

الجمهورية العربية السورية
مركز الدراسات والبحوث العلمية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

أمثلة معاملات ليزر نبضي محقون جانبياً بالديودات الليزرية عالية الاستطاعة

أطروحة أعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة وعلوم البصريات - اختصاص ليزر

إعداد:

حنين محمد

إشراف:

د. ظافر موسى

د. زياد محمد

دمشق ٢٠١٩/١٠/١٥

الإهداء

إلى بطل حياتي الذي لن ينكر

..... أبي الحبيب

إلى شيبك وتعبك في سبيل مراحتي

إلى اليد التي غرست بي كل ما أملك

..... أمي الغالية

إلى رايتة وجودي ومنهني أسباب سعادتني

..... إخوتي

إلى سند الروح وثقتي في الحياة

إلى ذاتي ونصف الحقيقي وصورتي أمام نفسي

..... زوجي الحنون

كينوتي والأمل الذي أحيانا به والأجله

..... أساتذتي المحترمين

لا يسعني إلا أن أخني لأولئك الذين أفادوني من خبراتهم وعلمهم

وتعجز الكلمات عن تقديم الشكر والامتنان للدكتورين الذين تفضلا وأشرفا على عملي هذا وقدموا إلي المعرفة

القيمة ولم يدخلوا علي بعلمهما فلهما مني كامل الشكر والامتنان الدكتور ظافر موسى، الدكتور زياد محمد

حنين كامل محمد

كلمة شكر

وأنا أنهى آخر صفحة من صفحات هذه الرسالة أجد نفسي عاجزاً عن الشكر والثناء والتقدير لأستاذي الفاضل الدكتور ظافر

موسى والدكتور زياد محمد على ما قدماه إليّ من إرشادات علمية وعملية وتهيئة أنسب الأجواء أثناء مدة بحثي هنا لما وجدت

فيها من سعة صدر ودماثة خلق ورعاية صادقة طيلة مدة البحث والذي لهما الفضل للوصول إلى ثمره هذا الجهد .

الشكر إلى إدارة المعهد العالي للعلوم التطبيقية على جهودهم خلال فترة الدراسة وإعداد الأطروحة متمثلة بقسم الفيزياء وإلى جميع

الأساتذة الكبار والعاملين من موظفين ومخبرين .

شكري وتقديري إلى زملائي من طلبة الدراسات العليا فمني لهم التحية والتقدير متمنية لهم التوفيق والنجاح وتحقيق الهدف الذي

نسعى له جميعاً، وأخيراً شكري وتقديري إلى كل من مدَّ يد العون والمساعدة سواءً كانت بالكلمة المعبرة أو بالنصيحة لهم مني جزيل

شكري وتقديري .

الملخص

في إطار تطوير المرسلات الليزرية الصلبة، قمنا ولأول مرة في فعالية الليزر، بتصميم وتنفيذ نموذج مخبري من ليزر نيوديميوم ياغ ذو ضخ جانبي بديودات ليزرية عالية الاستطاعة. يتمتع هذا الليزر بمواصفات فريدة تجعله نواة للعديد من التطبيقات الهامة. أهم هذه المواصفات: العمل بشكل مستمر أو نبضي وذلك بفضل استخدام مفتاح جودة سلمي، بالإضافة إلى فعالية ضوئية عالية مع نوعية حزمة جيدة.

يمكن تلخيص نتائج الأطروحة بالنقاط الرئيسية التالية:

- تطوير طريقة جديدة لأمثلة معاملات ليزر نيوديميوم ياغ ذو ضخ جانبي بديودات ليزرية عالية الاستطاعة، بما في ذلك طريقة دقيقة لقياس معامل التغطية بين منطقة الريح والنمط الليزري ضمن الوسط الفعال.
- تصميم وتنفيذ نموذج مخبري من الليزر المذكور وذلك بناءً على نتائج طريقة الأمثلة. أجرينا كافة القياسات المخبرية التي تؤكد دقة وفعالية هذه الطريقة ومقارنتها مع الطرق المعروفة والمعتمدة عالمياً في هذا المجال.
- الحصول على ليزر نبضي متعدد الأنماط (Multimodes) بطاقة نبضية (10.4 mJ) ومردود (28.8%) وذلك باستخدام مجاوب مستوي-مستوي ومفتاح جودة سلمي.
- الحصول على ليزر نبضي مع حزمة شبه غوصية ($M^2 = 3.4$) بطاقة (10 mJ) ومردود (11.4%) باستخدام مجاوب (مستوي- مقعر).

ABSTRACT

In the context of developing solid state lasers, we have, for the first time in our laser department, designed and realized an experimental prototype of a high-power diode side-pumped Nd:YAG laser. This prototype has such good characteristics that make it a milestone in many important applications. The most obvious characteristics are: laser capability of working in CW and pulsed mode using a passive Q-switch, in addition to the high efficiency with a good beam quality. We can summarize the results of the thesis in the main following points:

- Establishment of a new method for optimization of high-power diode side-pumped Nd:YAG laser, including an accurate approach to estimate the overlap efficiency between the gain and mode volume in the active medium.
- Based on this optimization method, we have designed and realized an experimental prototype of the indicated laser and done all the experimental measurements that assure the accuracy and efficacy of this method and compare it with the well-known methods used in this field.
- Establishment of a multimode pulsed Nd:YAG laser with an energy of 10.4 mJ and an efficiency of 28.8 %, by using a plano-plano oscillator with a passive Q-switch.
- Establishment of a nearly Gaussian Nd:YAG laser ($M^2 = 3.4$) with an energy of 10 mJ and an efficiency of 11.4%, by using a plano-concave oscillator.

الهدف من البحث

يعتبر الضخ باستخدام الديودات الليزرية أحد أهم محاور تطوير ليزرات الحالة الصلبة. حيث أظهرت أنظمة الليزر الصلبة التي يتم ضخها بالديودات الليزرية ميزات هامة مقارنة بتلك التي يتم فيها استخدام المصابيح النبضية والقوسية في الضخ، أهم تلك الميزات تحسين فعالية الضخ حيث تجاوزت فعالية الضخ (30%)، تحسين نوعية الحزمة، التقليل من الإجهاد الحراري (بالتالي إمكانية زيادة تردد نبضات الليزر)، تقليل عتبة الإصدار وبالإضافة طبعاً إلى الحصول على تصاميم مدججة وخفيفة وطويلة العمر.

شكلت الليزر الصلبة التي يتم حقنها بالديودات الليزرية 30% من إجمالي حجم مبيعات ليزرات الحالة الصلبة حسب إحصائيات عام 2006 [1].

كل ما سبق يبرز ضرورة وأهمية تصميم مرسلات ليزرية صلبة محقونة بالديودات عالية الاستطاعة وتنفيذها لاستخدامها في تطبيقاتنا المختلفة.

مخطط الأطروحة

يتوزع هذا البحث ضمن فصلين رئيسيين:

١. الفصل الأول القسم النظري: يتناول لمحة عن الليزر بشكل عام والليزر الصلبة بشكل خاص

ويتم التركيز على ليزر Nd: YAG باعتباره الوسط الفعال المستخدم في هذا العمل مع ذكر طرق

ضخه التقليدية والحديثة والمقارنة بين الطرق المختلفة للضخ.

٢. الفصل الثاني القسم العملي: الذي يتوزع ضمن جزأين:

● الأول: تصميم وتنفيذ مرسل ليزري نبضي محقون بالديودات الليزرية بهدف الحصول على طاقة نبضية

(10.4 mJ) وبأعلى مردود استخراج ، ومن أجل أمثلة معاملات هذا المجاوب قمنا بكتابة برنامج حاسوبي

يحل معادلات الليزر ويعطي قيم نفوذية الماص القابل للإشباع وعاكسية مرآة الخرج التي تعطي قيم الطاقة

المطلوبة مع إعطاء مردود الاستخراج من أجل تلك القيم. بناء على نتائج النمذجة تم اختيار القيم التالية

(10.4 mJ) والتي مكنتنا من الحصول على نبضات ليزرية بطاقة (10.4 mJ) و ($R = 0.48, T_0 = 0.4$)

وعرض نبضة (29ns) باستطاعة (0.36MW) ومردود (28.8%) باستخدام قضيب ليزري

Nd: YAG بطول (90mm) وقطر (3mm) موضوع ضمن مجاوب (مستوي-مستوي).

● الثاني: يهدف إلى توليد حزمة ليزرية بنوعية جيدة وذلك باستخدام الوسط الفعال نفسه ضمن مجاوب (مستوي

–مقعر)، حيث قمنا بأمثلة معاملات المجاوب الليزري للحصول على حزمة شبه غوصية ($M^2 = 3.4$)

بطاقة (10 mJ) ومردود (11.4%) كما تم تطبيق طريقتنا الدقيقة لقياس معامل التغطية بين الربح والنمط

الليزري ضمن الوسط الفعال والتأكد من أفضليتها لدى مقارنتها بالطرق التقليدية وذلك بحساب هذا المعامل

بالطريقة التجريبية.

المحتويات

١٦	١ . الفصل الأول
١٦	١- مقدمة:
١٩	٢-ليزر النيوديميوم ياغ (Nd:YAG) ذي الضخ بالديودات الليزرية:
١٩	٢-١- مدخل إلى ليزرات الجسم الصلب:
٢٢	٢-٢- ليزر نيوديميوم ياغ Nd:YAG:
٢٣	٢-٢-١-مخطط المستويات الطاقة في ليزر النيوديميوم ياغ:
٢٦	٢-٣- طرق الضخ الضوئي:
٢٧	٢-٣-١- الطريقة التقليدية في الضخ الضوئي:
٢٩	٢-٣-٢- الطريقة الحديثة في الضخ الضوئي:
٣٧	٣- معامل فعالية التغطية بين الضخ والنمط الليزري:
٣٨	٣-١- المجاوب الليزري ونوعية الحزمة الليزرية:
٤٠	٤- آلية إصدار النبضات القصيرة (مفتاح الجودة Q-switch):
٤٣	٤-١- التعديل الإيجابي لمعامل الجودة (Active Q-switch):
٤٣	٤-٢- التعديل السلبي لمعامل الجودة (Passive Q-switch):
٤٥	٤-٢-١- الكروم ياغ كماص قابل للإشباع Cr + 4:YAG :
٤٦	٤-٣- معادلات الليزر بوجود الماص القابل للإشباع:
٥٠	الفصل الثاني
٥٠	القسم العملي
٥١	الجزء الأول:
٥١	١-ملخص:

- ٢- مبدأ النمذجة الرياضية: ٥١
- ٣- توصيف الديودات المستخدمة في الضخ: ٥٢
- ٣-١- قياس تغير طول موجة إصدار الديود الليزري بدلالة درجة الحرارة: ٥٢
- ٣-٢- قياس المردود الكهروضوئي للديودات الليزرية: ٥٤
- ٣-٣- حجرة الضخ والمجاوب الليزري: ٥٥
- ٣-٤- اختبار صحة النمذجة: ٥٥
- الجزء الثاني: ٦١
- ١- ملخص: ٦١
- ٢- تصميم المجاوب: ٦٢
- ٢-١- اختيار المجاوب: ٦٢
- ٢-٢- أمثلة بارامترات المجاوب $(r; R; L1; L2)$: ٦٢
- ٢-٣- اختيار طريقة توزع منابع الضخ: ٦٣
- ٢-٤- النتائج العملية: ٦٤
- ٢-٥- طريقة حساب معامل نوعية الحزمة: ٦٥
- ٣- قياس معامل فعالية التغطية بين الضخ ونمط الإصدار: ٦٦
- ٣-١- قياس معامل التغطية بالطريقة التقليدية: ٦٧
- ٣-٢- قياس معامل التغطية بالطريقة نصف العملية: ٦٨
- ٣-٣- قياس معامل التغطية بطريقتنا المقترحة: ٦٨
- ٣-٤- الطريقة المقترحة نصف العملية لقياس معامل التغطية: ٧٠
- ٣-٥- الطريقة التجريبية لقياس معامل التغطية: ٧١
- ٤- مناقشة النتائج ٧٤

٧٤-٥ الخلاصة والآفاق المستقبلية:
٧٥-٦ الملاحق:
٧٥	الملحق ١ : البرنامج المستخدم لحساب نفوذية الماص القابل للإشباع وعاكسية مرآة الخرج:
٧٨	الملحق ٢ : البرنامج المستخدم لحساب معامل فعالية التغطية:
٨١	الملحق ٣ : المواصفات الفنية لوحدة التغذية:
٨٢المراجع:

فهرس الأشكال

- الشكل ١ : مخطط عام لمكونات ليزر Nd:YAG ١٧
- الشكل ٢ : مخطط عام للانتقالات الطاقية في ليزر Nd:YAG [2] ١٨
- الشكل ٣ : مخطط تفصيلي للمستويات الطاقية في ليزر Nd:YAG [2] ٢٥
- الشكل ٤ : مقطع الإصدار المحثوث لكافة الانتقالات الطاقية في ليزر Nd:YAG [2] ٢٦
- الشكل ٥ : منحنى الامتصاص المميز لليزر Nd-YAG ٢٧
- الشكل ٧ : طيف إصدار لمبة فلاش كزنيون (a)، لمبة كزنيون قوسية (b) [5] ٢٨
- الشكل ٨ : الطرق المعتمدة لضخ قضيب ليزري Nd:YAG بواسطة لمبة فلاش (أشكال العواكس): ٢٨
- الشكل ٩ : أشكال الديودات الليزرية (single emitter) (a); (Bar) (b); (Stack) (c) ٣١
- الشكل ١٠ : البنية التفصيلية لطيف امتصاص بلورة Nd:YAG وتوافقه مع طيف إصدار ليزر GaAlA ٣٢
- الشكل ١١ : مخطط توضيحي لطرق الضخ الليزرية الطولانية: (a) ضخ وحيد في مجاوب خطي بسيط، (b) ضخ ثنائي في مجاوب على شكل Z، (c) ضخ ثنائي في مجاوب حلقي. ٣٣
- الشكل ١٢ : مخطط توضيحي لطريقة الضخ الليزرية العرضانية: (a) ضخ من طرفين باستخدام نظام محرقة ٣٥
- الشكل ٦ : المنحنى المميز لليزر Nd:YAG ٣٦
- الشكل ١٣ : مخطط توضيحي لمعاملات المجاوب الليزري. ٤٠
- الشكل ١٤ : تغير الربح والضياعات والنبضة الليزرية مع الزمن ٤٢
- الشكل ١٥ : نفوذية الماص القابل للإشباع كتابع لكثافة الطاقة ٤٤
- الشكل ١٦ : مخطط سويات الطاقة لشاردة الكروم في الياغ ٤٥
- الشكل ١٧ طول موجة إصدار الديود عند درجة الحرارة (25°C). ٥٢
- الشكل ١٨ : منحنى استطاعة الخرج الضوئية بدلالة استطاعة الدخل الكهربائية للديود الليزري ٥٤
- الشكل ١٩ الديود الليزري المستخدم الضخ. ٥٥
- الشكل ٢٠ : تغير طاقة الليزر بدلالة عاكسية مرآة الخرج ٥٦

- الشكل ٢١ : تغيير طاقة الخرج بدلالة العاكسية من أجل ثلاث قيم لنفوذية الماص القابل للإشباع ٥٧
- الشكل ٢٢ : تغيير طاقة الخرج بدلالة النفوذية من أجل ثلاث قيم للعاكسية ٥٧
- الشكل ٢٣ : صورة الترتيب التجريبي الليزري المستخدم: ٥٩
- الشكل ٢٤ : عرض نبضة الليزر ٦٠
- الشكل ٢٥ : مخطط تمثيلي لحجرة الضخ والمجاوب الليزري. ٦٤
- الشكل ٢٦ : منحنى توزيع الشدة للحزمة الناتجة. ٦٥
- الشكل ٢٧ : صورة حزمة الليزر الناتج ٦٥
- الشكل ٢٨ : منحنى توزيع الشدة الضوئية للحزمة التي تم الحصول عليها ٦٦
- الشكل ٢٩ : صورة منطقة الضخ (a) وبقعة الخرج الليزرية (b) من أجل الحالة المثالية للمجاوب. ٦٧
- الشكل ٣٠ : صورة منطقة الضخ (a) وبقعة الخرج الليزرية النظرية (b) ٦٨
- الشكل ٣١ يوضح صور الضخ المأخوذة من المناطق الأربعة للضخ وصور الليزر عند كل منطقة من المناطق ٦٩
- الشكل ٣٢ : صور الضخ عند كل منطقة وصور الليزر النظري عند كل منطقة ٧٠
- الشكل ٣٣ : المنحنى المميز لليزر ٧١
- الشكل ٣٤ : منحنى تغيرات $-\ln(R)$ بدلالة Pin, th ٧٢

فهرس الجداول

- الجدول ١: أشهر ليزرات النيوديميوم وبعض مواصفاتها الفيزيائية. ٢٠.....
- الجدول ٢: أشهر ليزرات الحالة الصلبة. ٢٢.....
- الجدول ٣: المواصفات الفيزيائية والضوئية لليزر (Nd: YAG). ٢٣.....
- جدول ٤: الأطوال الموجية لإصدار ليزر النيوديميوم ياغ. ٢٥.....
- الجدول ٥: مقارنة بين الطريقة التقليدية والطريقة الحديثة للضخ. ٣٤.....
- الجدول ٦: المواصفات الفيزيائية لبلورة (Cr⁴⁺: YAG). ٤٦.....
- الجدول ٧: المعاملات المستخدمة في معادلات الليزر بوجود الماص القابل للإشباع. ٤٧.....
- جدول ٨: تغير طول موجة إصدار الليزر بدلالة درجة الحرارة: ٥٣.....
- جدول ٩: القيم النظرية التي تم الحصول عليها من البرنامج. ٥٨.....
- جدول ١٠: قيم استطاعة خرج الليزر [mW] بدلالة عاكسية مرآة الخرج. ٦٣.....
- جدول ١١: نتائج قياس معامل التغطية لمناطق الضخ الأربعة. ٦٩.....
- جدول ١٢: قيم فعالية الضخ عند كل منطقة ضخ. ٧٠.....

الرموز:

الرمز	الدلالة الفيزيائية
ω_0	نصف قطر الحزمة الغوصي
L_e	الطول المكافئ للمجاوب
R	نصف قطر تقوس المرآة
η_B	معامل فعالية التغطية
η_t	فعالية الانتقال
η_a	فعالية الامتصاص
η_Q	المردود الكومومي
η_s	معامل ستوكس
M^2	معامل نوعية الحزمة
E_p	طاقة النبضة
τ_p	عرض النبضة
P_p	استطاعة النبضة
σ_s	ميل منحني المميز لليزر
λ	طول الموجة
P_{in}	استطاعة الدخل
P_{out}	استطاعة الخرج

الفصل الأول

القسم النظري

١. الفصل الأول

١ - مقدمة:

يعتبر الليزر منبع ضوئي خاص جداً لأنه يتمتع بمواصفات مميزة لا يمتلكها أي من المصادر الضوئية التقليدية. ترتبط مواصفات الليزر المميزة بشكل رئيسي بآلية الإصدار المحثوث (Stimulated Emission) التي اقترحها العالم أينشتاين في مطلع القرن العشرين لكنها لم تتحقق عملياً حتى قام العالم ثيودور هارولد ميمان (T. H. Maiman) بتشغيل أول ليزر (ليزر الياقوت Ruby laser) عام ١٩٦٠ وذلك أثناء عمله في مخبر أبحاث هيوز الأمريكية (Hughes Research Laboratories) [2].

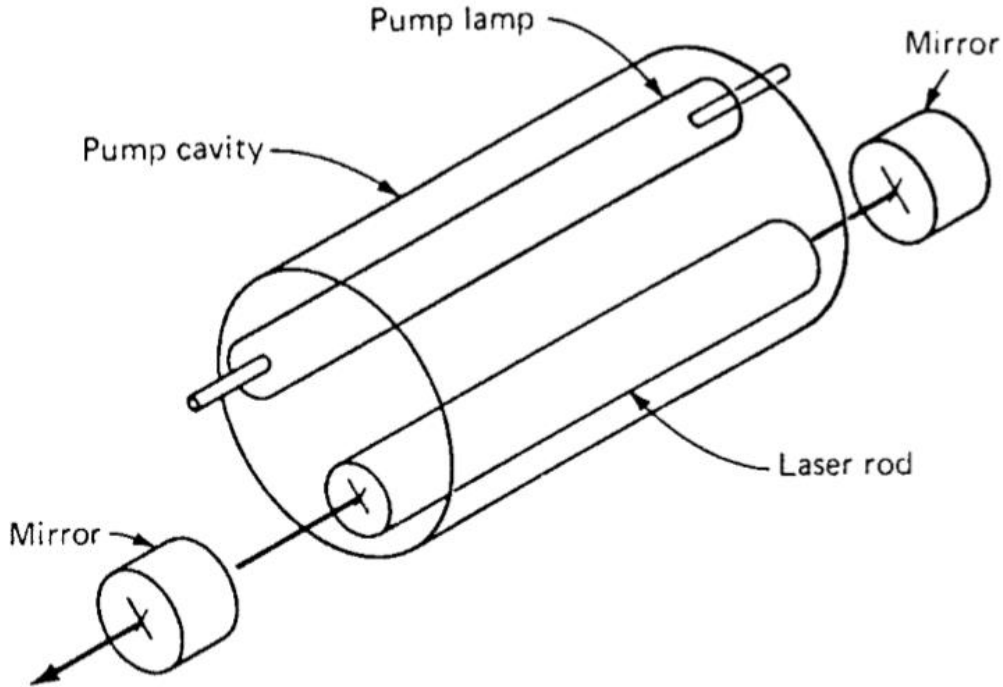
على الرغم من أن أول ليزر كان ليزر صلب (solid-state laser) من النوع النبضي وذو استطاعة ضعيفة إلا أن الأبحاث المتنوعة جعلت أنواع وتصاميم الليزر تعمل في كافة الحالات (الصلبة، السائلة، الغازية) وتغطي طيف واسع من الأطوال الموجية (فوق البنفسجي، المرئي، تحت الأحمر، المليميترى،) وتصدر استطاعات مختلفة مستمرة ونبضية (من الميلي واط وحتى التيراواط $(TW=10^{12} W)$ والبيتاواط $(PW=10^{15} W)$ وتصدر بشكل مستمر أو/و نبضي حيث يتراوح زمن النبضات من الملي ثانية وحتى الفمتوثانية $(10^{-15} s)$ ويوجد أبحاث حالياً في مجال الأتوثانية $(10^{-18} s)$ [3].

يتألف الليزر تصميمياً من ثلاثة مكونات أساسية كما يظهر في الشكل ١:

- الوسط الفعال Active Medium.
- وحدة الضخ Pumping Unit.
- مجاوب Resonator.

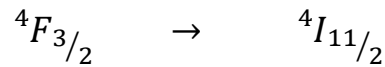
تنوعت الأوساط الفعالة وشملت كافة الحالات الفيزيائية للمادة بدءاً من الحالة الصلبة (كحالة ليزر النيوديميوم ياغ Nd: YAG موضوع الأطروحة) والحالة السائلة (كحالة الليزر الصبغية Dye Lasers) انتهاءً بالحالة الغازية (كحالة ليزرات غاز الكربون CO₂ Lasers أو ليزرات الاكسيمير Excimer Lasers). يتألف الوسط الفعال

من وسط مضيف (مادة حاضنة host material) يحتوي العنصر الفعال الذي تمثل انتقالاته الطاقية أساساً للإصدار المحثوث.

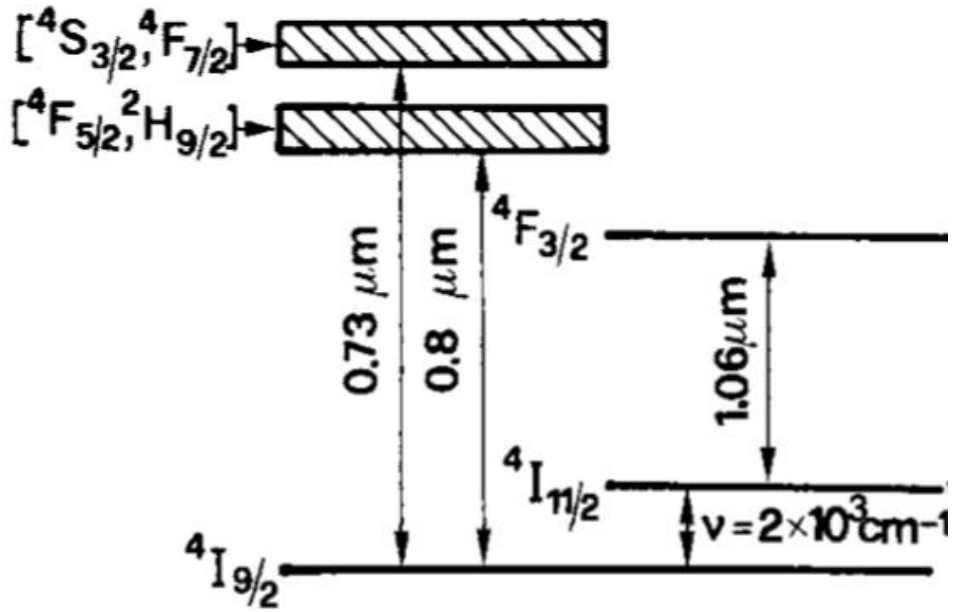


الشكل ١: مخطط عام لمكونات ليزر Nd:YAG

فمثلاً الوسط الفعال في ليزر النيوديميوم ياغ يتألف من بلورة الياغ (YAG) كوسط حاضن يحتوي شوارد النيوديميوم Nd^{3+} التي هي العنصر الفعال. يبين الشكل ٢ مخطط مبسط للمستويات الطاقية لشاردة النيوديميوم، حيث يظهر أن طول موجة الإصدار الرئيسية لليزر النيوديميوم ياغ ($\lambda = 1.064\mu m$) ناتجة عن الانتقال الطاقية:



مع تنوع الأوساط الفعالة وتصاميم الليزر، تنوعت طرق الضخ فوحدة الضخ تقوم بتأمين طاقة الدخل التي تهيج الوسط الفعال وتجعله جاهزاً لعملية الإصدار المحثوث، فمثلاً من أجل ضخ ليزر النيوديميوم ياغ يجب تأمين منبع ضوئي له حزمة إصدار في المجال الطيفي حول طولي الموجة ($\lambda = 0.73 \mu m$) أو ($\lambda = 0.808 \mu m$)، حيث يتضح من الشكل ٢ أن شاردة النيوديميوم لها حزمتي امتصاص أساسيتين تتمركزان حول طولي الموجة المذكورين.



الشكل ٢: مخطط عام للانتقالات الطاقة في ليزر Nd:YAG [2]

أما المجاوبات الليزرية فدورها الأساسي هو تشكيل حزمة الخرج الليزرية وتضخيمها وتحديد مواصفاتها الأساسية: استطاعة (طاقة)، تباعد، معامل نوعية حزمة، وتوزع الطاقة (الاستطاعة) ضمن البقعة الليزرية. تنقسم المجاوبات الليزرية حسب تصميمها إلى نوعين أساسيين: مجاوبات مستقرة Stable Resonators ومجاوبات غير مستقرة Unstable Resonators. عادةً ما يتم في ليزرات النيوديميوم ياغ استخدام مجاوبات من النوع المستقر وخاصةً مجاوب فابري-بيرو Fabry-Perot وهو مجاوب ليزري خطي ذي مرآتين مستويتين [4].

يعتبر ليزر النيوديميوم ياغ من أشهر أنواع ليزرات الحالة الصلبة وأكثرها انتشاراً واستخداماً في العديد من التطبيقات الصناعية، الطبية، العلمية والعسكرية [3,5]. يمكن لليزر النيوديميوم ياغ العمل بالنمط النبضي أو المستمر وله العديد من المواصفات الفريدة التي سنعرضها لاحقاً. أحد أهم محاور تطوير هذه الليزرات هو تحسين فعالية الضخ حيث تتم عملية الضخ بشكل تقليدي باستخدام منابع غير مترابطة وهذا ما يجعل فعالية هذه الليزرات لا تتجاوز 3% بينما تشير نتائج الأبحاث المستمرة حتى الآن في هذا المجال أنه وباستخدام منابع مترابطة (ديودات ليزرية) للضخ يمكن أن تتجاوز فعالية هذه الليزرات مستوى 25% بالإضافة إلى العديد من الميزات الهامة كتحسين نوعية الحزمة، التقليل من الإجهاد الحراري (بالتالي إمكانية زيادة تردد نبضات الليزر)، تقليل عتبة الإصدار، بالإضافة إلى الحصول على تصاميم مدجة وخفيفة وطويلة العمر. فتحت التطويرات المذكورة أعلاه المجال واسعاً أمام جيل جديد من ليزرات

الحالة الصلبة: ليزرات الحالة الصلبة ذات الضخ بالديودات الليزرية أو ما يسمى اختصاراً DPSSL (Diode-Pumped Solid-State Lasers) [10, 20]. الجدير بالذكر أن أول من عرض إمكانية ضخ الليزر الصلبة بواسطة الديودات الليزرية كان نيومان [6]، حيث أثبت أن استخدام الديود (GaAs بطول موجة إصدار $\lambda=880$ nm) يمكن أن يثير فلورة حول طول الموجة $1.06 \mu m$ في بلورة $Nd:CaWO_4$ وبيّن فوائد استخدام الديود الليزري في الضخ بدلاً عن اللامبات التقليدية. لكن روس [7] كان أول من عرض ليزر Nd:YAG يضح بالديودات الليزرية وأظهر ميزات الليزر DPSSL. بدأ التطور الحقيقي لهذه الجيل من الليزر فعلياً مع مطلع تسعينيات القرن الماضي وذلك كنتيجة طبيعية للتطور الهائل في تكنولوجيات الديودات الليزرية عالية الاستطاعة؛ ففي مؤتمر CLEO المنعقد في عام ١٩٩٢ عرض الخبراء الأمريكيان مصفوفة ديودات ليزرية بطول 1 cm وتصدر استطاعة مستمرة 121 W [9].

٢- ليزر النيوديميوم ياغ (Nd:YAG) ذي الضخ بالديودات الليزرية:

٢-١- مدخل إلى ليزرات الجسم الصلب:

تعتبر الليزر الصلبة من أولى الليزر التي تم تصميمها (ليزر الياقوت ١٩٦٠)، يتكون الوسط الليزري الفعال في هذه الليزر من بلورات أو من مواد مصنوعة من الزجاج تدعى بالمادة المضيفة مشابهة بشوارد فعالة تتوضع بتراكيز محددة ضمنها يتم الحصول على هذه الشوارد من المعادن الانتقالية والمعادن النادرة.

تضخ ليزرات الجسم الصلب ضوئياً وذلك باستخدام منابع ضوئية ذات خصائص معينة وطيف إصدار يقع ضمن حزم أو نطاقات امتصاص الشاردة الفعالة الموجودة ضمن الوسط الفعال، فتصدر أشعة ليزرية تقع ضمن مجال الطيف المرئي ومجال ما تحت الأحمر. تتميز ليزرات الجسم الصلب بشكل عام بميزتين أساسيتين:

- التصميم التقني والتركيب البسيط والسهل نسبياً.
- توليد نبضات ليزرية ذات استطاعات عالية.

تعتبر ليزرات النيوديميوم (Nd : host material) أكثر الليزر شهرةً وانتشاراً بين ليزرات الحالة الصلبة وعادةً ما تكون المادة الحاضنة في ليزرات النيوديميوم هي بلورة $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) اختصاراً لعبارة Yttrium

Aluminum Garnet) والتي يتم فيها استبدال بعض شوارد Y^{3+} بشوارد Nd^{3+} . بالإضافة إلى المادة الحاضنة المذكورة يستخدم أيضاً في بعض الأحيان عدد من المواد البديلة ذات المواصفات الخاصة والملائمة لبعض التطبيقات وأهمها: Glass، $YLiF_4$ (YLF)، YVO_4 (YVO). يبين الجدول ١ بعض المميزات الأساسية لمختلف ليزرات النيوديميوم المعروفة [3].

تتميز المادة الحاضنة YLF بخواصها البصرية والحرارية العالية مقارنةً مع مادة YAG مما يجعل ليزرات Nd:YLF أكثر استقراراً من ليزرات Nd:YAG حرارياً، وخاصة فيما يتعلق بالعدسة الحرارية الناتجة عن استطاعة الضخ العالية أو الانكسار المضاعف الناتج عن الإجهاد الحراري. تتمتع ليزرات Nd:YLF التي يتم ضخها بلمبات الفلاش بنوعية حزمة غوصية أعلى واستطاعة أعلى من تلك الناتجة عن ليزرات Nd:YAG وتحديدًا ذات الإصدار المستمر CW.

الجدول ١: أشهر ليزرات النيوديميوم وبعض مواصفاتها الفيزيائية [3].

الليزر	λ (μm)	$\Delta\nu_0$ (cm^{-1})	σ_e (10^{-19} cm^2)	n	τ (μs)	χ (W/m K)
Nd:YAG	1.0641	4.5	2.8	1.82	230	14
Nd:Glass (phosphate)	1.054	180	0.4	1.54	300	1.2
Nd:YLF	1.053	13	1.9	1.4481 (o) 1.4704 (e)	450	6
Nd:YVO ₄	1.064	11.3	7.6	1.958 (o) 2.168 (e)	98	5

λ : طول موجة الإصدار، $\Delta\nu_0$: عرض الخط الطيفي، σ_e : مقطع الإصدار المحثوث، n : قرينة الانكسار، τ : عمر المستوى الليزري الأعلى، χ : الناقلية الحرارية.

كما تتميز ليزرات Nd:YLF بعرض خط إصدار طيفي أكبر بثلاث مرات مما يجعلها مميزة في حالات إصدار النبضات القصيرة الناتجة عن قفل الأنماط. لكن خواصها الميكانيكية والحرارية-الميكانيكية أسوأ بكثير من مادة

YAG وهذا ما يجعل التشغيل الميكانيكي للقضبان الليزرية من مادة YLF صعباً جداً. أما فيما يخص المادة الحاضنة YVO_4 فإن معامل تضخيم الوسط فيها أكبر بثلاث مرات من مادة YAG وهذا ما يجعلها أقل حساسية لضياعات المجاوب الليزري. علماً أن عتبة الإصدار الليزري واحدة تقريباً لكلا المادتين. الجدير بالذكر أن ليزر $Nd:YVO_4$ ذي ضخ محوري بالديودات الليزرية وباستطاعة مستمرة 15W متوفر منذ فترة في الأسواق أما بالنسبة للمادة الحاضنة المصنعة من زجاج الفوسفات (Phosphate Glass) تظهر أن عرض الخط الطيفي أكبر بأربعين مرة من مادة الياغ بالتالي تعطي ليزرات Nd:Glass (في نمط الإصدار المتزامن الأنماط) نبضات أقصر بكثير تصل حتى 100 fs على الرغم من أن مقطع الإصدار المحثوث أقل بكثير من الياغ إلا أنها ميزة كبيرة فيما يخص ظاهرة تضخيم الإصدار التلقائي ASE حيث تكون أيضاً عتبة إصداره عالية مما يجعل مادة الزجاج مميزة من أجل الطاقات العالية. لكن السلبية الرئيسية لهذه المادة هي الناقلية الحرارية القليلة: أقل بعشر مرات من الناقلية الحرارية لمادة الياغ لذلك يقتصر عملها على الليزرات ذات تردد النبضات القليل (أقل من 5Hz). يبين الجدول ٢ قائمة بأشهر ليزرات الحالة الصلبة [3,5].

الجدول ٢: أشهر ليزرات الحالة الصلبة.

الليزر	المادة الفعالة	المادة الحاضنة	طول موجة الإصدار (μm)
الياقوت Ruby	Cr ³⁺	Al ₂ O ₃	0.6943/0.69282
Er:YAG	Er ³⁺	YAG	2.94
Yb:YAG	Yb ³⁺	YAG	1.03
Yb:Er:YAG	Yb ³⁺ Er ³⁺	YAG	1.54
Tm:Ho:YAG	Tm ³⁺ Ho ³⁺	YAG	2.091
Alexandrite	Cr ³⁺	BeAl ₂ O ₄	0.76
Ti:sapphire	Ti ³⁺	Al ₂ O ₃	0.79
Cr:LISAF	Cr ³⁺	LiSrAlF ₄	0.85
Cr:LICAF	Cr ³⁺	LiCaAlF ₆	0.78
Co:MgF ₂	Co ⁴⁺	MgF ₂	1.9
Cr:Forsterite	Cr ⁴⁺	Mg ₂ SiO ₄	1.25
Cr:YAG	Cr ⁴⁺	YAG	1.45

٢-٢- ليزر نيوديميوم ياغ Nd: YAG:

يستخدم ليزر النيوديميوم ياغ بنمطي العمل النبضي والمستمر في العديد من التطبيقات الصناعية، الطبية، العلمية والعسكرية. ففي التطبيقات الصناعية يستخدم ليزر باستطاعة متوسطة $1 - 2 \text{ kW}$ في اللحام الليزري (Welding)، حيث يتم محرقة الحزمة إلى قطر يتراوح في المجال $0.5 - 2 \text{ mm}$ لتأمين خط لحام دقيق في مختلف المعادن. كذلك يستخدم في الثقيب الليزري (Drilling) حيث تكون مواصفات الليزر كالتالي: ليزر نبضي ترددي باستطاعة وسطية $50 - 100 \text{ W}$ بعرض نبضة يتراوح في المجال $1 - 10 \text{ ms}$ وتردد نبضات $10 - 100 \text{ Hz}$

(بالتالي طاقة النبضة $10 J - 5$). أما في التطبيقات الطبية فاستخداماته أكثر تنوعاً كونه يتميز بطول موجة سهلة الانتشار في الألياف البصرية: ففي عمليات الجراحة الانكسارية في العين يستخدم ليزر بعرض نبضة $30ps$ وطاقة لا تتجاوز $1mJ$ من أجل معالجة عتامة الجسم البللوري (Cataract) ومن أجل معالجة زرق العين (Glaucoma) يستخدم ليزر بعرض نبضة من مرتبة $7 ns$ وطاقة لا تتجاوز $1mJ$ شريطة أن يكون قطر البقعة المتمحرفة لا يتجاوز $50 \mu m$. النقطة الهامة جداً هو أن هذا الليزر حل مؤخراً محل ليزر شوارد الأروغون (الأخضر) بكافة تطبيقاته المعروفة تاريخياً وأهمها في معالجة شبكية العين. طبعاً هذا الليزر مستمر CW ويعمل على التوافقية الثانية

($\lambda = 532 nm$) وذي ضخ بالديودات الليزرية وباستطاعة وسطية تصل حتى $10W$ بالتالي تم الاستعاضة عن ليزر شوارد الأروغون بكل تعقيداته التقنية والاستثمارية بليزر مدمج ومكونات صلبة وذي عمر مديد ووثوقية عالية. الميزات الفريدة التي تتمتع بها بلورة النيوديميوم ياغ جعلت هذا الليزر يشغل أكثر من 70% من سوق ليزرات الحالة الصلبة. السلبية الوحيدة هي صعوبة تنمية قضبان ليزرية بأبعاد كبيرة مع الحفاظ على التجانس البصري. يبين الجدول ٣ أهم الخصائص الفيزيائية لليزر Nd:YAG.

الجدول ٣: المواصفات الفيزيائية والضوئية لليزر (Nd: YAG)

$Y_3Al_5O_{12}$	الصيغة الكيميائية
$n = 1.82 ; \lambda = 1.0 \mu m$	قرينة الانكسار
$\sigma_{21} = 6.5 \times 10^{-19} cm^2$ $\sigma = 2.8 \times 10^{-19} cm^2$	مقطع الإصدار المحثوث $R_2 - Y_3$ ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$
$230 \mu s$	عمر السوية الليزرية العليا
$h\nu = 1.86 \times 10^{-19} J$	طاقة الفوتون عند طول الموجة $1 \mu m$

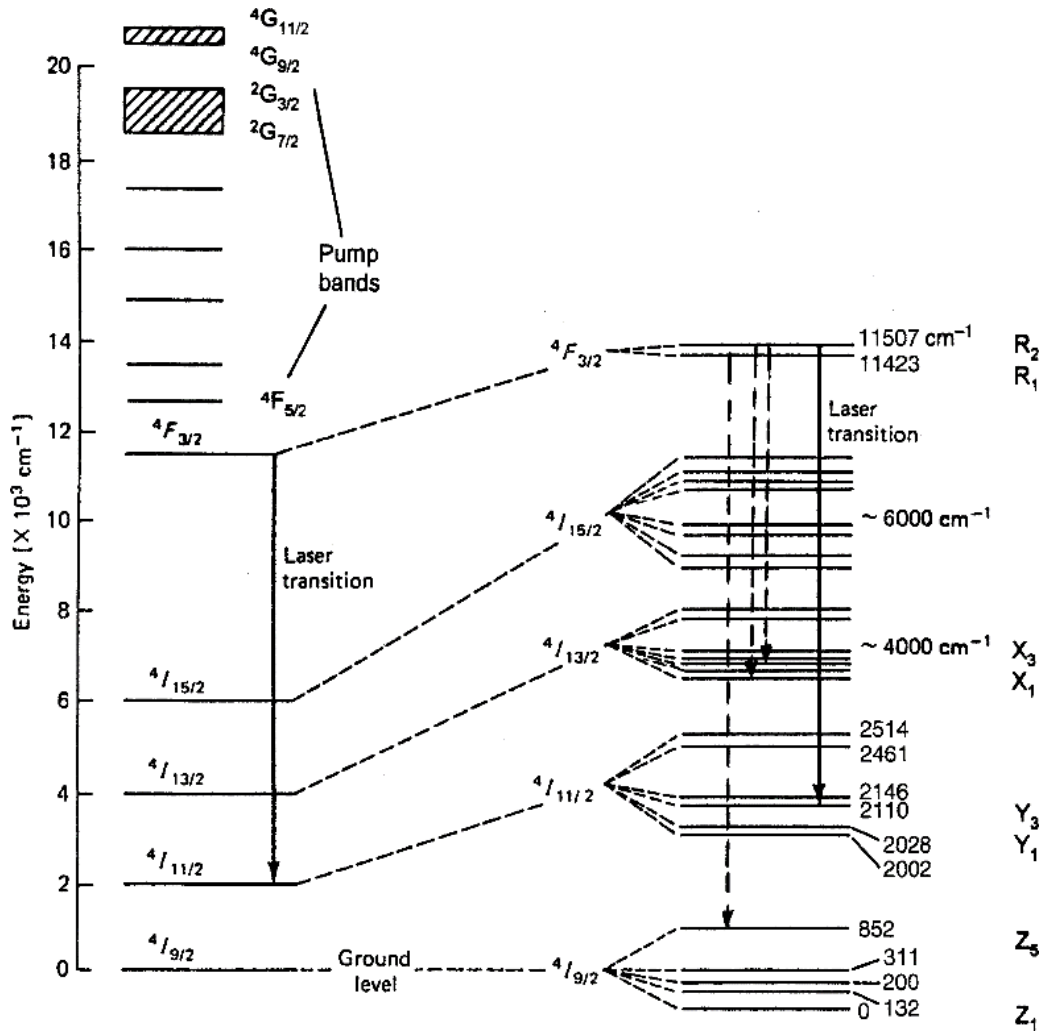
٢-٢-١- مخطط المستويات الطاقة في ليزر النيوديميوم ياغ:

يندرج ليزر النيوديميوم ياغ ضمن فئة ليزرات شوارد الأتربة النادرة Rare Earth Ion Lasers، حيث أن المادة الفعالة في هذا الليزر هي شاردة النيوديميوم الثلاثية Nd^{3+} والتي تتميز بأن الإلكترونات الفعالة ضوئياً هي الإلكترونات

تحت السطحية (4f) وبالتالي تكون محمية من تأثير الحقل البلوري، مما يعطي عرض خط إصدار ضيق نسبياً، وبالتالي عتبة إصدار منخفضة نسبياً وريح عالي. يعتبر ليزر النيوديميوم ياغ ليزر ذي أربعة مستويات طاقة وهي [1]:

- المستوى الليزري الأعلى (Upper Laser Level): ${}^4F_{3/2}$ ،
- المستوى الليزري الأدنى (Lower Laser Level): ${}^4I_{11/2}$ ،
- المستوى الأساسي أو الأرضي (Ground State) : ${}^4I_{9/2}$ ،
- مستوى (حزمة) الضخ (Pumping Bands): $[{}^4S_{3/2}, {}^4F_{7/2}]$ و $[{}^4F_{5/2}, {}^4H_{9/2}]$.

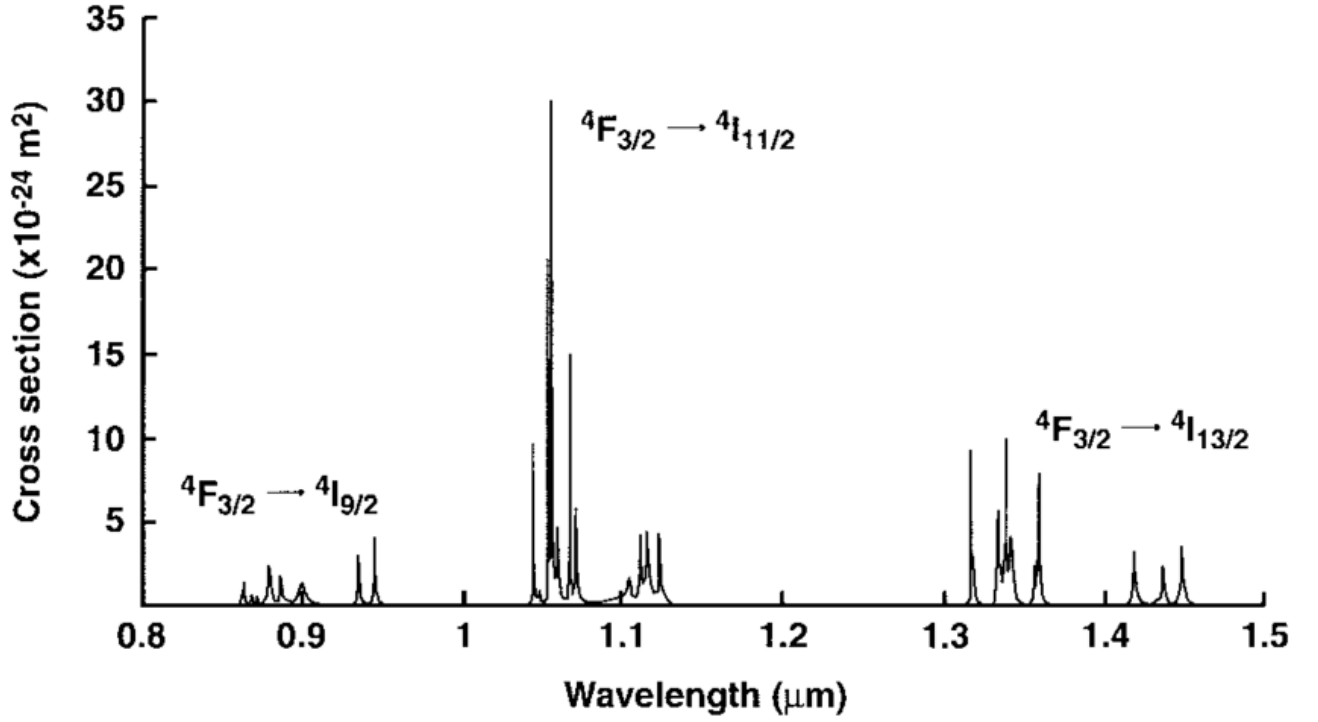
يظهر الشكل ٣ البنية التفصيلية للمستويات الطاقة حيث يتفرع المستوى الليزري الأعلى إلى مستويين R_1 و R_2 ، ويتميز بعمر حياة (230 μs) طويل جداً مقارنةً مع زمن الاسترخاء غير المشع non-radiative relaxation. كذلك فإن المستوى الليزري الأدنى يتفرع إلى ستة مستويات $Y_1 \dots Y_6$ والمستوى الأرضي يتفرع إلى خمسة مستويات $Z_1 \dots Z_5$ وكلاهما في حالة توازن حراري بناءً على توزيع بولتزمان، بالإضافة إلى أن زمن الاسترخاء غير المشع بين المستويين سريع جداً من مرتبة عدة مئات من البيكو ثانية وبناءً عليه يمكن اعتبار المستوى الليزري الأدنى فارغ دائماً وبالتالي شرط عكس الأهلية متحقق بشكل دائم وفعال. بناءً على ما سبق، فإن الانتقالات الطاقة المسؤولة عن الإصدار الليزري هي أربعة كما هو مبين في الجدول ٤ لكن الانتقال الأقوى، كما هو مبين على الشكل ٤، هو الانتقال الطاقوي الأول ($\lambda = 1.0641 \mu m$) لذلك فإن ليزرات النيوديميوم ياغ تعرف بطول موجة إصدارها المذكور. الخط الطيفي متجانس التعريض homogeneously broadened وعرضه في درجة حرارة الغرفة يساوي $\Delta\nu = 120 \text{ GHz (0.45 nm)}$.



الشكل ٣: مخطط تفصيلي للمستويات الطاقية في ليزر Nd:YAG [2].

جدول ٤: الأطوال الموجية لإصدار ليزر النيوديميوم ياغ

σ_e (10^{-20} cm^2)	λ (μm)	الانتقال الطاقى
28	1.0642	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$
15	1.3381	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$
15	1.3184	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$
8	0.946	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$



الشكل ٤ : مقطع الإصدار المحثوث لكافة الانتقالات الطاقية في ليزر Nd:YAG [2].

٢-٣- طرق الضخ الضوئي:

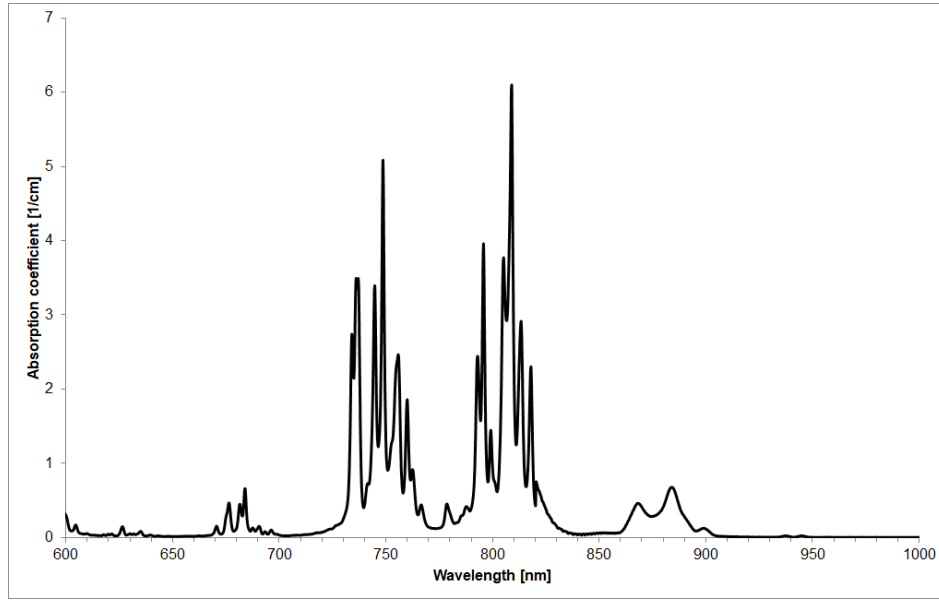
إن اختيار مصدر الضخ يؤثر بشكل كبير على الكفاءة الكلية للنظام بدءاً من طاقة الإدخال الكهربائية إلى طاقة الخرج الضوئية ونوعية الحزمة علاوة على ذلك فإنه يؤثر على مرونة تصميم الليزر وتحديد بيئة التشغيل الكلي. يتم ضخ ليزر النيوديميوم ياغ، كأى ليزر حالة صلبة، ضوئياً (optical pumping) وذلك باستخدام طريقتين أساسيتين:

الأولى: الطريقة التقليدية باستخدام منابع ضوئية غير مترابطة (incoherent optical sources).

الثانية: الطريقة الحديثة باستخدام منابع ضوئية مترابطة (coherent optical sources).

مازالت الطريقة الثانية موضوع الكثير من الأبحاث وموضوع الأطروحة يندرج تحتها لذلك سنستعرضها لاحقاً من خلال نتائج الأطروحة بينما سنستعرض في هذه الفقرة الطريقة الأولى كونها التقليدية ونتائجها وصلت إلى حدودها

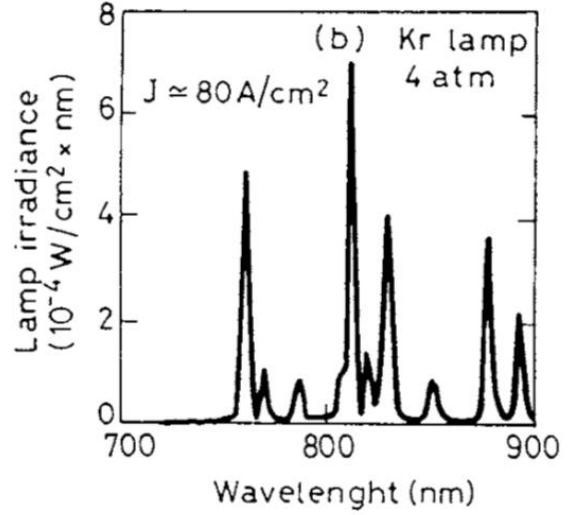
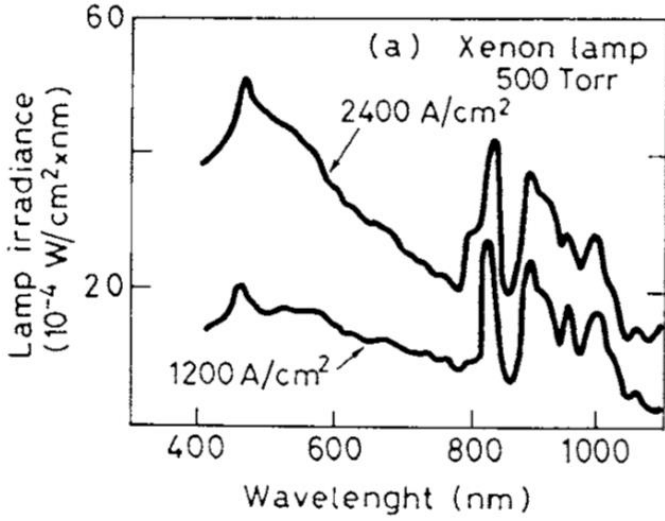
القصوى في كل الأحوال تعتمد كل من الطريقتين على أن بلورة النيوديميوم ياغ لها منحنى امتصاص مميز، حيث يتبين من الشكل ٥ أن حزمة الامتصاص الرئيسية تتركز حول طولي الموجة ($\lambda = 0.73 \mu\text{m}$) و ($\lambda = 0.8 \mu\text{m}$)، بالتالي فأى منبع ضوئي للضخ سواءً كان مترابطاً أو غير مترابط يجب أن يكون طيف إصداره متوافقاً مع هاتين الحزمتين.



الشكل ٥: منحنى الامتصاص المميز لليزر Nd-YAG

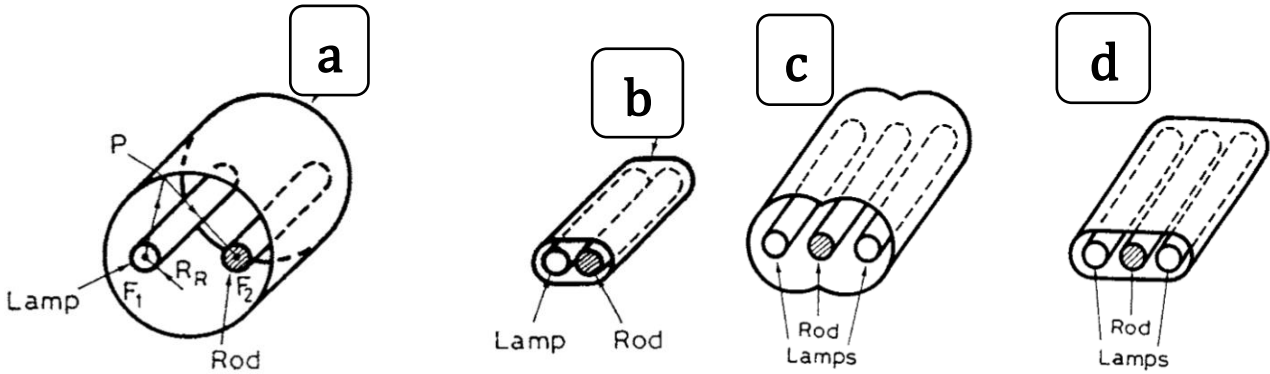
٢-٣-١ - الطريقة التقليدية في الضخ الضوئي:

يتم في هذه الطريقة استخدام لمبات فلاش Flash Lamp أو لمبات انفراغ قوسي Arc Lamp. في حالة الليزر المستمرة تستخدم لمبات قوسية ذات انفراغ مستمر ضمن غاز الكريبتون Kr ذي الضغط 1-8 atm، بينما من أجل الليزر النبضية تستخدم لمبات فلاش ذات انفراغ نبضي ضمن غاز الكزينون Xe أو الكريبتون ذي ضغط منخفض ومتوسط 500 – 1500 mmHg. يبين الشكل ٦-أ طيف إصدار لمبة فلاش كزينون ذي الضغط 500 mmHg ومن أجل قيمتين لكثافة التيار 1200 A/cm^2 و 2400 A/cm^2 . بينما يبين الشكل ٦-ب طيف إصدار لمبة كريبتون قوسية ذات ضغط 4 atm من أجل كثافة التيار 80 A/cm^2 يظهر على الشكل توافق طيف إصدار اللمبة القوسية المذكورة مع حزمة الامتصاص المتمركزة حوالي $0.8 \mu\text{m}$.



الشكل ٦: طيف إصدار لمبة فلاش كزنيون (a)، لمبة كريبتون قوسية (b) [5].

في كل الأحوال ومن أجل أمثلة معاملات الضخ باستخدام الطريقة التقليدية، يتم إجراء نمذجة للمبات الضخ المختلفة بأسطوانة لها توضع نسبي مقارنة مع الأسطوانة الأخرى (القضيب الليزري) اللتين توضعان ضمن عاكس ذي تصميم خاص بحيث يعمل على إسقاط كافة الاستطاعة الضوئية الصادرة عن اللمبة على القضيب الليزري بشكل متجانس. يبين الشكل ٨ عدة نماذج من أجل زيادة فعالية الضخ وتحسين التجانس إلا أن التجانس يبقى سيئاً في كل الأحوال وخاصةً عندما تزداد طاقة الضخ في ليزرات الاستطاعة (الشكل ٧-c و الشكل ٧-d).



الشكل ٧: الطرق المعتمدة لضخ قضيب لييزري Nd:YAG بواسطة لمبة فلاش (أشكال العواكس) [5]:

(a) لمبة وعاكس قطع ناقص، (b) لمبة واقتران قريب، (c) لمبتين وعاكس قطع ناقص، (d) لمبتين واقتران قريب.

يمكننا القول أن الضخ بالطرق التقليدية يتمتع بميزتين أساسيتين الأولى هي أنها رخيصة الثمن نسبياً والثانية هي مردودها الكهروضوئي العالي، حيث يصل بالنسبة للمبات الكريبتون إلى 70%، أما السليبات فعديدة وأهمها:

- فعالية الضخ قليلة جداً لا تتجاوز 3% وذلك بسبب طيف إصدار لمبات الضخ الواسع الطيف والذي يمتص منه فقط جزء صغير (وهو الطيف الواقع ضمن حزمة امتصاص الوسط الفعال لليزر).
- الجزء الكبير من طيف إصدار لمبات الضخ غير الممتص يتحول إلى طاقة حرارية في الوسط الليزري الفعال ويعيق بالمحصلة إمكانية توليد حزم ليزرية ذات نوعية جيدة.
- يتطلب تشغيل لمبات الضخ استخدام دارات ضخ كهربائية ذات جهد عالي مما يجعل التعامل معها غير آمن ومعقد نسبياً.
- عمرها محدود، بالتالي تصبح الليزرات بسببها بحاجة إلى إجراءات صيانة متكررة.

٢-٣-٢ - الطريقة الحديثة في الضخ الضوئي:

عندما نقول "بأن طريقة الضخ بالديودات الليزرية هي طريقة حديثة وقيد البحث" نأخذ بعين الاعتبار حقيقة أن طريقة ضخ ليزر باستخدام ليزر آخر هي طريقة معروفة ومعتمدة منذ زمن بعيد، حيث كان يضح الليزر الصبغى بليزر الآزوت مثلاً، أو ضخ ليزر التيتانيوم سفير (الشهير جداً والمستخدم حالياً في مجال الفموتو ثانية) باستخدام التوافقية الثانية من ليزر النيوديميوم ياغ. لكن الحداثة والقفرة النوعية هي باستخدام ليزرات نصف ناقلة (متطورة ومازالت قيد التطوير) ذات مواصفات خاصة جداً من حيث الاستطاعة وطيف الإصدار وغيرها من المواصفات التي سنستعرضها لاحقاً.

على الرغم من أن الديودات الليزرية ذاتها كانت معروفة مبكراً بأنها الطريقة الأكثر فعالية لضخ الليزرات الصلبة إلا أن هناك عدة معوقات منعت استخدامها أو إجراء أبحاث عليها آنذاك وحتى منتصف التسعينات. أهم هذه المعوقات: عدم توفر ديودات ليزرية ذات استطاعة عالية وذات نوعية حزمة جيدة، وبأطوال موجية مناسبة وأخيراً الكلفة العالية. مع التطور الهائل في تكنولوجيا أنصاف النواقل والأبحاث التي أفضت إلى تغييرات نوعية في بنية الديودات وآليات تشكيل الحزم الليزرية أصبح هذا المجال (ضخ الليزرات الصلبة بالديودات الليزرية) ذي آفاق مفتوحة.

تتكون الديودات الليزرية بشكل أساسي من وصلة ($p - n$) عند تطبيق انحياز أمامي على الوصلة (أي وصل نصف الناقل n بجهد سالب ووصل نصف الناقل p بجهد موجب) تنتقل الإلكترونات والثقوب إلى منطقة الوصلة حيث يحدث إعادة اتحاد بين الإلكترونات والثقوب ينتج عن ذلك إصدار طاقة على شكل فوتونات بطول موجة يتعلق بالفجوة الطاقية بين عصابتي التكافؤ والناقلية.

$$\lambda = \frac{h.c}{E_g} \quad (2)$$

h : ثابت بلانك، c : سرعة الضوء في الخلاء، E_g : الفجوة الطاقية بين عصابتي التكافؤ والناقلية

بتغيير المواد النصف الناقلية المشكلة للوصلة ($p - n$) وبالتالي تغيير قيمة الفجوة الطاقية نستطيع الحصول على أطوال موجية مختلفة، وبشكل عام المواد الأكثر فائدة التي تم استخدامها $GaAs - InP$ والتي تنتج أطوال موجية:

$$GaAs (980 - 680)nm ; InP (1100 - 1650)nm$$

الآن وبعد سنوات من الأبحاث والتطورات الهائلة التي حدثت في بنية الديودات الليزرية أصبح بإمكان المستثمر انتقاء الديودات المناسبة لتطبيقاته وفقاً لمتطلبات الاستطاعة التي يحتاجها التطبيق [2].

يبين الشكل ٨ الأشكال المتوفرة للديودات الليزرية والتي تبدأ من مرسل وحيد (single emitter) (a) يتكون من منطقة فعالة واحدة بأبعاد $(1 \times 200 \mu m)$ وينتج استطاعة تصل حتى $(2W)$ لزيادة الاستطاعة يتم تجميع عدة مرسلات مع بعضها عادة لتشكيل صف من المرسلات أو ما يدعى (Bar) (b) وينتج استطاعة مستمرة

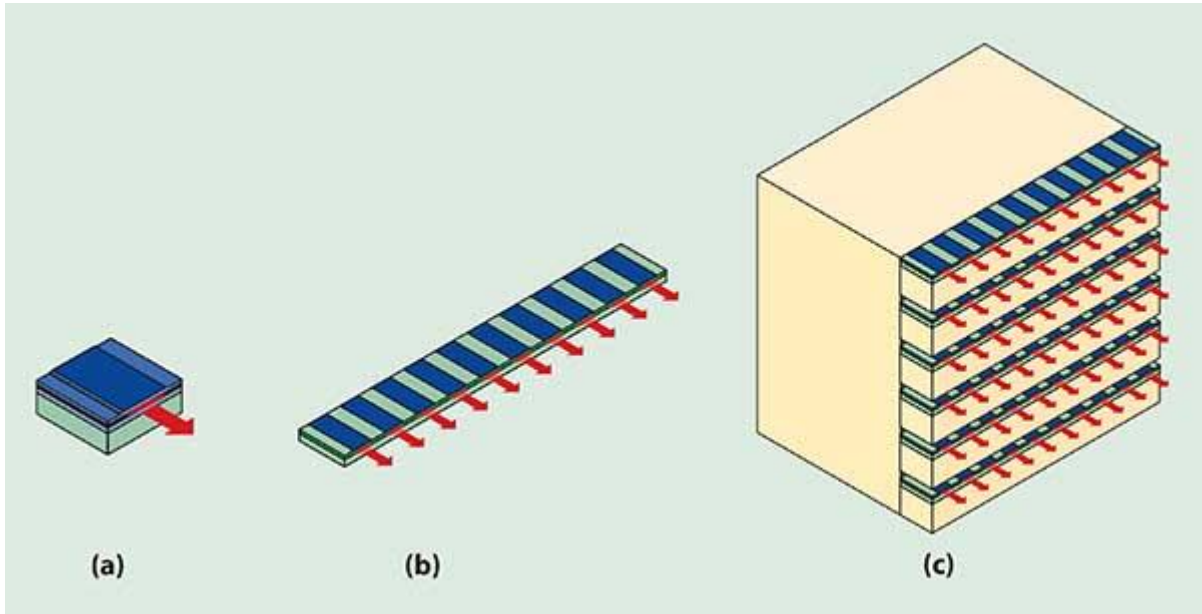
$(10 - 50W)$ من منطقة أبعادها $(1cm \times 1\mu m)$ ، يتم الحصول على المستوى الأعلى من الاستطاعة من خلال تجميع عدة صفوف من المرسلات مع بعضها لتشكيل مصفوفة من المرسلات أو ما يدعى (Stack) (c) تختلف الاستطاعة الناتجة باختلاف عدد صفوف المرسلات المستخدمة.

إن استخدام الديودات الليزرية في الضخ يتم باستخدام أسلوبيين رئيسيين:

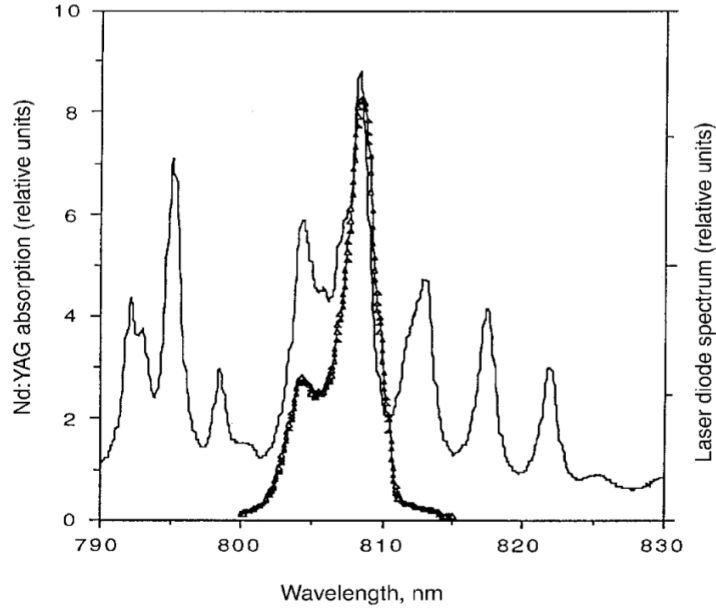
- الأول: بشكل طولاني (محوري أو خلفي) أو ما يسمى بالأدبيات Longitudinal (Axial, End) Pump؛
- الثاني: بشكل عرضاني (جانبي) أو ما يسمى بالأدبيات Transverse (Side) Pump.

المقصود هنا بأسلوب الضخ أو ما يسمى هندسة الضخ (pumping geometry)، سواءً طولاني أم عرضاني، هو اتجاه محور حزمة الضخ (الديود الليزري) مقارنةً مع اتجاه المحور البصري للمجاوب الليزري (محور القضيب الليزري).

أيًا كانت طريقة الضخ الليزرية (طولانية أم عرضانية) فإن الشرط الأساسي هو تأمين ديود ليزري يتمتع بالمواصفات 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. يبين الشكل ٩ 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 $2 nm$. بالتالي فالديود الليزري المثالي لضخ ليزر النيوديميوم ياغ هو $Ga_{0.91}Al_{0.09}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ طول موجة إصداره المركزية $\lambda = 808nm$ وعرض خط الإصدار يتراوح في المجال $\Delta\lambda = 1-2nm$.



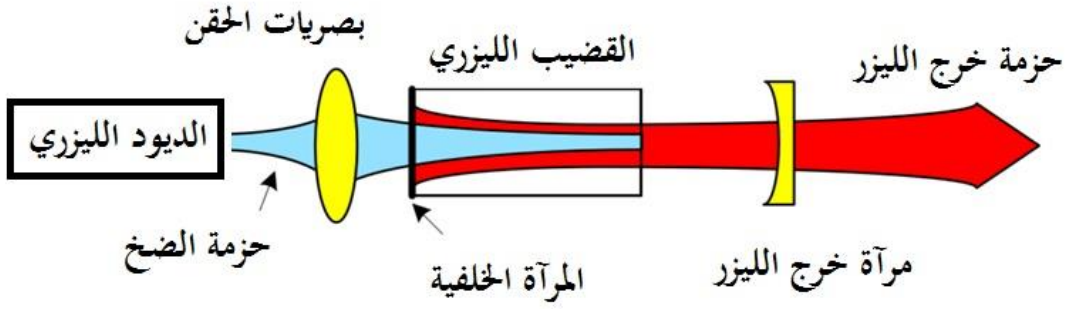
الشكل ٨: أشكال الديودات الليزرية (single emitter) (a); (Bar) (b); (Stack) (c)



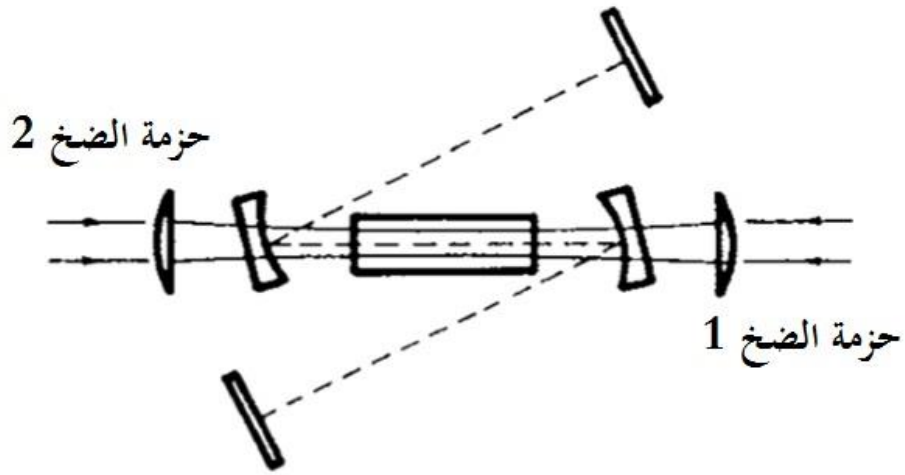
الشكل ٩: البنية التفصيلية لطيف امتصاص بلورة Nd:YAG وتوافقه مع طيف إصدار ليزر GaAlAs [5].

يبين الشكل ١٠ الطرق المختلفة للضخ الليزري الطولانية، حيث تكون حزمة الضخ متمحورة مع حزمة الإصدار الليزري. غالباً ما 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 أصغر من نظام بصري للمحرقة أو عن طريق ألياف بصرية: بحيث يكون عنق الحزمة المتمحورة في الوسط الفعال أصغر من قطره، بالإضافة إلى تأمين شكل دائري. على الرغم من فعالية هذه الطريقة ونوعية الحزمة الليزرية إلا أنها تعاني من الكثير من المشاكل الحرجة وأهمها: محدودية استطاعة الخرج بسبب محدودية حجم منطقة الضخ وكذلك الأفعال الحرارية. فالتوزيع الحراري ضمن الوسط الفعال غير متجانس: ففي بداية القضيب الليزري تكون الحرارة أكبر من نهايته. تم باستخدام هذه الطريقة الحصول على حزمة غوصية TEM₀₀ ذات استطاعة لا تزيد عن 15W [8]، حيث كانت فعالية التحويل الضوئي-الضوئي 50% وفعالية تحويل حزمة الضخ إلى الوسط الفعال 85%. بينما وصلت الاستطاعة الأعظمية في نمط الإصدار المتعدد إلى 407 W [9] حيث كانت الفعالية الضوئية-الضوئية 54%.

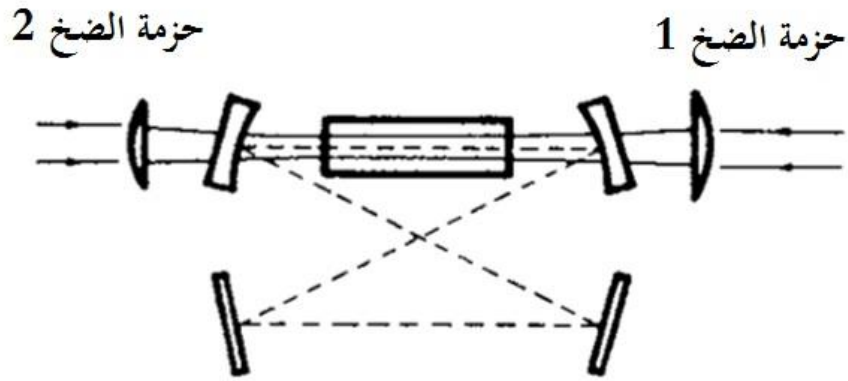
a



b



c



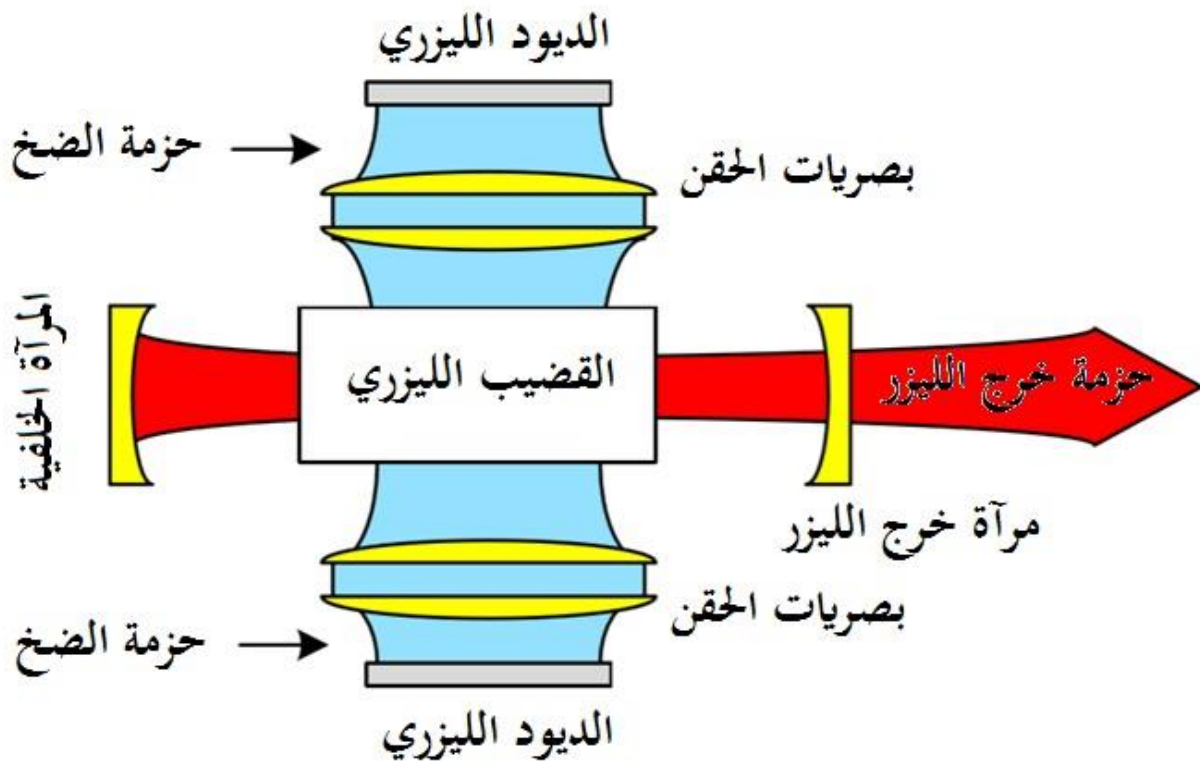
الشكل ١٠: مخطط توضيحي لطرق الضخ الليزرية الطولانية: (a) ضخ وحيد في مجاوب خطي بسيط، (b) ضخ ثنائي في مجاوب على شكل Z، (c) ضخ ثنائي في مجاوب حلقي.

على عكس الضخ الطولاني فإن الاستطاعة في الضخ الجانبي وصلت إلى حدود غير مسبوقه (من مرتبة عدة كيلوواطات) وبعضها مسوق تجارياً كليزر باستطاعة $16kW$ من انتاج شركة Trumpf الألمانية [10]. بالإضافة إلى أن الضخ الجانبي مناسب ليس فقط للقضبان الليزرية، بل للأقراص Disks والشرائح Slabs ولكن السلبية الرئيسية لهذه الطريقة هو نوعية حزمة. يبين الشكل ١١ مخطط توضيحي لضخ القضيب الليزري جانبياً من طرفين، علماً أن السيناريوهات المنفذة متعددة: ضخ من عدة جوانب، باستخدام محرقة أو بدونها، باستخدام عواكس أم بدونها، باستخدام ألياف أم بدونها، تم باستخدام هذه الطريقة الحصول على حزمة غوصية TEM_{00} ذات استطاعة تصل حتى $208W$ ، حيث كانت فعالية الكلية $7.6\% \sim [8]$ يبين الجدول ٥ دراسة مقارنة بين الطريقة التقليدية وطريقة الضخ الحديثة.

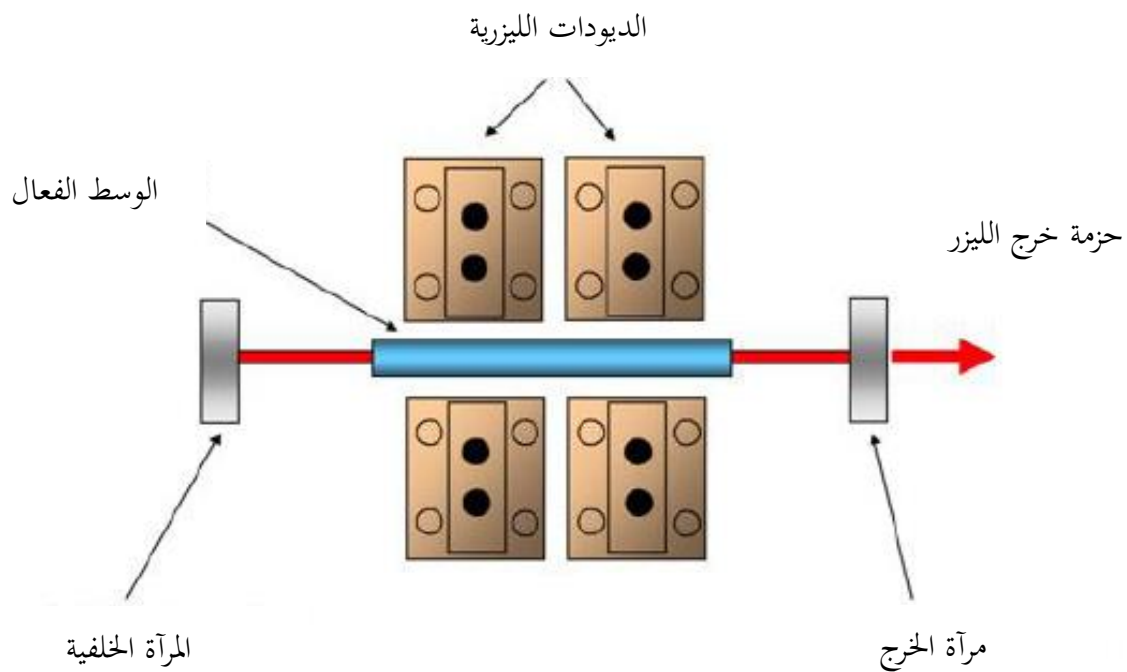
الجدول ٥: مقارنة بين الطريقة التقليدية والطريقة الحديثة للضخ [5]

	المصابيح النبضية	الديودات الليزرية
عمر التشغيل	500 – 1000h	10000 – 50000h
الجهد اللازم للعمل	2 – 5 KV	2 – 4 V
الإصدار الطيفي	عريض	ضيق ($\sim 3nm$)
الفعالية الكهروضوئية	60 – 70%	30 – 50%
فعالية الانتقال	4 – 8%	$\sim 100\%$
الفعالية الكلية للضخ	$\sim 3\%$	~ 30

a



b



الشكل ١١: مخطط توضيحي لطريقة الضخ الليزرية العرضانية: (a) ضخ من طرفين باستخدام نظام محرقة

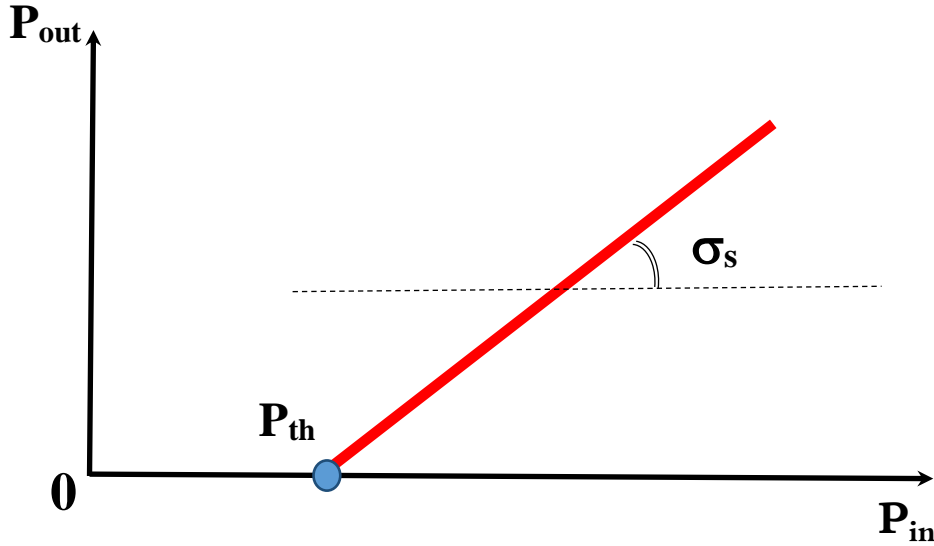
(b). ضخ من طرفين بدون نظام محرقة.

تجدر الإشارة أنه يتم توصيف حزمة الليزر عادة بطرق مختلفة وذلك وفقاً لأهداف البحث أو التطبيق المنشود. لكن يعتبر المنحني المميز لليزر (الشكل ١٢) الذي يمثل تغيرات استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل الكهربائية أول وأهم هذه الطرق والذي يعطى بالعلاقة [5]:

$$P_{out} = \sigma_s (P_{in} - P_{th}) \quad (1)$$

حيث أن:

σ_s : فعالية الليزر الكلية (slope efficiency)، P_{out} : استطاعة خرج الليزر (W)، P_{in} : استطاعة الدخل (W)، P_{th} : استطاعة عتبة الإصدار الليزري (W).



الشكل ١٢: المنحني المميز لليزر Nd:YAG [2].

تساوي القيمة النظرية (العظمى) لمعامل الفعالية الكلي σ_s بالنسبة لليزر النيوديميوم ياغ ($\lambda_{Laser} = 1.064 \mu m$) ذو الضخ بليزر ديود ($\lambda_{Pump} = 0.808 \mu m$) $\sim 76\%$ بينما لا تتجاوز هذه القيمة عملياً $\sim 30\%$ وفي حال كان ضخ الليزر بطرق تقليدية (لمبات فلاش وسواها من المصادر الضوئية غير المترابطة) فإن هذه القيمة لا تتجاوز 3% [5].

٣- معامل فعالية التغطية بين الضخ والنمط الليزري:

يعبر معامل فعالية التغطية (Overlapping Efficiency) عن مقدار التقاطع المكاني بين الضخ (الريح) والنمط الليزري المتولد، ويعتبر من أهم العوامل التي تحدد فعالية الليزر ونوعية حزمة الخرج وخاصةً في حالة الضخ الجانبي. فمن أجل الحصول على نمط غوصي يجب أن يتم الضخ في منطقة النمط الغوصي حيث أن كل طاقة الضخ التي تقع خارج منطقة النمط ستتحوّل إلى حرارة تشوه شكل الحزمة الليزرية.

في حالة الضخ الخلفي تكون قيمة هذا المعامل تكون عالية جداً (تقريباً 95%) وذلك لإمكانية التحكم في حقن الضخ ضمن منطقة النمط الغوصي تماماً.

بينما يترافق توليد حزمة بنوعية جيدة في الضخ الجانبي بمرود منخفض مقارنة بالضخ الخلفي والسبب الأساسي في ذلك هو التناقص الأساسي لطاقة الضخ من محيط الوسط الفعال إلى مركزه مما يجعل قيمة معامل فعالية التغطية بين الضخ والنمط الغوصي منخفضة وبالتالي مردود منخفض.

يعطى معامل فعالية التغطية بالعلاقة [5]:

$$\eta_B = \frac{\int gain(r).I(r).2\pi r dr}{\int gain^2(r).2\pi r dr} \quad (3)$$

حيث:

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

$I(r)$: تابع توزيع الشدة الضوئية للنمط الليزري ضمن الوسط الفعال.

تمت دراسة تأثير مدى الانطباق بين الضخ والنمط الليزري على المردود الكلي لعملية الضخ وعلى عتبة التشغيل في العديد من الدراسات [11,12,13,14,15] لكن هذه الدراسات كانت تعاني من عدة مشكلات، حيث يعتبر بعضها حجم النمط الليزري متغير على طول الوسط الفعال [11] بينما يعتبر حجم الضخ نفسه على طول الوسط الفعال، وبعضها الآخر يأخذ حالتين الأولى يعتبر حجم النمط ثابت [12] على طول الوسط الفعال بينما الضخ متغير ثم يعالج حالة حجم النمط المتغير على طول الوسط الفعال والضخ ثابت، وأغلب الدراسات التي تأخذ تغير حجم الضخ بالاعتبار كانت تعالج مسألة الضخ الخلفي وهي الحالة الأبسط [13,14,15].

في هذا العمل سنقترح طريقة تجريبية دقيقة لقياس معامل فعالية التغطية في حالة الضخ الجانبي تأخذ هذه الطريقة تغير كل من حجم النمط الليزري وحجم الضخ على طول الوسط الفعال بعين الاعتبار.

٣-١- المجاوب الليزري ونوعية الحزمة الليزرية [4]:

يتم تحديد نوعية الحزمة الليزرية Beam Quality بعدة مقادير مرتبطة بالمحصلة بعضها ببعض، لكن أكثرها شهرةً وانتشاراً وأهميةً هو معامل نوعية الحزمة M^2 (Beam quality factor) والذي يعرف بأنه النسبة بين زاوية تباعد الحزمة الحقيقية مضروباً بقطرها إلى زاوية تباعد الحزمة المحدودة بالانعراج مضروباً بقطرها Diffraction-limited beam ويعطى بالعلاقة التالية:

$$M^2 = \frac{\theta \omega}{\theta_0 \omega_0} \quad (4)$$

حيث: θ_0 : تباعد الحزمة الليزرية الغوصية، θ : تباعد الحزمة الليزرية الحقيقية، ω : نصف قطر الحزمة الحقيقية، ω_0 : نصف قطر الحزمة الغوصية.

بناءً على ما سبق فإن قيمة M^2 دائماً أكبر أو تساوي 1 (تساوي 1 فقط من أجل الحزمة الغوصية). من أجل قياس معامل نوعية الحزمة M^2 نقوم بمحرق الحزمة الليزرية باستخدام عدسة ذات بعد محرقى محدد f وخالية من العيوب البصرية (الزيوغ، ..) وبعد قياس قطر البقعة الأصغري للحزمة في المحرق، نحسب M^2 من العلاقة [5]:

$$M^2 = \frac{\pi d_0 d_1}{4 f \lambda} \quad (5)$$

حيث: d_0 : قطر الحزمة الليزرية في محرق العدسة f : البعد المحرقى للعدسة، d_1 : قطر البقعة الليزرية على سطح العدسة.

يتعلق معامل نوعية الحزمة الليزرية بشكل رئيسي بالوسط الفعال ومعاملات المجاوب الليزري. فللحصول على حزمة غوصية $M^2 = 1$ وبفعالية عالية، يجب تحقيق عدة شروط (مرتبطة بالعاملين الرئيسيين المذكورين أعلاه) وأهمها:

- تجانس في توزيع الضخ على طول الوسط الفعال.

- تطابق حجم النمط الغوصي مع حجم المنطقة المثارة في الوسط الفعال (تركيز الضخ في منطقة النمط الغوصي)

يبين الشكل ١٣ أحد المجاوبات الذي يسمى المجاوب نصف الكروي Hemispherical، وهو مجاوب مستقر بشرط تحقيق العلاقة:

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (6)$$

$$g_i = 1 - \frac{L_e}{R_i} \quad (7)$$

حيث: R_i : نصف قطر تقعر المرآة i ، L_e : الطول الفعال للمجاوب الليزري.

كما يظهر على الشكل نفسه المعاملات الأساسية للمجاوب الليزري والتي يجب أمثلتها للحصول على مواصفات الحزمة المطلوبة. يعطى الطول الفعال للمجاوب الليزري L_e بالعلاقة التالية:

$$L_e = L_1 + \frac{l}{n} + L_2 \quad (8)$$

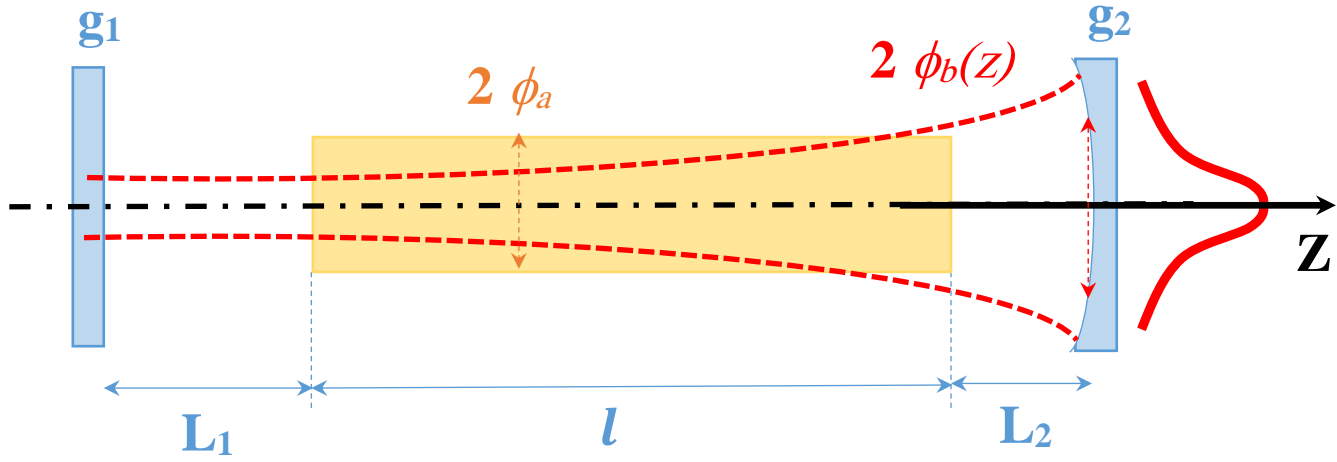
حيث: n : قرينة انكسار الوسط الفعال، l : طول الوسط الفعال

L_1 : بعد بداية القضيب الليزري عن المرآة الخلفية. L_2 : بعد نهاية القضيب الليزري عن مرآة الخرج.

يعطى نصف قطر البقعة الليزرية الغوصية TEM₀₀ على مرايا المجاوب بالعلاقة التالية [4]:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{\lambda L_e}{\pi} \sqrt{\frac{g_j}{g_i(1-g_1g_2)}}} \quad (9)$$

حيث: $i, j = 1, 2$ و $i \neq j$.



الشكل ١٣: مخطط توضيحي لمعاملات المجاوب الليزري

$2\phi_a$: قطر الوسط الفعال، $2\phi_b$: قطر البقعة الليزرية ضمن المجاوب.

من أجل توصيف متكامل للحزمة الغوسية يجب تحديد معامل هام ألا وهو طول رايبليه الذي يعطى بالعلاقة التالية:

$$Z_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (10)$$

بالتالي فتغير قطر البقعة الليزرية الغوسية بدلالة Z يعطى بالعلاقة التالية:

$$\omega(Z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{Z_R}\right)^2} \quad (11)$$

٤- آلية إصدار النبضات القصيرة (مفتاح الجودة Q-switch):

أصبحت عملية توليد نبضات ليزرية قصيرة بطريقة تحويل معامل الجودة (Q-switching) مجالاً بحثياً مهماً في السنوات الأخيرة فالنبضات العملاقة المتولدة من الليزر الصلبة تستخدم في الكثير من التطبيقات التقنية والعلمية والصناعية والعسكرية كاستخدامه في قوائم المسافة الليزرية (Laser Rangefinders) ومحددات الأهداف (Designators) حيث تحتاج هذه التطبيقات إلى نبضات قصيرة من مرتبة 5 - 20 ns وطاقة نبضة لا تتجاوز

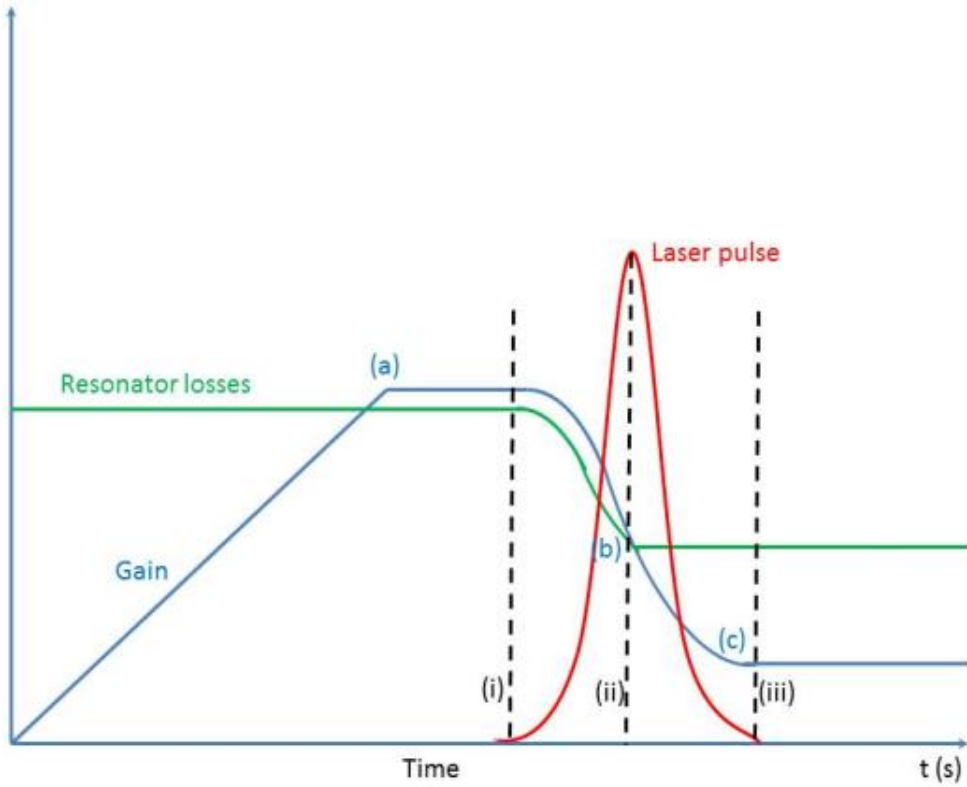
[100m] وتردد يصل حتى 20Hz [3]، أما في التطبيقات العلمية الخاصة والمتنوعة فيستخدم بكثرة ليزرات مفتاح الجودة سواء في التوافقية الأولى ($\lambda = 1.064 \mu m$) أو الثانية ($\lambda = 0.532 \mu m$) أو الثالثة ($\lambda = 0.355 \mu m$) أو الرابعة ($\lambda = 0.266 \mu m$).

يعرف معامل الجودة لمجاوب ما بأنه نسبة الطاقة المخزنة في الوسط الفعال (E_{st}) إلى الطاقة المفقودة في كل دورة للشعاع الليزري ضمن المجاوب (E_r)، ويعطى بالعلاقة [5]:

$$Q = 2 \pi \frac{E_{st}}{E_r} \quad (12)$$

والمقصود بتعديل معامل الجودة تغيير قيمته بين قيمتين على الأقل (بطرق سنذكرها لاحقاً) قيمة صغيرة تكون عندها الضياعات في المجاوب كبيرة وبالتالي يتم تأخير تحقيق شرط العتبة لتوليد الليزر مما يؤدي إلى تخزين طاقة كبيرة ضمن الوسط الفعال عند وصول الربح في المجاوب إلى قيمة تتجاوز الضياعات في كل دورة يتم تغيير قيمة هذا المعامل إلى قيمة مرتفعة (ضياعات منخفضة) يتم عندها إطلاق الطاقة المخزنة في الوسط الفعال على شكل نبضة ليزرية قصيرة زمنياً ذات استطاعة عالية.

الشكل ١٤ يوضح تسلسل نموذجي لتوليد النبضة الليزرية العملاقة بداية تكون الضياعات ضمن المجاوب عظمى والربح يزداد بشكل خطي أثناء الضخ حتى يتم الوصول إلى العتبة (النقطة a) بعد تأخير زمني قصير تخرج النبضة الليزرية وتعود البلورة إلى حالتها البدائية وتزداد بذلك الضياعات وتبدأ المرحلة من جديد.



الشكل ١٤ : تغير الربح والضياعات والنبضة الليزرية مع الزمن

تستخدم عملياً العديد من الطرق للتأثير على قيمة معامل الجودة للمجاوب الليزري وتصنف إلى نوعين:

- التعديل الإيجابي لمعامل الجودة (Active Q-switch) يتم من خلال استخدام التقنيات الكهروضوئية، الصوتية-الضوئية، والميكانيكية حيث تعتمد هذه الطرق استخدام تحكم خارجي لإحداث التحويل في معامل الجودة.
- التعديل السلبي لمعامل الجودة (Passive Q-switch) يتم من خلال استخدام مادة ماصة قابلة للإشباع صبغية أو بلورية وهنا يتم إحداث التغيير في معامل الجودة من داخل الحجرة الليزرية سيتم الحديث عن هذه الطريقة بالتفصيل لاحقاً كونها الطريقة المستخدمة في هذا العمل.

٤-١- التعديل الإيجابي لمعامل الجودة (*Active Q-switch*):

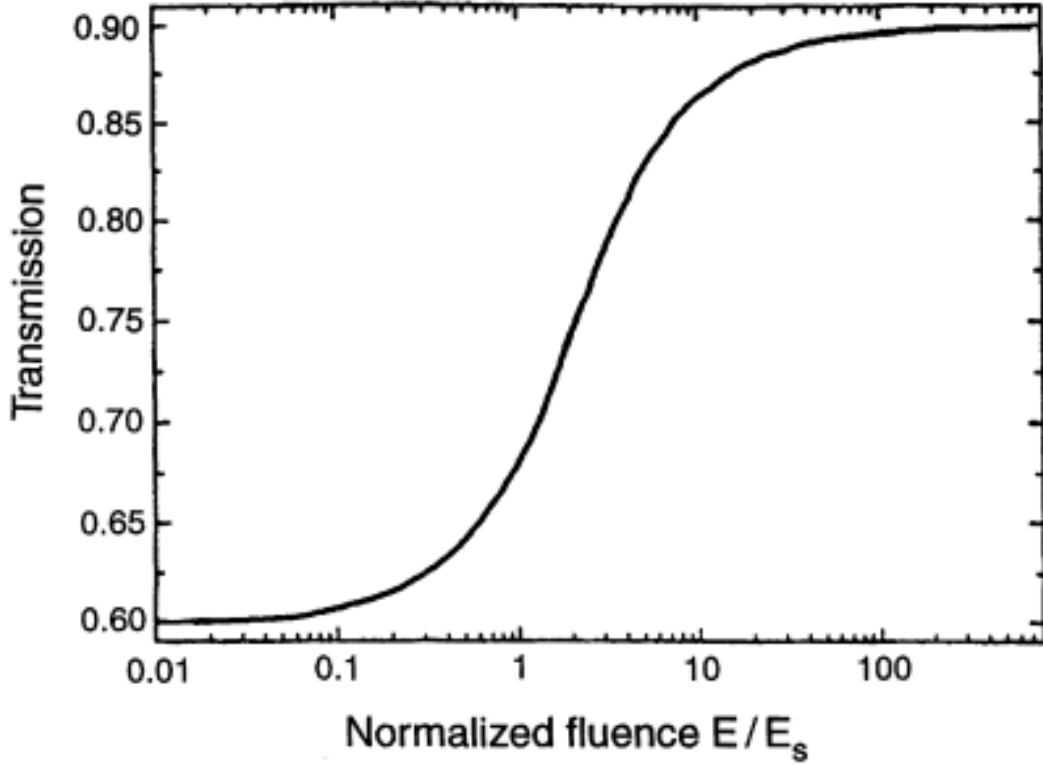
تأتي مفاتيح الجودة الميكانيكية في مقدمة هذه التقنيات وذلك لبرساطتها معظم هذه الأجهزة اعتمدت على منع حدوث الفعل الليزري باستخدام مرايا أو مواشير دوارة موجودة داخل الهزاز الليزري تؤمن هذه الطريقة تحويلاً فعالاً جداً لمعامل الجودة لأنها تفرض حدوث ضياعات عظيمة من أجل قيمة متدنية لمعامل الجودة وتعطي تمريراً كاملاً من أجل القيمة العظيمة لمعامل الجودة، ومع ذلك تعاني هذه التقنيات من بطء في عملية التحويل نسبياً ولذلك استبدلت بالأجهزة الكهروبرصرية والصوتية-البصرية.

تقوم فكرة استخدام الفعل الكهروبرصري في عملية التحويل على استخدام بعض المواد التي تصبح ذات انكسار مضاعف تحت تأثير حقل كهربائي خارجي على الرغم من التكلفة العالية والتعقيدات التقنية الإضافية في هذه الأجهزة التي تتطلب الكهرونيات خاصة للقيادة والتحكم بالحقل المطبق فهي تعطي تحويلاً سريعاً لمعامل الجودة محدوداً فقط بزم تطبيق الجهد الكهربائي من أكثر الأمثلة شيوعاً على هذا النوع من الطرق الكهروبرصرية خلايا كير وبوكلز (Pockels and Kerr cells) في حالة مفاتيح الجودة البصرية-الصوتية تعتمد خاصية المرونة الضوئية أو تغير قرينة الانكسار للمادة تحت تأثير إجهاد ميكانيكي دوري على البلورة يؤدي هذا التغير إلى أن تصبح البلورة كشبكة انعراج تحرف بذلك جزء من الحزمة عن المسار النظامي في الهزاز عند إيقاف تطبيق الحقل الصوتي تنتشر الحزمة بشكل طبيعي مؤدية إلى قيمة كبيرة لمعامل الجودة للهزاز إلا أن سرعة تحويل معامل الجودة في هذه الطريقة أقل منها في حالة المفتاح الكهروبرصري كون سرعة التحويل مرتبطة بسرعة انتشار الأمواج الصوتية عبر البلورة ويقطر الحزمة.

٤-٢- التعديل السلبي لمعامل الجودة (*Passive Q-switch*):

يتكون مفتاح الجودة السلبي من عنصر بصري (مثلاً بلورة مشابهة بشوارد فعالة) تزداد نفوذيتها لطول موجة الليزر مع زيادة كثافة الإشعاع الوارد عليها كما يبين الشكل ١٥. عند وضع هذه المادة ذات الامتصاص العالي لطول موجة الليزر داخل المجاوب فإنها ستمنع الاهتزاز ضمن المجاوب، وسيبدأ تخزين الطاقة ضمن الوسط الفعال ونظراً لزيادة الريح أثناء عملية الضخ وتجاوز الضياعات ذهاباً وإياباً تزداد كثافة الإشعاع داخل المجاوب مما يؤدي إلى إشباع الماص

القابل للإشباع ويصبح شفافاً لطول موجة الليزر مما يؤدي إلى تحرير الطاقة المختزنة على شكل نبضة قصيرة زمنياً باستطاعة عالية.



الشكل ١٥: نفوذية الماص القابل للإشباع كتابع لكثافة الطاقة

مميزات معامل الجودة السلبي:

نظراً لأن معامل الجودة السلبي يتم التحكم به بواسطة أشعة الليزر نفسها فإنه لا يحتاج إلى تحكم خارجي كتطبيق جهد ليبدأ عمله وبالتالي يوفر تصميم بسيط مما يؤدي إلى أنظمة صغيرة ومنخفضة التكلفة.

عيوب معامل الجودة السلبي:

تتمثل العيوب الرئيسية لمفتاح الجودة السلبي في عدم القدرة على التحكم بطاقة النبضة عند تثبيت التصميم إضافة إلى عدم التحكم بلحظة خروج النبضة بدقة.

استخدام معامل الجودة السليبي يضيف ضياعات على الوسط نتيجة امتصاصه للإشعاع مما يجعل مردود الليزر في حال استخدام معامل جودة سليبي أقل منه في حالة معامل الجودة الصوتي أو البصري.

٤-٢-١ - الكروم ياغ كماص قابل للإشباع $Cr^{4+}:YAG$:

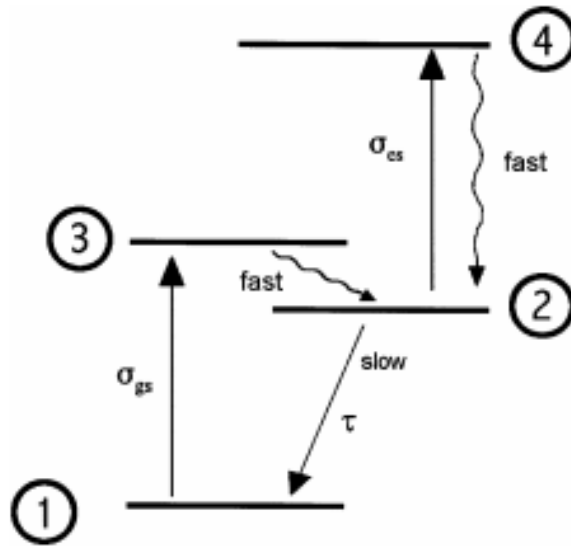
بداية كانت المواد الماصة القابلة للإشباع تعتمد على أصباغ عضوية مختلفة إما مذابة في محلول عضوي أو مشربة ضمن أغشية رقيقة من خلايا السيللوز.

عدم متانة هذه المواد ووثوقيتها وصعوبة التعامل معها قيدت بشدة تطبيقات مفاتيح الجودة السلبية مع ظهور بلورات مشابهة بأيونات تمتص أطوال موجية أدى إلى تحسن كبير في وثوقية ومتانة مفاتيح الجودة السلبية.

المواد الأكثر شيوعاً في الاستخدام كماص قابل للإشباع هي $(Cr^{4+}:YAG)$

البنية الطيفية لشاردة الكروم في الياغ:

تتمتع شوارد الكروم بمقطع امتصاص عالي لطول موجة الليزر ($1064nm$). وتوفر بلورة الياغ الخواص الكيميائية والحرارية والميكانيكية المرغوبة. يبين الشكل ١٦ مخطط سويات الطاقة لشاردة الكروم ضمن بلورة الياغ:



الشكل ١٦ : مخطط سويات الطاقة لشاردة الكروم في الياغ [5]

لكي تكون المادة مناسبة للعمل كمفتاح جودة سلمي يجب أن يكون المقطع العرضي لامتصاص الحالة الأرضية أكبر من مقطع امتصاص الشاردة الفعالة في الوسط الفعال بحيث يكون إشباع الماص أسهل بكثير من إشباع الوسط الفعال وفي الوقت نفسه يجب أن يكون عمر السوية العليا طويلاً بما يكفي لإفراغ السوية الأرضية من ذراتها، وهذه المواصفات تتوفر وبقوة في بلورة $(Cr^{4+}:YAG)$ ، حيث يبين الجدول ٦ المواصفات الفيزيائية للماص القابل للإشباع المصنوع من هذه البلورة.

الجدول ٦: المواصفات الفيزيائية لبلورة $(Cr^{4+}:YAG)$ [5]

(0.5 ns)	زمن حياة السوية ٤
(4.1μs)	زمن حياة السوية ٢
$\sigma_{gs} = 70 * 10^{-19} cm^2$	مقطع الامتصاص
$\sigma_{es} = 20 * 10^{-19} cm^2$	مقطع الامتصاص

٤-٣- معادلات الليزر بوجود الماص القابل للإشباع:

نتيجة إضافة العنصر الماص القابل للإشباع تضاف حدود جديدة ضمن معادلاتي الليزر الأساسيتين اللتين تصفان تغير الإسكان وتغير كثافة الفوتونات في المجاوب وتضاف معادلة جديدة تصف تغير عدد الذرات في الماص القابل للإشباع [17].

قبل البدء بذكر المعادلات سندرج ضمن الجدول ٧ المعنى الفيزيائي للمعاملات المذكورة في هذه المعادلات:

الجدول ٧: المعاملات المستخدمة في معادلات الليزر بوجود الماص القابل للإشباع

الثابت	الدلالة الفيزيائية
ϕ	تدفق الفوتونات ضمن المجاوب
σ	مقطع الإصدار المحثوث للوسط الفعال
σ_{13}	مقطع الامتصاص القابل للإشباع
σ_{24}	مقطع الامتصاص الغير قابل للإشباع
n_{s0}	تركيز شوارد الكروم الكلي ضمن الماص
n_{s1}	تركيز شوارد الكروم اللحظي في السوية (١)
n_{s2}	تركيز شوارد الكروم اللحظي في السوية (٢)
n	إسكان السويتين الليزريتين في الوسط الفعال
l_s	سماعة الماص القابل للإشباع
l	طول الوسط الفعال
L	الضياعات غير المفيدة ضمن المجاوب
γ	معامل يعبر عن النقص الصافي بالإسكان بعد إصدار فوتون

المعادلة الأولى: تصف تغير كثافة الفوتونات ضمن الوسط الفعال

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left[2\sigma n l - 2\sigma_{13} n_{s1} l_s - 2\sigma_{24} (n_{s0} - n_{s1}) l_s - \ln\left(\frac{1}{R}\right) - L \right] \quad (13)$$

الحد الأول يمثل كثافة الفوتونات المتولدة بالإصدار المحثوث

الحد الثاني يمثل كثافة الفوتونات التي تضيع نتيجة الامتصاص القابل للإشباع ضمن الماص القابل للإشباع.

الحد الثالث يمثل كثافة الفوتونات التي تضيع نتيجة الامتصاص الغير قابل للإشباع ضمن الماص القابل للإشباع

الحد الرابع يمثل الضياعات نتيجة مرآة الخرج.

الحد الخامس يمثل الضياعات الكلية غير المفيدة ضمن المجاوب.

المعادلة الثانية: تصف تغير الإسكان ضمن الوسط الفعال:

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma \sigma c \phi n \quad (14)$$

حيث أن γ معامل يعبر عن النقصان الصافي في إسكان السويتين الليزريتين نتيجة إصدار فوتون واحد

في الليزر المستمرة الرباعية المستوى يأخذ القيمة ١ بينما قيمته ٢ بالنسبة لليزر الثلاثية المستوى [5]

المعادلة الثالثة: تصف تغير عدد الذرات في السوية الأساسية في الماص القابل للإشباع

$$\frac{dn_{s1}}{dt} = -\sigma_{13} c \phi n_{s1} \quad (15)$$

يقود حل هذه المعادلات إلى إيجاد ثلاث علاقات للبارامترات الهامة (طاقة النبضة والاستطاعة وعرض النبضة) التي

توصف نبضة الليزر.

تعطى الطاقة النبضية بالعلاقة:

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \quad (16)$$

حيث n_i عدد الذرات البدائية وتعطى بالعلاقة:

$$n_i = \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + 2\sigma_{13}n_{s0}l_s + L}{2\sigma l} = \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \ln\left(\frac{1}{T_0^2}\right) + L}{2\sigma l} \quad (17)$$

n_f عدد الذرات النهائية وترتبط مع n_i بالعلاقة:

$$1 - \frac{n_f}{n_i} + \left(\frac{n_{t0}}{n_i}\right) \ln\left(\frac{n_f}{n_i}\right) - \left(1 - \frac{n_{t0}}{n_i}\right) \frac{1}{\alpha} \left[1 - \left(\frac{n_f}{n_i}\right)^\alpha\right] = 0 \quad (18)$$

n_{t0} تعطى بالعلاقة: $\alpha = \frac{\sigma_{13}}{\gamma\sigma}$

$$n_{t0} = \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \delta \ln\left(\frac{1}{T_0^2}\right) + L}{2\sigma l} \quad (19)$$

δ تعطى الاستطاعة بالعلاقة: $\delta = \frac{\sigma_{24}}{\sigma_{13}}$

$$P = \frac{h\nu A l}{\gamma t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \left[n_i - n_t - n_{t0} \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) - (n_i - n_{t0}) \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{n_t^\alpha}{n_i^\alpha}\right) \right] \quad (20)$$

حيث: $\frac{n_{s1}}{n_{s0}} = \left(\frac{n}{n_i}\right)^\alpha$

من أجل وسط فعال معين هناك قيمة أمثلية لعاكسية مرآة الخرج ونفوذية الماص القابل للإشباع يضمنان استخراج أكبر كمية من الطاقة المختزنة في الوسط الفعال وبالتالي الحصول على أعلى مردود.

أجريت عدة دراسات تهدف إلى أمثلة المعاملات الرئيسية لليزرات النبضية من طاقة واستطاعة خرج وعرض نبضة ومردود [16]. اقترح العالم ديغان Degan طريقة لأمثلية معاملات ليزر نبضي نتيجة هذه الطريقة أن كل المعاملات الأساسية لليزر يمكن التعبير عنها بدلالة مقدار دون واحدة $(z = \frac{\ln(GO^2)}{\delta})$ وقام بتوليد عدة منحنيات لهذه البرامترت كتابع للمتحوّل z [16]. لا تأخذ طريقة Degan بعين الاعتبار الامتصاص في الماص القابل للإشباع لذلك لا تطبق مباشرة على الليزرات التي تستخدم ماص قابل للإشباع. لاحقاً استند العالم زانغ (Zhang) [17] على طريقة Degan وأخذ بعين الاعتبار وجود الماص القابل للإشباع وتوصل إلى منحنيات يتم من خلالها تحديد قيم نفوذية الماص القابل للإشباع وعاكسية مرآة الخرج التي تعطي أفضل طاقة واستطاعة لنبضة الخرج.

الفصل الثاني

القسم العملي

الجزء الأول:

تصميم وتنفيذ مرسل ليزري نبضي وأمثلة معاملات المجاوب (شكل المجاوب، عاكسية مرآة الخرج ونفوذية الماص القابل للإشباع) بهدف الحصول على طاقة نبضية (10 mJ) وبأعلى مردود.

١- ملخص:

يهدف هذا القسم إلى تصميم وتنفيذ مرسل ليزري نبضي بالمردود الأعظم مع طاقة خرج (10 mJ) بتردد 30HZ. في هذا الجزء تم استخدام قضيب ليزري من مادة نيودميوم ياغ نظراً لما تتمتع به هذه البلورة من ميزات تم ذكرها في الفقرة (٢-٢) موضوع ضمن مجاوب (مستوي-مستوي). وتم الضخ باستخدام أربعة ديودات ليزرية من النوع (Stack) لاختيار القيم الأمثلية لعاكسية مرآة الخرج R ونفوذية الماص القابل للإشباع T_0 قمنا بإجراء نمذجة حاسوبية تهدف إلى استنتاج سلوك طاقة الخرج ومردود الاستخراج مع تغير عاكسية ونفوذية الماص القابل للإشباع نتيجة هذه النمذجة تم اختيار $R = 0.48, T_0 = 0.4$ وبالتالي تم الحصول على نبضات ليزرية بطاقة (10.4mJ) وعرض نبضة (29ns) باستطاعة (0.36MW) ومردود استخراج (28.8%). قبل البدء بإجراء التجارب العملية قمنا بقياس المواصفات الرئيسية للديودات الليزرية والتي تؤثر بشكل كبير على أداء الليزر.

٢- مبدأ النمذجة الرياضية:

قمنا بكتابة برنامج حاسوبي (ملحق ١) يقوم هذا البرنامج من أجل قيم مختلفة لنفوذية الماص القابل للإشباع ولعاكسيات مرآة الخرج بحساب عدد الذرات النهائية وعدد الذرات عند العتبة ومن ثم حساب طاقة الخرج النبضية ومردود الاستخراج. ويقوم بعرضها على شكل مصفوفة من القيم بحيث يمكننا اختيار قيمة نفوذية الماص القابل للإشباع والعاكسية اللتان تحققان الطاقة والمردود المطلوبان.

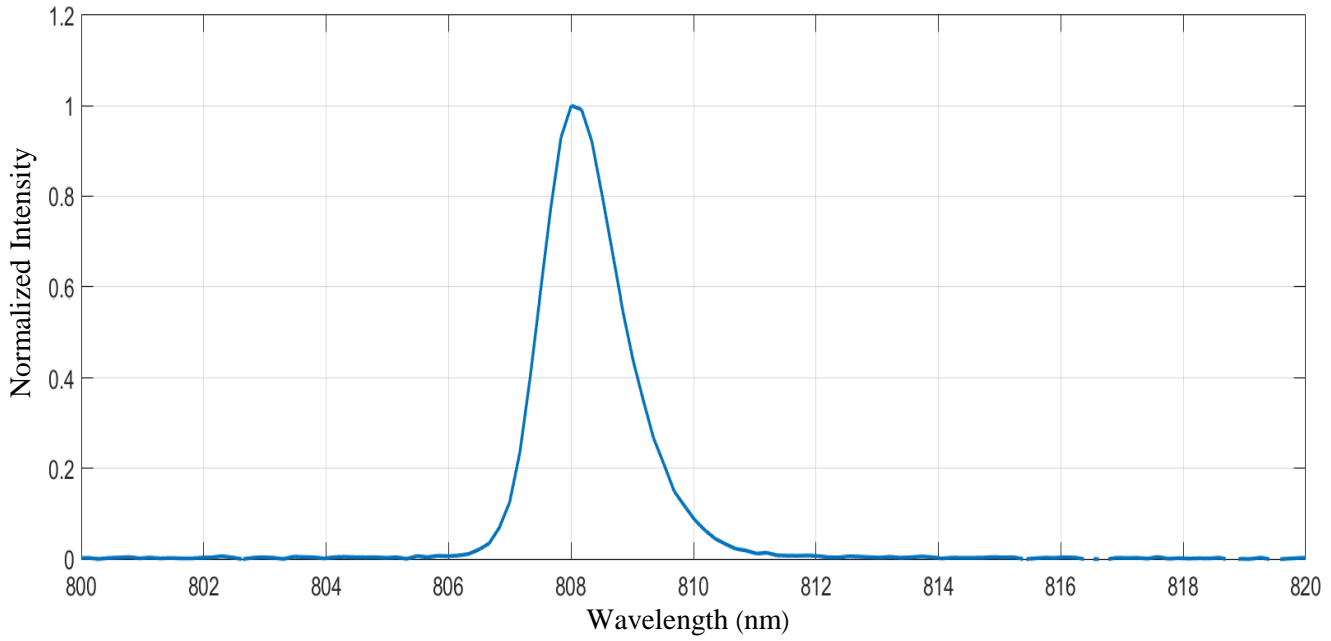
كما أنه يمكننا تحديد قيمة الطاقة المطلوبة ويقوم البرنامج بإعطاء قيمة عاكسية مرآة الخرج ونفوذية الماص القابل للإشباع الذين يحققان قيمة الطاقة السابقة.

وذلك باستخدام المعادلات (١٦-١٧-١٨-١٩-٢٠) المذكورة في الفقرة (٤-٣)

٣- توصيف الديودات المستخدمة في الضخ:

٣-١- قياس تغير طول موجة إصدار الليزر بدلالة درجة الحرارة:

باستخدام مقياس طول الموجة (Compact Spectrometer) تم قياس طول موجة إصدار الليزر عند درجة حرارة 25°C حيث يظهر على الشكل ١٧ نتائج هذا القياس الذي يبين أن طول موجة الإصدار المركزي هي 808nm مع عرض طيفي أقل من 3nm عند منتصف الارتفاع كما يظهر الجدول ٨ تغيير طول موجة إصدار الليزر بدلالة درجة الحرارة .



الشكل ١٧ طول موجة إصدار الليزر عند درجة الحرارة (25°C).

جدول ٨: تغير طول موجة إصدار الليزر بدلالة درجة الحرارة:

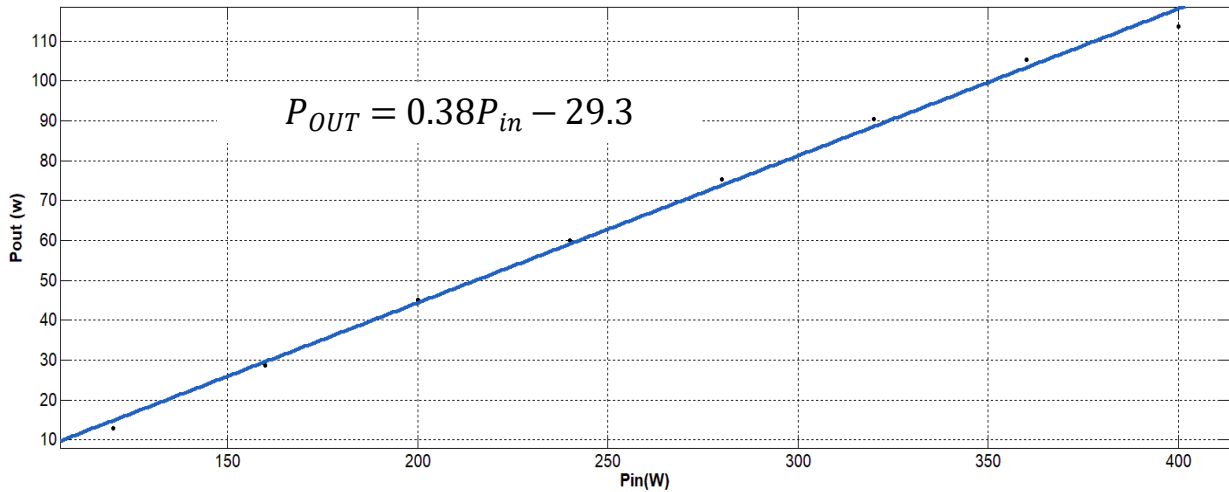
T(°C)	λ (nm)
21	807
22	807.3
23	807.5
24	807.8
25	808.0
26	808.2
27	808.4
28	808.7
29	809
30	809.3
31	809.5
32	809.8

نلاحظ من الجدول أن كل ارتفاع لدرجة الحرارة بمقدار درجة واحدة ينتج عنه انزياح بطول موجة إصدار الليزر بمقدار (0.3 – 0.2nm) وكما ذكرنا سابقاً فإن أعلى قمة امتصاص لليزر Nd:YAG تقع ضمن المجال

(808 nm) لذلك لابد من ضبط درجة حرارة الديودات الليزرية وثبيتها على الدرجة 25°C التي توافق طول موجة إصدار 808 باستخدام مبرد كهرو-حراري thermo-electric من النمط TEC - 0714 ذي التصاقية جيدة (تثبيت مع ضغط) من طرف أول مع الديود الليزري ومن طرف آخر مع مشع حراري Thermal Radiator لتبديد حرارة السطح الساخن من المبرد. الجدير بالذكر أنه يجب الانتباه جيداً إلى ضرورة ملء الفراغات الميكروية السطحية بين سطحي المبرد وكل من سطح الديود الليزري وسطح المشع الحراري وذلك من أجل تأمين ناقلية حرارية عالية.

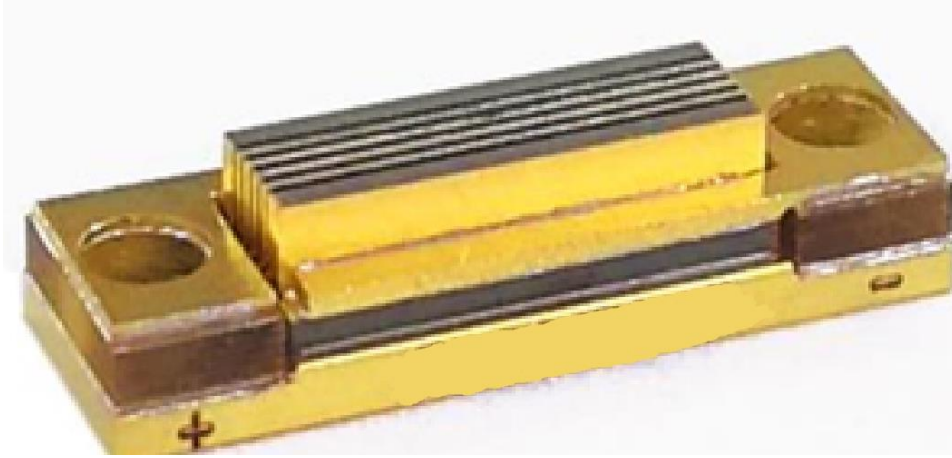
٣-٢- قياس المردود الكهروضوئي للديودات الليزرية:

تم تحديد المردود الكهروضوئي للديودات المستخدمة عن طريق تغيير قيمة استطاعة الضخ الكهربائية وقياس استطاعة الخرج الأعظمية (Peak Power) باستخدام مقياس الاستطاعة S425C من انتاج Thorlabs يبين الشكل ١٨: منحنى استطاعة الخرج الضوئية بدلالة استطاعة الدخل الكهربائية للديود الليزري . تظهر نتائج القياسات 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 المنحنى المميز لأحد هذه الديودات.



الشكل ١٨: منحنى استطاعة الخرج الضوئية بدلالة استطاعة الدخل الكهربائية للديود الليزري

يبين الشكل ١٩ صورة الديود الليزري المستخدم:



الشكل ١٩ الديود الليزري المستخدم الضخ.

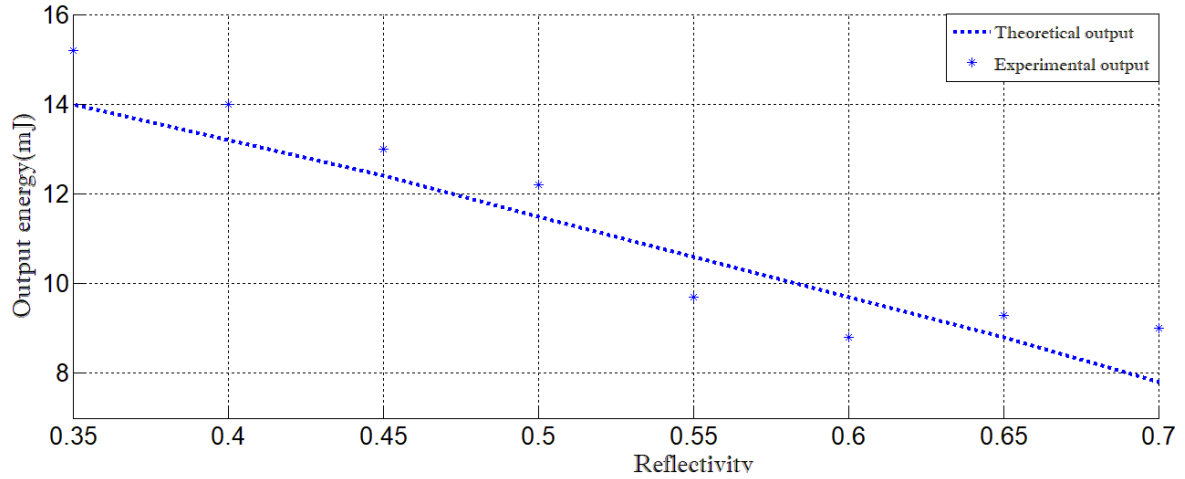
٣-٣- حجرة الضخ والمجاوب الليزري:

تم استخدام وسط فعال (قضيب ليزري) من مادة نيودميوم ياغ ذي إشابة ($at. 1\%$) بأبعاد فيزيائية (قطر $3mm$ وطول $90mm$) محاط بعاكس من الألمنيوم بهدف تحسين قيمة معامل امتصاص القضيب الليزري لطول موجة الضخ. تم وضع الوسط الفعال ضمن مجاوب من النوع (مستوي - مستوي) حيث يؤمن هذا المجاوب أكبر استفادة من الوسط الفعال. تم الضخ جانبياً باستخدام أربعة ديودات ليزرية من النوع (Stacks) ويتألف كل ديود من ٣ صفوف من المرسلات الليزرية قمنا بتأمين شروط التغذية الكهربائية لهذا الديود عن طريق كتلة التغذية الخاصة LDQCW Driver ملحق (٣).

٣-٤- اختبار صحة النمذجة:

بغية التحقق من صحة النمذجة الرياضية قمنا بإجراء تجارب عملية باستخدام المجاوب الذي تم توصيفه أعلاه حيث قمنا بقياس طاقة الخرج من أجل عدة قيم لعاكسية مرآة الخرج من أجل قيمة ثابتة لنفوذية الماص القابل

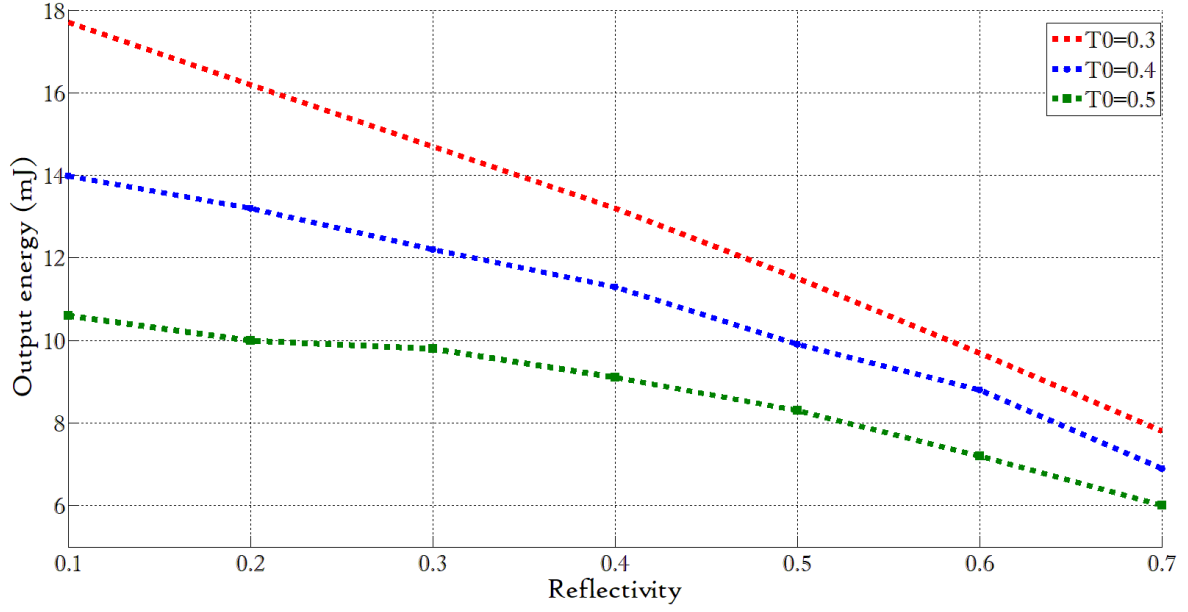
للإشباع ($T_0 = 0.3$) يظهر الشكل ٢٠ تغيرات طاقة خرج الليزر بدلالة عاكسية مرآة الخرج كما يظهر أن الخطأ الأعظمي بين القيم التجريبية والنظرية هو ١٢,٥% وهو ناتج عن الارتياح في قيمة عاكسية المرآة ومعاملات Q-SWITCH وقراءة مقياس الاستطاعة.



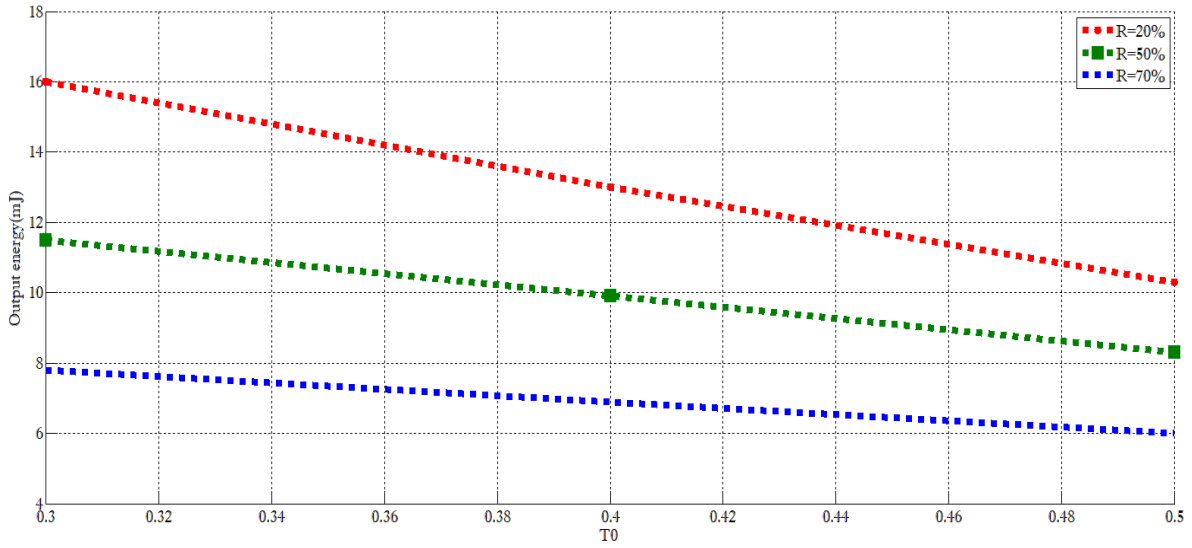
الشكل ٢٠: تغير طاقة الليزر بدلالة عاكسية مرآة الخرج

بعد التحقق من صحة البرنامج تمت دراسة تأثير تغير عاكسية مرآة الخرج على طاقة الخرج من أجل قيم ثابتة لنفوذية الماص القابل للإشباع. وبالعكس تمت دراسة تأثير تغير نفوذية الماص القابل للإشباع على طاقة الخرج من أجل قيمة ثابتة عاكسية مرآة الخرج.

لاحظنا في الحالتين أن طاقة الخرج تنقص بنقصان نفوذية الماص القابل للإشباع (من أجل قيمة ثابتة لعاكسية مرآة الخرج) ومع نقصان عاكسية مرآة الخرج (من أجل قيمة ثابتة لنفوذية الماص القابل للإشباع) كما يتضح من الشكلين ٢١ و ٢٢.



الشكل ٢١: تغيير طاقة الخرج بدلالة العاكسية من أجل ثلاث قيم لنفوذية الماص القابل للإشباع



الشكل ٢٢: تغيير طاقة الخرج بدلالة النفوذية من أجل ثلاث قيم للعاكسية

إن زيادة طاقة الخرج لا تعني بالضرورة زيادة مردود الاستخراج وهنا تكمن أهمية عملية الأمثلة حيث أنه يمكن الحصول على الطاقة نفسها من أجل قيم مختلفة للثنائيات (T_0, R) ولكن بمردود مختلف لأجل كل ثنائية جوهر عملية الأمثلة هو اختيار الثنائية (T_0, R) التي تضمن استخراج هذه الطاقة بأكبر مردود استخراج. تم باستخدام

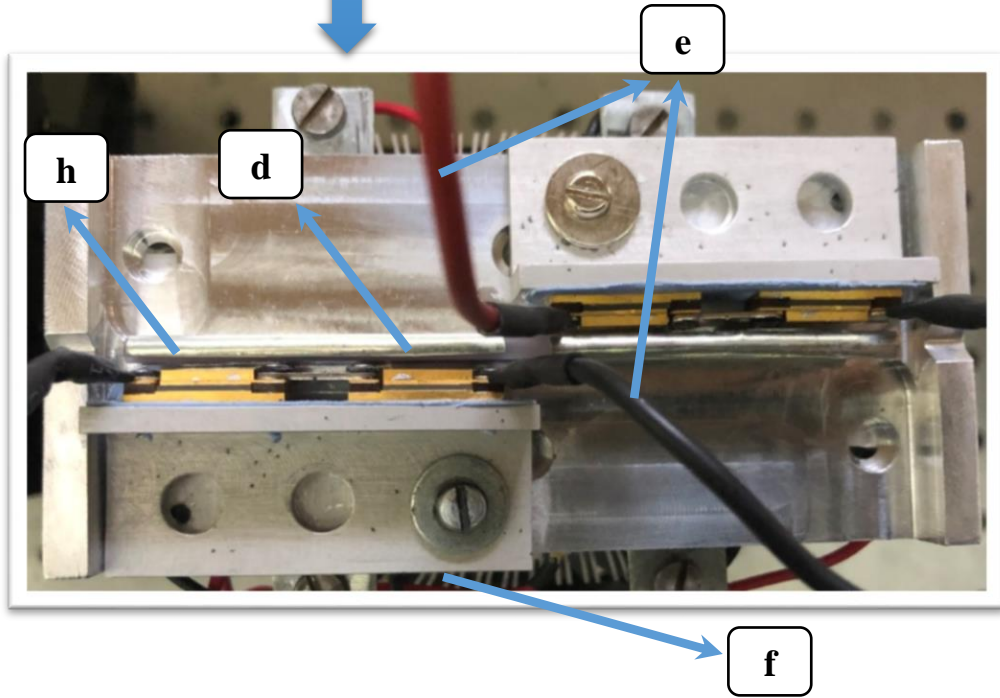
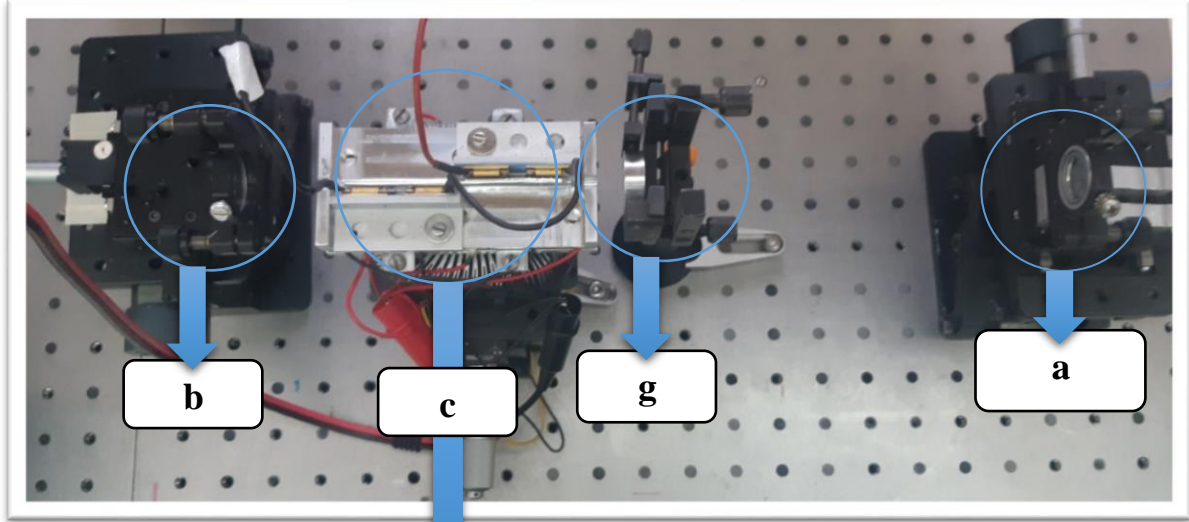
البرنامج الحصول على جدول ٩ الذي يوضح وجود عدة قيم متساوية لطاقة الخرج من أجل قيم مختلفة للثنائية (T_0, R) وبمردود استخراج مختلف لكل ثنائية فمن أجل قيمة الطاقة 10 mJ مثلاً هناك ثلاث قيم للثنائيات تعطي هذه القيمة للطاقة.

جدول ٩: القيم النظرية التي تم الحصول عليها من البرنامج

	R T_0	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.36	0.38	0.4	0.42	0.44	0.46	0.48	0.5	0.52	0.54	0.56	0.58
Energy(mJ)	0.3	15.9	15.6	15.3	15	14.7	14.4	14.1	13.8	13.5	13.2	12.8	12.5	12.2	11.9	11.5	11.2	10.8	10.5	10
Efficiency (%)		29.9	30	30	30	29.9	29.8	29.7	29.5	29.3	29	28.8	28.4	28.1	27.6	27.2	26.7	26.2	25.6	25
Energy(mJ)	0.4	13	12.8	12.6	12.4	12.2	12	11.8	11.5	11.3	11.1	10.9	10.6	10.4	10	9.9	9.6	9.3	9.1	8.8
Efficiency (%)		28.4	28.8	29	29.2	29.4	29.5	29.6	29.6	29.6	29.5	29.4	29.2	29	28.8	28.5	28.2	27.8	27.4	26.9
Energy(mJ)	0.5	10.3	10.2	10	9.9	9.2	9.7	9.6	9.4	9.3	9.1	9	8.8	8.6	8.4	8.3	8.1	7.9	7.7	7.5
Efficiency (%)		25.9	26.5	26.9	27.3	27.7	28	28.3	28.5	28.7	28.9	29	29	29	29	28.9	28.8	28.6	28.4	28.1

كما نلاحظ من الجدول، فإن الثنائية $T_0 = 0.4, R = 0.48$ تعطي أعلى مردود 28.8% لذلك تعتبر هذه الثنائية أفضل من باقي الثنائيات لأنها تعطي الطاقة نفسها بأعلى مردود استخراج.

تحقيقاً لهدف هذا القسم من العمل (الحصول على طاقة نبضية 10 mJ بأعلى مردود) وبناء على نتائج النمذجة السابقة تم اختيار $T_0 = 40\% R = 48\%$ وتم وضعها ضمن مجاوب (مستوي - مستوي) شكل (٢٣) وبالتالي تم الحصول على نبضات ليزيرية بمردود (28.8%) ، طاقة (10.4 mJ) ، وعرض نبضة (29 ns) كما يبين الشكل ٢٤.

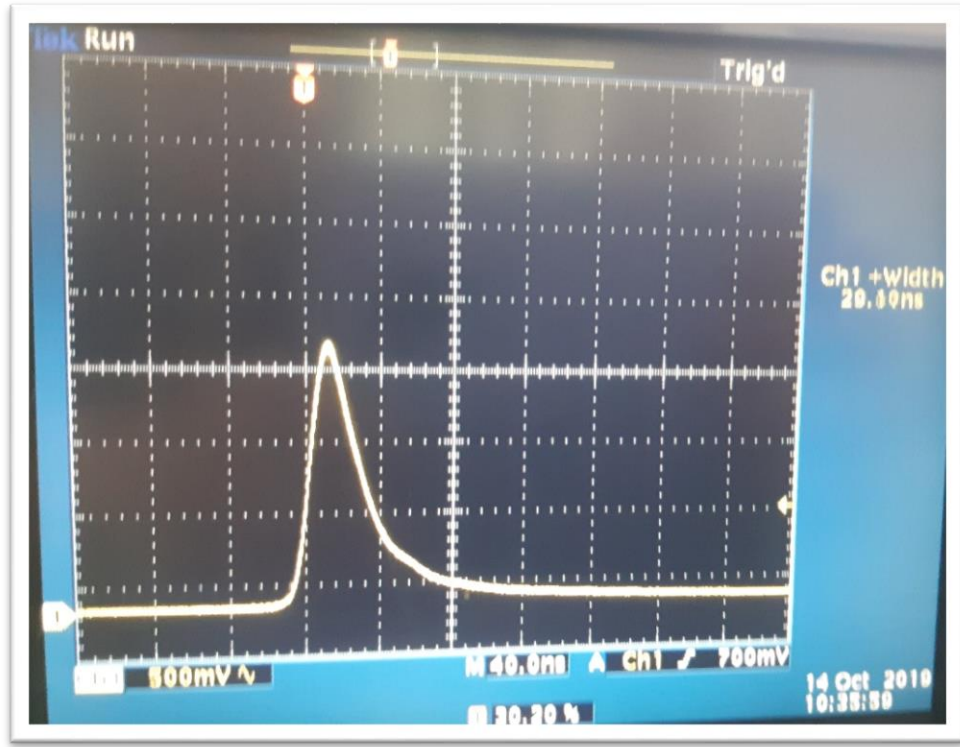


الشكل ٢٣: صورة الترتيب التجريبي الليزري المستخدم:

(a): المرآة الخلفية (المستوية)، (b): المرآة الأمامية (الخروج)، (c): الديود الليزري،

(d): القضيب الليزري، (e): تغذية الديود الليزري، (f): المشع الحراري الملصق بالمبرد الكهرو-حراري، (g): الماص القابل

للإشباع، (h): عاكس الألمنيوم



الشكل ٢٤: عرض نبضة الليزر

الجزء الثاني:

١- ملخص:

يهدف هذا الجزء لتوليد حزمة ليزرية غوصية نظراً لحاجتها في كثير من التطبيقات الطبية والصناعية والتي تتطلب استطاعة عالية لا يمكن الحصول عليها باستخدام الضخ الخلفي.

للحصول على حزمة غوصية يجب أن يتم الضخ في منطقة النمط الغوصي وذلك لأن كل طاقة الضخ التي لا تقع ضمن تلك المنطقة ستتحول إلى حرارة تشوه شكل الحزمة الناتجة لذلك يعتبر تقدير قيمة معامل فعالية التغطية من أولويات التصميم.

خلال بحثنا في الأدبيات لاحظنا عدم وجود طريقة دقيقة تسمح لنا بتقدير معامل فعالية التغطية من أجل طريقة معينة لتوزيع منابع الضخ وحجم النمط ضمن مجاوب ما.

بداية قمنا بأمثلة بارامترات المجاوب التي يمكننا التحكم بها بغية الحصول على إصدار غوصي واستخدام النمط الذي تم توليده لاقتراح طريقة تجريبية دقيقة لحساب معامل فعالية التغطية بين النمط الليزري والضخ وبناء عليها تم تقييم صحة اختيارنا لطريقة توزيع منابع الضخ واختيار المجاوب.

تم الحصول على حزمة ليزرية باستطاعة ($P = 52Watt$) وعرض نبضة ($\tau_p = 189\mu s$) وبتردد 30 HZ وبمعامل نوعية ($M^2 = 3.4$) وذلك باستخدام الوسط الفعال نفسه المستخدم في القسم السابق والموضوع ضمن مجاوب (مستوي - مقعر) ($R_1 = \infty, R_2 = 518.3mm$). كما تم اقتراح طريقة تجريبية لقياس معامل فعالية التغطية بين الضخ والنمط الليزري الذي تم الحصول عليه وتمت مقارنة هذه الطريقة مع الطريقة التقليدية المتبعة لحساب معامل فعالية الضخ ومع الطريقة التجريبية لحساب المعامل السابق.

نتيجة المقارنة تبين أن الفرق بين طريقتنا المقترحة والطريقة التجريبية (2%) بينما الفرق بين الطريقة التقليدية والطريقة التجريبية (14%).

٢-تصميم المجاوب:

٢-١-اختيار المجاوب:

يبين الشكل ٢٥ تصميم المجاوب الليزري المستخدم والذي هو من النوع المستقر والنمط نصف كروي Hemispherical حيث تكون المرآة الخلفية Rear mirror مستوية (نصف قطر تقعر لانهاضي) مع إمكان تغيير المسافة بين المرآة الأمامية وطرف القضيب (تغيير L_1) وكذلك بالنسبة للمرآة الخلفية (تغيير L_2) وذلك للوصول تجريبياً إلى القيم المثالية التي تؤمن أعظم حجم للنمط ضمن المجاوب وأفضل استقرار للمجاوب.

الوسط الفعال هو قضيب ليزري من النيوديميوم ياغ ذي الإشابة 1% ويتمتع بالأبعاد الهندسية التالية: قطر $3mm$ وطول $90mm$.

٢-٢-أمثلة بارامترات المجاوب ($r; R; L_1; L_2$):

١. في المجاوب النصف كروي أكبر حجم للنمط يقع على مرآة الخرج لذلك للاستفادة قدر الإمكان من

الوسط الفعال يجب تقريبه أقرب ما يمكن لمرآة الخرج في تجربتنا أقرب مسافة ممكنة ($L_1 = 33mm$)

٢. بالنسبة لـ L_2 تم اختيارها بحيث:

- تحقق أكبر حجم للنمط الليزري (وذلك لأن حجم النمط يكون أصغر ما يمكن على المرآة المستوية في المجاوب النصف كروي وبالتالي هناك قيمة لـ L_2 تجعل حجم النمط على هذه المرآة أكبر ما يمكن).
- تحقق أكبر استقرار للمجاوب.

لإيجاد قيمة L_2 التي تحقق الشرطين السابقين قمنا بالخطوات التالية :

انطلاقاً من العلاقة التي تعطي عنق الحزمة الغوصية في المجاوب (المقعر- المستوي) [2].

$$w_0^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) * [L_e * (R_2 - L_e)]^{1/2} \quad (21)$$

$$\omega_0(z) = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{1/2} \left[-(z + L_1)^2 + \left(R - \frac{2l}{n}\right)(z + L_1) + \frac{Rl}{n} - \left(\frac{l}{n}\right)^2 \right]^{1/4} \quad (22)$$

تمتلك العلاقة السابقة نهاية محلية عندما $\omega_0'(z) = 0$

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

$$Z_{max} = \left(\frac{1}{2}\right) \left(R - \frac{2l}{n}\right) - L_1 \quad (23)$$

$$\omega_{0max} = \left(\frac{\lambda R}{2\pi}\right)^{1/2} \quad (24)$$

أما اختيار نصف قطر تقعر مرآة الخرج فإنه وضوحاً من العلاقة (٢٤)، يزداد حجم النمط ضمن الوسط الفعال مع زيادة نصف قطر تقعر مرآة الخرج وفقاً لذلك تم اختيار $R_2 = 518.3mm$ (أكبر نصف قطر تقعر متوفر لدينا) ومن أجل اختيار العاكسية المثالية لمرآة الخرج قمنا تجريبياً بتحديد قيمة هذه العاكسية من خلال تغيير عدة قيم لعاكسية مرآة الخرج وتحديد قيمة العاكسية التي تعطي أعلى استطاعة خرج يبين الجدول ١٠ التالي القيم التجريبية التي تم الحصول عليها:

جدول ١٠: قيم استطاعة خرج الليزر [mW] بدلالة عاكسية مرآة الخرج

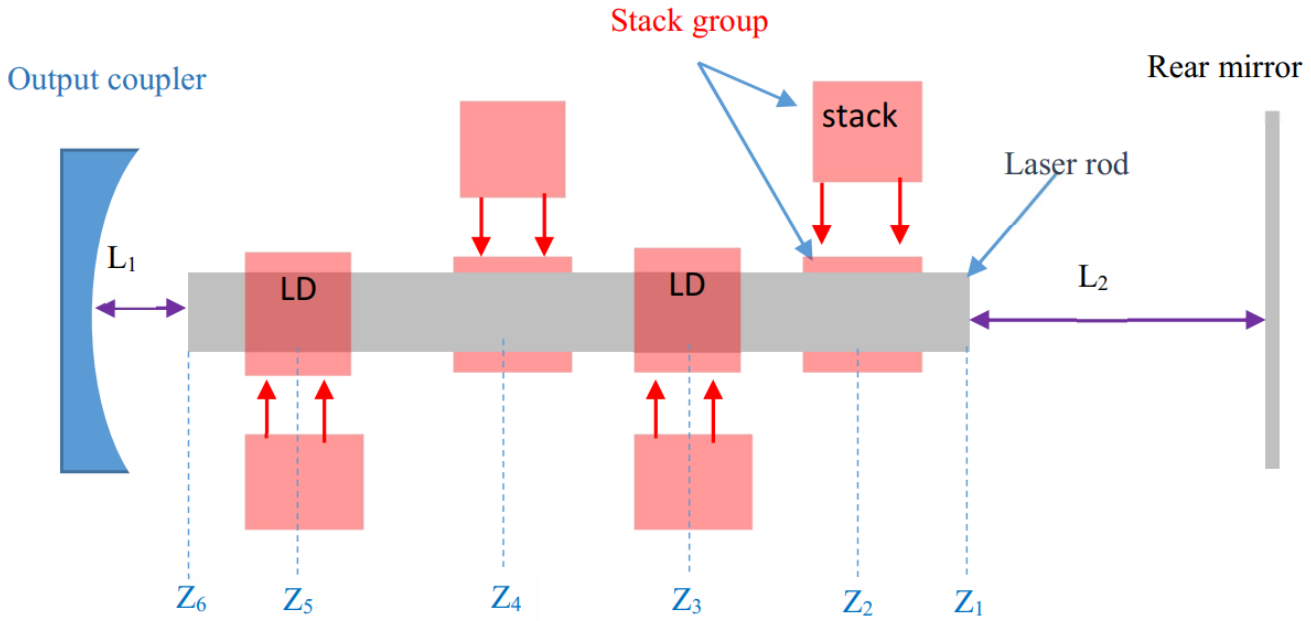
r (%)	95	90	80	70	60	50	40
$P_{avg} (mW)$	192	258	254	212	204	142	94

من الجدول السابق نستنتج أن القيمة الأمثلية لعاكسية مرآة الخرج هي ($r = 90\%$) لأنها تعطي أعلى استطاعة

$$P_{avg} = 258 mW \text{ خرج}$$

٢-٣- اختيار طريقة توزيع منابع الضخ:

تؤثر طريقة اختيار توزيع منابع الضخ بشكل مباشر على قيمة معامل فعالية التغطية الذي يؤثر بشكل أساسي على المردود الكلي لعملية الضخ، وبما أن هدفنا هو توليد حزمة بنوعية جيدة فيجب قدر الإمكان توزيع الحرارة بشكل متجانس على طول الوسط الفعال منعاً لحدوث تشوه في شكل الحزمة الليزرية المتولدة، لذلك قمنا باستخدام أربعة مجموعات من الديودات الليزرية الموصفة أعلاه لضخ القضيب جانبياً في أربعة مواضع متساوية البعد عن بعضها وعن طرفي القضيب بمقدار $10 mm$ ، بحيث تتكون كل مجموعة من ديودين متعامدين وتدور كل مجموعة عن التي تسبقها بزاوية 180° .



الشكل ٢٥: مخطط تمثيلي لحجرة الضخ والمجاوب الليزري.

من أجل انتقاء النمط الغوصي ومنع تضخيم الأنماط العليا في المجاوب، قمنا بإضافة حظار Diaphragm (قطره

2mm) بين المرآة المقعرة والقضيب الليزري. القيم المثالية الناتجة هي التالية:

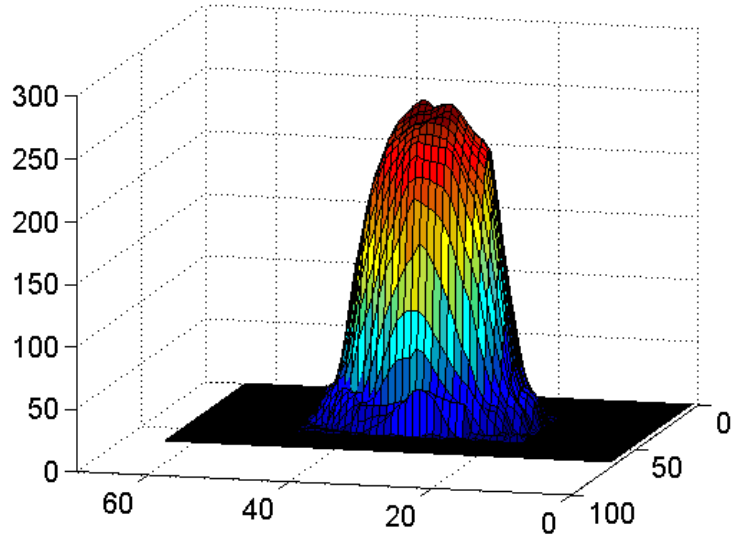
$$R_{oc} = 518.3 \text{ mm}, \quad r = 90\%, \quad L_2 = 177\text{mm}, \quad L_1 = 33 \text{ m}$$

٢-٤- النتائج العملية:

ضمن البارامترات التي تم اختيارها تم الحصول على حزمة ليزرية ذات استطاعة نبضية (52W) وعرض نبضة

$$(189\mu\text{s}) \text{ بتردد } 30 \text{ Hz} \text{ ومعامل نوعية الحزمة } (M^2 = 3.4)$$

الشكل (٢٦): منحنى توزيع الشدة للحزمة الناتجة - ٢٧: صورة حزمة الليزر الناتج



الشكل ٢٦: منحنى توزيع الشدة للحزمة الناتجة



الشكل ٢٧: صورة حزمة الليزر الناتج

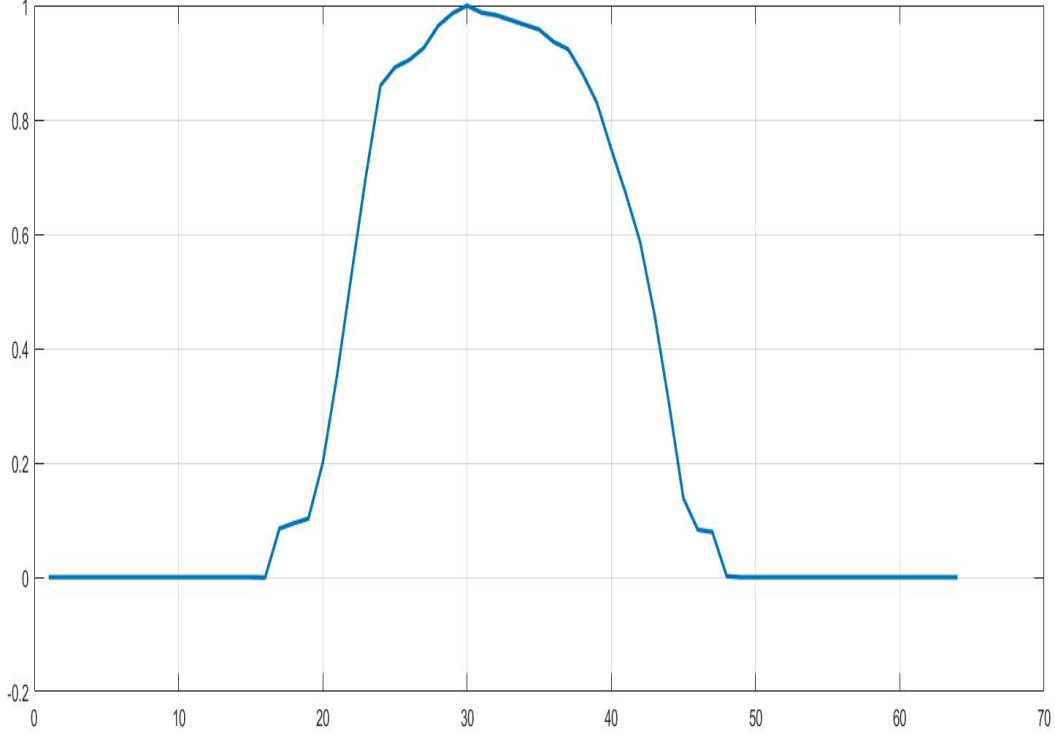
٢-٥- طريقة حساب معامل نوعية الحزمة:

تم أخذ صورة لحزمة الليزر على مخرج القضيب الليزري ورسم منحنى توزيع الشدة لهذه الحزمة الشكل ٢٨ ومنه تم استنتاج عنق الحزمة ($W_{real} = 723\mu\text{m}$)، بينما لو كانت هذه الحزمة غوصية فإن عنقها عند نهاية الوسط الفعال سيكون ($W_{gaussian} = 393\mu\text{m}$). نعلم أن العلاقة التي تربط بين عنقي الحزمة الغوصية $W_{gaussian}$ وشبه الغوصية W_{real} بمعامل جودة M هي [5]:

$$W_{\text{real}}(Z) = M \times W_{\text{gaussian}}(Z) \quad (25)$$

وبالتالي عند نهاية القضيب الليزري يكون لدينا:

$$M = \frac{723}{393} \approx 1.84 \Rightarrow M^2 = 3.4$$



الشكل ٢٨: منحنى توزيع الشدة الضوئية للحزمة التي تم الحصول عليها

٣- قياس معامل فعالية التغطية بين الضخ ونمط الإصدار:

سيتم في هذه المرحلة قياس معامل فعالية التغطية بأربعة طرق:

١. الطريقة التقليدية:

هذه الطريقة لحساب معامل فعالية التغطية تعتبر أن الضخ لا يتغير على طول الوسط الفعال كما أنها تعتبر حجم النمط ثابت على طول الوسط الفعال. وفقاً لهذه الطريقة يتم حساب هذا المعامل عن طريق أخذ صورة الضخ وصورة للنمط الليزري المتولد وتنظيمها بهدف الحصول على تابع توزيع الشدة الضوئية لكل منهما و ثم حساب معامل التغطية باستخدام العلاقة (3).

٢. طريقتنا المقترحة للحساب نفترض وجوب تقسيم الوسط الفعال إلى شرائح عنصرية وحساب معامل التغطية عند كل شريحة ثم حساب القيمة الوسطية للمعاملات السابقة.

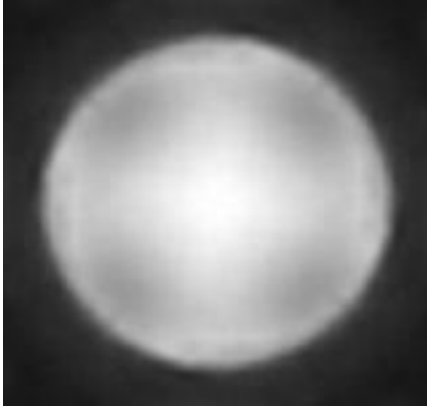
٣. الطريقة التجريبية: في هذه الطريقة قمنا بتحديد المنحني المميز لليزر عملياً (استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل) ميل هذا المنحني عبارة عن جداء عدة بارامترات يمكن حسابها بدقة وأحد هذه البارامترات هو معامل فعالية التغطية.

٤. الطريقة نصف العملية: المقصود بها أخذ صورة حقيقية للضخ بينما يتم توليد حزمة ليزرية لها نفس مواصفات حزمنا والهدف الأول من هذه الخطوة هو التأكد من صحة توصيفنا للحزمة والهدف الثاني هو إثبات إمكانية استخدامها في التنبؤ بقيمة معامل فعالية التغطية قبل تشغيل الليزر عن طريق صورة الضخ فقط لكل منطقة وتوليد حزمة ليزرية بالمواصفات المرغوبة ومن ثم الحكم على صحة توزيع منابع الضخ واختيار المجاوب.

٣-١- قياس معامل التغطية بالطريقة التقليدية:

يوضح الشكل ٢٩ صورة الضخ وصورة الليزر مأخوذتين من نهاية القضيب الليزري أعطت هذه الطريقة قيمة لمعامل

$$\eta_B = 33\%$$



a



b

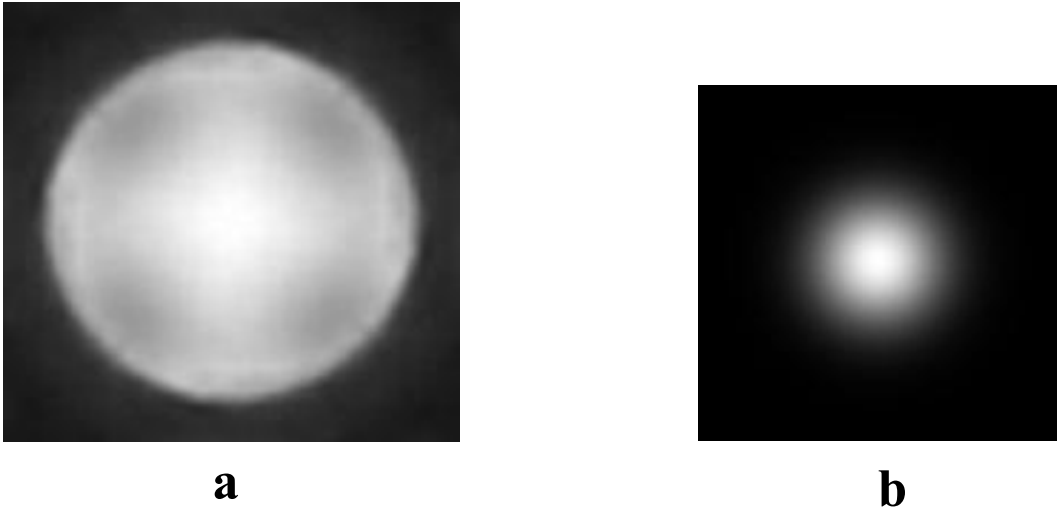
الشكل ٢٩: صورة منطقة الضخ (a) وبقعة الخرج الليزرية (b) من أجل الحالة المثالية للمجاوب.

٣-٢- قياس معامل التغطية بالطريقة نصف العملية:

قمنا بأخذ صورة حقيقية للضخ بينما تم توليد حزمة غوصية لها نفس مواصفات الحزمة التي حصلنا عليها (حزمة غوصية) عنق الحزمة ($w_0 = 723\mu m$) بمعامل نوعية ($M^2 = 3.4$) الشكل ٣٠

وحصلنا بنتيجة هذه الطريقة على قيمة لمعامل التغطية 32%

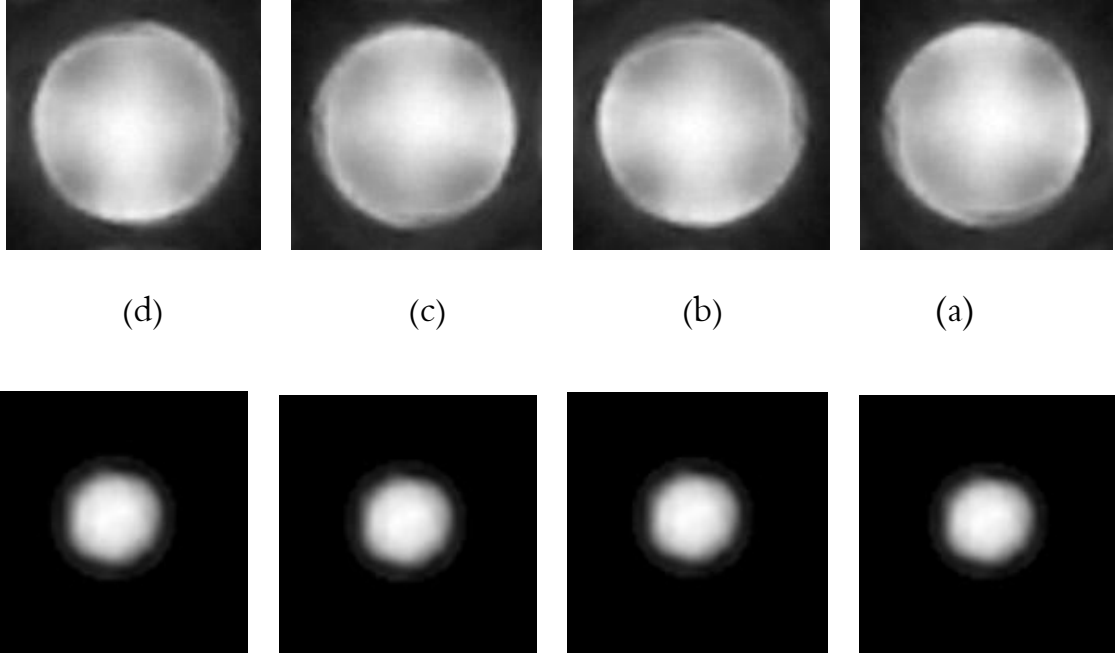
الفرق بين الطريقة التجريبية والطريقة نصف التجريبية فقط 3%.



الشكل ٣٠: صورة منطقة الضخ (a) وبقعة الخرج الليزرية النظرية (b)

٣-٣- قياس معامل التغطية بطريقتنا المقترحة:

في هذه المرحلة تم تشغيل كل مجموعة ضخ على حدى والتقاط صورة لكل منطقة ضخ ولمعرفة حجم النمط الليزري عند كل منطقة ضخ تمت الاستفادة من صورة الليزر الحقيقية المأخوذة من نهاية القضيب الليزري كما هو مبين في الشكل ٣١ وتم تقييسها بنسبة معينة لتحاكي شكل الحزمة عند كل منطقة ضخ حيث أننا وبعد قياس معامل نوعية الحزمة تجريبياً وباستخدام معادلات انتشار الحزمة الغوصية نستطيع تحديد نسبة التقييس وبالتالي نحصل على منحنى توزيع الشدة الليزرية في أي موضع ضمن الوسط الفعال.



الشكل ٣١ يوضح صور الضخ المأخوذة من المناطق الأربعة للضخ وصور الليزر عند كل منطقة من المناطق صورة الضخ، الليزر (a) عند المنطقة الأولى (b) عند المنطقة الثانية (c) عند المنطقة الثالثة (d) عند المنطقة الرابعة.

بين الجدول ١١ نتائج قياس معامل التغطية عند كل منطقة ضخ حيث يمثل Z_i موقع مجموعة ديودات الضخ على طول القضيب الليزري و $W(Z_i)$ قطر البقعة الليزرية عند كل منطقة ضخ و S نسبة التقييس (نسبة نصف قطر النمط في الموضع Z_i إلى نصف قطر نمط الحزمة الحقيقية المأخوذة عند نهاية الوسط الفعال).

جدول ١١: نتائج قياس معامل التغطية لمناطق الضخ الأربعة

Z_i (mm)	15	35	55	75
$W(Z_i)$	668.58	682.26	696.44	711
$S = \frac{W(Z_i)}{723}$	92.6%	94.4%	96.4%	98%
η_B	27.8	28.9	30	31.2

القيمة الوسطية لمعاملات التغطية السابقة هي 29.5%

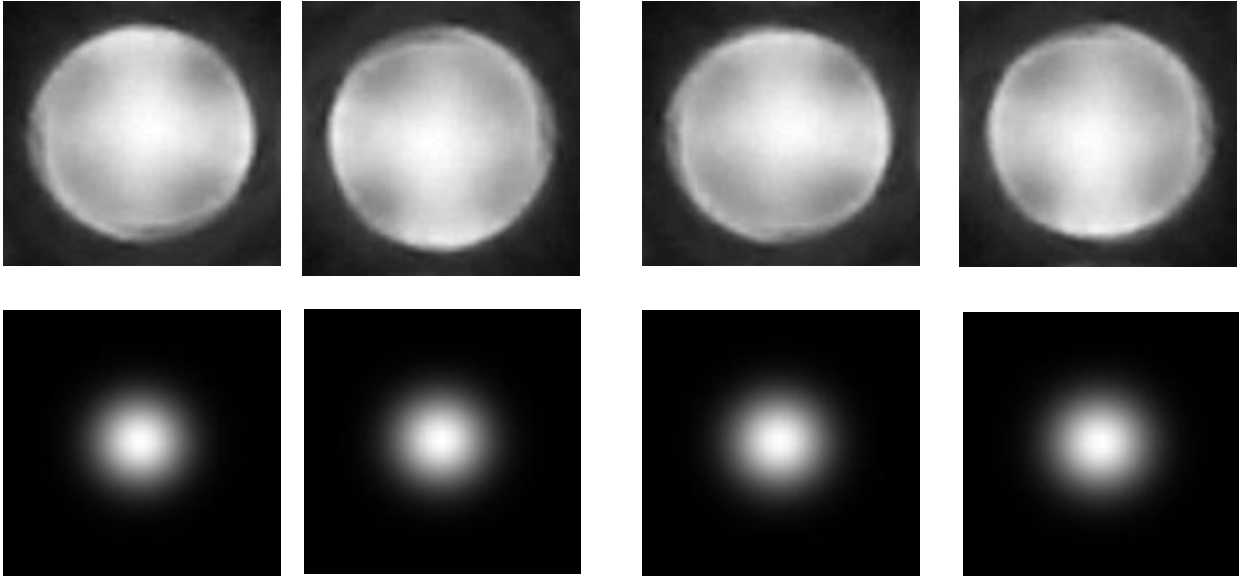
٣-٤- الطريقة المقترحة نصف العملية لقياس معامل التغطية:

في هذه المرحلة أخذنا صورة الضخ الحقيقية لكل منطقة من مناطق الضخ وتم توليد حزمة ليزرية (باستخدام برنامج Matlab) لها نفس مواصفات حزمة الليزر (نفس قطر الحزمة ونفس معامل نوعية الحزمة) عند كل منطقة ضخ ومن ثم حساب معامل فعالية التغطية عند كل منطقة ضخ الشكل ٣٢ والجدول ١٢ يظهر قيم فعالية الضخ عند كل منطقة ضخ:

جدول ١٢: قيم فعالية الضخ عند كل منطقة ضخ

$Z_i(mm)$	15	35	55	75
$W(Z_i)\mu m$	363	371	378	386
$\eta_B(\%)$	27.6	28.7	29.8	30.9

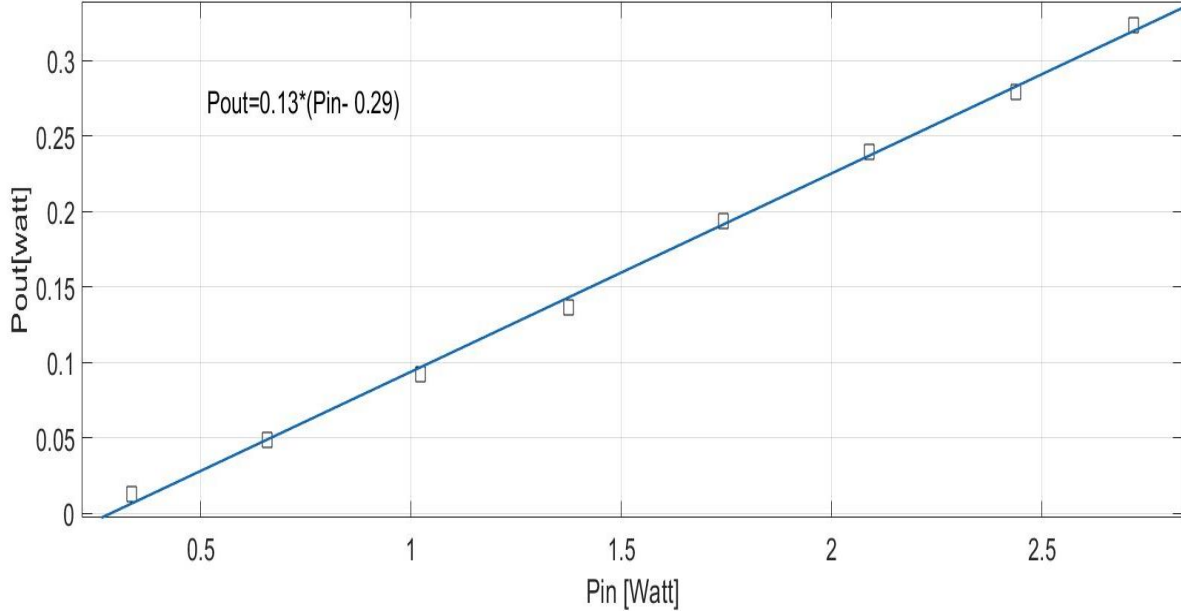
القيمة الوسطية لمعاملات التغطية السابقة هي 29.3%



الشكل ٣٢: صور الضخ عند كل منطقة وصور الليزر النظري عند كل منطقة

٣-٥- الطريقة التجريبية لقياس معامل التغطية:

قمنا بقياس عملي لمعامل التغطية من خلال تحديد المنحني المميز لليزر، أي قمنا بدايةً بتحديد فعالية الليزر الكلية وعتبة الإصدار الليزري من أجل النمط الناتج وذلك من خلال تغيير قيمة استطاعة الضخ وتسجيل قيمة استطاعة الخرج في كل مرة ومن ثم رسم المنحني الذي يعطي تغيرات استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل الضوئية.



الشكل ٣٣: المنحني المميز لليزر

يبين الشكل ٣٣ المنحني المميز لليزر الناتج ويتضح من المنحني أن القيمة العملية لمعامل الفعالية الكلي هي 13% (ميل المنحني) قيمة ميل هذا المنحني هي جداء عدة برامترات:

$$\sigma_s = \eta_t * \eta_a * \eta_s * \eta_Q * \eta_C * \eta_B \quad (26)$$

حيث η_t : فعالية الانتقال تتعلق بضياعات فرينل على وجه القضيب المقابل للديودات [5] $\eta_t = 0.92$

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

وبطول المسار الضوئي للحزمة ضمن الوسط الفعال [5] $\eta_a = 0.91$

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

$$\eta_s = \frac{\lambda_p}{\lambda_L} = \frac{808}{1064} = 0.76 \quad (27)$$

η_Q : يتعلق بمادة الوسط الفعال من أجل ليزر $Nd:YAG$ فإن $\eta_Q = 0.95$ [5]

بالنسبة للمعامل η_C يحسب من العلاقة [5]:

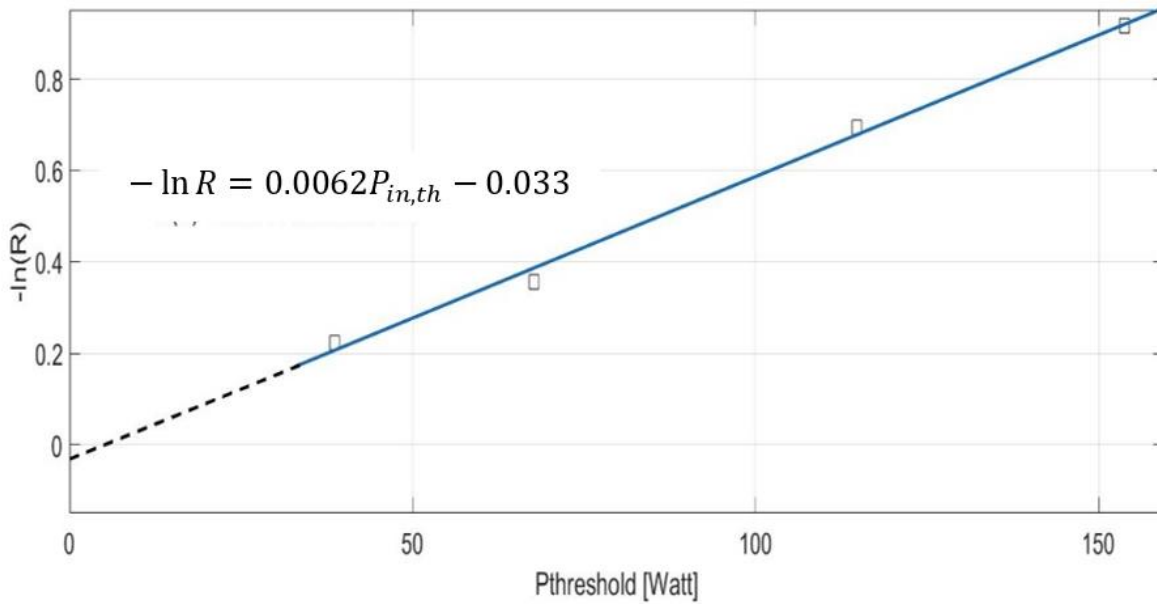
$$\eta_C = (1 - R)/(1 - R + \delta) \quad (28)$$

حيث R : عاكسية مرآة الخرج ; δ : الضياعات الكلية ضمن المجاوب.

وبالتالي لتحديد قيمة η_C يجب معرفة قيمة الضياعات الكلية ضمن المجاوب δ ، التي يتم تحديدها عملياً من خلال طريقة قياس منحنى تغير $-\ln(R)$ بدلالة عتبة الإصدار والذي يعطى بالعلاقة التالية [2]:

$$-\ln(R_{oc}) = 2 K P_{th} - \delta \quad (29)$$

يظهر على الشكل ٣٤ منحنى التغير المذكور، حيث يتبين أن نقطة تقاطع المستقيم مع المحور $-\ln(R)$ يمثل قيمة الضياعات الكلية (غير المفيدة) والتي تقدر تقريباً بـ 3.3%.



الشكل ٣٤: منحنى تغيرات $-\ln(R)$ بدلالة $P_{in,th}$.

بالتعويض في علاقة η_C :

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

وبالتالي من خلال علاقة فعالية الليزر الكلية (26) يمكن تقدير معامل التغطية $\eta_B \approx 28.9\%$.

٤ - مناقشة النتائج

- الفرق بين الطريقة التجريبية لحساب معامل فعالية التغطية والطريقة التقليدية 14% .
- بينما الفرق بين الطريقة التجريبية لحساب معامل التغطية والطريقة المقترحة 2% .
وبالتالي تعتبر طريقتنا المقترحة أكثر دقة من الطريقة التقليدية وذلك لأن طريقتنا تأخذ بعين الاعتبار تغيرات حجم النمط على طول القضيب الليزري والتي تبلغ 10% تقريباً على عكس الطريقة التقليدية التي تحمل هذه التغيرات كما تحمل تغيرات الضخ على طول الوسط الفعال.
- باستخدام الطريقة المقترحة نصف التجريبية يمكننا التنبؤ بقيمة معامل فعالية التغطية باستخدام صورة الضخ فقط وبالتالي يمكننا الحكم على طريقة توزيع منابع الضخ إذا كانت مناسبة لتوليد نمط غوصي بمعامل نوعية ما، حيث تبين أن الفرق بين هذه الطريقة وطريقتنا المقترحة 0.7% .

٥- الخلاصة والآفاق المستقبلية:

- تم في هذه العمل تصميم وتنفيذ نموذجين مخبريين من مرسلات ليزرية محقونة بالديودات الليزرية:
- النموذج الأول مرسل نبضي يعمل باستخدام تقنية مفتاح الجودة السليبي حيث تم اختيار القيم الأمثلية لعاكسية مرآة الخرج ونفوذية الماص القابل للإشباع الأمثلتين اللتين تعطيان الطاقة المطلوبة بأعلى مردود عن طريق حل معادلات الطاقة وعدد الذرات النهائية والبدائية باستخدام الحاسب
 - النموذج الثاني مرسل يصدر حزمة ذات نوعية $M^2 = 3.4$ باستطاعة $52W$ وعرض نبضة $(= \tau_p)$ $189\mu s$ كما تم اقتراح طريقة تجريبية دقيقة لحساب معامل فعالية التغطية بين الضخ والنمط ليزري متولد وقد تبين دقة هذه الطريقة حيث أعطت فرق 2% عن الطريقة العملية المستخدمة.
- على الرغم من دقة وفعالية الطريقة المقترحة إلا أن الهدف النهائي (والذي في إطاره تم تنفيذ هذه الأطروحة كخطوة أولى تأسيسية) هو الحصول على استطاعات أعلى ونماذج هندسية من هذه الليزر، بالتالي فالمشاكل الحرارية تكون فيها حرجة أكثر وذات تأثير أكبر.

الملحق ١ : البرنامج المستخدم لحساب نفوذية الماص القابل للإشباع وعاكسية مرآة الخرج:

```

lowi:=20;
upi:=80;
step:=5;
T0:=0.3;
gama:=1.7;
sigl:=2.8e-19;
sigg:=43e-19;
sige:=8.2e-19;
gampr:=1/(1-(sige/sigg));
alph:=sigg/(sigl*gama);
ls:=0.318;
ns0:=-ln(T0)/(sigg*ls);
c:=3e10;
L:=0.061;
lro:=4;
lres:=lro+ls+1.5;
indr:=1.82;
inds:=1.82;
leq:=lres+lro*(indr-1)+ls*(inds-1);
tr:=2*leq/c;
diam:=0.3;
A:=0.57*(3.1415*diam^2/4);
photon:=(1.24/1.064)*1.6e-19;
n0:=(1.1)*1.38e20;
delta:=sige/sigg;

```

lowi := 20
upi := 80
step := 2
T0 := .3
gama := 1.7
sigl := .28 10⁻¹⁸
sigg := .43 10⁻¹⁷
sige := .82 10⁻¹⁸
gampr := 1.235632184
alph := 9.033613447
ls := .318
ns0 := .8804832557 10¹⁸
c := .3 10¹¹
L := .061
lro := 4
lres := 5.818
indr := 1.82
inds := 1.82
leq := 9.35876
tr := .6239173334 10⁻⁹
diam := .3
A := .04028973750
photon := .1864661654 10⁻¹⁸
n0 := .1518 10²¹

```

for i from lowi by step to upi do
for j from lowi by step to upi do
T0:=0.01*i:
R:=0.01*j:
nt0:=(ln(1/R)+delta*ln(1/T0^2)+L)/(2*sigl*lro):
ni:=(ln(1/T0^2)+ln(1/R)+L)/(2*sigl*lro):
nt:=fsolve(y=nt0+(ni-nt0)*(y/ni)^alph,y):
nf:=fsolve(1-x/ni+(nt0/ni)*ln(x/ni)-((1-nt0/ni)/alph)*(1-(x/ni)^alph)=0,x):
ninf:=ni/nf:

```

```

for i from lowi by step to upi do
for j from lowi by step to upi do
T0:=0.01*i:
R:=0.01*j:
nt0:=(ln(1/R)+delta*ln(1/T0^2)+L)/(2*sigl*lro):
ni:=(ln(1/T0^2)+ln(1/R)+L)/(2*sigl*lro):
nt:=fsolve(y=nt0+(ni-nt0)*(y/ni)^alph,y):
nf:=fsolve(1-x/ni+(nt0/ni)*ln(x/ni)-((1-nt0/ni)/alph)*(1-(x/ni)^alph)=0,x):
ninf:=ni/nf:

```

```

print(_____);
mirror:=0.48;
qsT0:=0.4;
jmax:=trunc(mirror/0.01);
imax:=trunc(qsT0/0.01);
print( E_mj, result[imax,jmax,3],

```

mirror := .48

qsT0 := .4

jmax := 48

imax := 40

E_mj, 10.16983456,

efficiency, 28.85069919

الملحق ٢: البرنامج المستخدم لحساب معامل فعالية التغطية:

```
1  %laser modes
2  clear all;
3
4  Laser_Im = double(rgb2gray(imread('laser2.bmp')));
5  gain_Im= double(rgb2gray(imread('gain_stack.bmp')));
6  %imshow(Laser_Im/max(max(Laser_Im))
7  N=32;
8  e=1500/N;% pix_t0_micron ratio
9  for i=1:2*N
10     for j=1:2*N
11         MLaser(i,j)=Laser_Im(552-N+i,1064-N+j);
12         MP(i,j)=gain_Im(558-N+i,1092-N+j);
13         GG(i,j)=exp(-((i-N)^2+(j-N)^2)/((300/e)^2))
14         %for the mutimod laser
15         % MLaser(i,j)=Laser_Im(560-N+i,1096-N+j);
16         %
17         MG(i,j)=exp(-2*((i-N)^2+(j-N)^2)/(0.4*N)^2);
18     end
19 end
20 % this threshold is to done to eliminate the smudge
21 MZ=zeros(2*N);
22 for i=1:2*N
23     for j=1:2*N
24         if((i-N)^2+(j-N)^2 < 250)
25             MZ(i,j)=MLaser(i,j);
26         end
27     end
28 end
29 MLaser=MZ;
30 MLaser=MLaser/max(max(MLaser));
```

```

31 - MLK=MLaser;
32
33 - %% This part is used to scale the laser spot in any ratio
34 - Wl0=296;
35 - M=1;
36 - ZR_mm=0.001*(Wl0^2)*pi/(1.064);
37 - %ML=MG;
38
39 - %% first we normlaize the Images for intensity
40 - gainK=gain/max(max(gain));
41 - gain=gainK;
42 - %imwrite(gain,'third_block.jpg');
43 - %imshow(gainK+0.3*MLaser)
44 - %% normalize Image for integration
45 - gain=gain/(sum(sum(gain)));
46
47 - for z=90
48 -     L=176+(z/1.82);
49 -     W=sqrt(M)*Wl0*sqrt(1+(L/ZR_mm)^2)
50 -     ratio=(W/710)
51 -     WZ(z)=W;
52 -     ML_Big=imresize(MLaser,ratio);
53 -     M=length(ML_Big);
54 -     ML=zeros(2*N);
55 -     X=floor(abs(2*N-M)/2);
56 -     if ratio <=1
57 -         ML(X+1:X+M,X+1:X+M)=ML_Big(1:M,1:M);
58 -     end
59 -     if ratio >1
60 -         ML(1:2*N,1:2*N)=ML_Big(X+1:X+2*N,X+1:X+2*N);
61 -     end
62 -     %%
63 -     %%__if you want to test the theoritical gaussian spot
64 -     MLK=ML;
65 -     contour(MLK,20);
66 -     %imwrite(MLK,'spot55mm.jpg');

```

```

67 - ML=ML/ (sum (sum (ML) ) ) ;
68 - JK1=0;
69 - JK2=0;
70 - J1=0;
71 - J2=0;
72 - for i=1:2*N
73 -     for j=1:2*N
74 -         J1=J1+ML(i,j)*gain(i,j);
75 -         JK1=JK1+MLK(i,j)*gainK(i,j);
76 -         J2=J2+(ML(i,j)^2)*gain(i,j);
77 -         JK2=JK2+gainK(i,j)*gainK(i,j);
78 -     end
79 - end
80 - etta_pee=(J1^2)/(J2)
81 - ettaK=JK1/JK2
82 - end
83 - imshow(gainK+MLK)

```

LDQCW Quasi-CW Diode Laser Drivers



The LDQCW series is a new family of OEM diode laser pulsars designed for the emerging high power diode laser industry. Lumina Power LDQCW diode drivers can be configured for compliance voltage requirements up to 100V.

Maximum efficiency is realized with circuitry that minimizes losses across the output pulsing circuit. Compact size is possible due to the low-loss Zero Voltage Switching inverter and incorporation of planar magnetics.

Leakage current is less than 250uA, power factor is greater than 0.99 and conducted emissions meet stringent European regulations. No additional line filter is required to meet EN 55011 emission requirements.



26 Ward Hill Avenue, Bradford, MA 01835
Ph: 978-241-8260 / Fx: 978-241-8262
www.luminapower.com / sales@luminapower.com

ADVANTAGES

- ◆ <25uSec rise/fall times
- ◆ 200A pulsing capability
- ◆ Power factor correction
- ◆ Auxiliary +/-15V outputs
- ◆ Compliance voltage capability up to 100V
- ◆ Ideal for OEM applications
- ◆ ROHS Compliant

AVAILABLE POWER OUTPUTS ARE:

- ◆ LDQCW-50: 50Wavg
- ◆ LDQCW-250: 250Wavg
- ◆ LDQCW-600: 600Wavg
- ◆ Pulsed output current up to 200A

1. Fan T. Y. and Byer R. L., *Diode Laser-Pumped Solid-state Lasers*, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-24, №. 6, pp. 895-912, June (1988).
2. Hecht J., *Short History of Laser Development*, Optical Engineering, Vol. 49, № 9, pp. 091002.1-23, September (2010).
3. Svelto O., *Principals of Lasers*, Springer, 5th edition, 625 pages (2010).
4. Norman Hodgson, Horst Weber, *Laser Resonators and Beam Propagation: fundamentals, Advanced Concepts and Applications*, Springer, 2nd edition, 793 pages (2005).
5. Koechner W., Bass M., *Solid-State Lasers*, Springer, 422 pages (2003).
6. Newman R., *Excitation of the Nd³⁺ Fluorescence in CaWO₄ by Recombination Radiation in GaAs*, J. Appl. Phys. Vol. 34, №. 8, pp. 437, February (1963).
7. Ross M., *YAG Laser Operation by Semiconductor Laser Pumping*, Proceedings of the IEEE, pp. 196-197, February (1968).
8. Hirano Y. et al., *208-W TEM₀₀ operation of a diode pumped N:YAG rod laser*, Optics Letters, Vol. 24, №. 10, pp. 679-681 (1999).

9. Kracht D. et al., *407-W End-pumped Multi-segmented Nd:YAG Laser*, Optics Express, Vol. 13, №. 25, 10141-10144 (2005).
10. *TruDisk 6C: The next generation of innovation*, TRUMPF Laser Technology Center, (2015).
11. D.G. Hall, R.J.Smith, and R.R.Rice, " *Pump size effects in Nd:YAG lasers*," Appl. Opt., vol.19,
- 12.D.G. Hall, "*Optimum mode size criterion for low gain lasers*," Appl. Opt., vol.20, pp.1579-1583,1981.
13. W.P.Risk, "*Modelling of longitudinally pumped solid state lasers exhibiting reabsorption losses*," J. Opt. Soc. Amer. B, vol.5, pp. 1412-1423,1988.
- 14.T.Y. Fan, and Antonio Sanchez, "*Pump source requirements for end pumped lasers*," IEEE J. Quantum Electron.,vol.QE - 26, pp. 311-316, 1990.
- 15.Paolo Laporta and Marcello Brussard, "*Design criteria for mode size optimization in diode pumped solid state lasers*," IEEE J. Quantum Electron, vol. QE - 27, pp. 2319-2326, 1991.
16. Degnan, John J. "*Optimization of passively Q-switched lasers*." *IEEE journal of quantum electronics* 31.11 (1995): 1890-1901.

17. Zhang, Xingyu, et al. "**Optimization of Cr/sup 4+/-doped saturable-absorber Q-switched lasers.**" *IEEE Journal of Quantum Electronics* 33.12 (1997): 2286-2294.
18. Siegman A. E., *LASERS*, University Science Books, 1283 pages (1986).
19. Laporta P., Agni V. I., and Svelto O., *Comparative Study of the Optical Pumping Efficiency in Solid-state Lasers*, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-21, №. 8, pp. 1211-1218, August (1985).
20. Welsh D. F., *A Brief History of High-Power Semiconductor Lasers*, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-6, №. 6, pp. 1470-1477(2000).
21. Glukhikh I. V. et al., *Powerful Solid-State Transversely Diode-Pumped YAG:Nd Lasers with Improved Radiation Quality*, *Technical Physics*, Vol. 56, №. 8, pp. 1129-1134 (2011).
22. Wang Y. et al., *Optimization algorithm for the pump structure of diode side-pumped solid-state lasers*, *Optics and Laser Engineering*, Vol. 45, pp. 93-105 (2007).
23. Hua R. et al., *Versatile, compact, TEM00-mode resonator for side-pumped single-rod solid-state lasers*, *Appl. Optics*, Vol. 40, №. 15, pp. 2468-2474 (2001).

24. Xie W. et al., *Thermal lensing of diode side-pumped solid-state lasers*, Optics & Laser Technology, Vol. 32, pp. 199-203 (2000).
25. Xie W. et al., *Simple method of calculate the radial energy and temperature distributions in diode-pumped solid-state laser rods*, Opt. Eng., Vol. 40, №. 8, pp. 1568-1572 (2001).
26. Garcia Lopez J. H. et al., *Experimental study and modeling of a diode-side-pumped Nd:YVO4 laser*, Opt. Comm., Vol. 201, pp. 425-430 (2002).
27. Yao J. and Wang Y., *Nonlinear Optics and Solid-State Lasers: Advanced Concepts, Tuning-Fundamentals and Applications*, Springer, 697 pages (2012).