



## *Solid-State Laser Engineering*

**Dr. Walter Koechner**

### **4.1.7 العدسة الحرارية Thermal Lensing**

بعد أن وضعنا الإجهاد في ساق الليزر، سوف نعود الآن إلى التشويه البصري والذي يحدث نتيجة لكلا من التغير في درجة الحرارة والإجهاد. إن التغير في معامل الانكسار ممكن أن يفصل إلى متغير في درجة الحرارة ومتغير في الإجهاد.

وعليه

$$n(r) = n_0 + \Delta n(r)_T + \Delta n(r)_\varepsilon, \quad (7.38)$$

حيث  $n(r)$  هي التغير القطري لمعامل الانكسار،  $n_0$  هي معامل الانكسار في وسط ساق الليزر، و  $\Delta n(r)_T$  و  $\Delta n(r)_\varepsilon$  هما التغير في معامل الانكسار كدالة في درجة الحرارة وفي الإجهاد على التوالي.

معامل الانكسار كدالة في درجة الحرارة يمكن أن يوصف بالمعادلة التالية:

$$\Delta n(r)_T = [T(r) - T(0)] \left( \frac{dn}{dT} \right). \quad (7.39)$$

وبالاستعانة بالمعادلتين (7.5) و (7.7) نحصل على



$$\Delta n(r)_T = -\frac{Q}{4K} \frac{dn}{dT} r^2. \quad (7.40)$$

وكما نرى من المعادلات (34.7) و(35.7) و (40.7) فان معامل الانكسار في ساق الليزر يظهر تغير تربييعي مع نصف القطر  $r$ . ويعاني شعاع الليزر خلال انتشاره على امتداد محور الساق تغير تربييعي في الطور المكاني. هذا الاضطراب يكافئ تأثير عدسة كروية. البعد البؤري للمادة سوف يشبه البعد البؤري لعدسة، حيث إن معامل الانكسار يفترض انه يتغير طبقا للمعادلة التالية:

$$n(r) = n_0 \left( 1 - \frac{2r^2}{q^2} \right) \quad (7.41)$$

والبعد البؤري يعطى بالمعادلة التالية:

$$f \cong \frac{q^2}{4n_0 l}. \quad (7.42)$$

هذه المعادلة تقريبية حيث افترضنا أن البعد البؤري طويل جدا بالمقارنة مع طول ساق الليزر. المسافة  $f$  تقاس من المستوى الأساسي للساق وحتى نقطة البؤرة.

ونحصل على التغير الكلي لمعامل الانكسار من خلال إدخال المعادلات (34.7) و(35.7) و(40.7) في المعادلة (38.7):

$$n(r) = n_0 \left[ 1 - \frac{Q}{2K} \left( \frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\phi} \right) r^2 \right]. \quad (7.43)$$

وكما ناقشنا في الجزء الفرعي السابق، يكون التغير في معامل الانكسار الناتج عن الإجهاد الحراري معتمدا على استقطاب الضوء، لهذا فان معامل الإجهاد الضوئي  $C_{r,\phi}$  له قيمتين، الأولى للمركبة القطرية والأخر للمركبة المماسية للضوء المستقطب. بمقارنة المعادلة (43.7) مع المعادلة (41.7) ينتج ما يلي:

$$f' = \frac{K}{Ql} \left( \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n_0^3 \right)^{-1}. \quad (7.44)$$



وفي المعادلة الخاصة بإيجاد البعد البؤري لساق Nd:YAG، سوف ندخل التأثير الناتج عن نهايتي الساق. تحدث الاضطرابات في أنماط التشوهات الحرارية الرئيسية بالقرب من نهايتي ساق الليزر، حيث يغير السطح الحر الإجهاد الحادث. وهذا ما يعرف باسم تأثير النهايات end effects يكون هو السبب في التشوهات الفيزيائية الحادثة في مستوى سطحي نهايات الساق. وقد وجد ان الإجهاد الناتج عن التوازن الذاتي والمسبب للتشوه على سطح نهايتي الساق يحدث داخل المنطقة التي تعادل تقريبا قطر واحد من نهاية Nd:YAG ونصف قطر واحد من نهاية Nd:YAG. والانحراف عن السطح المستوي لنهايتي الساق يمكن أن نحصل عليها من

$$l(r) = \alpha l_0 [T(r) - T(0)], \quad (7.45)$$

حيث  $l_0$  هي طول نهاية مقطع الساق على المنطقة التي يحدث لها التمدد. وباستخدام  $l_0 = r_0$  والمعادلة (5.7) نحصل على

$$l(r) = \alpha r_0 \frac{Q}{4K} (r_0^2 - r^2) \quad (7.46)$$

البعد البؤري للساق الناتج عن تحذب وجهة نهاية الساق نحصل عليه من معادلة العدسة السمكية في علم البصريات الهندسية والذي يكون على النحو التالي:

$$f'' = \frac{R}{2(n_0 - 1)}, \quad (7.47)$$

حيث نصف قطر تحذب وجهة نهاية الساق يكون  $R = -(d^2 l / dr^2)^{-1}$ . ومن هذه المعادلات نستنتج إن البعد البؤري للساق والناتج عن التشوهات الفيزيائية للنهايات المستوية للساق هي

$$f'' = K [\alpha Q r_0 (n_0 - 1)]^{-1}. \quad (7.48)$$

إجمالي التأثيرات للحرارة والإجهاد على التغير في معامل الانكسار والتشوه الحادث لتحذب وجه نهاية الساق تؤدي إلى المعادلة التالية للبعد البؤري:



$$f = \frac{KA}{P_h} \left( \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n_0^3 + \frac{\alpha r_0(n_0 - 1)}{l} \right)^{-1}, \quad (7.49)$$

حيث  $A$  هي مساحة مقطع الساق و  $p_h$  هي الحرارة الكلية المتبددة في الساق.

إذا أدخلت متغيرات مادة مناسبة لـ Nd:YAG في المعادلة (49.7) يمكن أن نجد التغير في معامل الانكسار بالنسبة لدرجة الحرارة والذي له الأثر الكبير في العدسة الحرارية. والتغير في معامل الانكسار الناتج عن الإجهاد يؤدي إلى تعديل في البعد البؤري بحوالي 20%. والتحدب الحادث على وجهة نهاية الساق والناتج عن تمدد الساق يؤثر بأقل من 6% (22.7).

بإهمال تأثير تحدب وجهي نهايتي الساق، نلاحظ إن البعد البؤري يتناسب مع ثابت المادة ومساحة مقطع الساق  $A$  ويتناسب عكسيا مع الطاقة  $P_h$  المتبددة كحرارة في الساق. في البداية من الممكن أن نتساءل إن طول الساق لم يدخل في المعادلات. ولكن، في حالة الساق الطويلة على سبيل المثال فإن النقصان في الطاقة المتبددة لكل وحدة طول يعادل بطول الكبير للمسار.

نلاحظ من المعادلة (49.7) انه لدينا القليل من المرونة للتأثير على البعد البؤري. وثوابت المادة تحدد عندما نختار نوع مادة الليزر: الطاقة المتبددة  $P_h$  تحدد بالتطبيق (بالرغم من ذلك من الممكن أن نقلل من الحرارة عن طريق تجنب إشعاع الضخ الغير مستخدم)، ولهذا فإن المتغير الباقي هو مساحة مقطع الساق. البعد البؤري يمكن أن يزداد بزيادة مساحة المقطع  $A$ ، ولكن هذا غير عادي فهي ليست طريقة عملية لحل المشكلة، لان البلورة الكبيرة تقلل من كثافة طاقة ضخ وبالتالي تؤدي هذه الطريقة إلى تقليل الحصيلة  $gain$ .

طبقا للمعادلة (49.7)، فإن البعد البؤري لساق الليزر الاسطوانى، حيث تكون الحرارة المتولدة منتظمة داخل كامل المادة، فانه يمكن أن يعبر عن البعد البؤري بالمعادلة التالية:

$$f = M_{r,\phi} P_{in}^{-1}, \quad (7.50)$$

حيث  $M$  تحتوي كل متغيرات مادة ساق الليزر ومعامل الكفاءة  $\eta$  يربط الطاقة الكهربائية الداخلة مع الطاقة المتبددة كحرارة في الساق ( $P_h = \eta P_{in}$ ).

وبإمكاننا أن ندخل حساسية ساق الليزر والذي يعرف على النحو التالي:



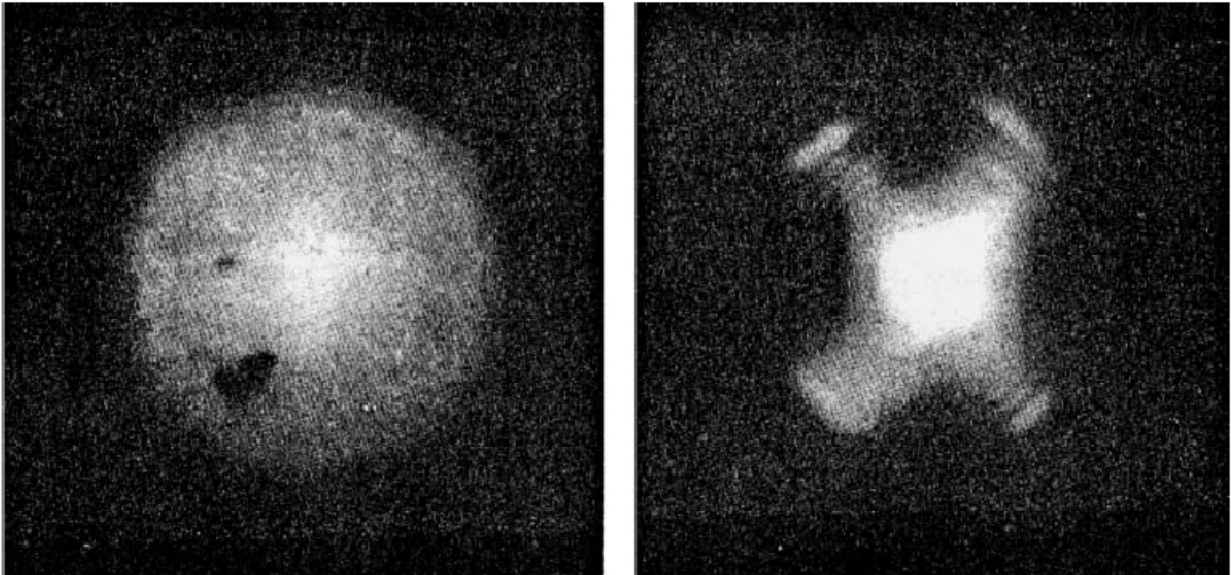
$$\frac{d(1/f)}{dP_{in}} = M_{r,\phi}^{-1}.$$

معامل الحساسية يصف مقدار القدرة الضوئية  $1/f$  لساق الليزر كمتغير في الطاقة الداخلة عليه. ولـ Nd:YAG قطره 0.63cm، وبافتراض ان 5% من الطاقة الكهربائية المستخدمة في مصباح الفلاش تتبدد على شكل حرارة، فانه يمكن ان نحصل على التغير في قدرة التبخير وهي  $0.5 \times 10^{-3}$  ديوبتر لكل وات من تغير طاقة المصباح.



## 6.1.7 تعويض التشوهات البصري Compensation of Optical Distortions

من التحليلات السابقة لاحظنا أن طول ساق الليزر الاسطوانية ذات التوزيع الحراري الداخلي المنتظم تظهر منحنى حراري يعتمد على مربع نصف القطر. وهذا يؤدي مباشرة إلى معامل انكسار يعتمد أيضا على مربع نصف القطر والذي يكون سببا في ان ساق الليزر يتصرف كعدسة ببعد بؤري متغير. القدرة البصرية للعدسة الحرارية تعتمد على طاقة الضخ.



(a)

(b)

الشكل 18.7 شكل شعاع ليزر مستمر من Nd:YAG بدون (a) و (b) مع وجود لوح بروستير

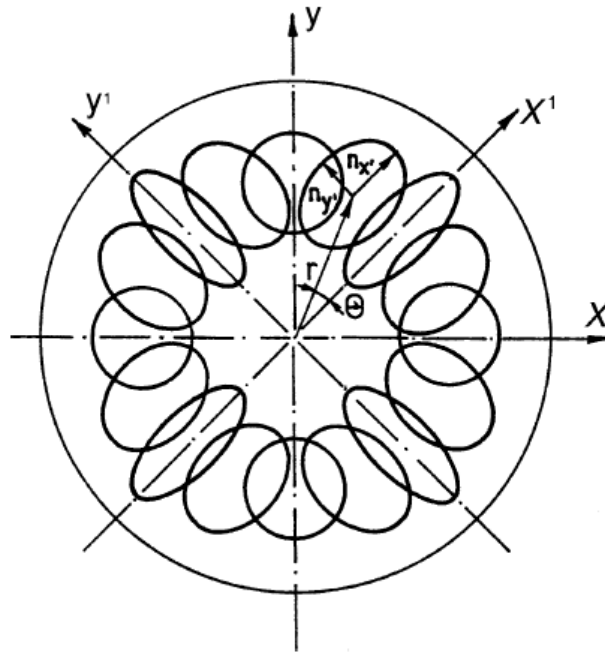
### Brewster في تجويف الليزر

التدرج الحراري يؤدي أيضا إلى توزيع تربيعي للانفعال. في بلورة مثل Nd:YAG، فإن تأثيرات الانفعال تختلف في الاتجاه القطري عن الاتجاه المحوري وتعطي زيادة، من خلال التأثير الإجهاد الضوئي، في التأثير الحراري المسبب لظاهرة الانكسار birefringence. معامل الانكسار المعتمد على الحرارة والإجهاد يسبب أيضا في ازدواج التبئير bifocusing.



ولأشعة مستقطبة خطيا، و birefringence تؤدي إلى فقد في الاستقطاب لان الشعاع المستقطب خطيا سوف يصبح مستقطب ببيضاويا بعد المرور خلال الساق.

الانحراف عن توزيع الضخ المنتظم قطريا يسبب زيغ بصري غير كروي في الساق. وفي الحالة المثالية لساق منتظم تماما،



الشكل 19.7 اتجاه محوري indicatrix للساق المتعرض للإجهاد الحراري (24.7)

فان العدسة الحرارية تكون كروية. وفي معظم الحالات العدسة الحرارية هي كروية لان الضخ يكون قويا في مركز الساق بالمقارنة مع المناطق الخارجية. كذلك بالاعتماد على الترتيبات لمصدر الضخ حول ساق الليزر فان العدسة الحرارية من الممكن ان لا تكون متماثلة قطريا

الحد الأعلى على الطاقة الداخلة يحدد بواسطة الحد الأعلى لقوة الكسر لمادة الليزر.

ولان التشوهات البصرية الحرارية لجهة الموجة TEM<sub>00</sub> تكون هي السبب الأساسي في تحديد قيمة الحد من الإنتاج، فان الميزة الأهم في الحصول على شعاع بجودة عالية هو ان نقل من الحرارة التي يتعرض لها الساق والتعويض عن التشوهات الموجودة في المذبذب. المشكلة الأساسية التي تقابل تصميم المذبذب هي



تزويدها بخطة تعويض ضد التشوهات البصرية لتتمكن من التغلب على التذبذبات في تبئير الساق والتي تنتج مع تغير شروط الضخ.

## التعويض للعدسة الحرارية Compensation of Thermal Lensing

التعويض الكامل عن الزيغ الحراري الناتج عن ساق الليزر صعب جدا لان البعد البؤري يتغير مع طاقة الضخ/ والضخ الغير منتظم يؤدي إلى زيغ غير كروي، والعدسة الحرارية تكون ثنائية التبئير.

التعويض عن متوسط المركبة الكروية: لكي نحصل على فكرة حول مقدار التعويض المطلوب، عادة نستخدم شعاع ليزر هيليوم نيون ويمر هذا الشعاع عبر ساق الليزر ويتم قياس متوسط البعد البؤري كدالة في طاقة الضخ. الهدف من تعويض الرتبة الأولى هو منع تأثير العدسة الموجبة لساق الليزر. الطريقة الأكثر استخداما هي إدخال عدسة سالبة في المذبذب، أو استخدام مذبذب يحتوي على تليسكوب، أو تصميم احد مرآيا المذبذب بان تكون محدبة السطح. الطريقتين الأخيرتين تم مناقشتهما في الجزء 9.1.5.

والتعويض الديناميكي والذي يستوعب التغيرات في طاقة الضخ يمكن ان نحصل عليه من خلال استخدام عناصر بصرية متحركة. على سبيل المثال، تلسكوب جاليليو ذو تكبير منخفض يمكن ان يوضح في داخل المذبذب، حيث ان الموضع النسبي للعدستين يمكن تحركهما بواسطة موتور. طريقة أخرى للتعويض الديناميكي هي استخدام عدسة سالبة أمام المرآة الخلفية المقعرة للمذبذب. وبضبط المسافة بين العناصر فان نصف قطر التحذب المكافئ للمرآة الخلفية يتغير، وهذا يجعل نصف قطر المرآة متغيراً (25.7). الحركة يمكن ان تتم بواسطة تثبيت المرآة الخلفية على حامل يتحرك بواسطة موتور. والتعويض الديناميكي للعدسة الحرارية، يتم بواسطة عناصر ضوئية يتحكم بها ميكروبروسيوسور، وفي بعض الأنظمة الحربية يتطلب الحصول على اقل تباعد ممكن لشعاع الليزر.

التعويض عن الزيغ الغير كروي. بوضوح الطرق التي ذكرت قبل قليل تعتمد على تشوه جبه الموجة المتماثلة قطريا. ولهذا فان ضخ منتظم مهم جدا للتعويض عن الزيغ في الطور.

في الكثير من أشكال الضخ، باستخدام ضوء الفلاش ومصادر الضخ بالدايود، والضخ بالإشعاع يكون مركزا أكثر عند المركز أكثر من الأطراف الخارجية للساق. والبعد البؤري لأي مساحة معطاة في الساق تتناسب عكسيا مع شدة الطاقة الضوئية الممتصة. وعليه في حالة تبئير ضوء الفلاش على المحور فان البعد البؤري





عند مركز الساق يقل عنه عند الحواف. أو انه يعكس بشكل مختلف معامل الانكسار الناتج عن التأثير الحراري ويحتوي على حدود اكبر من تربيعية. والعدسة السالبة سوف تتخلص من الحد التربيعي، ولكن التأثير ذو الرتبة الأعلى لا يمكن تعويضه.

هناك طريقتين أساسيتين ممكن الاعتماد عليهما للتصحيح الديناميكي لتشوهات جبهة الموجة الناتجة عن الحرارة بواسطة اقتران الطور أو التصحيح الاستاتيكي باستخدام لوح تصحيح كروي.

في المكبر، التشوهات في جبهة الموجية يمكن إزالتها باستخدام مرآة اقتران الطور الضوئي كما تم مناقشته في الجزء 10.5. هذه الطريقة تتطلب استخدام injection-seeded، ومذبذب ذو نطاق ضيق مع شعاع له اقل درجة حيود ممكنة، ومكبر مزدوج. المذبذب له قدرة منخفضة لان الزيغ فقط في المكبر هو الذي تم تصحيحه. بالمقارنة مع العدسات الكروية المنتهتة، واقتران الطور الضوئي يوفر تصحيح كامل لتشوهات جبهة الموجة على نطاق ديناميكي كبير.

التشوهات في الطور الأمامي الناتجة عن التأثير الحراري يمكن ان تصحح باستخدام عنصر بصري كروي في مسار الشعاع. ومنحنيات طور مناسبة يمكن ان تولد بأي من التقنيات المتوفرة حالياً مثل diamond turning، microlithography، والانتزاع الأيوني. وبالمثل كما في اقتران الطور الكروي، فان مثل هذا العنصر يمكن ان يصحح الزيغ الكوري والزيغ غير الكروي. ولكن التصحيح يمكن ان ينجز فقط من اجل مجموعة واحدة لشروط التشغيل. لان التصحيح الاستاتيكي يتطلب منحنى للزيغ الحراري والمستقر على فترة الزمن، هذه الطريقة مناسبة جدا للضخ بواسطة الدايدود.

في احد الليزرات الخاصة بنا، والمخصصة لتطبيقات الفضاء فان عدسة كروية من diamond-turned  $CaF_2$  كانت قادرة على القيام بالتصحيح بدرجة كبيرة جدا (26.7). في حالة المذبذب الذي يعمل بنظام الضخ بواسطة الدايدود أعطى متوسط طاقة قدرها 46W في حالة Q-switched mode داخل شعاع بحيود  $1.3x$ . تصحيح الطور كان لوح احد سطحه مقعر والآخر مستوي ومغطى بطبقة رقيقة ضد الانعكاس من  $CaF_2$  والتي تم وضعها في المكبر. تم قياس منحنى الطور البصري للمكبر بمراقبة السطح الفاصل بين الشعاع المنتشر خلال المكبر والمسار المرجعي لجهاز تداخل Mach-Zehnder. منحنى الطور كان ذو تماثل دائري، والزيغ الأغلب كان زيغ كروي والناتج عن التركيز القوي عند مركز الساق بالمقارنة مع المناطق الخارجية. نماذج التداخل تم تحديدها ودراستها بدقة باستخدام برامج لتحليل الأهداب الناتجة عن التداخل. وتم اختيار فلوريد الكالسيوم لأنه بسهولة تحويلة diamond turned وهي مادة قوية.



**التخلص من التبيير المزدوج.** التغير في البعد البؤري يسبب وجود مناطق مستقرة من النمط  $TEM_{00}$  كما تم مناقشته في الجزء 9.1.5. وتعمل ظاهرة Birefringence على فصل هذا النمط الى مركبتين تنتشران على امتداد القطر والمحور المماسي. النمط  $TEM_{00}$  يمكن ان نحصل عليه فقط في نطاق طاقة الضخ التي تقع في مناطق الاستقرار لمحوري الاستقطاب المتداخلين. وكما ان نصف قطر النمط  $TEM_{00}$ ، والشعاع الخارج يزداد فان التداخلات بين المناطق تقل. والفصل بين مناطق الاستقرار في المذبذب بواسطة نمطي الاستقطاب يجعلنا من الصعب الحصول على حجم بقعة ليزر ممتازة تعمل على زيادة كفاءة تداخل الشعاع.

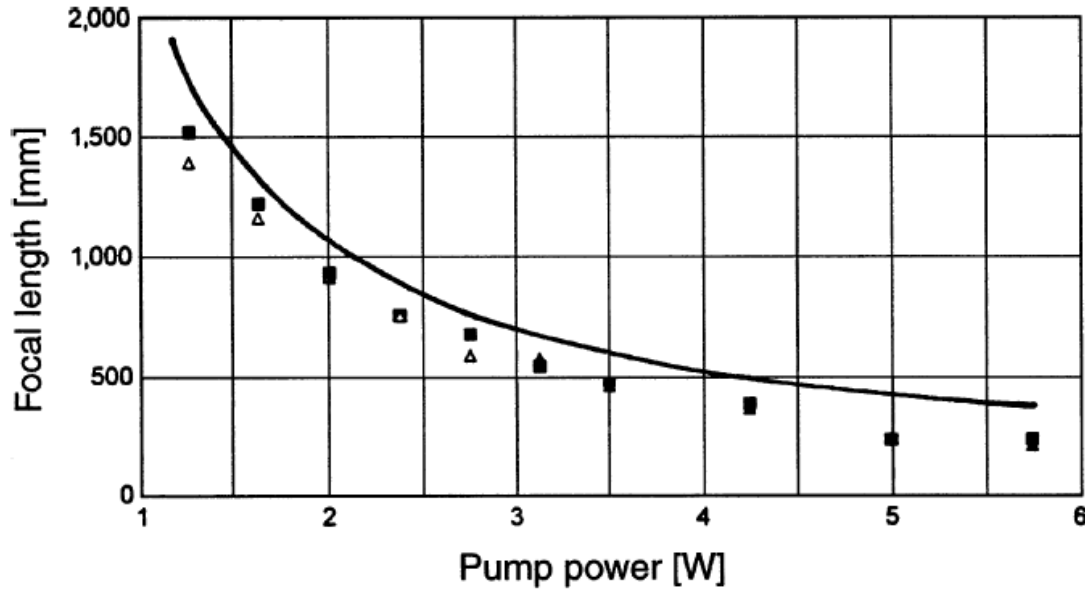
النقصان العام في التشوهات البصرية الناتجة عن الحرارة يمكن ان نحصل عليها اذا كانت عدسة التعويض الحرارية دمجت مع عدسة التبيير المزدوج bifocusing.



### 2.3.7 العدسة الحرارية Thermal Lensing

من العوامل الأساسية في تصميم مذبذب ضوئي هو مقدار العدسة الحرارية التي تنتج بسبب توزيع درجة الحرارة في بلورة الليزر. في التقريب الأولي العدسة الحرارية يمكن أن توصف باعتبار أن معامل الانكسار يعتمد على درجة الحرارة فقط. كذلك بافتراض إن التدفق الحراري قطري في داخل الساق والذي هو على اتصال مباشر مع مبدد الحرارة ليحافظ عليها عند درجة حرارة ثابتة، والحل التحليلي للبعد البؤري للعدسة الحرارية تم اشتقاقه في (63.7). شعاع الضخ الساقط على البلورة افترض على انه على النحو التالي:

$$I(r, z) = I_0 \exp(-2r^2/w_0^2) \exp(-\alpha_0 z), \quad (7.69)$$



الشكل 40.7 العدسة الحرارية في ليزر Nd:YAG. القيم المقاسة هي من (71.7)

حيث  $\alpha_0$  هي معامل الامتصاص و  $w_p$  هي  $(1/e^2)$  هي نصف قطر شعاع الضخ الجاوسيان. و  $P_h$  هي الجزء من طاقة الضخ التي تسبب تسخين الساق، والبعد البؤري الفعال لكامل الساق يمكن ان توصف بالمعادلة التالية:

$$f = \frac{\pi K w_p^2}{P_h (dn/dT)} \left( \frac{1}{1 - \exp(-\alpha_0 l)} \right), \quad (7.70)$$



حيث  $K$  هي الموصلية الحرارية لمادة الليزر و  $dn/dT$  هي التغير في معامل الانكسار بالنسبة لدرجة الحرارة. ومن المعادلة (70.7) نستنتج ان البعد البؤري الفعال يعتمد على مربع نصف قطر الشعاع المستخدم في الضخ  $w_p$ . ولهذا، فانه من المفضل استخدام اكبر نصف قطر ممكن لشعاع الضخ بما يتناسب مع نمط المذبذب.

اعتماد العدسة الحرارية على طاقة الضخ موضحة في الشكل 40.7. وساق Nd:YAG بطول 20mm ونصف قطر 4.8mm تم ضخه باستخدام ديودات متصلة مع ألياف بصرية في شكل مصفوفة خطية. والنتائج من حزمة الألياف البصرية تم توجيهها إلى سطح البلورة في بقعة ضخ نصف قطرها  $w_p = 340 \mu m$ . الشكل 40.7 يعرض قياس العدسة الحرارية والقيم المحسوبة طبقا للمعادلة (40.7). باستخدام المعادلة، افترضنا ان 32% من طاقة الضخ تسببت في تسخين الساق. ومتغيرات المادة المطلوبة لـ Nd:YAG هي  $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} K^{-1}$ ، و  $\alpha_0 = 4.1 cm^{-1}$ ، و  $K = 0.13 W/cm K$ .

المعادلة (70.7) هي معادلة تقريبية لطاقت ضخ منخفضة ومتوسطة. وعند مستويات ضخ عالية، فان مشاركة نهاية انتفاخ العدسة الحرارية يكون مؤثرا جدا وفي Nd:YVO<sub>4</sub> يمكن ان يكون كبيرا جدا مثل تغيرات معامل الانكسار الحراري (72.7). وكما ناقشنا في الأعلى فان نهاية الانتفاخ الناتج عن التشوه الحراري يمكن ان يمنع بواسطة الانتشار للنهية الغير مطعمة عند قمة الساق عند ضخ ساق الليزر من الجانب. وطريقة أخرى لتقليل الانتفاخ هو تطبيق إجهاد ميكانيكي على البلورة لتعويض التشويه الناتج عن الحرارة. وفي هذه الطريقة تضغط بلورة رقيقة بين نافذة من مادة السافير ومبدد حراري من النحاس. شعاع الضخ وشعاع المذبذب يدخلان خلال نافذة السافير. وعند تطبيق ضغط بمقدار 700 MPa على البلورة يحدث تقليل واضح في العدسة الحرارية (73.7).

كذلك باستخدام نافذة من مادة السافير كمبدد حراري بدون تطبيق ضغط كبير، تم قياس نقصان ملحوظ في تشوه السطح في Nd:YAG (69.7). وبصفة عامة، التشوه السطحي يكون أكثر وضوحا في Nd:YVO<sub>4</sub> بالمقارنة مع Nd:YAG (72.7، 74).

المقدار الكلي للعدسة الحرارية ليست هي التأثير الأقوى في حالة استخدام طريقة التبريد واختيار البلورة، ولكن أيضا اعتماده على الشكل وطاقة الضخ. في (74.7) تبين ان الشعاع الجاوسيان له عدسة حرارية وهي اقوي بما يعادل الضعف من الشعاع الذي له توزيع الشدة الذي يشبه القبة top hat intensity distribution.



تمت الترجمة في المركز العلمي للترجمة

[www.trgma.com](http://www.trgma.com)

24-11-2009