

تصميم وتنفيذ ليزر صلب محقون جانبياً بالديودات الليزرية

حنين محمد¹، د. ظافر موسى² د. زياد محمد³

¹طالبة ماجستير - المعهد العالي للعلوم التطبيقية - دمشق.

²مدير بحوث في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا - دمشق.

³باحث رئيسي في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا - دمشق.

الملخص

تم في هذه الدراسة تصميم ليزر صلب (Nd:Yag) محقون بالديودات الليزرية بشكل جانبي، تم الضخ باستخدام ديودات ليزرية من النوع (Stacks-bars) الاستطاعة العظمى للديودات 250W، بالنتيجة تم الحصول على حزمة ليزرية باستطاعة متوسطة 323mW وطول موجة 1064nm وبمردود ضوئي - ضوئي 15% ومعامل نوعية حزمة $M^2 < 3.4$.

الكلمات المفتاحية: ضخ بالديودات ليزرية، مردود الضخ، مجاوب ليزري، نيوديميوم ياغ

تاريخ الإيداع: 2022/6/2

تاريخ القبول: 2022/10/5



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية،

يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب

الترخيص CC BY-NC-SA 04

Design And Implementation Of Diode-Side- Pumped Solid-State Laser

Hanin mohammad¹, Dr. Zafer moussa²,
Dr. ziad mohammed³

1 master's student- Higher Institute of Applied Sciences - Damascus.

2Research Director at the Higher Institute of Applied Sciences and Technology - Damascus.

3Principal researcher at the Higher Institute of Applied Sciences and Technology - Damascus.

Abstract

A diode-side-pumped solid state (Nd:Yag) laser was designed in this study. The pump laser was a diode (Stacks-bars) with maximum peak power of 250W. A 323mW average power was obtained with a wavelength of 1064nm, a total optical-to-optical efficiency of 15% and a beam quality of $M^2 < 3.4$.

Key Words: Diode pumping, slope efficiency, optical resonator, Nd: YAG .

Received: 2/6/2022

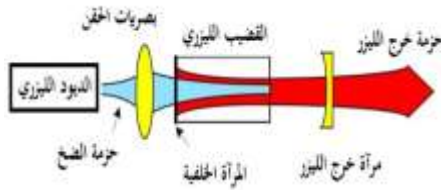
Accepted: 5/10/2022



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

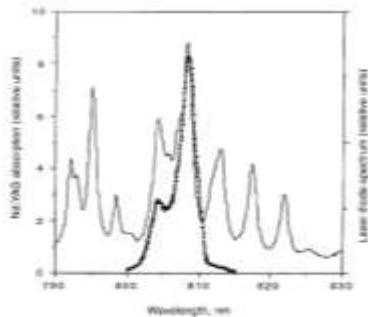
1-مقدمة:

على الرغم من فعالية هذه الطريقة ونوعية الحزمة الليزرية الجيدة إلا أنها تعاني من الكثير من المشاكل الحرجة كمحدودية استطاعة الخرج بسبب محدودية حجم منطقة الضخ، وكذلك الأفعال الحرارية الناتجة عن التوزيع الحراري غير المتجانس ضمن الوسط الفعال [3,4].



الشكل (1) مخطط توضيحي لطريقة الضخ الخلفي [5]

أما بالنسبة للضخ الجانبي فإمكانية توزيع منابع الضخ على كامل الوسط الفعال تتيح الاستفادة من كامل الوسط الفعال، وبالتالي الحصول على استطاعات عالية جداً في حالة الحزمة متعددة الأنماط، بالإضافة إلى أن الضخ الجانبي مناسب ليس فقط للقضبان الليزرية، بل للأقراص (Disks) والشرائح (Slabs) ولكن السلبية الرئيسية لهذه الطريقة هي نوعية الحزمة [6]، يبين الشكل (2) مخطط توضيحي لضخ القضيب الليزري جانبياً من طرفين، علماً أن السيناريوهات التي يمكن تنفيذها متعددة: ضخ من عدة جوانب، باستخدام محرقة أو بدونها، باستخدام عواكس أو بدونها، باستخدام ألياف أو بدونها [6].



الشكل (3) البنية التفصيلية لطيف امتصاص بلورة Nd:YAG

وتوافقه مع طيف إصدار ليزر GaAlAs [4].

يعتبر ضخ الليزر الصلبة باستخدام الديودات الليزرية أحد أهم محاور تطوير هذه الليزر، حيث أنه يؤثر وبشكل أساسي على المردود الكلي لعملية الضخ.

تشير الأبحاث إلى أن فعالية الضخ باستخدام الديودات الليزرية تصل إلى 25%، بينما لا تتجاوز 3% عند ضخها بمنابع غير مترابطة (مصاييح نبضية وقوسية) [1,2]، إضافة إلى العديد من الميزات الهامة كتحسين نوعية الحزمة، التقليل من الإجهاد الحراري (بالتالي إمكانية زيادة تردد نبضات الليزر)، تقليل عتبة الإصدار وبالإضافة طبعاً إلى الحصول على تصاميم مدمجة وخفيفة وطويلة العمر.

يتم الضخ باستخدام الديودات الليزرية بأسلوبين رئيسيين:

الأول: بشكل طولاني (محوري أو خلفي) أو ما يسمى

بالأدبيات Longitudinal (Axial, End) Pumping.

الثاني: بشكل عرضاني (جانبي) أو ما يسمى بالأدبيات Transverse (Side) Pumping المقصود هنا بأسلوب الضخ أو ما يسمى هندسة الضخ (Pumping geometry) سواءً طولانياً أو عرضانياً، هو اتجاه محور حزمة الضخ (الديود الليزري) مقارنةً مع اتجاه المحور البصري للمجاوب الليزري (محور القضيب الليزري).

يبين الشكل (1) مخططاً توضيحياً لضخ قضيب ليزري طولانياً، حيث تكون حزمة الضخ متمحورة مع حزمة الإصدار الليزري، غالباً تطبق هذه الطرق في حالة القضبان الليزرية (Laser Rods) وهي الخيار المثالي من أجل الحصول على فعالية عالية وكذلك حزمة ليزرية ذات نوعية جيدة، يتم في هذه الطريقة حقن حزمة الضخ في الوسط الفعال بواسطة نظام بصري للمحرقة أو عن طريق ألياف بصرية بحيث يكون عنق الحزمة المتمحورة في الوسط الفعال أصغر من قطره، بالإضافة إلى تأمين شكل دائري.

3- الدراسة النظرية والمرجعية

عُرفت الديودات الليزرية منذ بداية ظهورها بأنها الطريقة الأكثر فعالية لضخ الليزر الصلبة، ففي عام (1963) عرض العالم نيومان إمكانية استخدام الديودات الليزرية في ضخ الليزر الصلبة، حيث استخدم ليزر (GAAs) لإثارة شوارد Nd^{+3} في بلورة

($CaWO_4$) [7]، ومع ذلك فإن استخدام الديودات الليزرية فعلياً في ضخ الليزر الصلبة تأخر حتى منتصف التسعينيات، وذلك بسبب العديد من المعوقات أهمها عدم توفر ديودات ذات استطاعة عالية وبأطوال موجية مناسبة، إضافة إلى التكلفة العالية.

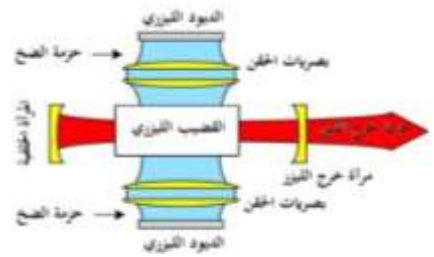
مع التطور الهائل في تكنولوجيا أنصاف النواقل والأبحاث التي أفضت إلى تغييرات نوعية في بنية الديودات الليزرية أصبح مجال الضخ باستخدام الديودات الليزرية ذي آفاق مفتوحة [8].

في عام 2005 تم الحصول على استطاعة (407W) باستخدام طريقة الضخ الخلفي حيث كانت الفعالية الضوئية-الضوئية % 54 [9].

وفي عام 2013 تم الحصول على طاقة $E = 210mj$ وعرض نبضة $\tau = 10ns$ ليزر نبضي بضخ جانبي وحزمة وحيدة النمط وبمردود كلي [10] % 11.7.

عام 2015 وصلت الاستطاعة في الضخ الجانبي وصلت إلى حدود غير مسبوقه (من مرتبة عدة كيلو واط) وبعضها أصبح مسوق تجارياً ك ليزر باستطاعة 16kW من إنتاج شركة Trumpf الألمانية [11].

وما تزال الأبحاث التي تهتم بالضخ بالديودات الليزرية مستمرة حتى الآن، وهدفها الأساسي إما الحصول على استطاعات عالية أو الحصول على حزم بنوعية جيدة.



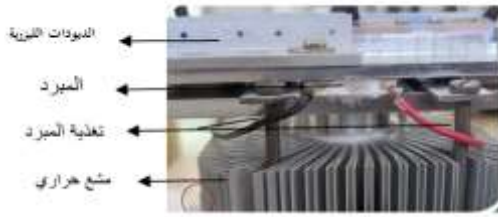
الشكل (2) مخطط توضيحي لطريقة ضخ جانبي [5]

أياً كانت طريقة الضخ الليزرية (طولانية أم عرضانية) فإن الشرط الأساسي هو تأمين ديود ليزري يتمتع بالموصفات الأساسية التالية: طول موجة إصدار تقع في مركز حزمة امتصاص بلورة الليزر، عرض خط إصدار الليزر أصغر من عرض حزمة امتصاص البلورة، استطاعة مناسبة لليزر المطلوب تصميمه، استقرار حراري لطول موجة إصدار الديود الليزري. ليزر نيوديميوم ياغ (Nd:YAG)

يبين الشكل (3) البنية التفصيلية لطيف امتصاص بلورة النيوديميوم ياغ حول حزمة الامتصاص $0.8 \mu m$ حيث يظهر أن قمة الامتصاص تقع تماماً عند طول الموجة $808 nm$ وعرض حزمة الامتصاص حولها أقل من $0.2 nm$ بالتالي فالديود الليزري المثالي لضخ ليزر النيوديميوم ياغ هو $Gs_{0.91}Al_{0.09}As/Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ وهو ليزر نصف ناقل من نمط البئر الكمومي (QW(quantum well) طول موجة إصداره المركزية $\lambda = 808nm$ وعرض خط الإصدار يتراوح في المجال $\Delta\lambda = 1-2nm$.

2- الهدف من البحث:

يهدف البحث إلى تصميم وتنفيذ مرسل ليزري من مادة النيوديميوم ياغ (Nd:YAG) بطريقة الضخ الجانبي بالديودات الليزرية يعطي حزمة ذات استطاعة عالية ونوعية حزمة جيدة لأهمية مثل هذه المرسلات في العديد من المجالات وخاصة في المجال الصناعي (كالحام الليزري والمعالجات الحرارية) التي تتطلب ليزرات عالية الاستطاعة وذات نوعية جيدة.



الشكل (5) آلية ضبط درجة حرارة الديودات

➤ ضبط درجة حرارة الديودات الليزرية:

نلاحظ من الجدول السابق أن كل تغير لدرجة الحرارة بمقدار درجة واحدة ينتج عنه انزياح بطول موجة إصدار الديود بمقدار (0.2-0.3nm) لذا لا بد من ضبط درجة حرارة الديودات وتثبيتها على الدرجة (25°C) وبالتالي تثبيت طول موجة إصداره على طول الموجة (808 nm) والتي توافقت أعلى قمة امتصاص لليزر Nd:YAG كما ذكرنا سابقاً.

لتحقيق ذلك استخدمنا مبرد كهروحراري (thermo-electric) من النمط (TEC-0714) يعتمد على مفعول بلتير (Peltier effect) حيث يؤدي مرور تيار كهربائي ضمنه إلى توليد فرق حراري بين سطحه، في تجربتنا وضعنا السطح الأبرد على تماس مع الصفيحة المعدنية التي تحمل الديودات الليزرية، والسطح الساخن على تماس مع صفيحة معدنية موصولة بمشع حراري (مروحة) لتبديد حرارة السطح الساخن وبذلك تزداد فعالية النقل الحراري بين سطحي المبرد، تم تغيير قيم التيار المار في المبرد ومراقبة درجة حرارة الديودات وطول موجتها بالنتيجة وجدنا أن تيار المبرد الذي يوافق درجة حرارة للديودات (25°C) وطول موجة (808 nm) هو (I = 1.94A) لذلك تم تثبيت قيمة التيار المار في المبرد على هذه القيمة مع مراقبة دائمة لدرجة حرارة الديودات، والجدير بالذكر أنه يجب ملء الفراغات الميكروبية السطحية بين سطحي المبرد وكل من سطح الديود الليزري وسطح المشع الحراري باستخدام مادة ناقلة للحرارة (شمع حراري) وذلك من أجل تأمين ناقلية حرارية عالية.

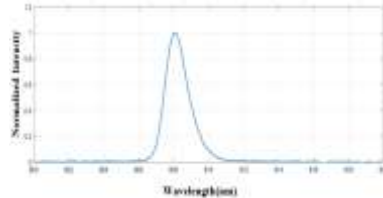
4-الأعمال المنجزة ضمن البحث:

4-1- توصيف الديودات الليزرية المستخدمة في الضخ:

تم الضخ جانبياً باستخدام أربعة ديودات ليزرية من النوع (Stacks-bars) يتألف كل ديود من ثلاثة صفوف من المرسلات الليزرية تنتج بالمحصلة استطاعة أعظمية (118W) عند تيار (100A) قمنا بتأمين شروط التغذية الكهربائية لهذا الديود عن طريق كتلة تغذية خاصة بقيادة الديودات الليزرية (LDQCWDRIVER) وتم توصيف الديودات المستخدمة عن طريق:

➤ قياس تغير طول موجة إصدار الديود الليزري بدلالة درجة الحرارة:

باستخدام مقياس طيفي (Compact Spectrometer) تم قياس طول موجة إصدار الديود الليزري عند درجة حرارة 25°C حيث يظهر على الشكل (4) نتائج هذا القياس والذي يبين أن طول موجة الإصدار المركزي هي 808nm مع عرض طيفي أقل من 3nm عند منتصف الارتفاع.



الشكل (4) طول موجة إصدار الديود عند درجة الحرارة (25°C).

كما تم قياس تغير طول موجة الإصدار مع تغير درجة الحرارة.

يلخص الجدول التالي النتائج التي تم الحصول عليها:

الجدول (1) تغير طول موجة الديود بدلالة درجة الحرارة

T(°C)	λ(nm)
21	806.6
22	806.7
23	806.9
24	807.9
25	808.0
26	808.2
27	808.4
28	808.7
29	809.1
30	809.3
31	809.5
32	809.8

$$\omega_0^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) * [L_e * (R_2 - L_e)]^{1/2} \quad (1)$$

نعوض L_e الطول المكافئ للمجاوب والذي يعطى بالعلاقة [2]:

$$L_e = \frac{l}{n} + L_1 + L_2 \quad (2)$$

$$\omega_0 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{1/2} \left[-(L_2 + L_1)^2 + \left(R_2 - \frac{2l}{n}\right)(L_2 + L_1) + \frac{R_2 l}{n} - \left(\frac{l}{n}\right)^2 \right]^{1/4} \quad (3)$$

حيث:

L_1 : بعد نهاية القضيب الليزري عن مرآة الخرج.

بعد بداية القضيب الليزري عن المرآة الخلفية.

L_2 : قرينة انكسار الوسط الفعال n .

l : طول الوسط الفعال.

λ : طول موجة الليزر المتولد.

تمتلك العلاقة السابقة نهاية محلية عظمى عندما

$$\omega_0'(L_2) = 0$$

بالتالي نحصل على قيمة L_{2max} التي تجعل ω_0 أعظم ما يمكن والمجاوب أكثر استقراراً.

$$L_{2max} = \left(\frac{1}{2}\right) \left(R_2 - \frac{2l}{n}\right) - L_1 \quad (4)$$

➤ اختيار نصف قطر تقعر مرآة الخرج (R_2): تبين

العلاقة (3) أنّ حجم النمط ضمن الوسط الفعال يزداد مع زيادة نصف قطر تقعر مرآة الخرج وفقاً لذلك تم اختيار

$$r = 518.3mm \quad (\text{أكبر نصف قطر تقعر متوفر لدينا})$$

بتعويض قيم r ، n ، R_1 في العلاقة السابقة نجد

$$L_{2max} = 157mm \quad \text{أن:}$$

➤ اختيار العاكسية المثالية لمرآة الخرج (r):

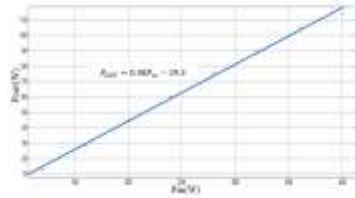
تم تحديدها عملياً وذلك من خلال تغيير عدة قيم لعاكسية مرآة الخرج وتحديد قيمة العاكسية التي

تعطي أعلى استطاعة خرج وجدنا أنها ($r = 90\%$)، يبين

الجدول التالي القيم التجريبية التي تم الحصول عليها:

➤ قياس المردود الكهروضوئي للديودات الليزرية:

تم تحديد المردود الكهروضوئي للديودات عن طريق تغيير قيمة استطاعة الضخ الكهربائية وقياس استطاعة الخرج الأعظمية (Peak Power) باستخدام مقياس الاستطاعة S425C من إنتاج شركة Thorlabs يظهر أن عتبة الضخ تساوي تقريباً $P_{th} \approx 77 W$ ومعامل الفعالية الكلية $\sigma_s \approx 38\%$. من أجل كل الديودات المستخدمة كانت القيم متقاربة جداً لذلك سنرسم المنحني المميز لأحد هذه الديودات.



الشكل (6) المنحني المميز للديود الليزري

$$P_{OUT} = \sigma_s (P_{in} - P_{th})$$

4-2 تصميم المجاوب:

يبين الشكل (7) المجاوب الليزري المستخدم والذي هو من النوع المستقر والنصف كروي (hemispherical) حيث المرآة الخلفية مستوية (نصف قطر تقعر لانهائي) والمرآة الأمامية مقعرة (نصف قطر التقعر R وعاكسية r) مع إمكانية تغيير المسافة بين المرآة الأمامية وطرف القضيب (تغيير L_1) وكذلك بالنسبة للمسافة بين المرآة الخلفية وطرف القضيب (تغيير L_2) تم اختيار قيم برامترات المجاوب (r, R, L_1, L_2) بحيث نحقق:

1- أكبر استفادة من الوسط الفعال.

2- أفضل استقرار للمجاوب.

3- أعلى استطاعة ممكنة.

➤ تحديد L_1 : بما أن أكبر حجم للنمط في المجاوب

النصف كروي يقع على مرآة الخرج لذلك للاستفادة قدر الإمكان من الوسط الفعال يجب تقريبه أقرب ما يمكن لمرآة الخرج في تجربتنا أقرب مسافة ممكنة ($L_1 = 33mm$).

➤ حساب L_2 : انطلاقاً من العلاقة (1) التي تعطي عنق

الحزمة الغاوصية في المجاوب (المقعر-المستوي) [4]:



الشكل (9) صورة الليزر الناتج

5-1- طريقة حساب معامل نوعية الحزمة:

يعرف معامل نوعية الحزمة بأنه النسبة بين تباعد الحزمة الحقيقي إلى تباعدها الأصغري المحدود بالانعراج ويعطى بالعلاقة:

$$M = \frac{\theta_{real}(z)}{\theta_0(z)} \approx \frac{w_{real}(z)}{w_0(z)} \quad (5)$$

وهو مقدار دائماً أكبر من الواحد (قيمه تساوي الواحد فقط من أجل الحزمة الغاوصية) ويعبر عن مدى ابتعاد توزع الشدة في الحزمة المتولدة عن التوزع الغاوصي.

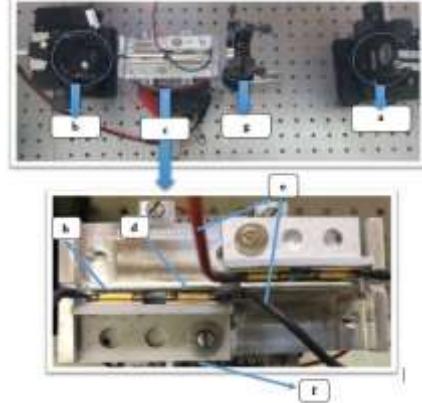
من التعريف السابق نجد أنه لحساب معامل نوعية الحزمة يجب إيجاد نصف قطر البقعة الحقيقي للحزمة المتولدة لدينا وحساب نصف قطر الحزمة الغاوصية المثالية التي تنتشر في نفس المجاوب، مربع نسبتها هو معامل نوعية الحزمة.

➤ تحديد نصف قطر الحزمة الحقيقي (قطر الحزمة عند $1/e^2$ من الشدة العظمى للحزمة w_{real}) [12,4] تم تحديد نصف قطر البقعة من خلال أخذ صورة لبقعة الليزر على مخرج الوسط الفعال الشكل (10-a) ومن ثم رسم منحنى توزع الشدة الضوئية لهذه الحزمة الشكل (10-b) ومن ثم تم تحديد قطر البقعة التي تضم $1/e^2$ من الشدة العظمى للحزمة وجدنا أن قيمتها $w_{real} = 723\mu m$.

➤ حساب نصف قطر الحزمة الغاوصية المثالية $w_0(z)$: تم حسابه رياضياً اعتماداً على العلاقات الرياضية الخاصة بانتشار الحزمة الغاوصية والتي تعتمد على مواصفات المجاوب المستخدم كما يلي: [12]

الجدول (2) تغير استطاعة الخرج بتغير عاكسية مرآة الخرج.

r (%)	95	90	80	70	60	50	40
P_{avg} (mW)	240	323	318	266	255	178	118

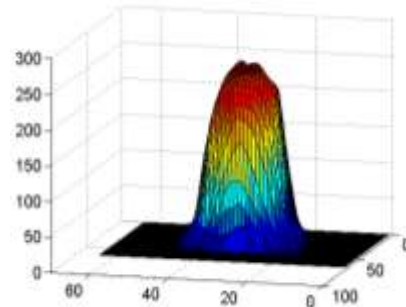


الشكل (7) مخطط تمثيلي لحجرة الضخ والمجاوب الليزري (a) المرآة الخلفية (المستوية)، (b) المرآة الأمامية (الخرج)، (c) الديود الليزري، (d) القضيب الليزري، (e) تغذية الديود الليزري، (f) المشع الحراري الملصق بالمبرد،

(g) حظار (diaphragm)، (h) عاكس الألمنيوم

5- النتائج العملية:

ضمن البارامترات التي تم اختيارها حصلنا على حزمة ليزرية باستطاعة متوسطة ($323mW$) ومعامل نوعية $(M^2 < 3.4)$ ، الشكلين (8) و(9).



الشكل (8) منحنى توزع الشدة للحزمة الناتجة

η_t : فعالية الانتقال تتعلق بضياعات فرينل على وجه القضيب المقابل للديودات.

وتعطى بالعلاقة:

$$\eta_t = 1 - R$$

حيث R ضياعات الإنعكاس على وجه القضيب المقابل للديودات.

$$\eta_t = 0.92$$

η_a : فعالية امتصاص الوسط الفعال لطول موجة الضخ يتعلق بمعامل امتصاص الوسط الفعال لطول موجة الضخ

ويطول المسار الضوئي للحزمة ضمن الوسط الفعال [4]:

$$\eta_a = 0.90$$

η_s : معامل ستوكس يأتي من الفرق الطاقى بين فوتونات الضخ وفوتونات الليزر الصادر:

$$\eta_s = \frac{\lambda_p}{\lambda_L} = \frac{808}{1064} = 0.76$$

η_Q : معامل يتعلق بمادة الوسط الفعال من أجل ليزر Nd:YAG

$$\eta_Q = 0.95$$

η_C : يتعلق بالضياعات الكلية في المجاوب وبحسب من العلاقة

$$\eta_C = \frac{1 - R_2}{1 - R_2 + \delta} \quad (10)$$

حيث: R_2 عاكسية مرآة الخرج.

δ الضياعات الكلية ضمن المجاوب.

وبالتالي لتحديد قيمة η_C يجب معرفة قيمة الضياعات الكلية ضمن المجاوب δ والتي يتم تحديدها عملياً من قياس منحنى تغير $-\ln(R)$ بدلالة عتبة الإصدار والذي يعطى بالعلاقة التالية: [4]

$$-\ln(R_{oc}) = 2 K P_{th} - \delta \quad (11)$$

يبين الشكل (11) أن قيمة الضياعات الكلية (نقطة تقاطع المستقيم مع المحور $-\ln(R_{oc})$) تقريباً $\delta = 3.3\%$ ، بالتعويض في العلاقة 6:

$$\eta_C = \frac{1 - R}{1 - R + \delta} = 0.75$$

• بداية تم حساب نصف قطر البقعة الأصغري أو ما يسمى عنق الحزمة ويعطى بالعلاقة:

$$w_0 = \sqrt{\frac{L * \lambda}{\pi}} * \left[\frac{g_1 * (g_2 - g_1)}{(g_1 + g_2 - 2g_1g_2)^2} \right]^{1/4} \quad (6)$$

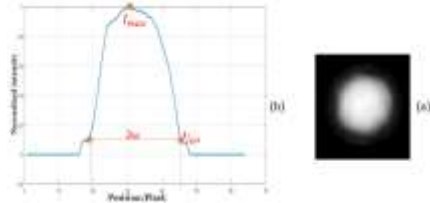
حيث: λ طول وجة الليزر، L طول المجاوب المستخدم، g_1, g_2 معاملات تتعلق بطول المجاوب (L) وأنصاف أقطار تقعر المرايا (R_2, R_1) وتعطى بالعلاقات التالية:

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} \quad (7) \quad g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}$$

• ومن ثم يتم حساب نصف قطر البقعة عند الموضع z (عند مخرج القضيب الليزري)

$$w(z) = w_0 * \sqrt{1 + \frac{z^2}{Z_R^2}} \quad (8)$$

حيث: Z_R مدى رايلييه ويعطى بالعلاقة: $Z_R = \frac{\pi * w_0^2}{\lambda}$ المسافة التي يتم عندها حساب نصف قطر الحزمة، بحساب المعاملات السابقة وتعويضها في العلاقة (5) حصلنا على قيمة عنق الحزمة الغاوسية (المثالية) $w_0(z) = 393 \mu m$



الشكل (10)، (a) شكل بقعة الليزر التي تم الحصول عليها، (b) منحنى توزيع الشدة الضوئية للحزمة

بالتعويض في العلاقة (5) نحصل على قيمة معامل نوعية الحزمة:

$$M = \frac{w_{real}(z)}{w_0(z)} = \frac{723}{393} = 1.8 \Rightarrow M^2 \approx 3.4$$

2-5- حساب المردود الكلي لعملية الضخ:

يعطى المردود الكلي لعملية الضخ بالعلاقة:

$$\sigma_s = \eta_t * \eta_a * \eta_s * \eta_Q * \eta_C * \eta_B \quad (9)$$

حيث:

نجد أن:

$$\sigma_s \approx 0.33 * 0.75 * 0.95 * 0.76 * 0.9 * 0.92 = 15\%$$

6-الخلاصة ومناقشة النتائج

تم في هذا العمل تصميم وتنفيذ ليزر (Nd: Yag) يتم ضخه بشكل جانبي باستخدام الديودات الليزرية، وذلك باستخدام مجاوب نصف كروي نصف قطر تقعر مرآة الخرج $(R_2 = 518.3mm)$ وعاكسيتها $(r = 90\%)$. ونلخص نتائج هذا البحث فيما يلي:

- القيمة الأمثلية لعاكسية مرآة الخرج والتي تجعل استطاعة الليزر أكبر ما يمكن $(r = 90\%)$ قد تم تحديدها عملياً وهذا يتوافق مع الأدبيات التي تشير إلى أن العاكسية المثالية لمرآة الخرج في حالة الليزر المستمرة تقع ضمن المجال $(0.8-0.98)$ [4].
- هناك قيم قيم مثالية لموقع المرآة الخلفية والمرآة الأمامية بحيث يكون حجم النمط ضمن المجاوب أكبر ما يمكن والمجاوب مستقر.
- مرآة الخرج يجب أن تكون أقرب ما يمكن للقضيب الليزري، وبعد المرآة الخلفية عن القضيب الليزري يجب أن يحقق العلاقة:

$$L_{2max} = \left(\frac{1}{2}\right) \left(R_2 - \frac{2l}{n}\right) - L_1$$

وقد تم التحقق عملياً من أن هذين الموقعين يحققان أعلى استطاعة خرج.

- قيمة معامل فعالية التغطية والذي يعتبر العامل الأساسي في تحديد مردود عملية الضخ $(\eta_B = 0.33)$ ، السبب الأساسي لانخفاض قيمة معامل التغطية هو الحظار الذي تم وضعه ضمن المجاوب والذي له قطر النمط المراد توليده بحيث يسمح بتضخيمه فقط ويمنع تضخيم الأنماط الأخرى، وبالتالي لم تتم الاستفادة من كامل طاقة الضخ ولكن بالمقابل تم الحصول على حزمة وحيدة النمط وباستطاعة عالية، هذا الإجراء شائع الاستخدام في الضخ الجانبي حيث

η_B : (overlapping efficiency) معامل فعالية التغطية بين الضخ والنمط لليزري المتولد يعبر هذا المعامل عن مقدار التداخل المكاني بين الضخ (الريح) والنمط لليزري المتولد، ويعتبر من أهم العوامل التي تحدد فعالية الليزر ونوعية حزمة الخرج وخاصةً في حالة الضخ الجانبي.

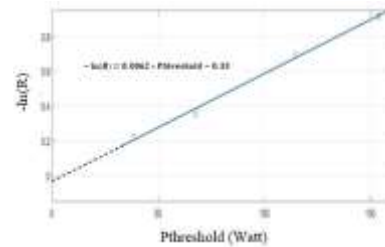
يعطى معامل فعالية التغطية بالعلاقة: [4]

$$\eta_B = \frac{\int gain(r).I(r).2\pi r dr}{\int gain^2(r).2\pi r dr} \quad \text{حيث (12)}$$

$gain(r)$: تابع توزع الشدة الضوئية للريح في الوسط الفعال.

$I(r)$: تابع توزع الشدة الضوئية للنمط لليزري ضمن الوسط الفعال.

ولحساب معامل فعالية التغطية قمنا بأخذ صورة للضخ وصورة للنمط لليزري المتولد الشكل (12) وتنظيمها بهدف الحصول على تابع توزع الشدة الضوئية لكل منهما و تم حساب معامل التغطية باستخدام العلاقة (12).



الشكل (11) تغيرات $-\ln(R)$ بدلالة عتبة الإصدار



الشكل (12) صورة الضخ والليزر مأخوذتين من نهاية القضيب الليزري.

حصلنا قيمة لمعامل التغطية $\eta_B = 0.33$

بتعويض قيم المعاملات السابقة في علاقة المردود الكلي

الضخ الجانبي للحزم الغاوصية (TEM_{00}) يتراوح بين (10%-15%).

هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

أنه لا يمكن الحصول على حزمة بنوعية جيدة دون اللجوء إلى إجراءات تسمح فقط بتضخيم النمط المطلوب فقط (كاستخدام ثقب في المجاوب أو استخدام عدسات محرقة) مما يمنع الاستفادة الكاملة من طاقة الضخ وينقص المردود ولكن بالمقابل يتم الحصول على حزم بنوعية جيدة واستطاعات عالية، تشير المراجع [13,14,15] إلى أن مردود

References

1. Burhan Davarcioglu, "An Overview of Diode Pumped Solid State (DPSS) Lasers" Aksaray University, Faculty of Science and Art, Department of Physics, 68100, December (2010).
2. Bruno Le Garrec, "Laser-diode and Flash Lamp Pumped Solid- State Lasers" CEA-CESTA, 15 avenue des Sablières, BP2, 33114 Le Barp, France, April (2010).
3. L. Cini, J. I. Mackenzie, "Analytical thermal model for end-pumped solid-state lasers", applied physics B, November (2017).
4. Koechner W., Bass M., **Solid-State Laser Engineering**, sixth Edition, Springer 747 Pages, May (2005).
5. Mamdouh EL HAJ ASSAD, Ehab BANI HAN, Israa AL-SAWAFTA, Ahmad SEDAGHAT, M. ALSHABI3, Shek RAHMAN, "Thermal Analysis of end pumped fiber lasers subjected to jacketed fluid cooling" January (2021).
6. Sergei G Grechin and P Nikolave, "Diode side-pumped laser heads for solide state lasers", Quantum Electronics, Volume 39, number1, (2009)
7. Newman R., **Excitation of the Nd^{3+} in $CaWO_4$ Fluorescence by Recombination Radiation in GaAs**, J. Appl. Phys. Vol. 34, №. 8, pp. 437, February (1963).
8. Hetch J, "short history of laser development" optical engineering, Vol. 49, №. 9, pp.091002-23, September (2010).
9. Kratcht D. et al., **407W End-pumped Multi-segmented Nd:YAG Laser**, optics Express, Vol. 13, №. 25, pp.10141-10144, (2005).
10. Bezyazychnaya, T.V; Bogdanovich, M.V.; Grigor'ev, A.V.; Kabanov, V.V; Kostik, O.E; Lebiadok, Y.V; Lepchenkov, K.V; Mashko, V.V; Ryabtsev, A.G; Ryabtsev, G.I.; et al. "Transversally diode-pumped Q-switched Nd:YAG Laser with improved power and spatial characteristics". Opt. Commun, 308, 26–29 (2013).
11. TruDisk 6C: **The next generation of innovation, TRUMPF Laser Technology Center**, (2015)
12. Prof elias N Glytisis, "Introduction to gaussian beams" school of electrical & computer Engineering National Technical University of athens, March 26, (2021).
13. Yan, X.P.; Liu, Q.; Gong, M.; Wang, D.S.; Fu, X. "Over 8 W high peak power UV laser with a high power Q-switched Nd:YVO4 oscillator and the compact extra-cavity sum-frequency mixing. Laser Phys". Lett. 2009, 6, 93–97.
14. Zhang, C.; Zhang, X.Y.; Wang, Q.P.; Fan, S.Z.; Chen, X.H.; Cong, Z.H.; Liu, Z.J." **Laser efficient extracavity Nd:YAG/BaWO4 Raman**". Laser Phys. Lett. 2009, 6, 505–508.
15. Tauer, J.; Kofler, H.; Wintner, E. Millijoule "Q-switched Nd:YAG laser operating at 946 nm". Laser Phys. Lett. 2010, 7, 280–285.