Effect Of Pump Beam Shape On Thermal And Stress Distribution Within The Laser Crystal In Diode Pumped Solid-State Lasers

تأثير شكل حزمة الضخ في توزع الحرارة والإجهادات في بلورات الليزرات الصلبة المضخوخة بليزر نصف ناقل

عيسى سليمان: المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته- جامعة دمشق.
مصطفى صائم الدهر: المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته- جامعة دمشق.
عنوان التواصل: issa1983.suleman@damascusuniversity.edu.sy
تاريخ التسليم: ١٥ أيار ٢٠٢٤ - **تاريخ القبول**: ٣ حزيران ٢٠٢٤

ABSTRACT

Thermal effects formed in a solid-state laser crystal, which cause the appearance of thermal lensing، mechanical stress and birefringence, lead to laser beam distortion and shorten the lifetime of laser crystal، and hinder getting a high-quality laser beam, even when using diode end-pumped solid-state lasers. In this work, the thermal effects in two types of end-pumped solid state lasers namely Nd:YAG and Nd:KGW have been investigated. In this study, the finite element method (FEM) was used to calculate thermal and stress distribution within end pumped laser crystals. The calculations carried out for different power of 5، 10 and 15 Watt and different pump beam shapes: first a Gaussian beam، second super Gaussian and last a Top Hat beam. The results were compared to experimental and theoretical values from previous studies. We also calculated the focal length of thermal lens and compared the results to an experimental measurement for one case of Nd:KGW Laser. The obtained results are useful in designing diode end-pumped solid-state lasers and in evaluating and mitigating thermal effects within laser crystals, which is important to improve laser performance and beam quality. The results are also useful in evaluating stress intensity resulting from thermal distribution gradient within the laser-generating crystal, to prevent cracks, bulges or crystal damage.

Keywords: Nd:YAG، Nd:KGW، Laser Diode، End-Pumped، Thermal Lensing، Mechanical Stress.

الملخص

إن الآثار الحرارية المتشكلة في بلورة الليزر الصلب، التي ينتج عنها ظهور العدسة الحرارية، والإجهاد الميكانيكي، وقرينة انكسار مضاعفة (birefringence))، تؤدي إلى تشوهات في الحزمة الليزرية، وإلى إنقاص عمر البلورة، وتمنع من الحصول على حزمة ليزر بجودة عالية، حتى مع استخدام الليزرات الصلبة المضخوخة بليزرات نصف ناقلة. في هذا العمل تمت دراسة الآثار الحرارية في نوعين من الليزرات الصلبة Nd:YAG و Nd:KGW المضخوخة النهاية بليزر نصف ناقل. استخدمنا في هذه الدراسة طريقة العناصر المنتهية Finite Element Method لحساب التوزع الحراري والإجهادات داخل البلورة وذلك من أجل طاقات ٥ و١٠ و١٥ واط، وأشكال مختلفة من حزم الضخ؛ أولاً حزمة غاوصية، وثانياً حزمة سوبر غاوصية، وأخيراً حزمة على شكل قبعة مسطحة. وجرت مقارنة النتائج مع قيم نظرية وتجريبية من دراسات سابقة. كما جرى حساب البعد المحرقي للعدسة الحرارية ومقارنته مع قياس تجريبي في حالة واحدة لبلورة ليزر Nd:KGW. النتائج التي حصلنا عليها تفيد في تصميم الليزرات الصلبة المضخوخة النهاية بديود ليزري، وتساعد في تقييم وتخفيف الأثر الحراري ضمن البلورة؛ ما يفيد في تحسين أداء الليزر وجودة حزمة الليزر الناتجة، كما يفيد في تقييم شدة الإجهادات الناتجة عن تدرج التوزع الحراري في البلورات المولدة لليزر وذلك لمنع حدوث تشققات أو انتفاخات أو تخريب للبلورات.

الكلمات المفتاحية: Nd:YAG، Nd:KGW، ديود ليزري، الضخ من النهاية، العدسة الحرارية، إجهادات ميكانيكية.

المقدمة

إن الحصول على طاقات عالية من الليزرات الصلبة المضخوخة بليزرات نصف ناقلة وتتمتع بجودة عالية لحزمة الخرج محدود بالآثار الحرارية المتشكلة في بلورة الليزر، التي تسبب تشكل العدسة الحرارية thermal lensing نتيجة للتدرج في التوزع الحراري داخل البلورة والخسائر الناتجة عن تشوه الاستقطابية depolarization losses ويمكن حدوث تصدع في بلورة الليزر[١-٣] . لهذا الأسباب طُورت نماذج للضخ الطولي longitudinal pumping configuration التي تدعى بالليزرات الصلبة المضخوخة النهاية end-pumped solid-state lasers ما يساعد على الحصول على حزم خرج ذات مردودية وجودة عالية بالمقارنة مع الليزرات ذات الضخ الجانبي side pumped lasers التي تستخدم ليزارت نصف ناقلة أو مصابيح وميضية Flash lamp. لتحقيق هذا الغرض تستخدم ديودات ليزرية مقترنة بليف ضوئي fiber-coupled laser diode لضخ بلورة الليزر على نحو طولي، وتقترن نهاية الليف بمجموعة عدسات ميكروية بحيث يضبط شكل شعاع حزمة الضخ ليكون مناسباً للبلورة الصلبة التي نريد توليد ليزر منها،

هذا الترتيب يسمح لنا باستثمار أغلب الطاقة المنبعثة من الديود الليزري [٤] . إن استخدام تقنية الضخ بالألياف الضوئية تؤمن توزعاً مناسباً ومنتظماً لحزمة الضخ، وتُبقي مجاوب الليزر بعيداً عن الآثار الجانبية الناجمة عن مصدر الضخ. في هذا الترتيب يجري تركيز كمية كبيرة من ضوء الضخ ضمن مساحة صغيرة داخل البلورة وبالقرب من وجه بلورة الليزر ما يؤدي إلى تولد تدرج حراري شديد بين مركز بلورة الليزر وسطحها الخارجي، الذي يؤدي بدوره إلى نشوء العدسة الحرارية thermal lens وإجهادات وتوترات ميكانيكية stress وقرينة انكسار مضاعفة birefringence [٥] .
تم في هذه الدراسة اختيار نوعين من البلورات الصلبة لدراسة الآثار الحرارية المتشكلة فيها نتيجة للضخ بليزر نصف ناقل وفق ترتيب النهاية المضخوخة، هذه البلورات هي Nd:YAG الواسعة الانتشار، وهي من أهم البلورات الصلبة المستخدمة في توليد الليزر، وبلورة Nd:KGW لما لها من ميزات مناسبة جداً للحصول على طاقات عالية من الليزرات المضخوخة النهاية end-pumping بالديودات الليزرية. تمت دراسة عدد من أشكال حزمة الضخ المطبقة على كل من البلورات المدروسة، وحساب توزع درجة الحرارة والحمل الحراري Heat load وشدة الإجهادات المتشكلة داخل البلورة، كما تم حساب البعد المحرقي للعدسة الحرارية المتشكلة في كل حالة.

الآثار الحرارية الضوئية Thermo-Optic Effects:

يسمى الفرق بين طاقة فوتونات الضخ وطاقة فوتونات الليزر في الليزرات الصلبة المضخوخة ضوئياً بوساطة الديودات الليزرية بالعيوب الكمومية الحرارية quantum defect heating وهي السبب الرئيس لتولد الحرارة في الشبكة البلورية للوسط الفعال. إضافة إلى ذلك، إن الانتقالات غير المشعة من السوية الليزرية العليا ومن سويات نطاق الضخ إلى السويات الأرضية والناتجة عن ظاهرة التركيز الخافض concentration quenching تقدم إلى الوسط الفعال على هيئة حرارة [٦].
تُزال الحرارة المتولدة داخل قضيب الليزر، الناتجة عن عملية الامتصاص لحزمة ضوء الضخ، بوساطة مبدد حراري Heat Sink على كامل سطح قضيب الليزر الأسطواني، وهو شرط للحالة المستقرة بافتراض انتظام تولد الحرارة الداخلي. يجري الحصول على انتظام في التوزع الحراري باستخدام حزمة ضخ متناظرة محورياً axisymmetric، لهذا فإن الضخ من النهاية End-pumping بوساطة ديود ليزري مقترن بليف ضوئي fiber coupled يؤمن توزعاً منتظماً ومتناظراً.
بافتراض انتظام التبريد على سطح قضيب الليزر المنتهي الأبعاد أيضاً بحيث تكون درجات الحرارة في كل نقطة على طول محور البلورة ثابتة مع الزمن. وبافتراض معامل التوصيل الحراري K_c Thermal conductivity عدد سلمي ثابت وغير تابع لدرجة الحرارة [٧].
باعتماد الفرضيات السابقة، يمكن كتابة المعادلة التفاضلية للتوصيل الحراري ضمن بلورة أسطوانية بالصيغة التالية [٧-١١]

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=-\frac{Q(r,z)}{K}$$

T(r،z): درجة الحرارة بالكلفن K،
r،z: محور طول البلورة، نصف قطر البلورة
K_ : معامل التوصيل الحراري W/(m.K)،
Q(r،z): الحمل الحراري في واحدة الحجم ٣^W/m.

إن التوزع الحراري داخل بلورة الليزر هو تابع لكثافة الطاقة الممتصة absorbed power density والتي بدورها تأخذ شكل توزع حزمة الضخ عند أي مقطع عمودي على محور بلورة الليزر الموازي لمنحى حزمة الضخ، هذا من جهة، ومن جهة أخرى فإن شدة ضوء الضخ تتناقص على طول المحور z وتتعلق بشدة الامتصاص. فمن أجل حزمة ضخ منقولة بليف ضوئي Fiber-Optic وتوزع حزمة على شكل قبعة مسطحة top-hat distribution يمكن التعبير عن قيمة Q(r،z) بالمعادلة التالية [٦]:

$$Q(r,z)=\frac{\propto \beta P}{C\pi w_p^2}exp\left[-2\left|\frac{r}{w_p}\right|^{SG}-\propto z\right]$$

حيث إن:

$$w_p=\sqrt{\left[w_0^2+((z-f)\theta)^2\right]}\ ,\ C=2^{-2/SG_{L,R}}\Gamma\left(1+\frac{2}{SG_{L,R}}\right)$$

حيث $P[W]$: استطاعة الضخ الكلية Total Pump Power.
$\alpha(1/mm)$: معامل الامتصاص Absorption Coefficient.
β: معامل الكفاءة الحراري Heat Efficiency Coefficient يعبر عن كمية طاقة الضخ التي تتحول الى حرارة Fractional Thermal Load من أجل بلورة Nd:KGW تكون $\beta \approx 0.3$.
$z(mm)$: البعد عن مركز وجه البلورة.
$L(mm)$: طول البلورة.
Γ: تابع غاما Gamma function.
SG: معامل يدل على مرتبة (أس) الدالة الغوصية. من أجل SG = 2 نحصل على التوزع الغوصي العادي. عند قيم أعلى لـ SG نحصل على توزع على شكل قبعة مسطحة top-hat distribution .
$\theta(mrad)$: التفرق الزاوي لحزمة الضخ .
$f(mm)$: بُعد تخصر حزمة الضخ عن وجه بلورة الليزر، تكون قيمة f موجبة إذا كان موقعها داخل البلورة، وسالبة إذا كانت خارجها .
$w_0(\mu m)$: نصف قطر تخصر حزمة الضخ شكل (1).
يتناسب فرق المسار الضوئي القطري radial OPD(r) optical path difference مع مربع نصف القطر، وحسب تقريب العدسات الكروية الرقيقة يمكن أن نكتب[6]

$$OPD(r)=OPD_0-\frac{r^2}{2f_{th}}$$

حيث f_{th} هو البعد المحرقي للعدسة الحرارية بفرض أن السطح الجانبي لبلورة الليزر على تماس مباشر مع المشع الحراري والمصنوع بوجه عام من قطعة نحاس مبردة . ستكون الشروط الحدية كالتالي: الشرط الحدي الأول هو استمرارية التدفق أو الجريان الحراري عبر هذه التماسات [7]، والشرط الحدي الثاني: $T(r_0)=T_c$.
إن التغير في قرينة الانكسار في بلورة الليزر أثناء عملية توليد الليزر يمكن تقسيمه إلى حدين:
الحد الأول يعتمد على توزع درجة الحرارة، والحد الثاني يعتمد على الإجهاد [6] ، بحيث يمكن أن نكتب:

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

n_0 : قرينة الانكسار الطبيعية للبلورة.
$n(r)$: قرينة الانكسار الكلية عند الضخ.

$n(r)_T$ و $n(r)_\varepsilon$: قرينتا الانكسار المتعلقتان بدرجة الحرارة والإجهاد على الترتيب

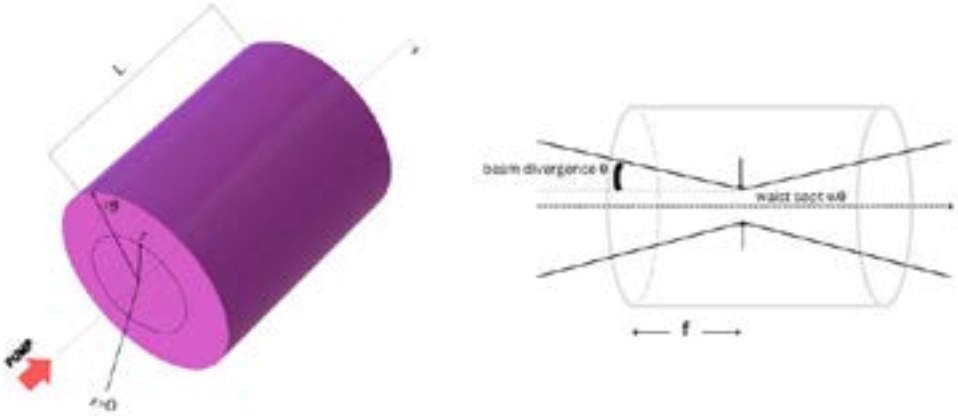
فمن أجل حزمة ضوئية مترابطة coherent ومحورية paraxial تنتشر باتجاه المحور z ، يُعبر عن التغير في قرينة الانكسار كتابع لتغير قرينة الانكسار مع درجة الحرارة $\frac{dn}{dT}$ و كتابع للإجهاد كما يلي [7,6] :

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

و

$$\Delta n(r,z)_\varepsilon = \sum_{i,j=1}^{3} \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_{ij}} \varepsilon_{ij}(r,z)$$

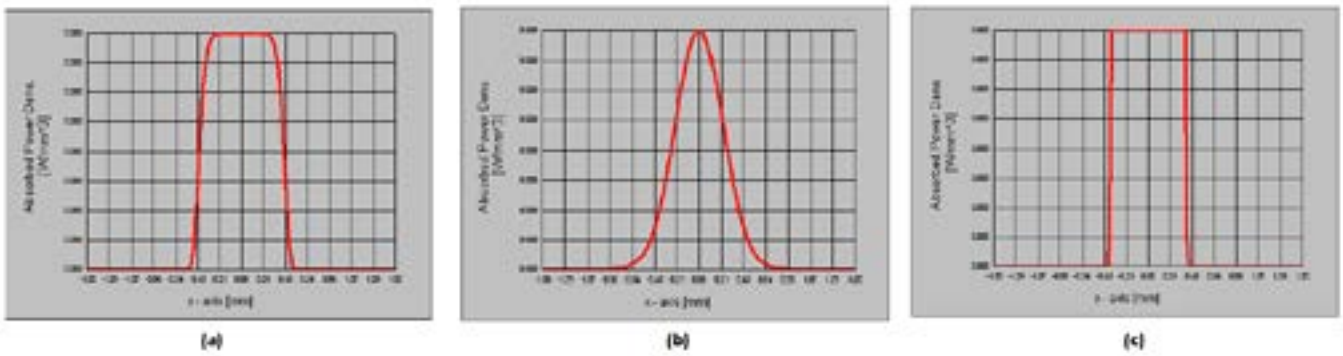
حيث ε_{ij} تنسورات الإجهاد.



الشكل (١): التصميم الهندسي للضخ من النهاية

المواد والطرائق:

قمنا بتطبيق طريقة العناصر المنتهية [١٣,١٢] باستخدام برنامج Lascad (LAS-CAD GmbH، Munich، Germany، http://www.las-cad.com) لدراسة الأثر الحراري ضمن بلورات الليزرات الصلبة المضخوخة النهاية بليزر نصف ناقل، وفق الترتيب الموضح في الشكل (١). تمت الدراسة من أجل (١٣) ثلاث عشرة حالة مختلفة من حالات استطاعة الضخ وشكل حزمة الضخ، ومن أجل نوعين من بلورات الليزرات الصلبة Nd:YAG و Nd:KGW المضخوخة النهاية. الليزر المستخدم في ضخ هذا النوع من البلورات هو ليزر نصف ناقل بطول موجي يبلغ ٨٠٨ nm. , ويبين الجدول (١) الحالات الست والعشرين المدروسة. تتضمن الدراسة استطاعات ضخ بقيمة ٥ و١٠ و١٥ واطاً، وثلاثة أشكال مختلفة لحزم ضخ غاوصية وسوبر غاوصية (n=٤ أو ٦ أو ١٠) وقبعة مسطحة Top Hat مبينة في الشكل (٢)، الذي يقارن بين شكل حزم الضخ، حزمة غاوصية (a) وحزمة سوبر غاوصية (b) عند قيمة n=١٠ وحزمة على شكل قبعة مسطحة (c). كما تمت دراسة حالة بلورة مركبة تحتوي جزءاً غير مشاب يلعب دور تبريد محوري لبلورة الليزر.



الشكل (٢) مقارنة بين شكل حزم الضخ، حزمة غاوصية (a) وحزمة سوبر غاوصية (b) عند قيمة n=١٠ وحزمة على شكل قبعة مسطحة (c)

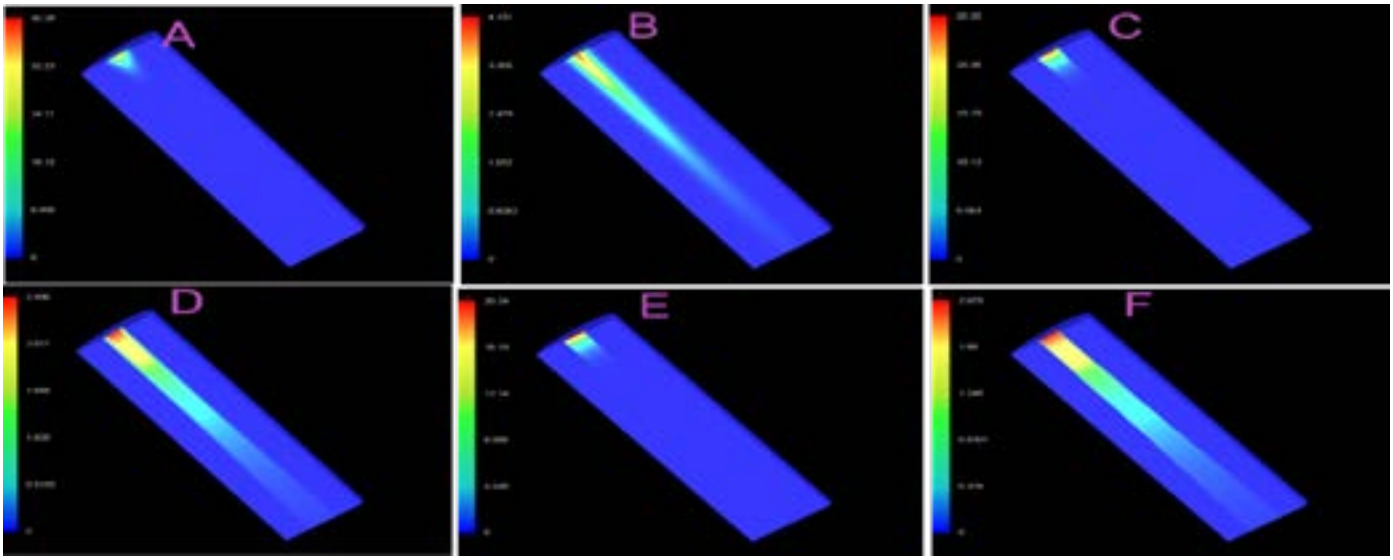
القيم العددية للثوابت الفيزيائية الخاصة بالبلورات المدروسة، التي استُخدمت في الحسابات العددية، معطاة في الجدول (١). جميع البلورات المدروسة أسطوانية الشكل، ولها الأبعاد نفسها: الارتفاع ١٠mm والقطر ٣mm، وتخصر حزمة الضخ ٤٠٠ mμ. الثوابت الفيزيائية المستخدمة في الحسابات موجودة ضمن الملحقات.

النتائج

لقد قمنا بحساب التوزع الحراري والإجهادات الميكانيكية داخل البلورة؛ ويبين الشكل (٣) نتائج حساب توزع الحمل الحراري ضمن حجم البلورة المدروسة لحالات مختارة من الدراسة، ويبين الشكلان (٤) و(٥) توزع درجة الحرارة والإجهادات الميكانيكية في بلورتي Nd:YAG وNd:KGW.

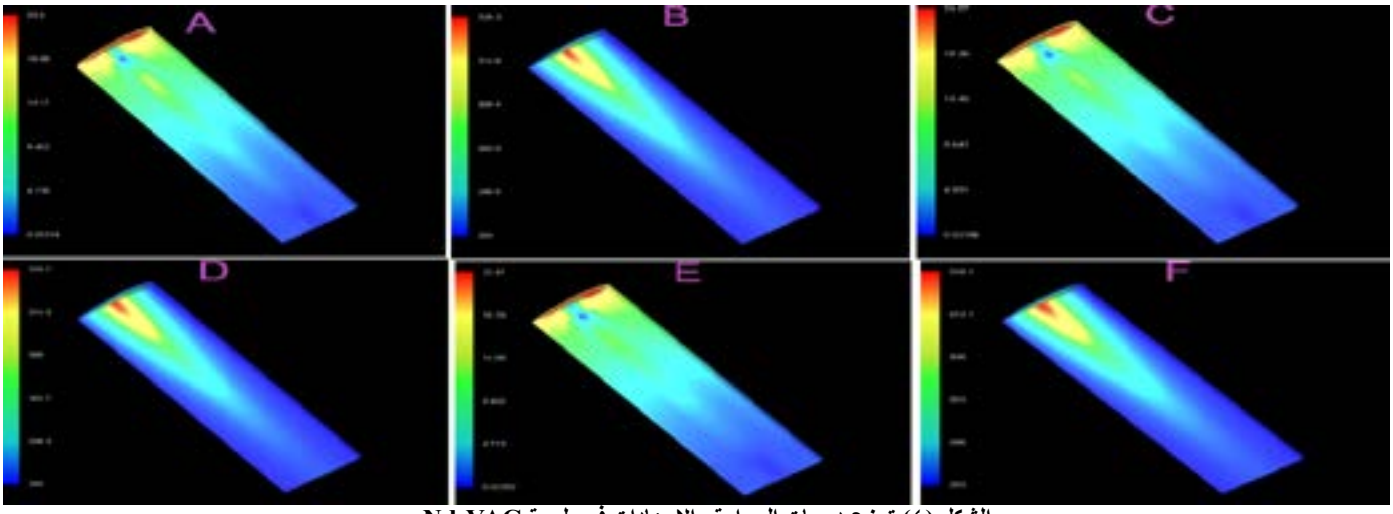
يوضح الشكل (٣) الحمل الحراري في بلورتي Nd:YAG و Nd:KGW، ويوضح الشكل (٤) توزع درجات الحرارة والإجهادات في بلورة Nd:YAG، ويوضح الشكل (٥) توزع درجات الحرارة والإجهادات في بلورة Nd:KGW، – نلاحظ من الشكل (٣) أن الحمل الحراري يتجمع في حجم أصغر في حالة بلورة Nd:KGW من حالة بلورة Nd:YAG، وذلك ناتج عن اختلاف الخواص الحرارية، واختلاف شدة امتصاص ليزر الضخ بين البلورتين. كما نلاحظ من الشكلين (٤) و(٥) أن توزع درجة الحرارة والإجهادات في بلورة Nd:KGW يكون في حجم أصغر من

بلورة Nd:YAG ما يؤدي إلى ارتفاع أكبر في درجة الحرارة وفي شدة الإجهادات في البلورة، لكن امتداد التدرج الحراري على جزء كبير من بلورة Nd:YAG يؤدي إلى اختلاف أكبر في المسير الضوئي ضمن البلورة، ومن ثم إلى عدسة حرارية أقوى.



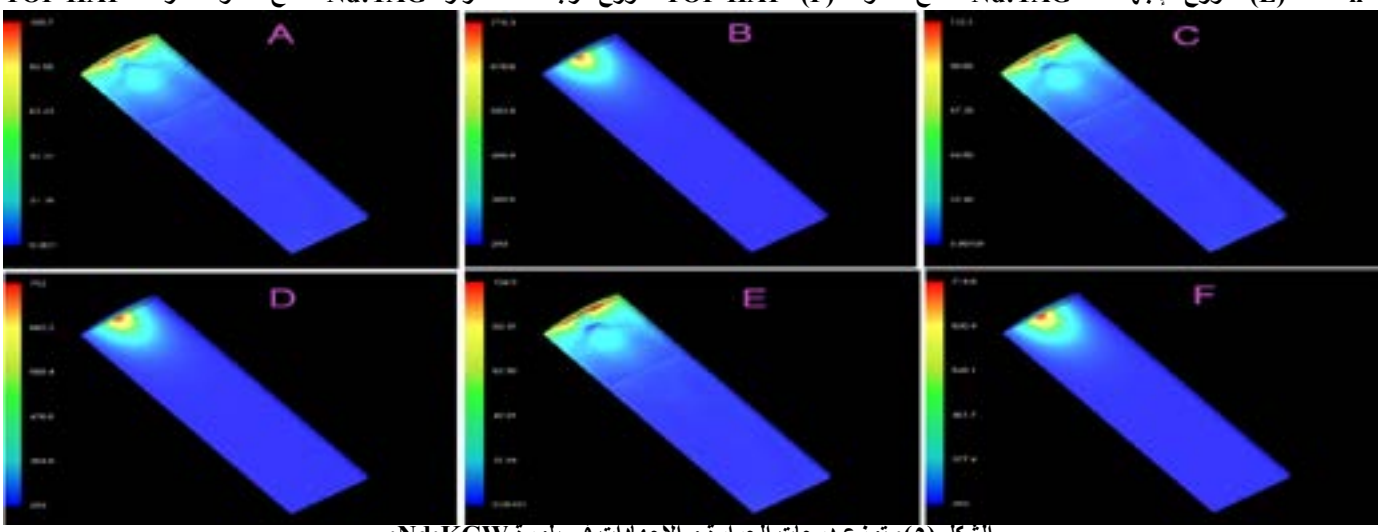
الشكل (٣) الحمل الحراري في بلورتي Nd:YAG و Nd:KGW:

(A) الحمل الحراري Nd:KGW ضخ١٠ واط حزمة غاوصية، (B) الحمل الحراري Nd:YAG ضخ١٠ واط حزمة غاوصية، (C) الحمل الحراري Nd:KGW ضخ١٠ واط حزمة سوبرغاوصية n=١٠، (D) الحمل الحراري Nd:YAG ضخ١٠ واط حزمة سوبرغاوصية n=١٠، (E) الحمل الحراري Nd:KGW ضخ١٠ واط (F) TOP HAT، الحمل الحراري Nd:YAG ضخ١٠ واط TOP HAT



الشكل (٤) توزع درجات الحرارة والإجهادات في بلورة Nd:YAG:

(A) توزع الإجهادات Nd:YAG ضخ١٠ واط حزمة غاوصية، (B) توزع درجة الحرارة Nd:YAG ضخ١٠ واط حزمة غاوصية، (C) توزع الإجهادات Nd:YAG ضخ١٠ واط حزمة سوبر غاوصية n=١٠، (D) توزع درجة الحرارة Nd:YAG ضخ١٠ واط حزمة سوبر غاوصية n=١٠، (E) توزع الإجهادات Nd:YAG ضخ١٠ واط (F) TOP HAT، توزع درجات الحرارة Nd:YAG ضخ١٠ واط حزمة TOP HAT



الشكل (٥): توزع درجات الحرارة و الإجهادات في بلورة Nd:KGW:

(A) توزع الإجهادات Nd:KGW ضخ١٠ واط حزمة غاوصية، (B) توزع درجة الحرارة Nd:KGW ضخ١٠ واط حزمة غاوصية، (C) توزع الإجهادات Nd:KGW ضخ١٠ واط حزمة سوبر غاوصية n=١٠، (D) توزع درجة الحرارة Nd:KGW ضخ١٠ واط حزمة سوبر غاوصية n=١٠، (E) توزع الإجهادات Nd:KGW ضخ١٠ واط (F) TOP HAT، توزع درجات الحرارة Nd:KGW ضخ١٠ واط حزمة TOP HAT

- الجدول (١) يوضح القيم العظمى لدرجة الحرارة، وقيم الإجهاد الأعظمي، وقيم البعد المحرقي للعدسة الحرارية من أجل جميع البلورات المدروسة.

الجدول (١): درجة الحرارة الأعظمية داخل البلورات المدروسة

نوع البلورة	شكل حزمة الضخ	درجة الحرارة الأعظمية K	شدة الإجهاد الأعظمية N/mm^2	البعد المحرقي للعدسة الحرارية Mm
Nd:YAG	غاوصية ضخ 5 واط	306.6	11.8	382
	غاوصية ضخ 10 واط	320.3	23.6	190
	غاوصية ضخ 15 واط	333.9	35.39	126
	، ضخ 10 واط n= 4 سوبر غاوصية	320.7	24.2	216
	، ضخ 10 واط n= 6 سوبر غاوصية	320.2	24.18	241
	، ضخ 10 واط n= 10 سوبر غاوصية	319.7	24.07	270
	ضخ 5 واط Top Hat	305.5	11.73	672
	ضخ 10 واط Top Hat	318.1	23.47	335
	ضخ 15 واط Top Hat	330.6	35.2	223
Nd:YAG*	غاوصية ضخ 10 واط	313.3	17.13	268
	غاوصية ضخ 15 واط	323.5	25.69	178
	ضخ 10 واط Top Hat	311.6	15.35	500
	ضخ 15 واط Top Hat	320.9	23.02	333
Nd:KGW	غاوصية ضخ 5 واط	589.1	62.88	111
	غاوصية ضخ 10 واط	775.3	105.7	81
	غاوصية ضخ 15 واط	1181	188.6	34
	، ضخ 10 واط n= 4 سوبر غاوصية	779.3	114	85
	، ضخ 10 واط n= 6 سوبر غاوصية	767.6	113.8	91
	، ضخ 10 واط n= 10 سوبر غاوصية	752	112.1	100
	ضخ 5 واط Top Hat	503.9	52.47	246
	ضخ 10 واط Top Hat	714.8	104.9	121
	ضخ 15 واط Top Hat	822.8	125.7	74
Nd:KGW*	غاوصية ضخ 10 واط	562.9	88.21	1292
	غاوصية ضخ 15 واط	697.9	132.3	861
	ضخ 10 واط Top Hat	525.3	75.24	2266
	ضخ 15 واط Top Hat	641.5	112.9	1500

*بلورة مركبة مع جزء غير مشاب، بطول 3 mm.

حيث نلاحظ أن القيم تتراوح بين ٣٠٠ K و٣٣٤ لبلورة Nd:YAG، وبين ٥٠٣ و١١٨١ لبلورة Nd:KGW. تتوافق هذه النتائج مع المراجع والدراسات السابقة [٤] و[١٧] ، ويعود ارتفاع درجة الحرارة الكبير في بلورة Nd:KGW إلى التركيز العالي لإيونات الإشابة، والناقلية الحرارية الضعيفة لهذه البلورة بالمقارنة مع بلورة Nd:YAG، علماً أن درجة حرارة انصهار كلا البلورتين أعلى من ٢٠٠٠ K [٤] أي تبقى درجة الحرارة أقل بكثير من درجة الانصهار، كما يلاحظ أن شكل حزمة الضخ يلعب دوراً ملحوظاً في درجة الحرارة المتشكلة داخل البلورة، ففي حالة الحزمة السوبر غاوصية (خصوصاً حالة n=١٠) كانت درجة الحرارة العظمى أقل من الحزمة الغاوصية. كما كانت درجة الحرارة العظمى الناتجة عن حزمة الضخ من الشكل Top Hat أقل من الحزمة الغاوصية من أجل نفس استطاعة الضخ، حيث كان الفارق بحدود ٥٠ درجة بين الضخ بحزمة غاوصية والضخ بحزمة top hat من أجل استطاعة ١٠ واط و بلورة Nd:KGW. يعود ذلك إلى الشكل الهندسي –انظر الشكل (٣)– لحزمة الضخ؛ إذ تتوزع الطاقة على نحو متساوي في الحزمة من الشكل Top Hat في حين تكون أشد ما يمكن في المركز في الحزم الغاوصية. إن وجود جزء غير مشاب في البلورة ساعد كثيراً على إنقاص الأثر الحراري داخل البلورة كما هو واضح في القيم من أجل البلورتين المركبتين بوجود منطقة طولها ٣ mm غير مشابة، حيث كانت درجة الحرارة العظمى أقل بنحو ١٠٠ درجة من الحالة المثيلة لبلورة غير مركبة. القيم العظمى لشدة الإجهاد انظر الجدول (١)، وإجهاد Von Mises من أجل البلورات المدروسة مبينة في الملحقات، ونلاحظ أيضاً أن قيم الإجهادات تتراوح بين ١١ و٣٤ N/mm^2 لبلورة Nd:YAG، وبين ٦٢ و ١٨٨ N/mm^2 من أجل بلورة Nd:KGW. تتوافق هذه النتائج مع المراجع والدراسات السابقة [١٧]، علماً أن الإجهادات في كلا البلورتين بقيت أقل من حد التشقق Fracture limit [٤]. كما يلاحظ أن شكل حزمة الضخ يلعب دوراً ملحوظاً، ففي حالة الحزم السوبر غاوصية (خصوصاً حالة n=١٠) كانت قيم الإجهاد الأعظمية أقل من الحزمة الغاوصية. وكذلك كانت القيم العظمى الناتجة عن حزمة الضخ من الشكل Top Hat أقل منها في حالة الحزمة الغاوصية من أجل استطاعة الضخ نفسها. كما قمنا بحساب البعد المحرقي للعدسة الحرارية، انظر الجدول (١). نتائج حساب قوة العدسة الحرارية مقدرة بالـ Diopter مبينة في الملحقات. وجدنا أنه تحت الظروف نفسها تكون قوة العدسة المتشكلة داخل بلورة Nd:KGW أصغر من قوة العدسة المتشكلة ضمن بلورة Nd:YAG ، هذا يعني أن فرق المسار الضوئي بين محور بلورة الليزر وأطرافها داخل بلورة Nd:KGW أقل مما هو عليه لبلورة الـ Nd:YAG ولهذا السبب تمتلك بلورة Nd:KGW وسطاً أكثر تجانساً

من بلورة Nd:YAG ما يؤدي إلى تحسين جودة حزمة ليزر الخرج.

المناقشة

في كل الحالات المدروسة المذكورة آنفاً كان أثر العدسة الحرارية ملحوظاً، ويجب أن يؤخذ في الحسبان في تصميم الليزرات الصلبة المضخوخة بليزر نصف ناقل. في دراسة سابقة [١٥,١٤]، من أجل قياس العدسة الحرارية، قمنا بتمرير حزمة ليزر هليوم نيون من خلال بلورة الليزر أثناء عملية الضخ. لاحظنا أن المسار الضوئي لحزمة ليزر الهليوم نيون لا يبدي أي تغير في غياب الضخ، في حين تعاني حزمة الليزر من تأثير العدسة، إذ تزداد قوة العدسة بزيادة استطاعة الضخ، وبضبط مكان الكاميرا نستطيع تحديد مكان تخصر حزمة ليزر الهليوم نيون. ومن ثم قياس البعد المحرقي للعدسة الحرارية عند أي استطاعة ضخ. قمنا بقياس البعد المحرقي للعدسة الحرارية المتشكلة عند استطاعة ضخ ١٠W لبلورة Nd:KGW ، ووجدنا أن قيمتها ١٣٨ mm. قمنا أيضاً بحساب البعد المحرقي للعدسة الحرارية ضمن شروط القياس التجريبي نفسها، وحصلنا على القيمة النظرية ١٥٤ mm المحسوبة بالطريقة العددية المعتمدة على FEA. نجد أن القيمة المقاسة أقوى بمقدار ١٠ ٪ ويرجع ذلك لفرضنا أن درجة حرارة سطح البلورة في النموذج النظري هي نفسها درجة حرارة المبرد الحراري، أي أن استخدام موصل حراري لا ينتج عنه أي فرق بدرجة الحرارة بين سطح البلورة والسطح الداخلي للمبرد الحراري، لكن حقيقة يوجد فرق بدرجة الحرارة بينهما ما يؤدي إلى فرق بين القيمة المحسوبة نظرياً والقيمة المقاسة. تبين معنا نتيجة لهذا العمل النقاط التالية:
كان لأشكال حزمة الضخ المختلفة أثر ملحوظ في التوزع الحراري، وتوزع الإجهادات، وتشكل العدسة الحرارية، وكان أقل ما يمكن من أجل حزمة ضخ Top Hat والحزمة السوبر غاوصية n=١٠. يمكن أن نخفف من الأثر الحراري بصورة ملحوظة إذا كانت محرقة الحزمة أقل، لكن ذلك سيؤدي إلى ضخ أقل لبلورة الليزر، لذلك يجب الموازنة بين الخيارات المتاحة للحصول على التصميم الأمثل في كل حالة.
إن العدسة الحرارية لبلورة لـ Nd:KGW أصغر من العدسة الحرارية لبلورة الـ Nd:YAG. وهذا عائد للتغير الصغير الذي تبديه قرينة الانكسار $\Delta n/\Delta T$ بالنسبة لدرجة الحرارة، ويؤدي إلى الحصول على جودة عالية لحزمة الليزر في بلورات الـNd:KGW بالمقارنة مع البلورات الحاضنة الأخرى، كما أن لقصر طول الامتصاص absorption length في بلورة الـ Nd:KGW يمكن الحصول على مجاوبات قصيرة جداً وبالتالي نحصل على جودة حزمة أفضل بالمقارنة مع ليزرات الـ Nd:YAG، لكن يجب أخذ تبريد مناسب بسبب تركز الحرارة على نحو كبير في منطقة صغيرة من البلورة كما هو واضح في الجدول (١).
إن إضافة جزء غير مشاب إلى البلورة (أي بلورة مركبة) يساعد في تخفيف الأثر الحراري بصورة ملحوظة، ويمكن أن يحسن من جودة الحزمة الناتجة، وأداء بلورة الليزر، وحماية الطلاء الذي يلعب دور المرآة العاكسة على سطحي البلورة إن وجد.
وفي الختام نجد أن التأثيرات الحرارية تلعب دوراً رئيساً في ليزرات الحالة الصلبة المضخوخة بليزر نصف ناقل، ويجب أخذها في الحسبان في تصميم الليزر. ومن أجل التغلب على التأثيرات الحرارية غير المرغوب فيها في بلورات الليزر نوصي بالآتي:
تطوير طرق دقيقة لقياس العدسات الحرارية [١٦]، ونماذج رياضية تحليلية للتنبؤ بالتأثيرات الحرارية بدقة [١٧-١٩]، كما توجد تقنيات تعويض مختلفة لتقليل تأثيرات العدسات الحرارية، منها ما يعتمد على قطع بصرية تضاف ضمن المجاوب الضوئي [٢٠] أو التحكم بشكل حزمة الضخ [٢١-٢٢]. كما يمكن تعويض ظاهرة الانكسار المضاعف التي تحدث كنتيجة للآثار الحرارية [٢٣-٢٤].
ونود أن نشير إلى أن بعض الدراسات الحديثة [٢٥-٢٧] استفادت من بلورات مركبة للتقليل من الآثار الحرارية التي تحصل ضمن بلورة الليزر، وهذا يتوافق مع النتائج التي حصلنا عليها بأن البلورات المركبة في جميع الحالات المدروسة قد أعطت أثراً حرارياً أقل.

المراجع

1. M. Sovizia، b. R. Massudi، Thermal distribution calculation in diode pumped Nd: YAG laser rod by boundary element method، Optics & Laser Technology 52-46 (2007) 39.
2. Kun-Fu Tsengand Yung-Sheng Huang، The Optimum Characteristics for the Fiber Coupled Laser Diode End-Pumped Lasers، JOURNAL OF C.C.I.T.، VOL.34، NO.2، May، 2006.
3. Y. F. Chen، T. S. Liao، C. F. Kao، T. M. Huang، K. H. Lin، and S. C. Wang، Optimization of Fiber-Coupled Laser-Diode End-Pumped Lasers: Influence of Pump-Beam Quality، IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS، VOL. 32، NO. 11، NOVEMBER 1996.
4. Koechner W. Solid-state laser engineering. Springer Series in Optical Science. Sixth ed. 2006.
5. Z. Zhuo، T. Li، X. Li، H. Yang، Investigation of Nd:YVO4/YVO4 composite crystal and its laser performance pumped by a fiber coupled diode laser، Optics Communications 181-176 (2007) 274،
6. E. Safaria، A. Kachanovb، Estimation of thermal lensing effect in the high-power end-pumped direct-cut crystal lasers، Optics & Laser Technology 539-534 (2006) 38.
7. S. Chenais، F. Druon، S. Forget، F. Balembois، P. Georges، Review On thermal effects in solid-state lasers: The case of ytterbium-doped materials، Progress in Quantum Electronics 153-89 (2006) 30.
8. David W. Hahn and M. Necati Ozisik، Heat Conducteion، 3d edition، WIley 2012.
9. Y.S. Huang، H. L. Tsai، and F. L. Chang، Thermo-optic effects affecting the high pump power end pumped solid-state lasers: Modeling and analysis، Optics Communications 525-515 (2007) 273.
10. A.S. Demented، A. Jovai، K. R. ckaitis، F. Ivanauskas، and J. D. Bagdonaviciene، Numerical treatment of the temperature distribution in end-pumped composite laser rods، Lithuanian Journal of Physics، Vol. 47، No. 3، pp. (2007) 279.288.
11. S. Fan، X. Zhang، Q. Wang، S. Li، S. Ding، and F. Su، More precise determination of thermal lens focal length for end-pumped solid-state lasers. Optics Communications 626-620 (2006) 266.
12. Konrad Altmann، Christoph Pflaum، and David Seider "Three-dimensional computation of laser cavity eigenmodes by the use of finite element analysis (FEA)"، Proc. SPIE 5333، Laser Resonators and Beam Control VII، (1 June 2004); https://doi.org/12.532578/10.1117
13. K. Altmann، C. Pflaum، andD. Seider، "Semi-unstructured grids in the laser simulation program LASCAD،" Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics، vol. 2، no. 1، pp. 2003 ،439-438.
14. M. Sayem El-Daher، Finite Element Analysis of Thermal Effects in Diode End-Pumped Solid State Lasers، Journal Advances in Optical Technology، Volume 2017.
15. F. Awad، Study and design of Nd:KGW solid state laser end pumped with semiconductor

laser، Thesis، Damascus University، 2010.
16. Measurement of thermal effects of diode-pumped solid-state laser by using digital holography، Article in Applied Optics ،2018، DOI: 10.1364/AO.57.005385
17. L. Cini and J. I. Mackenzie، Analytical thermal model for end-pumped solid-state lasers، Appl. Phys. B (2017) 123:273.
18. R. Hua، S. Wada، H. Tashiro، Analytical method for design a TEM00 mode resonator of a dual-rod Nd: YAG laser with full birefringence compensation، Optics Communications (2004) 232.
19. H. Nadgaran a،*، M. Servatkhah a، M. Sabaeian، Mathieu–Gauss beams: A thermal consideration، Optics Communications 426–417 (2010) 283.
20. Muzammil A. Arain، Volker Quetschke، Joseph Gleason، Luke F. Williams، Malik، Adaptive beam shaping by controlled thermal lensing in optical elements. Applied Optics، Vol. 46، Issue 12، pp. (2007) 2165-2153.
21. Peijin Shang، Lu Bai، Shiyu Wang*، Defang Cai، Bingbin Li، Research progress on thermal effect of LD pumped solid state laser، Optics &LaserTechnology108640(2023)157.
22. Y.J. Oh، T.H. Kim، E.J. Park، J.S. Park، H. Jeong، J.W. Kim، Direct generation of the first-radial-order Laguerre-Gaussian mode in a Nd:YVO4 laser incorporating a core-ring-shaped pump fibre، Laser Phys. (2020) (9) 30 095801، https://doi.org/ 6611-1555/10.1088/ab9ec6.
23. M. Frede، R. Wilhelm، M. Brendel، C. Fallnich، High power fundamental mode Nd:YAG laser with efficient birefringence compensation، OSA، Vol. 12، No. 15 OPTICS EXPRESS، 2004.
24. I. Moshe، S. Jackel، Correction of thermally induced birefringence in double-rod laser resonators – comparison of various methods، Optics Communications 325–315 (2002) 214.
25. P.J. Shang، M.Y. Wu، S.Y. Wang، D.F. Cai، B.B. Li، Thermal lens Q-switched 1064nm Nd:YAG laser، Opt. Commun. 127676 (2022) 507، https://doi.org/ 10.1016/j.optcom.2021.127676. P. Shang et al.
26. L. Jinge، W. Ya، L.i. Shuo، G. Liangyu، W.u. Chunting، Y.u. Yongji، W. Chao، J. Guangyong، Study on LD end-pumped multi-segment bonded Tm:YAG solid-state laser، Opt. Commun. 126452 (2021) 480، https://doi.org/10.1016/j. optcom.2020.126452.
27. L. Hu، D. Sun، H. Zhang، J. Luo، C. Quan، Z. Han، K. Dong، Y. Chen، M. Cheng، Laser performance of LD side-pumped high-efficiency YSGG/Er:YSGG/ YSGG bonding crystal rod with concave end-faces، Infrared Phys. Techn. 103944 (2021) 119، https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103944.

التمويل: لا يوجد.

تضارب المصالح: يعلن المؤلفون أنه ليس لديهم أي مصالح متضاربة.

توافر البيانات والمواد: جميع البيانات متوفرة في النص الرئيس والمواد الملحقة.