



Self-Adjusting Compensating Thermal Lens to Balance the Thermally Induced Lens in Solid-State Lasers

العدسة الحرارية التعويضية ذات الضبط الذاتي لموازنة العدسة الحرارية المستحثة في ليزرات الحالة الصلبة

R. Weber, Thomas Graf, and Heinz P. Weber, *Fellow, IEEE*

الخلاصة

العدسة الحرارية هي موضوع حساس وذو أهمية خاصة في ليزرات الحالة الصلبة المضخة بواسطة الدايود ذو الطاقة العالية. وهنا في هذا البحث موضح المخطط المستخدم لعملية الضبط الذاتي لتعويض العدسة الحرارية المستحثة. وقد تم مناقشة المتطلبات لعنصر التعويض وتأثيره على المذبذب. وباستخدام عنصر تعويض مناسب وبالتصميم الجيد للمذبذب نتوقع أن نحصل على معاملات ثابتة لشعاع الليزر للحصول على طاقة بعدة كيلووات في مدى الضخ المستخدم.

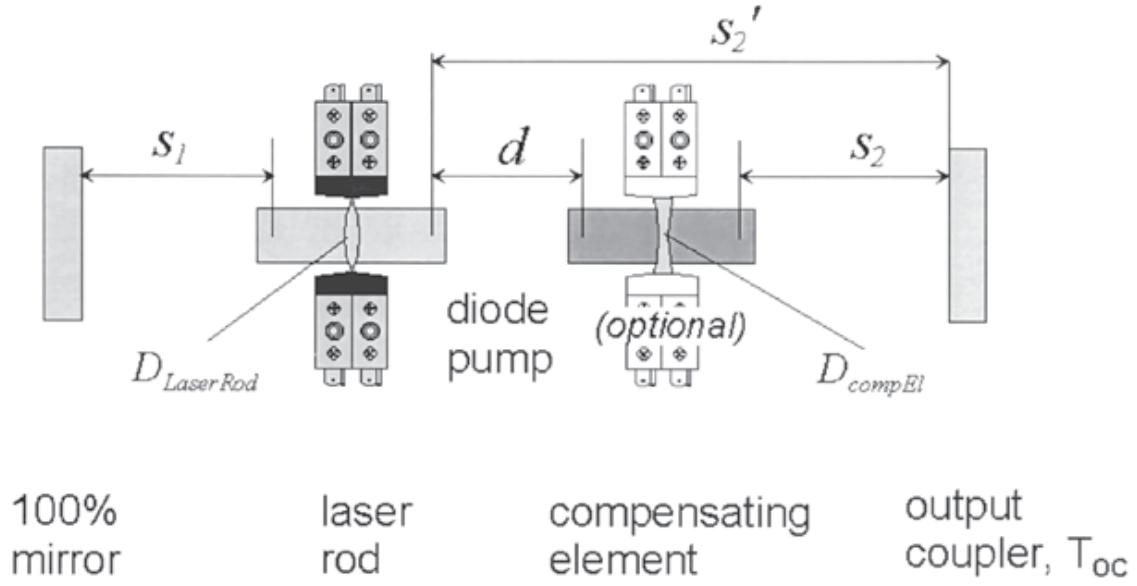
كلمات مفتاحيه – تعويض العدسة الحرارية، ليزرات حالة صلبة عالية الطاقة، العدسة الحرارية السالبة العدسة الحرارية.



1. المقدمة

الدايود عالي الطاقة المستخدم في ضخ ليزرات الحالة الصلبة يعتقد إنها العمود الفقري للجبل القادم لليزرات المستخدمة في التطبيقات الصناعية. الشعاع الناتج متعدد الأنماط يمتلك طاقة في حدود بضع مئات من الواط وقريبا سوف تصبح متوفرة تجارياً. عادة ما تصمم هذه الليزرات لتعمل عند أقصى طاقة ضخ ممكنة وبالتالي تكون الطاقة الناتجة اكبر ما يمكن أيضاً. وهذا أمراً ضرورياً لأن العدسات المستحثة حرارياً داخل تجويف الليزر، وبالأخص في مادة الليزر، سوف تقيد مدى استخدام هذه.

تنتج العدسة الحرارية من الاختلافات الموضوعية في داخل المواد البصرية. والتوزيع الغير متجانس في درجة الحرارة ناتج عن تسخين المادة، وهو ينتج عن امتصاص أما طاقة الضخ أو طاقة الليزر نفسها. وبصفة عامة العدسة الحرارية تحتوي على ثلاثة أجزاء هي: **الجزء الأول**، معامل الانكسار كدالة في درجة الحرارة، وفي هذا البحث العلمي نشير لهذا الجزء بـ dn/dT ، **الجزء الثاني** هو التمدد المحوري للمادة البصرية والذي يؤدي إلى حدوث انحناء عند النهايتين ويشار له بالتأثير الطرفي **end-effect**، **الجزء الثالث**، التشويه الموضعي (الإجهاد strain) للمادة الناتج عن الحرارة المستحثة بالإجهاد وتأثيرها على الأنظمة البصرية، والتي تكون مختلفة موضعياً حسب اتجاهات الاستقطاب المختلفة، ويشار لهذا الجزء بالانكسار المزدوج birefringence. في حين أن النقصان في إزالة الاستقطاب الناتج عن الانكسار المزدوج الحراري ظهر بنجاح في [1] ، [2]، انه يعوض عن التشويه الحادث في الطور الأمامي الناتج من اعتماد معامل الانكسار والتمدد للمادة على درجة الحرارة كبديل في تصميم مادة الليزر [3] ولكن لم يتم التوصل لحل بخصوص ساق الليزر.



الشكل 1. مخطط التعويض لتجوييف الليزر الداخلي باستخدام عدستين حراريتين، ساق الليزر ($D_{Laser Rod}$) وعنصر التعويض (D_{compEl}).

وعلاوة على ذلك، فإنه من المفضل أن نحافظ على ثبات معاملات شعاع الليزر على مدى واسع من قيم طاقة الضخ. وهذا يمكن أن يتحقق بتكليف المذبذب مع مستوى ضخ الطاقة الخاص بكل معامل. وبالرغم من أن طول المرايا [4] أو طول المذبذب يمكن تعديله [5] هي وسيلة ممكنة، إلا إنها تتطلب ترتيبات ميكانيكية متطورة و/أو تحكم إلكتروني دقيق. وبالإضافة إلى ذلك، فإنها لا تسمح عادة بالتعويض عن الانحراف في شعاع الليزر aberrations.

هناك إمكانية أخرى للتعويض عن العدسة الحرارية من خلال الاستفادة من التأثير نفسه واستخدام العناصر البصرية الساخنة كعنصر تعويض. وهذا ما اقترحه Koch [6]، والأثر الطرقي وكذلك تأثير dn/dT لهما القدرة على أن يستخدما في عنصر التعويض. ولنظام الضخ، فإن المرآة التي تسبب لها انحناء وتحذب نتيجة لامتصاصها للطاقة الضوئية تم مناقشته بشكل موسع في [6].



في ليزر الطاقة العالية، يفضل أن يكون الضخ بشكل مستعرض لأنه أبسط في التوسع. وفي هذه الحالة فإن عنصر التعويض توضع داخل المذبذب (الشكل 1)، وفي معظم الحالات dn/dT يكون سالباً، وهذا يبدوا الأكثر نجاحاً من المخطط الذي يستخدم المرآة الساخنة. وعادة الزجاج البصري والتي لها تغير سالب قوي dn/dT ، وقيمة مطلقة مماثلة للـ Nd:YAG، مثل زجاج ليزر الفوسفات Schott LG-760 أو Hoya LHG-8 [7]، متوفرة. في حالة الضخ العرضي، فإنه من الممكن أن يكون من الصعب استخدام نفس مصدر الضخ في ساق الليزر وتسخين عنصر التعويض في نفس اللحظة. لذا يجب أن يتوفر مصدر ضخ مستعرض لعنصر التعويض لحل هذه المشكلة، ويتطلب هذا توزيع الضخ بشكل متساوي مع ساق الليزر بقدر الإمكان. ومن جهة أخرى، فإن عنصر التعويض الذي يسخن بواسطة الطاقة في التجويف الداخلي لليزر يظهر العديد من المزايا. **الميزة الأولى** لا يتطلب مصدر ضخ إضافي. **والميزة الثانية** العدسة الحرارية تلازم بشكل مباشر الطاقة الناتجة والانحرافات في أشعة الليزر سوف يتم تعويضها بشكل فعال ومتلازم.

في هذه الورقة العلمية، تم مناقشة المتطلبات الضرورية لعناصر التعويض لليزرات الحالة الصلبة التي تضخ بواسطة الدابود بطاقة ناتجة في مدى عدة مئات من الواط. وبالرغم من إن هذا ليس هو هدفنا الأساسي إلا أن المخطط المستخدم للضخ الفعال كعنصر تعويض ممكن كما أنه مدرج في الاعتبارات اللاحقة. عنصر التعويض يجب أن يعوض التشويه الأمامي الناتج في وسط مادة الليزر بشكل دقيق بقدر الإمكان. ولهذا فإن معرفة التفاصيل المتعلقة بالعدسة الحرارية في الوسط الفعال مهمة جداً وحساسة. وفي الطريقة التحليلية لتعيين المتطلبات لعنصر التعويض وتأثيره على خواص الليزر موضح هنا. بالإضافة إلى تأثير عنصر التعويض على خواص المذبذب تم مناقشتها وقدم تصميم مقترح للمذبذب الأمثل.

2. الاعتبارات الحرارية

من أجل التعويض عن عدسة الحرارية في ساق الليزر، وهذه العدسة الحرارية المتولدة نتيجة التسخين في المواد البصرية يجب أن تحسب. وذلك لنتمكن من تحديد المعايير المناسبة لعنصر التعويض. وبدراسة السلوك الفيزيائي بواسطة طرق التحليل البسيطة لوصف التأثير الحراري الناتج عن العدسات موضح في [7]، [8]، [9]. باستخدام هذه الطريقة، وبافتراض التجانس الحراري في ساق الليزر لكل من وسط الليزر وعنصر التعويض. افترض أن الموصلية الحرارية تعتمد على درجة الحرارة. ويتبع ذلك أن الطاقة الكلية



للعدسة الحرارية تعطى بحاصل جمع مشاركات معامل الانكسار كدالة في درجة الحرارة (تأثير dn/dT) وتحذب السطح (التأثير الطرفي)، والتي تشير لهما بـ $D_{dn/dT}$ و D_{end} على التوالي.

طبيعة الانكسار المزدوج birefringence يجعل من الضروري أن نعوض عنها بشكل منفصل، على سبيل المثال، بالمخطط الذي وصف في [1]، [2]. وبالتالي، فإنه لن يتم تضمينها في الاعتبارات التالية. و ينتج عن التسخين المتجانس لساق الليزر فرق في درجات الحرارة بين محيط الساق ومركزه، والتي هي مستقلة عن التبريد، والموضحة في [7]

$$\Delta T = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot k} \cdot \frac{P_{heat}}{\ell_{heat}} \quad (1)$$

حيث k هي الموصلية الحرارية و ℓ_{heat} طول المسافة للعنصر الذي يتم تسخينه، (والذي قد يكون اقصر من طول ساق الليزر)، و P_{heat} هي الطاقة الكلية المتحولة إلى حرارة. هذا بالإضافة إلى معامل الانكسار المعتمد على درجة الحرارة dn/dT ومعامل التمدد α_{exp} ، والفرق في درجة الحرارة هو المسئول عن العدسة الحرارية. وبافتراض هندسة الساق لكلا من الليزر وعنصر التعويض، كلاهما يساهمان في العدسة الحرارية للساق الساخن بنصف قطر معطى في [7]

$$D_{dn/dT} = \Delta T \cdot \frac{2 \cdot dn/dT \cdot \ell_{heat}}{R_{Rod}^2} = \frac{dn/dT}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot \frac{P_{heat}}{R_{Rod}^2} \quad (2)$$

و

$$\begin{aligned} D_{end} &= \Delta T \cdot \frac{4 \cdot \alpha_{exp} \cdot (n_0 - 1)}{R_{Rod}} \\ &= \frac{\alpha_{exp} \cdot (n_0 - 1)}{\pi \cdot k} \cdot \frac{P_{heat}}{\ell_{heat} \cdot R_{Rod}} \end{aligned} \quad (3)$$

إذا تم تسخين العنصر إلى أقصى طول ممكن له. هنا n_0 تشير إلى معامل الانكسار الغير موزع. ومساهمة التأثير الطرفي سيقبل إذا كان طول الساق أطول بكثير من قطره و/أو المنطقة الساخنة اقصر من عنصر التعويض. التأثير الطرفي يمكن أن يهمل، إذا كانت المنطقة الغير ساخنة عند طرفي الساق أطول من نصف



قطر الساق. وتجدر الإشارة إلى أن وسط مادة الليزر وكذلك وسط التعويض افترضاً بأنهما يكونا ساق الليزر. وبصرف النظر عن المادة والمعاملات الهندسية فإن (2) و (3) تحتوي على مصدر الحرارة. في حالة ساق الليزر، فإن التسخين يعطى من خلال جزء من طاقة الضخ التي تمتص وتتحول إلى حرارة

$$\begin{aligned} P_{\text{heat,LaserRod}} &= \eta_{\text{trans}} \cdot \eta_{\text{abs}} \cdot \eta_{\text{heat}} \cdot P_{\text{pump}} \\ &= \eta_h \cdot P_{\text{pump}} \end{aligned} \quad (4)$$

حيث η_{trans} و η_{abs} هي كفاءة الانتقال والامتصاص على التوالي. ومعامل التحويل الحراري η_{heat} هي تقريبا 35% لـ Nd:YAG في ظروف إنتاج الليزر [10].

إذا كان الضخ الخارجي يسخن عنصر التعويض، فإن التسخين يوصف بنفس المعادلة التي تصف التسخين لساق الليزر. وفي المخطط المقترح في هذا البحث، فإن تسخين عنصر التعويض يفترض أن يكون نتيجة للامتصاص الضعيف للطاقة الدورانية في تجويف الليزر الداخلي. ولهذا، يعطى حجم التسخين بالحجم عند موضع هذا العنصر. وللطرق التحليلية المتبعة، فإن عنصر التعويض يفترض أن يوضع بعد مادة الليزر في ليزر متعدد الأنماط، أي أن حجم الشعاع في عنصر التعويض يكون له نفس حجم ساق الليزر تقريبا (وعنصر التعويض). بالإضافة إلى أن التسخين يبدأ على كل طول العنصر.

التسخين لعنصر التعويض ينتج عن امتصاص الطاقة الدورانية في تجويف الليزر P_{cir} ، والتي تعتمد على الطاقة الناتجة P_{out} على النحو التالي:

$$\begin{aligned} P_{\text{heat,compEl}} &= 2 \cdot \alpha_{\text{abs}} \cdot \ell_{\text{compEl}} \cdot P_{\text{cir}} \\ &= 2 \cdot \alpha_{\text{abs}} \cdot \ell_{\text{compEl}} \cdot \frac{P_{\text{out}}}{T_{\text{OC}}} \end{aligned} \quad (5)$$

حيث α_{abs} هي معامل الامتصاص عند الطول الموجي لليزر في عنصر التعويض، و ℓ_{compEl} هي طول عنصر التعويض، و T_{OC} هو الانتقال لأداة الاقتران الخارجية (المرآة الخارجية). ونظراً لأن لشدة التشبع مرتفعة نسبياً، افترض إن معامل الامتصاص مستقلاً عن شدة الأشعة الساقطة. وبالتحقق من خلال المعادلات الزمنية rate equations يتبين لنا إن الامتصاص من مستوى طاقة الليزر المنخفض في Nd المطعم في الزجاج (مثل الحصىلة) يتشبع بشدة تشبع $h\nu(\sigma\tau)^{-1}$ ، حيث أن $h\nu$ هي طاقة الفوتون، و σ هو مساحة مقطع الامتصاص (أو الانبعاث الاستحثاثي)، و τ هي فترة العمر لمستوى الطاقة العلوي في الليزر.



ونتيجة لصغر مساحة المقطع وانزياح القيمة العظمى للامتصاص بالنسبة إلى الطول الموجي 1064nm، فإن شدة التشبع للامتصاص في LG-760 أكبر من شدة تشبع الحصىلة في Nd:YAG.

ومن أجل معالجة السلوك البصري لعنصر التعويض الغير فعال حرارياً، فإنه من الضروري أن ننمذج خصائص الشعاع الخارج بليزر بسيط متعدد الأنماط. والطاقة الناتجة P_{out} لمثل هذا الليزر ترتبط مع طاقة الضخ بطاقة ليزر عند الحالة الحرجة P_{th} وميل الكفاءة η_{slope} بـ

$$P_{out} = \eta_{slope} \cdot (P_{pump} - P_{th}). \quad (6)$$

كلا من ميل الكفاءة والطاقة الحرجة دوال في مقدار الخسارة الكلية في الدورة الكاملة round-trip الناتج عن عنصر التعويض بسبب الامتصاص المعطى بـ $L_{compEl} = 2\alpha_{abs} \cdot l_{compEl}$. ولساق يضخ بشكل متجانس وانتقال منخفض لأداة الاقتران الخارجية، فإن ميل الكفاءة والطاقة الحرجة تعطى من خلال [7]

$$\eta_{slope} = \frac{T_{OC}}{T_{OC} + L_{int} + L_{compEl}} \cdot \eta_{tot},$$
$$P_{th} = \frac{T_{OC} + L_{int} + L_{compEl}}{2} \cdot \frac{A_{LaserRod} \cdot I_s}{\eta_{tot}} \quad (7)$$

حيث L_{int} هي مجموع الخسارة الداخلية الفعالة في داخل مذبذب الليزر، و $A_{LaserRod}$ هي مساحة مقطع الساق، و I_s هي شدة الأشعة المشبعة، و η_{tot} هي حاصل ضرب كفاءة الانتقال، وكفاءة الامتصاص، وكفاءة ستوكس، والكفاءة الكوانتية، وتداخل الأنماط. وبإدخال نموذج لليزر بالطريقة أعلاه يسمح لنا بأن نحلل تأثير عنصر التعويض على أداء الليزر.

A العدسات الحرارية الناتجة

بالتسخين الذي ذكر في الأعلى للمواد النشطة حرارية و (2) و (3) و (1)، فإن طاقة الانكسار الضوئي للعدسات الحرارية في ساق الليزر (برمز سفلي LaserRod)، والتي لا تسخن إلى أقصى قيمة لها، وعنصر التعويض (برمز سفلي compel) وجدت على إنها



$$D_{\text{LaserRod}} = \frac{dn/dT_{\text{LaserRod}}}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{LaserRod}}} \cdot \frac{\eta_h \cdot P_{\text{pump}}}{R_{\text{LaserRod}}^2} \quad (8)$$

و

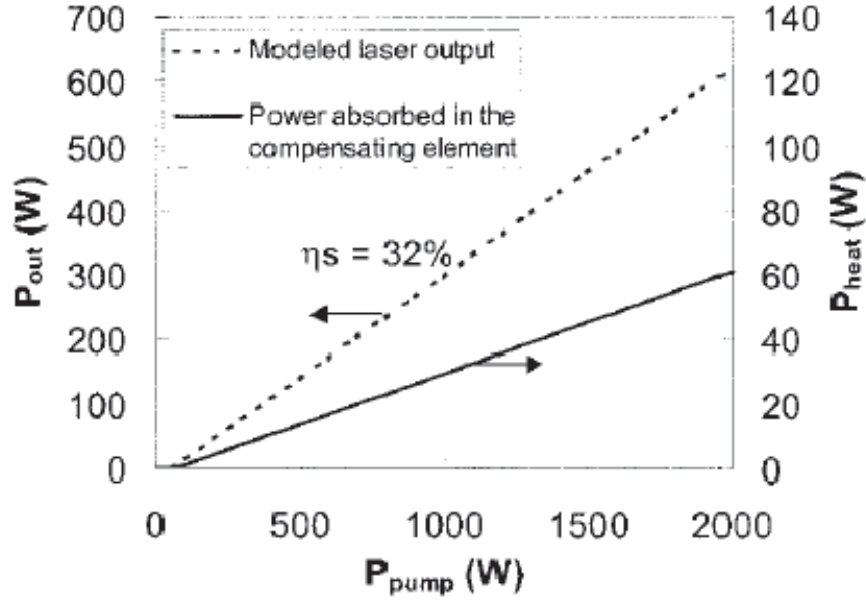
$$D_{\text{compEl}} = \left(\frac{dn/dT_{\text{compEl}}}{2 \cdot R_{\text{compEl}}} + \frac{\alpha_{\text{exp}} \cdot (n_0 - 1)}{\ell_{\text{compEl}}} \right) \cdot \frac{L_{\text{compEl}} \cdot \eta_{\text{slope}} \cdot (P_{\text{pump}} - P_{\text{th}})}{\pi \cdot k_{\text{compEl}} \cdot R_{\text{compEl}} \cdot T_{\text{OC}}} \quad (9)$$

هناك عدستين تنتجان داخل تجويف الليزر والتي يجب أن نعوض عن كلا منهما.

سلوك المذبذبات التي تحتوي على عنصرين مثل ذلك سوف يتم مناقشته لاحقاً في هذا البحث.

B. هل مخطط التعويض لتجويف الليزر مقبول؟

بما أن أداء جهاز الليزر يجب أن لا يتراجع كثيراً، فإن الامتصاص الكلي داخل عنصر التعويض يجب أن لا يزيد عن نسبة محددة. ولهذا فإن أول تخمين يمكن اتخاذه في هذا الجزء هو التحقق إذا كان المخطط المفترض مقبول أو لا. ولهذا الغرض، فإن مجموع طاقات الانكسار الضوئي للعدستين سوف نجعلها تساوي صفر، أي أن $D_{\text{therm,LaserRod}} + D_{\text{therm,compel}} = 0$ (تعويض مثالي)، ويتحد مع (8) و (9). النتيجة التي نحصل عليها هي حل لـ L_{compEl} . ولهذا التخمين الأول، فإن عدد من الافتراضات وضعت. افترض أن الليزر يعمل فوق الحالة الحرجة، أي أن الطاقة الحرجة تساوي صفر $P_{\text{th}} = 0$. بالإضافة إلى، η_{slope} افترضت بأن تكون مستقلة عن L_{compEl} ، والذي يكون مقبولا إذا كان الفقد قليلا انظر (7). وإذا كان طول عنصر التعويض بضعة سنتيمترات، فإن التأثير يكون 10 مرات أقل من تأثير dn/dT ويمكن أن يهمل. ولوحظ أنه بهذه الافتراضات، فإن الحالة يكون



الشكل 2. أداء نموذج الليزر والطاقة الممتصة في عنصر التعويض

عنصر التعويض الذي يسخن بواسطة مصدر ضخ إضافي يوصف أيضا. أخيرا، افتراضات مقبولة إضافية لقيم الكميات المتعلقة ($dn/dT_{rod} \approx -dn/dT_{compEl}$, $\eta_{heat} \approx \eta_{slope}$, $R_{compEl} \approx R_{rod}$) تنتج كنتيجة بسيطة لفقد الامتصاص المطلوب في داخل عنصر التعويض

$$L_{compEl} \approx T_{OC} \frac{k_{compEl}}{k_{LaserRod}} \quad (10)$$

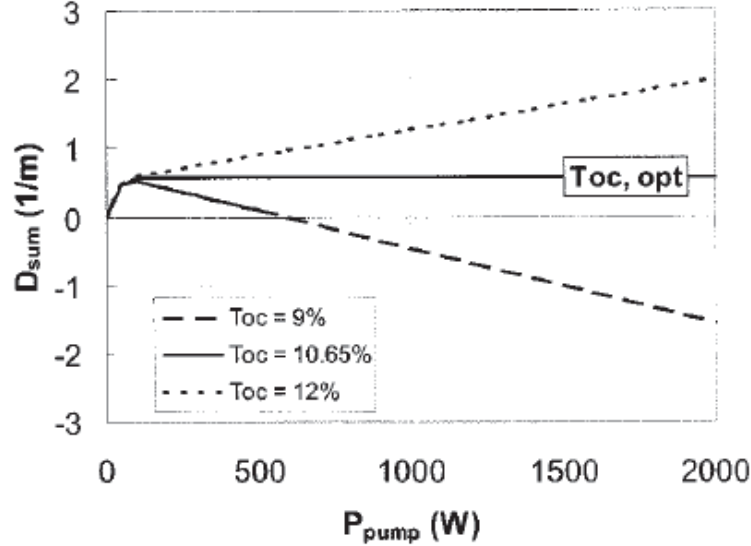
حيث إن الموصلية الحرارية للزجاج النموذجي اصغر بعشر مرات من Nd:YAG ($\approx 10 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) ومقدار نفاذ الأشعة النموذجي من أداة الاقتتران الخارجية حوالي 10%، فإن الامتصاص الكلي في عنصر التعويض هو 1%. وهذا المقدار مشجع جدا ويوضح إن مبدأ التعويض للتجويف الداخلي لليزر يستخدم مواد بصرية وتشتت حراري سالب يمكن استخدامه بدون تأثير يذكر على أداء الليزر. وبهذا الفقد الإضافي، فإن الطاقة الخارجة تقل بمقدار 10%. (لاحظ انه في حالة ضخ عنصر التعويض، فإن النسبة بين طاقة ضخ الليزر إلى طاقة ضخ عنصر التعويض تعطى كالنسبة بين الموصلية الحرارية، أي أن $K_{compEl}/K_{LaserRod} = (\eta_{h,compEl} \cdot P_{p,compEl})/(\eta_{h,LaserRod} \cdot P_{p,LaserRod})$ بدون الاستفادة من زيادة الطاقة داخل تجويف الليزر نتيجة لتقليل الشعاع الخارج من المرايا.

C. المزيد من التحاليل التفصيلية

المزيد من التحاليل المكثفة مطلوب لوصف تأثير عنصر التعويض داخل تجويف الليزر. ولهذا الهدف، تم نمذجة ليزر يضخ بواسطة دايود ذو طاقة عالية باستخدام (6) و (7) وبأخذ القيم العددية لـ Nd:YAG في [7]: $I_s=2.9\text{kW/cm}^2$, $K_{YAG}=10\text{W.mK}$, $dn/dT_{YAG}=7.3\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$. الساق له قطر يساوي 4mm وافترض أن مقدار 80% من طاقة الضخ يتم امتصاصها. والجزء الفعال من طاقة الضخ تتحول إلى حرارة تكون $\eta_{tot}=42\%$ و $\eta_h=\eta_{heat}\cdot\eta_{abs}=30\%$.

القيم التالية افترضت لعنصر التعويض: $dn/dT_{compEI}=-7.8\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ و $\alpha_{exp}=12.7\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$. (وجدت قيم مشابهة لليزر زجاج LG760 Schott، على سبيل المثال).

اختيرت الكفاءات المستخدمة لإعادة أداء الليزر النموذجي مثل تلك التي في [11] و [12] و [9]. الشكل 2 يوضح الأداء المنمذج لهذا الليزر ومقدار الطاقة الممتصة في عنصر التعويض بـ 1% للامتصاص و 10.7% لأداة الاقتران الخارجية. (هذه الأعداد سوف تشرح لاحقاً في هذا البحث).



الشكل 3. مجموع طاقات الانكسار الضوئي في عدستين حراريتين لأشعة مختلفة نافذة لأداة الاقتران الخارجية .



ميل الكفاءة الناتج هو $\eta_{solpe} \approx 32\%$ و طاقة حرجة $P_{th} \approx 60 \text{ W}$ تشمل 1% خسارة إضافية في داخل عنصر التعويض.

العدسة الحرارية المطلوبة في عنصر التعويض تتولد بواسطة الامتصاص الحجمي. وحيث إن معامل الامتصاص في المادة يكون ثابتاً، وقيمتة 0.0015 cm^{-1} يفترض للاعتبارات التالية. وهذا يتطابق مع الامتصاص 1% في المسار المزدوج لطول 7cm لعنصر التعويض. وطبقاً لـ (6)-(9)، فإن T_{OC} و L_{compEl} هي المتغيرات التي تسمح لتعديل العدسة الحرارية في عنصر التعويض. نصف قطر عنصر التعويض هي بالضبط نفس نصف قطر ساق الليزر وذلك لضمان أفضل تعويض للانحراف الضوئي.

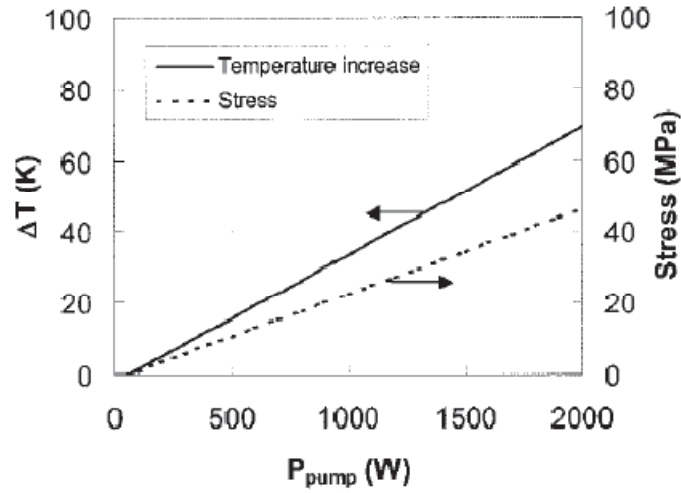
بداية، تم دراسة تأثير T_{OC} . ولهذا الغرض، تم تحليل مجموع طاقات الانكسار الضوئي للعدسات في ساق الليزر وفي عنصر التعويض، أي أن $D_{sum} = D_{LaserRod} + D_{compEl}$. الشكل 3 يوضح هذا المجموع لثلاثة أشعة مختلفة نافذة من المرايا.

أفضل القيم لـ T_{OC} يمكن أن توجد حيث مجموع طاقات الانكسار الضوئي للعدستين موجب ولكن يبقى ثابت على الحالة الحرجة لليزر. الشعاع الناتج الأفضل يمكن إيجاده بتفاضل مجموع (8) و (9) بالنسبة إلى P_{pump} . وبالاقتراضات المذكورة أعلاه، فإنه يمكن إهمال بدقة عالية من الحسابات اعتماد الطاقة الحرجة على المرايا الخارجية. ووضع النتيجة تساوي صفر والحل لـ T_{OC} ، يعطي أفضل شعاع يخرج من أداة الاقتران الخارجية بـ

$$T_{OC,opt} = - \left(\frac{dn/dT_{compEl}}{2 \cdot R_{compEl}} + \frac{\alpha_{exp} \cdot (n_0 - 1)}{\ell_{compEl}} \right) \cdot \frac{2 \cdot L_{compEl} \cdot \eta_{tot} \cdot k_{LaserRod} \cdot R_{LaserRod}^2}{dn/dT_{LaserRod} \cdot \eta_h \cdot k_{compEl} \cdot R_{compEl} - L_{compEl} - L_{int}} \quad (11)$$

طول عنصر التعويض مهم، حيث إن العدسة الحرارية الموجبة الناتجة عن التمدد تميل إلى التعويض عن العدسة السالبة الناتجة بالتغير السالب في dn/dT . وزيادة الطول في عنصر التعويض يقلل من هذا التأثير.

ونتيجة لامتنصاص 1%، فإن 10% من الطاقة الناتجة يتحول إلى حرارة داخل عنصر التعويض. هذا التسخين يتسبب في ارتفاع ملحوظ في درجة الحرارة، وكذلك الإجهاد. الارتفاع في درجة حرارة عنصر التعويض



الشكل 4. الزيادة في درجة الحرارة المحسوبة وأعلى إجهاد في عنصر التعويض

يمكن أن تحسب من (1). أعلى قيمة إجهاد σ_{max} تحدث عند محيط ساق الليزر تعطى بـ [7]

$$\sigma_{max} = \frac{1}{2} \cdot \Delta T_{compEl} \cdot \frac{\alpha_{exp} \cdot E_{compEl}}{1 - \nu_{compEl}} \quad (12)$$

حيث E_{compEl} و ν_{compEl} هي معامل المرونة ونسبة بواسون على التوالي.

الشكل 4 يوضح مخطط ارتفاع درجة الحرارة في مركز عنصر التعويض وأعلى إجهاد (ب) $(\nu_{compEl}=0.3$ و $E_{compEl}=74\text{GPa}$).

إذا كان طول عنصر التعويض 7cm، فإن ارتفاع درجة الحرارة بمقدار 70K تتسبب في أعلى إجهاد $\sigma_{max} \approx 50\text{MPa}$ عند 2000W من طاقة الضخ. كلا القيمتين أقل بشكل كبير من القيمة الحرجة لحد إجهاد الكسر. ارتفاع درجة الحرارة كدالة في طاقة الضخ الممتصة لكل وحدة طول. ولهذا فإن الزيادة في طول



عنصر التعويض تؤدي إلى نقصان الزيادة في درجة الحرارة ونقصان الإجهاد. (بوضوح، هذا يتطلب نقصان في الامتصاص لكل وحدة طول في عنصر التعويض). ولهذا، فإن القيم المناسبة لمعامل الامتصاص وطول عنصر التعويض تم اختيارهما بعناية.

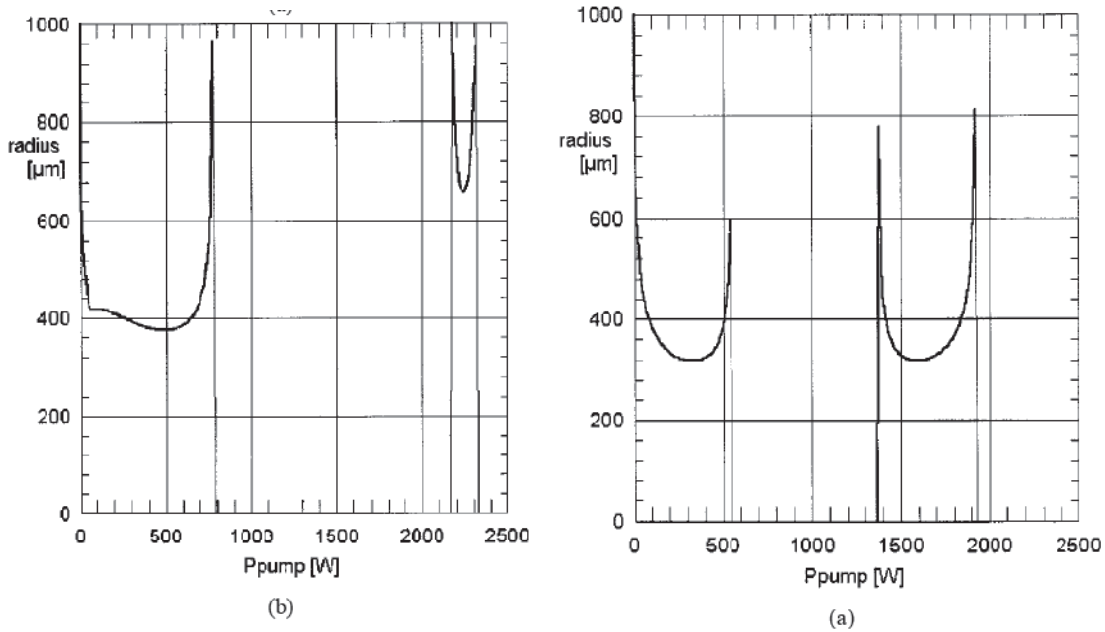
III اعتبارات المذبذب

A. تأثير عنصر التعويض على المذبذب

بعد أن ناقشنا مقدار العدسات الحرارية، السؤال الآن هو كيف سوف يؤثر مثل هذا العنصر التعويضي على سلوك المذبذب. مرة أخرى سوف نفترض أن العدسة الحرارية في ساق الليزر وفي عنصر التعويض (عند طاقة ضخ مرتفعة كثيرا عن القيمة الحرجة) لها نفس القيمة المطلقة ولكن بإشارة مختلفة أي أن،

$$D_{\text{compEl}} = - D_{\text{LaserRoad}}$$

الطريقة المباشرة هي إدخال عنصر التعويض في المذبذب، كما هو موضح في الشكل 1. حيث أن طول المذبذب هو 70 mm، وكل منها عند مسافة 40 mm من المرآتين، وقد تم حساب سلوك المذبذب باستخدام معادلة المصفوفة ABCD كما هو موضح في [13]-[15]. العدسات الحرارية داخل الساق وعنصر التعويض تم نمذجتها بعدسات رقيقة بين قطعتي المادة بمعامل انكسار تقريبي [16]. الشكل 5 يوضح نصف قطر النمط الأساسي عند موضع العدسة الحرارية في ساق الليزر كدالة في طاقة الضخ.



الشكل 5. الاستقرار بزيادة (a) بدون عنصر التعويض، $\Delta P \approx 550 \text{ W}$ ، و $M^2 \approx 20$. (b) مع عنصر تعويض $M^2 \approx 12$ و $\Delta P \approx 800 \text{ W}$



ونفس أداء الليزر افترض كما في الشكل 2. وضعت العدسة في عنصر التعويض تساوي صفر حتى تم الوصول بالليزر إلى الحالة الحرجة. الرسم في (a) يوضح الأداء بدون عنصر التعويض والرسم في (b) يوضح السلوك بوجود عنصر التعويض.

يمكن أن نرى ذلك بوضوح، بواسطة إدخال عنصر التعويض، ومدى الاستقرار الأول يمكن أن يزداد بمقدار 1.5 على الأقل. بالإضافة، حجم النمط في الساق يزداد نتيجة لعنصر التعويض، مما ينتج عنه تحسن في معامل M^2 ، والذي حسب عن طريق مقارنة نصف قطر النمط الأساسي وساق الليزر [15]. بالإضافة إلى ذلك فإن حجم النمط ثابت تقريبا على نطاق كبير من مدى الاستقرار. وهذا يزود بمعاملات شعاع ليزر ثابتة تقريبا في هذا المدى من التشغيل، والتي هي المفضلة. ومدى الاستقرار الثاني لا يزال موجودا مع عدسة التعويض ولكن بشكل اقل كثيرا.

الشكل 3 يوضح مجموع الطاقات الانكسار الضوئي للعدستين الحراريتين والتي تكون ثابتة عندما تزداد طاقة الضخ فوق القيمة الحرجة وتصبح 100W اعلي من القيمة الحرجة. إذا كانت العدستين موضوعتين بالضبط في نفس المكان، فهذا يؤدي إلى شروط مذبذب ثابتة فوق القيمة الحرجة. وفي الحالة العامة، العدستين والفراغ بينهما يجب أن يتعامل معه على انه نظام عدسة. قوة الانكسار الكلية D_{system} لهذا النظام من العدسات معطى من خلال المعادلة التالية:

$$D_{System} = D_{LaserRod} + D_{compEL} - d \cdot D_{LaserRod} \cdot D_{compEL} \quad (13)$$

حيث d هي المسافة بين المستويات الأساسية للعدستين. والتراكب البصري المثالي للعدستين يتطلب عناصر ضوئية إضافية في المذبذب وسوف يتم مناقشته لاحقا. الطريقة الأبسط هي وضع ساق الليزر وعنصر التعويض في المذبذب، بأقل مسافة ممكنة بينهما. والجزء التالي من البحث سوف يناقش كم مقدار مدى الاستقرار الأول يجب أن يمتد في هذه الحالة البسيطة.



B. المعالجة الدقيقة لسلوك المذبذب

المتغير g الشكلي (كما يوصف في [15]) هو مناسب جدا للمقارنة بين أبعاد عرض نطاقات الاستقرار للعديد من أشكال المذبذبات المختلفة بما فيها المذبذبات بالعدسات الحرارية. وللمذبذب ذو الموجة المستوية التي تحتوي فقط على ساق الليزر مع العدسة الحرارية بطاقة انكسار ضوئي D_{LaserRod} ، ويعطى المتغير g من خلال المعادلة التالية:

$$g1 = 1 - s'_2 \cdot D_{\text{LaserRod}}$$

و

$$g2 = 1 - s_1 \cdot D_{\text{LaserRod}} \quad (14)$$

حيث s_1 و s'_2 هي المسافات من المستويات الأساسية للعدسة الحرارية حتى مرآيا المذبذب طبقا للشكل 1. (المستويات الأساسية موجودة عند مسافة $(l_{\text{LaserRod}}/2n_{\text{YAG}})$ من نهاية الوجه داخل ساق الليزر [15].)

يزداد التعقيد بشكل ملحوظ إذا احتوى نظام العدسة على عدستين حراريتين داخل تجويف الليزر. وطاقة الانكسار الضوئي لساق الليزر لا يمكن أن تستبدل بسهولة بطاقة الانكسار لنظام العدسة. في نظام العدسة فان موضع المستويات الأساسية يكون دالة في كلا من طاقة الانكسار لكل عدسة وطاقة الانكسار لنظام العدسة ككل. ولهذا فان المسافات بين المرآيا والمستويات الأساسية في نظام العدسة يكون دالة في طاقة الضخ ايضا. والمشتقة للمتغيرات g لنظام العدسة كدالة في المسافة الثابتة s_1 و s_2 يوصف في الملحق. ولمذبذب مستوى-مستوى يحتوي على نظام عدساتنا مع عدستين حراريتين، فان المتغيرات g يعطى بالعلاقة التالية:

$$g1 = 1 - s_2 \cdot D_{\text{System}} - d \cdot D_{\text{LaserRod}}$$

و

$$g2 = 1 - s_1 \cdot D_{\text{System}} - d \cdot D_{\text{compEl}} \quad (15)$$

حيث أن s_1 و s_2 مرة تم اعتبارهما مرة أخرى من المستويات الأساسية للعدسات كما هو موضح في الشكل 1. D_{System} هي طاقة الانكسار الكلية لنظام العدسة طبقا لـ (13).



كما ذكر من قبل العدسة الحرارية في ساق الليزر وفي عنصر التعويض لهما نفس القيمة المطلقة ولكن بإشارة مختلفة. هذه القيمة المطلقة للعدسات تكون في الاختصار التالي للحد الموجب $D_{thermal}$. وفي (15)، D_{system} يمكن أن تعوض بـ (13). مع بعض بـ $D_{LaserRod}=D_{therm}$ (لحالة الـ Nd:YAG) و $D_{compEl}=-D_{therm}$ ، والمتغيرات g التالية تنتج للمذبذب مستوى-مستوى الذي يحتوي على عنصر تعويض إضافي:

$$g1 = 1 - s_2 \cdot d \cdot D_{therm}^2 - d \cdot D_{therm}$$

و

$$g2 = 1 - s_1 \cdot d \cdot D_{therm}^2 + d \cdot D_{therm}, \quad (16)$$

عرض نطاق الاستقرار الأول لتشكيلين للمذبذب الآن يمكن مقارنتهما باستخدام (14) و (16). في مذبذب فابري بيروت، تم الوصول إلى حدود الاستقرار لنواتج المتغير g الذي إما يكون $g_1 \cdot g_2 = 0$ أو $g_1 \cdot g_2 = 1$. هذه الشروط استخدمت لتحديد طاقة الانكسار للعدسات الحرارية عند أول حدين للاستقرار D_{Limit0} و D_{Limit1} . هذين الحدين يعرفان عرض نطاق الاستقرار الأول المعطى بـ $D_{Limit1}-D_{Limit0}$. والمذبذب المستوى-المستوى بدون بصريات إضافية وبدون ضخ (أي أن بدون عدسات حرارية) يكون ناتج المتغير g هو $g_1 \cdot g_2 = 1$. وعليه فإن أقل حد استقرار يكون $D_{Limit0}=0$ في كلا الحالتين. هذا يعني أن عرض نطاق أول استقرار يعطى فقط بـ D_{Limit1} . ويتم الوصول إلى حد الاستقرار هذا عندما تكون

$$g1 \cdot g2 = 0. \quad (17)$$

المعادلة 17 لها حلين هما إما أن يكون $g_1=0$ أو $g_2=0$. ويتم الوصول إلى حد الاستقرار الأول في اضعف طاقة انكسار تحقق الشرط في المعادلة (17).

في البداية تم اعتبار حد الاستقرار لمذبذب يحتوي على ساق الليزر فقط والذي يوصف بالمعادلة (14). في حالة المقارنة بين المتذبذبات التي لها طول فيزيائي متساوي، في حالة مذبذب ساق الليزر فقط، هناك فراغ إضافي موجود حيث يتم وضع عنصر التعويض فيه. هذا يعني أن المسافة s'_2 تعطى بـ $s'_2 = d + l_{compEl} \cdot (1 - 1/n_{compEl}) + s_2$. وبهذا ومع الشرط $s_1 \leq s'_2$ ، فإن طاقة الانكسار عند حد الاستقرار الأول يعطى بالعلاقة التالية:

$$D_{Limit1}^{uncomp} = \frac{1}{d + \ell_{compEl} \cdot (1 - 1/n_{compEl}) + s_2} \quad (18a)$$

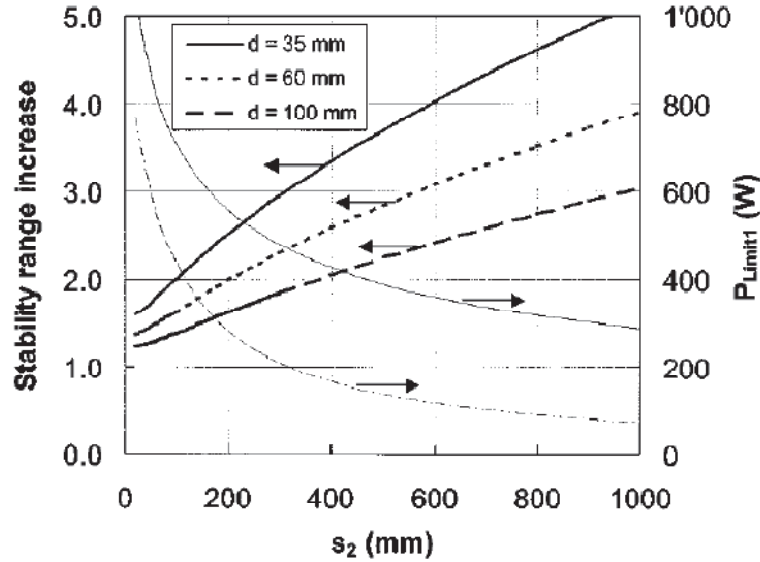
(rod-only).

للمذبذب الذي به عنصر تعويض، والموصوف بالمعادلة (16)، $g_1=0$ و $g_2=0$ ينتج معادلة تربيعية كحل لطاقة الانكسار الضوئي عند حدود الاستقرار. D_{Limit1} يجب أن تكون موجبة بالتعريف في هذه الحالة. ومع (اختياري) الشرط $s_1 \leq s_2$ ، فإن حد الاستقرار الأول يعطى بالعلاقة التالية:

$$D_{Limit1}^{comp} = \frac{-d + \sqrt{d^2 + 4 \cdot s_2 \cdot d}}{2 \cdot s_2 \cdot d} \quad (18b)$$

(with compensating element).

النسبة بين طاقات الانكسار الضوئية عند حد الاستقرار الأول $R = D_{Limit1}^{comp} / D_{Limit1}^{uncomp}$ موضحة في الشكل 6. هذه النسبة تمثل الزيادة في عرض نطاق الاستقرار كدالة في s_2 لمسافات d مختلفة. إضافة إلى ذلك فإن طاقة الضخ عند حد الاستقرار الأول $d=60\text{mm}$ موضحة وتمثل بخطوط رفيعة. (طاقة الضخ ذات العلاقة، وبتقريب جيد- بالعدسة الحرارية بـ $D_{therm} = P_{pump} / (f^* \cdot \pi \cdot R_{Rod}^2)$ ، حيث f^* تكون معرفة كطول بؤري نوعي له قيمة تقريبية 6500W/mm في ليزر ساق Nd:YAG الذي يعمل بضخ مستعرض بواسطة الدابود.



الشكل 6. الزيادة في عرض نطاق حد الاستقرار الأول كدالة في s_2 لمسافات d مختلفة. الخطوط الرفيعة هي طاقة الضخ عند حد الاستقرار الأول لـ $d=60\text{mm}$ للمذبذب العادي (الخط المشرط) ونظام التعويض (الخط المتصل).



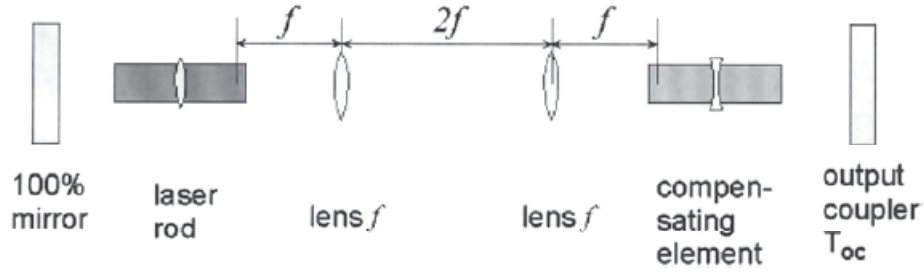
الخط المتصل يصف النظام في حالة عنصر التعويض، والخط المشروط يصف النظام في حالة المذبذب بساق الليزر فقط.

ويبدو أن عنصر التعويض يكبر بشكل ملحوظ نطاق الاستقرار الأول. وتزداد هذه الزيادة بزيادة الطول s_2 ، والتي تتطابق مع الزيادة في حجم النمط في ساق الليزر. بالإضافة إلى ذلك، فإن التأثير يصبح أكثر وضوحاً عندما تصبح المسافة d بين ساق الليزر وعنصر التعويض اقل. وهذا السلوك الكمي لا يعتمد على s_1 طالما إن الشرط $s_1 < s_2$ متحققاً. $s_2 < s_1$ تعني أن كل المعاملات يجب أن تتغير في الاشتقاق أعلاه).

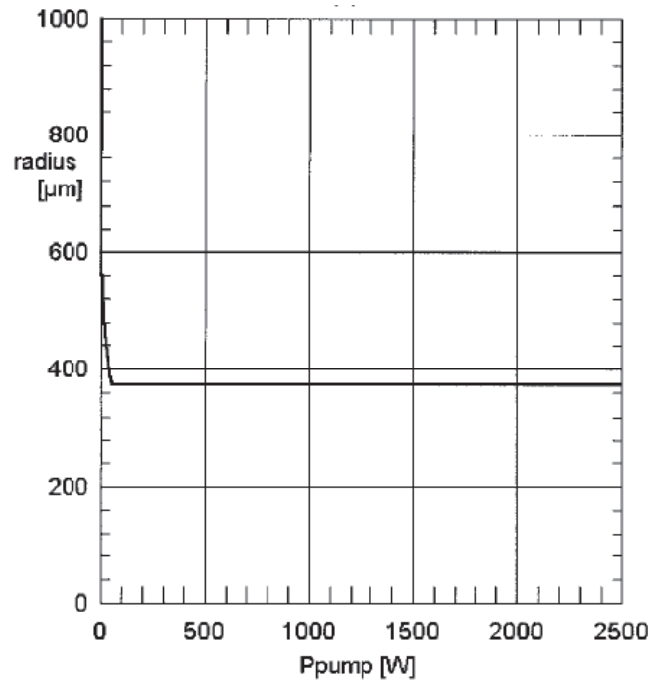
C. المذبذب التصوري

المناقشة أعلاه تتطلب تحسينات كثيرة بإضافة عنصر تعويض في المذبذب. ولكن العدسة الحرارية لا تعوض على كل نطاق الضخ، حيث إن العدستين موضوعتين في مكانين مختلفين داخل المذبذب ولهذا تواجه شعاع ليزر بخواص مختلفة. وعليه فإن التعويض المثالي، هو وضع عدستين عند نفس الموضع بالضبط. ولأن هذا لا يمكن أن يتم فيزيائياً، فإن هذا يتم بمذبذب تصوري. هذا المبدأ استخدم بنجاح في حالة الانكسار المزدوج الموصوف في [1] و [2]: عدستين إضافيتين ببعد بؤري f توضعاً في داخل المذبذب. هذا الترتيب في المذبذب موضح في الشكل 7 (a). المسافة بين العدستين أكبر بمرتين من البعد البؤري لهما. ومصفوفة التحويل لنظام العدسة بين العدستين الحراريتين تعرف المصفوفة بإشارة سالبة. وعليه، طبقاً لقانون ABCD، فإن متغير الشعاع (المتغير q) في ساق الليزر يعاد توليده داخل عنصر التعويض. وبهذا، فإن العدستين الحراريتين تكونا مترابكتين بصرياً.

استخدمت عدستين ببعد بؤري 50mm لحساب نصف قطر النمط الأساسي داخل ساق الليزر الموضح في الشكل 7 (b). كل متغيرات المذبذب احتفظ بها نفسها كما في الأمثلة السابقة. والنتيجة التي توصلنا لها بهذه الطريقة هي أن حجم النمط بقي ثابتاً على كل نطاق الضخ عندما كان فوق القيمة الحرجة لليزر. وتم الوصول إلى حساب ثابت لحاصل انتشار الشعاع وهي $M^2 \approx 13$. زيادة المسافة بين المرأتين والعدسات الحرارية، أو دمج هذا الترتيب مع المذبذبات التلسكوبية [5] و [16]، سوف يسمح بالحصول على تشغيل النمط الأساسي على مدى ضخ فعلي غير محدود.



(a)



(b)

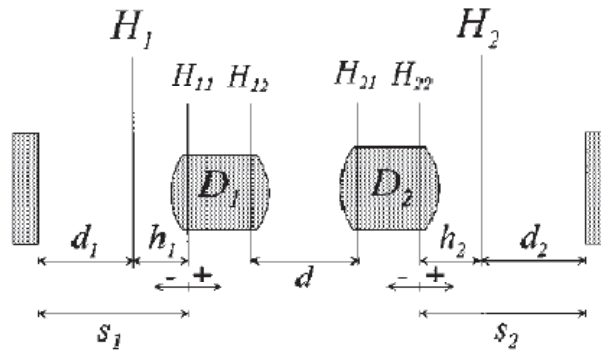
الشكل 7. (a) ترتيب المذبذب التصوري مع (b) حجم النمط الأساسي المحسوب في ساق الليزر

IV الخلاصة

موضح هنا مخطط تعويض ذاتي التكيف لعدسة حرارية في ساق ليزر الحالة الصلبة. ساق ليزر إضافية، ويفضل أن تكون من الزجاج، مع اعتماد سالب لدرجة الحرارة على معامل الانكسار وضعت داخل المذبذب. تسخين عنصر التعويض هذا من خلال الامتصاص الضعيف لطاقة التجويف الداخلية تسبب عدسة حرارية سالبة. والتسخين من شعاع الليزر نفسه، تكون العدسة ذاتية الضبط إذا تم اختيار المتغيرات الصحيحة.

وبالرغم من الافتراضات البسيطة التي تم إتباعها للحصول على النتائج المدرجة في هذا البحث، فإن مبدأ عنصر التعويض ذات التسخين الغير فعال يتضح انه واعد جدا. تم الوصول الى زيادة ملحوظة في نطاق الاستقرار بوضع عنصر تعويض بسيط داخل مذبذب الليزر. والنتائج الأفضل تم الوصول لها إذا كان عنصر التعويض متحد مع نظام بصري تصوري. بالإضافة إلى ذلك فان مخطط التعويض هذا له دور في تصحيح الزيغ الغير كروي الناتج عن العدسة الحرارية في ساق الليزر.

وبالرغم من أن النظام البصري الزجاجي بـ dn/dT و موصلية حرارية متوفر، إلا أن المشكلة الأساسية في الوقت الحالي هو أن تحصل على الزجاج بالامتصاص الصحيح. وطبقا للمعلومات المتوفرة من مصانع الزجاج، فإن إضافة امتصاص ضعيف للزجاج المتوفر له dn/dT سالبة ممكن بدون مشاكل أساسية. ولسوء الحظ، فهي باهظة الثمن للحصول على مقدار قليل مقابل الحصول على صناعة خاصة لزجاج بجودة عالية.



الشكل 8. المذبذب المستوى-المستوى يحتوي على نظام عدسة من عدسات سميكة.

في البداية، التجارب سوف تجرى بزجاج من النوع LG760 من Schott. وفي الزجاج المطعم بـ Nd، فإن تسخين غير فعال متوفر بواسطة الامتصاص في مستوى الطاقة الأدنى، والتعداد لهذا المستوى من الطاقة يمكن أن يتم التحكم به حرارياً. ولأن في هذه الحالة الزيادة في درجة الحرارة سوف تتسبب في التأثير على مقدار الامتصاص أيضاً، والنظام سيصبح أكثر تعقيداً.



ملحق

المتغيرات g للمذبذب المستوى-المستوى الذي يحتوي على نظام عدسات

المتغيرات g في المذبذب الذي يحتوي على عدسة سميكة بطاقة انكسار D تعطى بـ [15]

$$g1 = 1 - \frac{L^*}{R_1} - D \cdot d_2 \quad \text{and} \quad g2 = 1 - \frac{L^*}{R_2} - D \cdot d_1 \quad (19)$$

حيث R_1 و R_2 هي نصف قطر التحذب للمرأتين في المذبذب، و d_1 و d_2 هي المسافات من المرأتين وحتى المستويات الأساسية لكامل نظام العدسة، و $L^*=d_1+d_2-D \cdot d_1 \cdot d_2$.

الحالة لمذبذب الذي يحتوي على نظام عدسات سميكة موضح في الشكل 8.

H_i و H_{ij} تشيران إلى مواضع المستويات الأساسية للعدسة المفردة ونظام العدسات، على التوالي. المسافة بين المستويات الأساسية في العدسات المفردة والمستويات الأساسية لنظام العدسات طبقاً للشكل 8 تعطى بـ [17]

$$h_1 = \frac{D_2 \cdot d}{D_{\text{System}}} \quad \text{and} \quad h_2 = -\frac{D_1 \cdot d}{D_{\text{System}}}, \quad (20)$$

المذبذب المستوى-المستوى افترض لما يلي، أي أن، $R_1=\infty$ و $R_2=\infty$. وفي هذه الحالة، فإن المعادلة (19) تصبح

$$g1 = 1 - D_{\text{System}} \cdot d_2 \quad \text{and} \quad g2 = 1 - D_{\text{System}} \cdot d_1 \quad (21)$$

حيث أن طاقة الانكسار الكلية لنظام العدسات يعطى بـ $D_{\text{system}}=D_1+D_2 \cdot d \cdot D_1 \cdot D_2$.

ولسوء الحظ، المسافة d_1 و d_2 غير ثابتة ولكن دالة في طاقة الانكسار لنظام العدسة.



وباعتبار اصطلاح الإشارة، الموضح في الشكل 8، فإن المسافات المتغيرة d_1 و d_2 في المعادلة (21) يمكن أن تستبدل بـ $d_1 = s_1 + h_1$ و $d_2 = s_2 - h_2$. بالإضافة إلى ذلك، بالتعويض عن h_i بـ (20)، يمكن في النهاية أن نحصل على متغيرات g للمذبذب المستوى-المستوى الذي يحتوي نظام عدسات

$$\begin{aligned} g_1 &= 1 - s_2 \cdot D_{\text{System}} - D_1 \cdot d \quad \text{and} \\ g_2 &= 1 - s_1 \cdot D_{\text{System}} - D_2 \cdot d. \end{aligned} \quad (22)$$

لقد لاحظنا أن المسافتين s_1 و s_2 ثابتتين من المرأتين في المذبذب وحتى المستويات الأساسية للعدسات المفردة. المتغيرات g الموصوفة في (22) تسمح بمعالجة مناسبة للمذبذبات بنظام العدسات الحرارية ذات التغير في طاقة الانكسار الضوئي.

تمت الترجمة في المركز العلمي للترجمة

www.trgma.com

10-4-2010



المراجع

- [1] Q. Lü, N. Kugler, H. Weber, S. Dong, N. Müller, and U. Wittrock, "A novel approach for compensation of birefringence in cylindrical Nd:YAG rods," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 28, pp. 57–69, 1996.
- [2] N. Kugler, S. Dong, Q. Lü, and H. Weber, "Investigation of the misalignment sensitivity of a birefringence-compensated two-rod Nd:YAG laser system," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 36, pp. 9359–9366, 1997.
- [3] A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Witting, U. Brauch, and H. OPOWER, "Scaleable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers," *Appl. Phys.*, vol. B58, pp. 365–372, 1994.
- [4] U. J. Griener and H. H. Klingenberg, "Thermal lens correction of a diode-pumped Nd:YAG laser of high TEM power by an adjustable curvature mirror," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 16, pp. 1207–1209, 1994.
- [5] D. C. Hanna, C. G. Sawyers, and M. A. Yuratic, "Telescopic resonators for large-volume TEM - mode operation," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 13, pp. 493–507, 1981.
- [6] R. Koch, "Self-adaptive elements for compensation of thermal lensing effects in diode end-pumped solid-state lasers—Proposals and preliminary experiments," *Opt. Commun.*, vol. 140, pp. 158–164, 1997.
- [7] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 3rd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, Springer Series in Optical Sciences.
- [8] "Absorbed pump power, thermal profile and stresses in a cw pumped Nd:YAG crystal," *Appl. Opt.*, vol. 9, no. 6, pp. 1429–1434, 1970.
- [9] R. Weber, B. Neuenschwander, and H. P. Weber, "Thermal effects in solid-state laser materials," *Opt. Mater.*, vol. 11, pp. 245–254, 1999.
- [10] T. Y. Fan, "Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, pp. 1457–1459, June 1993.
- [11] D. Golla, S. Knorke, W. Schöne, G. Ernst, M. Bode, A. Tünnermann, and H. Welling, "300-W cw diode-laser side-pumped Nd:YAG rod laser," *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 1517–1520, 1995.
- [12] B. J. LeGarrec, G. J. Razé, P. Y. Thro, and M. Gilbert, "High-average power diode-array-pumped frequency-doubled YAG laser," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 24, pp. 1990–1992, 1996.
- [13] H. Kogelnik, "On the propagation of Gaussian beams of light through lenslike media including those with a loss or gain variation," *Appl. Opt.*, vol. 4, no. 12, pp. 1562–1569, Dec. 1965.
- [14] H. Kogelnik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Appl. Opt.*, vol. 5, no. 10, pp. 1550–1567, Oct. 1966.
- [15] N. Hodgson and H. Weber, *Optical Resonators*, 1st ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1997.
- [16] V. Magni, "Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability," *Appl. Opt.*, vol. 25, no. 1, pp. 107–117, 1986.
- [17] E. Hecht, *Optics*, 2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1987, p. 214.