

الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
ماجستير البصريات "اختصاص ليزر"

التحكم بأنماط الإصدار لليزر صلب يضخ بليزر نصف ناقل من نمط الضخ الخلفي

Controlling the emission modes of Solid State laser end pumped by diode laser

أطروحة أعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة علوم البصريات - اختصاص الليزر

إعداد:

الطالبة: وفاء شاليش

إشراف:

د. ظافر موسى د. محمد دله

دمشق - ٢٠١٩

أعضاء اللجنة

- | | |
|----------------|-----------------------|
| رئيساً ومقرراً | ١- الدكتور مازن حسن |
| عضواً ومقيماً | ٢- الدكتور محمد سلوم |
| عضواً ومقيماً | ٣- الدكتور بهاء الصوص |
| عضواً ومشرفاً | ٤- الدكتور ظافر موسى |
| عضواً ومشرفاً | ٥- الدكتور محمد دله |

تم الدفاع يوم الثلاثاء بتاريخ ٣ / ١٢ / ٢٠١٩

كلمة شكر

إن الشكر والمن لله عز وجل الذي بلطفه ومنه الكريم تيسرت الأمور فأوجد الأسباب
وقدر الأقدار .

وأقدم شكري وامتناني لكل من بذل الجهد والتعب للإشراف على المشروع طول فترة
التحضير وأخص المشرفين:

د. ظافر موسى

د. محمد دله

وأشكر كل من ساعدني وقدم العون لي والنصيحة وأسأل الله أن يجزيهم عني كل الجزاء .

الإهداء

إلى من افتخر بالانتماء إليه

إلى العطاء الذي لا ينضب والفضل الذي لا ينسى

((والدي))

إلى من رافقتني صديقة أثق بها ومعلمة رائعة اعترت بها

إلى صاحبة البصيرة النافذة والقلب الطيب والروح المرحة

((والدتي))

إلى قلب لن أنساه أبداً

إلى من أعطاني المحبة والإخلاص والمودة

إلى من افتخر بمرافقتي له لسنوات

((زوجي))

إلى الذين فرحوا لفرحي وحزنوا لحزني

إلى الذين يفتخرون بنجاحي وأفتخر بنجاحهم

((أخوتي: وئام، أمل، الأء، هلا))

إلى رفاق دربي والأيام الجميلة واللحظات السعيدة

إلى من أسعدني وجودي بينهم

وخرسوا في داخلي أجمل الذكريات

((أصدقائي))

إلى الذي وقف بجانبني وأراه يدعمني في الأيام القادمة

المخلص

تم إجراء دراسة نظرية وتجريبية لتطوير طريقة جديدة للتحكم بتوليد الأنماط الليزرية Laguerre–Gauss (LG). فمن أجل توليد نمط معين دون غيره، يجب التحكم بالريح الخاص لنمط محدد مقارنة مع الأنماط المنافسة وقد تم ذلك بطريقتين مختلفتين للنمط المراد توليده. تعتمدان على تغيير معامل التغطية للنمط المطلوب بهدف الحصول على استطاعة العتبة المثلى. ويتم ذلك إما بتغيير موقع وعمق الضخ داخل القضيب الليزري أو بتجزئة حزمة الضخ إلى عدة حزم تتوافق مع التوضع الفراغي للنمط المطلوب إظهاره. لتحقيق هذا الهدف يتم باستخدام مجزئ حزمة متعدد الأنماط في نمط الضخ الخلفي في الحالتين.

Abstract

A theoretical and experimental study in attempt to develop a new method for controlling the generation of laser modes (has been carried out Laguerre–Gaussian (LG)). In order to generate a particular mode, the gain of that mode must be controlled compared to competing modes by two ways. The two methods are based on changing the effective mode volume of the desired mode in order to obtain the optimum threshold power of the mode to be generated either in the first method by changing the location and depth of pumping within the laser rod or in the second method by splitting the pumping beam into several bundles that correspond to the vacuum position of the pattern to be demonstrated using a multi–pattern beam splitter, using end pumping in both cases.

المحتويات

٩	قائمة الأشكال
١٢	قائمة المصطلحات
١٣	قائمة الاختصارات
١٥	المقدمة
١٦	الفصل الأول (الليزرات الصلبة)
١٧	(١) المقدمة
١٨	(٢) لمحة عن الليزر
١٩	(٣) المبادئ الأساسية ومكونات الليزر
٢١	(٤) المجاوب الليزري
٢٣	(٥) أنواع الليزرات
٢٣	(٥) الليزرات الصلبة
٢٤	(٦) آليات الضخ
٢٦	الفصل الثاني (الضخ الخلفي لليزرات الصلبة)
٢٧	(١-٢) أشكال الضخ
٢٨	(٢-٢) مبدأ عمل الليزر نصف الناقل
٣٠	(٣-٢) الضخ بواسطة ليف بصري واستخدام الديود الليزري في الألياف البصرية
٣٢	(٤-٢) الأنماط في المجاوب الليزري
٣٣	(٥-٢) حساب الريح للأنماط الليزرية
٣٤	(٦-٢) استخدام مبدأ تنافس الأنماط في الضخ الخلفي بواسطة ليف بصري
٣٦	الفصل الثالث (الضخ الخلفي بواسطة ليف متعدد الأنماط)
٣٧	(١-٣) المقدمة
٣٧	(١-١-٣) توصيف القضيب الليزري
٣٨	(٢-١-٣) توصيف بارامترات منبع الضخ

٤٧	٢-٣) مبدأ العمل بالضخ الخلفي بواسطة ليف وحيد
٤٨	٣-٣) الآليات المتبعة لتغير قيمة استطاعة عتبة النمط
٤٨	٤-٣) نمذجة لحساب معامل التغطية (الحجم الفعال)
٥٣	حساب استطاعة العتبة لأنماط مختلفة كتابع لموضع المحرقة
٥٧	النتائج التجريبية: حساب خسر النمط الليزري
٧١	الإزاحة وفق المحورين (X, Y)
٧٤	الفصل الرابع (الضخ الخلفي لليزر صلب بمنبع متعدد الألياف)
٧٤	١-٤) مبدأ العمل بالضخ الخلفي بواسطة منبع خرج سابع ألياف
٧٤	٢-١-٤) العمل بمنبع خرج سابع ألياف
٧٥	٣-١-٤) النتائج الحسابية
٨٠	٣-١-٤) النتائج التجريبية
٨٣	الخاتمة
٨٤	التوصيات
٨٥	المراجع
٨٦	الملحقات

قائمة الأشكال

- شكل (١-١) مخطط لمكونات النظام الليزري ١٩
- شكل (٢-١) الإصدار المحثوث للفوتونات من الذرة في الحالة المثارة (يسار) قبل، وأثناء (منتصف)، بعد (يمين) آلية الإصدار المحثوث ٢٠
- شكل (٣-١) أنواع المجاوبات الليزرية ٢١
- شكل (٤-١) المعاملات الخاصة بالنمط الأساسي. ٢٢
- شكل (٥-١) طيف الامتصاص لليزر (Nd: YAG) متوافق مع طيف الإصدار للديود الليزري عند (808 nm). ٢٥
- شكل (١-٢) (الضخ الجانبي مع مقطع عرضاني للحزمة)، و(الضخ الخلفي مع مقطع عرضاني للحزمة) ٢٧
- الشكل (٢-٢) بنية الليزر نصف الناقل ٢٨
- الشكل (٢-٣) بنية الليف البصري ٣٠
- شكل (٣-١): مخطط النظام البصري ٣٧
- شكل (٢-٣) معامل الامتصاص بدلالة طول الموجة ٣٧
- شكل (٣-٣) تبعية استطاعة الخرج لتيار الضخ ٣٨
- شكل (٣-٣) مخطط دائرة تبريد منبع الضخ ٣٩
- شكل (٤-٣) الشكل الحلقي لحزمة الضخ ٤٠
- شكل (٥-٣) طريقة حرف السكين ٤١
- شكل (٦-٣) قياسات الاستطاعة بدلالة موضع السكين ٤١
- شكل (٧-٣) الاستطاعة بدلالة موضع السكين بتقريب غاوصي ٤٢
- شكل (٨-٣) الاستطاعة بدلالة موضع السكين بتقريب أسطواني ٤٣
- شكل (٩-٣) نصف قطر حلقة الضخ بدلالة البعد ٤٤
- شكل (١٠-٣) البنية التجريبية للمنظومة الليزرية المستخدمة ٤٥
- شكل (١١-٣) العاكسية بدلالة عتبة الضخ ٤٦

- الشكل (١٢-٣) مخطط المجاوب الليزري والضخ بليف متعدد الأنماط ٤٧
- شكل (١٣-٣) توزيع شدة النمط (LG_{00}) وتوزعه الفراغي ٥١
- شكل (١٤-٣) توزيع شدة النمط (LG_{10}) ٥٢
- شكل (١٥-٣) الحجم الفعال للنمط (LG_{10}) والنمط (LG_{00}) ٥٢
- شكل (١٦-٣) استطاعة العتبة بدلالة موضع المحرقة لحزمة الضخ ٥٤
- شكل (١٧-٣) التوزيع الفراغي للحزمة الليزرية بواسطة كمييرا (CCD) لحزمة الأنماط ٥٥
- (LG) بتوزيعات شدة مختلفة
- الشكل (١٨-٣) التوزيع العرضي للنمط (LG_{10}) ٥٦
- الشكل (١٩-٣) التوزيع العرضي للنمط (LG_{20}) ٥٦
- شكل (٢٠-٣) الاستطاعة بدلالة انزياح حرف السكين عن المحور ٥٧
- شكل (٢١-٣) خصر النمط الليزري بدلالة بعد حرف السكين ٥٨
- شكل (٢٢-٣) استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند موضع المحرقة ($Z_0 = 1 mm$) ٦٢
- شكل (٢٣-٣) استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_1 = 0.5 mm$) ٦٣
- شكل (٢٤-٣) استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_2 = 0 mm$) ٦٣
- شكل (٢٥-٣) استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_3 = -0.5 mm$) ٦٤
- شكل (٢٦-٣) استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_4 = -1 mm$) ٦٥
- شكل (٢٧-٣) استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_1 = 1.5 mm$) ٦٦
- شكل (٢٨-٣) استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_1 = 2 mm$) ٦٦
- شكل (٢٩-٣) استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_3 = 2.5 mm$) ٦٧
- شكل (٣٠-٣) استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_4 = 3 mm$) ٦٨
- شكل (٣١-٣) استطاعة العتبة التجريبية والحسابية للنمط (LG_{00}) بدلالة عمق المحرقة ٧٠
- شكل (٣٢-٣) النمط الغاوصي مع مرشح لتخميد الاستطاعة ٧٠
- شكل (٣٣-٣) النمط الغاوصي (TEM_{00}) عند استطاعة ضخ ($P_{in} = 2.94$) وإزاحة ($\Delta x = 0 mm$) ٧١
- شكل (٣٤-٣) النمط الغاوصي (TEM_{10}) عند استطاعة ضخ ($P_{in} = 2.96 W$) وإزاحة ($\Delta x = 0.35 mm$) ٧١
- شكل (٣٥-٣) النمط الغاوصي (TEM_{20}) وإزاحة ($\Delta x = 0.4 mm$) ٧٢
- شكل (٣٦-٣) النمط الغاوصي (TEM) وإزاحة ($\Delta x = 0.5 mm$) ٧٢

٧٤	الاستطاعة بدلالة (r/w_{00}) للأنماط الثلاثة الأولى. [4]	شكل (١-٤)
٧٥	منبع متعدد الألياف (سبع ألياف)	شكل (٢-٤)
٧٩	النمط (LG_{01*})	الشكل (٣-٤)
٧٩	النمط (LG_{00})	الشكل (٤-٤)
٨٠	(أ) ستة ألياف متركزة حول ليف سابع لا يعمل، (ب) ستة ألياف متركزة حول ليف سابع يعمل	شكل (٥-٤)

قائمة المصطلحات

LASER	الليزر هو تضخيم للضوء عن طريق الإصدار المحثوث
Active laser medium	الوسط الفعال
Cavity	الحجرة
Optical resonator	المجاوب
Solid state Laser (SSL)	ليزر صلب
Liquid Laser (LL)	ليزر سائل
Gas Laser (GL)	ليزر غازي
(SCL)	ليزرات نصف ناقلة
Pulse Wave Laser (Puled)	ليزر نبضي
(CW) Continuous Wave Laser	ليزر مستمر
Laser diode	ليزر نصف ناقل
TEM	الأنماط الكهرومغناطيسية العرضية
Laguerre–Gauss (LG)	أنماط غاوصية Laguerre
Hermit– Gauss (HG)	أنماط غاوصية هرميتيه
Gaussian Modes	الأنماط الغاوصية
L_m^n	كثير حدود (Laguerre) من الدرجة (m)

قائمة الاختصارات

V_{eff}	الحجم الفعلي
S_n	التوزع الفراغي لشدة النمط الليزري
r_p	التوزع الفراغي لشدة حزمة الضخ
l	طول القضيب الليزري
P_{in}	استطاعة الضخ
r	نصف القطر
g_0	معامل الريح الفعلي بوحدة الطول
ν_l	تردد الليزر
V	الحجم
η_p	معامل التغطية
I_{sat}	كثافة شدة الإشباع
G	معامل الريح الكلي
R	عاكسيه المرآة
G_{th}	الريح عند العتبة
w_{l0}	خسر الحزمة الليزرية
σ	المقطع العرضي للإشعاع المحثوث
τ_f	عمر السوية الليزرية
L	طول المجاوب الليزري
α	معامل الامتصاص
n	قرينة انكسار مادة القضيب الليزري
D	القطر المركزي لليف الضوئي المستخدم
θ_p	تباعد حزمة الضخ
w_{p0}	خسر حزمة الضخ عند خروجها من الليف البصري
g_{\pm}	معامل يتعلق باستطاعة الضخ (P_{in}) والضياعات الكلية (γ) وشدة الإشباع (I_{sat})
c	ثابت معامل جودة الحزمة
w_p	نصف قطر حزمة الضخ
P_{th}	استطاعة العتبة

Z_0	موضع المحرقة داخل البلورة
Z_r	بعد رايليه
S_e	المردود
P_{out}	استطاعة الخرج
λ	طول الموجة
I	التيار الكهربائي
V	الجهد

المقدمة

أهداف البحث:

- طريقة جديدة للتحكم بإصدار الأنماط الليزرية عن طريق التحكم بالضخ.
- تباعد أصغري لأكبر مسافة ممكنة بأكبر استطاعة ممكنة.

أهمية البحث:

- التحكم بآليات إصدار الأنماط الليزرية ذات التناظر الأسطواني للاستفادة منها في تطبيقات متنوعة لما لها من أهمية في المجالات العملية التطبيقية.
- تمتلك الحزم الغاوصية تباعداً منخفضاً في الخلاء ولكن في الهواء يصبح تباعدها أكبر كونها تتأثر بشكل كبير بالاضطرابات أثناء انتشارها في الغلاف الجوي، ولكن تمتلك الأنماط الأعلى مرتبة حجماً أكبر لذلك تمتلك استطاعة أكبر وتأثيرها بالاضطراب أقل.

مخطط البحث:

يتضمن الفصل الأول مقدمة عن الليزر الصلبة ولمحة عن الليزر والمبادئ الأساسية ومكونات المجاوب الليزري ثم آليات الضخ. ويتضمن الفصل الثاني أشكال الضخ الخلفي لليزر الصلبة ومبدأ عمل الليزر نصف الناقل، حساب الريح للأنماط الليزرية. يتضمن الفصل الثالث آلية الضخ الخلفي بواسطة ليف متعدد الأنماط مقدمة وتوصيف القضيب الليزري ومبدأ العمل بالضخ الخلفي بواسطة ليف وحيد ثم الآليات المتبعة لتغيير قيمة استطاعة عتبة النمط، وحساب استطاعة العتبة لأنماط مختلفة كتابع لموضع المحرقة، النتائج التجريبية. يتناول الفصل الرابع الضخ الخلفي لليزر صلب بمنبع متعدد الألياف مع شرح المبدأ ثم العمل بمنبع خرجة سبع ألياف، ذكر النتائج النظرية والعملية.

الفصل الأول الليزرات الصلبة

١. المقدمة:

يحتوي الإشعاع المنبعث من معظم أجهزة الليزر على عدة ترددات ضوئية منفصلة، مفصولة عن بعضها البعض باختلاف التردد التي يمكن أن ترتبط مع أنماط مختلفة في المجاوب البصري. يتم تعريف كل نمط من خلال اختلاف الحقل الكهرومغناطيسي عرضانياً وعلى طول المجاوب الليزري.

وللتمييز بين نوعين من أنماط المجاوب: تختلف الأنماط "الطولية" عن بعضها البعض فقط في تردد الاهتزاز، بينما تختلف الأنماط "العرضية" عن بعضها البعض ليس فقط في تردد الاهتزاز، ولكن أيضاً في توزيعها في مستوى عمودي على اتجاه الانتشار.

يتم استخدام الرموز (HG) و (LG) لوصف النمط العرضي للموجة داخل المجاوب للإحداثيات الديكارتية والأسطوانية، على التوالي.

على الرغم من أن أنماط المجاوب تتكون من توزيع في المجال العرضي والطولي، إلا أنه من المفيد دراسة هذين المكونين بشكل منفصل لأنهما مسؤولان عن جوانب مختلفة من أداء الليزر. يتم تحديد الخصائص الطيفية لليزر، مثل طول التماسك، في المقام الأول من خلال الأنماط الطولية، في حين أن تباعد الحزمة، قطر الحزمة، وتوزيع الطاقة تحكمه الأنماط العرضية. وسنركز في هذا البحث هو التحكم بالأنماط العرضية.

تتبع أهمية الأنماط العرضية من تطبيقات الليزر المختلفة حيث تتأثر الأنماط الليزرية باضطرابات الغلاف الجوي هي واحدة من المشكلات الرئيسية في انتشار الأمواج في الغلاف الجوي التي تؤدي الى الاضطراب في شدة الإشارة المستقبلية (الاضطراب الناتج بسبب مرور الليزر عبر وسط بقرائن انكسار متفاوتة بسبب تغيرات في درجات الحرارة). يشوه الاضطراب صدر الموجة، ومن الصعب التخفيف من آثار الاضطراب في النمط الغاوسي القياسي. أما الأنماط النموذجية التي تم التخفيف فيها بشكل ملموس من الاضطرابات فهي أنماط Laguerre-Gauss (LG) وأنماط Hermit-Gauss (HG). بشكل عام، وجد أن أنماط المراتب العليا هي في الواقع أكثر أهمية من الأنماط الغاوسية (Gaussian) في التطبيقات وتتمتع أنماط (LG) بسعة معلومات أكبر من أنماط (HG) [1].

توجد تطبيقات كثيرة أيضاً تحتاج لضخ حلقي للوسط الفعال أو ضخ متعدد المناطق [2]، بخلاف النمط الغاوسي الذي يمكن الحصول عليه بسهولة فإن توليد الأنماط (LG) دون الحصول على النمط الغاوسي

عن طريق التحكم بتوزيع الضخ ضمن الوسط الفعال تحتاج لمعالجة مختلفة. لذلك في هذا سوف نركز البحث على إيجاد آليات لربط التوزيع الفراغي للضخ مع أنماط حزمة الليزر عن طريق استخدام معادلات الليزر مع أخذ معامل التغطية وتأثير ذلك على عتبة الليزر وتأثر عتبة الليزر بموضع محرقة حزمة الضخ. إحدى الطرق الموجودة هي اللامركزية أي إزالة محورية الضخ عن طريق إزاحة الضخ عن المحور البصري. وتبين أنه يمكن توليد أنماط مختلفة عن طريق تغيير قيمة انزياح محور الضخ، ومن سيئات الضخ أنه يكون متمركزاً في أجزاء صغيرة من الوسط الفعال ويؤدي ذلك إلى زيادة الإجهادات الحرارية الموضعية. من الأفضل للحصول على الأنماط (LG) ذات التناظر الأسطواني فإن الضخ إما أن يكون حلقياً أو أن تكون نقاط الضخ متوزعة بشكل متناظر ضمن الوسط الفعال وهذا ما سنقوم به ضمن هذا البحث.

يتم الحصول على ضخ حلقي بطريقتين: الطريقة الأولى بوضع فتحة دائرية على شكل حلقة أمام حزمة ضخ متوازية ضمن المجاوب الليزري ولكن هذه الطريقة تسبب ضياع في استطاعة الخرج، وتقلل من فعالية استطاعة الضخ [3]، والطريقة الثانية محرقة حزمة مصدر الضخ بليف بصري وحيد ضمن القضيب الليزري وهي الطريقة المستخدمة في البحث الحالي ليتم الحصول على الأنماط بتناظر أسطواني ثم تم استخدام مصدر للضخ متعدد الألياف [4].

٢. لمحة عن الليزر:

ظهر الليزر الأول تقريباً في منتصف القرن الماضي في (١٩٦٠). وأصبحت الليزرات تشكل جزءاً مهماً من الحياة الحديثة بعد أن ساهم تقريباً في العديد من جوانب حياتنا.

يتم استخدام الليزر في هذا الوقت للبحث في مجالات الفيزياء والعلوم الطبية والكيمياء وعلم الأحياء وعلوم الأرض والصناعة في كثير من التطبيقات منها القص بالليزر وفي صناعة السيارات وحتى يدخل الليزر في مجالات الترفيه منها (DVD, CD).

يستخدم الليزر لأهداف وأغراض مختلفة في المجالات الطبية مثل إزالة الشعر بالليزر وأيضاً مجالات طبية مهمة منها معالجة السرطانات، ويستخدم في المجالات العسكرية الأمنية الدفاعية مثل قانس المسافة لضمان دقة توجيه النيران.

إن كلمة (LASER) هي اختصار للعبارة:

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

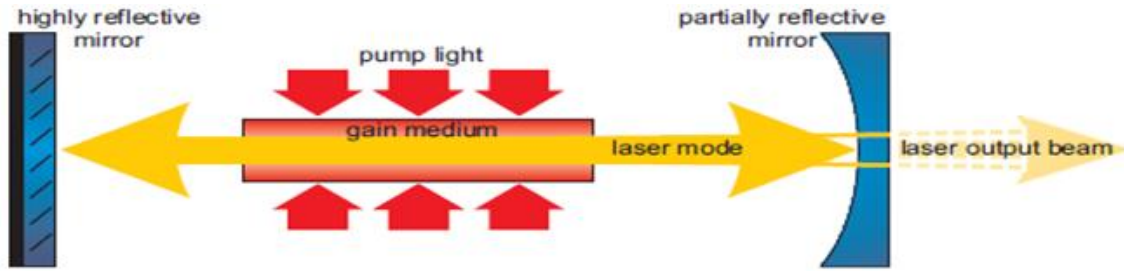
إن الليزر هو تضخيم للضوء عن طريق الإصدار المحثوث للإشعاع، وأشعة الليزر هي جزء من الإشعاع الكهرومغناطيسي، المكونة من فوتونات متماثلة في التردد، وتتميز بتمائل الطور، مما يؤدي إلى بروز

ظاهرة التداخل البناء بين هذه الموجات لتتحول إلى حزمة ضوئية لها استطاعة عالية التركيز. تستعمل بلورات خاصة كوسط فعال لليزر مثل: الياقوت (Ruby) المتميز بنقاؤه العالي أو العقيق (Nd: YAG)، من أجل تحفيز إنتاج الأشعة ذات طول الموجة الواحدة، فيؤدي تطابق الأشعة وانعكاسها لمرات متكررة بين مرآتين داخل المجاوب الليزري إلى تنظيم هذه الموجات وخروجها من أهم خصائص أشعة الليزر أنها تحتوي على طول موجي واحد فقط، وتعرف هذه الخاصية باسم (monochromaticity)، ويتحدد طول الموجة من خلال كمية الطاقة التي أطلقها الإلكترون في الذرة المثارة ليعود إلى مستواه الطبيعي من السوية الطاقية الأعلى. يعتبر التماسك (coherence) من أهم خصائص أشعة الليزر، حيث يسمح ذلك بتركيز الأشعة الليزرية في بقع صغيرة مقارنة بالإشعاع العادي. تتميز أشعة الليزر بكونها مُوجَّهة فيسمح لها بالانتشار لمسافات بعيدة بتباعد صغير.

٣. المبادئ الأساسية ومكونات الليزر:

يتألف الليزر من مجاوب ليزري ووسط مضخم للضوء يدعى الوسط الفعال (medium active laser) ويستخدم للتعويض عن ضياعات المجاوب بواسطة التضخيم الضوئي (optical amplification)، ويعتمد التضخيم الضوئي على مصدر للطاقة كما هو موضح في الشكل (1-1).

توجد أنواع مختلفة من المجاوبات إما إحدى المرآتين مقعرة والأخرى مستوية أو كلا المرآتين مقعرتين أو إحداهما مقعرة والأخرى محدبة، أو كلا المرآتين مستويتين. وتوضع المرآتان بشكل متقابل في المجاوبة الليزرية ويخضع الضوء لعدد من الانعكاسات بين المرآتين.



شكل (1-1) مخطط لمكونات النظام الليزري. [5]

تضمن المرآتان الأمامية والخلفية للمجاوب الليزري حصول تغذية راجعة للمضخم الضوئي وتكون المرآة الأمامية عاكسة جزئياً والمرآة الخلفية عاكسة كلياً.

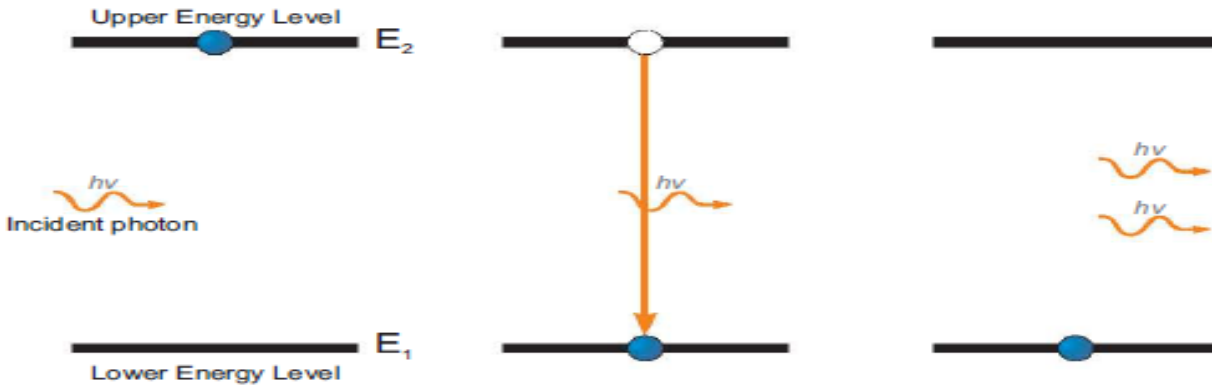
لكي يتم توليد الحزمة الليزرية يجب أن يكون الربح مساوياً أو أكبر من الضياعات ضمن المجاوب الليزري ومع ازدياد الربح ضمن الوسط الفعال تزداد استطاعة خرج الليزر.

يوجد نوعان للإصدار: الإصدار التلقائي والإصدار المحثوث. يتم إنجاز عملية تضخيم الضوء من خلال عملية الإصدار المحثوث.

تهبط الذرة أو الأيون المثار بعد فترة من الزمن من سوية طاقة عليا إلى سوية طاقة أدنى محرراً طاقة على شكل فوتون تدعى هذه العملية الإصدار التلقائي.

وهذه الفوتونات الأولية مهمة من أجل البدء بعملية إطلاق الليزر، حيث أن الفوتونات الناجمة عن الإصدار التلقائي التي تغادر موازية لمحور المجاوب ضمن الحجرة الليزرية تشكل البذرة لإطلاق فوتونات أخرى بواسطة الإصدار المحثوث حيث يقوم كل فوتون بنقل الذرة من سوية طاقة عليا إلى سوية طاقة دنيا مع إصدار فوتون ثانٍ مطابق للفوتون الأول.

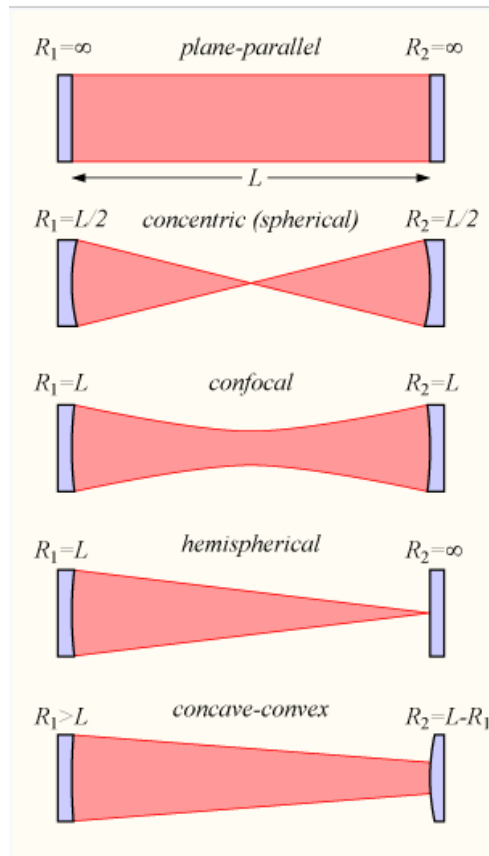
يوضح الشكل (٢-١)، ذرة في السوية المثارة الثانية (E_2) على يسار الشكل، إذا عبر فوتون بجوار الذرة المثارة وكان يملك طاقة مطابقة لفرق الطاقة بين السويتين الطاقيتين (E_2) و (E_1) فتكون ($E_2 - E_1 = h\nu$)، فيظهر الإشعاع المحثوث عن طريق إصدار فوتون من الذرة المثارة و هبوطها الى سوية دنيا وإطلاقها لفوتون بنفس طاقة الفوتون الأصلي القادم، لذلك تتم عملية تضخيم الفوتونات الواردة، تكون هذه العملية القاعدة لتضخيم الضوء في الليزر.



شكل (٢-١): الإصدار المحثوث للفوتونات من الذرة في الحالة المثارة (يسار) قبل، وأثناء (منتصف)، بعد (يمين) آلية الإصدار المحثوث. [5]

٤ . المجاوب الليزري:

المجاوب (optical resonator) أو المرنان الليزري أحد المكونات الأساسية في الليزر ويتكون المجاوب الليزري من مرآتين ويحصران بينهما الوسط الفعال، يوجد عدد أشكال للمجاوبات موضحة في الشكل (١-٣) حيث (L) هو المسافة بين المرآتين و (R₁) نصف تقعر المرآة الأولى و (R₂) نصف تقعر المرآة الثانية.



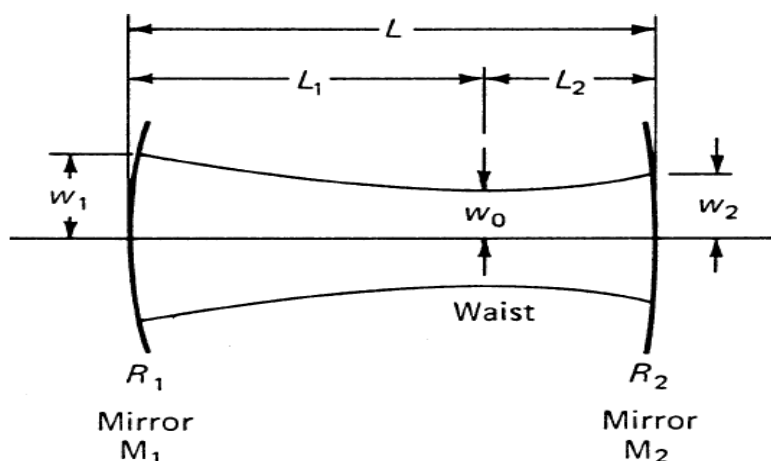
شكل (١-٣) أنواع المجاوبات الليزرية.

يوضح الشكل (١-٣) أنواع المجاوبات المختلفة المستخدمة في الأنظمة الليزرية منها ما يتكون من مرآتين مستويتين تدعى بالمجاوبة (plane- parallel) تكون نصف قطر تقعر المرآتين (لا نهائي) ($R_1 = \infty$)، ومنها ما يتكون من مرآتين مقعرتين تدعى بالمجاوبة (concentric) حيث أن نصف قطر تقعر المرآتين يكون مساوياً لنصف المسافة بين المرآتين ($R_1 = R_2 = L/2$)، والنوع الثالث من المجاوبات الذي يتألف من مرآتين مقعرتين تدعى بالمجاوبة (confocal) ولكن نصف قطر تقعر كل من المرآتين يكون مساوي لطول المسافة بين المرآتين ($R_1 = R_2 = L$)، ومنها يتألف من مرآة مستوية

والأخرى مقعرة تدعى بالمجاوية (hemispherical) حيث أن $(R_1 = L, R_2 = \infty)$ ، والنوع الأخير من المجاويات تكون إحدى المرآتين مقعرة والمرآة الأخرى محدبة تدعى بالمجاوية (concave-convex) حيث أن $(R_1 > L, R_2 = L - R_1)$.

تقوم المرايا بعكس الفوتونات المتولدة في الوسط عدداً من المرات ذهاباً وإياباً بين المرآة الخلفية التي تكون عاكسة للضوء بنسبة (100%) والمرآة الأمامية تتراوح عاكسيتها بين (10%-99%)، بعكس الفوتونات وإعادتها إلى داخل المجاوب إلى الوسط الفعال تتضخم مما يزيد عددها ويعوض النقص الناتج عن الضياعات ضمن المجاوب وعن الخرج المفيد من المرآة الأمامية.

بمجرد معرفة المعاملات الخاصة بالنمط الأساسي TEM_{00} الموضحة في الشكل (1-4)، فإن كل أنماط الترتيب العالي يتم ببساطة قياسها بطريقة معروفة.



الشكل (1-4) المعاملات الخاصة بالنمط الأساسي. [6]

يوضح الشكل (1-4) المعاملات الخاصة بالنمط الأساسي، يكون خصر النمط الغاوسي (W_0) على بعد (L_1) من المرآة الخلفية نصف قطر تقعرها (R_1) وبالتقدم على المحور (Z) أيضاً يمكن تحديد موقع خصر النمط الغاوسي (W_0) على مسافة (L_2) من المرآة الأمامية نصف قطر تقعرها (R_2) .

ويمكن تحديد خصر النمط الغاوسي على المرآتين الأمامية (W_2) والمرآة الخلفية (W_1) بالعلاقات التالية (1)، [6]:

$$w_1^4 = \left(\frac{\lambda R_1}{\pi} \right)^2 \frac{R_2 - L}{R_1 - L} \left(\frac{L}{R_1 + R_2 - L} \right)$$

$$w_2^4 = \left(\frac{\lambda R_2}{\pi} \right)^2 \frac{R_1 - L}{R_2 - L} \left(\frac{L}{R_1 + R_2 - L} \right) \quad (1)$$

وخصر النمط الغاوصي (W_0) يحدد بالعلاقة (2)، [6]:

$$w_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2} \quad (2)$$

ويمكن تحديد بعد خصر النمط الغاوصي عن المرآة الأمامية (L_2)، وبعد خصر النمط الغاوصي عن المرآة الخلفية بالعلاقة (3)، [6]:

$$L_1 = \frac{L(R_2 - L)}{R_1 + R_2 - 2L}$$
$$L_2 = \frac{L(R_1 - L)}{R_1 + R_2 - 2L} \quad (3)$$

أنواع الليزر: يوجد تصنيفات مختلفة لليزر:

(١) حسب نوع الوسط الفعال:

ليزر صلب (SSL) Solid state Laser، ليزر سائل (LL) Liquid Laser، ليزر غازي (GL) Gas Laser، ليزر نصف ناقل (SCL).

(٢) حسب نمط الإصدار:

ليزر نبضي (Pulsed) Pulse Wave Laser، ليزر مستمر (CW) Continuous Wave Laser.

(٣) حسب طول الموجة الإصدار:

ليزر فوق البنفسجي (UV)، ليزر مرئي (VIS)، ليزر تحت الأحمر (IR).

(٤) حسب استطاعة الليزر:

ليزر استطاعة منخفضة (LPL)، ليزر استطاعة متوسطة (MPL)، ليزر استطاعة عالية (HPL).

٥. الليزر الصلبة:

فعاليتها الكهروضوئية قليلة نسبياً لا تتجاوز (3-4%) عند الضخ بالطريقة التقليدية أي الضخ بالمصابيح الضوئية (اللمبات)، يتجاوز مردود الضخ الضوئي-ضوئي عند ضخ الليزر الصلبة بليزر آخر (كالديودات الليزرية) إلى (30%) إذا كان الضخ عرضاني ويكون المردود الكوانتي عند الضخ الطولاني (70%)، أما بخصوص آليات الإصدار إما أن يكون الإصدار حرّاً، أو إصدار نبضات بتبديل معامل جودة المجاوب أو قفل الأنماط حيث يكون عرض النبضة صغير جداً (عشرات البيكو ثانية).

مثال عن مواصفات الليزر الصلبة المستخدمة: طاقة النبضة العظمى من مرتبة 1 جول، عرض النبضة من 10 وحتى 30 نانو ثانية، تباعد الحزمة الليزرية من مرتبة 1 ميلي راديان، تردد النبضات 10 هرتز.

من أهم مميزات: الاستطاعة العالية مما يفتح مجالاً للتطبيقات اللاخطية وتوليد أطوال موجية جديدة من أهم سلبياتها: صعوبة تصنيع البلورات بالمواصفات المطلوبة، ومعدل تبديل العناصر البصرية والبلورات اللاخطية نتيجة تأثرها بشدة الليزر العالية مما يؤدي إلى لتخريب الطلاء.

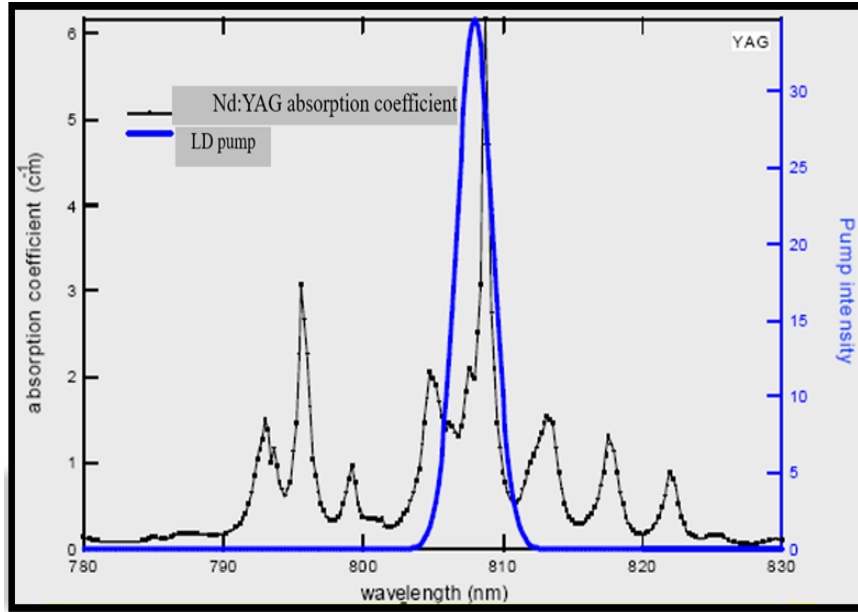
أهم الليزر بالحالة الصلبة: ليزر الياقوت (Ruby) بطول موجة (694 nm)، وليزر (Nd: YAG) بطول موجة (1064 nm)، وليزر التيتان-سفير (Ti: sapphire) القابل للتوليف.

٦. آليات الضخ:

ينجز الضخ عادة بعدة طرق:

- الضخ الضوئي: إما ضخ نبضي أو مستمر يصدر بشكل ضوء من اللمبة أو بواسطة ليزر آخر، وهذه الطريقة ملائمة لليزر السائلة وليزر الحالة الصلبة.
- الضخ الكهربائي: ملائم لليزر النصف ناقلة والليزر الغازية.
- الضخ الكيميائي: يستخدم عادة لمواد تكون في الحالة الغازية.

وفي دراستنا هذه سوف ندرس الضخ بالديود الليزري لليزر بالحالة الصلبة. يعتمد الضخ بالديودات بسبب الطاقة العالية والكفاءة للديود الليزري حيث طورت الديودات وأصبحت تملك أطوال موجية مختلفة مناسبة لحزم الامتصاص لليزر الصلبة كما يوضح الشكل (1-5).



شكل (١-٥) طيف الامتصاص لليزر (Nd: YAG) متوافق مع طيف الإصدار للديود الليزري عند (808 nm).

[6]

يوضح الشكل (١-٥): قمة إصدار الديود الليزري متناسبة مع قمة الامتصاص الثانية لليزر (Nd: YAG) عند طول الموجة (808 nm) أي متوافق مع مقطع الإصدار المحثوث لليزر (Nd: YAG) الذي يوافق الانتقال من $(4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2})$.

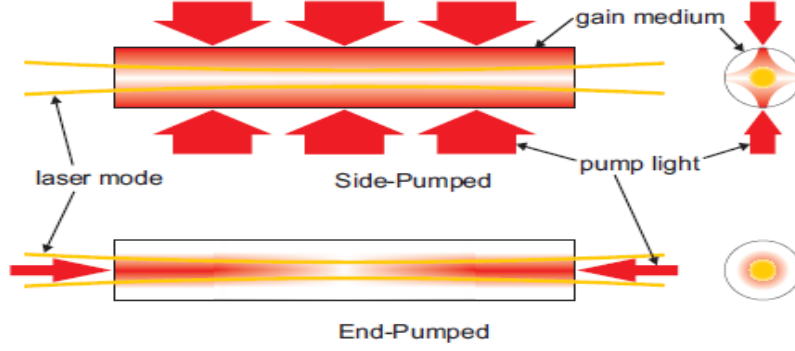
تتميز الليزرات نصف الناقلية بمردود كهربائي إلى ضوئي يتجاوز (50%) ويمكن أن يصل مردود الليزر الصلب إلى الدخل الكهربائي إلى (20%) عند ضخه بالليزرات نصف الناقلية المناسبة.

الفصل الثاني

الضخ الخلفي لليزرات الصلبة

١-٢ أشكال الضخ:

يوجد نوعان من الضخ الضوئي للأنظمة الليزرية بالحالة الصلبة باستخدام الليزرات نصف الناقل هما الضخ الخلفي (ضخ طولي) والضخ الجانبي (ضخ عرضي). يوضح الشكل (١-٢) نوعي الضخ (الخلفي والجانبي).



شكل (١-٢) (الضخ الجانبي مع مقطع عرضاني للحزمة)، و(الضخ الخلفي مع مقطع عرضاني للحزمة). [5]

من الشكل (١-٢)، يوضح الشكل الأعلى الضخ الجانبي حيث يضخ الوسط الفعال بشكل متعامد مع محور المجاوب الليزري (تثار معظم حجم البلورة في هذا الضخ ويمتص معظم ضوء الضخ)، يستخدم نمط الضخ الجانبي للحصول على استطاعات عالية من المجاوب الليزري ولكن نظراً لكون الضخ أقوى على المحيط منه في المركز يكون شكل الحزمة متعدد الأنماط ويكون من الصعوبة الحصول على نمط غاوسي في مثل هذا النوع من الضخ إلا باستخدام تدابير خاصة تزيد من تعقيد المجاوب ولكن الميزة الأساسية هو الحصول على استطاعات عالية يمكن أن تتجاوز الكيلو واط في نمط الضخ الجانبي.

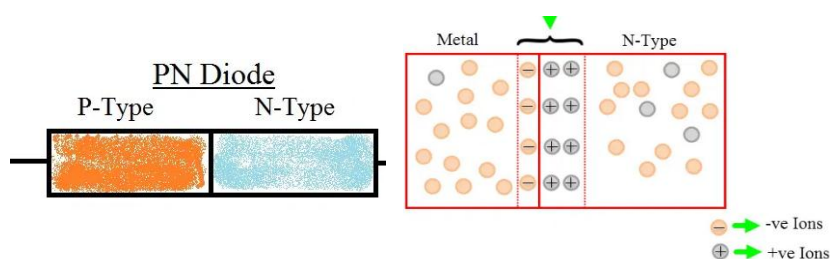
في الضخ الخلفي يكون الضخ طولياً على طول الوسط الفعال (co-linearly) مع نمط المجاوب، الضخ الخلفي أكثر كفاءة من الضخ الجانبي (بسبب التوافق بين الضخ والنمط الليزري) حيث يكون الضخ في المنطقة التي يكون فيها النمط الليزري، ونحصل في الضخ الخلفي بليزر نصف ناقل على حزمة ليزرية ذات مواصفات عالية ونمط غاصي تماماً بمرود عالي ولكن باستطاعات منخفضة.

يؤدي التراكم المكاني الجيد في نمط المجاوب وحجم الضخ في الوسط الفعال إلى تقليل الحمل الحراري وبما أن جوانب البلورة لا يمكن الوصول إليها بالضخ ويكون سطح البلورة على اتصال مباشر مع حامل التبريد مما يسهل عملية التبريد وسيئة الضخ الخلفي هي تطلب الضخ الخلفي لمصدر ضخ بجودة حزمة جيدة لكي تكون حزمة الضخ موازية بشكل تام على طول البلورة أو على الأقل طول الامتصاص والسيئة الأخرى يتم امتصاص معظم حزمة الضخ في نهاية البلورة حيث لا يوجد تلامس مع سطح التبريد، وتؤدي الحرارة المتبقية إلى إجهادات حرارية وتشكل عدسات حرارية.

تحقق ليزرات الضخ الخلفي جودة حزمة أفضل من ليزرات الضخ الجانبي المشابهة، في هذا العمل سوف نأخذ بعين الاعتبار تشكيلة الضخ الخلفي بواسطة (diode laser).

٢-٢) مبدأ عمل الليزر نصف الناقل:

ليزر نصف ناقل Laser diode أو Semiconductor laser ويطلق عليه أحياناً الديود الليزري يشبه الديود الباعث للضوء حيث يتم توليد حزمة ليزر عند منطقة الوصلة للديود، يرد في الشكل (٢-٢) بنية الليزر نصف الناقل.



شكل (٢-٢) بنية الليزر نصف الناقل

يوضح الشكل (2-2) بنية ليزر نصف الناقل، يتكون من بلورة من مادة نصف ناقلة يتم تطعيمها بعناصر مانحة وأخرى مستقبلية لتصبح على شكل وصلة موجب_ سالب (PN junction) أي ثنائي (diode) ولذلك يغلب على اسمه ثنائي الليزر (laser diode)، أي يتكون الديود الليزري من وصلة P-N هي عبارة عن المادة الفعالة أو المنطقة النشطة (I) ويتم تصنيع الديودات الليزرية باستخدام أنصاف نواقل من نوعين (n) و (p) ذات فجوة النطاق المباشرة. يصنع الديود الليزري باستخدام إحدى تقنيات التتمية البلورية، والتي تبدأ عادة من الركيزة (N)، وفوقها تتم تنمية الطبقة النشطة (I)، تليها الركيزة (P)، والذي تضخ إليه الطاقة باستخدام التيار الكهربائي، ويتم تشكيل وجهين متعامدين من أوجه البلورة لتشكيل المجاوب الليزري للحصول على التغذية الخلفية وأما عملية الضخ فتتم من خلال تمرير تيار في هذه الوصلة وإذا ما تجاوزت قيمة التيار قيمة حدية هي قيمة العتبة (threshold) فإن الثنائي يبدأ بتوليد ضوء الليزر. في الليزر نصف الناقل يكون سمك المادة الفعالة بأجزاء الميكرونات، ويسمح ذلك للحصول على كثافة تيار عالية جداً قد تصل لعشرات الآلاف أمبير للسنتيمتر المربع. إن هذا السمك الضئيل للطبقة الفعالة يؤدي إلى توليد حزمة ليزرية صغيرة الأبعاد وعند خروج الليزر يزيد من زاوية تباعد الحزمة بسبب الانعراج ولهذا يتطلب استخدام عدسات تجميع للحصول على شعاع ليزري بزاوية تباعد صغيرة. ولا تستخدم المواد نصف الناقلة الأساسية وهي السيليكون والجرمانيوم في هذه الليزرات لكونها ذات فجوة طاقة غير مباشرة بل يتم استخدام مواد نصف ناقلة مركبة من عناصر العامود الثالث والخامس في الجدول الدوري التي تسمح

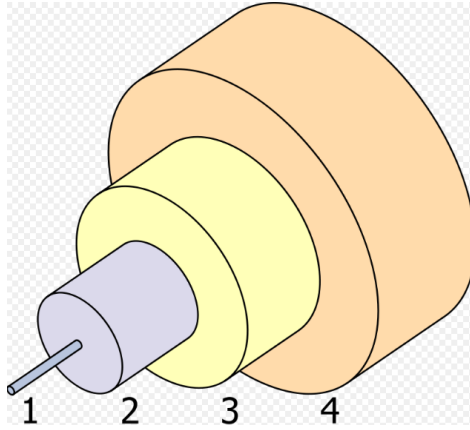
بالحصول على مدى واسع من الأطوال الموجية. بسبب إمكانية تغير نسب المركبات ضمن تراكيب من ثلاثة أو أربع عناصر، مثال فإن مادة زرنيخ الغاليوم (GaAs) تسمح بتصنيع ليزر بطول موجي من ٨٠٠ إلى ٩٠٠ نانومتر ومادة (AlGaAs) تسمح بتصنيع ليزر تتراوح أطواله الموجية بين ٦٣٠ و ٩٠٠ نانومتر بينما يمكن لمادة (InGaAsP) تغطية ترددات تتراوح أطوالها الموجية بين ١٠٠٠ و ٢١٠٠ نانومتر.

يتميز هذا النوع من الليزر (ليزر شبه الموصلات- ديود الليزر) بما يلي:

- ١ - صغر الحجم والمردود العالي.
 - ٢ - إمكان الضخ المباشر باستخدام تيار كهربائي صغير وعند جهود صغيرة نسبياً.
 - ٣ - قد يصل المردود إلى %٦٠.
 - ٤ - إمكانية التحكم بشدة الشعاع الخارج مباشرة بواسطة التيار الكهربائي.
 - ٥ - الكلفة المنخفضة للواط.
 - ٦ - نصف قطر المنطقة الفعالة صغير نسبة لنصف قطر مقدمة الديود (على افتراض أنه دائري في أغلب الأحيان).
 - ٧ - ذو عمر تشغيلي طويل مما يمكن من الاعتماد عليه في الاستخدامات التي يكون من الصعب القيام بعمليات تبديل القطع فيها أي أنه ذو وثوقية عالية.
- بسبب هذه الميزات انتشر استخدامها في التطبيقات كما في أنظمة الاتصالات الضوئية وفي أدوات القياس الدقيقة للمسافات والأطوال.

٢-٣) الضخ بواسطة ليف بصري واستخدام الديود الليزري في أنظمة الألياف البصرية:
يستخدم الديود الليزري في العديد من الصناعات والأجهزة وخاصة في مجال الاتصالات باستخدام الألياف البصرية، حيث يكون الديود الليزري مقترناً مع دخل الليف البصري وتعتمد الليزرات الصناعية الألياف البصرية لنقل الحزمة الليزرية (التي تكون عادة ألياف متعددة الأنماط).

تتكون الألياف الضوئية من اسطوانتين متحدتي المركز تسمى الأولى بالقلب Core محاطة بأسطوانة أخرى تسمى الغلاف Cladding ثم الغطاء الواقي Buffer Coating والغلاف الخارجي للكابل (jacket) الموضحة في الشكل (٢-٣):



الشكل (٢-٣): بنية الليف البصري

يوضح الشكل (٢-٣) بنية الليف البصري يتكون من:

١. القلب (Core) وهو عبارة عن زجاج رفيع (أسطواني) ينتقل فيه الضوء ويصنع من السليكا

Silica المطعمة بالجرمانيوم مثلا Ge-Silica

٢. الغلاف (Cladding) مادة تحيط باللب الزجاجي (أسطوانة أخرى محيطة) وتعمل على حفظ

الضوء في مركز الليف الضوئي وهي مصنوعة من السليكا، وذلك لكي يكون معامل انكسار القلب أكبر من معامل انكسار الغلاف، وهو الشرط المطلوب لحصول ظاهرة الانعكاس التام، الذي هو أساس توجيه الضوء في الألياف الضوئية، إذ ينعكس الضوء كلياً ويتكرر الانعكاس ينتشر الضوء داخل قلب الليف الضوئي ويصل إلى النهاية الأخرى للليف.

٣. الغطاء الواقي (Buffer Coating) غلاف بلاستيكي يحمي الليف البصري

من الرطوبة ويحميه من الضرر والكسر.

بعد ذكر بنية الليف البصري سنتطرق أهم العوامل التي تؤثر على عمل الليف والتي يجب مراعاتها عند استخدامها مع الألياف البصرية وهي:

١- طول الموجة المركزي:

و نعني بذلك طول الموجة الذي يشع عنده الليف أقصى طاقة ممكنة أي أنه يعمل بطاقة القصوى فيجب الانتباه إلى مقدار الضياعات الضوئية في الليف والتي تسبب خسارة في الشدة الضوئية وبالتالي اختيار النوع الأنسب من ديودات الليزر لاستخدامه.

٢ - عرض طيف الإصدار:

عند دراسة ديود الليزر بشكل نظري وعلى اعتبار أنه مثالي فإن هذه الدراسة تظهر أن ديود الليزر يصدر ضوءاً وحيداً طول الموجة غالباً، ولكن في المجال العملي يلاحظ أن الضوء الصادر لا يكون وحيداً وإنما يتألف من مجال طيفي حول طول الموجة المركزي وهذا المجال يدعى بعرض طيف

الإصدار للمنبع.

٣ - نمط الإصدار للديود:

يؤثر نموذج الإصدار لديود الليزر على كمية الضوء الذي يمكن تجميعه في الليف البصرية و بالتالي إرساله عبره مما يؤثر على مدى الإرسال و دقته و للحصول على أفضل النتائج يجب أن يكون نصف قطر المساحة المضاءة بالليزر مساوية لنصف قطر نواة الليف البصري و من الممكن أن يعدل و يقوّم لأداء أفضل عن طريق إضافة بعض العدسات المصممة في طريق الشعاع لمحرقته في مساحة صغيرة.

٤ - الاستطاعة الضوئية:

يتم الحصول على أفضل النتائج نتيجة لاستخدام ديود الليزر عندما نتمكن من تجميع أكبر كمية ممكنة من الضوء وحقنها خلال الليف البصري وبالتالي تكون استطاعة الخرج للديود كافية لجعل الحساس الضوئي في الطرف الآخر من الليف يتحسس للشعاع المنقول مع مراعاة ليونة الليف و الضياعات في مناطق الاتصال والممانعات الأخرى التي تؤثر على الشعاع في الليف.

٥ - سرعة الاستجابة:

و نعني بسرعة الاستجابة هي إمكانية تعديل شدة الحزمة الليزرية لليزر نصف ناقل بترددات عالية تتجاوز الجيجا هرتز، وهذا يجعل الليزر نصف ناقلة مناسبة لأنظمة الاتصالات بالألياف البصرية.

٦ - الحرارة:

تتأثر ديودات الليزر كغيرها من العناصر الإلكترونية بالحرارة حيث تتغير عتبة الإصدار و هي قيمة التيار التي يبدأ عندها الديود بإصدار إشعاع الليزر، عند تغير درجة الحرارة يمكن أن تحدث عدة عوامل منها :

- تغير تيار العتبة: حيث كلما انخفضت درجة الحرارة كلما انخفض تيار العتبة.

- تغير ميل منحنى الكفاءة و الذي يعبر عن تغير الاستطاعة مع تغير شدة التيار، حيث يقل هذا الميل كلما ارتفعت درجة الحرارة، و لهذا يتطلب تبريد الليزر للحفاظ على تيار العتبة عند قيمة معينة.

يتم استخدام الضخ الخلفي بواسطة الليزر نصف الناقل (diode laser) لامتلاكه ميزات مثل تباعد قليل وقدرة تحكم بحزمة الضخ بواسطة الليزر نصف الناقل (diode) ولكن يحتاج الديود الليزري الى بصريات للحصول على حزمة ضخ بتجانس دائري ضمن القضيب الليزري، لذلك تعتمد آلية وصل الديود الليزري الى ليف بصري كمصادر لضخ ليزرات الحالة الصلبة في حالة الضخ الخلفي للحصول على حزمة ضخ ذات تجانس دائري بمواصفات عالية.

في بحثنا سوف نستخدم مادة (Nd: YAG) وهي مادة ليزرية صلبة سيتم ضخها بديود ليزري مقترن مع ليف بصري، لأن ليزر الحالة الصلبة الذي يضخ بديود ليزري مقترن مع ليف بصري يزودنا بكفاءة وشدة

عالية وخاصة في الضخ الخلفي. كما أن الضخ بليف بصري يحمي المجاوب ويجعله معزولاً عن ضجيج مصدر الضخ كما أنه يعطي خرجاً لحزمة الضخ ذات تناظر أسطواني مقارنة مع الوضع غير المتناظر لخرج الديود الليزري وهذا ما يسمح بتوليد حزمة ليزر في الليزر الصلب ذات مواصفات تناظرية عالية.

٢-٤) الأنماط في المجاوب الليزري:

ينشأ الليزر في الوسط الفعال ضمن المجاوب الليزري. في المجاوب الليزري، لا يمكن أن توجد إلا موجات دائمة ذات أطوال موجية معينة (موجات ذات تداخل بناء)، والباقي يلغى بالتداخل الهدام. ويمكن تعريف النمط الليزري بأنه موجة مستقرة في المجاوب الليزري. نرى أن الضوء المحثوث ينتقل اياً ذهاباً بين المرايا ويتداخل ضمن المجاوب الليزري، ونتيجة لذلك فإن الضوء الذي تكون مسافة رحلته ذهابه وإيابه هي مضاعفات عدد صحيح من الطول الموجي (λ) يمكن أن يصبح موجة دائمة.

هذه الأنماط مسموح بها لأنها تحتوي على تداخل بناء، وبالتالي يمكنها الحفاظ عليها عندما يكون الريح في وسط الريح مساوياً للخسارة (والعوامل التي تسبب توهين في الضوء أنه ينفذ من الوجه المستوي أو الخسائر الناتجة عن الامتصاص في المجاوب الليزري) والأنماط أعلاه هي الأنماط الطولانية.

عند دراسة المقطع العرضي للشعاع الليزري، نجد أن كثافة الضوء يمكن أن تكون ذات توزيعات مختلفة (أنماط). وتدعى هذه الأنماط بالأنماط العرضانية (Transverse modes).

في ليزر ذو تناظر أسطواني، يتم وصف أنماط الوضع العرضي كجاء شكل الحزمة الغاوصية مع كثير حدود)، في هذا البحث سيتم دراسة الأنماط العرضانية (Transverse modes)

٢-٥) حساب الريح للأنماط الليزرية:

تتوفر في الكثير من الأدبيات [7]، [8] دراسة أثر الضخ (توزع وشدة) على توليد نمط ليزري حيث يمكن دراسة تداخل التوزع المكاني للنمط الليزري مع التوزع المكاني لطاقة الضخ بهدف تحديد طاقة العتبة والفعالية لنمط ليزري معين.

سنقدم ضمن هذا العمل دراسة لأثر التوزع المكاني لطاقة الضخ على توليد نمط ليزري معين، وسنقوم بتطبيق نتائج هذه الدراسة عملياً لتوليد أنماط (LG) من الشكل (LG_{0n})، هذه التوابع التحليلية تعتمد على خصائص الوسط الفعال ومعامل جودة حزمة الديود الليزري. تعتمد آلية التوليد على اختيار القيمة المثلى لقطر بقعة الضخ (w_p)، وموقع هذه البقعة داخل القضيب الليزري، والقيمة المثلى لطاقة الضخ لكل نمط.

معامل التغطية (معامل التداخل) هو آلية لربط التوزيع الفراغي للضخ مع التوزيع الفراغي للنمط الليزري يحسب عن طريق استخدام معادلات الليزر وتأثير ذلك على عتبة الليزر وتأثر عتبة الليزر بموضع محرقة حزمة الضخ.

كما سيوضح لاحقاً إن معامل الريح الفعلي (g_0) متعلق بالحجم الفعلي (V_{eff}) أو التداخل بين التوزيع الفراغي لحزمة الضخ والتوزيع الفراغي للنمط الليزري، التي بدوره معامل الريح الفعلي يؤثر على استطاعة العتبة (P_{th}) لظهور كل نمط.

يعبر المقدار (V_{eff}) عن الحجم الفعلي لحزمة الضخ للنمط الليزري من أجل كل نمط ليزري محدد، [8]:

$$V_{eff} = \left(\iiint s_n(r, z) * r_p(r, z) dV \right)^{-1} \quad (4)$$

حيث أن: ($s_n(r, z)$) التوزيع الفراغي لشدة النمط الليزري المحدد داخل المجاوب الليزري بتناظر أسطوانى، ($r_p(r, z)$) التوزيع الفراغي لشدة حزمة الضخ.

• والمهم هو حساب قيمة الريح الفعلي بوحدة الطول بين شدة النمط الليزري وشدة الضخ بليف بصري الذي يتعلق بالمعامل (V_{eff}) الحجم الفعال:

$$g_0 = 2 * \eta_p * P_{in} / V_{eff} * I_{sat} \quad (5)$$

(P_{in}) استطاعة الضخ، (I_{sat}) تحسب كثافة تيار الإشباع، [4]:

$$I_{sat} = \frac{h \nu_l}{\sigma * \tau_f} = \frac{1.86 * 10^{-19}}{2.8 * 10^{-19} * 230 * 10^{-6}} = 2800 \text{ W/cm}^2 \quad (6)$$

(ν_l) تردد الحزمة الليزرية، ($\sigma = 2.8 * 10^{-19} \text{ cm}^2$) المقطع العرضي للإصدار المحثوث، ($\tau_f = 230 * 10^{-6} \text{ s}$) عمر السوية الليزرية لبلورة (Nd: YAG)، [4].

• استطاعة العتبة الحسابية (P_{th}) تتعلق أيضاً بالمعامل (V_{eff}) الحجم الفعال [7]:

$$P_{th} = \frac{\gamma * I_{sat}}{\eta_p * l} * V_{eff} \quad (7)$$

يعبر المقدار (l) طول الوسط الفعال، (γ) الضياع الكلي.

٦-٢) استخدام مبدأ تنافس الأنماط في الضخ الخلفي بواسطة ليف بصري:

تنافس الأنماط هو مفهوم ظهور نمط على حساب نمط آخر، ونستطيع التحكم بإظهار النمط المطلوب عن طريق التحكم بمعامل ربحه الكلي (G) الذي يجب أن يكون معامل الرياح الكلي للنمط المطلوب أعلى من معامل الرياح لأنماط الأخرى الغير مرغوبة، ومعامل الرياح الكلي يتعلق بمعامل الرياح الفعلي بوحدة الطول (g_0) وبدوره معامل الرياح الفعلي يتعلق بالحجم الفعال (V_{eff}).

حساب معامل الرياح الكلي:

$$G = e g_0 * l \quad (8)$$

وعند حساب معامل الرياح الكلي للنمط المطلوب يجب أن يكون أكبر من معامل ربح العتبة وبدوره معامل ربح العتبة أكبر من معامل الرياح الكلي للنمط الغير مرغوب ظهوره.

ولحساب قيمة ربح العتبة ضمن القضيب الليزري بطول (l) عند قيمة محددة لعاكسية المرآة (R) حيث (ϵ) الضياعات الداخلية:

$$I_0 = I_0 * G_{th}^2 * R * (1 - \epsilon) \quad (9)$$

تكون قيمة الرياح عند العتبة عند عاكسية المرآة المستخدمة:

$$G_{th} = \sqrt{\frac{1}{R(1 - \epsilon)}} \quad (10)$$

مثلاً للتحكم بظهور النمط (LG_{01}^*)، أي هو النمط المنافس المطلوب إظهاره على حساب النمط (LG_{00}) يجب تحقيق الشرط التالي:

$$G_{00} < G_{th} < G_{01}^* \quad (11)$$

الفصل الثالث

الضخ الخلفي بواسطة ليف متعدد الأنماط

٣-١) المقدمة:

سوف ندرس إمكانية الحصول على أنماط مختلفة بواسطة التحكم بالضخ من ليف وحيد متعدد الأنماط وليتم ذلك سوف يتم توصيف القضيب الليزري وتوصيف منبع الضخ.

٣-١-١) توصيف القضيب الليزري:

يتكون النظام الليزري من مجاوبة ليزرية ووسط فعال ومصدر للضخ يكون نمط الضخ هو ضخ خلفي بواسطة ديود ليزري مقترن مع ليف ضوئي من طراز (WSLX-808-007-H)، بطول موجة $(\lambda = 808 \text{ nm})$.

والوسط الفعال هو قضيب ليزري (Nd: YAG)، طول الوسط الفعال $(l = 7 \text{ mm})$ وقطر $(2r = 4 \text{ mm})$ بإشابة $(\text{Nd} = 1.1\%)$.

المجاوبة ليزرية بطول $(L = 60 \text{ mm})$ مكونة من مرآتين، المرآة الخلفية هي مرآة مستوية بنفاذية (100%) لطول موجة الضخ $(\lambda = 808 \text{ nm})$ وعاكسية (99.8%) لطول موجة الليزر $(\lambda = 1064 \text{ nm})$ ، والمرآة الأمامية مقعرة بعكاسيه أقل نصف قطر تقعر المرآة $(r = 300 \text{ mm})$ وعاكسيتها المرآة المستخدمة $(R = 80\%)$ و $(R = 70\%)$ ، عند اختيار هذه المجاوبة بهذه المميزات تم تحقيق شرط استقرار المجاوبة :

$$0 < g_1 * g_2 < 1 \quad (12)$$

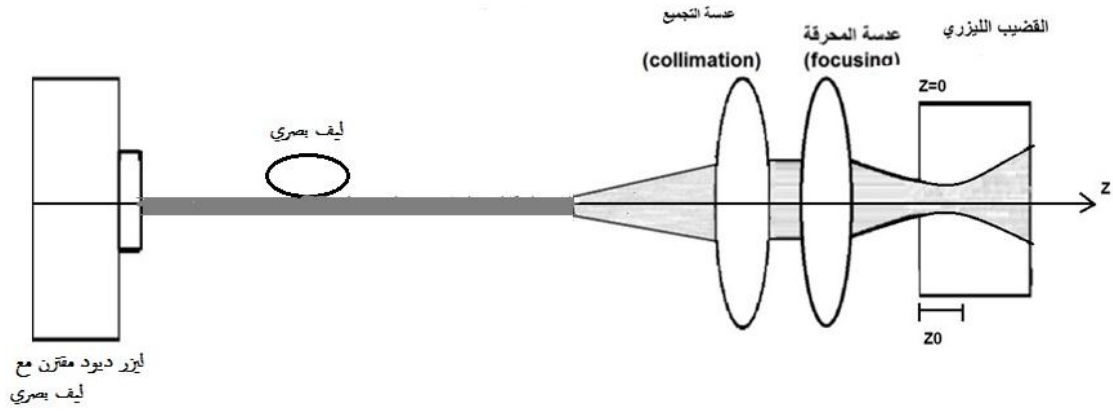
$$0 < \left(1 - \frac{L}{r_1}\right) * \left(1 - \frac{L}{r_2}\right) < 1 \quad (13)$$

$$0 < 0.8 < 1$$

أي أن $(g_1 * g_2 = 0.8)$ تقع ضمن منطقة الاستقرار، فالمجاوبة مستقرة.

وأمام المجاوبة الليزرية تم وضع نظام بصري للضخ الموضح في الشكل (٣-١) مكون من عدستين بأبعاد محددة العدسة الأولى عدسة التجميع (collimation) ببعد محرق $(f = 15 \text{ mm})$ لتجميع حزمة الضخ من الديود الليزري والعدسة الثانية هي عدسة محرقة (focusing) ببعد محرق $(f = 15 \text{ mm})$ لمحرقة حزمة الضخ ضمن الوسط الفعال، يتم تطبيق تغذية على الديود الليزري بواسطة كتلة تغذية مخبرية. بواسطة كاميرا (CCD) يتم تصوير الحزمة الليزرية بطول موجة بطول $(\lambda = 1064 \text{ nm})$ والأنماط المتشكلة ويتم عرضها على شاشة الإظهار، يتم قياس أيضاً الاستطاعة للحزمة الليزرية بواسطة مقياس

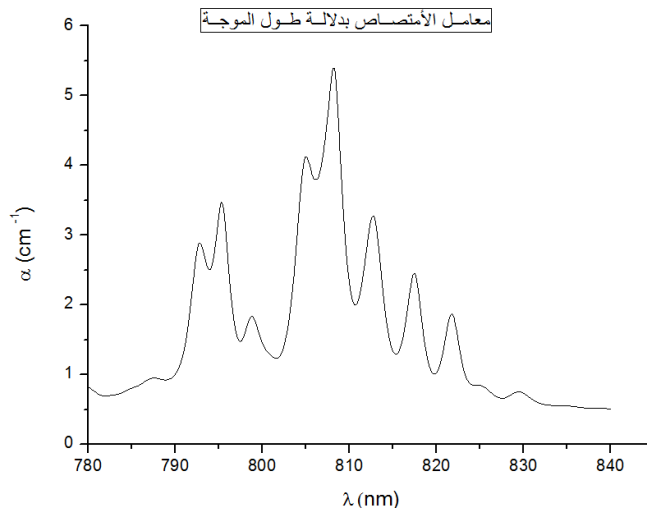
استطاعة لقياس الاستطاعات التي تصل حتى (10 W)، بطراز (THORLABS(PM100D)) مع حساس بطراز (S425C).



شكل (٣-١): مخطط النظام البصري

• تحديد معامل الامتصاص للقضيب الليزري.

تم إجراء القياسات على قضيب (Nd: YAG) بطول (0.7 cm) باستخدام جهاز (A560- spectrophotometer) لقياس النفاذية والعاكسية للعناصر البصرية في المجال المرئي ومجال (UV) أي في مجال الأطوال الموجية (190- 1100 nm)، لقياس معامل الامتصاص الخاص.



شكل (٢-٣) معامل الامتصاص بدلالة طول الموجة الضخ

ويظهر الشكل (٢-٣)، معامل الامتصاص بدلالة طول الموجة. نجد أن أكبر قيمة لمعامل الامتصاص هي عند طول الموجة (808 nm) وتبلغ ($\alpha = 5.3 \text{ cm}^{-1}$).

٣-١-٢) توصيف بارامترات منبع الضخ:

أولاً: توصيف استطاعة منبع الضخ:

أجري اختبار للديود الليزري المستخدم، بعد وصل الديود الليزري مع الليف الخاص به ووصله الى كتلة تغذية لتأمين تغذيته، ثم وضع مقياس استطاعة لقياس الاستطاعات التي تصل حتى (10 W)، بطراز (THORLABS(PM100D)) مع حساس بطراز (S425C).

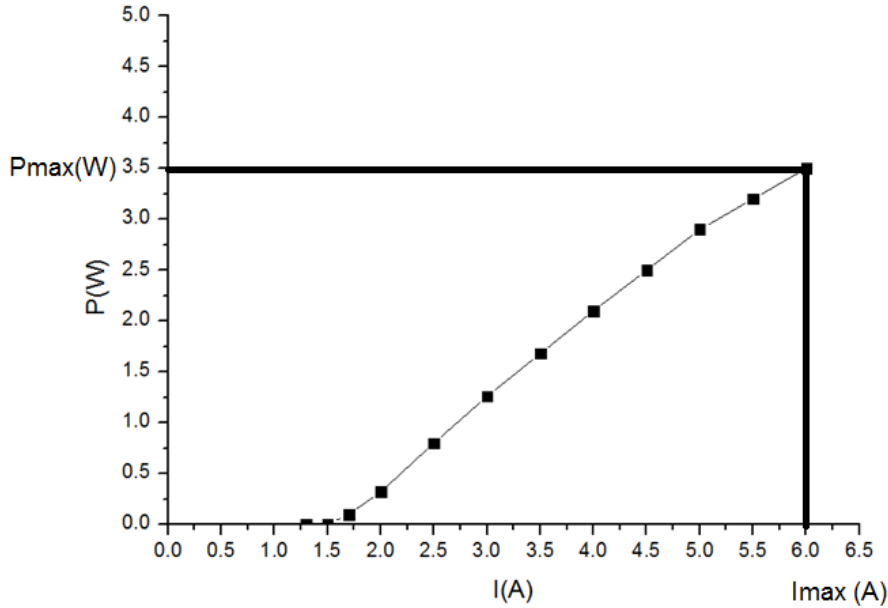
نتائج اختبار الديود ذو النموذج (PN 250):

V(v)	2.12	2.8	2.2	2.3	2.5	2.59	2.7	3	3.2	3.4
I(A)	1.7	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
P(W)	0.1	0.32	0.8	1.26	1.68	2.1	2.5	2.9	3.2	3.5

جدول (1) نتائج اختبار الديود ذو النموذج (PN 250).

وعند رسم الاستطاعة بدلالة التيار الكهربائي يتبين قيمة تيار العتبة (التيار الذي ظهر عند الليزر):

$$P_{out} = S_e * (I - I_{th}) \quad (14)$$



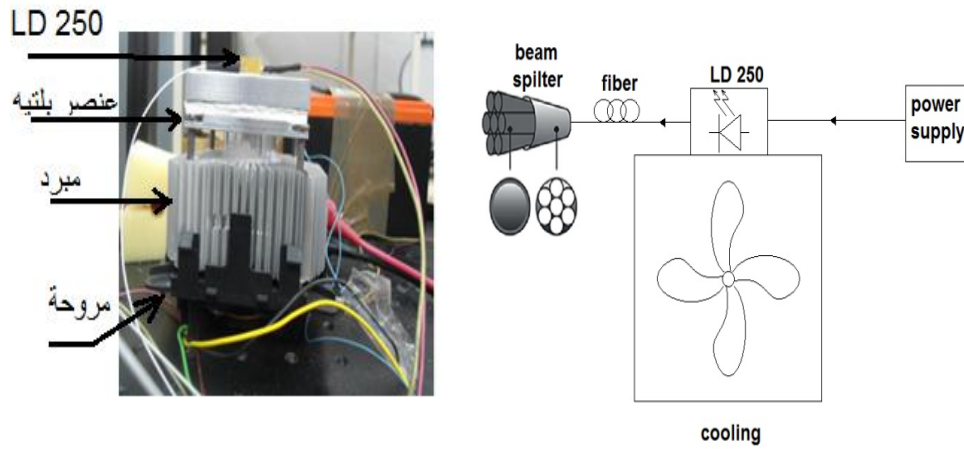
شكل (٣-٣) تبعية استطاعة الخرج لتيار الضخ

نلاحظ من الشكل (٣-٣): تم الضخ بتيارات مختلفة للديود الليزري لمعرفة استطاعات الخرج عند كل قيمة تيار مقابلة لها ومنها تم الحصول على تيار العتبة (I_{th}) التي ظهر عندها الليزر ومعرفة المردود (S_e) (slope efficiency). تظهر النتائج العملية بأن تيار عتبة الليزر ($I_{th}=1.7 A$)، ووافق الضخ بالتيار الأعظمي ($I_{max}= 6 A$) استطاعة أعظمية بقيمة ($P_{max}= 3.5 W$).

ثانياً: التحكم بطول موجة الليزر نصف الناقل (تبريد الليزر نصف الناقل):

تم تبريد الليزر نصف الناقل لضمان عدم ارتفاع درجة حرارته وضمان استقرار درجة الحرارة عند $T = 16^\circ \text{C}$ لاستقرار ضخه عند طول الموجة $(\lambda = 808 \text{ nm})$ لأن أي ارتفاع بدرجة الحرارة يؤدي الى انزياح طول موجة الضخ الخاصة به أي بارتفاع بدرجة الحرارة يؤدي الى زيادة طول موجة الضخ والابتعاد عن طول الموجة $(\lambda = 808 \text{ nm})$.

تمت عملية التبريد لليزر نصف الناقل بوضع مروحة تحت الليزر ووصلها الى منبع تغذية (12 V) لتغذيتها ووضع مادة مبردة (شم حراري) بين الصفيحة المعدنية المثبت عليها الديود نصف الناقل الديود نصف الناقل وتم التحكم بدرجة حرارة الديود الليزري المقترن بالليف الضوئي بواسطة عنصر بلتية بوصلها الى كتلة تغذية مخبرية (يستخدم عنصر بلتية للتبريد مع المحافظة على درجة حرارة ثابتة لتثبيت طول موجة الضخ) فعند قيمة محددة للتيار الكهربائي المطبق على عنصر بلتية من طراز (TEC-0714) وهو $(I = 1.94 \text{ A})$ وجهد $(V = 1.9)$ تكون درجة الحرارة $(T = 16^\circ \text{C})$ وطول موجة الليزر نصف الناقل عند هذه الدرجة $\lambda = 808 \text{ nm}$ في ظروف درجة حرارة المخبر شبه ثابتة.

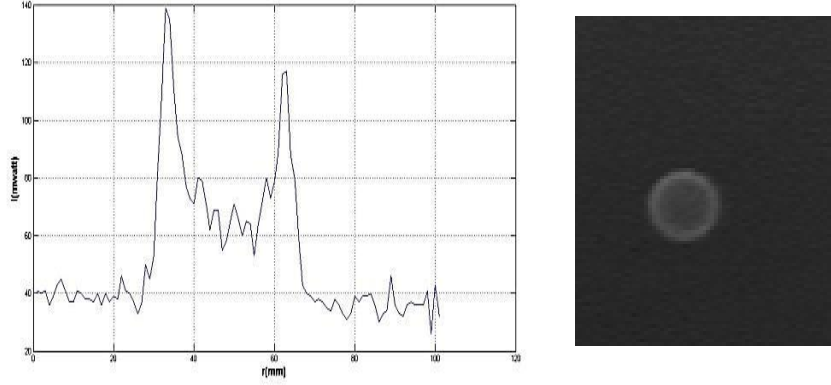


شكل (٣-٤) مخطط تبريد منبع الضخ

يوضح الشكل (٣-٤) مخطط التبريد لمصدر الضخ (الديود الليزري) يتكون من مروحة تصل الى منبع تغذية (12 V) ثم مبرد معدني ثم عنصر بلتية لضبط درجة حرارة الديود الليزري وتم دهن مادة شم مبرد للتبريد ايضاً.

ثالثاً: توصيف التباعد:

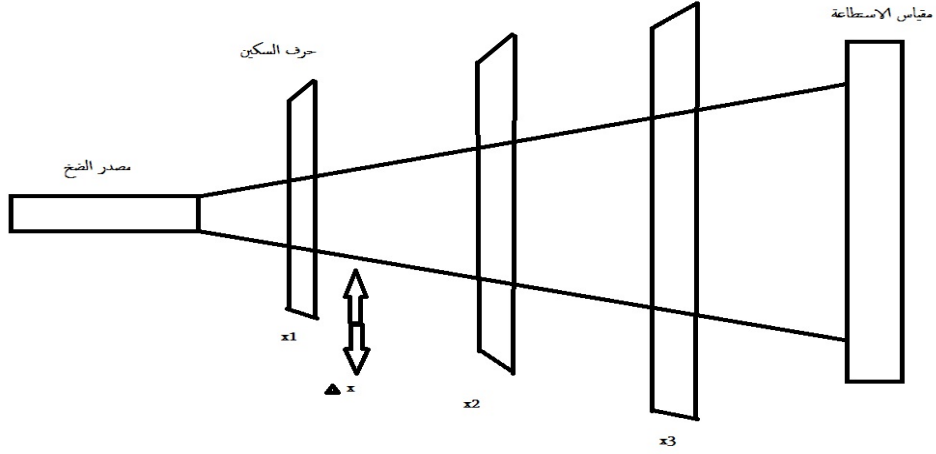
تعتبر حزمة الضخ لليزر نصف الناقل المقترن بليف ضوئي ($\lambda = 808 \text{ nm}$) من خلال نظام بصريات الموضحة في الشكل (٣-١)، يوضح الشكل مكونات النظام البصري: يتكون من العدسة الأولى هي عدسة التجميع (collimation) ببعد محراقي ($f = 15 \text{ mm}$) توضع بعد الديود الليزري تعمل على ضبط حزمة الضخ التي تملك تباعداً لتصبح حزمة متوازية، العدسة الثانية هي عدسة المحرقة (focusing) ببعد محراقي ($f = 15 \text{ mm}$) تعمل على تجميع ومحرقة حزمة الضخ التي تأخذ شكل حزمة متوازية بعد عدسة (collimation)، شكل حزمة الضخ بعيداً عن المستوي المحراقي هو حلقة وفي المستوي المحراقي هو (top-hat) [4]، تم تصوير الحزمة مع وضع مخرجات ضوئية أمام الكاميرا لتخفيف الاستطاعة.



شكل (٣-٥) الشكل الحلقي لحزمة الضخ

يوضح الشكل (٣-٥) أن شكل حزمة الضخ حلقيّة بعيداً عن المستوي المحراقي.

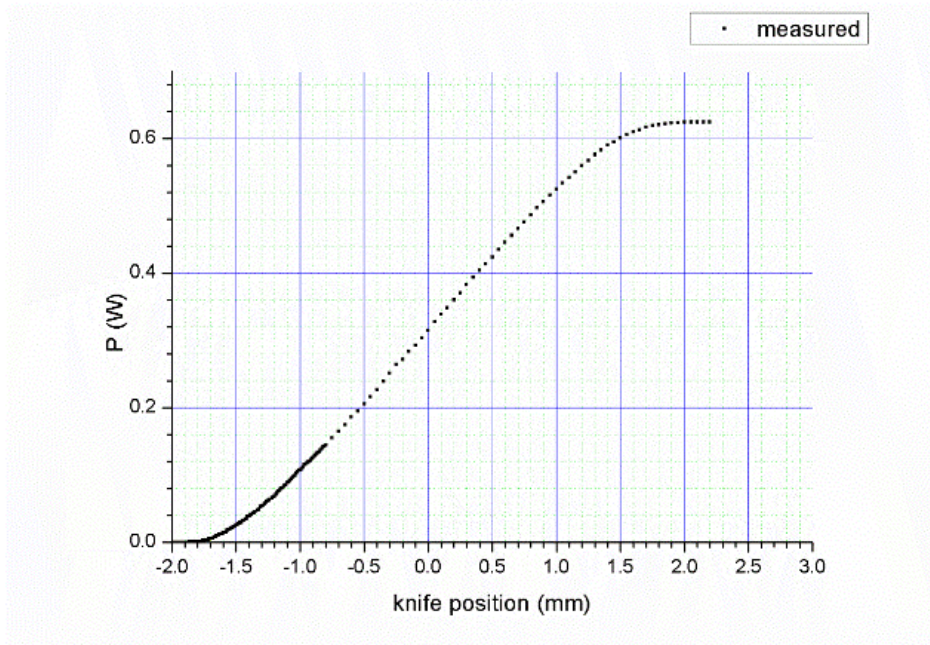
- ولكن التوصيف الدقيق لحزمة الضخ تم بطريقة حرف السكين (Knife edge)، تم قياس استطاعة الديود الليزري (PN250) المقرون بالليف الضوئي الذي يباعد مسافات مختلفة عن الشفرة المستخدمة، الموضحة في الشكل التالي:



شكل (٦-٣): طريقة حرف السكين

يوضح الشكل (٦-٣) طريقة حرف السكين التي تبعد مسافات مختلفة عن مصدر الضخ وتقاس الاستطاعة بواسطة مقياس الاستطاعة.

عند إتباع طريقة (knife edge) وإجراء القياسات للاستطاعة بدلالة موضع السكين على بعد $x_1 = 1$ (cm) من مصدر الضخ لحساب نصف قطر حلقة الضخ نحصل على المنحني الموجود في الشكل (٧-٣):



شكل (٧-٣): قياسات الاستطاعة بدلالة موضع السكين

يوضح الشكل (٧-٣) القياسات العملية للاستطاعة بدلالة موضع السكين.

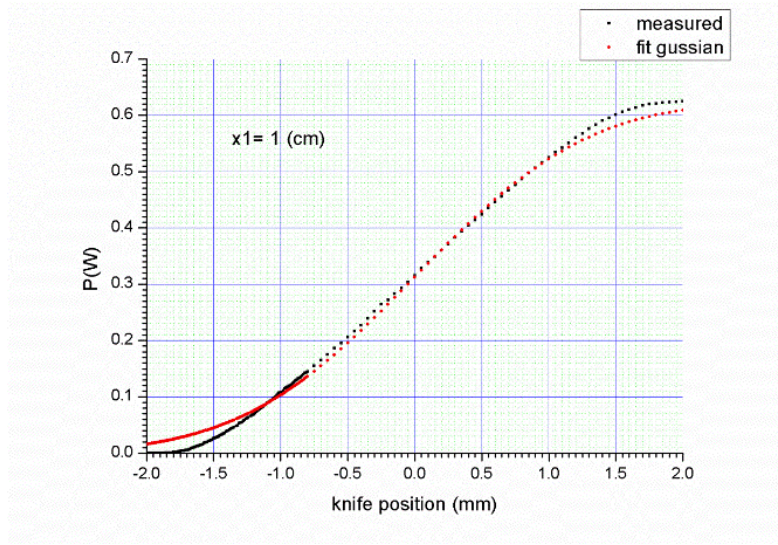
- تم إجراء تناسب غاوصي على الشكل لمعرفة نصف قطر حلقة الضخ:

الاستطاعة حسب التناسب الغاوصي:

$$P_{tot} = \frac{\pi}{2} I_0 w^2 \quad (15)$$

الاستطاعة بدلالة إزاحة حرف السكين:

$$P(x) = P_{tot} \left(0.5 - 0.5 * \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2} * x}{w} \right) \right) \quad (16)$$



شكل (٨-٣): الاستطاعة بدلالة موضع السكين بتقريب غاوصي

- نلاحظ من الشكل (٨-٣) عدم تطابق منحنى القياسات مع منحنى التقريب الغاوصي بين المجالين $(-2 \rightarrow 0.08 \text{ mm})$ و $(1.25 \rightarrow 2 \text{ mm})$ ، لذلك سوف يتم اتباع التقريب الأسطواني، أي مقطع حزمة الضخ دائري متجانس الشكل الصادرة من الليف متعدد الأنماط.

الاستطاعة حسب التناسب الأسطواني (ملحق (1)):

$$P(x) = \pi R^2 I_0 \quad (17)$$

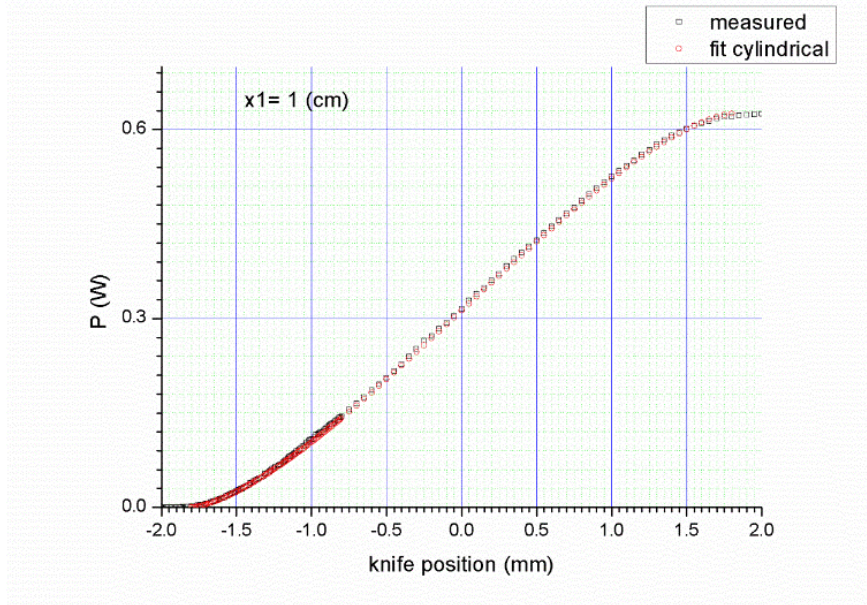
حيث أن:

$$I_0 = \frac{P}{\pi R^2} \quad (18)$$

فتكون الاستطاعة الكلية حسب التناسب الاسطواني:

$$P(x) = \frac{P}{\pi} * \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(\frac{x}{R} \right) + \frac{x}{R} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x}{R} \right)^2} \right) \quad (19)$$

حيث أن (x) هي إزاحة الشفرة، (R) نصف قطر حزمة الضخ.



شكل (٣-٩): الاستطاعة بدلالة موضع السكين بتقريب أسطواني

لقد تم تغيير قيم نصف قطر حلقة الضخ بين عدة قيم من القيمة $(r = 1.5 \text{ mm})$ الى القيمة $(r = 2 \text{ mm})$ ، نلاحظ من الشكل (٣-٨) تطابق المنحنيين عند القيمة $(r = 1.8 \text{ mm})$ هنا يدعم فرضيتنا بأن حلقة الضخ مخروطية أو دائرية متجانسة الشكل ونصف قطر حلقة الضخ على البعد $(x_1 = 1 \text{ cm})$ هي $(w_1 = r = 1.8 \text{ mm})$.

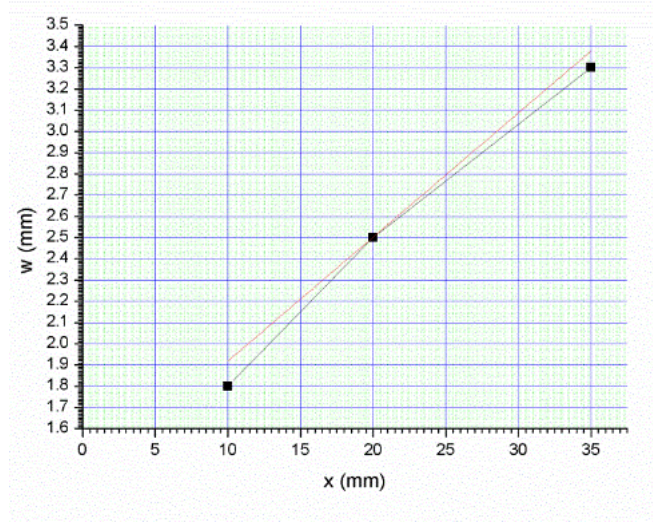
- تم قياس الاستطاعة بدلالة موضع ثاني لحرف السكين على بعد $(x_2 = 2 \text{ cm})$ من مصدر الضخ فنتج نصف قطر حلقة الضخ على البعد $(x_2 = 2 \text{ cm})$ هي $(w_2 = 2.7 \text{ mm})$.
 - تم قياس الاستطاعة بدلالة موضع ثالث لحرف السكين على بعد $(x_3 = 3.5 \text{ cm})$ من مصدر الضخ فنتج نصف قطر حلقة الضخ على البعد $(x_3 = 3.5 \text{ cm})$ هي $(w_3 = 3.3 \text{ mm})$.
- نلاحظ بأن قيم نصف قطر حلقة الضخ تتزايد مع تزايد البعد بين الشفرة والديود المقرون بالليف باستخدام طريقة حرف السكين.

- يتضمن الجدول (٢) قطر الحزمة بدلالة موضع حرف السكين على محور الانتشار:

W(mm)	X(mm)
1.81	10
2.7	20
3.3	35

الجدول (٢): قطر الحزمة بدلالة البعد على المحور لحرف السكين

- وعند رسم نصف قطر حلقة الضخ بدلالة بعد السكين واختيار أفضل مستقيم لحساب قيمة ميل المستقيم ومنه يتم تعيين قيمة التباعد:



شكل (٣-١٠) نصف قطر حلقة الضخ بدلالة البعد

يكون ميل المستقيم الذي يمثل قيمة التباعد:

$$\theta = \frac{w_3 - w_1}{x_3 - x_1} = \frac{3.3 - 1.81}{35 - 10} = 0.099 \text{ (rad)}$$

$$\theta/2 = 2.8^\circ = 0.049 \text{ (rad)}$$

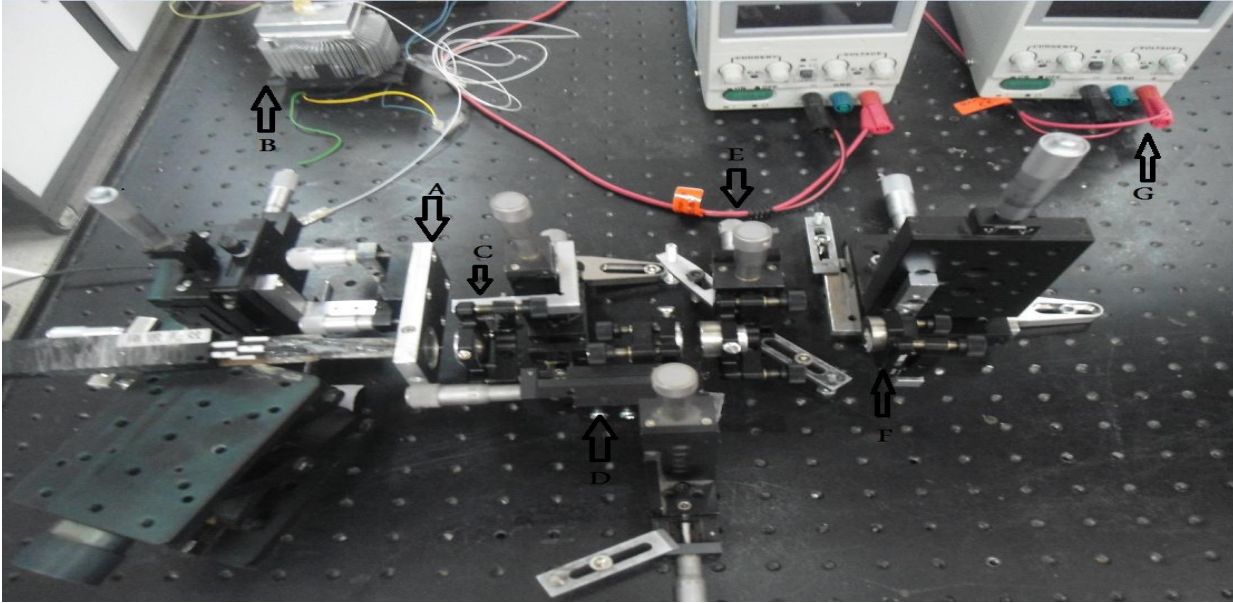
خامساً: ضبط المحور البصري للمنظومة البصرية.

لقد تم ضبط المحور البصري للمنظومة البصرية مع المحور البصري لليزر (He: Ne) وفق الخطوات

التالية، ليكون المحور البصري لليزر (He- Ne) منطبق على محور الضخ يتم ما يلي:

١. يتم تشغيل ليزر (He: Ne).

٢. يتم ضبط كل من عدستي التجميع والمحركة بدون الليف الضوئي نرى البقعة خلف العدستين يتحسن شكلها عن طريق ضبط ليزر الهليوم في مركز تصالب موجود على لوحة خلف العدستين مع ضبط بقعة انعكاس المرأتين في مركز حزمة ليزر الهليوم.
٣. نضع الليف تخنقي البقعة ويجب أن تكون بقعة الضخ بمركز ليزر الهليوم.
٤. نزيل العدستين ثم نضع القضيب الليزري لضبط مركز القضيب الليزري على مركز بقعة ليزر الهليوم مع ضبطه في مركز التصالب.
٥. نزيل القضيب الليزري ثم نضع المرآة الأمامية لضبط البقعة النهائية على بقعة ليزر الهليوم مع ضبط البقعة الناتجة عنها في مركز التصالب.
٦. بعد الانتهاء من هذه الخطوة نضع ورقة بيضاء لضبط بقعة ليزر الهليوم على مركز بقعة ضخ الديود الليزري، أي لضبط مركزية البقتين.
٧. نغطي بقعة ليزر الهليوم ونقوم بضبط لكل من مرآة الخرج وعدسة المحركة حتى تظهر بقعة الليزر ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) التي يتم تصويرها بكاميرا (CCD) وعرضها على شاشة الإظهار.



شكل (١١-٣): البنية التجريبية للمنظومة الليزرية المستخدمة. (A) حامل ميكانيكي لمنبع ضخ ليف وحيد أو منبع متعدد الألياف، (B) نظام التبريد لمنبع الضخ، (C) حامل ميكانيكي للعدسة الأولى ببعد محراقي ($f = 15 \text{ mm}$)، (D) حامل ميكانيكي للعدسة الثانية ببعد محراقي ($f = 15 \text{ mm}$)، (E) حامل ميكانيكي للقضيب الليزري بلورة (Nd: YAG)، (F) حامل ميكانيكي للمرآة الأمامية، (G) كتل التغذية.

سادساً: تم حساب الضياع اللوغاريتمي الكلي في كل عبور ضمن القضيب الليزري والتي تتضمن ضياعات مفيدة (ضياعات مرآة الخرج) وضياعات غير مفيدة وهي ضياعات المجاوب (E)، [6].

$$\gamma = \frac{E - \ln R}{2} \quad (20)$$

تم حساب الضياعات الغير مفيدة (ضياعات المجاوب (E)) من أجل عاكسيات مختلفة للمرآة الأمامية:

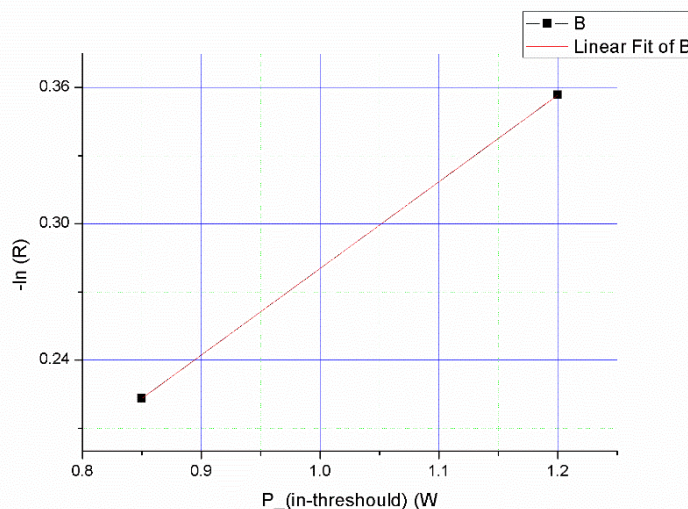
تم استخدام مرآيا بعاكسيات (R = 70 %, 80 %) في نفس شروط المجاوبة بطول

(L = 6 cm)، وتم قياس استطاعة العتبة عند الدخل لكل مجاوبة بعاكسيه مختلفة، كما يظهره الجدول (٣).

R	-ln(R)	$P_{in-threshold}(W)$
0.8	0.22	0.85
0.7	0.35	1.2

الجدول (٣): عتبة الضخ بدلالة عاكسيه مرآة الخرج

نلاحظ مع زيادة عاكسيه المرآة الأمامية تقل استطاعة العتبة لظهور الليزر، تم رسم العاكسية بدلالة عتبة الضخ ثم تم إجراء تناسب خطي لحساب الميل وحساب الضياعات الغير مفيدة:



شكل (١٢-٣): العاكسية بدلالة عتبة الضخ

تم حساب الميل لحساب الضياعات الغير مفيدة انطلاقاً من المعادلة:

$$y = a + b * x$$

والتي تمثل المعادلة:

$$-\ln(R) = 2K P_{in-threshold} - E$$

$$m = b = 2k = 0.38 W^{-2}$$

ثم تم حساب الضياع (E) الذي يمثل نقطة تقاطع الخط المستقيم مع المحور (x)، [4]:

$$a = 0.1 \rightarrow E = 0.1$$

• الضياعات الكلية عند عاكسيه المرآة (R= 80%): $\gamma = 0.16$ ، الضياعات عند عاكسيه

المرآة (R= 70%): $\gamma = 0.23$.

نلاحظ مع زيادة عاكسيه مرآة الخرج يقل الضياع اللوغاريتمي في كل عبور.

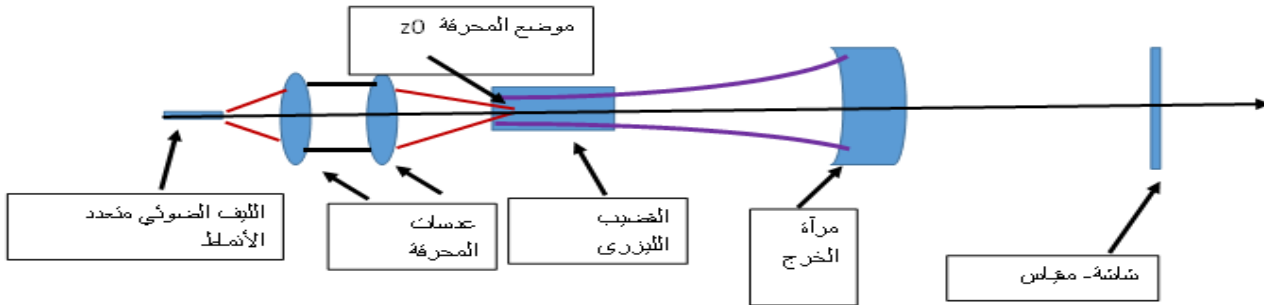
بعد توصيف منبع الضخ والقضيب الليزري وحساب الضياعات سوف يتم العمل بشكل حسابي وتجريبي

لإظهار الأنماط الليزرية بليف واحد:

(٢-٣) مبدأ العمل بالضخ الخلفي بواسطة ليف وحيد:

يتألف المجاوب الليزري من مرآتين، المرآة الخلفية مستوية والمرآة الأمامية مقعرة وطول المجاوب (L).

كما يظهره الشكل (٣-١٣).



الشكل (٣-١٣): مخطط المجاوب الليزري والضخ بليف متعدد الأنماط

تتوفر في الكثير من الأدبيات [7] و [8] دراسة أثر الضخ (توزع وشدة) على توليد الأنماط الليزرية حيث يمكن دراسة تداخل التوزع المكاني للنمط الليزري مع التوزع المكاني لطاقة الضخ لتحديد قيمة المعامل (V_{eff}) بهدف تحديد طاقة العتبة (P_{th}) لكل نمط والفعالية لنمط ليزري معين، حيث أن الحجم الفعال (V_{eff}) يرتبط بشكل النمط ويتغير من نمط لآخر مع نفس التوزع المكاني للضخ.

سنقدم ضمن هذا العمل أثر التوزيع المكاني لطاقة الضخ على توليد نمط ليزري معين، وسنقوم بتطبيق نتائج هذه الدراسة عملياً لتوليد أنماط (LG) من الشكل (LG_{0n})، تعتمد هذه التتابع التحليلية على خصائص الوسط الفعال لمادة

(Nd-YAG) من معامل الامتصاص وقرينة الانكسار ومعامل جودة حزمة الديود الليزري، تعتمد آلية التوليد على اختيار القيمة المثلى لقطر بقعة الضخ (W_p)، وموقع هذه البقعة داخل جسم القضيب الليزري، والقيمة المثلى لطاقة الضخ لكل نمط.

جوهر الطريقة المستخدمة في هذا العمل انتقاء نمط معين دون غيره سنقوم بدراسة تغيير استطاعة عتبة الليزر طبقاً لتغير المقدار (V_{eff}) ونقارن قيم معامل الريح للنمط المنافس المطلوب.

بعد دراسة التداخل بين التوزيع المكاني لحزمة الضخ والتوزيع المكاني للنمط الليزري أي قياس (V_{eff}) الحجم الفعلي من أجل كل نمط ليزري محدد وفق المعادلة (4)، يتم حساب معامل الريح الفعلي وتحديد قيمة استطاعة العتبة.

٣-٣) الآليات المتبعة لتغيير قيمة استطاعة عتبة النمط:

إن التوزيع المكاني للأنماط الليزرية يسمح بتغيير قيمة خصر الحزمة الليزرية (W_l) وذلك عن طريق تغيير معاملات المجاوب كتغيير نصف قطر تقعر المرآة الأمامية، وعند تثبيت معاملات المجاوب يصبح التوزيع المكاني للأنماط ثابتاً. لذا للتحكم بقيمة عتبة الضخ يتم تغيير التوزيع المكاني للضخ.

حيث يمكن إجراء انسحاب لمحور حزمة الضخ بالاتجاه (OZ) لتغيير موضع محرقة حزمة الضخ على المحور البصري في الاتجاهين السالب والموجب عن طريق استخدام فرنية [4] وتغيير قيمة (W_p) عن طريق تغيير النظام البصري، تم حساب قيمة الحجم الفعال من أجل كل نمط ثم حساب طاقة العتبة لكل نمط.

٣-٤) النمذجة لحساب معامل التغطية (الحجم الفعال):

لدراسة أثر المعاملات السابقة يجب تحديد شكل حزمة الضخ ضمن الوسط الفعال ثم يتم نمذجة حزمة الضخ بتابع مناسب وبعدها يتم حساب معامل التغطية والحجم الفعلي للضخ ضمن الوسط الفعال (V_{eff}) لكل من الأنماط التي هي موضوع الدراسة. وبعدها يتم حساب الريح لكل نمط.

يتم اختيار أفضل قيم لخصر (W_{l0}) للنمط الليزري (LG_{00}) على المرآة المستوية لاختيار أفضل استطاعة خرج، [8] مع اختيار قيم استطاعة دخل (P_{in}) مختلفة. مع العلم أن معامل امتصاص

القضيب الليزري (Nd: YAG) هي ($\alpha = 0.53 \text{ mm}^{-1}$) عند طول موجة ($\lambda = 808 \text{ nm}$) وطول الوسط الفعال ($l = 7 \text{ mm}$) نحصل على القيمة الأمثل بناء على القانون، [7]:

$$w_{lo,opt} = \sqrt{4\beta \ln(2) \{g_+(x, \beta) - g_-(x, \beta) - 1\}} \quad (21)$$

حيث أن:

$$\begin{aligned} \beta &= c/n * \alpha = w_{po} * \theta / n * \alpha \quad (22) \\ &= \frac{52.5 * 10^{-3} * 5.6 * \pi / 180}{1.82 * 0.53} = 0.006 \text{ (rad. mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

(c) ثابت معامل جودة الحزمة.

حيث أن (g_{\pm}) معامل يتعلق باستطاعة الضخ (P_{in}) والضياعات الكلية (γ) وشدة الإشباع (I_{sat}):

$$g_{\pm} = \left(\frac{\sqrt{3} \sqrt{27(x/4\beta \ln(2))^2 + 1}}{9} \pm \frac{x}{4\beta \ln(2)} \right)^{1/3} \quad (23)$$

(x) معامل يعبر عن استطاعة الدخل.

$$x = \frac{P_{in}}{\pi \gamma I_{sat} / 2 \eta_p} \quad (24)$$

عند التنفيذ والضخ باستطاعة دخل ($P_{in} = 1500 \text{ (mW)}$)، تبين أن قيمة خسر النمط الليزري الأمثل:

$$w_{lo,opt} = 202 \mu\text{m}$$

• لحساب توزيع شدة الضخ ($r_p(r, z)$) بليف ضوئي وحيد مقترن مع ديود ليزري يجب أولاً تحديد مواصفات حزمة الضخ (مقطع والتباعد).

عند رسم الحزمة الغاوصية على (matlab) حيث يكون مركزها (0,0)، [8]:

$$r_p(x, y, z) (\text{mm}^{-3})$$

$$= \frac{2 * \alpha * e^{-\alpha z}}{\pi * w_p^2(z) * (1 - e^{-\alpha l})} * e^{-2 \frac{x^2 + y^2}{w_p^2(z)}} \quad (25)$$

$$\alpha = 0.53 \text{ (mm}^{-1}\text{)}, l = 7 \text{ (mm)}$$

$$w_p(z) = w_{p0} + \theta(z - z_0),$$

$$\theta = 5.6 * \frac{\pi}{180} = 0.099 \text{ (rad)}, z_0 = 0,$$

$$w_{p0} = w_0 = 52 * 10^{-3} \text{ (mm)}$$

حيث ($n = 1.82$) هي قرينة انكسار مادة القضيب الليزري، ($D = 105 \mu\text{m}$) القطر المركزي لليف الضوئي المستخدم، $\theta_p = 5.6^\circ$ تباعد حزمة الضخ وقد تم قياسه تجريبياً، وتباعد الحزمة الليزرية هنا غير مهم، حيث (z_0) موقع خصر حزمة الضخ من سطح القضيب الليزري مع اعتبار مبدأ الإحداثيات هو المرآة الخلفية المطلية على سطح القضيب الخلفي، (w_{p0}) هو خصر حزمة الضخ عند خروجها من الليف البصري.

- حساب توزيع شدة النمط الليزري فراغياً ($s_{m0}(r, z)$) للأنماط الليزرية (LG_{m0}) سيتم في هذا العمل دراسة الأنماط (LG) (Laguerre) بالإحداثيات الأسطوانية، من الشكل (LG_{mn}) والتي تملك توزيع لشدة النمط الليزري داخل المجاوبة الليزرية، إن توزيع الشدة للأنماط (LG) في الحالة العملية، [6]:

$$s_{mn}(r, z) = \frac{2}{\pi * w_l^2(z) * m! * l} * \left(\frac{2r^2}{w_l^2(z)} \right)^m * \left(L_m^n \left(\frac{2r^2}{w_l^2(z)} \right) \right)^2 * (\cos^2(p\phi)) * \exp\left(-2 \left(\frac{2r^2}{w_l^2(z)} \right)\right) \quad (26)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (21)$$

$$\phi = \text{arctag} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (22)$$

حيث أن (L_m^n) كثير حدود (Laguerre) من الدرجة (m)، و (l) طول الوسط الفعال وأجريت الحسابات على الأنماط من المرتبة ($p = 0$) والتي تتميز بتناظر أسطواني من أجل التناظر الاسطواني تصبح علاقة التوزيع لشدة النمط الليزري:

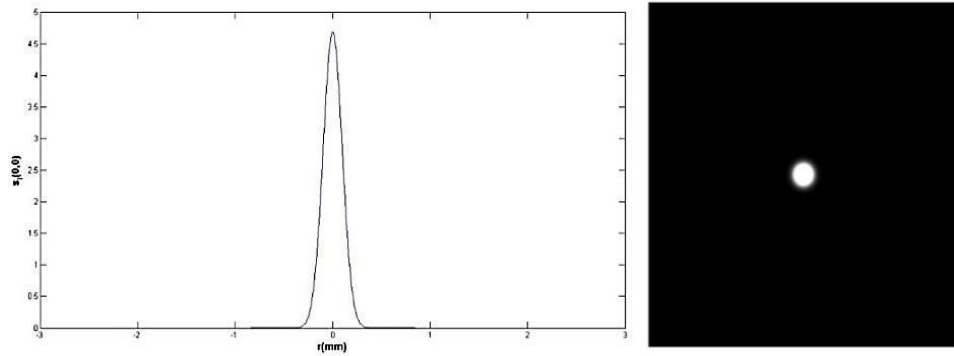
$$s_{m0}(r, z) = \frac{2}{\pi * w_l^2(z) * m! * l} * \left(\frac{2r^2}{w_l^2(z)} \right)^m * \left(L_m^0 \left(\frac{2r^2}{w_l^2(z)} \right) \right)^2 * \exp\left(-2 \left(\frac{2r^2}{w_l^2(z)} \right)\right) \quad (27)$$

مع الأخذ بعين الاعتبار التقريب التالي $w_l(z) = w_0$ [8].

وتم التأكد من هذا التقريب بإجراء الحساب في مجاوية متكونة من مرآة أمامية مقعرة بنصف قطر تقعر (r= 300 mm) وعاكسيته (R= 80%) والمرآة الخلفية مستوية وعاكسيته (R= 100%)، تبين أن خصر نمط الحزمة الليزرية ثابت على طول الوسط الفعال للمادة حيث نتج حسابياً أن نصف قطر الحزمة الليزرية على السطح الخلفي للقضيب الليزري (205 μm) وعلى السطح الأمامي للقضيب (205.3 μm) نلاحظ تقريباً القيمة نفسها على السطحين لذلك يعتبر خصر الحزمة الليزرية ثابتاً على طول الوسط الفعال، وإن طول الوسط الفعال قصير والتباعد قليل.

يعطى توزيع شدة النمط الليزري فراغياً للحزمة الغاوسية (LG₀₀)، [6]:

$$s_{00}(r, z) = \frac{2}{\pi * w_l^2(z) * l} * e^{-2\frac{x^2+y^2}{w_l^2(z)}} \quad (28)$$



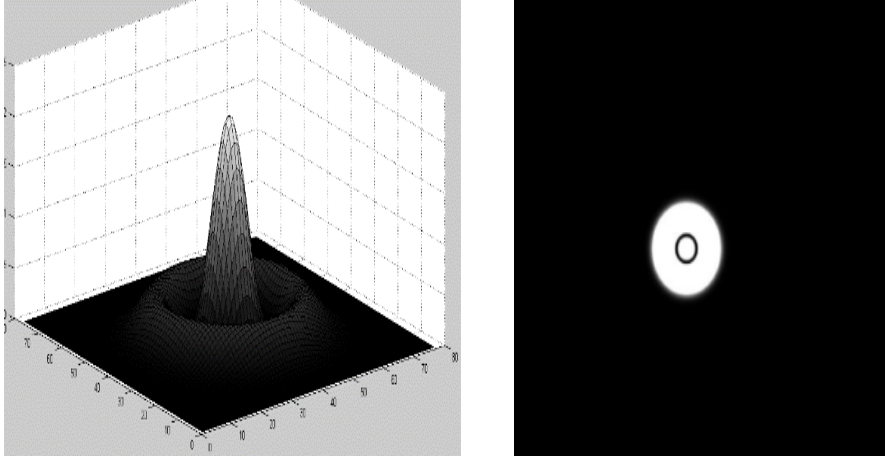
شكل (٣-١٤) توزيع شدة النمط (LG₀₀) وتوزعه الفراغي

يوضح الشكل (٣-١٤) توزيع شدة النمط الأساسي (LG₀₀) حيث تتوزع طاقة الفوتونات وتتركز في منطقة صغير مركزية.

لحساب شدة التوزيع للنمط (LG₁₀)، [6] تصبح العلاقة من الشكل:

$$L_1^0 = 1 - \frac{2r^2}{w_l^2} = 1 - \frac{2(x^2 + y^2)^2}{w_l^2} \quad (29)$$

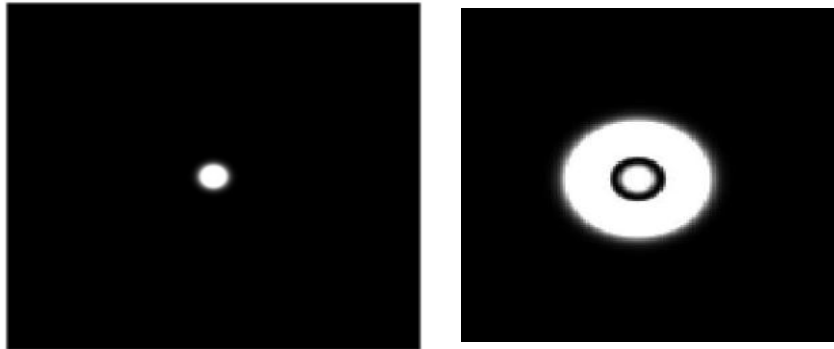
$$s_{10}(r, z) = \frac{2}{\pi * w_1^2(z) * l} * \left(1 - \frac{2(x^2 + y^2)^2}{w_1^2}\right)^2 * \exp\left(-2\left(\frac{2(x^2 + y^2)^2}{w_1^2}\right)\right) \quad (30)$$



شكل (٣-١٥) توزيع شدة النمط (LG_{10})

يوضح الشكل (٣-١٥) توزيع شدة النمط الأساسي (LG_{10}) حيث تنتزع طاقة الفوتونات في حلقتين متمركزتين.

- يمكن حساب معامل التغطية (الحجم الفعال) بين شدة الضخ والنمط الليزري الغاوصي، الحجم الفعال لشدة حزمة الضخ حلقيه الشكل مع شدة توزيع النمط (LG_{m0}) من العلاقة (1):



شكل (٣-١٦) الحجم الفعال للنمط (LG_{10}) والنمط (LG_{00})

حساب استطاعة العتبة لأنماط مختلفة كتابع لموضع المحرقة:

نلاحظ من علاقة استطاعة العتبة (7) بأن النمط الذي يملك أكبر تراكب أو تداخل بين توزع شدة حزمة الضخ وتوزع شدة النمط الليزري داخل المجاوب يملك أصغر استطاعة عتبة وهذا النمط سوف يسيطر على الخرج الليزري.

تمت دراسة تبعية استطاعة العتبة (P_{th}) لموضع المحرقة (Z_0) تم رسم (P_{th}) بدلالة (Z_0) على برنامج (MATLAB) من العلاقة التالية، [4]:

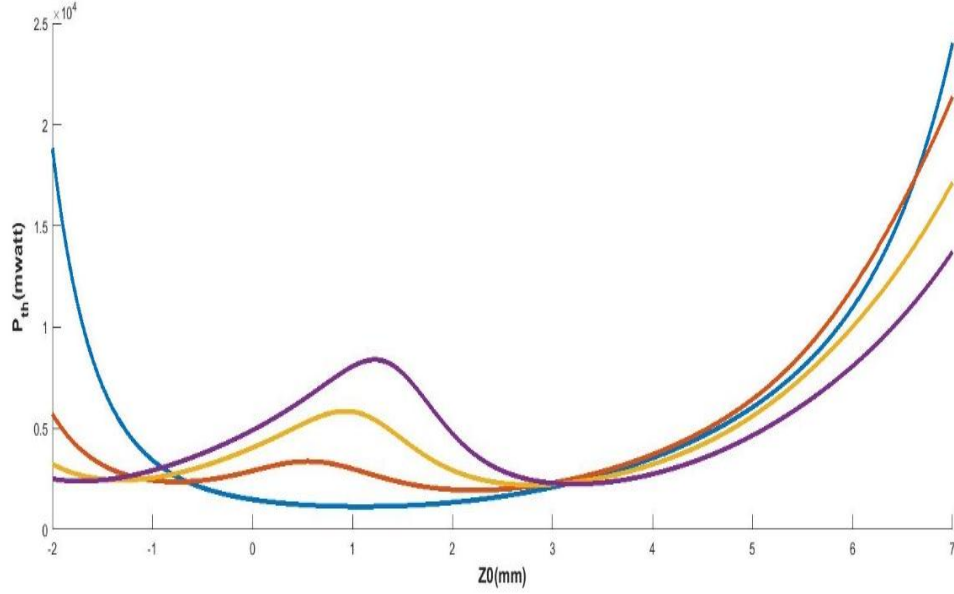
$$P_{thl.0}(z_0) = \frac{\pi\gamma I_{sat}}{n_p} * \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} * \frac{w_p^2}{\int_0^L Q_l(z_0) * e^{-\alpha z} dz} \quad (31)$$

$$Q_l(z_0) = \sum_{j=0}^l \frac{1}{(l-j)!} * \left\{ \varrho^{l-j} * e^{-\varrho} - \left(\varrho + \frac{2w_p^2}{w_{l0}^2} \right)^{l-j} * e^{-\left(\varrho + \frac{2w_p^2}{w_{l0}^2} \right)} \right\} \quad (32)$$

حيث أن:

$$\varrho = 2 \left[\frac{\theta_p(z - z_0)}{w_0} \right]^2 \quad (33)$$

النتائج الحاسوبية لاستطاعة العتبة تقابل موضع المحرقة لحزمة الضخ (Z_0) موضحة في الشكل (٣-١٧).

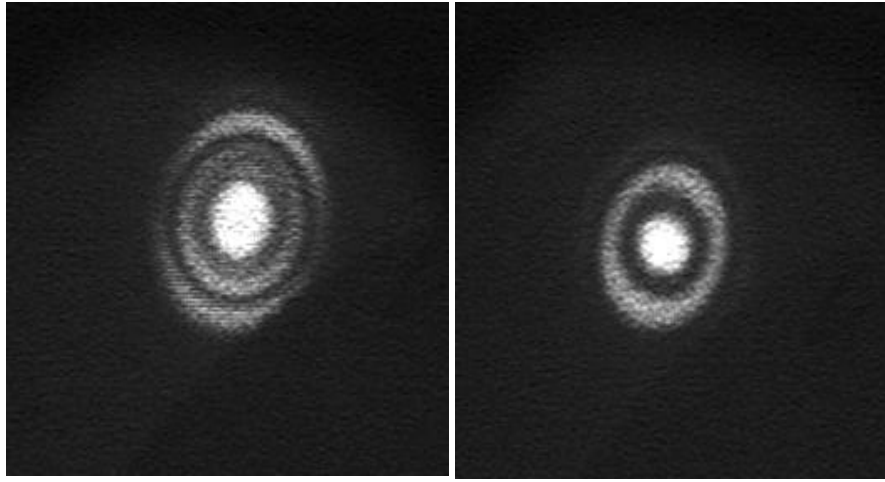


شكل (٣-١٧) استطاعة العتبة بدلالة موضع المحرقة لحزمة الضخ

يوضح الشكل (٣-١٧) تابعة استطاعة العتبة على موضع المحرقة لحزمة الضخ للأنماط الخمسة الأولى، نجد من الشكل أن النمط الغاوصي (LG_{00}) يملك أقل استطاعة عتبة لموضع المحرقة، والنمط الذي يليه (LG_{10}) يملك استطاعة عتبة أعلى، ينتج أن الضخ بقيمة استطاعة دون غيرها عند موضع محرقة محدد يتم توليد نمط دون آخر بقيم محددة للرمز (l)، حيث أن الأنماط العرضية التي تملك أقل استطاعة عتبة يمكن أن تنهار داخل المهتز منذ البداية، أي عند اختيار قيمة لاستطاعة العتبة من الشكل (٣-١٨) ($P_{th} = 5 \text{ Watt}$) من أجل قيمة موضع محرقة ($Z_0 = 0$) فإن الأنماط (LG_{20} , LG_{10} , LG_{00}) قابلة للتولد لأن قيمة استطاعة العتبة أقل قيمة استطاعة الضخ. لذلك فإنه لتوليد الأنماط الأعلى يمكن إزاحة موضع المحرقة إلى ($Z_0 = 5 \text{ mm}$) يمكن توليد النمط (LG_{30}).

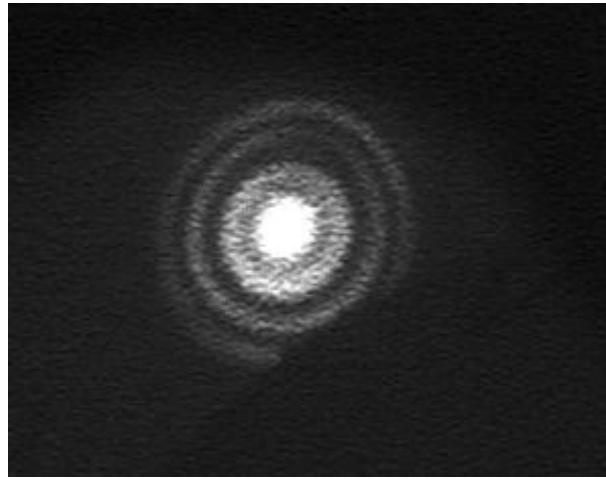
من أجل بعض قيم (Z_0) يمكن التخلص من الأنماط الأخرى والابتعاد عن نمط واحد يحقق أقل عتبة ضخ عند هذه القيمة ل (Z_0). مثلاً ($Z_0 = 1$) يمكن الحصول على النمط (LG_{00}) فقط، بينما من أجل ($Z_0 > 4$) يمكن الحصول على النمط (LG_{50}) وإن كان من الصعوبة فصل الأنماط نتيجة لتقارب قيم (Z_0). أما عند قيمة ($Z_0 = -2$) فإننا يمكن أن نولد النمط (LG_{00}) ولكن نحصل على تراكب لعدد من الأنماط عند الضخ باستطاعة (1.2 W).

بالعمل التجريبي تم ظهور الأنماط ذات التناظر الأسطواني كما هي موضحة في الشكل (٣-١٨)، ظهرت الأنماط المختلفة عند نفس موضع محرقة حزمة الضخ ($Z_0 = 1 \text{ mm}$) ولكن مع اختلاف قيم استطاعات الضخ.



(b)

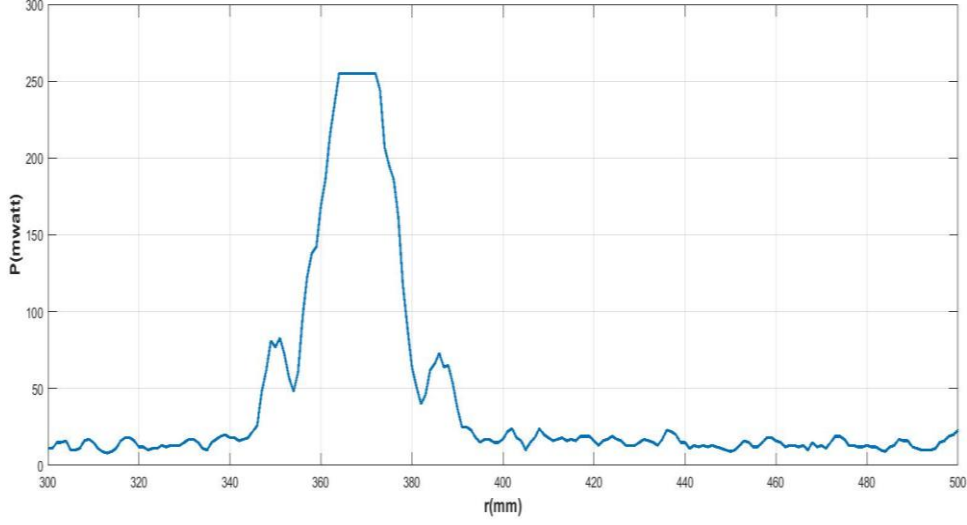
(a)



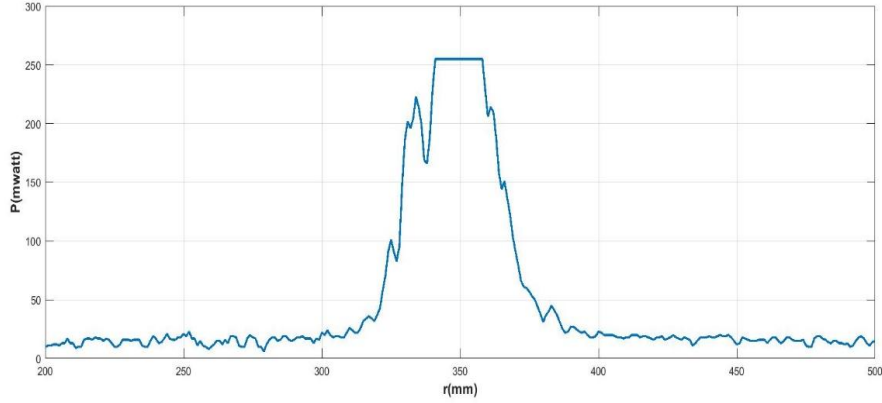
(c)

شكل (٣-١٨) التوزيع الفراغي للحزم الليزرية الناتجة والمصورة بكاميرا (CCD) لحزمة الأنماط (LG) بتوزيعات شدة مختلفة يوضح شكل (٣-١٨) أشكال الحزمة الليزرية التي تم الحصول عليها بشكل تجريبي لأنماط (LG). حيث يوضح الشكل (a) النمط (LG_{10}) مع النمط (LG_{00}) عند استطاعة ضخ ($P_{in} = 0.35(w)$)، أما الشكل (b) فيوضح النمط (LG_{20}) مع النمط (LG_{00}) عند استطاعة ضخ ($P_{in} = 0.42(w)$)، وأخيراً الشكل (c) يوضح النمط (LG_{30}) مع النمط (LG_{00}) عند استطاعة ضخ ($P_{in} = 0.49(w)$) المسجلة بكاميرا (CCD) عند مواضع مختلفة.

ويبين الشكلان التاليان التوزيع العرضي للنمطين (LG_{10}) والنمط (LG_{20}).



الشكل (٣-١٩) التوزيع العرضي للنمط (LG_{10})



الشكل (٣-٢٠) التوزيع العرضي للنمط (LG_{20})

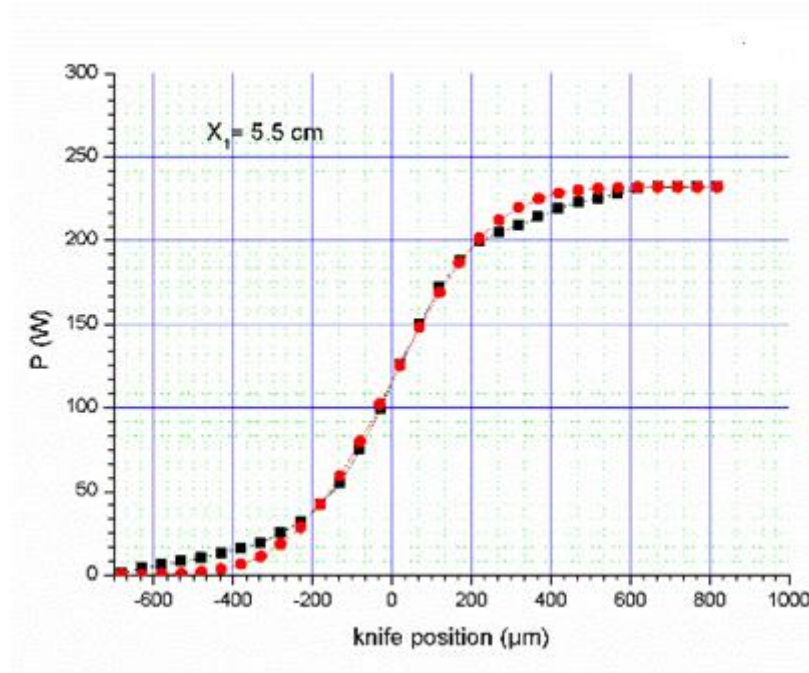
تبين النتائج التجريبية بأن العمل على طريقة محرقة حزمة الضخ ودراسة تبعية استطاعة العتبة (P_{th}) لموضع المحرقة (Z_0) لا يتم فصل النمط الغاوسي عن الأنماط الأعلى ترتيباً، نقترح طريقة أخرى سوف يتم اتباعها لفصل النمط الغاوسي عن الأنماط الأعلى ترتيباً باستخدام الديود الليزري ووصل خرجه الى مجزئ حزمة ليفي متعدد الأنماط (multi modes fibre splitter) يكون خرج المجزئ عبارة عن ثلاث حزم، وايضاً تم العمل على مجزئ حزمة خرجه سبع ألياف.

النتائج التجريبية:

حساب خصص النمط الليزري:

- تم قياس تجريبياً نصف قطر النمط الليزري، بإجراء تجربة (knife edge) بوضع حرف السكين بعد المرآة الأمامية ويتم إجراء قياسات لاستطاعة الخرج بدلالة موضع حرف السكين عند ثلاث مواضع مختلفة:

المسافة الأولى بين نهاية المجاوب وحرف السكين ($x_1 = 5.5 \text{ cm}$)، والمسافة بين حرف السكين والحساس ($d_1 = 9.5 \text{ cm}$) وتم وضع فلتر على الحساس لقص الأطوال الموجية الأقل من ($\lambda = 850 \text{ nm}$) حيث أن الحساس يبعد مسافة ($Z = 15 \text{ cm}$) عن المرآة الأمامية، تم رسم الاستطاعة بدلالة انزياح حرف السكين عن المحور عندما تكون المسافة الأولى بين نهاية المجاوب وحرف السكين ($x_1 = 5.5 \text{ cm}$) في الشكل (٣-٢٢).



شكل (٣-٢١): الاستطاعة بدلالة انزياح حرف السكين عن المحور

يوضح الشكل (٣-٢٢) عند إجراء تناسب غاوسي تبين بأن نصف قطر النمط الغاوسي ($W_l = 395 \mu m$).

المسافة الثانية بين نهاية المجاوب وحرف السكين ($x_2 = 8 \text{ cm}$)، والمسافة بين حرف السكين والحساس ($d_2 = 7 \text{ cm}$).

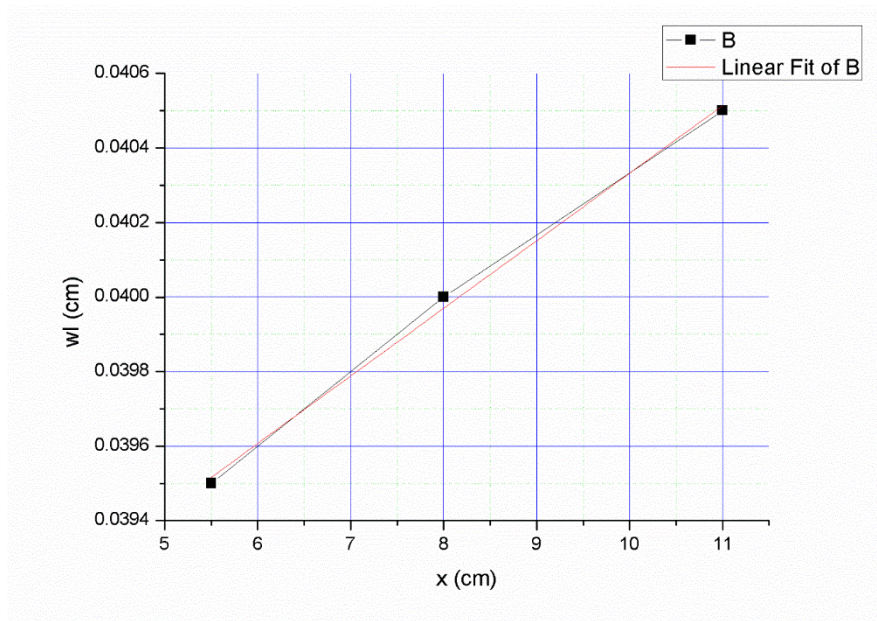
عند إجراء تناسب غاوصي عند المسافة الثانية ينتج نصف قطر النمط الغاوصي ($w_l = 400 \mu m$).
المسافة الثالثة بين نهاية المجاوب وحرف السكين ($x_3 = 11 cm$)، والمسافة بين حرف السكين
والحساس ($d_3 = 4 cm$)، عند إجراء (Fit) غاوصي عند المسافة الثالثة ينتج أن نصف قطر النمط
الغاوصي ($w_l = 405 \mu m$).

ولقياس التباعد تم رسم خصر النمط الليزري بدلالة بعد حرف السكين (الجدول (٤)).

$w_l (cm)$	$x (cm)$
0.0395	5.5
0.0400	8
0.0405	11

الجدول (٤): خصر النمط الليزري بدلالة بعد حرف السكين

يتم حساب الميل لحساب تباعد النمط الليزري:



شكل (٣-٢٢): خصر النمط الليزري بدلالة بعد حرف السكين

يكون ميل المستقيم الذي يمثل قيمة التباعد:

$$\theta = \frac{w_3 - w_1}{x_3 - x_1} = \frac{0.0405 - 0.0395}{11 - 5.5} = 1.8 * 10^{-4} (rad)$$

$$\theta/2 = 0.9 * 10^{-4} (rad)$$

- باختيار طول المجاوب ((L= 60 (mm)) ونصف قطر تقعر مرآة الخرج ((r= 300 (mm)) بعاكسيه ((R= 80 %) ويعطى نصف قطر البقعة الليزرية نظريا على مرآة الدخـل (السطح المستوي) من العلاقة (29)، [6]:

$$W_l^2 = W_0^2 = \frac{\lambda}{\pi} * \sqrt{L(r - L)} \quad (34)$$

$$w_{l0} = 202 \mu m$$

- تم حساب نصف قطر النمط الليزري على السطح المقعر (المرآة الأمامية) من [6]:

$$W_2^2 = \frac{\lambda}{\pi} * r * \sqrt{\frac{L}{r - L}} \quad (35)$$

$$w_2 = 225 \mu m$$

- وللتذكير نتج من تجربة حرف السكين أن خصر النمط الغاوسي على البعد ((x₁ = 5.5 cm) هو ((w₃ = 395 μm) وقيمة خصر النمط الليزري على البعد ((x₂ = 11 cm) هو ((w₄ = 405 μm).
- تم التأكد من القيم الحسابية على كل وجه بتطبيق مصفوفات غاوص:

حساب النمط الليزري على المرآة الأمامية انطلاقاً من القضيب الليزري والتي تمثل المصفوفة (A)، ثم المسافة الفاصلة بين القضيب الليزري ومرآة الخرج والسافة ((Z = 53 mm) ويمثل الهواء وهو المصفوفة (B)، ثم المرآة الأمامية بحالة الانتشار فتشكل عدسة مبعدة ببعد محرق:

وتمثل المصفوفة (C) ((F = \frac{r}{n-1} = 600 mm) والمسافة الفاصلة بين مرآة الخرج والبعد الأول لحرف السكين ((Z= 55 mm) ويمثل الهواء وهي المصفوفة (D)، والمسافة الفاصلة بين مرآة الخرج والبعد الثالث لحرف السكين ((Z= 110 mm) ويمثل الهواء وهي المصفوفة (F).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3.846 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 53 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{F} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1.3 * 10^{-3} & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 55 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 110 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C * B * A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 53 \\ 0.0017 & 1.0881 \end{bmatrix}$$

$$x_2' = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1' \end{bmatrix}$$

تمثل (x_2) خصر النمط الليزري على مرآة الحرج وتمثل (x_2') التباعد وتمثل (x_1) خصر النمط الليزري على (مرآة الدخل) السطح المستوي وتمثل (x_1') التباعد على السطح المستوي.

وتم حساب التباعد:

$$x_1' = \theta_1' = \frac{\lambda}{\pi * x_1} = \frac{\lambda}{\pi * w_1} = 1.677 (m \text{ rad})$$

$$w_2 = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ \theta_1' \end{bmatrix}$$

ينتج أن قيمة ($w_2 = 290 \mu m$) وهي قيمة قريبة من القيمة الحسابية التي نتجت معنا على مرآة الخرج.

✓ تم حساب خصر النمط الليزري على بعد ($x_1 = 5.5 \text{ cm}$) من مرآة الخرج ونتجت معنا قيمة الخصر بشكل تجريبي بطريقة حرف السكين ($w_3 = 395 \mu m$)، سوف يتم التأكد من هذه القيمة التجريبية بشكل حسابي بطريقة مصفوفات غاوص نبدأ من مرآة الدخل (السطح المستوي):

$$D * C * B * A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.083 & 107.42 \\ 0.0017 & 1.088 \end{bmatrix}$$

$$w_3 = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ \theta_1' \end{bmatrix}$$

$$\begin{matrix} w_3 \\ \theta_3 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1.083 & 107.42 \\ 0.0017 & 1.088 \end{bmatrix} * \begin{matrix} 0.202 \\ 1.677 * 10^{-3} \end{matrix}$$

ينتج أن قيمة ($w_3 = 398 \mu m$) وهي قيمة قريبة من القيمة الحسابية التي نتجت معنا بطريقة حرف السكين على البعد الأول.

✓ تم حساب خصر النمط الليزري على بعد ($x_3 = 11 cm$) من مرآة الخرج ونتاجت معنا قيمة الخصر بشكل تجريبي بطريقة حرف السكين ($w_4 = 405 \mu m$)، سوف يتم التأكد من هذه القيمة التجريبية بشكل حسابي بطريقة مصفوفات غاوس.

$$F * C = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.183 & 110 \\ 0.002 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{matrix} w_4 \\ \theta_4 \end{matrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} * \begin{matrix} w_2 \\ \theta_2 \end{matrix}$$

تم حساب التباعد:

$$\theta_2 = x_2 = \frac{\lambda}{\pi * x_2} = \frac{\lambda}{\pi * w_2} = 1.506 (m rad)$$

$$\begin{matrix} w_4 \\ \theta_4 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1.183 & 110 \\ 0.002 & 1 \end{bmatrix} * \begin{matrix} 0.225 \\ 1.506 * 10^{-3} \end{matrix}$$

ينتج أن قيمة ($w_4 = 432 \mu m$) وهي قيمة قريبة من القيمة التجريبية التي نتجت معنا بطريقة حرف السكين على البعد الثالث.

يلاحظ تطابق بين القيم الحسابية والقيم التجريبية لخصر النمط الليزري عند كل موضع.

- يتم تجريبياً التحقق من استطاعة العتبة لأنماط مختلفة كتابع لموضع المحرقة لحزمة الضخ في القضيب الليزري، ثم يتم رسم (P_{out}) بدلالة (P_{in}) ليتم تعيين استطاعة العتبة (P_{th}) والمردود عند كل موضع محرقة (S_e).

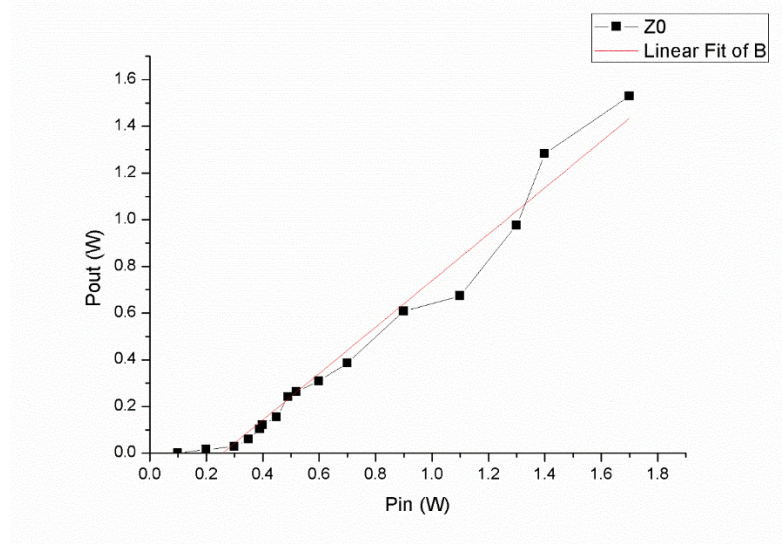
النتائج التجريبية لقياس استطاعة الخرج عند كل قيمة استطاعة ضخ عند مواضع محرقة مختلفة في الاتجاهين السالب والموجب:

- $Z_0 = 1 \text{ mm}$ ، ظهر النمط الغاوسي عند تيار العتبة ($I_{th} = 1.95 \text{ (A)}$) أي استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.22 \text{ (W)}$) وعند هذا التيار كانت استطاعة الخرج ($P_{out} = 0.016 \text{ (W)}$)، كما يظهره الجدول (٥).

$P_{in}(W)$	0.1	0.2	0.3	0.35	0.39	0.4	0.45	0.49	0.52	0.6	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4	1.7
$P_{out} (mW)$	0	16	29	60	103	122	155	242	263	309	386	608	674	976	1283	1530

الجدول (٥): استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الضخ (الدخل).

تم رسم استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل باستخدام برنامج (OriginPro8) في الشكل (٢٣-٣):



شكل (٢٣-٣): استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند موضع المحرقة ($Z_0 = 0$)

يتبين من الشكل (٢٣-٣): عند القيام بتناسب خطي للقياسات الناتجة، تنتج معادلة من الشكل:

$$y = b + ax$$

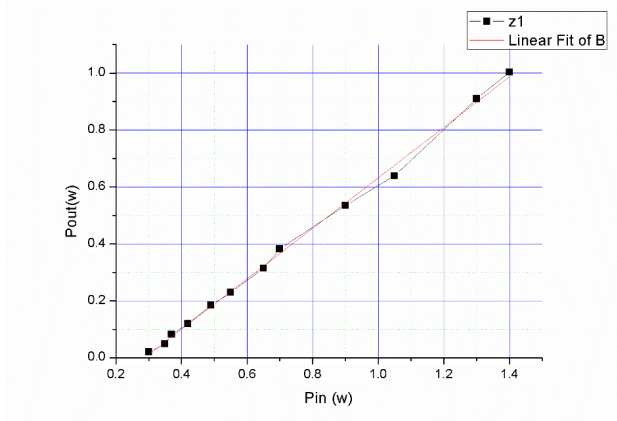
تمثل هذه المعادلة:

$$P_{out} = S_e * (P_{in} - P_{th})$$

فتنتج قيمة استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.24 \text{ W}$)، والمردود ($S_e = 0.9$).

- عند التحرك في الاتجاه السالب ($Z_1 = 0.5 \text{ mm}$)، ظهر النمط الغاوسي عند تيار العتبة ($I_{th} = 2.02 \text{ (A)}$) وعند هذا التيار كانت استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.3 \text{ (W)}$) واستطاعة الخرج ($P_{out} = 0.02 \text{ (W)}$).

يتم رسم استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل:

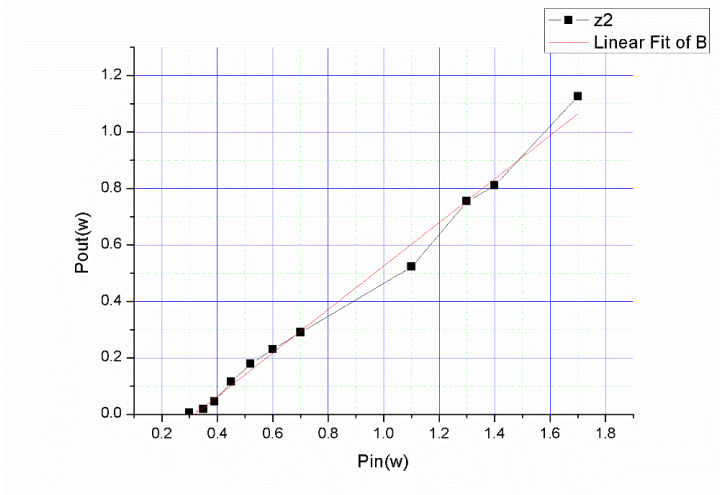


شكل (٣-٢٤): استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_1 = 0.5 \text{ mm}$)

فتكون استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.27 \text{ (W)}$)، والمردود ($S_e = 0.88$).

- عند ($Z_2 = 1 \text{ mm}$)، ظهر النمط الغاوصي عند تيار العتبة ($I_{th} = 2.05 \text{ (A)}$) وعند هذا التيار كانت استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.3 \text{ (W)}$) واستطاعة الخرج ($P_{out} = 0.006 \text{ (W)}$).

يتم رسم استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل:

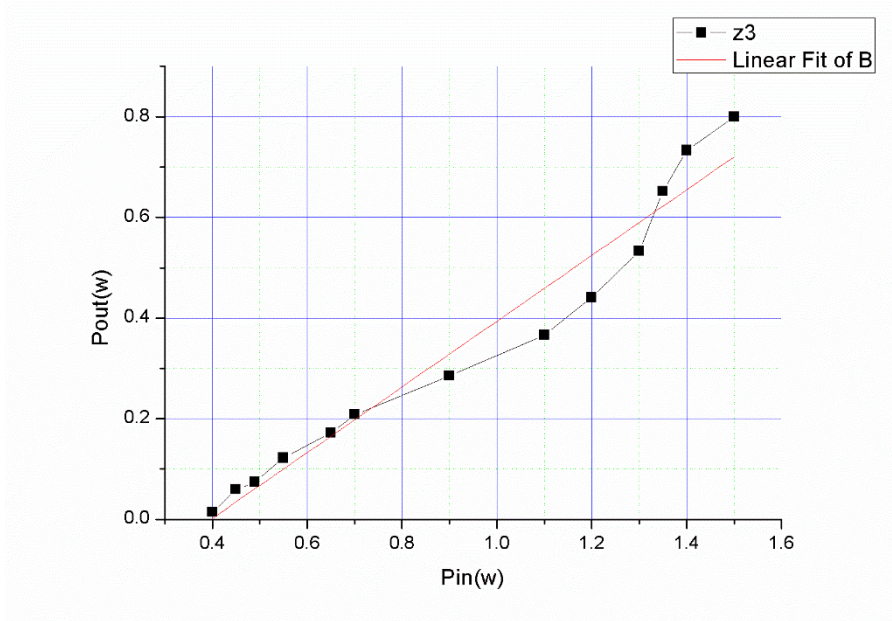


شكل (٣-٢٥): استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_2 = 1 \text{ mm}$)

فتكون استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.32 \text{ (W)}$)، والمردود ($S_e = 0.7$).

- عند ($Z_3 = -0.5 \text{ mm}$)، ظهر النمط الغاوسي عند تيار العتبة ($I_{th} = 2.24 \text{ (A)}$) وعند هذا التيار كانت استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.4 \text{ (W)}$) واستطاعة الخرج ($P_{out} = 0.014 \text{ (W)}$).

يتم رسم استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل:

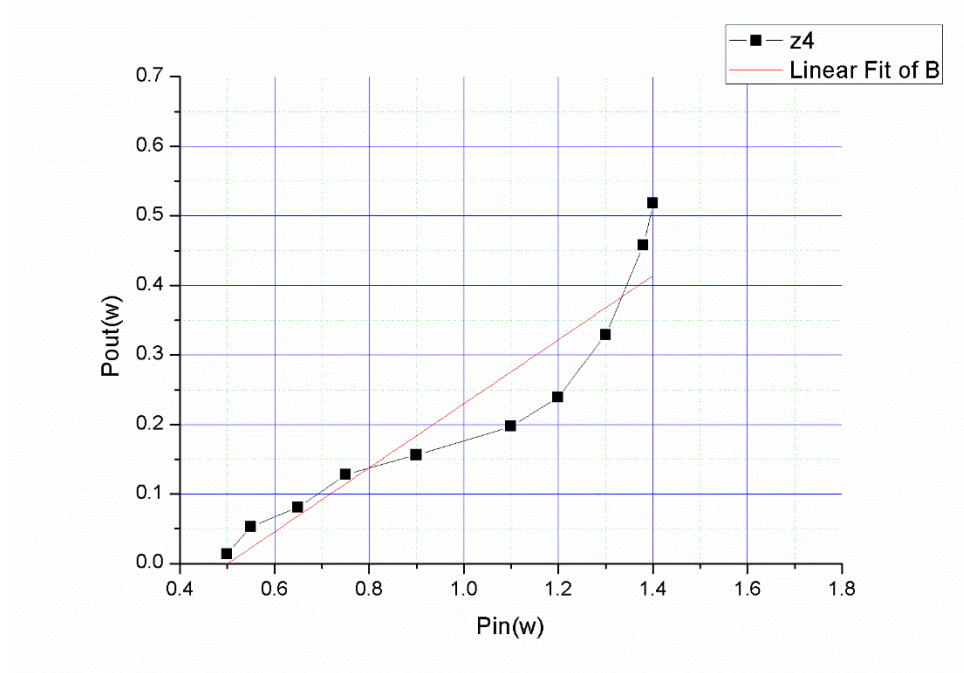


شكل (٣-٢٦): استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_3 = -0.5 \text{ mm}$)

فتكون استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.41 \text{ (W)}$)، والمردود ($S_e = 0.6$).

- عند ($Z_4 = -1 \text{ mm}$)، ظهر النمط الغاوسي عند تيار العتبة ($I_{th} = 2.56 \text{ (A)}$) وعند هذا التيار كانت استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.5 \text{ (W)}$) واستطاعة الخرج ($P_{out} = 0.014 \text{ (W)}$).

رسم استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل:



شكل (٣-٢٧): استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_4 = -1 \text{ mm}$)

فتكون استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.5 \text{ (W)}$)، والمردود ($S_e = 0.46$).

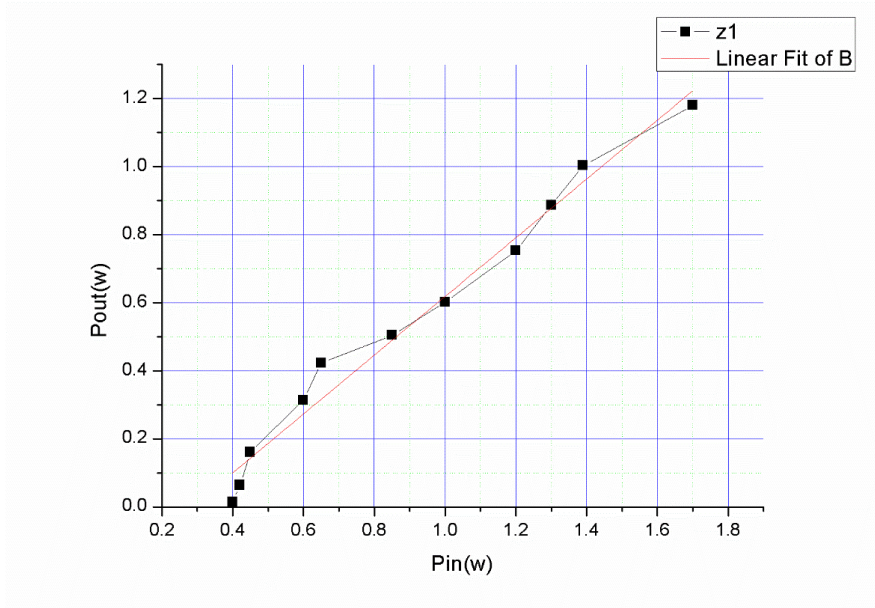
- نعود الى (Z_0) ثم نأخذ أبعاد المحرقة بالجهة المعاكسة أي بالاتجاه الموجب بجهة زيادة المحرقة لحزمة الضخ:

- عند ($Z_1 = +1.5 \text{ mm}$)، ظهر النمط الغاوصي عند تيار العتبة ($I_{th} =$

2.03 (A)) وعند هذا التيار كانت استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.4 \text{ (W)}$) واستطاعة

الخرج ($P_{out} = 0.014 \text{ (W)}$).

يتم رسم استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل:

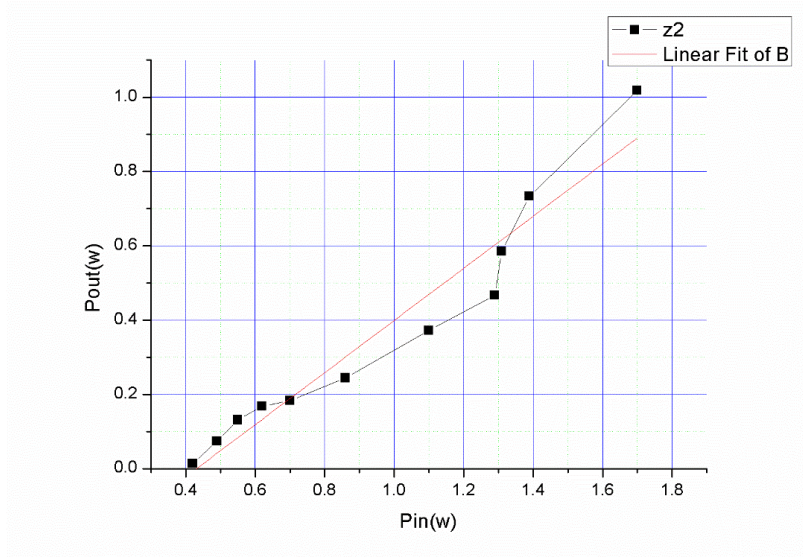


شكل (٣-٢٨): استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_1 = 1.5 \text{ mm}$)

فتكون استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.38 \text{ (W)}$)، والمردود ($S_e = 0.8$).

- عند ($Z_2 = 2 \text{ mm}$)، ظهر النمط الغاوصي عند تيار العتبة ($I_{th} = 2.27 \text{ (A)}$) وعند هذا التيار كانت استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.42 \text{ (W)}$) واستطاعة الخرج ($P_{out} = 0.014 \text{ (W)}$).

يتم رسم استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل:

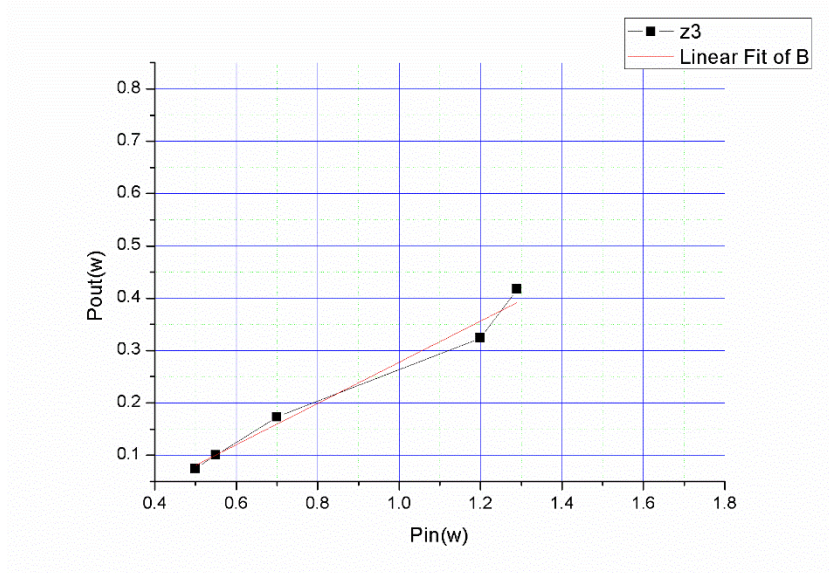


شكل (٣-٢٩): استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_2 = 2 \text{ mm}$)

فتكون استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.4 \text{ (W)}$)، والمردود ($S_e = 0.7$).

- عند ($Z_3 = 2.5 \text{ mm}$)، ظهر النمط الغاوصي عند تيار العتبة ($I_{th} = 2.54 \text{ (A)}$) وعند هذا التيار كانت استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.5 \text{ (W)}$) واستطاعة الخرج ($P_{out} = 0.074 \text{ (W)}$).

يتم رسم استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل:

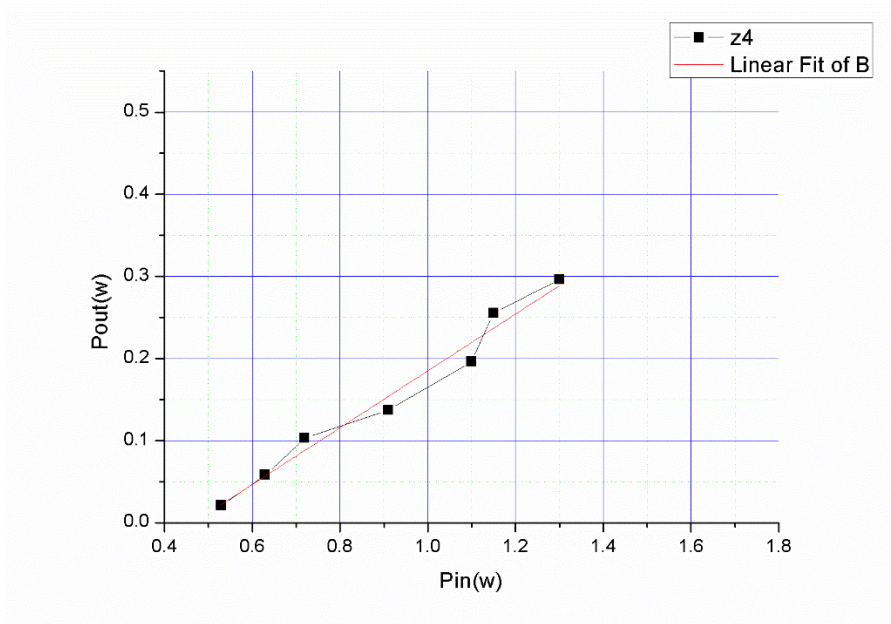


شكل (٣-٣٠): استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_3 = 2.5 \text{ mm}$)

فتكون استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.48 \text{ (W)}$)، والمردود ($S_e = 0.39$).

- عند ($Z_4 = 3 \text{ mm}$)، ظهر النمط الغاوصي عند تيار العتبة ($I_{th} = 2.67 \text{ (A)}$) وعند هذا التيار كانت استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.53 \text{ (W)}$) واستطاعة الخرج ($P_{out} = 0.021 \text{ (W)}$).

يتم رسم استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل:



شكل (٣-٣١): استطاعة الخرج بدلالة استطاعة الدخل عند ($Z_4 = 3 \text{ mm}$)

فتكون استطاعة العتبة ($P_{th} = 0.5 \text{ (W)}$)، والمردود ($S_e = 0.34$).

- سيتم رسم المردود (S_e) بدلالة عمق المحرقة ($Z \text{ (mm)}$) على سطح القضيب الليزري ($Z = 0 \text{ (mm)}$) والمحرقة ضمن القضيب في الاتجاه الموجب ثم خارج القضيب في الاتجاه المعاكس (الجدول (٦)).

(mm)Z	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
S_e	0.46	0.6	0.7	0.88	0.8	0.88	0.7	0.39	0.34

الجدول (٦): المردود بدلالة عمق المحرقة.

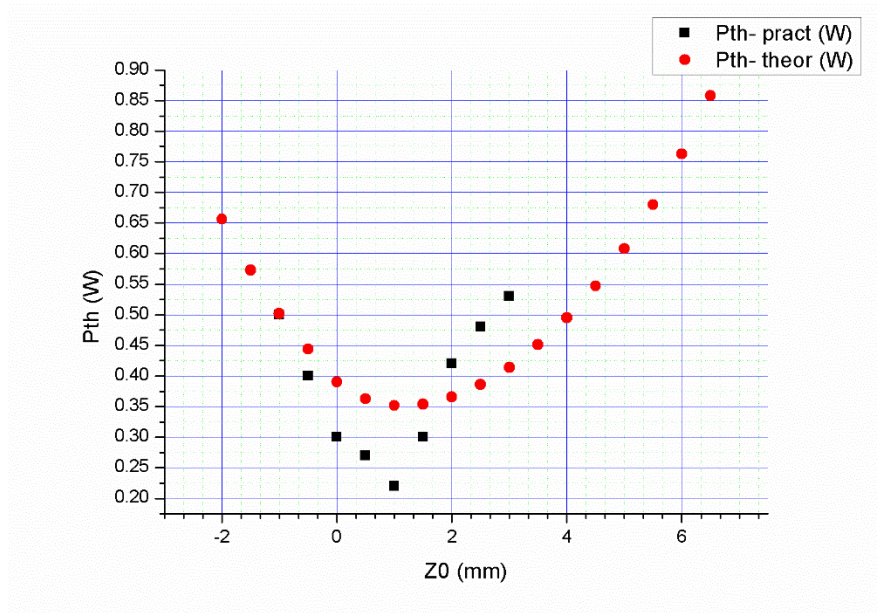
نلاحظ بأن المردود على سطح القضيب يمتلك أقل قيمة وعند الابتعاد بالاتجاهين الموجب والسالب تتزايد قيمة المردود تقريباً بنفس القيمة.

يتضمن الجدول (٧) قيم استطاعة العتبة الحسابية ($P_{th-theor} (LG_{00}) (w)$) من العلاقة (7) واستطاعة العتبة التجريبية ($P_{th-prc} (LG_{00}) (w)$) للنمط (LG_{00}) بدلالة عمق المحرقة ($Z \text{ (mm)}$)، حيث أن الخطأ في قياس الاستطاعة هو (± 0.05).

Z (mm)	$P_{th-theor} (LG_{00})$ (w)	$P_{th-prc} (LG_{00})$ (w)
-1	0.502	0.5 ± 0.025
-0.5	0.422	0.4 ± 0.02
0	0.393	0.3 ± 0.015
0.5	0.363	0.27 ± 0.013
1	0.352	0.22 ± 0.011
1.5	0.354	0.4 ± 0.02
2	0.366	0.42 ± 0.021
2.5	0.386	0.48 ± 0.024
3	0.414	0.53 ± 0.026
3.5	0.451	
4	0.495	
4.5	0.547	
5	0.608	
5.5	0.680	
6	0.763	
6.5	0.858	

الجدول (٧): استطاعة العتبة التجريبية والحسابية للأنماط الثلاثة بدلالة البعد المحرقى

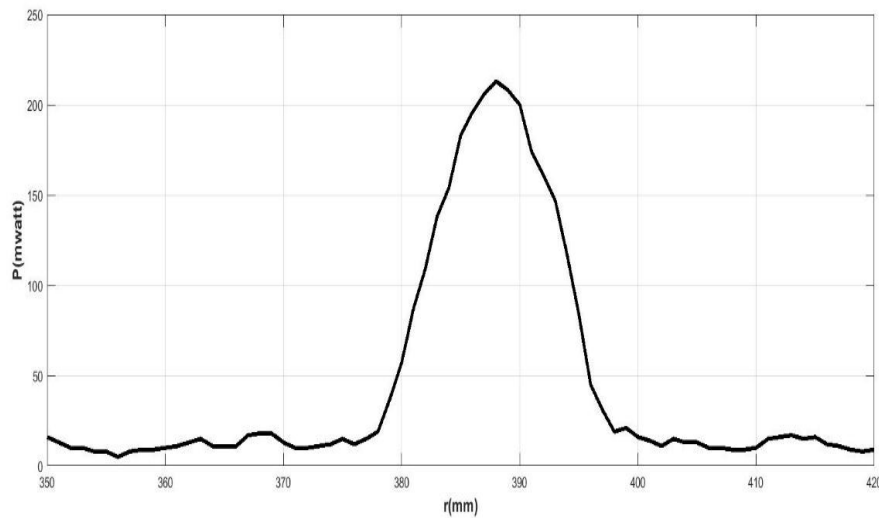
سوف يتم رسم استطاعة العتبة التجريبية والحسابية بدلالة البعد المحرقى في اتجاهين متعاكسين من سطح القضيب الليزرى للنمط الليزرى (LG_{00}):



شكل (٣-٣٢): استطاعة العتبة التجريبية والحسابية للنمط (LG_{00}) بدلالة عمق المحرقة

نلاحظ من الشكل (٣-٣٢)، النمط (LG_{00}) يملك أقل استطاعة عتبة عند ($Z_0 = 1 \text{ mm}$).

ويكون شكل النمط الغاوسي مع وضع ($RG-850$) على عدسة الكاميرا (CCD) لقطع الأطوال الموجية لمصدر الضخ تحت (850 nm)



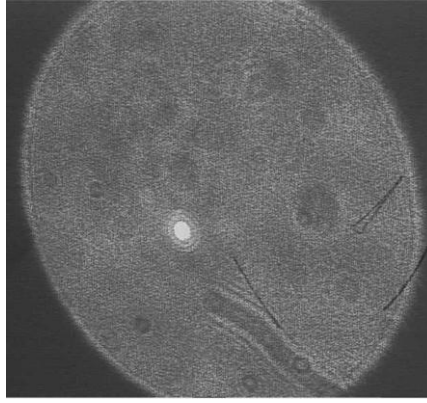
شكل (٣-٣٣): النمط الغاوسي مع مرشح لتخميد الاستطاعة.

حيث نلاحظ أن المرشح ($RG-850$) يقوم بحذف الأطوال الموجية لمصدر الضخ الأقل من (850 nm) ومنها طول موجة الضخ ويحافظ فقط على طول الموجة الليزرية ويقوم بتخفيف الاستطاعة ولا تصل عدسة الكاميرا لمرحلة الإشباع.

الإزاحة وفق المحورين (x, y):

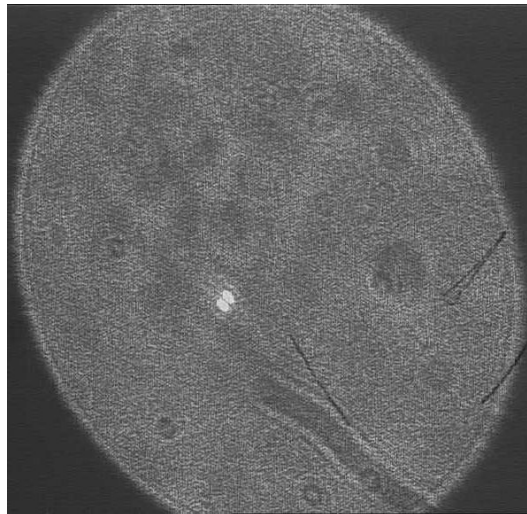
تم الحصول على أنماط ليزيرية بإزاحة حامل الديود الليزيري المقترن مع الليف البصري وفق المحورين (x) و (y) بخطوات محددة على الفرنية وتم الحصول على الأنماط الهرميتية أنماط بتناظر ديكارتي ولكن لم نعطي أهمية لها لأنه يوجد ضياع كبير باستطاعة الضخ بسبب الانزياح وفق المحورين عن المحور البصري لذلك لا يوجد استفادة من كامل استطاعة الضخ، وتم نشر أبحاث كثيرة حول كيفية توليد الأنماط الهرميتية (الديكارتية) [7].

تم الحصول على النمط الأول وهو النمط الغاوسي (TEM_{00}) عند استطاعة ضخ ($P_{in} = 2.94$ w) وإزاحة ($\Delta x = 0$ mm).



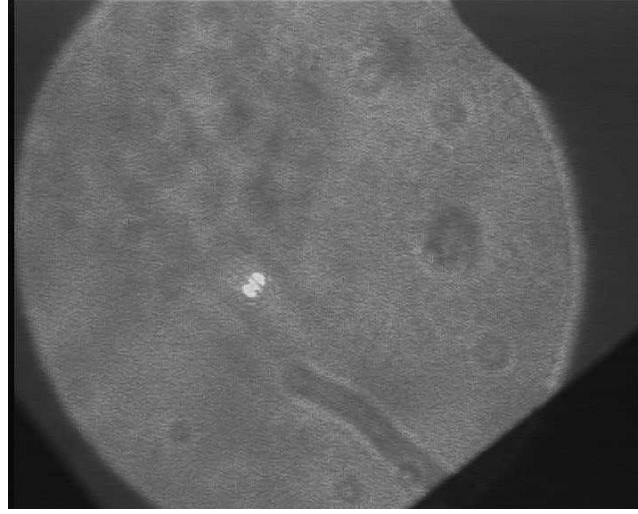
شكل (٣-٤) النمط الغاوسي (TEM_{00}) عند استطاعة ضخ ($P_{in} = 2.94$ w) وإزاحة ($\Delta x = 0$ mm).

ثم تم الحصول على النمط الثاني وهو النمط (TEM_{10}) تم الحصول على هذه النمط عند استطاعة ضخ ($P_{in} = 2.96$ w) وإزاحة ($\Delta x = 0.35$ mm):



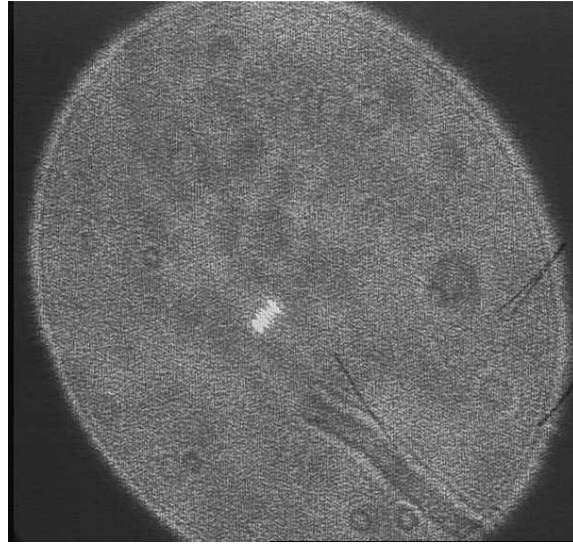
شكل (٣-٥) النمط الغاوسي (TEM_{10}) عند استطاعة ضخ ($P_{in} = 2.96$ W) وإزاحة ($\Delta x = 0.35$ mm).

ثم تم الحصول على النمط الثالث وهو النمط (TEM_{20}) وإزاحة ($\Delta x = 0.4 \text{ mm}$).



شكل (٣-٣٦): النمط الغاوصي (TEM_{20}) وإزاحة ($\Delta x = 0.4 \text{ mm}$).

ثم تم الحصول على النمط الثاني وهو النمط (TEM_{40}) وإزاحة ($\Delta x = 0.5 \text{ mm}$).



شكل (٣-٣٧) النمط الغاوصي (TEM_{40}) وإزاحة ($\Delta x = 0.5 \text{ mm}$)

الفصل الرابع

الضخ الخلفي لليزر طلبة بمنبع متعدد الألياف

٤-١) مبدأ العمل بالضخ الخلفي بواسطة منبع خرج سيع ألياف:

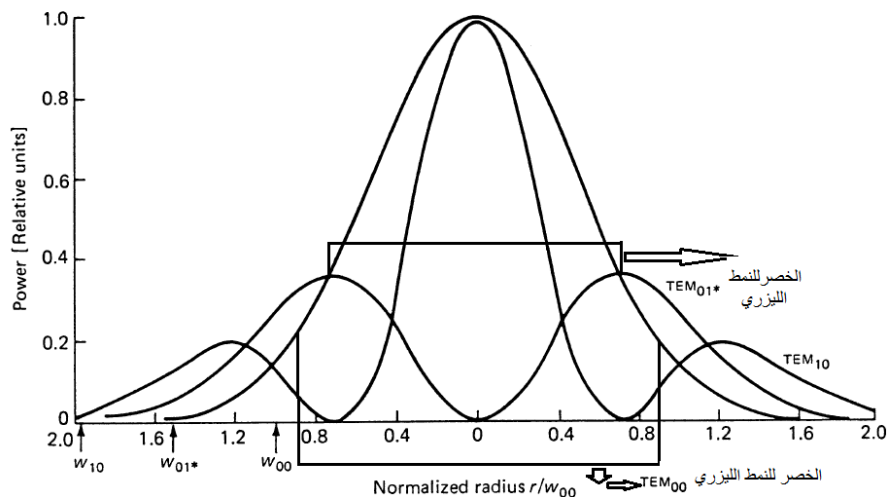
بعد عجز فصل النمط الغاوسي عن الأنماط الأخرى، تم اللجوء الى استخدام مجزئ حزمة خرج سيع ألياف (سنة ألياف متجمعة حول الليف المركزي)، أي لإظهار النمط الأساسي (LG_{00}) يتم الضخ في المركز، يعمل الليف المركزي وإلغاء عمل الألياف الستة الأخرى، حيث يمتلك أكبر تداخل بين شدة الضخ وشدة النمط الليزري في المركز فيظهر النمط الأساسي أولاً، وللتحكم بإظهار النمط (LG_{01}^*) على حساب النمط الأساسي تم توزيع الضخ على شكل حلقة وعدم الضخ بالمركز عن طريق إلغاء عمل الليف المركزي والضخ بالست ألياف الأخرى فيكون التداخل أعظمي حول المركز بين شدة الضخ وشدة النمط الليزري لذلك يخرج النمط (LG_{01}^*) ولا يظهر النمط الأساسي.

أولاً: تمت الحسابات النظرية لإظهار الأنماط اعتماداً على إزاحة الضخ عن المركز (المحور البصري) استناداً الى [4]:

لحساب نصف قطر حزمة الضخ (w_p) من [8] و [7]:

$$w_p(z) = w_{p0} + \theta(z - z_0) \quad (36)$$

حيث أن $\theta = 5.6^\circ$ تباعد حزمة الليزر، و ($z_0 = 0$) سطح بلورة (Nd-YAG)، و ($w_{p0} =$) $52 * 10^{-3} \text{ mm}$ نصف قطر الليف المركزي، و ($z = 1 \text{ mm}$) موضع المحرقة داخل البلورة.



شكل (١-٤) الاستطاعة بدلالة (r/w_{00}) للأنماط الثلاثة الأولى. [6]

للتحكم بظهور النمط تكون المجاوبة متألفة من مرآة مستوية ومرآة منحنية بنصف قطر تقعر $(r = 300 \text{ mm})$ بعاكسيه $(R = 80\%)$ وطول المجاوب $(L = 60 \text{ mm})$.

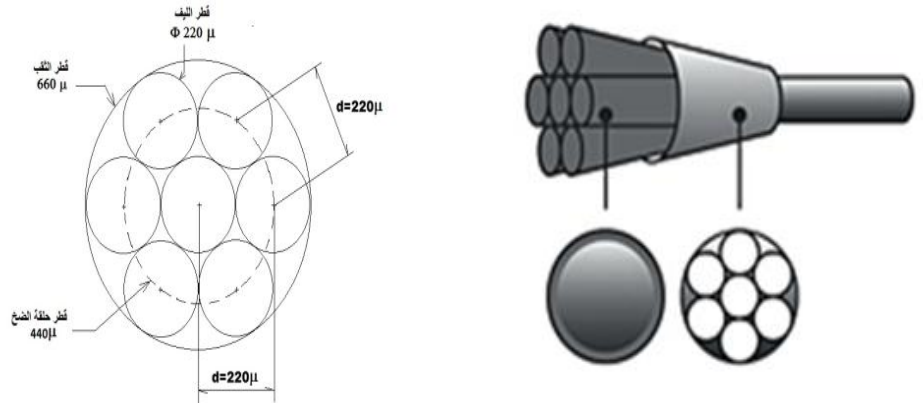
تكون (w_l) حسب مواصفات المجاوب المستخدم: $(w_l = 0.202 \text{ mm})$

٤-١-٢) العمل بمنبع خرجه سبع ألياف:

تم استخدام مجزئ حزمة خرجه سبع ألياف، حيث تم وصل دخل المجزئ بديود ليزري ووصل دخل الليف البصري المركزي السابع بديود ليزري آخر للتحكم بظهور النمط المطلوب.

دخل المجزئ يكون الديود الليزري من طراز $(WSLX-808-007-H)$ وخرج المجزئ عبارة عن سبع ألياف بقطر الغلاف $(220 \mu\text{m})$ و قطر الغمد $(125 \mu\text{m})$ ، و قطر القلب $(105 \mu\text{m})$ وعند ضخ الديود الليزري باستطاعة كهربائية تكون استطاعة خرج المجزئ لكل ليف هي نفس استطاعة دخل الديود الليزري ولكن مقسومة على سبعة.

تم تصميم حامل ميكانيكي دائري الشكل وتم صنع ثقب صغير بقطر (0.7 mm) ليتم تثبيتها على خرج المجزئ وإخراج الألياف منها الشكل (٤-٩) يوضح ذلك



شكل (٤-٢) منبع متعدد الألياف (سبع ألياف)

يوضح الشكل (٤-٩) الحامل الميكانيكي فيه ثقب $(0.7 \text{ mm} \approx 660)$ وتكون قطر حلقة الضخ $(440 \mu\text{m})$ ، حيث يتم وضع خرج المجزئ هو عبارة عن سبع ألياف نضع الألياف الستة مصدر ضخ للمجاوبة المستخدمة لاحقاً والليف السابع يتم وصله الى ديود ليزري آخر من الطراز $(WSLX-808-H-006)$ موصول الى كتلة تغذية خاصة به، ويكون توزيع الألياف الستة كدائرة متمركزة حول الليف السابع في المركز، يستخدم الليف السابع من مجزئ الحزمة كمرجع لقياس استطاعة خرج الليزر.

٤-١-٣) النتائج الحسابية:

يتم اختيار الإحداثيات للألياف الستة حيث تم إجراء الحسابات على ليف بصري مع غلاف ($d = 200 \mu\text{m}$) وبعد تجميع الألياف البصرية ضمن الحامل الميكانيكي تكون قطر حلقة الضخ ($2r = 440 \mu\text{m}$) ويكون خصر الحزمة الليزرية حسب المجاوب الليزري المعتمد في التجربة العملية والحسابات ($w_{l0} = 202 \mu\text{m}$):

إحداثيات توزع الألياف الستة المتوزعة حول ليف مركزي:

$$(x_1, y_1) = (d, 0) = (220, 0)$$

$$(x_2, y_2) = (d * \sqrt{3}/2, -d/2) = (110, -190)$$

$$(x_3, y_3) = (-d * \sqrt{3}/2, -d/2) = (-110, -190)$$

$$(x_4, y_4) = (-d, 0) = (-220, 0)$$

$$(x_5, y_5) = (-d * \sqrt{3}/2, d/2) = (-110, 190)$$

$$(x_6, y_6) = (d * \sqrt{3}/2, d/2) = (110, 190)$$

حيث أن توزع شدة الضخ بست ألياف، [7]:

$$\begin{aligned} r_p(x - x_i, y - y_i, z - z_i) &= (1/6) \\ &* \left(\frac{2 * \alpha * p_0 * e^{-\alpha z}}{\pi * w_p^2(z) * (1 - e^{-\alpha l})} \right. \\ &* \left[e^{-2 \frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}{w_p^2(z)}} + e^{-2 \frac{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2}{w_p^2(z)}} \right. \\ &+ e^{-2 \frac{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2}{w_p^2(z)}} + e^{-2 \frac{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2}{w_p^2(z)}} \\ &+ e^{-2 \frac{(x-x_5)^2 + (y-y_5)^2}{w_p^2(z)}} + e^{-2 \frac{(x-x_6)^2 + (y-y_6)^2}{w_p^2(z)}} \left. \right] \end{aligned} \quad (37)$$

يتم حساب استطاعة العتبة والمردود:

المردود (S_e)، [8]:

$$S_e = \frac{T}{2\gamma} \eta_p \eta_0 \quad (38)$$

استطاعة العتبة، [8]:

$$P_{th} = \frac{Y * I_{sat}}{\eta_p * l} * V_{eff} \quad (39)$$

• يتم إدراج جدول يبين مقارنة المردود واستطاعة العتبة لكل نمط عند الضخ بالليف المركزي:

	S_e	P_{th}
LG ₀₀	0.56	0.39
LG _{01*}	0.45	1.52

الجدول (٨) مقارنة بين (S_e) و (P_{th}) للنمطين.

تبين من الجدول (٨): النمط (LG₀₀) يملك استطاعة عتبة أقل من استطاعة العتبة للنمط (LG_{01*}) أي الظهور الأول سوف يكون للنمط (LG₀₀) قبل النمط (LG_{01*}).

بعد حساب الحجم الفعال أو معامل التغطية (V_{eff}) يتم حساب الريح (g) ثم الريح الفعلي (G) واستطاعة الخرج (P_{out}):

استطاعة الخرج (P_{out}):

$$P_{out} = S_e * [P_{in} - P_{th}]$$

يتم إدراج جدول يبين مقارنة في الريح بين النمط (LG₀₀) والنمط (LG_{01*}) ومقارنة بين استطاعة الخرج لكل نمط عند كل استطاعة ضخ عندما ($d=220 \mu m$):

$P_{in}(W)$	$P_{out}(00)$	G_{00}	G_{01*}	$P_{out}(01*)$
1.7	0.73	2.37	1.24	0.07
2	0.9	2.76	1.29	0.21
2.5	1.18	3.56	1.38	0.44
3	1.47	4.6	1.48	0.67

3.3	1.6	5.36	1.54	0.81
3.5	1.75	5.9	1.58	0.89
3.7	1.86	6.5	1.62	0.98
4	2.03	7.65	1.68	1.12
4.5	2.32	9.86	1.8	1.35
5	2.5	12.7	1.9	1.58

الجدول (٩) مقارنة في الريح واستطاعة الخرج بين النمط (LG₀₀) والنمط (LG_{01*}) عندما

$$.(d= 220 \mu\text{m})$$

نلاحظ من الجدول (٩): في حالة الضخ بليف وحيد بأن الريح للنمط (LG₀₀) أكبر من الريح للنمط (LG_{01*})، والنمط (LG_{01*}) يملك استطاعة عتبة أكبر من استطاعة العتبة للنمط (LG₀₀) بسبب الظهور الأول للنمط (LG₀₀) قبل النمط (LG_{01*}).

- يتم قطع التغذية عن الليف المركزي وتشغيل المنبع الموصول بالألياف الستة، يبين الجدول (١٠) مقارنة المردود واستطاعة العتبة لكل نمط عند الضخ بالألياف الستة:

	S _e	P _{th}
LG ₀₀	0.216	2.5
LG _{01*}	0.403	1.727

الجدول (١٠) مقارنة بين (S_e) و (P_{th}) للنمطين.

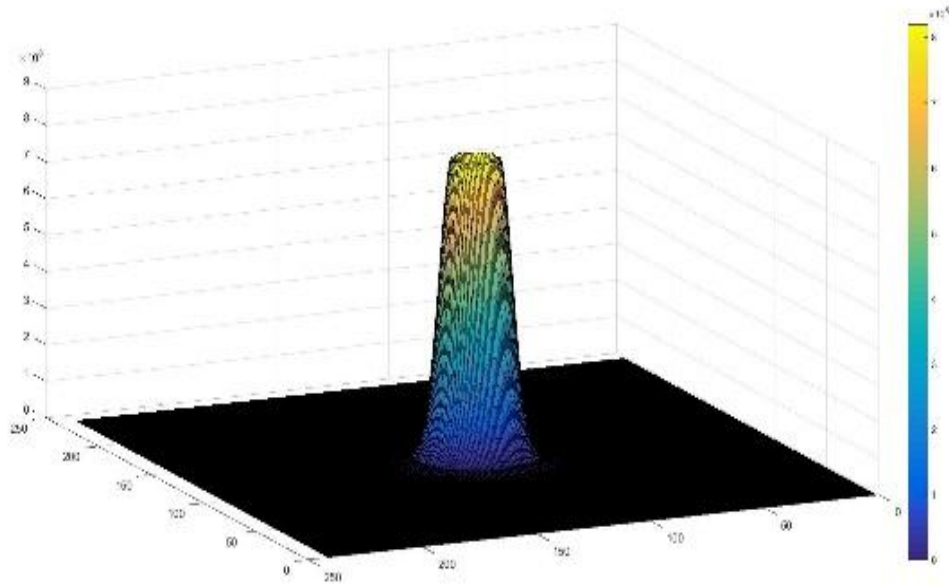
تبين من الجدول (١٠): النمط (LG_{01*}) يملك استطاعة عتبة أصغر من استطاعة العتبة للنمط (LG₀₀) أي الظهور الأول سوف يكون للنمط (LG_{01*}) قبل النمط (LG₀₀).

يبين الجدول (١١) مقارنة في الريح بين النمط (LG₀₀) والنمط (LG_{01*}) ومقارنة بين استطاعة الخرج لكل نمط عند كل استطاعة ضخ عند الضخ بست ألياف:

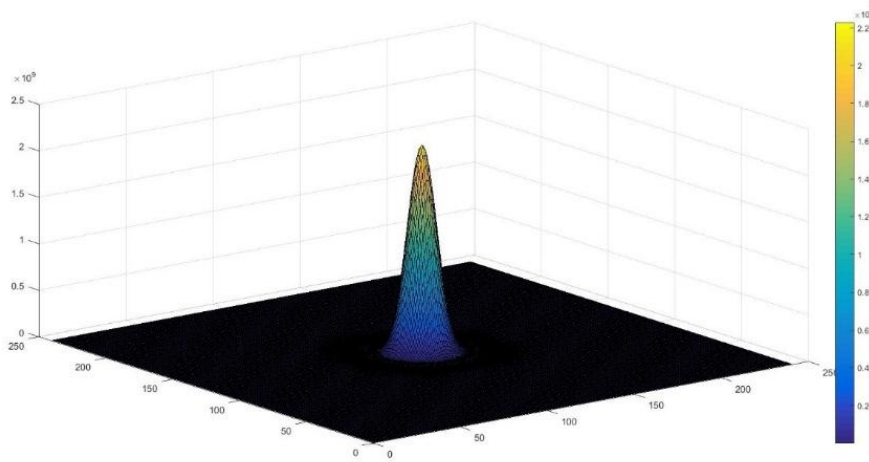
P _{in} (W)	P _{out} (01*)	G _{01*}	G ₀₀	P _{out} (00)
2.3	0.09	1.25		0
2.5	0.16	1.28		0
2.7	0.23	1.3		0
3	0.34	1.34	1.23	0.015
3.3	0.44	1.38	1.25	0.07
3.5	0.51	1.42	1.27	0.108
3.7	0.58	1.44	1.28	0.145
4	0.68	1.48	1.33	0.2

الجدول (١١): مقارنة بين الريح واستطاعة الخرج لكل نمط عند كل استطاعة ضخ.

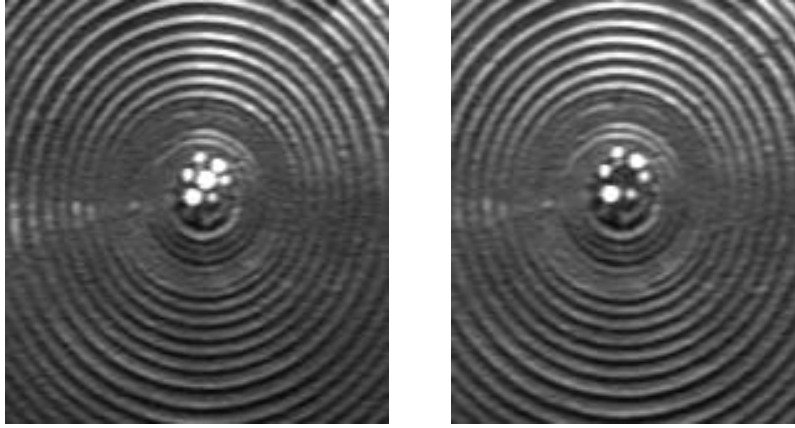
نلاحظ في حالة نصف قطر حلقة الضخ ($d= 220 \mu\text{m}$) بأن الريح للنمط (LG_{00}) أصغر من الريح للنمط (LG_{01*})، ولا يظهر النمط (LG_{01*}) قبل قيمة لاستطاعة الضخ ($P_{in}= 2.3 \text{ W}$)، ولا يوجد ظهور للنمط الليزري (LG_{00}) قبل الضخ باستطاعة دخل ($P_{in}= 3 \text{ W}$) أي النمط (LG_{01*}) يملك استطاعة عتبة أصغر من استطاعة العتبة للنمط (LG_{00}) بسبب الظهور الأول للنمط (LG_{01*}) قبل النمط (LG_{00}).



الشكل (٤-٣): النمط (LG_{01*}).



الشكل (٤-٤): النمط (LG_{00}).



(أ) (ب)

شكل (٤-٥): (أ) ستة ألياف متمركزة حول ليف سابع لا يعمل، (ب) ستة ألياف متمركزة حول ليف سابع يعمل.

تكون قطر حلقة الضخ مباشرة بعد الديود الليزري المقترن مع الليف البصري ($2r = 510 \mu m$) وبما أننا نستخدم نظام عدسات تكبيره واحد بالتالي نصف قطر حلقة الضخ ($d = 255 \mu m$) يدل ذلك على وجود تباعد في الألياف عن بعضها بسبب التجميع، وخصر حزمة النمط الليزري ($w_{10} = 0.202 mm$) حسب معطيات المجاوب المستخدم، يتم اختيار الإحداثيات للألياف الستة:

$$(x_1, y_1) = (d, 0) = (255, 0)$$

$$(x_2, y_2) = (d * \sqrt{3}/2, -d/2) = (127, -219)$$

$$(x_3, y_3) = (-d * \sqrt{3}/2, -d/2) = (-127, -219)$$

$$(x_4, y_4) = (-d, 0) = (-255, 0)$$

$$(x_5, y_5) = (-d * \sqrt{3}/2, d/2) = (-127, 219)$$

$$(x_6, y_6) = (d * \sqrt{3}/2, d/2) = (127, 219)$$

يبين الجدول (١٢) مقارنة المردود واستطاعة العتبة لكل نمط عند الضخ بالألياف الستة بعد حسابهم على برنامج (MATLAB):

	S_e	P_{th}
LG_{00}	0.14	4.2
LG_{01*}	0.32	2.49

الجدول (١٢) مقارنة بين (S_e) و (P_{th}) للنمطين.

بعد حساب الحجم الفعال أو معامل التغطية (V_{eff}) يتم حساب الريح (g) ثم الريح الفعلي (G) واستطاعة الخرج (P_{out}):

يتم إدراج جدول يبين مقارنة في الريح بين النمط (LG_{00}) والنمط (LG_{01*}) ومقارنة بين استطاعة الخرج لكل نمط عند كل استطاعة ضخ:

$P_{in}(W)$	$P_{out}(01^*)$	G_{01^*}	G_{00}	$P_{out}(00)$
3	0.026	1.22		0
3.3	0.109	1.25		0
3.5	0.165	1.27		0
3.7	0.22	1.28		0
4	0.305	1.32		0
5	0.58	1.41	1.22	0.01
5.5	0.7	1.46	1.25	0.07

الجدول (١٣) مقارنة في الريح واستطاعة الخرج بين النمط (LG_{00}) والنمط (LG_{01*}).

نلاحظ عند الضخ بست ألياف بأن الريح للنمط (LG_{01*}) أكبر من الريح للنمط (LG_{00}).

ملاحظة:

تم توصيف منبع الضخ بعد عملية تجميع الألياف حسب مبدأ التراص ضمن الحامل الميكانيكي، بعد التأكد من عملية التبريد لمنبع الضخ، تم إجراء اختبار لمجزئ الحزمة عند الضخ بتيارات مختلفة.

I(A)	1.3	1.5	1.7	2	2.3	2.6	3	3.5	4	4.5	5
$P_{in}(W)$	0	0.002	0.1	0.32	0.4	0.8	1.2	1.6	2.1	2.5	2.9
$P_{out}(W)$	0	0	0.08	0.28	0.2	0.5	0.7	1.1	1.2	1.4	1.7

الجدول (١٤): استطاعة الضخ بدلالة استطاعة الخرج للمجزئ.

نلاحظ من الجدول أنه عند الضخ باستطاعة ($P_{in}= 2.9 (W)$) تكون استطاعة خرج المجزئ ($P_{out}= 1.7(W)$) وهي غير كافية لتوليد النمط المطلوب حسب النتائج الحسابية التي أجريت أي لا تتجاوز استطاعة الخرج من المجزئ استطاعة العتبة المطلوبة لتظهر الأنماط المرادة.

الخاتمة:

في الخلاصة، تم اتباع طريقتين للحصول على الأنماط الأعلى ترتيباً، الطريقة الأولى: توليد أنماط (LG_{10}) المهيمنة حلقيه الشكل في نظام ضخ بشكل خلفي بواسطة محرقة حزمة ديود ليزري مقترن مع ليف بصري لينتج شكل ضخ حلقي الشكل، وتزودنا ايضاً الدراسة النظرية بأن استطاعة العتبة للنمط المهيمن تتعلق بموضع المحرقة لحزمة الضخ، حيث أن القيم التجريبية لاستطاعة العتبة متوافق مع القيم التحليلية للنمط المهيمن (LG_{10})، وتبين من هذه الطريقة أنه لا يمكن فصل النمط الغاوصي عن النمط المنافس المطلوب. لذلك تم اتباع طريقة أخرى: باستخدام مجزئ حزمة موصول على خرج الليف المقترن مع ديود الليزري وتم إجراء دراسة نظرية على هذه الطريقة وتم تطبيقها مخبرياً لتثبيت صحة الطريقة والنتائج، والنتيجة أنه لم نتمكن من الحصول على النتيجة المتوقعة وهي عزل النمط الأساسي عن النمط الأعلى ترتيباً أي إظهار النمط (LG_{01*}) قبل النمط الأساسي (LG_{00}) ، بسبب صعوبات بهذه الطريقة من حيث التطبيق وضبط المسافات الدقيقة بين الألياف وتجميع الألياف خصوصاً أن الأبعاد التي يتم التعامل معها من مرتبة أجزاء المليمتر في الاتجاه العرضاني، والسبب الآخر هو أن خرج الاستطاعة للمجزئ متعدد الألياف غير كافية لإظهار النمط (LG_{01*}) المطلوبة حسب الحسابات النظرية التي أجريت.

التوصيات:

١. لتكملة العمل سيتم طلب مجزئات حزمة تعطي تيار خرج عالي وتحمل التيارات العالية وتحمل درجات الحرارة لتجنب تكسرها عند الاستطاعة العالية للضخ.
٢. أو طلب عدد من الديودات الليزرية سيتم تجميعها واستخدامها كمصدر للضخ والتحكم بشكل الضخ عن طريقها.
٣. أنتمة التحكم بدرجة الحرارة وتثبيتها لكي لا يكون لها تأثير على نتائج القياسات.

المراجع:

1. Mitchell A, et al, 2019– The Resilience of Hermite– and Laguerre– Gaussian Modes in Turbulence. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 6P.
2. Kim J.W, et al, 2013– Selective generation of Laguerre–Gaussian (LG_{0n}) mode output in a diode–laser pumped Nd:YAG laser. Elsevier, 4P.
3. BISSON J–F, et al, 2005– Generation of Laguerre–Gaussian modes in Nd–YAG laser using diffractive optical pumping. Astro Ltd, NO 7, 8P.
4. CHEN Y–F, et al, 2000– Generation of Laguerre–Gaussian modes in fiber–coupled laser diode end– pumped lasers. Springer, 4P.
5. Wayne S. Koen, August 2010- END–PUMPED SOLID–STATE LASERS
6. W Koechner, et al, 2006– Solid State Laser Engineering. Springer, 6th. New York, 765.
7. CHEN Y.F, et al, 1997– Generation of Hermite– Gaussian Modes in Fiber– Coupled Laser– Diode End– Pumped Lasers. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL 33M NO 6, 7P.
8. CHEN Y.F, et al, 1997– Analytical model for the design of fiber– coupled laser– diode end– pumped lasers. RLSEVIER, 8P.
9. Dabu .R, et al, 2004– Design and characterization of an end– pumped Nd: YAG microlaser. Romanian Reports in Phisics, VOL 56, NO 2, 12P.
10. Kogelnik .H, et al, 1966– Laser Beams and Resonators. PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL 54, NO 10, 17 P.

الملحقات:

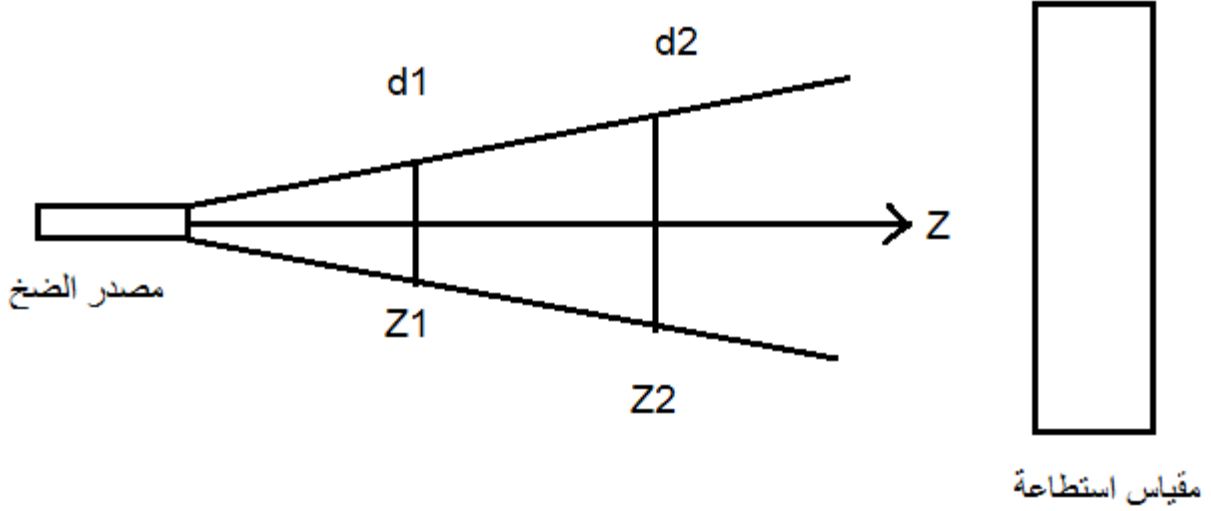
ملحق (1):

مبدأ حرف السكين: نفرض حزمة الضخ الخارجة من ليف متعدد الأنماط أنها مقطع دائري متجانس يتغير قطر الدائرة في مع مسافة الانتشار الشكل:

حيث تتغير الاستطاعة المقاسة بطريقة حرف السكين (knife edge) كحزمة دائرية متجانسة.

$$P = \pi * R^2 * I_0$$

نصف قطر الحزمة الدائرية (R)، واستطاعتها الكلية (P)، التدفق الضوئي الذي افترضناه متجانس.

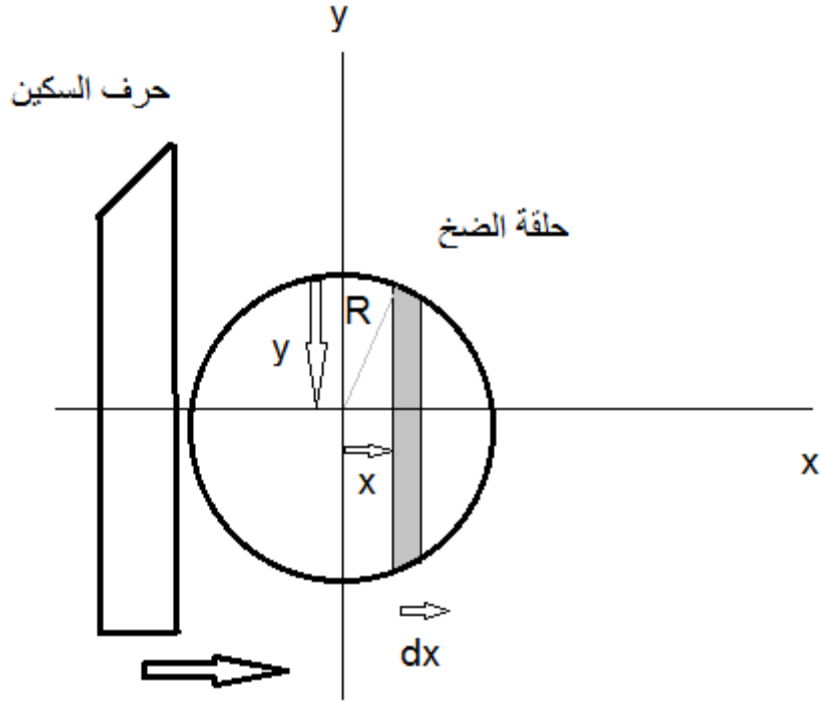


حيث أن:

$$I_0 = \frac{P}{\pi * R^2}$$

عند تغيير المسافة (x) تتغير الاستطاعة التي يقيسها مقياس الاستطاعة وتكون تابع للمسافة (x) ونرمز لها $P(x)$:

$$P(x) = \int_{x=-R}^x I_0 * (2 * \sqrt{R^2 - x^2}) dx$$



حرف السكين وهو يقطع حلقة الضخ

$$ds = dx * y = dx * \sqrt{R^2 - x^2}$$

$$u = \frac{x}{R}$$

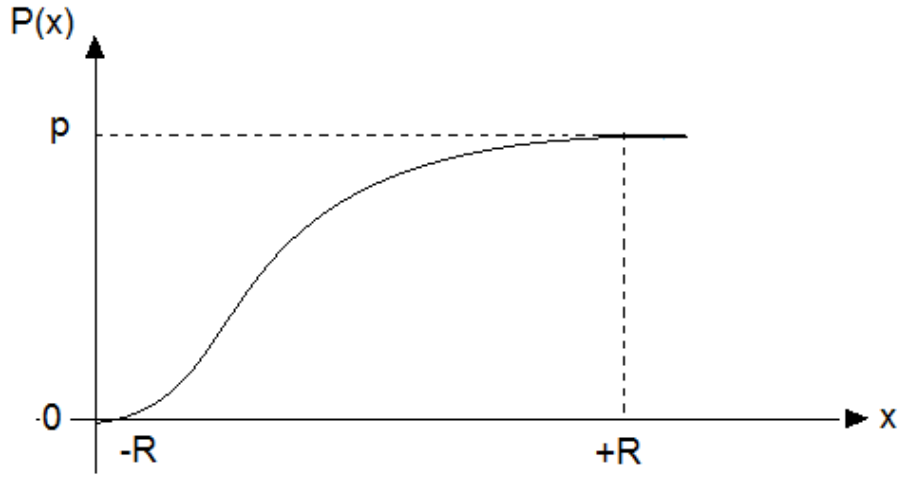
$$P(x) = \int_{-1}^u \frac{P}{\pi * R^2} * 2 * R * \sqrt{1 - u^2} * R * du$$

$$P(x) = \frac{2P}{\pi} \int_{-1}^u \sqrt{1 - u^2} * du$$

$$P(x) = \frac{2P}{\pi} * \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} * \text{asin} \left(\frac{x}{R} \right) + \frac{1}{2} * \frac{x}{R} * \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R} \right)^2} \right)$$

$$P(x) = \frac{P}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + \text{asin} \left(\frac{x}{R} \right) + \frac{x}{R} * \sqrt{1 - \left(1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right)} \right)$$

$$P(x) = P \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} * \text{asin} \left(\frac{x}{R} \right) + \frac{1}{\pi} * \frac{x}{R} * \sqrt{1 - \left(1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right)} \right)$$



الاستطاعة بدلالة البعد (x)

ملحق (2):

لقد تم حساب الحجم الفعال واستطاعة العتبة والمردود واستطاعة الخرج عن طريق برنامج (MATLAB14) بواسطة الضخ بليف واحد وأيضاً بواسطة الضخ بمجزئ خرجة ستة ألياف للنمطين (LG_{00}) و (LG_{01*})، وفق ما يلي:

```

1 - clear all;
2 - clc;
3 - stepz=20e-6;
4 - stepx=10e-6;
5 - Xmax=2e-3;
6 - Ymax=2e-3; %mm
7 - Nx=30.0;
8 - alfa=530; %m-1
9 - n=1.82;
10 - Isat=2800e4; % mWatt/mm2;
11 - etta_pee=0.67; % etta_a*etta_t=0.67 from paper
12 - Pin=8;
13 - P=6*Pin/7;
14 - Wl0=0.202e-3; % mm
15 - Wp0=0.052e-3; %mm
16 - lambda=808e-9; %mm
17 - laambda=1064e-9; %mm
18 - M=1;
19 - zL=n*pi*Wl0^2/laambda;
20 - zp=n*pi*Wp0^2/(M*M*lambda);
21 - LR=0.74; %mm
22 - %r=300;%mm
23 - L=7e-3;
24 - Nz=round(L/stepz,1); %mm
25 - teta=5.9;
26 - Leff=L*(n-1)+LR;
27 - R=0.8;
28 - m=0.9;

```

```

26 - Leff=L*(n-1)+LR;
27 - R=0.8;
28 - T=0.2;
29 - loss=0.1;
30 - z0=0;
31 - |
32 - step=0.05;
33 - %% la guerre polynomial
34 - % L[l p]
35 - %L[l 0]=1
36 - %L[0 1]=1-rho
37 - %L[0 2]=1-2*rho+0.5*rho^2
38 - %l=1;
39 - k=0;
40 - Veff=0;
41 - Wl=Wl0;
42 - VeffF=0;
43 - □ for z=0:L/Nz:L
44 -     k=k+1;
45 -     %Mxy=0; % local variable to do the integral
46 -
47 -     %Wl=sqrt((laambda/pi)*(sqrt(LR(r-LR))));
48 -
49 -     Wp=Wp0+abs(tan(teta*pi/(n*180))*(z-z0));
50 -     j=0;
51 -     SS=0;
52 -     SSS=0;

```

```

53 - □ x=-4*Wp:Wp/Nx:4*Wp;
54 -     j=j+1;
55 -     i=0;
56 - □ for y=-4*Wp:Wp/Nx:4*Wp;
57 -     i=i+1;
58 -     rho=2*(x^2+y^2)/Wl^2;
59 -     %phi=atan(y/x);
60
61 -     r2=x^2+y^2;
62 -     x1=0.255e-3;%mm^-1
63 -     y1=0;%mm^-1
64 -     x2=0.127e-3;%mm^-1
65 -     y2=-0.219e-3;%mm^-1
66 -     x3=-0.127e-3;%mm^-1
67 -     y3=-0.219e-3;%mm^-1
68 -     x4=-0.255e-3;%mm^-1
69 -     y4=0;%mm^-1
70 -     x5=-0.127e-3;%mm^-1
71 -     y5=0.219e-3;%mm^-1
72 -     x6=0.127e-3;%mm^-1
73 -     y6=0.219e-3;%mm^-1
74
75
76 -     s1(i,j)=(2/(pi*Wl^2*L))*exp(-rho);% TEM00
77 -     %s1(i,j)=(2/(pi*Wl^2*L))*(rho)*(1)^2*exp(-rho);%01
78 -     rp(i,j)=((2*alfa/((pi*Wp^2)*(1-exp(-alfa*L))))*exp(-2*(x^2+y^2)/Wp^2)*exp(-alfa*z));
79 -     I1(i,j)=exp(-2*((x-x1)^2+(y-y1)^2)/Wp^2)+exp(-2*((x-x2)^2+(y-y2)^2)/Wp^2)+exp(-2*((x-x3)

```

```

78 - rp(i,j)=((2*alfa/((pi*Wp^2)*(1-exp(-alfa*L)))))*exp(-2*(x^2+y^2)/Wp^2)*exp(-alfa*z);
79 - I1(i,j)=exp(-2*((x-x1)^2+(y-y1)^2)/Wp^2)+exp(-2*((x-x2)^2+(y-y2)^2)/Wp^2)+exp(-2*((x-
80 - I2(i,j)=exp(-2*((x-x4)^2+(y-y4)^2)/Wp^2)+exp(-2*((x-x5)^2+(y-y5)^2)/Wp^2)+exp(-2*((x-
81
82 - %rp(i,j)=(1/6)*(2*alfa*exp(-alfa*z))/((pi*Wp^2)*(1-exp(-alfa*L))))*(I1(i,j)+I2(i,j))
83
84 - SS=SS+rp(i,j)* sl(i,j);
85 - SSS=SSS+(rp(i,j)*(sl(i,j))^2);
86 - end
87 - end
88
89 - Veff=Veff+SS*Wp^2/Nx^2; %dxdy
90 - VeffF=VeffF+SSS*Wp^2/Nx^2; %dxdy
91 - end
92 - %end
93 - invveff=(Veff*(L/Nz));
94 - Vef=1/invveff %dz
95
96 - integratedVeffF=(VeffF*(L/Nz));
97 - etta_zero=invveff^2/integratedVeffF
98
99 - g=(2*etta_pee*Pin)/(Vef*Isat);
100 - gain=exp(g*L)
101 - Se=T*etta_pee*etta_zero/(2*loss)
102
103 - pth=loss*Isat*Vef/(etta_pee*L)
104 - Pout=Se*(Pin-pt)

103 - pth=loss*Isat*Vef/(etta_pee*L)
104 - Pout=Se*(Pin-pt)
105 - surf(rp)
106 - hold on
107 - surf(sl)

```