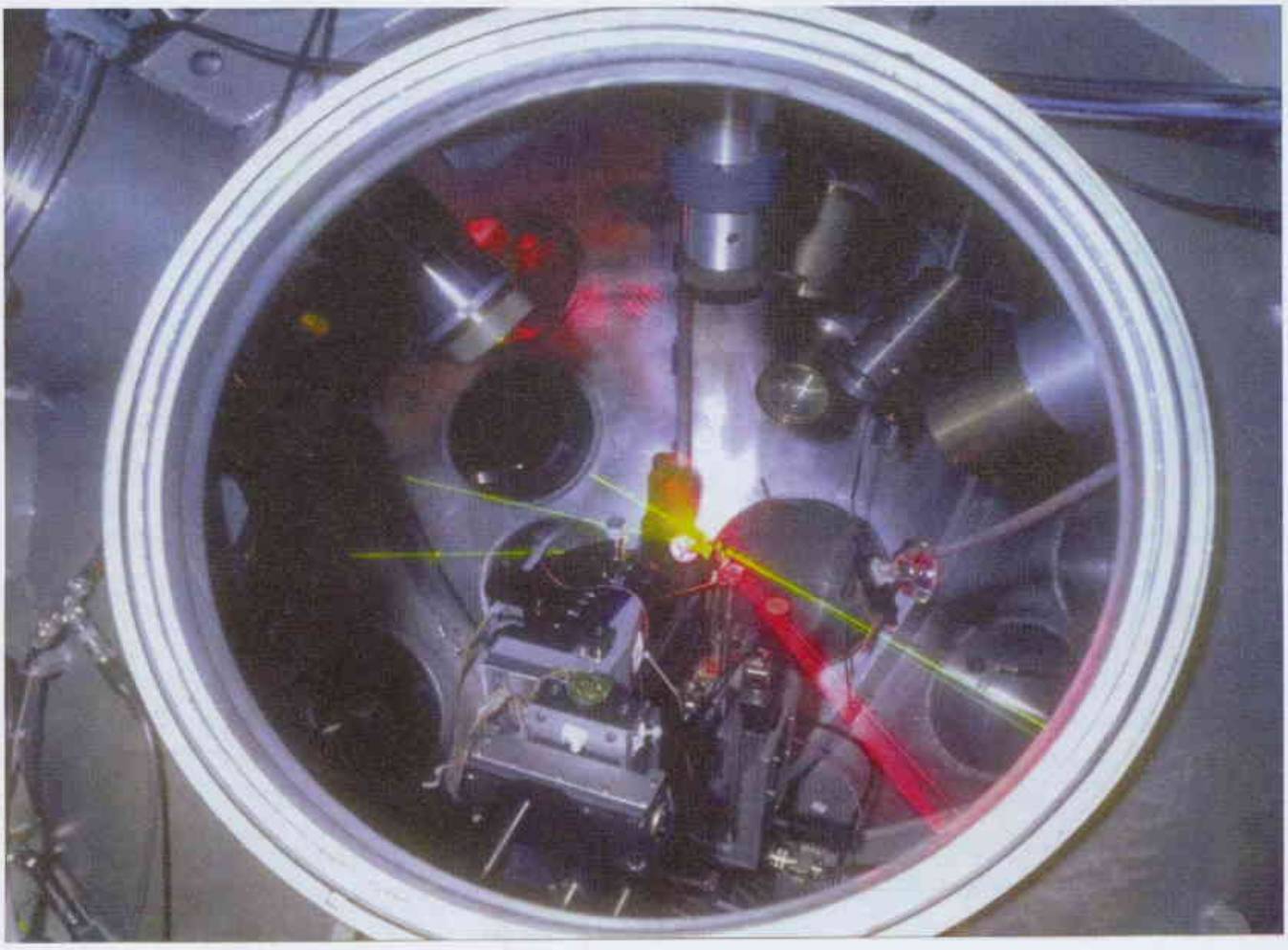
*** يتضمن مشروع الاندماج بالحصر العطالي في جعل خليط من الدوتريوم والتريتيوم ينبجر (ينفجر نحو الداخل) بعنف بتأثير أشعة الليزر، فتحتّ تأثير عطالته الذاتية تبلغ كثافة المزيج ودرجة حرارته القيم المطلوبة لإقلاع التفاعلات الاندماجية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

ضغوط تبلغ حوالي ألف ميغابار). إذاً نحن نعرف كيف نصنع في المختبر، و ضمن فترة زمنية وجيزة، "قطعاً صغيرة من الكواكب" بهدف دراسة خواصّها الترموديناميكية وتحديد معادلة الحالة "state equation" التي تحكمها، أي معرفة العلاقة التي تربط الكثافة والضغط والطاقة الداخلية. إن هذه العلاقة بسيطة من أجل الغاز المثالي، حيث لا يوجد تأثير متبادل بين جسيماته: فالضغط يتناسب طرداً مع جداء درجة الحرارة والكثافة. أما في حالتنا حيث المادة كثيفة جداً، فلا توجد علاقة صريحة من هذا النمط.

وهذه هي العلاقة التي نحاول إيجادها تجريبياً: ففي كل مرة نقذف الهدف بالليزر ونجري قياساً،فإننا نحدد نقطة من هذه العلاقة. ولكننا لا نعرف كيف نقيس بشكل مباشر ضغط وكثافة ودرجة حرارة المادة المضغوطة بالصدمة: نحن نحسب هذه المقادير عن طريق سرعة جبهة الصدم وسرعة الجسيمات خلف الجبهة باستخدام قوانين انحفاظ الكتلة والاندفاع والطاقة. ويجدر بالذكر أن المعادلات التي نستخدمها لإجراء هذه الحسابات (انظر المؤطر علاقات Hugoniot-Rankine) غير قابلة للتطبيق إلا إذا تحققت ثلاثة معايير ضرورية: يجب أن تكون جبهة الصدم مستوية، ويجب ألا تتغير المقادير الفيزيائية التي توصّف الصدم أثناء عملية القياس، ويجب أخيراً أن تبقى حالة المادة مقابل موجة الصدم معروفة بشكل تام.

يتحقق المعيار الأول عندما يُنار الهدف بشكل منتظم. وعلى العكس، إذا أبدى الليزر عالي الاستطاعة شذّات زائدة، فإن الضغط سيكون أكبر محلياً، وستنتشر الصدمة بسرعة أكبر، مما يعني أن موجة الصدم غير مستوية. إن عدم انتظام الإنارة كان من أهم المشكلات الأساسية التي توجّب حلها خلال هذا البحث. وفي إطار الاندماج بالحصر العطالي، وبالتوازي مع طريقة "الهجوم المباشر" حيث تُبأّر حزمة الليزر مباشرة على الهدف، تم وضع طريقةٍ "للهجوم غير المباشر" [3]. يُنار بالليزر داخل تجويفٍ قطره حوالي 1 مم ومصنوع من مادة ثقيلة (من الذهب غالباً) فتُصدر هذه المادة أشعة X قوية. تنعكس هذه الأشعة على الحواف الداخلية للتجويف فينتج هذا الأخير وبشكل سريع أشعة متجانسة تدعى "أشعة الجسم الأسود" الذي توافق طاقته عدة ملايين درجة كلفن. وهذه الأشعة هي التي تتأثر مع الهدف وتؤدي إلى انضغاطه. إن الهجوم غير المباشر هو، من حيث المبدأ، طريقة مفضّلة من أجل إنارة الهدف بشكل منتظم. ولكن استخدام التجويف كوسيط يترافق مع فَقْد كبير في الطاقة، بين ما يؤمّنه الليزر في الأصل وبين ما يمتصّه الهدف فعلاً. وبسبب هذا



الشكل 1– يُضغط هدف، موضوع في حجرة خلاء مختبر LULI (بقطر 1.5 م)، بصدمه بالليزر (الحزمة الخضراء من جهة اليسار). تُقاس سرعة الصدمة عبر الهدف بكشف الضوء الصادر عندما ينفذ من الجهة الأخرى للهدف (يُمثّل الضوء الذي تُصدره المادة الساخنة بحزمة خضراء من جهة اليمين).

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

المردود الضعيف فقد حبّذنا في LULI الطريق المباشر (الشكل 1). في هذه الحالة، يبدي توزع الشدة الليزرية على الهدف شِدّات زائدة دوماً ناتجة من التداخلات بين الأجزاء المختلفة للحزمة ذاتها. وتحصل هذه التداخلات بسبب الطبيعة الترابطية لضوء الليزر.

في بداية الثمانينيات، توصّل باحثون يابانيون يعملون في إطار تجارب الاندماج بالحصر العطالي، ومن أجل أهداف كروية، إلى وضع طرائق "التنعيم الضوئي" بكسر ترابط الليزرات وإبعاد خطر حصول التداخلات. [ولكن، في بداية التسعينيات تمكّن تعاون بين LULI وبين جامعة ميلانو ومختبر Rutherford Appleton (RAL) في شيلتون قرب أكسفورد، من وضع طريقة مناسبة تماماً للحصول على إسقاط منتظم لأشعة الليزر على الهدف، وبالتالي توليد صدمات مستوية [4]]. نضع أمام العدسة التي تبؤرّ حزمة الليزر على الهدف، صفيحة مكونة من رصف لعدسات صغيرة من نوع فرينيل تولد فروقاً في الطور بين أجزاء الحزمة المختلفة بجعلها تقطع أطوالاً ضوئية مختلفة.

ويكون المعيار الثاني، أي عدم تغير المقادير الفيزيائية الموصّفة للصدمة أثناء القياس، محققاً عندما نختار ثخانات الأهداف بشكل مناسب.

من أجل طاقة ليزر ومدة نبضة معينتين، يجب ألا تكون الأهداف ثخينة لتجنب تخامد الصدمة وألا تكون رقيقة جداً كي تأخذ الصدمة الوقت الكافي لتشكلها. استخدمنا في التجارب المُجراة في LULI على أهداف معدنية، أهدافاً بثخن 15 إلى 20 مكرومتر. وحددت هذه القيم بمساعدة المحاكاة الهدروديناميّة التي تكرر انضغاط المادة وتوليد الصدمة ضمن شروطنا التجريبية.

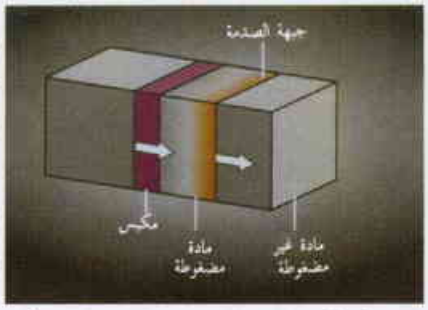
في المقابل، فإن المعيار الأخير الذي يفرض أن حالة المادة مقابل الصدمة معروفة تماماً، هو أصعب للتحقيق. تكون البلازما المتولّدة عند سطح الهدف حارّة جداً وتصدر أشعة X عالية الطاقة (عند أطوال موجية أصغر من 1 نانومتر). يغادر نصف هذه الإشعاعات خارج الهدف، ويتجه النصف الآخر داخل الهدف. هذه الأشعة التي تنتشر داخل الهدف بسرعة الضوء، أي أسرع من موجة الصدم، تُمتص جزئياً محدثةً ارتفاعاً في درجة الحرارة قد يكون كبيراً جداً (من مرتبة عشرة آلاف كلفن)، ويمكن لهذا الارتفاع أن يغير حينئذ حالة المادة قبل أن تبلغها الصدمة. بما أن شدة أشعة X الصادرة عن مادة مسخّنة تنخفض بانخفاض كتلة العناصر الكيميائية المكوّنة لها، فقد تم تغطية الهدف من جهة ورود أشعة الليزر بطبقة من البلاستيك المكوّن من عناصر خفيفة (كربون وهدروجين) وهذا البلاستيك هو الذي يتبخر بالليزر. لقد قمنا بوضع طريقة للتقدير النوعي لدرجة حرارة التحمية الأولية وقمنا باختبارها على مواد مختلفة [5]. واخترنا بهذه الطريقة المادة التي تبقي درجة حرارة التحمية الأولية أقل من درجة حرارة انصهار المواد التي نود دراستها.

عندما تتحقق معايير الانتظام والثبات والاستقرار في الوسط البدئي، يمكن طرح إمكانية القياس الدقيق لسرعة الصدمة مما يقود إلى تحديد معادلة الحالة للمادة المضغوطة. ولكن العقبة الأخيرة التي يجب تجاوزها هي عقبة تقنية: كيف نجري قياسات موثوقة بدقة فصلٍ مكاني وزماني جيدة؟ إن الليزرات التي نمتلكها لا تقدم استطاعات عالية إلا لكونها تعمل في النمط النبضي: أي أنها لا تزودنا بالطاقة إلا خلال فترة زمنية وجيزة (10^{-9} ثانية تقريباً). ونضيف أنه للوصول إلى أعلى الضغوط الممكنة فإن حزمة الليزر تُبأّر على سطح صغير (بضع مئات من المكرومترات المربعة عادة).

عندما نضغط مادة صلبة، فإننا نستخدم هدفاً مكوناً من قاعدة نوضّع على جزء منها طبقة من المادة المراد دراستها (على شكل درجة أو عتبة) بثخن معروف بدقة. عندما تخترق الصدمة هدفاً وتنفذ خلفه فإنها تكون مصحوبةً بومضة ضوئية شديدة تنتج من الارتفاع المفاجئ في درجة الحرارة بسبب الصدمة. بمساعدة كاشف ضوئي ذي دقة فصلٍ مكاني وزماني عالية، نقوم بتسجيل الومضتين الموافقتين لعبوري الصدمة للقاعدة وللعتبة: يبيّن الانزياح الزمني بين الومضتين المدة التي تستغرقها الصدمة لعبور العتبة وبالتالي سرعتها داخل المادة. بشكل أصح، نقيس سرعة الصدمة في مادتين بآن واحد: المادة المراد دراستها ومادة مرجعية نعرف

علاقات هوغونيو-رانكين

في مائع مضغوط بمكبس يتحرك بالسرعة الثابتة U، تتشكل موجة صدم وتنتشر بالسرعة D. تكون المادة خلف جبهة الصدمة مضغوطة وتتميّز



بالكثافة ρ_1 والضغط p_1 وسرعة المائع U. ومن مبادىء انحفاظ الكتلة والاندفاع والطاقة نستنتج علاقات هوغونيو-رانكين الثلاث التي تربط مختلف المقادير قبل وبعد الصدم، دون أن ندخل أية فرضية حول الحالة الترموديناميّة للوسط المعتبر.

وفي الواقع إن الضغط والكثافة والطاقة الداخلية غير مستقلة عن بعضها: فهي ترتبط بمعادلة الحالة للوسط. فإذا كانت هذه المعادلة معروفة، يكون لدينا جملة أربع معادلات بخمسة مجاهيل. ويلزم قياس وسيط واحد لمعرفة الوسطاء الأخرى. وعلى العكس إذا أردنا تحديد معادلة الحالة بصورة مطلقة ينبغي قياس اثنين من هذه المقادير تجريبياً، لأن عدد المعادلات اختزل إلى ثلاث معادلات. يمكن أيضاً تحقيق قياس نسبي: نقيس وسيطاً واحداً، سرعة الصدمة، في المادة المرجعية (التي نعرف معادلة الحالة لها) وفي المادة المدروسة بصورة متزامنة.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

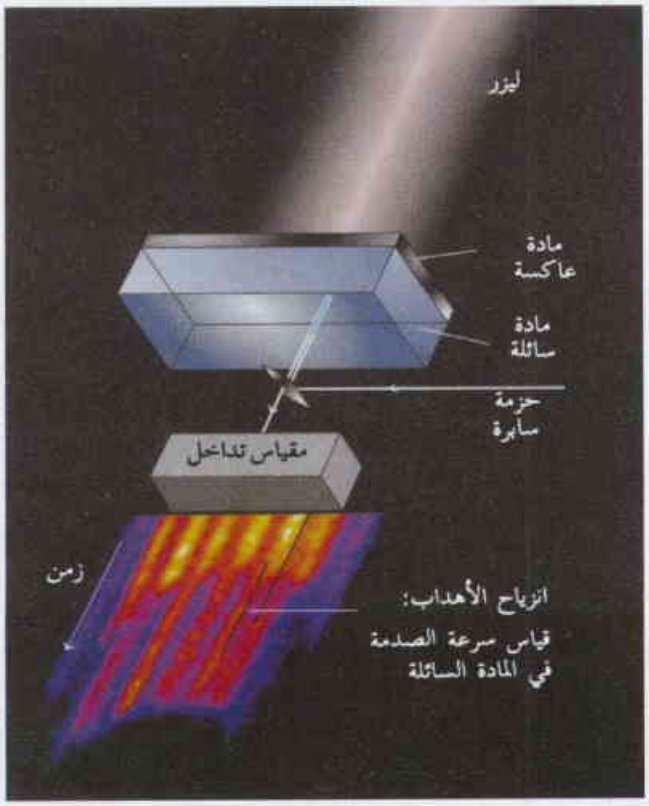
سلوكها في الضغوط العالية (الألمنيوم مثلاً، حيث تتطابق النماذج النظرية مع النتائج التجريبية العديدة التي حُصل عليها من الانفجارات التقليدية أو النووية). الهدف المستخدم هو قاعدة مستوية تتوضّع عليها عتبة من الألمنيوم وعتبة من المادة المراد دراستها (الشكل 2). وفي هذه الحالة يمكن الحديث عن تحديد نسبي لمعادلة الحالة. بيّنا بفضل هذه الطريقة في العام 1995، ولأول مرة، أنه يمكن إجراء قياس دقيق (بخطأ أقل من 5%) لمعادلة الحالة باستخدام الليزرات عالية الاستطاعة [6].

الشكل 2– إصدار المادة المسخّنة لومضة ضوئية من خلف الهدف يدل على أن موجة الصدم التي تولّدها صدمة الليزر قد عبرت الهدف بشكل كامل. نقيس سرعة الصدمة في المادة المدروسة (من الحديد في هذا المثال) وفي مادة مرجعية (الألمنيوم هنا) من خلال الانزياح الزمني بين الومضة الصادرة عن قاعدة الألمنيوم وبين الومضتين الصادرتين عن المسارين الألمنيوم والحديد. تسمح هذه السرعات بحساب المقادير الترموديناميكية التي توصّف الحديد المضغوط.

بعد التحقق من صلاحية هذه الطريقة من أجل مواد نعرف معادلة الحالة لها (الذهب مثلاً، حيث أنه كان موضوع دراسات نظرية وتجريبية عديدة، وخاصة باستخدام الانفجارات النووية)، طبّقنا هذه الطريقة على الحديد الذي يهمنا سلوكه عند الضغوط العالية بشكل خاص، لوصف باطن الأرض. في الواقع، يدرس الجيوفيزيائيون دوماً حركة تيارات الحمل التي تحدث في المعطف الأرضي، وتعتمد هذه الحركة بشدة على حالة الحديد في نواة الأرض وبشكل خاص على درجة حرارة انصهاره تحت ضغوط كبيرة. ومن خلال تجربة أوربية باستخدام ليزر Phébus، التابع لمفوضية الطاقة الذرية الفرنسية في ليميل، حصلنا على نقاط تجريبية لمعادلة الحالة للحديد حتى 35 ميغابار، مما سمح بالتحقق من النماذج الموضوعة في هذا النطاق من الضغوط الهائلة. وسنجري في مختبر LULI في السنة القادمة تجربةً لتحديد نقاط انصهار الحديد في هذا المجال من الضغط، وذلك بالتعاون مع مجموعة مختبر فيزياء الأرض في باريس ومع ENSMA في بواتييه.

طبّقنا هذه الطريقة أيضاً على مواد مسامية تشبه بنيتها المجهرية بنية الإسفنج:

تكون حبيبات المادة مفصولة عن بعضها بمسامات بقدر المكرومتر، فتصبح كثافة الهدف ضئيلة وأصغر من كثافة الجسم المتراص بحوالي مائة مرة. تستخدم هذه المواد في تجارب الاندماج بالحصر العطالي لتحسين انتظام حزمة الليزر على الهدف من جهة، وفي تجارب الفيزياء الفلكية لتمثيل دور البلازما المحيطة بالنجم عند تشكل المستعر الفائق supernova من جهة أخرى. وقد تمكّنا من إجراء القياسات الأولى لمعادلة الحالة الخاصة بهذه المواد حتى 2.5 ميغابار [7]. وتم الحصول على نتائج مدهشة جداً في مختبر Lawrence Livermore الأمريكي عند إجراء قياسات مماثلة على الهدروجين السائل: يكون الهدروجين في حالة معدنية عند ضغوط كبيرة جداً [8]. عندما تكون المادة المدروسة في الحالة السائلة فإن من الواضح عدم إمكانية قياس سرعة الصدمة باستخدام الهدف ذي

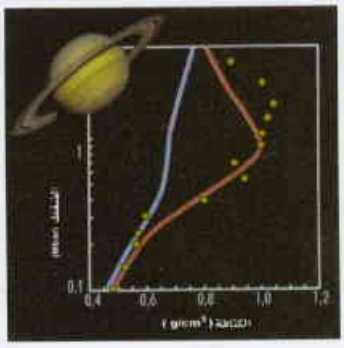


الشكل 3– يتم ضغط المادة السائلة ضمن حجرة شفافة. تُستخدم حزمة ليزرية ضعيفة الشدة كمسبار قياس. في بداية التجربة، تنعكس هذه الحزمة عند قاعدة الحجرة ويرسل الضوء المنعكس ضمن مقياس التداخل الضوئي، حيث تتشكل أهداب التداخل (في الأسفل). عندما تتقدم موجة الصدم داخل السائل، تنعكس حزمة السبر عن جبهة الصدمة التي تشكل عدم استمرارية داخل السائل.عندئذ تنزاح أهداب التداخل عرضياً مسافة تتناسب مع سرعة الصدمة. ويُستنتج الضغط ودرجة الحرارة من هذه السرعة.

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

العتبة: لذلك ابتكرنا طريقة فريدة تعتمد على قياس السرعة بأثر دوبلر* (الشكل 3).

حاول الفيزيائيون منذ سنوات عديدة وصف سلوك الهدروجين في الشروط التي تسود أعماق الكوكبين العملاقين المشتري وزحل. والنماذج، التي ترى أن الهدروجين سيبقى على شكل عازل كهربائي (ذرات الهدروجين مرتبطة بشكل جزيئات ثنائية الذرة)، تتنبأ بانضغاط** ضئيل للهدروجين في ضغوط أكبر من 0.1 ميغابار، وهذا ما يتناقض مع النتائج التجريبية (الشكل 4).



الشكل 4- تسمح النماذج، التي تأخذ بعين الاعتبار تفكك الهدروجين الذي يصبح في حالة معدنية تحت ضغط شديد (المنحني الأحمر)، بتوافق أفضل مع النتائج التجريبية (النقاط الخضراء) من النماذج الأقدم التي تفترض عدم تغير طوري للهدروجين

إضافة لذلك، ووفقاً للنماذج نفسها، إن زحل المكون بغالبيته من الهدروجين قد تشكل منذ حوالي ملياري سنة فقط. ويُحسب هذا العمر بتقدير الزمن الذي استغرقته عملية تبريد الكوكب منذ تشكله. ولكن الفلكيين يؤكدون أن كل أجرام المنظومة الشمسية قد تكونت في الوقت نفسه منذ ما يقارب 4.5 مليار سنة: فهل ينبغي عليهم أن يعيدوا النظر في سيناريو تشكيل الكواكب؟

إن تفكك الهدروجين وتغير حالته الذي أثبتته مجموعة ليفرمور Livermore تزيل هذا التناقض: بالطريقة نفسها التي يختزن فيها بخار الماء طاقة أكبر مما يختزنه الماء في الحالة السائلة، يختزن الهدروجين السائل حرارة أكبر في الحالة المعدنية حيث الذرات متفككة، منه في الحالة الجزيئية. فالطاقة الابتدائية المختزنة في زحل قد تكون أكبر مما كنا نظن، ودرجة الحرارة الحالية للكوكب، المرتفعة نسبياً، تتوافق بصورة أفضل مع عمر قدره 4.5 مليار سنة.

أخيراً، بدأنا في حزيران 1999 مشروعاً أوربياً (بتمويل جزئي من المجموعة الأوربية) لقياس معادلة الحالة للماء باستخدام ليزر Phebus. لم تعط تجاربنا حتى الآن نتائج قاطعة: وذلك لأسباب تتعلق بحجم الحجرات التي تحوي الماء، ولسنا متأكدين أن قياساتنا تأخذ بالحسبان تماماً سلوك هذا السائل. لذلك قمنا بتعديل هذه الحجرات وستتابع هذه الدراسة خلال العام 2000 باستخدام الليزرات في LULI وفي RAL (بالتعاون مع ليفرمور).

قد تبدو أهمية هذه المعلومات الجديدة حول معادلة الحالة للماء غريبةً في عالمنا الذي يكوّن هذا المركب أكثر من 70% من سطحه. في الحقيقة، لا توجد معطيات تجريبية حتى الآن إلا من أجل ضغوط أصغر من 0.6 ميغابار تؤمّنها مدافع الغاز. يضع الفيزيائيون نماذج لسلوك الماء المضغوط بشدة، وهذه النماذج ضرورية لوصف أعماق كوكبي أورانوس ونبتون. والآن، بعد أن أصبح "الليزر عالي الطاقة" كفؤاً لتحقيق قياسات في مجال ضغوط أكثر ارتفاعاً، سنعمّق ونحن على الأرض، معارفنا حول كواكب المنظومة الشمسية.

ستكون الدراسة المباشرة لتشكل المنظومة الشمسية المرحلة النهائية لهذه الأبحاث، وذلك بقياس معادلات الحالة لمواد تُضغط ببطء بحيث تمر بحالات متتابعة من الاستقرار. وبهذه الطريقة، سنكرر في المختبر الضغط الطبيعي والتدريجي الذي سبق تشكّل الكواكب. لقد تعلّمنا كيف نضرب المادة بقوة بالليزرات، ويبقى علينا أن نتعلم الاستخدام المضبوط لهذه القوة.

المراجع REFERENCES

[1] A. Jayaraman, pour la science, 80, 35, 1984.

[2] F. Cottet et al., Phys. Rev. Lett. 52, 1884, 1984.

[3] R. Sigel et al., Phys. Rev. Lett. 65, 587, 1990.

[4] M. Koenig et al., Phys. Rev. E, 50, R3314, 1994.

[5] A. Benuzzi et al., Phys. of. Plasmas, 5,1,1998.

[6] M. Koenig et al., Phys. Rev. Lett., 74, 2260, 1995.

[7] M. Koenig et al., Phys. of. Plasmas, 6, 3296, 1999.

[8] G. Collins et al., Science, 281, 1178, 1998.■

☆ ★ ☆

* أثر دوبلر هو التغير الظاهري للتواتر الملاحظ لموجة الناتج من الحركة النسبية بين المنبع والمراقب.

** الانضغاط هو النسبة بين كثافة المادة الخاضعة للصدمة وكثافة المادة غير المضطربة.

الليزرة في الأجواف المكروية المتشكلة في البلّورات الفوتونية*

يتجه الباحثون مقتربين من هدف استعمال بنى فرجات عصابية فوتونية في صنع نبائط ضوئية مرنة جديدة

بربارة غوص ليفي

ملخص

تتحقق الليزرة في الأجواف المكروية المتشكلة من عيوب في صفيف دوري من ثقوب أُحدثت في بلّورة فوتونية. ويكون حجم الجوف أصغر من مربع نصف طول الموجة المراد الحصول عليها. تتبعثر الأمواج الضوئية داخل هذه البنية الدورية من الثقوب ويحصل التداخل الهدّام الذي يُلغي أطوالاً موجيّة معينة مشكّلاً فرجة عصابية فوتونية شبيهة بالفرجة العصابية للأمواج الإلكترونية في أنصاف النواقل. يقوم الباحثون الآن، في دراسة بُنى الفرجة العصابية هذه على أمل تسخيرها في التحكم بالفوتونات لإحداث الليزرة بأطوال موجية محدّدة.

الكلمات المفتاحية: الليزرة، بلّورة فوتونية، عيب فوتوني، فرجة عصابية فوتونية، تجويف ضوئي، حصر الضوء.

لقد أحرزنا نجاحاً كبيراً في هندسة أنصاف النواقل من أجل مداولة الإلكترونات ودفعنا هذا النجاح بصورة طبيعية إلى الاهتمام بطرق مشابهة للتحكم بالفوتونات. إن إحدى الوسائل الواعدة هي في صُنع بنى تملك تغيرات دورية في قرائن الانكسار - كصفيفات سداسية من الثقوب الهوائية مخترِقة فلماً دقيقاً من زرنيخيد الغاليوم. وكما تتبعثر الأمواج الضوئية داخل بنية دورية لعازل، فإن التداخل الهدّام يلغي ضوء أطوال موجيّة معينة مشكّلاً بذلك فرجة عصابية فوتونية شبيهة بالفرجة العصابية للأمواج الإلكترونية في أنصاف النواقل. لاتستطيع الفوتونات التي تقع طاقاتها ضمن الفرجة العصابية أن تنتشر خلال البنية. ويمكن استعمال الخاصة الاستبعادية هذه بصورة جيدة في توليد جوف منخفض الفقد: فبكل بساطة إن وجود عيب في بنية دورية يؤدي إلى الحصول على منطقة في الداخل يمكن لمختلف الأطوال الموجية الممنوعة أن تؤسر فيها محلياً. وبشكل مشابه، يمكن أن يخدم صف العيوب كدليل موجة.

يدرس الباحثون بنى الفرجة العصابية هذه، والتي يطلق عليها أيضاً اسم البلّورات الفوتونية، على أمل تسخير إمكاناتها في التحكم بالفوتونات.

بدأت الجهود تعطي ثمارها. وإحدى الخطوات في ذلك الاتجاه هو الليزر ذو الفرجة العصابية الثنائية البعد الذي تم إثباته مؤخراً بالتجارب التي أجراها كالتش Caltech وجامعة كاليفورنية الجنوبية USC [1]. تألف الجوف من ثقب واحد ممتلئ (عيب) في صفيف دوري من نوع آخر من الثقوب مخترِقة فلماً نصف ناقل مصدراً للضوء. كانت أبعاد جوف العيب الفوتوني أقل من طول موجة الضوء تحت الأحمر، مما جعله طول الموجة القصير المكافئ لجوف الموجة المكروية الذي يتضمنه الميزر maser. أثار جزءاً من الاهتمام في مثل هذه الأجواف التي حجمها يبلغ المكرومتر تأكيد إدوارد بورسيل E. Purcell عام 1946 بأنه كلما كان الجوف أصغر كان تحفيز الإصدار التلقائي أكبر.

يعتقد أوسكار بينتر O. Painter من مجموعة كالتش أن أحد إنجازات مجموعته الكبيرة هو البرهنة على أنه من الممكن تصنيع البلورات الفوتونية بجودة عالية بكفاية لتموضع الفوتونات بقوة لتشكيل جوف ضوئي. ويقول: "إن هذا العمل فتح الباب أمام بنى نانو ضوئية متكاملة وعالية الكثافة". وحتى الآن، يملك الليزر استطاعة ضخ عالية العتبة جداً ليكون له أهمية تقانية، ولكن مصممي يعملون لتحسين خصائصه.

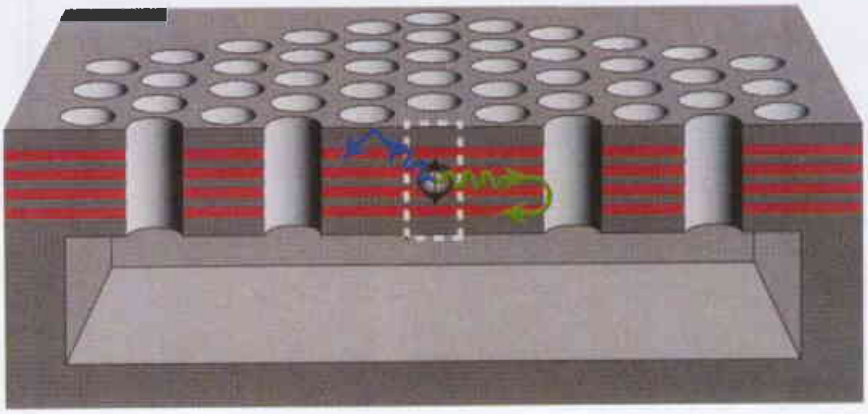
أعلنت حديثاً جماعات بحث أخرى عن ليزرات بفرجة عصابية فوتونية ذات بعدين، ولكن تصميماتها لم تبرز بوضوح هذا الحصر المحكم من الضوء [3,2]. إن مناطق الفرجة العصابية في ليزراتهم لا تحوي عيوباً، وبدلاً عن ذلك فإن البلّورات الفوتونية تقع تحت المنطقة النشيطة أو تخترقها: فقط الضوء، الذي متجهات أمواجه تماشي تلك التي في البلّورة الفوتونية، هو الذي يعطي تغذية راجعة موجبة. وبعكس الليزر العيبي الفوتوني الذي طوره كالتش - مجموعة USC، فإن هذه الليزرات الأخرى تحصر الضوء على منطقة فضائية أكبر إلى حد بعيد، يصل مقدارها إلى 100μm ويعود ذلك إلى أن تعديل قرينة الانكسار أصغر بما يقرُب مئة مرة مما هو عليه في الليزر العيبي. ومظهر هام وجديد في هذه الليزرات الثنائية هو قابليتها لاقتران الضوء بكفاءة في حزمة ضيقة منتشرة عمودياً خارج البنية المستوية.

* نشر هذا المقال في مجلة *Physics Today*, September 1999. ترجمة هيئة التحرير - هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

الليزر النمطي العيبي

يُبيّن الشكل المرافق تخطيطياً، ليزر الفرجة العصابية العيبي الذي أقامته مجموعة كالتش - USC، فالبنية الأساسية لهذا الليزر عبارة عن شريحة نصف ناقل رقيقة مصنوعة من الإنديوم والغاليوم والزرنيخ والفسفور. يوضع ضمن هذه الشريحة نصف الناقل على شكل طبقات في أربعة آبار كمومية تصدر عند تعرضها إلى نبضات إشعاعية ضوءاً طول موجته 1.5 مكرومتر (طول الموجة المستعمل في الاتصالات الضوئية). تساوي قرينة الانكسار لنصف الناقل حوالي 3.5 وهو محاط بالهواء الذي تبلغ قرينة انكساره 1.0 ، ولهذا فإن هذه الشريحة الرقيقة التي ثخانتها نصف طول الموجة تعمل كدليل موجة ضيق جداً آسر للضوء بشكل ضعيف في الاتجاه العمودي نتيجة عكسه داخلياً بصورة كاملة.



يتشكل الجوف المكروي للبلّورة الفوتونية من عيب في الصفيف السداسي للثقوب (المنطقة المنقطة). حجم الجوف أقل من مكعب نصف طول الموجة. سينعكس أي فوتون يتحرك في المستوي الأفقي عن صفيف الثقوب وسيعود إلى داخل منطقة الجوف (السهم الأخضر). سيُحجز أي فوتون يحاول الهرب عمودياً بالانعكاس الداخلي الكلي (السهم الأزرق). تشير الطبقات الأربع الحمراء إلى آبار نصف الناقل الكمومية التي تصدر ضوءاً طوله الموجي 1.55 مكرومتر عند إثارتها ضوئياً.

قام باحثو كالتش - USC، في داخل دليل الموجة الأفقي هذا، بتنميش شبيكة سداسية من ثقوب هوائية عمودية، أو فجوات أنصاف أقطارها 180 نانومتر وبتباعد بين الثقوب مقداره 515 نانومتر. يكون لهذه الشبيكة فرجة عصابية كاملة من بعدين، أي أن الفرجة العصابية توجد في كل اتجاه في المستوي الأفقي. تم إهمال أحد الثقوب في مركز الشبيكة مما جعل منه عيباً يعمل عمل الجوف: تحصر انعكاسات براغ Bragg من ثقوب الشبيكة المحيطة الضوءَ ضمن هذا الجوف أفقياً. عدّل باحثو كالتش - USC إلى حد ما، حجم وأمكنة الثقوب المجاورة مباشرة للعيب لتوليف طول موجة التجاوب للنمط العيبي ضمن الفرجة العصابية الفوتونية ولفهم انتكاس النمط الناتج في نمط جوف وحيد - ذلك الذي يكون مستقطباً بشكل كبير في الاتجاه الأفقي.

يبلغ حجم جوف ليزر كالتش - USC 2.5 مكعب نصف الأطوال الموجية، وهو قريب إلى النهاية الصغرى 2.0 التي تنبأت بها حديثاً مجموعة من جامعة كاليفورنية في لوس أنجلوس [4]. ولإتمام الليزرة في هذا الحجم الصغير احتاج الباحثون إلى جوف له عامل جودة عالٍ بكفاية Q (يقيس هذا العامل قابلية الجوف لاصطياد الفوتونات). يبلغ عامل الجودة Q في الليزر الذي تُشغّله مجموعة كالتش - USC 300 فقط. يفيد "بينتر" وزملاؤه أنهم بالتحسينات التي أدخلوها على Q استطاعوا تشغيل الليزر في درجة حرارة الغرفة.

يجد المرء في الليزر الذي أبعاده من مرتبة المكرون صعوبة لحصر الضوء بصورة فعّالة في داخل الجوف، ولكنه يحتاج لقياس الضوء إلى تركه يتسرب في مكان ما. ومع أن النمط العيبي في ليزر كالتش - USC ينتشر بشكل كبير في المستوي الأفقي، فإن الفقدان من ذلك النمط يحصل بصورة رئيسية في الاتجاه العمودي ولهذا السبب استطاع الباحثون دراسة الإصدار الليزري من الضوء الذي يخرج مقروناً من السطح العلوي. يصل الطيف الصادر فوق العتبة إلى قمة حادة حول 1504 نانومتر، وهي قيمة قريبة إلى القيمة التي تم التنبؤ بها نظرياً (انظر الشكل في الصفحة التالية).

يملك ليزر كالتش - USC استطاعة ضخ عالية العتبة من مرتبة الملّي واط، ويعود ذلك بصورة جزئية لكون حزمة الضخ أكبر بكثير من النمط العيبي. استطاعة الضخ عالية أيضاً لأن الفلم الرقيق ليس له حالياً مصرف تسخين حراري، ولهذا تكون كفاية الإشعاع منخفضة. يعمل التجريبيون لخفض استطاعة العتبة بالإضافة إلى إيجاد المزيد من مواصفات اعتماد الليزرة على وسطاء الشبيكة، كحجم الثقوب المجاورة للجوف وهلمّ جرا.

تشير جميع الدلائل إلى أن الليزرة تنتج من الجوف العيبي الفوتوني، ولكن من المستحسن إثبات ذلك مباشرة بتصوير نمط الليزرة بآلة تصوير تحت الحمراء القريبة في الحقل القريب والبعيد، أي الحقل القريب والبعيد من المنبع نسبة إلى طول موجة الضوء. إن الدليل الأقوى حتى الآن بأن الليزرة تنتج من النمط العيبي هو أن أنماط الليزر تتغير حسب ما يُتنبأ به مع تغيرات صغيرة في هندسة الثقوب المتاخمة للعيب.

يتطلب استخدام الليزر في الدارات المتكاملة الفوتونية اقتران الضوء في الاتجاه الأفقي. يأمل باحثو كالتش - USC تحقيق ذلك، إما بشق البنية في اتجاه عمودي على النمط المفضّل أو بصنع صف من العيوب لتوجيه الضوء الذي يضمحل في ذلك الاتجاه بشكل أسّي.

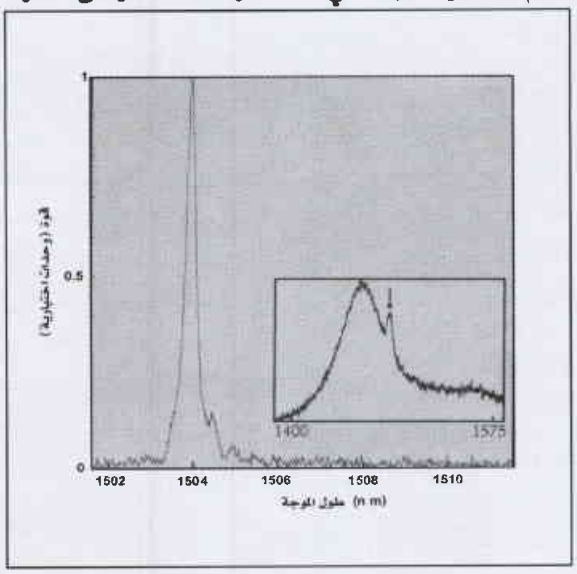
أفاد أكسل شيرر A.Scherer أحد المتعاونين مع كالتش أنه يأمل وزملاؤه في ضخ الليزر كهربائياً وبصورة مستمرة، وهم غير متأكدين أنهم يستطيعون تحقيق ذلك بالتصميم الأساسي نفسه.

ليزرات التغذية الراجعة الموزّعة

قدم الباحثون في مختبرات "بِل" وتقانات "لوسنت" ومعهد ماستشوستس للتقانة MIT في شهر كانون الأول الماضي، تقريراً عن ليزر أساسه البلّورة الفوتونية أيضاً [2] ولكن سماته وميزاته تختلف تماماً عن الليزر العيبي الذي تُشغّله مجموعة كالتش- USC. فوسط الكسب في

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

نبيطة مخابر بِل و MIT عبارة عن مادة عضوية صلبة تصدر ضوءاً عندما تُثار ضوئياً، تُوضَّع هذه المادة فوق طبقة من ثنائي أكسيد السليكون نُمّشت في داخلها شبيكة مثلثية من الفجوات. يملأ الفلم العضوي الثقوب التي عمقها 50 نانومتر ويمتد ليرتفع إلى 200 نانومتر فوق فلم ثنائي أكسيد السليكون ليشكل دليل موجة مستوياً ذا بعدين. يفرض التعديل الدوري لثابت العزل الكهربائي الحاصل من الثقوب شروطاً متناظرة على الضوء المنتشر داخل وسط الليزرة وتتشكل الأمواج المستقرة فقط من أجل الأنماط الكهرطيسية المنتشرة على طول الاتجاهات المتناظرة الستة من الشبيكة المثلثية (وبعكس الليزر العيبي، ليس لهذه البلّورة الفوتونية فرجة عصابية كاملة). إن تصميم هذا الليزر شبيه بليزرات التغذية الراجعة الموزّعة ذات البعد الواحد، التي تعطي فيها شبيكة الانعراج الدورية للأنماط المرغوب فيها تغذيةً راجعة موجبة.



طيف الليزر لجوف عيب بلّورة فوتونية مُضخة ضوئياً. تبدو ذرى الاستطاعة حادة فوق العتبة من أجل الليزرة. تحت العتبة (في الشكل الداخلي) يقع الإصدار من منطقة العيب (السهم العمودي) فوق الإصدار العريض من المادة غير المعالجة المحيطة بالعيب.

بعد إثارة مادة الكسب العضوية بضوء 337 نانومتر، جمع فريق مختبرات بِل – MIT الضوء الصادر في الاتجاه العمودي فوجد قمتي ليزرة عند 580 و 596 نانومتر تعودان إلى الأنماط العرضانية المتوقع انتشارها داخل الليزر.

لم يكن لدى التجريبيين في مختبرات بِل– MIT، عند نشرهم التقرير في كانون الأول، أي دليل على أن الاهتزاز المترابط الذي شاهدوه يمكن أن يُعزى إلى بلّورة فوتونية ذات بعدين. ولكنهم أوردوا هذا الدليل في ورقة بحثهم الجديدة. ويبّنوا، بصورة خاصة أن ضوء الليزر المقترن عمودياً الخارج من الدليل المستوي والمتجمع في صفيف من البقع في الحقل البعيد يسمح بتفسيرٍ مباشر للميزة الثنائية البعد لفعل الليزرة [5]. يمكن للباحثين أن يتحكموا بالتوزيع الزاوي وعدد البقع بتكييف أبعاد وتناظر شبيكة العزل الكهربائي ذات البعدين. فسّر ديك سلوشر D.Slusher من مختبرات بِل، وهو عضو الفريق الذي طوّر هذا الليزر، بأن الاقتران العمودي في داخل البقع المجمّعة جيداً يتطلب مناطق الليزرة الممتدة فضائياً الناتجة من التغذية الراجعة الموزّعة من توليفات القرينة الصغيرة في الدليل المستوي. وكحالة خاصة واحدة، يستطيع التجريبيون الحصول على حزمة خَرْج وحيدة بزاوية 90° مع السطح. يشعر سلوشر بأن آلية الاقتران هذه يمكن أن تكون مهمة في كثير من التطبيقات التي تتطلب اقتران فعّال ضوئياً للألياف وللبنى الضوئية الأخرى.

أدى التعاون حديثاً بين العلماء من جامعة كيوتو و سوميتومو للصناعات الكهربائية المحدودة في يوكوهاما في اليابان، إلى نشر تقرير عن ليزر تمّ ضخُّه كهربائياً، ويعمل في درجة حرارة الغرفة ويقوم على أساس بنية فرجة عصابية ضوئية ثنائية البعد [3]. (لقد وصفوا هذه النبيطة في ورشة عمل حول البنية البلّورية الكهرطيسيةالتي أقيمت في شهر كانون الثاني في لاغونايتش في كاليفورنية.) وكما هو الحال في نبيطة مختبرات بِل– MIT، ينتج الليزر الياباني من التغذية الراجعة الموزعة، ولكنه بالمقابل، يُبرز أنصاف النواقل كوسط كسب. في نبيطة كيوتو–سوميتومو، يوجد فوق الطبقة، التي تحوي الآبار الكمومية المضاعفة المؤلفة من فسفيد زرنيخيد الإنديوم والغاليوم، طبقةٌ من فسفيد الإنديوم مع مصفوفة مثلثية من الثقوب الهوائية الضحلة. إن البلّورة الفوتونية لا تخترق الطبقة الفعّالة، ولكن هذه تشعر مع ذلك بتأثيرها. قاس قائد الفريق سوسومو نودا S.Noda وزملاؤه كلاً من إشعاع الحقل القريب والبعيد في الاتجاه العمودي ليتأكدوا من أنه يملك خصائص الإصدار المترابط من البلورة الفوتونية. عندما قاس الباحثون الخرج في المستوي الأفقي شاهدوا بقعاً في كلٍ من اتجاهات التناظر الستة شبيهة بالبقع الست التي شاهدها المتعاونون من مختبرات بِل– MIT، ولكن الانعراج في الاتجاه العمودي كان من المرتبة الأولى. وكنتيجة لذلك، شاهد المتعاونون من كيوتو–سوميتومو حزمة ترابط وحيدة صادرة من أعلى الليزر (بدلاً من الحزم الست التي سيحصلون عليها بالانعراج من المرتبة الثانية).

أخبر نودا بأنه وزملاءه سيعلنون في شهر تشرين الثاني بأنهم صنّعوا بنية فرجة عصابية ثلاثية الأبعاد بموجة قصيرة إلى حد الـ 1.1 مكرومتر وبتخميد فرجة عصابية يبلغ 18 ديسيبل، (18 dB).

نشر الباحثون سابقاً تقريراً عن بلورات فوتونية لها فرجات عصابية تبلغ 1.55 مكرومتر وبتخميدات تبلغ حوالي 10 ديسيبل.

المراجع REFERENCES

[1] O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, I. Kim, Science 284, 1819 (1999).

[2] M. Meier, A. Mekis, A. Dodabalapur, A. Timko, R. E. Slusher, J. D. Joannopoulos, O.Nalamasu, Appl. Phys. Lett. 74, 7 (1999). A. Mekis, M. Meier, A. Dodabalapur, R. E. Slusher, J.D.Joannopoulos, Appl. Phys. A 69, 111 (1999).

[3] M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, T. Tokuda, M. Murata, G. Sasaki, Appl. Phys, Lett. 75, 316 (1999).

[4] R. Coccioli, M. Boroditsky, K. W. Kim, Y. Rahmat-Samii, E. Yablonovitch, IEE Proc.- Optoelectron. 145, 391 (1998).

[5] M. Meier, A. Dodabalapur, J. A. Rogers, R. E. Slusher, A. Mekis, A. Timko, C. A. Murray, R. Ruel, J. Appl. Phys. 86, 1 (1999).■

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

أخبار علمية

قسيمة اشتراك في مجلة عالم الذرة

هيئة الطاقة الذرية السورية

الإسم ..... **المهنة:** .....

صفة المشترك : **فرد** ☐ **طالب** ☐ **مؤسسة** ☐

تاريخ الاشتراك :

.....

العنوان .....

المراسلة على العنوان التالي:

هيئة الطاقة الذرّية السورية ــ مكتب الترجمة والتأليف والنشر ــ دمشق ــ ص.ب 6091

هاتف 6111926/7 ــ فاكس 6112289

رسوم الاشتراك السنوي(متضمنه اجور البريد):

للطلاب: 200 ل.س للأفراد: 300 ل.س للمؤسسات: 1000 ل.س

للأفراد من خارج القطر: 30 دولار أمريكي للمؤسسات: 60 دولار أمريكي

1- من ديودات الليزر إلى الشلالات الكمومية*

أنجز فريقان من معهد إيوفّه في سانت بيترسبرغ في روسيا ومختبرات بل في الولايات المتحدة، في وقت واحد على الأغلب، عام 1969 أول ليزر نصف ناقل AlGaAs/GaAs يعمل باستمرار في درجة حرارة الغرفة.

بدأ "سباق السبع سنوات إلى درجة حرارة الغرفة" عام 1962، بعد المشاهدة الأولى لفعل الليزر النبضي عند الدرجات القرّية، في الوصلة المتجانسة GaAs من قِبل بوب هول B. Hall من مختبرات بحوث جنرال إلكتريك.

كان البحث عن عملية الموجة المستمرة للّيزرات نصف الناقلة في درجة حرارة الغرفة تماماً كالبحث عن الكأس المقدسة للوفاء بحاجات الاتصالات الضوئية التي كانت، ولا تزال، القوة الدافعة الرئيسة لبحوث الليزر نصف الناقل. كانت المسألة الرئيسة في السبعينيات هي ملاءمة أطوال أمواج الليزر مع ما أصبح بعدئذ يدعى نوافذ النقل الجديدة لألياف السليكا عند الطولين الموجيين 1.3 و 1.5 مكرومتر. وهكذا اتجه بحث الليزر نصف الناقل إلى أطوال أمواج أكبر، تقوم على أساس شبيكة سبيكة رباعية من GaInAsP ملائمة لركازة فسفيد الإنديوم.

إن الاختراق الهام في تقانة الليزر نصف الناقل منذ نهاية السبعينيات هو في ظهور بنى البئر الكمومي. وكان هذا التقدم نتيجةً لبروز التقنيات المتقدمة في نمو البلّورة مثل التنضيد بالحزمة الجزيئية والتنضيد بطور البخار المعدني العضوي. حسّن الحصر الكمومي الأداءات بالتيارات منخفضة العتبة واستطاعات الخرج العالية وسرعات التعديل العالية مقارنة مع الليزرات التقليدية المضاعفة البنية. وبينما عملت ليزرات البئر الكمومي الأولى عند طول موجي قريب من 0.8 مكرومتر (GaAs/AlGaAs) فإن ليزرات البئر الكمومي الحالية تستخدم منظومات المواد الرئيسة الأربع (GaN, III-V GaAs, InP, GaSb) لتصدر ضوءاً بين المرئي وتحت الأحمر البعيد (0.4 إلى 18 مكرومتر).

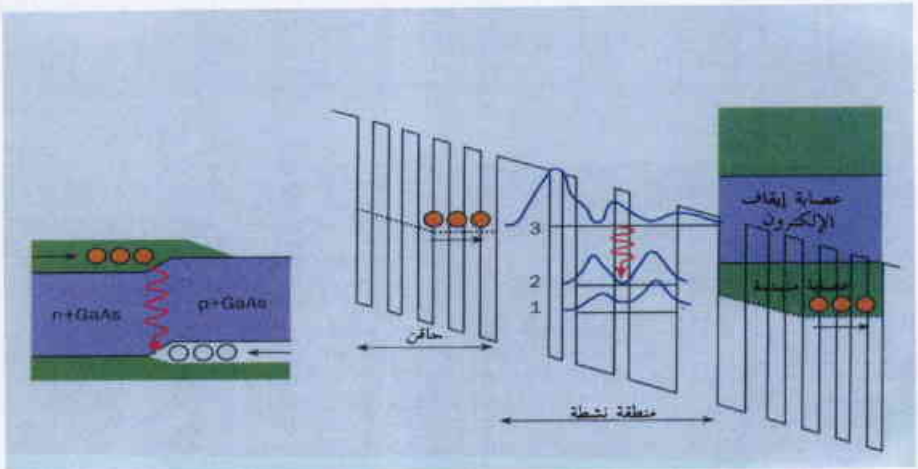
منذ منتصف الثمانينيات وحتى الوقت الحالي، توجّه الاهتمام كثيراً إلى ليزرات البئر الكمومي المنفعِلة InGaAs/AlGaAs التي تصدر أطوال أمواج في المجال 0.88 إلى 1.1 مكرومتر، والمحفّزة مرة أخرى بحاجات منظومة الاتصالات الضوئية. إن ليزر الضخ 0.98 مكرومتر من أجل مضخم ليف مطعّم بالإربيوم القائم على أساس الآبار الكمومية المنفعِلة InGaAs/AlGaAs هو الآن بمثابة حجر العقد لمنظومات النقل بعيدة المدى.

لم يحصل التقدم في الثمانينيات بعلوم المواد فقط، بل حصل أيضاً بتصميمات الليزر الجديدة وتقنيات المعالجة. وعلى وجه الخصوص، كان حجر الرحى ليزر التغذية الراجعة الموزّعة (DFB) من أجل متعدد الجيغابايت ومنظومات الإرسال التعاقبي بتقسيم طول الموجة. طُبّق مفهوم الليزر DFB لأول مرة في بداية 1974 على البنى GaAS/AlGaAs ومن ثم امتد إلى المنظومة InGaAsP/InP حيث تم إنجاز تحسينات رئيسة عند الأطوال الموجية 1.3 و 1.5 مكرومتر.

في العقد الأخير، كشفت ليزرات نصف الناقل مجالات تطبيقات جديدة، مثل التسجيل الضوئي والطباعة واتصالات الفضاء الحر ومعالجة المواد والتطبيقات الطبية والضخ الضوئي لليزرات الأجسام الصلبة والألياف.

وفي السنوات الأخيرة، جمعت ليزرات البئر الكمومي للأشعة تحت الحمراء القريبة منطقة فعّالة خالية من الألمنيوم (GaInAsP) أو (GaAsP) مع تصميم ليزر جديد (جوف ضوئي كبير أو دلائل موجية عريضة). نتج من هذه الأشياء استطاعات خرج موجة مستمرة قياسية (حتى 11 واط) وكفايات مقبس جداري (حتى 66%) من مصدرات ضوء وحيدة بعرض 100 مكرومتر. ومنذ عام 1992، أعطت تصميمات ديود جديد، مثل ليزرات الأجواف المنفتحة وفيما بعد ليزرات التغذية الراجعة الموزعة α-، استطاعات موجة مستمرة محدودة الانعراج بلغت عدداً من الواطات.

جذبت ليزرات الجوف العمودي ذات الإصدار السطحي (VCSEL$_s$) كثيراً من الاهتمام من أجل الاتصالات الضوئية ومن أجل تطبيقات التوصيل البيني الضوئي. كان معهد طوكيو التقاني أول من نشر عام 1979 عن ليزرات الجوف العمودي ذات الإصدار السطحي GaInAsP/InP تحت شروط نبضية في درجة حرارة تبلغ 77 كلفن.



إلى اليسار: التصميم الأساس لديود ليزر زرنيخيد الغاليوم المتجانس الوصلة من عام 1962. إلى اليمين: يملك ليزر الشلال الكمومي الوحيد القطب، الذي اخترع عام 1994، طبقات من AlGaAs على ركازة من زرنيخيد الغاليوم.

* نُشر هذا الخبر في مجلة *OLE Millennium issue*. ترجمة هيئة التحرير - هيئة الطاقة الذرية السورية.

وفي عام 1988 تمت البرهنة على أول عملية موجة مستمرة في درجة حرارة الغرفة لليزر الجوف العمودي ذي الإصدار السطحي /GaAlAs GaAs. جرت معظم الأعمال على هذا النوع من الليزرات على GaAs، وتُركّز فعاليات البحث والتطوير الحالية على ليزرات الجوف العمودي ذات الإصدار السطحي الطويلة الموجة (1.3 إلى 1.55 مكرومتر) على ركازات InP من أجل الوصلات الضوئية المنخفضة التكلفة. تكرّس الجهود في هذا الحقل على تطوير مرايا مكدّسة ذات جودة عالية.

وأخيراً، ظهر عام 1994 في مختبرات بِل أول ليزر تحت العصابة البيني الأحادي القطب أو ليزر الشلال الكمومي (QCL)، وهو مفهوم جديد في ليزرات نصف الناقل، مع أول GaInAs/AlInAs QCL عند الطول الموجي 4.3 مكرومتر. لقد أصبحت ليزرات الشلال الكمومي ممكنة بتقارب تقنيتين وهما تنضيد بالحزمة الجزيئية وهندسة بنية عصابية. لقد جعلت منطقة طول الموجة المتوفرة حالياً (من 3.4 إلى 18 مكرومتر) ليزرات الشلال الكمومي ملائمةً للمطيافية والتحسس الغازي. لقد كان تطور ليزرات الشلال الكمومي سريعاً بشكل مدهش: فمنذ عام 1994، أظهرت ليزرات التغذية الراجعة الموزعة عملية في درجة حرارة الغرفة باستطاعات تزيد عن الواط الواحد. إن عملية الموجة المستمرة في درجة حرارة الغرفة قريبة جداً.

الاختراقات الهامة

1962: أول ديود ليزر GaAs (عملية نبضية، درجة حرارة قرّية)، مختبرات بحث جنرال إلكتريك.

1970: ديود ليزر AlGaAs/GaAs ذو الوصلة غير المتجانسة المضاعفة (موجة مستمرة، 300 كلفن) معهد إيوفّه، مختبرات بل.

1974: ديود ليزر AlGaAs/GaAs DFB.

1976: ديود ليزر GaInAsP/InP ذو الوصلة غير المتجانسة المضاعفة عند الطول الموجي 1.2 مكرومتر (موجة مستمرة، 300 كلفن). مختبرات لينكولن.

1977 ليزر البئر الكمومي InGaAsP/InP، جامعة أوربانا.

1978: ليزر البئر الكمومي AlGaAs/GaAs، جامعة أوربانا.

1979:ليزر VCSEL InGaAsP/InP (عملية نبضية، 77 كلفن) معهد طوكيو للتقانة.

1984: ليزر البئر الكمومي الانفعالي InGaAs/AlGaAs.

1988: VCSEL AlGaAs/GaAs (موجة مستمرة، 300 K) معهد طوكيو للتقانة.

1994: QCL InGaAs/AlInAs/InP (عملية نبضية، درجات حرارة قرّية) مختبرات بِل.

1995: ديود ليزر أزرق InGaN/AlGaN/GaN (عملية نبضية، درجات حرارة قرّية)، كيمياويات نيشيا.

1996 ديود ليزر أزرق InGaN/AlGaN/GaN (موجة مستمرة، 300K) كيمياويات نيشيا.

1998 AlGaAs/GaAs QCL (عملية نبضية، درجات حرارة قرّية) طومسون – CSF.■

2– طريقة أرخص لفصل النظائر*

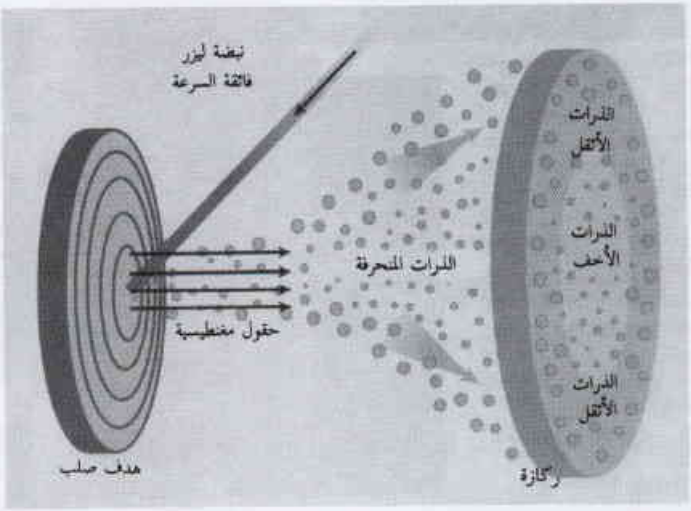
بالنسبة لسباق العلماء في مشروع مانهاتن من أجل بناء أول قنبلة ذرية أثناء الحرب العالمية الثانية، كان أحد أكبر التحديات هو عدم معرفة كيفية إحداث التفجير النووي. كما وجب عليهم أيضاً تصميم طريقة لفصل وقود التفاعل، وهو اليورانيوم – 235 من قرينه الأثقل قليلاً والأكثر وفرة بكثير U-238. وأخيراً، بنى علماء المشروع منشأة انتشار غازية بحجم كبير لفصل النظائر مستفيدين من قابلية النظائر الأخف للانتشار في زمن معين إلى مسافة أبعد من النظائر الأثقل. ومنذ الحرب العالمية الثانية بقيت عملية فصل جميع أنواع النظائر على مقياس صناعي. وأما الآن فإن النتائج الجديدة باستخدام ليزر مخبري مكّنت من تغيير كل ذلك.

نشر الباحثون في جامعة متشغان – آن أربر – حديثاً في مجلة "Physical Review Letters" بحثاً حول استعمال ليزر يُطلِق نبضات فائقة القِصر متراصة القدرة لفصل نظائر العناصر بدءاً من عنصر البور وحتى الزنك. وهذه ليست التقنية الأولى التي تستخدم الليزر لفصل النظائر، ولكنها لا تتطلب استعمال مغانط معقدة وباهظة الثمن، مما يجعل إمكانياتها أسهل بكثير وأرخص إذا ما انخفضت تكاليف الليزر وأمكن للتقنية أن ترتقي بنسبة معينة. في الحقيقة، يصف تود ديتمير T. Ditmire الفيزيائي في ليزر النبضات القصيرة في مختبر لورنس ليفرمور الوطني في كاليفورنيا، الطريقة الجديدة بأنها "عظيمة الإمكانية"، وتمكن من تحقيق منبع جديد للنظائر رخيص من أجل البحث والصناعة والطب.

في البداية، جرّب الباحثون في جامعة متشغان وهم الفيزيائيان بيتربرونكو P. Pronko و جون نيز j. Nees وطالبا الدراسات العليا بول فانرومبي P. Van Rompay وزهيو تسانع Z. Zhang تنمية أفلام رقيقة من نتريد البور، المادة الفائقة القساوة. يُصنّع الباحثون عادة مثل هذه الأفلام، التي تستعمل في النبائط الضوئية والإلكترونية العالية التقنية، بتسليط ليزر على المادة وتبخيرها ثم توضيعها على مُسطّح. استعمل برونكو وزملاؤه، ليزراً غير عادي: وهو ليزر يعطي 10^{15}واط من الاستطاعة في السم^2 بشكل نبضات قصيرة جداً تدوم 150 فمتو ثانية

* نشر هذا الخبر في مجلة *Science*, Vol. 286, 1 October 1999. ترجمة هيئة التحرير – هيئة الطاقة الذرية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية



منحرك إلى الخارج: عندما تتعرض المادة للتبخير بواسطة الليزر الفائق السرعة، تميل النظائر الأثقل لأن تتركز عند حواف الهدف.

فقط. أدى تجريب هذا الليزر على كتلة صلبة من نتريد البورون إلى ترسب فِلم على قرص مجاور من السليكون، وترسب فِلم آخر أكبر على الجوانب.

للبور نظيران B-10 و B-11 متوزعان عشوائياً في الهدف الصلب. ولكن دهشة الباحثين الكبيرة كانت عندما استعملوا نبيطة تدعى محلل الطاقة الكهراكدية لدراسة نظائر البور في عمود الغازات الناتجة من نبضة الليزر، فوجدوا عندها أن النوعين من البور لم يعودا مختلطين كما عند انطلاقهما. يقول برونكو "لقد اعتقدنا أن جهازنا كان معطلاً، وهكذا أعدنا التجربة مرة ثانية". لقد وجدوا في كل مرة أن معظم البور الأثقل قد استقر على الجزء الخارجي من الدائرة، بينما بقي البور الأخف حول الوسط. يقول برونكو بعد إجراء تجارب قليلة، "لقد اقتنعنا بأن ما رأيناه كان حقيقة".

لا تزال النتيجة محيّرة، ليس لأن النظيرين قد انفصلا فحسب لكن ظهر بأن النظير الأثقل قد سار أبعد في البخار من النظير الأخف، تماماً بعكس ما يحدث عندما تجرف النظائر في غاز غير مشحون. أدرك برونكو وزملاؤه أن الجواب يكمن في العاصفة الكهربائية والمغنطيسية التي أحدثتها نفثة الليزر الفعّال.

أولاً، عندما يضرب الضوء الهدف فإنه يطرد الإلكترونات من الذرات السطحية، وحالما تنفلت الإلكترونات بعيداً عن سطح الهدف فإنها تجرّ خلفها شحنات البور والنتروجين الموجبة المتشكلة توّاً، وفي الوقت نفسه، تولّد نفثة الطاقة على السطح حقلاً مغنطيسياً قوياً ينطلق من السطح على شكل سلسلة من خطوط الحقل المغنطيسي. تسحب هذه الخطوط الأيونات في سيرها مسببة لها حركة حلزونية حول خطوط الحقل. ومفتاحية فصل النظائر هو أن الأيونات الأقل كتلة تطير أو تتحرك في المسار الحلزوني الأكثر التصاقاً بينما تتحرك الأيونات الأثقل في المسار الأعرض أو الأبعد مما يجعلها تبعد أكثر عن الهدف.

كانت النتيجة أن المنطقة الخارجية من القرص فيها ضعف الكمية من نظير البور الثقيل الموجود في المنطقة الداخلية. وقد قدّر ديمتري هذا الإغناء بالجيّد. وفضلاً عن ذلك، فقد حصل فريق متشغان على نتائج مشابهة في حال الغاليوم والنحاس، العنصرين الآخرين المستعملين بكثرة في النبائط الإلكترونية. إنهم يخططون مسبقاً لاستخدام تقنيتهما للحصول على أفلام رقيقة ونقية نظيرياً من أجل أنصاف النواقل المعروفة بأنها تملك قابلية جيدة لنقل الحرارة، وهو المتطلب المفتاحي لجذاذات الحاسوب الحالية المتراصة بكثافة. يقول برونكو أيضاً أنه من الممكن للتقنية أن تبرهن فائدتها من أجل فصل النظائر الطبية مثل الايتريوم-90 الذي يستعمل في معالجة الورم اللمفي اللاهوجنز.

يضيف برونكو قائلاً بأن فريقه ليس لديه حالياً الخطط ليبحث فيما إذا كان من المستطاع استعمال هذه التقنية في تنقية اليورانيوم الصالح في القنبلة، والتي من الممكن أن لا يكون تطبيقها مناسباً من الناحية الاقتصادية على أي حال. يقول جيرارد مورو G. Mourou الذي يدير مركز متشغان لعلم الضوء الفائق السرعة، من حسن الحظ أن هناك حاجة للعديد من تركيبات الليزر لجمع الكيلوغرامات من المادة النووية المُغناة لبناء القنبلة.■

3- البحث من أجل حواسيب كمومية*

يغطي حقل الضوئيات الكمومية في مفهومه العام الظواهرَ الكمومية للتآثر بين الإشعاع والذرّة. ولهذا فهو يقدّم وسائل مهمة لاختبار ملامح كمومية أساسية، ويكون أيضاً الحلبة التي يجري فيها توضيح وشرح التأثيرات الكمومية التي تظهر أحياناً بأنها ضد المدرَك بالبديهة.

يمكن فهم معظم عمليات فيزياء الليزر على الأسس التي تقوم عليها الفيزياء نصف التقليدية، حيث تكون الذرة مكممة بينما يُعامل الإشعاع بشكل تقليدي. ولهذا، فإن تأمّلنا ما جرى على تطوّر الضوئيات الكمومية أثناء نهاية السبعينيات أو حتى بداية الثمانينيات لوجدنا بأن الظواهر، التي كان فيها تكميم حقل الإشعاع مهماً فقط، هي الظواهر المرتبطة بالإصدار التلقائي.

فمثلاً، من الممكن لعرض الخط الطيفي الطبيعي لليزر أن يحسب فقط على أساس الحقل المكمم. وكذلك كانت الظاهرة الأخرى هي تفلور التجاوب: وهي الظاهرة التي تبين فيها أطياف الذرات المُساقة الوحيدة اللون وإحصائيات الفوتون لإشعاع التفلور من ذرة وحيدة إحصائيات تحت بواسونية وتخزيماً مضاداً، وهما الأمران اللذان يعتبران سماتٍ كمومية صرفة.

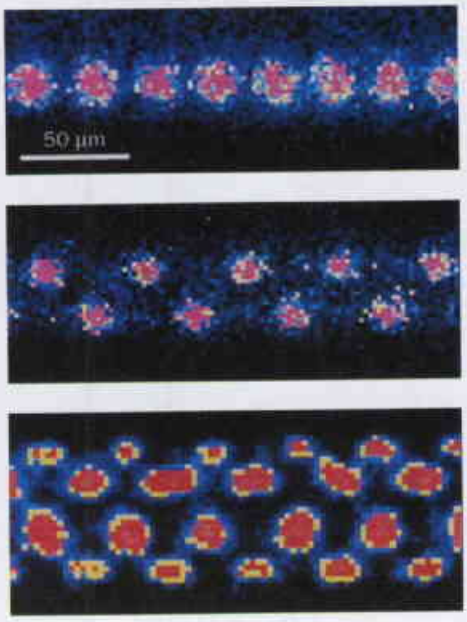
عندما وجّه هانبري Hanbury وبراون Brown وتويس Twiss من المملكة المتحدة في منتصف الخمسينيات انتباه الفيزيائيين إلى إحصائيات الفوتون (اعتبر الصفائيون ذلك كبداية للضوئيات الكمومية)، اعتُرِف بتحزيم الفوتونات كسمة مميزة لحزمة ضوئية حرارية، في حين يعرض ضوء الليزر المترابط إحصائيات بواسونية.

* نشر هذا الخبر في مجلة *OLE Millennium issue*. ترجمة هيئة التحرير – هيئة الطاقة الذرّية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

اعترف أخيراً بأن المعالجة الكمومية لحقل الإشعاع تأخذ أيضاً بالحسبان الإحصائيات تحت البواسونية، والتي يطلق عليها اسم التحزيم المضاد، لأن فوتونات مثل حزمة الضوء هذه تصل تقريباً بفترات زمنية متساوية كما هو ملاحظ من أجل إشعاع الفلورة لذرات منفردة.

بدأت الضوئيات الكمومية تزدهر في الثمانينيات والتسعينيات، فتطور التحريك الكهربائي الكمومي للجوف في الثمانينيات. وقد فُهم ضبط الإصدار التلقائي بوضوح تجريبياً من قِبَل فريق من معهد ماساشوستس للتقانة في الولايات المتحدة والمدرسة العليا للأساتذة في باريس، وجرى بناء ميزر الذرة الواحدة، وهو نبيطة كمومية صرفة، من قبل فريق في جامعة ميونخ. وتطورت على أساس ميزر الذرة الواحدة، أو المكروميزر، منظومات المكروليزر التي تحقق اليوم إنجازات تقانية واسعة، وبخاصة في حقل الاتصالات.



فَلْورة من أيونات مأسورة في ليزر مبرَّد تشكل مثل هذه الأيونات الأساس في الحواسيب الكمومية.

وبعد ذلك، جرى إثبات عصْر الإشعاع بالإضافة إلى اللاهدم الكمومي، وهي العملية التي تسمح بالقياس اللاإتلافي للفوتونات. وكانت العملية الأكثر أهمية هي قياس الحالات الكمومية. يحتوي تابع الموجة في النظرية الكمومية جميع المعلومات عن المنظومة الكمومية. وفي السنوات الأخيرة فقط أصبحت المعرفة النظرية والتقانات التجريبية متوفرة لإعداد منظومة معينة مثل الضوء أو الذرات في حالة كمومية خاصة.

إن إعداد الحالات المعصورة المذكورة سابقاً هو أحدُ الأمثلة على ذلك. تُقدِّم قابلية هندسة الحالات الكمومية إمكانيات رائعة من أجل اختبار التنبؤات البدائية للميكانيك الكمومي.

وزيادة على ذلك، هنالك تضمينات عملية مشمولة فيها: فيمكن لحقول الليزر المصممة بصورة خاصة، مثل الضوء المعصور، أن تسمح بقياس التداخل بدقة عالية نظراً لإمكانية الاختزال أو التقليل من الضجيج الكمومي.

يحصل التداخل في الضوئيات التقليدية عندما يتم ضم سعتي موجتين أو أكثر بأطوار مختلفة. ولما كان الجسيم التقليدي لا يملك طوراً، فإن الأمواج فقط هي التي تستطيع أن تحدث التداخل في الفيزياء التقليدية. وبالمقابل فإن التداخل سمة عامة في الميكانيك الكمومي الذي لا يُقيَّد بالأمواج ولكنه يظهر عندما يمكن التوصل إلى خرج قياس ما عبْر عدة مسارات غير متميزة الخصائص، أي سعات الاحتمال لها التي يجب أن تضاف لحساب نتيجة القياس. وهكذا يُعبِّر كل من الجسيم ومظاهر الموجة عن نفسهما في الوصف الميكانيكي الكمومي للتداخل.

وحتى يمكن إجراء تجارب تداخل الفوتون، يجب توليد أزواج الفوتونات. استخدم لين ماندل L. Mandel عام 1987 وزملاؤه في جامعة روشستر التحويل النازل البارامتري للحصول على أزواج الفوتونات ودرسوا سلسلة من الظواهر الكمومية من ضمنها: العبور النفقي للفوتون والماحي الكمومي ومتراجحات بل Bell. يمكن توليد أزواج متشابكة من الفوتونات بواسطة التحويل النازل من النوع II من المغنطيسية المسايرة. إنها أسس التجارب عن المعلومة الكمومية التي ستأتي لاحقاً.

حصل تقدم آخر في بداية التسعينيات 1990 عندما لفت شارل بينّيت C. Bennett من IBM في الولايات المتحدة الانتباه إلى علم التعمية الكمومي. تقدِّم الفيزياء الكمومية الوسائل من أجل معالجة وإرسال المعلومة التي تختلف بشكل أساسي عن الفيزياء التقليدية. ويتضح بأن نظرية المعلومة والميكانيك الكمومي يتلاءمان بشكل جيد.

يمكن تقسيم الفروع من المعرفة الجديدة إلى أقسام أصغر ضمن ثلاث مساحات متراكبة:

الحسابات الكمومية، علم التعمية الكمومي والاتصالات الكمومية.

حصل تطور آخر مثير للانتباه عام 1995 عندما لاحظ كارل فيمان C.Wieman وإريك كورنل E. Cornell في جامعة كلورادو تكاثف بوز - آينشتاين في ليزر غازات ذرية ممددة ومبرّدة.

كان الشيء المثير بشكل خاص هو إثبات التداخل بين كُثافتين بشكل قاطع تجريبياً، مما يُظهر بأن من الممكن الحصول على أمواج المادة المترابطة. وهذا ما أوحى بالمقارنة بين الليزرات والميزرات وإطلاق اسم "ليزر ذري" على بعض الأنواع من الحزم الذرية المترابطة التي استخدمت.

أظهرت الأدلة العملية الأولى للضوئيات اللاخطية بأمواج المادة التي أجريت في NIST في غايثربرغ في الولايات المتحدة مظاهر أبعد من التشابه بين الإشعاع الكهرطيسي وأمواج المادة.

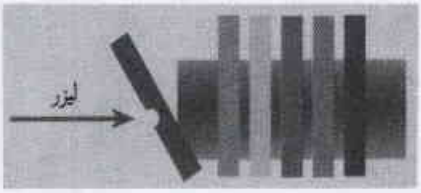
لقد تفرّع حقل الضوئيات الكمومية بشكل هائل في السنوات الأخيرة. ويمكن الاستنتاج من هذا التطوّر أنه سيكون هنالك في المستقبل عدة مكتشفات جديدة وتطورات مهمة، وكذلك الحال بالنسبة للتطبيقات التقانية. ستُحدِّد تقانة القرن الحادي والعشرين بالظواهر الكمومية، تماماً بالطريقة نفسها التي تحددت فيها التقانة السابقة بالفيزياء التقليدية.■

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

4- الفيزياء النووية بالليزرات*

يمكن استعمال نبضات الليزر القصيرة والعالية الشدة في تفعيل عمليات نووية متنوعة بدءاً من عملية الانشطار وحتى عملية إصدار النترونات والبروتونات والبوزترونات.

منذ عشرين عاماً اقترح توشي تاجيما T.Tajima وجون داوسون J.Dawson، ومن ثَمّ جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس أنه يمكن للبلازمات المنتجة بالليزر أن تُستعمل في تسريع الجسيمات إلى طاقات عالية. كانت السمة الأساسية لاقتراحهم هي أن من الممكن تسريع الإلكترونات بأمواج بلازما متحركة بسرعة قريبة من سرعة الضوء وشبيهة إلى حد كبير بما يحصل في رياضة ركوب الأمواج. وهو تشابه مناسب للفكرة التي نشأت أصلاً في كاليفورنيا. وبما أن الحقل المسرِّع في موجة البلازما يمكنه، من حيث المبدأ، أن يكون أكبر بكثير من المسرّع التقليدي، فقد جرى تحرّي التسريع القائم على البلازما كبديل للتقنيات التقليدية العالية الطاقة.



الشكل 1- تولّد نبضة الليزر الواردة من اليسار عندما تصطدم مع هدف التنتالوم بلازما (أزرق غامق). تسرّع الإلكترونات في البلازما بالليزر فقط لإيقافها عند خلف الهدف مما يسبب لها إطلاق طاقتها على شكل أشعة غاما (عصابة حمراء). تملك أشعة غاما هذه طاقة كافية لتحريض تفاعلات في أهداف إضافية متنوعة (برتقالي، أصفر، أخضر، أزرق فاتح، أرجواني). وبمقارنة كمية التنشيط في كل طبقة مع تلك التي في طبقة النحاس (برتقالي) يمكن تقدير درجة حرارة الإلكترون.

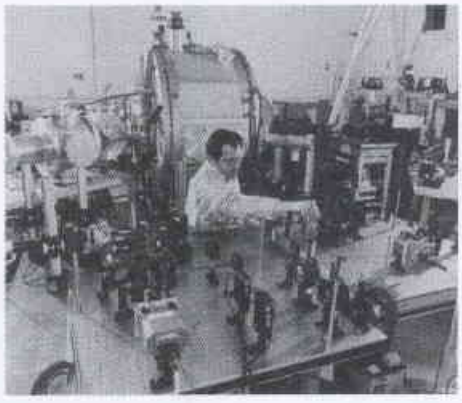
ومع أن توليد الجسيمات الفائقة الطاقة بهذه الطريقة مازال بعيداً جداً، فإن التجارب الحديثة التي أجريت في مختبر رذرفورد أبليتون (RAL) في المملكة المتحدة وفي مختبر لورنس ليفرمور الوطني في الولايات المتحدة قد بينت أن من الممكن استعمال الليزرات في تحريض التفاعلات النووية (ليدنغهام K.Ledingham وزملاؤه، وروث M.Roth وزملاؤه). ولقد أمكن تحقيق هذه التجارب باستخدام تقنية "التضخيم بالنبضة المزقزقة". تُمدّد في هذه التقنية نبضة ليزر قصيرة في الوقت المناسب قبل تضخيمها. ثم تضغط بعدئذ ثانية بعد التضخيم.

لا يستطيع وسط الليزر المتكوّن أن يُضخّم النبضات القصيرة جداً إلى طاقات عالية بصورة مباشرة. لقد جعل التضخيم بالنبضة المزقزقة هذا الأمر ممكناً من أجل الليزرات المكتبية البسيطة جداً لنقل طاقةتيراواط (10^{12}W) في نبضات أقل من بيكوثانية، بينما تقترب معظم منظومات الليزر الضخمة من حدود البيتاواط (10^{15}W).

يستطيع ليزر التيراواط عند تبئيره على هدف أن يصل إلى شدات من مرتبة 10^{19} إلى 10^{20} واط بالسم^2. وفي شدات كهذه تكون "حركة ارتعاش" الإلكترون في الحقل الكهربائي المهتز عالية النسبوية. يكون التآثر بين الليزر والهدف الصلب، الذي يُشكل بسرعة بلازما من الأيونات المشحونة إيجابياً ومن الإلكترونات، عملية لاخطية معقدة تحصل في أمواج البلازما التي تسرّع الإلكترونات إلى طاقات عالية.

أُنجزت تجارب الفيزياء النووية في مختبر رذرفود من قبل فريق يقوده كين لدينغهام من جامعة ثملاسكو بالتعاون مع مجموعات يقودها بيتر نوريس P.Norreys من مختبر رذرفورد أبليتون و بابكر دانغور B.Dangor من الكلية الملكية في لندن. شعع الفريق هدف التنتالوم بواسطة ليزر VULCAN الذي شكل بلازما أمام الهدف. ثم جرى تبطيء الإلكترونات العالية الطاقة من البلازما على مقربة من خلف الهدف وحررت طاقتها كإشعاع كبح. ثم استعملت فوتونات أشعة غاما بعدئذٍ لبدء سلسلة من تفاعلات ضوئية- نووية في هدف ثانوي مصنوع من طبقات مواد مختلفة (الشكل 1).

شوهدت تشكيلة متنوعة من التفاعلات التي تقذف فيها فوتونات أشعة غاما النترونات من الذرات في الهدف الثانوي، مع تحديد الذرات غير المستقرة المتشكلة من خواص اضمحلالها وأعمارها النصفية. تراوحت العتبة من أجل النترونات المقذوفة من الهدف الثانوي من حوالي 7.6 MeV للتنتالوم إلى 18.7 MeV من أجل طبقة الكربون. تقدم حقيقة حدوث هذه التفاعلات دليلاً لا لبس فيه بأن الفوتونات بهذه الطاقات قد تمّ تشكلها في الهدف الأولي، ويشير هذا بدوره إلى أن إلكترونات ذات طاقة مشابهة قد جرى توليدها في البقعة البؤرية لليزر.



الشكل 2- إيان واطس I.Watts من الكلية الملكية يعمل في منطقة هدف VULCAN.

إن درجة حرارة الإلكترون جزء حاسم وهام من المعلومات إذا أردنا فهم تآثر الليزر - البلازما وأردنا مقارنة التجربة مع النظرية والمحاكيات الحاسوبية. يمكن الحصول على درجة حرارة الإلكترون من درجات التنشيط النسبية في طبقات النحاس والكربون في الهدف الثانوي. لقد قدم هذا النهج الجديد للعمل الصعب في قياس درجة حرارة الإلكترون إضافة مفيدة لتشخيصات الليزر - البلازما الموجودة.

لقد شاهد فريق RAL، وكذلك فريق ليفربول الذي يقوده توم كاوان T.Cowan أيضاً، كل على حدة، الانشطار المحرّض ضوئياً

* نشر هذا الخبر في مجلة *Physics World*, January 2000. ترجمة هيئة التحرير - هيئة الطاقة الذرية السورية.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

لأول مرة، محققين بذلك التنبؤ النظري الذي جرى منذ عشرسنوات (بوير، لوك، رودس K.Boyer, T.Luc, C.Rhodes، مجلة Phys Rev. Lett. 1988).

تملك أشعة غاما في هذه العملية طاقة كافية لشطر نواة ثقيلة إلى شدوفات أصغر. كان الهدف من هذه التجارب هو الحصول على شريحة من اليورانيوم - 238 سمكها 2ملم، وذلك لتشعيعها بثلاث طلقات متتابعة من الليزر شداتها حوالي 10^{19}W cm^{-2}. لقد تم إثبات حصول الانشطار من كشف أشعة غاما بالطاقات المميزة لليود -134 وللسيزيوم - 138 وللسترونسيوم-92 وشدوفات انشطار أخرى. قدّر الفريق أن كل طلقة ليزر تنتج حوالي 10^6 حادثة انشطار.

والآن، وبعد أن عرفنا أن تلك الليزرات قادرة على بدء تفاعلات نووية، يمكننا أن نتساءل عن نوع التطبيقات التي يمكن أن تقدمها. فهل يستطيع هذا الأسلوب من العمل أن يقدم، وبشكل خاص، منبعاً متراصاً واقتصادياً من النظائر المشعة القصيرة العمر للتطبيقات الطبية؟ إن مردود كل طلقة في الوقت الحاضر منخفض جداً، وضرورة الحاجة إلى عدد كبير من النبضات للحصول على كمية مفيدة من النظير أمر مستحيل. على كل حال، توحي النظرية بأنه إذا زيدت شدة الليزر إلى حوالي 10^{20}W cm^{-2} فإن الكفاءة من أجل تحول طاقة الليزر إلى إلكترونات سريعة، وبالتالي إلى أشعة غاما تزداد، وإذا استمر تطور تقانة الليزر بالسرعة الحالية، فيمكننا أن نتخيل ليزرات متراصة تعطي حوالي جول واحد من الطاقة في نبضات أقل من 100 فمتوثانية وبسرعة تكرار حوالي 10 نبضات في الثانية. يمكن لمثل هذه الليزرات أن تنتج كمية مفيدة من النظير في حوالي يوم واحد بكلفة اقتصادية معتبرة أو قابلة للتطبيق.

لقد حصل الفريق المتعاون غلاسكو - رذرفورد - الكلية الملكية في الآونة الأخيرة على تمويل للتحري عن الطاقة التجارية لإنتاج حزمات من البروتونات بواسطة الليزر (~10^{19}Wcm^{-2}) ASTRA في مختبر رذرفورد أبليتون. سيتم الحصول على البروتونات من تأثر ضوء الليزر مع طبقة رقيقة من البلاستيك.

يمكن استخدام مثل هذه الحزم من البروتونات لإنتاج مصدرات للبوزترونات القصيرة العمر لاستعمالها في إصدار بوزترونات التصوير المقطعي الطبقي. إن هذه تقنية تشخيص طبية قوية إلا أن استخدامها محدود في الوقت الحاضرلأن النظائر المصدرة للبوزترونات المطلوبة يمكن الحصول عليها فقط بواسطة مسرّعات السيكلوترون أو مسرّعات فان دي غراف van de Graaff.

تُولّد الأيونات العالية الطاقة أيضاً في البقعة البؤرية لليزر، ويكون لهذه الأيونات القدرة على قَدْح تفاعلات انشطار في أهداف عناصر ثقيلة. وبصورة عامة، فإن استعمال نبضات ليزر قصيرة جداً ستكشف النظام تحت النانو ثانية في الفيزياء النووية، وستسمح أيضاً في التحري عن النظائر ذات العمر الفائق القِصر البعيدة عن الاستقرار.

مازالت هنالك، حتى في الشدات الأعلى أي حوالي 10^{21}W cm^{-2} وأكبر من ذلك، عمليات قد جرى التنبؤ في حدوثها. إن إنتاج الزوجين إلكترون -بوزترون، والذي شوهد سابقاً في ليفرمور (Physics World، أيار 1999) له الإمكانية لتأمين منابع حزم بوزترونات مفيدة. كذلك يُتوقع في مثل شدات الليزر العالية هذه لطيف الفوتون أن يمتد لطاقات عالية (فوق 140 MeV) كافية لتعطي خرج بيونات قابلة للقياس.

لقد عمل الفريق في RAL كثيراً لتمهيد الطريق أمام تطبيقات الليزرات في العمليات النووية. وبرفع درجة الـ VULCAN في السنتين القادمتين إلى شدات أعلى فإن من الممكن توقع تطورات مثيرة أبعد في هذا الحقل من المعرفة.■

☆ ★ ☆

هيئة الطاقة الذرية السورية مكتب نظم المعلومات http://serversmiso.aecs.sy

تعريف بمنشورات هيئة الطاقة الذرّية المعدّة للبيع

Publications of the AEC of SYRIA

منشورات عامة	الشكل	السعر (ل.س من داخل القطر) ($ من خارج القطر)
1- النظائر المشعة في الحياة اليومية Isotopes Day Life (ترجمة دائرة الإعلام والترجمة والنشر)	كتيب مطبوع Printed Book	15 ل.س $ 3
2- ما يجب أن يعرفه الطبيب الممارس في معالجة المتعرضين للإشعاع What The General Practitioner (MD) Should Know About Medical Handling of overexposed Individuals (ترجمة قسم الوقاية والأمان)	كتيب مطبوع Printed Book	40 ل.س $ 9
3- مستويات التدخل المقدرة لمواجهة تلوث الطعام بالنظائر المشعة (إرشادات للتطبيق بعد الانتشار الواسع للتلوث الإشعاعي الناتج عن حادث نووي كبير) Derived Intervention Levels for Radionuclides in Food (ترجمة الدكتور إبراهيم عثمان)	كتاب مطبوع Printed Book	80 ل.س $ 7
4- تشعيع الغذاء (تقنية لحفظ الغذاء وتحسين سلامته) Food Irradiation (A technique for Preserving and Imporoving the Safety of Food) (ترجمة الدكتور نجم الدين شرابي)	كتاب مطبوع Printed Book	160 ل.س $ 15
5- نظرية الكم وقصتها الغريبة L'étrange Histoire des Quanta (ترجمة محمد وائل الأتاسي)	كتاب مطبوع Printed Book	250 ل.س $ 25
6- حقائق حول تشعيع الأغذية سلسلة نشرات الحقائق صادرة عن المجموعة الاستشارية الدولية لتشعيع الأغذية Facts about Food Irradiation (ترجمة الدكتور نزار حمد)	كتاب مطبوع Printed Book	160 ل.س $ 8
7- الإشعاع: الجرعات -الآثار -المخاطر Radiation: Doses, Effects, Risks (ترجمة الدكتور إبراهيم عثمان-المهندسة مها عبد الرحيم)	كتاب مطبوع Printed Book	100 ل.س $ 10
8- دروس من حوادث وقعت في منشآت التشعيع الصناعية Lessons Learned From Accidents In Industrial Irradiation Facilities (ترجمة الدكتور محمد قعقع)	كتيب مطبوع Printed Book	100 ل.س $ 6
9- الاختبارات اللاإتلافية: طريقة التصوير الشعاعي الصناعي Industrial Radiography Method (تأليف الدكتور وفيق حرارة)	كتاب مطبوع Printed Book	200 ل.س $ 10
10- الطاقة الذرّية لأغراض عسكرية Atomic Energy for Military Purposes (ترجمة مكتب الترجمة والتأليف والنشر)	كتاب مطبوع Printed Book	300 ل.س $ 25
11- معجم المصطلحات العلمية والتقنية (إنكليزي-عربي) Dictionary of Trchnical Terms in the Field of Atomic Energy (طبعة جديدة موسعة)	كتاب مطبوع Printed Book	300 ل.س $ 25

ملاحظة: يمكن طلب هذه المنشورات من مكتب الترجمة والتأليف والنشر في هيئة الطاقة الذرّية -دمشق -منزة فيلات غربية شارع الخنساء -رقم 10 -هاتف 6111926/7.

LASING DEMONSTRATED IN TINY CAVITIES MADE WITH PHOTONIC CRYSTALS*

B. GOSS LEVI

ABSTRACT

Lasing can be achieved in the micro-cavities formed as a result of defects in periodic array of holes being made in a photonic crystal. The size of cavity will be smaller than the square of half the wavelength needed to be obtained. The optical waves scatter within such periodic structure of holes leading to a destructive interference which abolishes specific wavelength and forms a photonic band gap similar to that of the electronic waves in semiconductors. Researchers are currently studying the probable structures of this band gap with the hope to exploit them for the control of photons and, hence, be able to produce lasing with specific wavelengths.

Key Words

lasing, photonic cristal, photonic defect, photonic bandgap, optical cavity, light confinement.

* This article appeared in *Physics Today,* September 1999. It has been translated into Arabic by Editorial Board, Atomic Energy Commission of Syria.

☆ ★ ☆

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

Key Words

continued laser, pulsed laser, femtosecond laser, pumping laser, industrial applications.

⋆ This article appeared in *Optique et Photonique*, 4/1999. It has been translated into Arabic by Editorial Board, Atomic Energy Commission of Syria.

BIOMEDICAL OPTICS⋆

P. French

Department of Physics, Imperial College of Science Technology and Medicine, London UK

ABSTRACT

Recent advances in lasers, optics and information technology will make biomedical imaging faster and cheaper, and will also reduce the need for surgery

Key Words

optical spectroscopy, fluorescence imaging, wavelength-ratiometric imaging, fluorescence-lifetime imaging (FLIM), 3-D spectroscopic imaging, confocal fluorescence microscopy, two-photon microscopy, scanning probe microscopy, optical coherence tomography (OCT), thick-tissue optical imaging.

⋆ This article appeared in *Physics World*, June 1999. It has been translated into Arabic by Editorial Board, Atomic Energy Commission of Syria.

LASER PULSES COMPRESS THE MATTER⋆

Planet cores in laboratory

M. KOENIG, A. BENUZZI-MOUNAIX

Ecole polytechnique, Palaiseau-France

D. BATANI

l'université de Milan-Bicocca-Italie

ABSTRACT

Temperature and pressure inside huge planets, like Saturn, cannot be compared to those on earth, and the elements that are composed of will have unusual properties. Hydrogen and water will be metallic. To ensure that, the physicists produce enormous pressures in the laboratory by hitting the targets using high-power-lasers.

Key Words

metallic state of materials, shock wave, high power lasers, inertial confinement fusion, Hugoniot - Rankine equations.

⋆ This article appeared in *La Recherche*, Vol. 330, April 2000. It has been translated into Arabic by Dr. M. B. AL-Soos, Department of Physics, Atomic Energy Commission of Syria.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

COPPER VAPOUR'S LASER AND MATRICE OF 3500 MOSFETs TRANSISTORS: RELIABILITY*

D. CHATROUX
CEA Valrho, Pierrelatte, France.

ABSTRACT

The Copper Vapour Laser (CVL) is an impulse gas laser generating two wavelengths within green and yellow (510 nm and 578 nm). This laser allows the pumping of colouring laser chains of high power on the plants of isotope separation process by laser, SILVA, which is developed at the French Atomic Energy Commissariat, in association with COGEMA.

Key Words

isotopic separation, copper vapour laser, SILVA, commutation by transistors matrice, injected oscillator module, laser head, electric impulse, reliability.

* This article appeared in *Optique et Photonique*, 4/1999. It has been translated into Arabic by Translation, Composition & Publication Office, Atomic Energy Commission Of Syria.

URANIUM ENRICHMENT BY LASER: SILVA PROCESS*

A. ROSENGARD, PH. ELIAS
Commissariat à l'Énergie Atomique Saclay-France

ABSTRACT

About 15 years ago, the Atomic Energy Commissariat (AEC) has decided to develop uranuim enrichment process SILVA based on selective photoionization of atomic vapour by laser. This decision has led to an important research programme, jointly carried out by the French AEC and the industrial operator COGEMA. After having described the principle of this process and the various functions that production installion must fill up, we will also present in detail photons-atoms interaction aspects, and the interaction between laser and optics.

Key Words

uranium enrichment, selective photoionization, atomic vapour, SILVA process, separator, collector.

* This article appeared in *Optique et Photonique*, 4/1999. It has been translated into Arabic by Editorial Board, Atomic Energy Commission of Syria.

USING FEMTOSECOND LASER IN INDUSTRY*

É. AUDOIRD
Laboratoire Traitement du Signal et Insttumentation, Université Jean Monnet, Saint Etienne-France

ABSTRACT

At present, laser techniques are developing in industry particularly in the field of welding and machining. At Saint - Etienne in France a femtosecond laser machine is developed and designed for industrial applications.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

review the results obtained in these two directions, then we explain why the performances of the diode lasers based on ZnSe stagnate while rapid progress has been achieved with the diode lasers based on GaN. This direction is affirmed to be the most promising.

Key Words

diode laser, heterostructure, epitaxial substrate, ohmic contact, quantum well, energy gap.

⋆ This article appeared in *Optique Et Photonique*, 4/1999. It has been translated into Arabic by Dr. B. Maassarani, Department of Physics, Atomic Energy Commission of Syria.

LASER MARKING⋆

R. STEVENSON

is now director of marketing services at Control Micro Systems Inc. in Orlando

ABSTRACT

Both laser marking designs, the beam-steered and the mask, provide a better combination of speed, permanence, and imaging flexibility than other marking techniques. The beam-steered design provides superior imaging and material penetration and the mask design provides superior speed. The Nd-YAG laser offers a higher peak power and a greater range of adjustable process variables to achieve a specific material modification but at a correspondingly higher purchase price than the CO_2 laser.

Key Words

laser marking, Nd-YAG laser, CO_2 laser.

⋆ This article appeared in *Industrial Laser Review*, December 1998. It has been translated into Arabic by Dr. M. B. AL-Soos, Department of Physics, Atomic Energy Commission of Syria.

ISOTOPIC SEPARATION BY SOLID LASERS PUMPED WITH DIODES⋆

P. YVES THRO, B. LE GARREC, PH. DUPUY, M. GILBERT

ABSTRACT

Recently, pumping of solid lasers has developed greatly. This development is linked essentially with the reduction of powerful laser diodes prices. At first these lasers were limited to military and space applications; fields where the performances prevail over costs. At present they reach medical and industrial applications markets. One of these applications is the programme of SILVA technology in which the solid lasers may be interesting alternative to copper vapour lasers exploited at present for optical pumping of colouring lasers in SILVA technique.

Key Words

isotopic separation, solid laser, laser pumping, laser diode, resonating cavity, Nd- YAG laser, frequency doubling cristal.

⋆ This article appeared in *Optique et Photonique*, 4/1999. It has been translated into Arabic by Editorial Board, Atomic Energy Commission of Syria.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

wavelengths are excited independently of each other and separated in time. This may have considerable impact on various semiconductor with differential absorption spectroscopy.

Key Words

bidirectional laser, positive bias voltage, negative bias voltage, positive polarity, negative polarity, pulsed mode, optical power, photon-assisted tunneling, threshold gain.

⋆ This article appeared in *Science*, Vol. 286, 22 October 1999. It has been translated into Arabic by Editorial Board, Atomic Energy Commission of Syria.

LASERS AND OPTICS⋆

V. JAMIESON

ABSTRACT

Advances in lasers and optics have led to widespread applications in science, technology and medicine that will continue to flourish in the 21st century

⋆ This introduction appeared in *Physics World*, June 1999. It has been translated into Arabic by Editorial Board, Atomic Energy Commission of Syria.

QUANTUM CASCADE LASERS⋆

F.CAPASSO, C.GMACHL

are in the semiconductor physics research department

D.L.SIVCO, A.Y.CHO

are in the semiconductor research laboratory, Bell Laboratories, Lucent Technologies, Murray Hill, NJ 07974, US.

ABSTRACT

Advances in quantum-mechanically designed materials have led to fundamentally new high-power semiconductor lasers that are suitable for a broad range of applications.

Key Words

laser, quantum cascade laser, quantum well laser, supperlattice, applications, chemical sensing, distributed-feedback laser

⋆ This article appeared in *Physics World*, June 1999. It has been translated into Arabic by Editorial Board, Atomic Energy Commission of Syria.

BLUE - UV DIODE LASERS: STATE OF THE ART⋆

E. TOURNIÉ

Centre de Recherche sur l'Hétéro-Epitaxie et ses Applications,

Centre National de la Recherche Scientifique-France

ABSTRACT

Many applications are foreseen for compact lasers emitting in the blue or UV. This has initiated important research efforts aiming at obtaining such components. One promising way is the fabrication of semiconducting diode lasers. Two families of materials, based on ZnSe or GaN, are expected to allow the fabrication of such lasers. We first

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

Key Words

laser diode, light-emitting diode, lithography, epitaxy, laser stripe, double heterostructure.

⋆ This article appeared in *Laser Focus World*, Vol. 34, No. 1, 1998. It has been translated into Arabic by Dr. H. Hamadeh, Department of Physics, Atomic Energy Commission of Syria.

POLYMER DIODES⋆

Semiconducting polymers are moving out of the research lab and into the market-place as industry realizes the commercial potential of polymer-based LEDs, displays and photovoltaics

R. FRIEND
Cavendish Laboratory-UK
J. BURROUGHES
Cambridge Display Technology-UK
T. SHIMODA
Seiko-Epson Corporation, Suwa-Shi, Nagano-Ken-Japan

ABSTRACT

Semiconducting polymers can be used as the active element in light - emitting diodes (LEDs). The most widely used polymer is poly (phenylene vinylene) or PPV. The "quantum efficiency" of the early devices was low and the number of the emitted photons relative to the number of the charges injected was few. the improvements have been due to our better understanding of the Chemistry of the electrode / polymer interfaces, which has allowed the newer devices to inject both electrons and holes easily into the semiconductor layer. The performance of polymer LEDs has advanced rapidly, so both organic and inorganic light - emitting diodes are now so efficient as a traditional tungsten light bulb. Polymer LEDs will really take off if they can be used in a full - colour displays, which have a market that is estimated to be worth as much as $40 bn a year. Finally, a new method based on the ink-jet printing techniques was developed to integrate the three primary colours together onto one screen.

Key Words

LEDs, photovoltaics, spin-coating, efficiency, passive matrix, active matrix, heterojunction

⋆ This article appeared in *Physics World*, June 1999. It has been translated into Arabic by Editorial Board, Atomic Energy Commission of Syria.

BIDIRECTIONAL SEMICONDUCTOR LASER⋆

C. GMACHL, A. TREDICUCCI, D. L. SIVCO, A. L. HUTCHINSON, F. CAPASSO, A. Y. CHO
Bell Laboratories, Lucent Tecchnologies, 600 Mountain Avenue, Murray Hill, NJ, USA

ABSTRACT

A semiconductor laser capable of operating under both positive and negative bias voltage is reported. Its active region behaves functionally as two different laser materials, emitting different wavelengths, depending on the design, when biased with opposite polarities. This concept was used for the generation of two wavelengths (6.3 and 6.5 micrometers) in the midinfrared region of the spectrum from a single quantum cascade laser structure. The two

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

THE SMALLER, CHEAPER, FASTER WORLD OF THE LASER DIODE*

Semiconductor techniques have forged the tiny laser diode into a powerful engine for the information superhighway

T. V. HIGGINS
Contributing Editor

ABSTRACT

Semiconductor lasers have been evolved from the light emitting diode (LED) by getting a population inversion and applying an optical feedback on it.

The earliest semiconductor lasers required fantastically high current densities to reach laser threshold, therefore they had to operate in pulsed mode. In fact, it was not until 1970 that continuous room-temperature operation became possible through the development of double heterostructures. To achieve even greater efficiency the laser diodes were made using stripe geometry technique. To reach higher gain and much lower threshold currents, the single-quantum-well (SQW) laser and later on a multiple quantum well (MQW) laser were developed. These types of laser diodes have an edge laser emission. Therefore the development of new type of laser cavity such planar-cavity and vertical-cavity led to fabricate surface emitting lasers PCSEL and VCSEL. These lasers have tremendous potential for optoelectronic applications such as massive parallel processing, high speed optical storage, and fiberoptic network interconnects, and other promotive applications.

Key Words

photodiode, light emitting diode, laser diode, semiconductor laser.

* This article appeared in *Laser Focus World*, April 1995. It has been translated into Arabic by Dr. Sh. Hawat, Department of Physics, Atomic Energy Commission of Syria.

DIODE LASERS LIGHT UP DISKS, COMMUNICATIONS, AND PRINTERS*

ERIC J. LERNER
contributing editor

ABSTRACT

The progress in the development of semiconductor laser in the last few decades made tremendous steps forwards. Today this kind of laser is at the heart of electronic industry. The laser diode is small, inexpensive and can be integrated in nearly every simple device. In this paper we give a short review of semiconductor laser. We will describe its applications, principles, materials, structures and its fabrication.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

INFRARED GAS LASERS COVER A WIDE SPECTRUM*

J. HECHT
Contributing Editor

ABSTRACT

Although carbon dioxide lasers are the most common, many other molecular gas lasers that emit between 5 μm and 1mm are available.

Key Words

gas laser, infrared spectrum, vibrational-rotational transitions, CO_2 laser, nitrous oxide laser.

* This article appeared in *Laser Focus World*, March 1993. It has been translated into Arabic by Editorial Board, Department of Physics, Atomic Energy Commission of Syria.

THE THREE PHASES OF LASERS: SOLID-STATE, GAS, AND LIQUID*

T. V. HIGGINS
Contributing editor

ABSTRACT

Since the first demonstration of the ruby laser, researchers have discovered laser action in a variety of substances and in nearly every state of matter. These lasers cover the spectrum from the UV to the far-IR. This article focuses on some of the most successful solid- state, liquid, and gas laser designs.

Key Words

laser action, solid-state lasers, dye lasers, gas lasers.

* This article appeared in *Laser Focus World*, July 1995. It has been translated into Arabic by Dr. M. D. Zedan, Department of Physics, Atomic Energy Commission of Syria.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

ABSTRACTS OF THE SUBJECTS PUBLISHED IN THIS ISSUE

ARTICLES

THE BIRTH OF THE LASER*

P. HILL

ABSTRACT

The development of science and technology is intimately dependent on people, their interactions and mutual stimulation. The laser came not from an isolated idea but from a scientific milieu, curiosity and struggles. Here, Charles H Townes tells the story of the laser.

Key Words

story of the laser, radar system, maser, short wavelengths, stimulated emission, ruby laser, helium neon laser.

* This article appeared in *Opto & Laser Europe*, December 1999.

THE PRINCIPLE OF LASER*

G. CORNILLAUT
Compagnie Industrielle des Lasers, Marcoussis, France

ABSTRACT

The laser is a type of non - classical source: it doesn't work like all other active electronics systems (vacuum tubes, transistors) by means of interactions between applied electric fields and mobile charges (electrons). It's a kind of stimulated emission.

Key Words

energy levels, active medium, reflecting mirrors, absorption, excited atoms, population inversion, stimulated emission, photons, electrons, laser sources.

* This article appeared in *Optique Et Photonique*, April 1999. It has been translated into Arabic by Translation, Composition & Publication Office, Atomic Energy Commission of Syria.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

3- THE QUEST FOR QUANTUM COMPUTERS.. . . . . *OLE MILLENNIUM ISSUE* . . .111

4- NUCLEAR PHYSICS WITH LASERS. . . . . *PHYSICS WORLD* 113

ABSTRACTS OF THE SUBJECTS PUBLISHED IN THIS ISSUE IN ENGLISH. 124

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

CONTENTS

ARTICLES

- ☐ THE BIRTH OF THE LASER. . . . . P. HILL. 9
- ☐ THE PRINCIPLE OF LASER . . . . . G. CORNILLAUT. 15
- ☐ INFRARED GAS LASERS COVER A WIDE SPECTRUM . . . . . J. HECHT. 18
- ☐ THE THREE PHASES OF LASERS: SOLID-STATE, GAS, AND LIQUID . . . . . T. V. HIGGINS. 23
- ☐ THE SMALLER, CHEAPER, FASTER WORLD OF THE LASER DIODE . . . . . T. V. HIGGINS. 29
- ☐ DIODE LASERS LIGHT UP DISKS, COMMUNICATIONS, AND PRINTERS . . . . . E. J. LERNER 35
- ☐ POLYMER DIODES. . . . . R. FRIEND et al. 40
- ☐ BIDIRECTIONAL SEMICONDUCTOR LASER. . . . . C. GMACHL et al 47
- ☐ LASERS AND OPTICS. . . . . F. JAMIESON 52
- ☐ QUANTUM CASCADE LASERS . . . . . F. CAPASSO et al. 54
- ☐ BLUE-UV DIODE LASERS: STATE OF THE ART . . . . . E. TOURNIE 63
- ☐ LASER MARKING. . . . . R. STEVENSON. 70
- ☐ ISOTOPIC SEPARATION BY SOLID LASERS PUMPED WITH DIODES . . . . . P. YVES THRO et al 73
- ☐ COPPER VAPOUR'S LASER AND MATRICE OF 3500 MOSFETs TRANSISTORS: RELIABILITY . . . . . D. CHATROUX. 78
- ☐ URANIUM ENRICHMENT BY LASER: SILVA PROCESS . . . . . A. ROSENGARD, PH. ELIAS . 83
- ☐ USING FEMTOSECOND LASER IN INDUSTRY. . . . . E. AUDOIRD. 88
- ☐ BIOMEDICAL OPTICS . . . . . P. FRENCH. 92
- ☐ LASER PULSES COMPRESS THE MATTER PLANET CORES IN LABORATORY . . . . . M. KOENIG et al 99
- ☐ LASING DEMONSTRATED IN TINY CAVITIES MADE WITH PHOTONIC CRYSTALS . . . . . B. GOSS LEVI 104

NEWS

1- FROM LASER DIODES TO QUANTUM CASCADES . . . . . *OLE MILLENNIUM ISSUE* . . 109

2- A CHEAPER WAY TO SEPARATE ISOTOPES?. . . . . *SCIENCE* 110

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

Notice: Scientific matters and different inquiries; subscriptions, address changes, advertisements and single copy orders, should be addressed to the journal's address:
Damascus, P.O. Box 6091 Phone 6111926/7, Fax 6112289, Cable; TAKA.

Subscription rates, including first class postage charges: *a) Individuals* *$ 30 for one year*
b) Establishments *$ 60 for one year*
c) For one issue *$ 6*

It is preferable to transfer the requested amount to:
The Commercial Bank of Syria N-13 P.O. Box 16005 Damascus-Syria account N-3012\2
Cheques may also be sent directly to the journal's address.

The views expressed in any signed article in this journal do not necessarily represent those of the AEC of Syria, and the commission accepts no responsibility for them.

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية

AALAM AL-ZARRA

JOURNAL OF THE ATOMIC ENERGY COMMISSION OF SYRIA

A journal published in Arabic six times a year, by the Atomic Energy Commission of Syria. It aims to disseminate knowledge of nuclear and atomic sciences and of the different applications of atomic energy.

N° 68 | 15th Year | JULY/AUGUST 2000

Managing Editor

Dr. Ibrahim Othman

Director General of A. E. C. S.

Editorial Board

Dr. Tawfik Kassam *(Editor In-Chief)*

Dr. Mohammed Ka'aka ***Dr. Fouad Al-Ijel***

Dr. Ahmad Haj Said ***Dr. M. Fouad Al-Rabbat***

Layout and Printing Supervision

Roula Al-Khatib

http://serversmiso.aecs.sy مكتب نظم المعلومات هيئة الطاقة الذرية السورية