

دراسة وبناء ليزر صلب Nd:GKG يضخ بليزر ديود

د. ابراهيم بلال*

د. جمال سعيد**

يارا علي***

(تاريخ الإيداع 22 / 2 / 2021. قُبل للنشر في 16 / 8 / 2021)

□ ملخص □

تتضمن هذه المقالة دراسة معمقة عن الليزر Nd:GKG وضخ هذا الليزر باستخدام ليزر ديود لكونها طريقة فعالة في الحصول على مردود واستطاعة عالية والاعتماد على تقنية ضخ مناسبة (ضخ طرفي - ضخ جانبي). كما يتضمن البحث دراسة عن أنواع الديودات الليزرية ومعرفة الليزر ديود المناسب ودراسة العوامل المؤثرة على خرج الليزر المستمر الذي يضخ بليزر ديود وإجراء الحسابات وإظهار النتائج للبحث عن المردود الأفضل. تم استخدام مبادئ الضوء الهندسي لتقدير مساحة مقطع الضخ ضمن القضيب الليزري حسابياً وتم الاعتماد على هذه النتائج وعلى معادلات اليزرات الصلبة المستمرة رباعية السوية لحساب خرج الليزر وأمثلته بذلك باستخدام برنامج MAPLE.

الكلمات المفتاحية: ضخ ضوئي لليزرات الصلبة، ليزر ديود، المادة الفعالة Nd:GKG والخواص الطيفية، المردود، الضخ الجانبي، الضخ الحلفي.

* أستاذ - قسم الفيزياء - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** باحث - المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا - دمشق - سورية.

*** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - اختصاص فيزياء الليزر والأطياف الذرية والجزيئية - قسم الفيزياء - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Study and Building of Diode Pumped Solid State Nd: GGG Laser

Dr. Ibraheem Bilal*
Dr. Jamaml Saeed**
Yara Ali***

(Received 22 / 2 / 2021. Accepted 16 / 8 /2021)

□ ABSTRACT □

This article contains a thorough study on Nd:GGG laser and pumping this laser with laser diodes due to its effectiveness in getting good efficiency and high power, then find a suitable pumping method (side pumping – end pumping).

Also this article includes a study on different types of laser diodes and how to choose a suitable laser diode for pumping. Also a study on the factors affecting continuous laser output under laser diode pumping, Calculations were performed to get results for optimum efficiency.

Pumping area inside LASER rod was evaluated based on geometrical optics numerically. Then, based on these results and CW four –level solid state LASER system equations, the laser output was calculated and optimized using MAPLE program.

Keywords: optical pumping of solid state laser, diode laser, Nd:GGG, spectral properties, efficiency, side-pumping, end-pumping.

* Professor, Physics Department, Faculty of Sciences, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Researcher, Physics Department, Higher Institute of Applied Science and Technology, Damascus, Syria.

***Postgraduate Student, Laser and Atomic Spectra and Molecular Physics, Department of Physics, Faculty of Sciences. Tishreen University. Lattakia. Syria.

مقدمة:

يعتبر الضخ باستخدام الديودات الليزرية أحد أهم محاور تطوير الليزر الصلبة. حيث أظهرت أنظمة الليزر الصلبة التي يتم ضخها بالديودات الليزرية ميزات هامة مقارنة بتلك التي يتم ضخها بالمصابيح النبضية أو القوسية، منها تحسين فعالية الضخ حيث تجاوزت فعالية الضخ 30%، تقليل الإجهاد الحراري، تقليل عتبة الإصدار والحصول على تصاميم مدمجة وطويلة العمر، حيث أن ضخ الليزر الصلبة كان يعتمد و لزم طويل على لمبات الفلاش الضوئية التي تشع طيف مستمر من الترددات يتراوح ما بين فوق البنفسجي و ما بين تحت الأحمر القريب بينما يكون مجال امتصاص المادة الليزرية ضيق جدا بالنسبة لهذا المجال الطيفي العريض لذلك فإن مردود الضخ يكون قليل ولا يتجاوز 4%. تمكن أهمية البحث في أن تطوير وإنتاج هذا النوع من الليزر الصلبة يسهل الاستخدام للأنظمة الليزرية ويحسن مردود ويفتح آفاقاً جديدة في تطبيقات عديدة كالصناعة والطب والجانب العسكري.

أما الهدف من هذا البحث فهو دراسة وتطوير منابع ليزر صلبة Nd:GGG تتميز بمواصفات جديدة عن المنابع الأخرى والحصول على ليزر:

- ذو استطاعة عالية
- بمردود يصل إلى أكثر من 20%
- صغير الحجم
- استطاعة ضخ منخفضة
- مردود طاقي عالي

قمنا بإجراء دراسة مرجعية للمادة الفعالة وخواصها الطيفية من ناحية طيف الامتصاص وطيف الإصدار الليزري، ودراسة لأنواع الديودات الليزرية وذلك لتحديد النوع الأفضل من الديودات المناسبة لضخ هذه المادة.

وبعد ذلك قمنا بدراسة انتشار حزمة الضخ ضمن القضيب الليزري ودراسة نظرية (حسابية) باستخدام برنامج MAPLE لخرج الليزر ومردوده وذلك بتغيير عدة بارامترات (عاكسية مرآة الخرج- أبعاد الشريحة التي يتم ضخها- نوع الديود الليزري- استطاعة الضخ) وذلك لتحديد أفضل البارامترات التي تعطي أفضل استطاعة خرج وأعلى مردود والاعتماد عليها عملياً.

طرائق البحث ومواده:

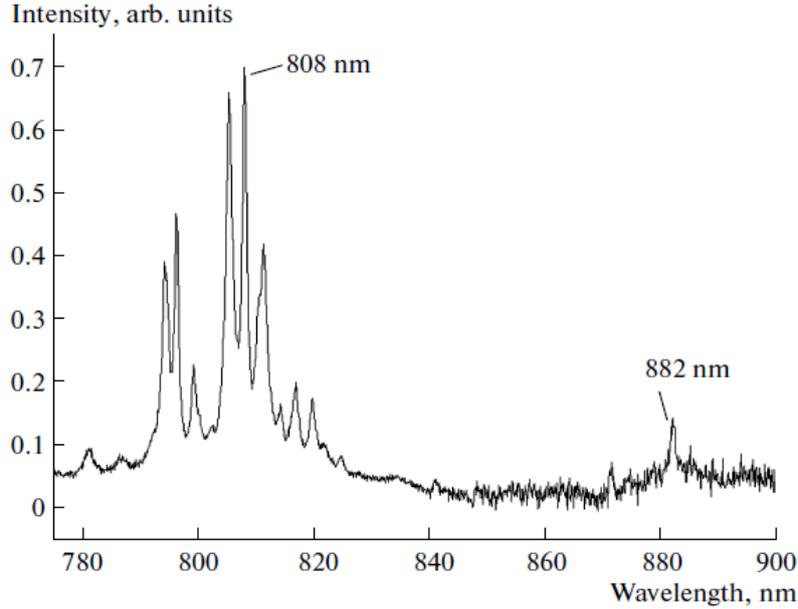
يعتمد هذا البحث على دراسة العوامل المؤثرة على خرج الليزر المستمر الذي يضخ بليزر نصف ناقلة باستخدام معادلات الضوء الهندسي ومعادلات الليزر ذي الخرج المستمر وإجراء الحسابات على برنامج MAPLE هو برنامج لحل المعادلات وإظهار النتائج وإجراء الحسابات العددية.

وتعتمد الأمثلة على مسح القيم العددية الممكنة للمعاملات والبحث عن المردود الأفضل.

1- استخدام الليزر نصف الناقلة في ضخ الليزر الصلبة (دراسة مرجعية):

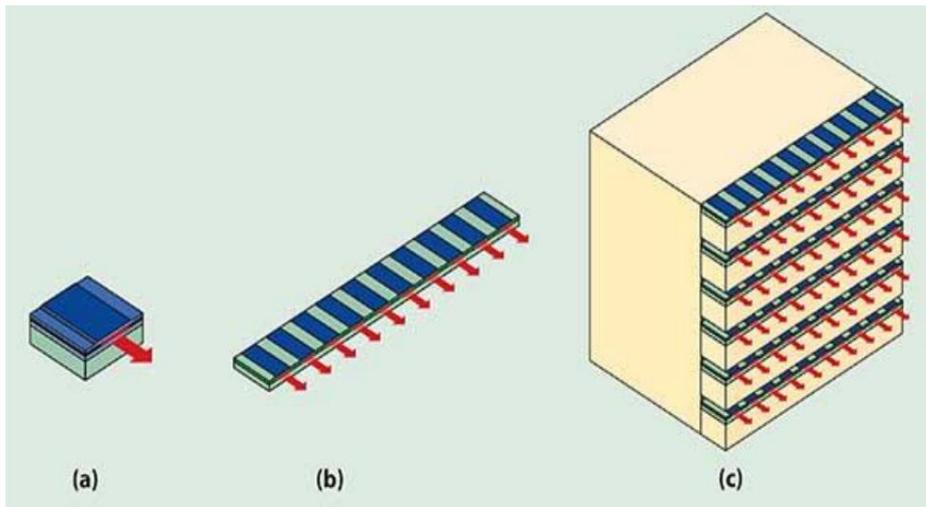
يستخدم نظام الضخ الفعال (الديود الليزري) مصدر إشعاع لديه خرج طيفي يطابق مجال امتصاص وسط الريح، ينتقل الإشعاع بأقل خسارة من المصدر إلى الوسط الفعال ($Gd_3Ga_5O_{12}$) المشاب بالنديميوم [1] بالإضافة إلى صغر

أبعاد ليزر الضخ مما يسمح الضخ ضمن حجم صغير والحصول على ليزر 1062nm بأبعاد صغيرة، حيث نحصل على الليزر ذو الطول الموجي 1062nm من الانتقال⁴ السوية من $F_{3/2}$ إلى السوية⁴ $I_{9/2}$ [2].
 أيضاً كانت طريقة الضخ الليزرية طولانية أم عرضانية فإن الشرط الأساسي هو تأمين ديود ليزري يتمتع بالموصفات الأساسية التالية: طول موجة إصداره 808nm [3] يقع 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. [4]



الشكل (1): طيف امتصاص Nd:GGG [5]

- (a) ليزرات المرسل الوحيد single emitter
- (b) مصفوفة (شريط) المرسلات الوحيدة bar
- (c) عدة مصفوفات (شرائط) للمرسلات الوحيدة stack



الشكل (2): لأنواع المختلفة للديودات الليزرية

بشكل عام الاستطاعة المنبعثة من المرسل الوحيد هي أقل من 15 W والحرارة منخفضة نظراً للمردود الضوئي الكهربي العالي في الليزر نصف الناقل.

هناك نوعان من التبريد لليزرات أنصاف النواقل وهي التبريد عن طريق التماس والتبريد بالسائل، لكن يتم تبريد المرسل الوحيد بطريقة التبريد بالتماس وهي الطريقة المتبعة لأغلبية ليزرات المرسل الوحيد [6]. هناك أربعة أشكال لحاوية Package ليزرات نصف الناقل المرسل الوحيد وهي [7]:

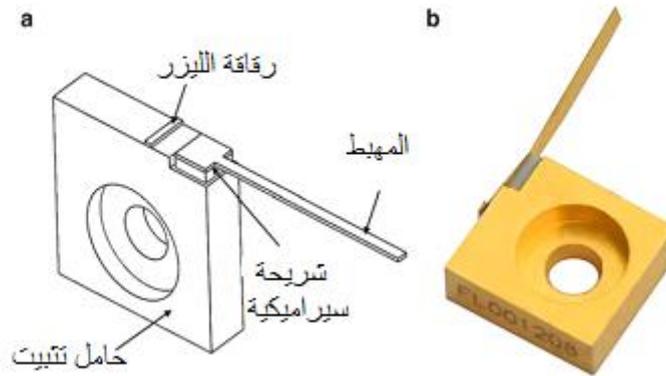
- C-mount
- B-mount
- CT-mount
- F-mount

تختلف عن بعضها بالمكونات الداخلية حيث كل منها مطور عن السابق من الناحية الحرارية (أي التخلص من حرارة الديود).

2- ليزر ديود المرسل الوحيد من النوع C-mount:

يحتوي هذا النوع من الليزرات على أربعة أجزاء رئيسية وهي المهبط - قطعة سيراميك - رقاقة الليزر laser chip (وهي عبارة عن مادة نصف ناقلة فعالة ضوئياً تتكون من ركيزة مشابهة من النوع n يعلوها منطقة تلعب دور دليل موجي ويتم فيها توليد الليزر ويعلوها طبقة رقيقة مشابهة من نوع P). وتستخدم مركبات أنصاف نواقل المجموعة III-V مثل GaAs و Al-GaAs في هذه الليزرات. لا تختلف من حيث البنية ولكن تختلف بالأبعاد من نوع لآخر - حامل تثبيت mounting substrate (يقوم بدور المصعد) (الشكل 3).

تستخدم الشريحة السيراميكية لعزل المهبط عن المصعد، حيث يربط المهبط بالجانب n من رقاقة الليزر. في التطبيقات يتم تركيب شريحة الليزر ديود C-mount على منصة تنصيب بجهة حامل التثبيت، أثناء العمل تنتقل الحرارة بالتوصيل من شريحة الليزر إلى حامل التثبيت بشكل شاقولي ثم تنتقل بشكل أفقي إلى منصة التنصيب installation platform، وينقطع كلا الطريقتان تحت الشريحة الليزرية وبالتالي لا يمكن التخلص من الحرارة بشكل فعال بوجود هذا التقاطع وتحتاج إلى حل أمثل لانتشار الحرارة بالتوصيل [7].

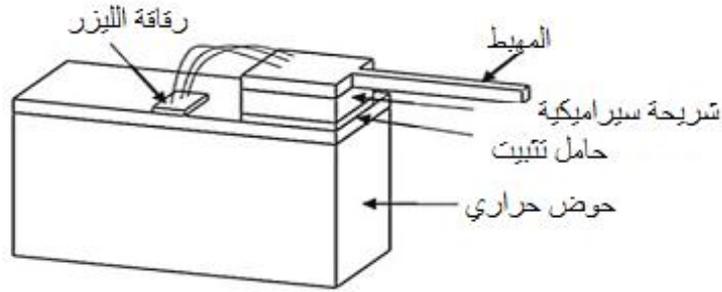


الشكل (3): بنية ليزر نصف ناقل من النوع C-mount

3- ليزر ديود المرسل الوحيد من النوع B-mount:

يتكون من أربع أجزاء رئيسية وهي: حامل تثبيت - رقاقة الليزر - شريحة سيراميكية - مهبط وهي نفس أجزاء C-mount (الشكل 4).

يربط المهبط بالجانب n من رقاقة الليزر، كما أن حامل التثبيت له عملين، الأول يلعب دور المهبط والثاني لتوصيل الحرارة. إن فعالية تبديد الحرارة في هذا النوع أفضل من نوع C-mount [7].

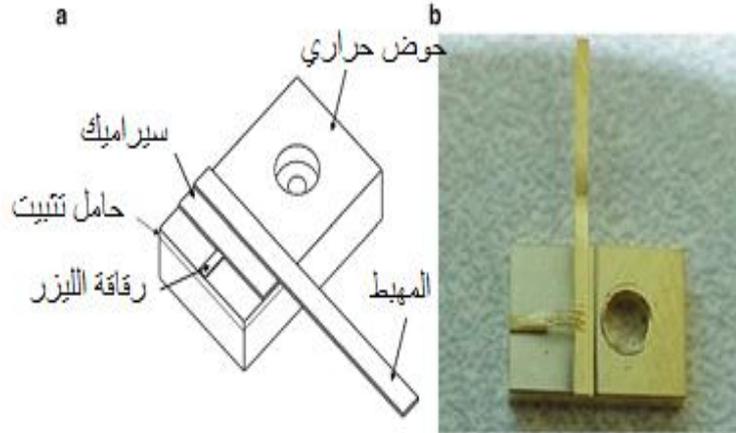


الشكل (4): بنية ليزر نصف ناقل من النوع B-mount

4- ليزر ديود المرسل الوحيد من النوع CT-mount:

بالمقارنة مع ليزر C-mount فإن الاختلاف بين هذين الليزرين هي أن التبديد الحراري يحصل بشكل مباشر عبر حامل التثبيت (الشكل 5).

يربط المهبط بجهة n لرقاقة الليزر، وحامل التثبيت يلعب دور المصعد وهذا يؤدي أن المبرد في CT-mount سيتم شحنه عندما يعمل الليزر وبالتالي فإنه محدود في بعض التطبيقات ولكن التبديد الحراري أفضل في النوع CT-mount [7].

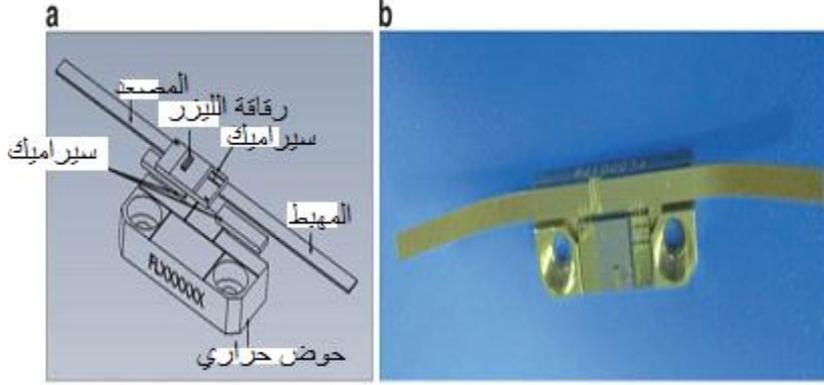


الشكل (5): بنية ليزر نصف ناقل من النوع CT-mount

5- ليزر ديود المرسل الوحيد من النوع F-mount:

لقد تم تطويره في السنوات الأخيرة ويكون من ست أجزاء وهي: الرقاقة الليزرية - حامل التثبيت السيراميكي - المهبط - المصعد - الشرائح السيراميكية - حوض حراري Heat sink (الشكل 6).

تلعب الشرائح السيراميكية دور العازل بين المصعد والمهبط من جهة والحوض الحراري من جهة أخرى وبالتالي فإن الحوض الحراري غير فعال كهربائياً عندما يعمل الليزر وذلك بسبب أن الحوض معزول عن الديود الليزري. الرقاقة الليزرية مثبتة على حامل التثبيت السيراميكي عن طريق طبقة من القصدير، والمهبط موصول بالطرف n من الرقاقة الليزرية حيث يمكن أن يوضع حساس حراري على حامل التثبيت السيراميكي لإظهار والتحكم بدرجة حرارة الديود الليزري. تنتقل الحرارة إلى حامل التثبيت في البداية ثم إلى الحوض الحراري بشكل شاقولي [7].



الشكل(6):بنية ليزر نصف ناقل من النوع F-mount

6- ليزر ديود المصفوفي من النوع C-S mount:

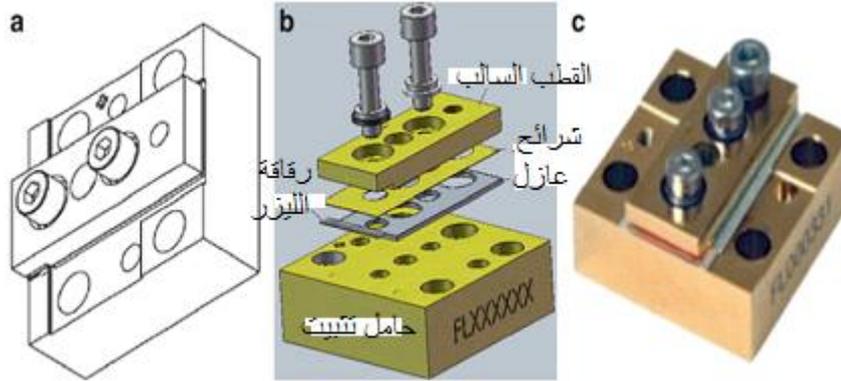
أطواله الموجية: (808 , 880 , 885, 940, 980)nm

استطاعة الخرج (20 -100) W في حال كان يعمل في النمط المستمر CW.

W (100- 1600) في حال كان نبضياً .

يبين (الشكل 7) مثال عن مصفوفة الليزر C-S mount، تضاف طبقة ذات معامل تمدد حراري مناسب بين الشريحة والحوض الحراري وتشكل طبقة عازلة.

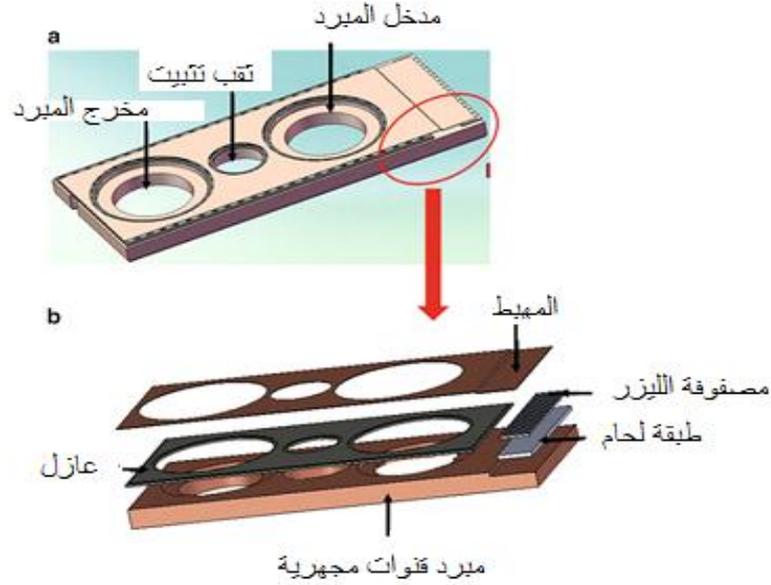
الشريط الديودي (diode bar) موصول مع طبقة من خليط التتغستن والنحاس CuW باستخدام لحام من الذهب والقصدير وهي موضوعة فوق حوض حراري نحاسي والذي يمثل الجانب P أما الطرف n فهو موصول عن طريق أسلاك من الجانب P. استطاعة الخرج بين (60- 300) W في حالتي النمط CW و QCW وهو مناسب جداً لضخ الليزر الصلبة، ومعالجة مواد الديود المباشر، الطبية، الطابعات، وتطبيقات الإنارة [7].



الشكل(7): بنية ليزر نصف ناقل من النوع C-S mount

7- الليزر ديود ذو مصفوفة (شريط) وحيدة المبرد بسائل:

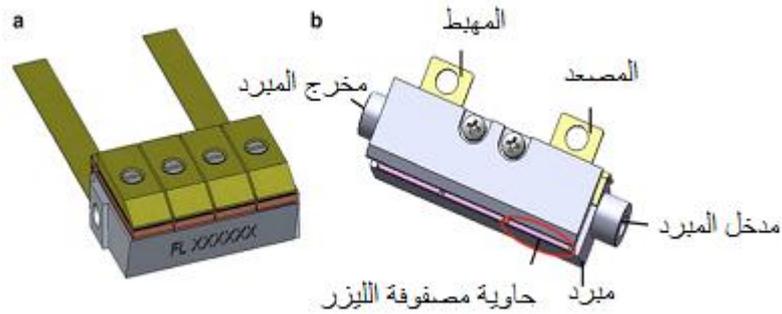
إن مجمل الاستطاعة الحرارية المتولدة من ليزر نصف ناقل بمرسل وحيد تقدر بعدة اواط ويمكن تبديدها بسهولة باستخدام مبرد توصيل نحاسي حتى في الأنماط المستمرة CW ولكن في شرائط الليزر فإن الاستطاعة المتولدة خلال عمل تقدر بعشرات الواط وحتى بالمئات، وبالتالي فإن بنية المبردات لهذه الشرائط يجب أن تكون مصممة بشكل أمثلي وفي بعض الحالات مثل النمط المستمر تحتاج إلى تبريد بالسائل (الشكل 8) [7].



الشكل(8): بنية ليزر ديود ذو مصفوفة وحيدة bar

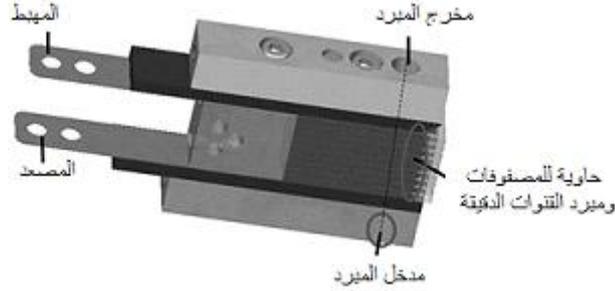
8- الليزر ديود ذو المصفوفات المتعددة (stack):

تم تطوير مصفوفات من شرائط ليزرية نصف ناقلة للحصول على طاقة خرج أعلى وتتألف هذه المصفوفات من عدة شرائط ليزرية نصف ناقلة ويوجد شكلين من هذه المصفوفات، شرائط مرتبة بشكل أفقي وتدعى بالمصفوفات الأفقية (H-array) (الشكل 9) وشرائط مرتبة بشكل عمودي وتدعى بالمصفوفة الشاقولية (V-stack) (الشكل 10). إن ليزرات أنصاف النواقل من النوع H-array و V-stack يمكن أن تعمل في النمطين CW أو QCW (الشكل 9). إن معامل سطوع الحزمة ($BPP=w_0 \times \theta$) أي جداء التباعد في مقطع الحزمة لليزر H-array يتناقص بازدياد عدد الشرائط الليزرية نصف الناقلة ولكن في بعض التطبيقات التي تحتاج إلى حزمة خطية كالضخ الجانبي لليزر الصلبة فإن ليزرات H-array هي المفضلة، وبشكل نظري فإن عدد الشرائط الليزرية في المصفوفة غير محدود [7].



الشكل (9): بنية ليزر ديود متعدد المصفوفات من النوع H-array

لكن بسبب الجودة المتناقصة للحزمة على طول المحور فإن ليزرات H-array ليست مفضلة للتطبيقات التي تحتاج إلى جودة حزمة عالية. حيث تتغلب ليزرات أنصاف نواقل من نوع V-stack على ليزرات H-array من حيث جودة الحزمة. ويسبب التطور الحاصل فإن عدد الشرائط الليزرية في ليزرات V-stack ازدادت من عدة شرائط إلى سبعين شريط وازدادت استطاعة الليزر V-stack من عدة مئات الواطات إلى 20 ألف واط [7].

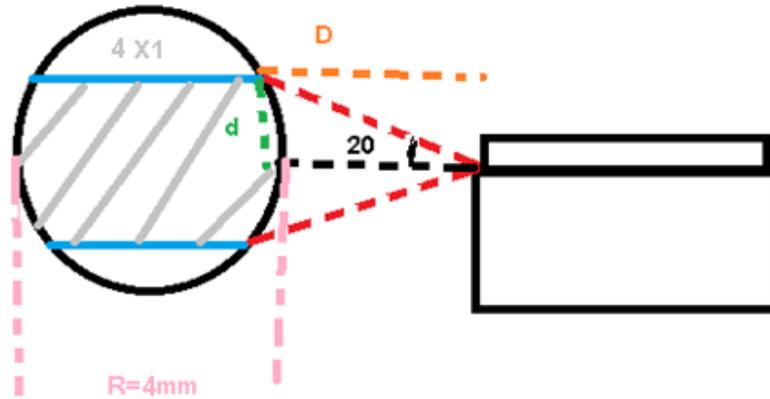


الشكل(10): بنية ليزر ديود متعدد المصفوفات من النوع V-stack

النتائج والمناقشة:

1- انتشار حزمة الضخ في القضيب الليزري:

إن الضخ بواسطة الليزر نصف الناقل يتم بطريقتين: إما الضخ الخلفي أو الضخ الجانبي. يستخدم الضخ الخلفي من أجل الحصول على حزم ليزرية عالية الجودة، أما للحصول على استطاعة عالية فإن الضخ الجانبي هو المعتمد (الشكل 11) [4,8].



الشكل(11): شكل توضيحي للضخ الجانبي وأبعاد الشريحة التي نضخها ومكان توضع الليزر ديود بالنسبة للقضيب الليزري

عندما نضخ القضيب الليزري بليزر ديود من جهة واحدة يمكننا دراسة انتشار حزمة الضخ داخل القضيب أي توزيع استطاعة الضخ على محور القضيب وفق العلاقة:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

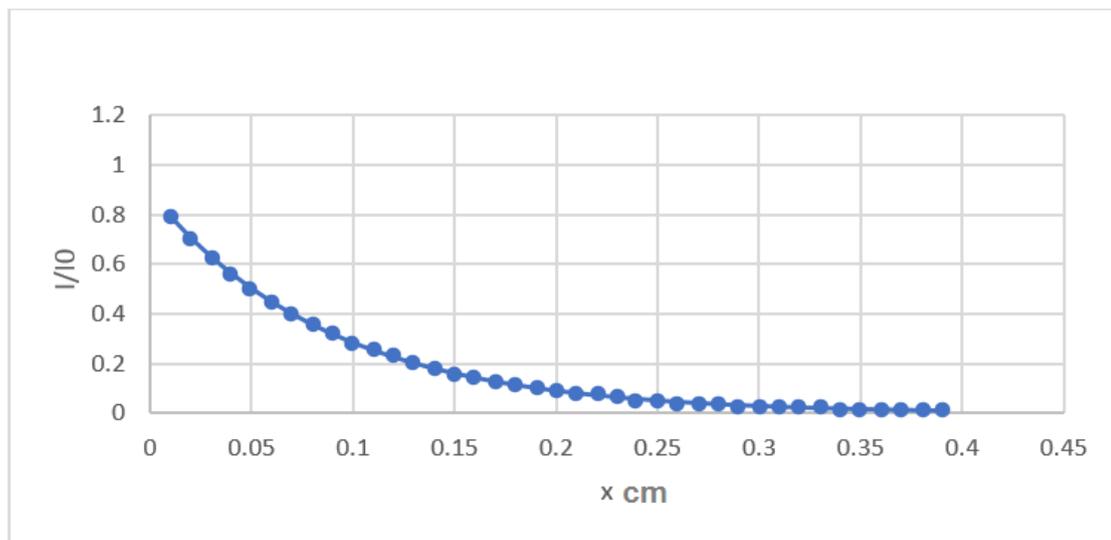
حيث $\alpha = 11.44 \text{ cm}^{-1}$ وتمثل معامل التخميد وقد تم حسابها [8].

x : هي المسافة داخل القضيب بالسنتيمتر وتتراوح من (0-4mm) أي من الصفر حتى 4mm (قطر القضيب).

كما هو مبين في الجدول (1).

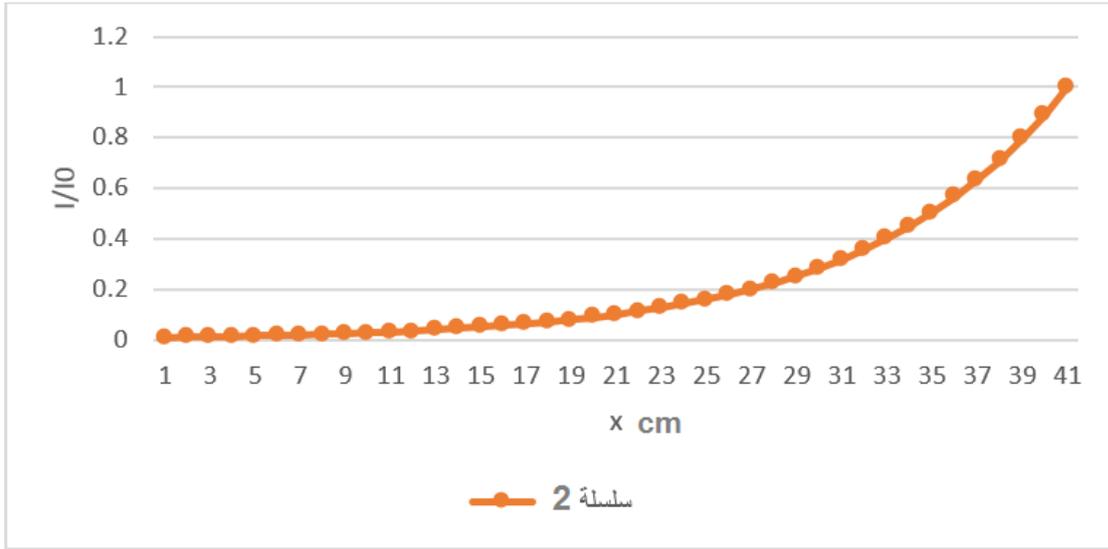
الجدول (1) : تغيير التدفق الضوئي لليزر الضخ ضمن القضيب الليزري.

X (cm)	I/I_0	X(cm)	I/I_0
0.01	1	0.21	0.090
0.02	0.795	0.22	0.080
0.03	0.709	0.23	0.071
0.04	0.632	0.24	0.064
0.05	0.564	0.25	0.057
0.06	0.503	0.26	0.051
0.07	0.448	0.27	0.045
0.08	0.400	0.28	0.040
0.09	0.357	0.29	0.036
0.1	0.318	0.3	0.032
0.11	0.284	0.31	0.028
0.12	0.253	0.32	0.025
0.13	0.226	0.33	0.022
0.14	0.201	0.34	0.020
0.15	0.179	0.35	0.018
0.16	0.160	0.36	0.016
0.17	0.143	0.37	0.014
0.18	0.127	0.38	0.012
0.19	0.113	0.39	0.011
0.2	0.101	0.4	0.010



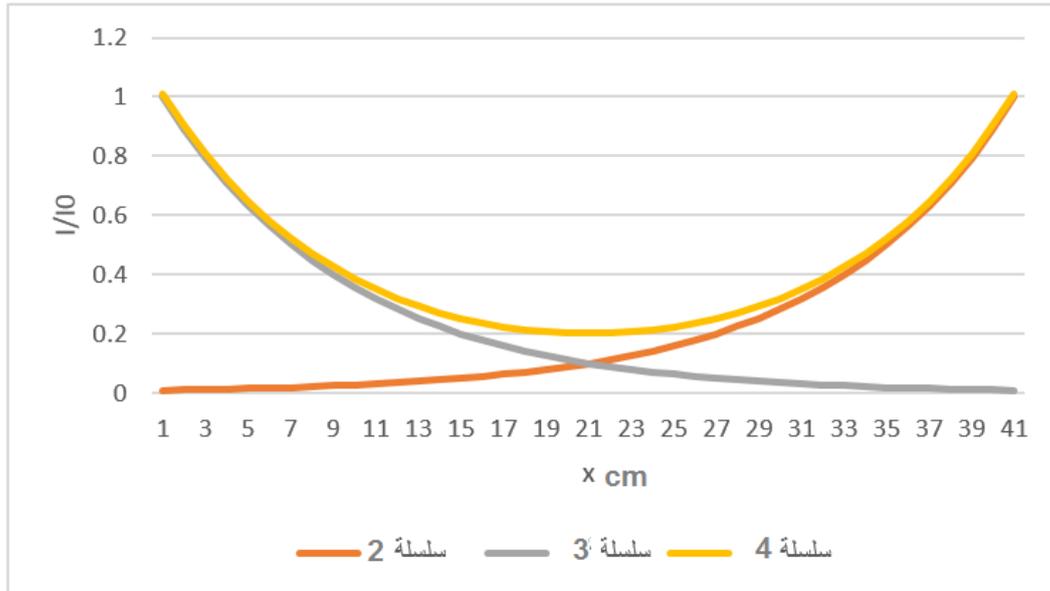
الشكل(12): انتشار الحزمة ضمن القضيب الليزري في حالة الضخ الجانبي

نلاحظ من (الشكل 12) أنه في الجهة القريبة من منبع الضخ تكون الاستطاعة كبيرة ومع ازدياد المسافة أي كلما اقتربنا من الطرف الآخر للقضيب (الجهة المقابلة) كلما تناقصت استطاعة الضخ لتصبح أقل من 1%. لذلك ولكي يكون هنالك تجانس في الضخ لابد من وضع ليزر ديود في الجهة المقابلة بانزياح صغير منعاً من الحاق الأذى بالليزر ديود السابق، ومن ثم دراسة توزيع الاستطاعة له داخل القضيب وفق العلاقة: $I = I_0 e^{-\alpha(d-x)}$ كما هو موضح في (الشكل 13):



الشكل (13): انتشار الحزمة ضمن القضيب الليزري في حالة الضخ الجانبي في الجهة المقابلة نلاحظ أن الحالة مماثلة لكن هنا الاختلاف بجهة توضع الليزر ديود لذلك فإن استطاعة الضخ ستكون عالية في الطرف القريب من الليزر ديود والذي يمثل الجهة الثانية للقضيب. أما في حالة دراسة توزيع استطاعة الضخ داخل القضيب لليزري ديود معاً في آن واحد وفق العلاقة و (الشكل 14):

$$I = I_0 e^{-\alpha x} + I_0 e^{-\alpha(d-x)}$$



الشكل (14): توزيع الضخ داخل القضيب الليزري في حالة الضخ بليزري ديود وبجهتين متعاكستين

حيث يبين الشكل توزيع الضخ داخل القضيب في حال الضخ بليزري ديود معا وبجهتين متعاكستين وبهذا نكون حصلنا على ضخ متجانس.

أيضا لابد من معرفة مكان توضع الليزر ديود أي بعده المناسب عن القضيب الليزري لتجنب ضياع الأشعة ولضخ شريحة محددة في القضيب تم اختيارها، كما موضح في الشكل (11) ، وتم حسابه وفق الجدول (2): حيث

$$\tan\theta = \frac{d}{D}$$

الجدول (2)

أبعاد شريحة الضخ (mm)	4×1	4×2	4×3
D المسافة بين الليزر ديود والقضيب (mm)	1.37	2.75	4.12

2-2 حساب خرج الليزر المستمر:

إن شرط الحصول على الليزر هو أن يكون الريح أكبر تماماً من الضياعات في كل دورة للشعاع ضمن المجاوب. ولمعرفة المردود الكلي لليزر (slope efficiency) يجب معرفة ما يلي:

η_p : الفعالية (المردود) الكلية للضخ حيث تتعلق بمنبع الضخ وتتراوح قيمتها في حال منبع الضخ ديود ما بين (30-50%).
 η_t : فعالية الانتقال وهي جزء الطاقة المنتقلة من الديود والتي تقع ضمن حزمة امتصاص الوسط الفعال وتعطى بالعلاقتين:

$$\eta_t = (1 - R)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)}$$

حيث R: تمثل ضياعات الانعكاس على سطح القضيب الجانبي والوسط الفعال والبصريات المستخدمة.

n: قرينة انكسار القضيب الليزري

η_a : فعالية الامتصاص وهي جزء الطاقة الممتص ضمن القضيب الليزري وتعطى بالعلاقة:

$$\eta_a = 1 - \exp(-\alpha_0 l)$$

حيث α_0 : معامل امتصاص الوسط الفعال لطول موجة الضخ

l: طول القضيب الليزري

η_s : معامل ستوكس ويأتي من الفرق الطاقى بين فوتونات الضخ وفوتونات الليزر الصادر ويعطى بالعلاقة:

$$\eta_s = \frac{\lambda_p}{\lambda_l}$$

η_Q : المعامل الكمومي غالباً ما تكون قيمته 100% لأنه يمكننا استخدام ليزر ديود طول موجته توافق الفرق بين السويتين الليزريتين لليزر المدروس.

η_B : معامل التغطية يكون كبير في حال الليزر متعدد الأنماط وتصل قيمته إلى 100%

η_C : فعالية التقارن وتعطى بالعلاقة:

$$\eta_c = \frac{T}{T + \delta}$$

T: ضياعات مرآة الخرج حيث $T = (1 - R)$

δ : الضياعات الكلية ضمن المجاوية وتساوي 0,03، ويتم حسابها عملياً من خلال تغيير ثلاث انعكاسيات مرابا ونسجل العتبة في كل مره ثم نرسم $-LnR=f(P_{th})$ فتكون نقطة تقاطع المستقيم الناتج مع المحور $-LnR$ هي قيمة δ . ومنه يحسب المردود الكلي لليزر بالعلاقة التالية [4]:

$$\sigma_s = \eta_t \eta_a \eta_s \eta_Q \eta_B \eta_C$$

بالحساب تبين ما يلي:

$$\eta_t = 90\% = 0.90$$

$$\eta_a = 100\% = 1$$

$$\eta_s = 76\% = 0.76$$

$$\eta_Q = 100\% = 1$$

$$\eta_C = 57\% = 0.57$$

$$\eta_B = 100\% = 1$$

ومنه فإن المردود الكلي لليزر ضوئياً:

$$\sigma_s = 0.388 = 38.8\%$$

كما قمنا بحساب طاقة العتبة وطاقة الخرج لليزر Nd:GGG ومردوده ومقارنته مع ليزر Nd:YAG من أجل طاقات ضخ مختلفة وعاكسية مرآة خرج تتراوح بين % (70 -99) وأخذنا القيم العظمى لكل حالة وسنوضح طريقة إيجاد القيم العظمى لحالة واحدة ثم نعرض النتائج لباقي الحالات وفق الجدول (3):

$$P_{th} = \left(\frac{\delta - \ln R}{2} \right) \frac{A h \nu_l}{\eta \sigma \tau_f}$$

$$P_{out} = A \left(\frac{1 - R}{1 + R} \right) I_s \left(\frac{2 g_0 l}{\delta - \ln R} - 1 \right)$$

حيث :

$$I_s = \frac{h \nu_l}{\sigma \tau_f}$$

$$\eta = \frac{p_{out}}{p_{in}}$$

A: مساحة المقطع العرضي الفعال

R: عاكسية مرآة الخرج

g_0 : معامل ربح الإشباع

I_s : كثافة استطاعة الإشباع

τ_f : زمن حياة الفوتون

σ : المقطع الفعال للإصدار الليزري المحثوث

$h \nu_l$: طاقة الفوتون المنبعث من الإنتقالات الليزرية

p_{out} : استطاعة الخرج

p_{in} : استطاعة الدخل (الضخ)

في حال قمنا بضخ ليزر Nd:GGG بليزرات ديود ذات استطاعة 150W وقمنا بتغيير قيم العاكسية بحيث تتراوح

% (50-90) نحصل على الجدول (3):

الجدول (3)

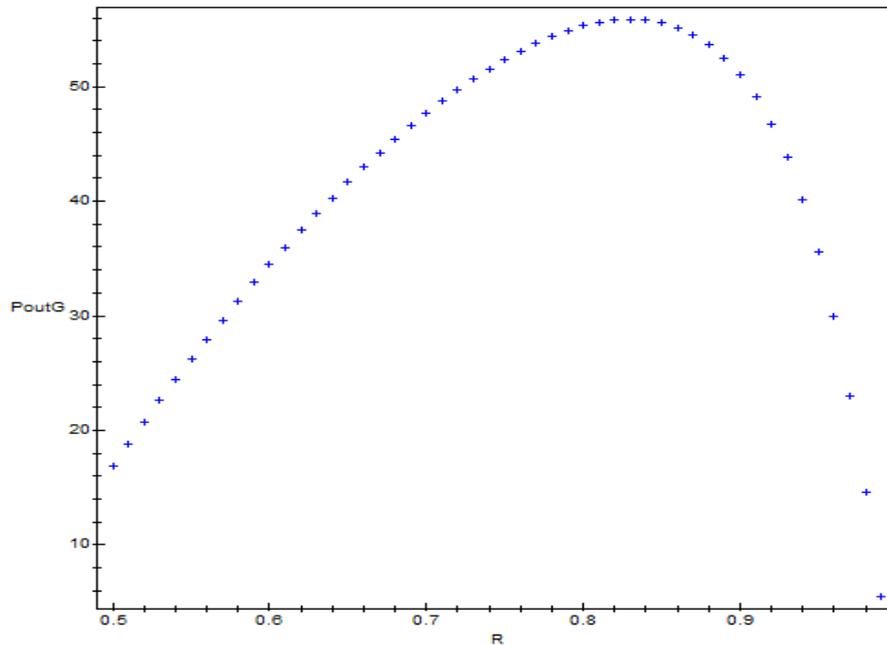
R	99	98	97	95	94	93	91	90	85	83	80
$P_{in}(W)$	150										
$P_{th}(W)$	25.5	20	19.2	20.7	21.9	23.3	26.4	28	36.8	40.5	46.4
$P_{out}(W)$	4.5	14.6	23	35.6	40.1	43.8	49.1	51	55.5	55.8	55.2
η	3.6	9.7	15.3	23.7	26.7	29.2	32.7	34	37	37.2	36.8

وبمقارنة القيم التي حصلنا عليها نجد ما يلي:

$$R_{max}=83$$

$$P_{max}= 55.8$$

$$\eta_{max} =37.2$$



الشكل (15): استطاعة خرج الليزر بتابعية عاكسية المرآة

يوضح الجدول (4) القيم العظمى لطاقة الخرج لليزر Nd:GGG ومردوده وأفضل عاكسية مرآة ومقارنته مع ليزر Nd:YAG من أجل طاقات ضخ مختلفة:

الجدول (4)

$p_{in}(W)$	GGG			YAG		
	R_{max}	$P_{max}(W)$	η_{max}	R_{max}	$P_{max}(W)$	η_{max}
130	84	54.7	35.1	78	56.6	43.6
150	83	55.8	37.2	76	67	45.1
170	82	66.1	38.2	75	78.8	46.4

نلاحظ أن بلورة الياك YAG أفضل من بلورة الGGG في حالة الضخ المستمر حيث أن مردود واستطاعة خرج ليزر Nd:YAG أفضل من ليزر Nd:GGG.

ولأن محور دراستنا هي بلورة GGG قمنا بضخ ليزر Nd:GGG بعدة ليزرات ديود من النوع C-mount استطاعة الليزر ديود الواحد 5watt وتم تركيز الضخ على شريحة أبعادها 4×1 ثم 4×2 والمقارنة بينهما وفق الجدول (5) حيث n عدد الديودات الليزرية:

الجدول (5)

$p_{in}(w)$	n	4×1			4×2		
		R_{max}	$P_{max}(w)$	η_{max}	R_{max}	$P_{max}(w)$	η_{max}
30	6	95	2.5	8.5	0	0	0
60	12	90	13.3	22.2	95	5.1	8.5
90	18	87	26.5	29.4	92	15	16.7
100	20	87	31.1	31.1	92	18.7	18.7
150	30	83	55.8	37.2	89	39.5	26.3

في حال استخدمنا ليزرات ديود من النوع C-mount ومن أجل الحصول على مردود عالي واستطاعة خرج عالية يفضل تطبيق حالة 30 ليزر ديود باستطاعة دخل 150watt ومقطع الضخ شريحة 4×1 من قضيب الليزر حيث أن أفضل عاكسية مرآة تحقق المطلوب هي 83%.
أما في حال تم الضخ بثلاث ليزرات ديود من النوع C-S mount على شريحة أبعادها 4×1 ثم 4×2 وباستطاعات مختلفة نجد الجدول (6) :

الجدول (6)

$p_{in}(W)$	$p_{diode}(W)$	4×1			4×2		
		R_{max}	$P_{max}(w)$	η_{max}	R_{max}	$P_{max}(w)$	η_{max}
120	40	85	40.8	34	90	26.7	22.2
150	50	83	55.8	37.2	89	39.5	26.3
180	60	81	71.3	39.6	87	53	29.4
240	80	78	103.5	43.1	85	81.6	34

نلاحظ في حال تم استخدام ليزرات ديود من النوع C-S mount فإن أفضل مردود واستطاعة خرج تكون عند استخدام ثلاث ليزرات ديود ذات الاستطاعة 80watt أيضاً بمقطع ضخ 4×1 من قضيب الليزر وأفضل عاكسية مرآة تحقق المطلوب هي 78%.

الاستنتاجات والتوصيات:

إن الإصدار الليزري من قضيب لييزري يمكن تحضيره من مادة Nd:GGG عند الضخ باستطاعات مقبولة من الديودات الليزرية، ويمكن الحصول على مردود ضوئي-ضوئي عالي يتراوح ما بين 22.2% إلى 43% من أجل استطاعة خرج تتراوح من (26.7-103.5)W وذلك عند ضخ القضيب جانبياً بثلاثة ديودات لييزرية C-S mount باستطاعة ما بين (40-80)W لكل منها.

تبين أنه من الأفضل الضخ بشكل حزمة ضيقة ضمن القضيب الليزري للحصول على أعلى مردود ممكن. يمكن استخدام مرسلات لييزرية مستمرة في الصناعة في عمليات قص المعادن أو في الطب في إزالة الشعر وذلك بعد إضافة آلية تحكم بتردد العمل والاستطاعة عن طريق التحكم بمنابع تغذية الديودات الليزرية. كما يمكن الاستفادة منه كليزر تعليمي لدراسة البنية الفراغية لحزمة الخرج والتحكم بأنماطها.

ملاحظة: هذه الدراسة نظرية باستخدام برنامج حسابي MAPLE، تمت كتابة المعادلات وإدخال المعاملات بطريقة برمجية للحصول على النتائج السابقة.

تم انجاز العمل في مركز الدراسات والبحوث العلمية.

References:

- [1] Diode-pumped passively mode-locked Nd:GGG laser at 1331.3 nm Y. Yang, X.-Q. Yang, Z.-T. Jia, J.-L. Xu, J.-L. He, S. D. Liu, B.-T. Zhang, and H. Yang 27 March 2012.
- [2] Diode-pumped continuous-wave blue laser operation of Nd:GGG at 467.0, 467.7, and 468 nm B Xu *et al* 2012 *Laser Phys. Lett.* 9 295.
- [3] Neodymium doped GGG laser compared with YAP, SLGO and YAG lasers. S.Kaczmarek, K.Kopczyński, T.Łukasiewicz, A.N. Durygin³, I.M. Solskii 1997.
- [4].Koechner W., Bass M.,Solid-State,Lasers,Springer, 2006.
- [5] DiodePumped Nd:GGG Laser at 937 nm, under Direct Pumping¹ K. N. Hea, b, Z. Y. Weia, , D. H. Lia, Q. Wanga, Z. G. Zhanga, H. H. Jiangc, S. T. Yinc, and Q. L. Zhangc published online September 2, 2011.
- [6] Svelto O., Principals of Lasers, Springer,5thedition,(2010)219.
- [7] Packaging of High Power Semiconductor Lasers, Xingsheng Liu • Wei Zhao. Lingling Xiong, Hui Liu, Springer Science+Business Media New York (2015) 29-50.
- [8] Labranche Wu Qun.,Diode-Pumped CW and quasi-CW Nd:GGG(Ca,Mg,Zr) Laser, 2015.
- [9] Efficient laser-diode end-pumped Nd:GGG lasers at 1054 and 1067 nm, Bin Xu, Huiying Xu, Zhiping Cai, P. Camy, J. L. Doualan, and R. Moncorgé published 9 October 2014.