



Solid-State Laser Engineering

Walter Koechner

7. التأثيرات البصرية الحرارية Thermo-Optic Effects

عملية الضخ الضوئي في مادة ليزر الحالة الصلبة ترتبط مع توليد الحرارة لعدد من الأسباب هي:

(1) الطاقة المختلفة للفوتونات بين حزم الضخ ومستوى طاقة الليزر العلوي والذي يفقد على شكل حرارة في البلورة المستضيفة، وبالمثل بين الطاقة المختلفة بين مستوى الطاقة السفلي لليزر ومستوى الطاقة الأرضي يكون حرارياً. الفرق بين الضخ وطاقة الفوتونات والتي تعرف باسم العيب الحراري الكوانتي، ويعتبر المصدر الأساسي للحرارة في ليزرات الحالة الصلبة.

(2) بالإضافة إلى الاسترخاء الغير مشع للفوتونات من مستوى الطاقة العلوي لليزر إلى المستوى الأرضي، يسبب إخماد مركز، والاسترخاء الغير مشع للفوتونات من مستوى الضخ إلى المستوى الأرضي سوف يولد حرارة في المادة الفعالة لليزر.

(3) أنظمة الضخ التي تعمل بواسطة ضوء الفلاش، فان توزيع الطيف الواسع للمصدر الضوئي المستخدم في الضخ يسبب امتصاص مقدار محدد بواسطة مادة الليزر، وبالأخص في منطقة فوق البنفسجي ومنطقة تحت الحمراء من طيف الضوء المستخدم. أيضا امتصاص إشعاع الضوء بواسطة الذرات الشائبة تزيد من الحرارة.

إن التزايد في درجة الحرارة في مادة الليزر نتيجة للحرارة من الممكن أن تؤدي إلى حدوث شقوق، والتي تحدد الحد الأقصى لمتوسط الطاقة التي نحصل عليها من مادة الليزر. وتحت حد إجهاد حدوث الشقوق فان العدسة الحرارية و ظاهرة birefringence تؤثر بشكل عكسي على جودة الليزر. كذلك، كنتيجة للعدسة الحرارية، فان نقطة تشغيل المذبذب داخل مخطط الاستقرار تصبح دالة في الطاقة الداخلة. ولهذا فان جودة شعاع الليزر الناتج وتركيب الأنماط يصبح دالة في الطاقة الداخلة لان العدسة الحرارية يمكن أن تعوض فقط عن مستوى الطاقة الداخلة الثابت.



إزالة الحرارة بشكل فعال والتقليل من تأثيرات الحرارة التي تنتج عن تزايد درجات الحرارة عبر المساحة الفعالة لمادة الليزر تكون في العادة العامل الأساسي عند تصميم أنبوبة الليزر لأنظمة الطاقة العالية.

القدرة على توجيه مقدار الحرارة المتزايد في مادة الليزر أمر مهم للحصول على مؤشر لتأثير العدسة الحرارية التي يمكن أن تحسب لساق الليزر أو شريحة الليزر. وفي الأبحاث العلمية لليزر فان العديد من المتغيرات تم إدخالها لتحديد مقدار الحرارة المتبددة بواسطة مادة الليزر. والحمل الحراري الجزئي η_h يعرف على إنه النسبة بين الحرارة الناتجة وطاقة الضخ الممتصة. وطريقة إضافية لتحديد الحرارة المتولدة يمكن أن نعبر عنها بالمتغير χ ، تعرف على إنها النسبة بين الحرارة المتكونة إلى الطاقة المخزنة في مستوى طاقة الليزر العلوي.

الحد الأدنى النظري η_h لليزر Nd:YAG الذي يعمل عند $1.6 \mu m$ وطاقة ضخ بواسطة مصدر ليزر دايود يعمل عند $898 \mu m$ يكون $\eta_h = 1 - \lambda_p / \lambda_L = 0.24$ حيث أن $\eta_h = \lambda_p / \lambda_L$ هي معاملات ستوكس والتي نوقشت في الجزء 1.4.3 وكلا من λ_L و λ_p هي الأطوال الموجية للضخ ولشعاع الليزر، على التوالي.

بلورة Yb:YAG تشع ليزر عند $1.03 \mu m$ ويمكن أن تضخ بواسطة ضوء دايود عند طول موجي 943 nm. وبسبب الاختلاف الصغير بين الضخ وطاقة فوتون الليزر فان الحمل الحراري النظري يكون فقط $\eta_h = 0.09$.

في ضوء الفلاش ومصابيح التفريغ الكهربائي باستخدام غاز الكريبتون فان الإثارة الضوئية اقل كفاءة بالمقارنة مع الضخ بواسطة ليزر الدايدود لأنه يحتوي على إشعاع ذو طول موجي قصير وبشده عالية. ولهذا فان الفرق بين طاقة الضخ وطاقات فوتونات الليزر كبيرا وهذا يؤدي إلى تشوه حراري كمي ملحوظ. وفي الليزر الحقيقية فانه هناك أيضا عدد من عمليات الاضمحلال الغير باعثة للإشعاع الكهرومغناطيسي والذي يولد حرارة ولكن لا يساهم في شعاع الليزر الناتج.

التبريد المركز يقلل من كثافة انقلاب التعداد ويقلل بشكل سريع عمر الفلوريسنت لمستويات التطعيم فوق 1% في Nd:YAG. وهذا يؤدي إلى الاضمحلال بدون إشعاع كهرومغناطيسي للأيونات المثارة من مستوى الليزر العلوي إلى المستوى الأرضي. وفي المرجع (1.7) عرض مختصر للنتائج المنشورة.



مصدر آخر للحرارة المتولدة هي تلك التي نشأت بواسطة المواقع الغير مصدرة للإشعاع الكهرومغناطيسي. والتي تعرف باسم ايونات نيوديميوم المعتمدة، أو المواقع الميتة وهي ايونات تمتص فوتونات الضخ ولكن لا تساهم في عملية انقلاب التعداد. وهذا يؤدي إلى كفاءة ضخ اقل من الوحدة (2.7).

تم قياس الجزء الممتص من طاقة الضخ الذي يتحول إلى حرارة ليكون في حدود 30 إلى 32% لمختلف أنواع ليزرات Nd:YAG التي تضخ عند طول موجي 808 nm (3.7). والقيم الافتراضية لـ η_h والتي اشتقت من القياسات الحرارية أيضا تقترح قيمة وهي $\eta_h=0.32$ لـ Nd:YAG و $\eta_h=0.11$ لـ Yb:YAG تضخ عند 943 nm (4.7).

في الجزء 2.4.3 قمنا بدمج الخسارة الناتجة عن العمليات الغير مشعة في الكفاءة الكوانتية η_Q . ولـ Nd:YAG استخدمنا $\eta_Q=0.9$ (انظر الشكل 6.69)، والذي يعطي حمل حراري بقيمة $\eta_h=1-\eta_Q\eta_s=0.32$ للضخ بواسطة الدايدود، وهذا متناسق مع القيم المقاسة.

المتغير χ يحدد عادة بواسطة قياس تكبير الإشارة الصغيرة small-signal gain بمجس الشعاع عند نهاية نبضة الضخ. والطاقة المختزنة تحسب من التكبير، والطاقة المختزنة تحسب فيما بعد من التكبير، وتنتج الحرارة المتولدة من الارتفاع في درجة الحرارة في المادة. وفي نمط الطاقة المختزنة فان قيمة χ تعتمد على طول نبضة الضخ وذلك بسبب الفقد في الفلوريسنت (انظر 35.3). وبالتشغيل في نمط الطاقة المختزنة فان قيمة $\chi=1.1$ تم قياسه لنبضة ضخ فترة عمرها 200 μs (5.7).

في الليزرات التي تعمل بضخ مصباح الفلاش، فان التشوه الحراري الكوانتمي يكون كبيرا هذا بالإضافة إلى العمليات الغير مشعة للفوتونات التي سبق وان وصفت من قبل فان هناك حرارة إضافية من امتصاص إشعاع الضخ بواسطة مادة الليزر والامتصاص الإضافي الناتج بسبب الذرات الشائبة والمراكز اللونية. القيم المقاسة لـ χ تقع بين 2.9 و 3.3 لـ Nd:YAG وتكون من 1.6 إلى 3.0 لـ Nd:phosphate glass المطعمة بالنيوديميوم بنسبة 3-6% (6.7,7).

مقارنة قيم χ المقاسة في حالة الضخ بواسطة ضوء الفلاش وضخ الدايدود لليزر Nd:YAG تقترح أن الضخ بالدايدود ينتج فقط ثلث الحرارة في البلورة بالمقارنة مع أنظمة الضخ بواسطة الفلاش.



من مقدار η_h و χ فانه يمكن تقدير مقدار الحرارة المتولدة في مادة الليزر بالنسبة إلى شعاع الليزر الناتج من نظام الليزر. والطاقة الممتصة في عنصر الليزر تتحول إلى قناة حرارية، وانبعاث استحثائي، وفلوريستنت. وفي حالة التشبع القوي للانبعاث الاستحثائي فان الفلوريستنت يصبح غير مهماً فقط الايونات المثارة الموجودة خارج الحجم المشغول بالأنماط الاهتزازية سوف يسترخي عن طريق الفلوريستنت إلى مستوى الطاقة الأرضي. وعلى سبيل المثال، من تعريف η_h فان نسبة الحرارة إلى كثافة طاقة الانقلاب المتوفرة للإثارة هي $\eta_h/(1-\eta_h)$. إذا حسبنا الخسارة في المذبذب والتي نعبر عنها بكفاءة الارتباط η_c وتداخل بمقدار اقل من الوحدة لمنطقة التكبير مع أنماط المذبذب نعبر عنها بـ η_B (انظر الجزء 1.4.3) نحصل على، للنسبة بين حرارة الحمل إلى طاقة الليزر الخارجة،

$$\frac{P_h}{P_{out}} = \frac{\eta_h}{\eta_c \eta_B (1 - \eta_h)}. \quad (7.1)$$

هذه المعادلة تمثل الحد الأدنى لأنها لا تحتوي على الجزء المتعلق بخسارة المذبذب والذي يظهر في صورة حرارة في مادة الليزر كنتيجة للامتصاص بين شعاع الليزر ومادة الليزر.

أمثلة نموذجية للحرارة المتولدة في عملية الليزر متوفرة في الجزء 2.6. وفي أنظمة الليزر ذات ضخ الدايدود تم تحليله كما في الشكل 6.69 حيث طاقته 7 W مرتبطة مع 5 W من الحرارة الناتجة عن التشوه الكوانتمي والعمليات الغير مشعة للضوء. هذا يمكن التعبير عنه بواسطة $\eta_h=0.32$. بالإضافة إلى ذلك فان جزء من الامتصاص المفقود يساهم أيضا في تسخين بلورة الليزر. دعنا نفترض أن 7 W من أشعة الليزر تنتج بواسطة ساق من Nd:YAG طوله 5 cm بمعامل امتصاص هو 10^{-3} cm^{-1} . إذا كان المذبذب يمتلك مرآة خارجية بانعكاسية قدرها 90%، فان الطاقة تكون 133 W، والتي تنتج تقريبا 0.7 W من الفقد بواسطة الامتصاص في ساق Nd:YAG. ولهذا، فانه في المثال المعطى في الشكل 6.69، فان الحرارة الكلية للبلورة تقريبا في حدود 5.7 W. وباستخدام هذا الرقم فان النسبة بين $P_h/P_{out}=0.81$ نحصل عليه من الليزر المفترض في الشكل 6.69.

وبصفة عامة، يمكن أن نفترض إن النسبة

$$P_h/P_{out} = 0.8-1.1 \quad (7.2)$$



لليزر Nd:YAG الذي يضخ بواسطة ليزر الدايدود، بالاعتماد على جودة البلورة والتداخل بين المذبذب ومنطقة الضخ. وفي ليزر Nd:YAG الذي يستخدم فيه مصباح الفلاش أو ضوء الكريبتون للضخ فان الحمل الحراري للبلورة يكون أعلى بثلاثة مرات

$$P_h/P_{out} = 2.5-3.3. \quad (7.3)$$

في مثال الطاقة المتدفقة في نظام مصباح التفريغ الكهربائي ملخصة في الجدول 5.6، والنسبة المقاسة لحرارة الحمل بالنسبة لليزر الخارج هي 2.5 تقريبا لشعاع متعدد الأنماط. وأي قياسات لتحسين جودة الشعاع سوف تثبت النتائج في تقليل التداخل بين نمط المذبذب ومنطقة الضخ وعليه فان النسبة بين حرارة الحمل والليزر الناتج سوف تزداد.

وفي هذا السياق فانه من المفيد أن نوضح أن الحمل الحراري في بلورة Nd:YAG تختلف تحت ظروف وجود ليزر أو عدم وجود ليزر. هذا يمكن ملاحظته بسهولة في ليزرات الشعاع المتصل cw أو في الليزرات ذات الضخ المتكرر إذا كانت عملية الليزر قد أوقفت بواسطة حجب الشعاع في المذبذب. وبعد عودة الليزر مرة أخرى، فان تباعد الشعاع سوف يظهر سلوك مؤقت حتى الحمل الحراري، وعليه فان العدسة الحرارية تصل إلى قيمتها النهائية.

الجزء الممتص من طاقة الضخ والتي تحولت إلى حرارة يمكن أن تحدد بواسطة Fan (4.7) لتكون $\eta_h=0.37-0.43$ بدون عملية الانبعاث الاستحثائي، وقيمة $\eta_h=0.32$ قدرت تحت ظروف عملية الليزر. السبب في هذا الاختلاف هو أن طاقة الضخ الممتصة والتي تحولت إلى حرارة تعتمد على إذا كان تعداد مستوى الطاقة العلوي يتأثر أثناء عملية الليزر أو يستنزف بواسطة عملية الفلوريسنت. والأخيرة تساهم بحوالي 10% في الاضمحلال الغير باعث للفوتونات والتي تساهم في الحمل الحراري. وفوق الحالة الحرجة بكثير، حيث أن تعداد مستوى الطاقة العلوي يستنزف بواسطة الانبعاث الاستحثائي وتكون عملية الفلوريسنت مهملة والحمل الحراري يقل.



1.1.7 التوزيع الحراري Temperature Distribution

سوف نبدأ أولاً باعتبار شرط الاستقرار الموجود في الليزر ذو الشعاع المستمر cw أو في حالة أنظمة الليزر التي تعمل بمعادلات تكرر عالية حيث تكون الفترات الزمنية بين نبضات الليزر قصيرة بالمقارنة مع ثابت الزمن الحراري لساق الليزر.

في حالة نبضة ليزر قصيرة فإن شكل التوزيع الحراري المؤقت في ساق الليزر يكون مرتبط بعملية التسخين السريع خلال نبضة الضخ ويكون الاضمحلال الحراري بطيء خلال طور التبريد. الانتقال الحراري في ساق الليزر يكون له ثابت زمني طويل أكثر من نبضة الضخ بمقدار يصل إلى مئات الميكروثانية أو أقل. ولأن عملية الليزر تحدث خلال نبضة الضخ، أو في حالة Q-switching حتى انتهاء النبضة، فإن الانتقال الحراري يمكن أن يهمل. في حالة نبضة ليزر قصيرة، يحدث تشويه بصري نتيجة للحرارة المتزايدة المتولدة بواسطة الامتصاص الغير منتظم لطاقة الضخ.

في حالة الليزر بمعدل تكرر صغير فإن التوزيع الحراري يكون له مركبة بسبب الحرارة الناتجة خلال نبضات الضخ والحرارة المتبقية والتي تكون بسبب الطاقة الحرارية المتبقية في ساق الليزر من النبضات التي سبقتها.

حالة الاستقرار Steady-State Condition

سوف نعتبر الحالة التي يكون فيها الحرارة المتولدة داخل ساق الليزر بواسطة امتصاص طاقة ضوء الضخ أزيلت بواسطة تدفق المبرد على امتداد السطح الاسطواني لساق الليزر. مع الافتراض بان الحرارة الداخلية المتولدة منتظمة وان التبريد على السطح الاسطواني للساق ذو طول لانهائي، فإن التدفق الحراري سيكون قطرياً، وتتأثر نهايته والتغير الصغير في درجة حرارة المبرد على امتداد المحور يمكن أن تهمل. توزيع درجة الحرارة القطرية في الساق الاسطوانية ذات الموصلية الحرارية K، بحيث أن الحرارة المتولدة منتظمة بمعدل Q لكل وحدة حجم، عند الحصول عليها من معادلة التوصيل الحراري في بعد واحد (8.7).

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \left(\frac{dT}{dr}\right) + \frac{Q}{K} = 0. \quad (7.4)$$



الحل لهذه المعادلة التفاضلية يعطي درجة الحرارة المستقرة عند أي نقطة على امتداد نصف القطر r . ومع تطبيق الشروط الحدية $T(r_0) = T_0$ ، حيث أن $T(r_0)$ هي درجة الحرارة عند سطح الساق و r_0 هي نصف قطر الساق، وهذا يؤدي إلى

$$T(r) = T(r_0) + \left(\frac{Q}{4K} \right) (r_0^2 - r^2). \quad (7.5)$$

شكل توزيع درجة الحرارة هو قطع ناقص، مع أعلى درجة حرارة عند مركز الساق. وتزايد درجة الحرارة داخل الساق ليس دالة في درجة حرارة سطح $T(r_0)$ الساق. الحرارة المتولدة لكل وحدة حجم يمكن التعبير عنها على النحو التالي:

$$Q = \frac{P_h}{\pi r_0^2 l}, \quad (7.6)$$

حيث P_h هي الحرارة الكلية المتبددة بواسطة الساق و l هي طول الساق. والفرق في درجة الحرارة بين سطح الساق ومركزه هي على النحو التالي:

$$T(0) - T(r_0) = \frac{P_h}{4\pi K l}. \quad (7.7)$$

الانتقال الحراري بين الساق والسائل المبرد يسبب في فرق في درجة الحرارة بين سطح الساق والمبرد. وحالة الاستقرار تنشأ عندما يصبح التبريد الداخلي P_h تساوي الحرارة المفقودة من سطح الساق بواسطة المبرد

$$P_h = 2\pi r_0 l h [T(r_0) - T_F], \quad (7.8)$$

حيث h هي معامل الانتقال الحراري السطحي و T_F هي درجة حرارة المبرد. ومع $A = 2\pi r_0 l$ هي مساحة سطح الساق، فإننا نحصل على

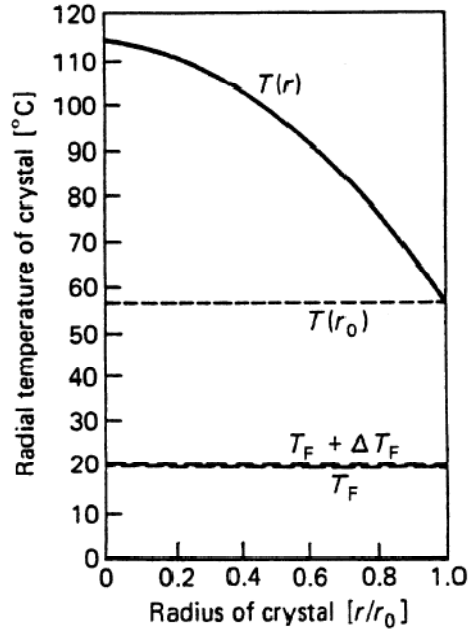
$$T(r_0) - T_F = \frac{P_h}{Ah}. \quad (7.9)$$



بدمج المعادلتين (7.7) و (9.7) نحصل على درجة الحرارة في وسط الساق،

$$T(0) = T_F + P_h \left(\frac{1}{4\pi Kl} + \frac{1}{Ah} \right). \quad (7.10)$$

وعليه، من الهندسة، والنظام المناسب لمتغيرات المادة، فان شكل التوزيع الحراري للبلورة يمكن ان يحدد، فيما عدا ان h يجب ان تحسب.



الشكل 1.7 توزيع درجة الحرارة القطري داخل بلورة Nd:YAG كدالة في نصف القطر. T_F هي درجة

حرارة المادة المبردة التي تدخل أنبوبة التدفق، و ΔT_F هي الزيادة في درجة الحرارة المحورية، و $T(r_0)$

هي درجة حرارة سطح الساق (9.7)

معامل الانتقال الحراري بالحمل h هي دالة في معدل التدفق المبرد، والخواص الفيزيائية للمبرد وساق الليزر، والشكل الهندسي لتجويف الضخ. الشروط الحدية لمعامل الانتقال الحراري هي إن ساق الليزر معزولة حراريا ($h=0$) أو التدفق الحراري الغير محدود من سطح الساق الى المبرد الحراري ($h=\infty$). للحالات العملية فان معامل الانتقال الحراري يكون في حدود $h=0.5-2 \text{ W cm}^{-2} \text{ C}^{-1}$.



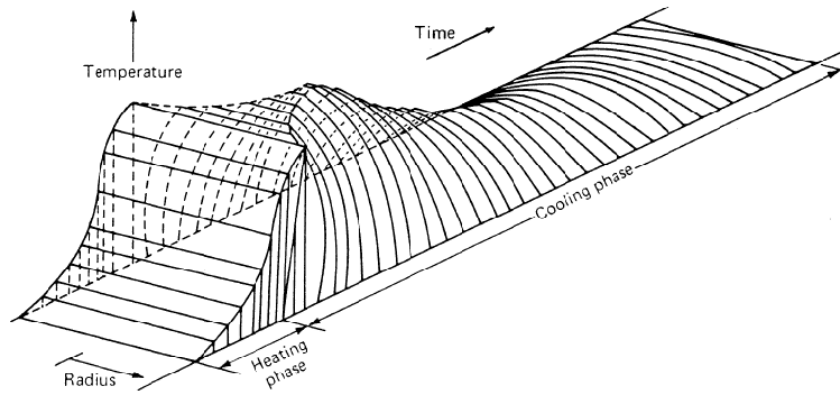
إذا افترضنا إن الماء يستخدم كمبرد، فإن التدفق المضطرب في الفراغ الحلقي المتكون بواسطة ساق الليزر داخل أنبوبة التدفق، فإننا يمكن أن نبسط التعبير المتعلق بـ h (9.7، 10).

$$h = 10.47 \times 10^{-3} \frac{(D_2/D_1)^{0.53}}{(D_2 - D_1)(D_2 + D_1)^{0.8}} f_r^{0.8} \quad (\text{W/cm K}), \quad (7.11)$$

حيث D_2 و D_1 هي قطر الساق والقطر الداخلي للأنبوبة المبردة بالسنتيمتر على التوالي، و f_r هي معدل التدفق بوحدة cm^3/s . وعلى سبيل المثال، فإن قطر الساق $D_1=0.3 \text{ cm}$ والقطر الداخلي $D_2=0.8 \text{ cm}$ لأنبوبة التدفق، ونحصل بالتالي على $h=1.8 \text{ W/cm}^2 \text{ K}$ لتدفق الماء بمعدل $150 \text{ cm}^3/\text{s}$.

الشكل 1.7 تبين مثلاً على شكل منحنى توزيع درجة الحرارة القطري في ساق Nd:YAG المحسوب من المعادلة (7، 10). الليزر، الذي يعطي طاقة بين 200 و 250 W كان يضخ بطاقة قدرها 12 kW. والمتغيرات التالية استخدمت في الحسابات العددية للحصول على شكل منحنى توزيع درجات الحرارة للبلورة: $l=7.5 \text{ cm}$ ، و نصف قطر الساق $r_0=0.32 \text{ cm}$ ، ونصف القطر الداخلي للأنبوبة التدفق $r_F=0.7 \text{ cm}$ ، والطاقة المتبددة بواسطة ساق Nd:YAG هي $P_h=600 \text{ W}$ ، ومعدل التدفق للمبرد هو $F_r=142 \text{ cm}^3/\text{s}$ ، ومعامل الانتقال الحراري $h=0.58 \text{ W/cm}^2 \text{ K}$ ، ودرجة حرارة السائل الذي يدخل التجويف هو $T_F=20^\circ\text{C}$.

وكما نرى من الشكل، فإن أكبر درجة حرارة للبلورة تحدث عند المركز هي 114°C . والتزايد الكبير للحرارة عند 57°C يحدث بين مركز البلورة والسطح هو المسئول عن الإجهاد العالي في المادة.



الشكل 2.7 الاسترخاء الحراري لنبضة وحيدة في ساق الليزر الاسطوانية الشكل.