



**Development of a process for characterization of
Nd:YAG crystals**

**تطوير عملية لتشخيص بلورات النيوديميوم ياج
Nd:YAG**

A Thesis
Submitted to the Faculty
of the
Worcester Polytechnic Institute
in partial fulfillment of the requirements for the
Degree of Master of Science
in
Mechanical Engineering

by

Mark T. Bronski
January 20 2003

Approved:

Prof. Ryszard J. Pryputniewicz, Major Advisor
Prof. Richard D. Sisson, Member, Thesis Committee
Prof. Raymond R. Hagglund, Member, Thesis Committee
Prof. Cosme Furlong, Member, Thesis Committee
Dr. Holger Schlueter, TRUMPF Inc., Farmington, CT, Member, Thesis Committee
Prof. John M. Sullivan, Graduate Committee Representative



الخلاصة

الهدف من هذه الرسالة هو تطوير طرق لقياس خصائص شعاع الليزر من ليزر أحادي التجويف (cavity)، وتأسيس خطوط أولية لتحديد أي من البلورات مقبول للاستخدام في إنتاج أجهزة ليزر. هذه الأهداف تم التوصل إليها من خلال تطوير طرق عملية وتحليل إحصائي للبيانات التي حصلنا عليها. ولكن، هناك حاجة إلى المزيد من العمل لتأكيد نتائج هذا البحث بشكل مستقل.

للحصول على ليزر Nd:YAG فعال وبكفاءة عالية يعمل بالضخ الضوئي فان ذلك يعتمد على البلورة التي يخرج منها شعاع الليزر. وعلى كل حال، مقدار ضئيل من الاهتمام وجه إلى جودة شعاع الليزر الناتج من كل بلورة. وبالرغم من وجود الكثير من العوامل التي تؤثر على الشعاع الخارج، إلا أن من أهم هذه العوامل هو اعتماد الطاقة على البعد البؤري. ولسوء الحظ فان قياسات مباشرة للبعد البؤري للبلورة لا يمكن باستخدام شعاع ليزر من Nd:YAG. هذا لان ليزر التجويف الأحادي (cavity) تقوم بوظيفة كلا من المكبر والمذبذب في نفس الوقت. ولهذا تم تطوير طريقة لقياس غلاف أشعة الليزر بعد أن تخرج من المذبذب وتركز الأشعة بواسطة عدسات مناسبة. تم تحليل غلاف أشعة الليزر باستخدام محلل أشعة يقوم بحساب معامل التنبير للشعاع وقياس حجم الخصر للشعاع beam waist. ومن هذه المعلومات، فان قطر الوسط عند مرآة خروج الليزر تم حسابه باستخدام مبدأ انتشار شعاع جاوسين. وقد تم تطوير نموذج المذبذب بالاستناد على التكرار الذاتي لمصفوفة ABCD التي تسمح بتحديد العدسة الحرارية المستحثة المستندة على الطاقة المستخدمة. طرق عديدة لنمذجة تأثير العدسة الحرارية تم استخدامها، ويزيادة مستمرة في التعقيد. وكنتيجة لذلك تم تقدير ثلاثة عوامل مع التركيز على استخدام واحدة أو أكثر كطريقة لتصنيف البلورات الجيدة والرديئة. هناك معامل حساسية البلورة، ومعامل تبير الشعاع، وحجم وسط الشعاع عند مستوى القياس. حساب معامل حساسية البلورة، M^{-1} ، استند على تطوير نموذج متذبذب مع تقريب كبير في سلوك البلورة. ولهذا بعد حساب معامل M^{-1} كدالة في الطاقة المستخدمة، لم يلحظ أي نقوش pattern مميزة. ولكن، معامل تبير الشعاع وحجم الشعاع، كلاهما اظهر أنماط مختلفة تميز البلورة الجيدة عن الرديئة. وأجريت تحليلات إحصائية على البيانات أكدت الاستنتاجات الأولية والتي تبين إن عاملين يمكن استخدامهما كمقياس للتحكم في الجودة. هذه العوامل قيست باستخدام الطرق المقبولة عالميا ولذلك فهي تعتبر أفضل الأدوات المتوفرة لتحديد جودة بلورات Nd:YAG.



1. المقدمة

هناك طلب في السوق حاليا على ليزر Nd:YAG ذو الشعاع المتصل ويعمل بطاقة عالية يقود إلى تطوير اختراعات وطرق فعالة وذات كفاءة عالية للتصنيع والفحص لهذه الليزرات. لقد وصل حجم مبيعات ليزرات الحالة الصلبة المضخة بالضوء إلى \$750 مليون خلال العام 2001. حتى في الجدوى الاقتصادية الغير مؤكدة، فان الطلب على الليزر من المتوقع أن يزداد. وطبقا للتخمينات الحالية، فان سوق الليزر ما عدا ليزر الدايبود يتوقع أن يصل إلى 2 بليون دولار في العام 2002 (Kincade and Anderson, 2002).

العنصر الأساسي في ليزر Nd:YAG هو البلورة المسئولة عن توليد شعاع الليزر. على كل حال، فان طرق التحكم في الجودة تفرض على هذا العنصر أن لا يكون بالكامل مسؤولا عن نظام الليزر ككل. فأي انحراف عن مواصفات تصنيع الليزر من الممكن أن تؤدي إلى إمكانية اضمحلال كفاءة الليزر إلى مستوى غير مقبول. وعلى كلا فإن عملية نمو البلورة الأحادية المستخدم لإنتاج البلورات تبقى عملية حساسة ومعقدة جدا (Hecht, 1994). ولهذا، فان أي اضطراب خلال نمو البلورة يمكن أن يظهر فقط أثناء استخدام البلورة في تجويف الليزر. إضافة إلى ذلك، فان طرق التحكم في الجودة الحالية تفرض على البلورة بواسطة المصنع المنتج لها قد لا تكون مضمونة لتعمل البلورة في مستوى المرغوب به. ولكي يتم الحصول على ليزر Nd:YAG بطاقة عالية فانه من المهم أن يظهر تحكم في الخواص الضوئية والحرارية وفي الخواص الميكانيكية الحرارية للبلورة (Mudge et al., 2000). ويجب أن تطور قياسات جديدة للتحكم في الجودة وتستخدم لضمان تصنيع عالي الدقة وضمان الحصول على أجهزة ليزر بمواصفات مضمونة.

هناك طريقة مقترحة لضمان مستوى كفاءة مرضي وهو فحص واختبار البلورات الجديدة في تجويف ليزر أحادي كمنصة فحص لهذه البلورات. وبهذا من الممكن أن يتم فحص عدد من الخصائص المهمة للبلورة بان تقاس وتحدد أثناء إنتاج شعاع الليزر (Schlueter and Markille, 2002). ومن احد أهم هذه الخصائص هو أقصى طاقة ممكن الحصول عليها من البلورة. بالإضافة إلى هذا، يمكن تطوير طريقة لفحص الخواص الضوئية للبلورة. من خلال قياس العدسة الحرارية المتكونة داخل البلورة.



هذه المعلومات يمكن أن يجرى عليها المزيد من التحليل لربطها مع الطاقة المستخدمة لتشغيل جهاز الليزر. ومن هذا، فإن معامل حساسية البلورة يمكن أن يستخلص. هذا العامل يربط التغيير في البعد البؤري للبلورة مع التغيير في مصدر الطاقة المستخدم. وباستخدام هذه المعلومات، فإنه من الممكن تحديد قيم المدى المقبول الذي يمكن أن تستخدم كمرشد للتحكم في الجودة. وهذا سوف ينتج عنه وسيلة للتحكم في جودة البلورة قبل استخدامها لتحديد إذا ما كانت البلورة تقابل شروط محددة قبل أن يتم تركيبها في جهاز الليزر. ونتيجة لهذا، فإن الزمن المطلوب للتجميع النهائي والفحص لنظام الليزر سوف يقل بشكل كبير. وبالتالي فإن فحص بلورة الليزر يصبح أكثر دقة ويحسن بشكل كبير عملية إنتاج أجهزة الليزر.



2. نبذة تاريخية عن الليزر

أول من وضع فرضية الليزر هو ألبرت اينشتين في عام 1917. هو من وضع فكرة الانبعاث الاستحثاثي للإشعاع من الذرات. شرح اينشتين انه في حالة وجود مجال من الفوتونات المثارة، فان ذرات أخرى تستحث لإشعاع المزيد من الفوتونات لإضافة المزيد من الإشعاع للإشعاع الأصلي. وبشكل كبير فان الفوتونات المنبعثة سوف تكون في نفس الاتجاه ولها نفس تردد الإشعاع المسئول عن الاستحثاث (Forward, 1979).

هذا الاكتشاف طور في العام 1954 بواسطة Charles Townes باكتشاف الميزر MASER. وهذا الاسم هو اختصار Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation. أي تكبير أشعة الميكروويف بواسطة الانبعاث المستحث للإشعاع. هذا الاكتشاف أكد وجود عملية الانبعاث الاستحثاثي وأدى إلى اكتشاف الليزر. في العام 1958، Charles Townes و Arthur Schawlow اخترعا أول جهاز ليزر مرئي عندما كانا يقومان بأبحاثهما في مختبرات بل، ولكن هما لم يقوما ببناء جهاز ليزر (Lucent, 1998). اخترع العالم Ted Maiman أول ليزر من بلورة الياقوت (ضوء مرئي) وبعد ذلك بفترة قصيرة في عام 1960 في مختبرات هيوز استخدم ليزر ميمان أي ليزر بلورة الياقوت كوسط إثارة بواسطة ضوء فلاش حلزوني. بلورة الياقوت شكلت تجويف الليزر عن طريق صفل طرفيها وتغطيتها بالفضة. ثم وضعت البلورة في تجويف اسطواني من الالومنيوم وفي الهواء البارد (Talbot, 2002). أول ليزر استخدم الغاز كوسط إثارة هو الهليوم والنيون، والذي طوره Ali Javan في عام 1961 في مختبرات بيل (Bellis, 2002). تم تطوير أول ليزر Nd:YAG في مختبرات بيل بعد ذلك بفترة قصيرة في عام 1964 بواسطة J. E. Geusic, H. M. Markos, and L. G. Van Uiteit (Steen,) (1998).



3. المبدأ الأساسي لعمل الليزر

أي نظام ذري (ذرات، أيونات، إلى آخره) يوجد في مستويات طاقة متقطعة. والتغير في مستويات الطاقة (الانتقالات بين أي مستويي طاقة) يتطلب امتصاص طاقة من الفوتون. الطول الموجي للفوتون الممتص أو المنبعث يعطى بعلاقة التردد لبور

$$E_2 - E_1 = h\nu_{21} \quad (1)$$

حيث أن E_1 و E_2 هما مستوى الطاقة المنقطعة، و ν_{21} هو تردد فرق الطاقة، و h ثابت بلانك والذي يساوي 6.6×10^{-34} Js.

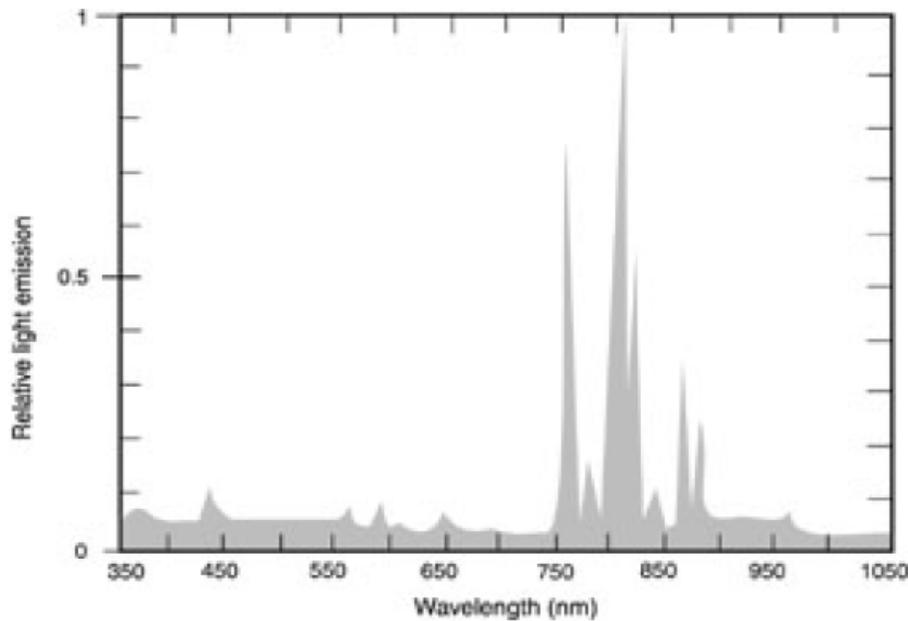
عند الاتزان الحراري، فإن أدنى مستويات الطاقة في المادة تعتبر هي الأكثر تعدادا من مستويات الطاقة العليا. وتحت ظروف مناسبة، فإن المادة تمتص طاقة من الإشعاع الكهرومغناطيسي، فترفع الذرات من مستويات الطاقة الدنيا إلى مستويات طاقة أعلى. وهذه العملية هي الأساس خلف إنتاج الليزر. وباستخدام مصدر ضخ طاقة خارجي يمكن نقل الإلكترونات من مستويات الطاقة الدنيا إلى مستويات الطاقة العليا، وبهذا يحدث انقلاب في تعداد الإلكترونات في مادة الليزر. ويجب أن نلاحظ أنه من غير الممكن أن نحصل على انقلاب تعداد في حالة الاتزان الحراري (Koechner, 1999). بتمرير أشعة كهرومغناطيسية بتردد مناسب على مادة الليزر المثارة سوف تكبر لان الفوتونات الساقطة سوف تجعل الإلكترونات في مستويات الطاقة المثارة في مادة الليزر بان تنتقل إلى مستويات طاقة منخفضة وبالتالي تشع المزيد من الفوتونات. هذا يسمح باستخلاص طاقة من النظام الذري في مادة الليزر وتحويل الطاقة إلى إشعاع. وتحرير الطاقة المخزنة في مستويات الطاقة بواسطة الإشعاع الكهرومغناطيسي بعملية الانبعاث الاستحثاثي. وهذا يسمح لنا بتعريف كلمة ليزر LASER وهي اختصار لـ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation والتي تعني تكبير الضوء بواسطة الانبعاث المستحث للإشعاع. إثارة المدة يسمح بالمزيد من الإلكترونات في مستويات الطاقة العليا أكبر من مستويات الطاقة الدنيا سوف يسمح للمادة لتكبير الإشعاع الساقط عند تردد يتطابق تماما مع فرق مستويات الطاقة. التأثير الأهم هو أن هذا يأتي ليحقق فرضية اينشتين بان الانبعاث الاستحثاثي يماثل حقل الإشعاع الاستحثاثي. وهذا يعني أن مجال الانبعاث له نفس الاتجاه ونفس الاستقطاب ونفس الطور وكذلك الخصائص الطيفية كما لمجال الاستحثاث. وهذا يجعل ضوء الليزر المنبعث على درجة عالية من الترابط. في ليزر الحالة الصلبة فإن مستويات الطاقة وتردد الانتقالات المصاحبة الناتجة عن مستويات الطاقة



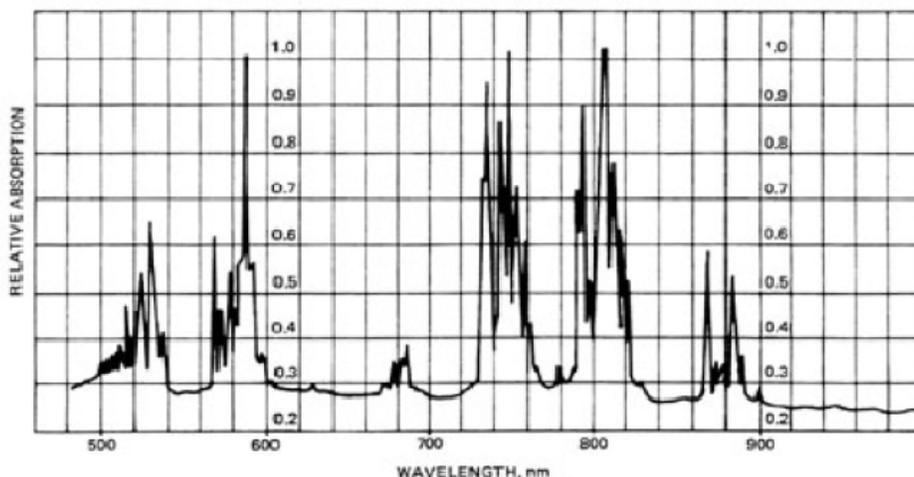
المختلفة، أو مستويات الطاقة المكتملة المسموح فيها للإلكترونات بان تدور حول نواة الذرة. في حالة ليزر Nd:YAG، فان ايونات النيوبيديوم تحدد مستويات الطاقة التي تحدد خصائص الليزر.

بلورة ليزر Nd:YAG لها طيف امتصاص معروف حيث تمتص الطاقة الساقطة على البلورة. ولكي نجعل طاقة المتحولة من مصدر الضخ اكبر ما يمكن فان طيف الانبعاث من ضوء المصباح يجب ان يكون اقرب ما يمكن لطيف امتصاص البلورة. طيف انبعاث مصباح الكريبتون موضح في الشكل 1.3. وطيف امتصاص بلورة ليزر Nd:YAG موضح في الشكل 2.3.

من الشكل 2.3 يظهر بوضوح ان Nd:YAG يمتص الطاقة بشكل كبير في مدى طيف المصباح. وحزمتي الطاقة الاهم في ضخ بلورة Nd:YAG هما المنقطقتين 760-730 nm و 790-820 nm.



الشكل 1.3 طيف انبعاث الكريبتون



الشكل 2.3 طيف امتصاص Nd:YAG

الطاقة الضوئية يمكن أن تمتص عند حزم طاقة ذات أطوال موجية قصيرة، ولكن هذه غير فعالة وفي وجود ضوء في منطقة فوق الأزرق من الطيف سوف يسبب ضرر لمادة الليزر من خلال زيادة الامتصاص، والذي يؤدي الى ازدياد درجة حرارة البلورة (CORD, 2002).

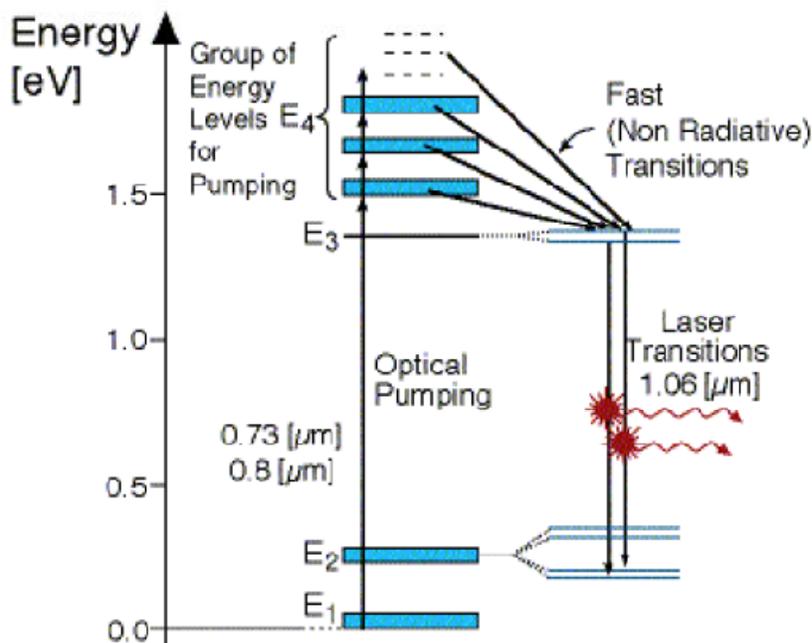
حدثت تطورات جديدة في هذا المجال بما فيها استخدام ليزر الدايمود كمصدر للضخ والذي يمكن أن يضبط ليعتج بضوء ليزر عند طول موجي محدد. في حالة ليزرات Nd:YAG، فإن الطول الموجي 808nm يوفر أفضل اقتران للطاقة والذي يعمل على زيادة كفاءة جهاز الليزر. كفاءة تصل إلى 10% متوقعة من هذه التقنيات الحديثة (Schlueter and Markille, 2002).

4. ليزرات Nd:YAG

يعتبر ليزر Nd:YAG من أشهر ليزرات المواد الصلبة. ولقد اخترع هذا الليزر في العام 1964 وطرأت عليه العديد من التطورات والتحسينات بشكل مستمر وحتى يومنا هذا. يتبع ليزر Nd:YAG نفس مبادئ تشغيل ليزر الياقوت، ولكن باختلاف البلورة والايونات النشطة المستخدمة. البلورة هي Yttrium Aluminum Garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) والتي تعرف بالاسم ليزر YAG مع إزالة بعض من ايونات اليوتريوم واستبدالها بايونات النيوبيديوم (Koechner, 1999).



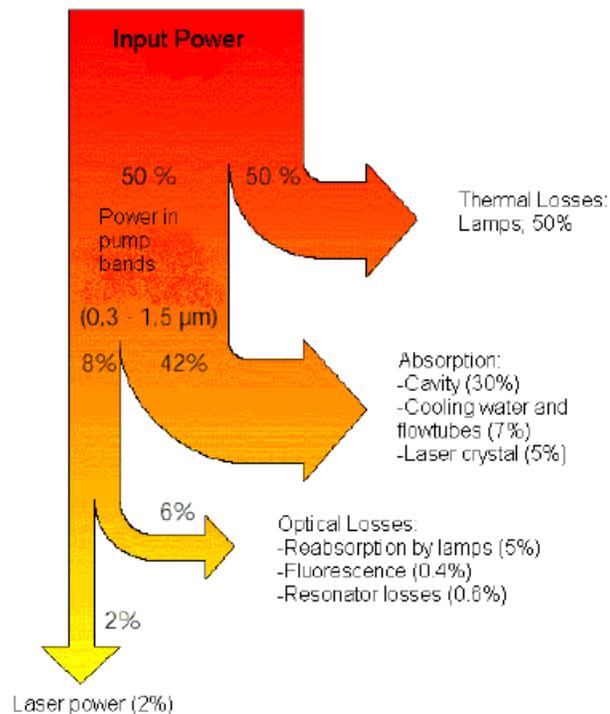
عملية الإثارة تتبع نظام الأربعة مستويات والموضح في الشكل 1.4.



الشكل 1.4. مخطط مستويات الطاقة في Nd:YAG.

الالكترونونات في المستوى الأول E_1 تنثار إلى مستوى الطاقة E_4 . وعند هذه النقطة، فان الالكترونونات ذات الطاقة العالية تتعرض إلى اضمحلال سريع إلى المستوى E_3 . انتقال الليزر يبدأ بمجرد حدوث عملية الانتقال من E_2 إلى E_3 . وهذا الانتقال يناظر الطول الموجي $1.06 \mu\text{m}$. الطول الموجي للانتقال الليزر يساعد في التمييز بين خصائص أنواع أخرى من الليزر، حيث إن كل مادة من مواد الليزر سوف تبعث ضوء ليزر عند طول الموجي مختلف. ومن الممكن، استخدام مضاعفة التردد frequency doubling للحصول على ليزر Nd:YAG بطول موجي 532nm (HAAS, 1994).

يعتبر ليزر Nd:YAG غير فعال في تحويل الطاقة الممتصة إلى ضوء ليزر مفيد، وتصل كفاءة ليزر Nd:YAG إلى 2% تقريبا. ويكون الفقد الأكبر على شكل طاقة حرارية وتكمن المشكلة في التخلص من الحرارة المتولدة من ضوء الفلاش ومن تجويف الليزر (Bronski et al., 2002;). توضيح مفصل للفقد في نظام الليزر موضح في الشكل 2.4. (Bronski and Machate, 2002).



الشكل 2.4 فقط الطاقة في ليزر Nd:YAG

وبغض النظر عن الكفاءة، فإن ليزر Nd:YAG وعلى مدار السنوات لازالت تعمل وربما تعتبر من أهم أنواع أنظمة الليزر حتى الآن. وقد استخدمت أجهزة ليزر Nd:YAG في المجال الحربي لقياس المدى وتحديد الأهداف، وكذلك استخدم في المجال الطبي كأداة جراحية، كذلك استخدمت في مجال التقنيات الصناعية والتي تقدم الكثير من الخدمات مثل اللحام والقطع والحفر.



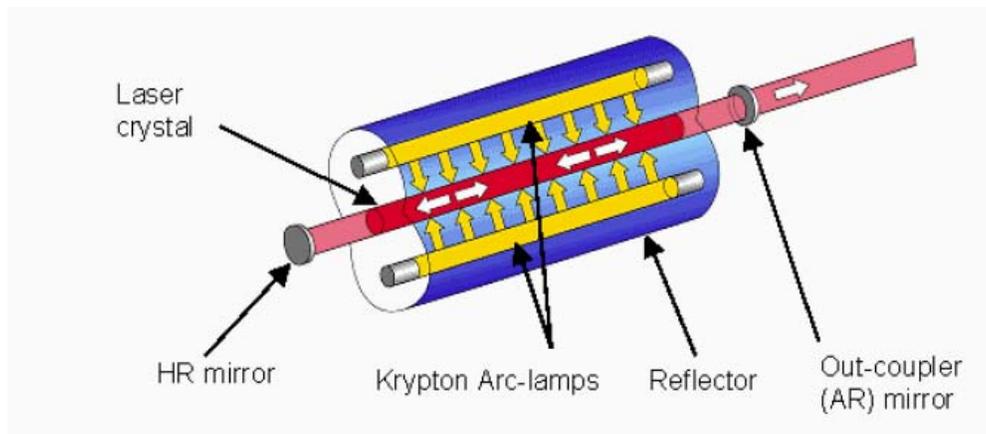
5. أجزاء Nd:YAG

تتجمع عدد من الأجزاء المعقدة لتشغيل نظام الليزر. هذه الأجزاء صممت لمهام محددة ويجب ان تعمل بأعلى دقة لها لضمان الحصول على شعاع ليزر فعال. في الأقسام التالية سوف نتحدث عن الأجزاء الرئيسية لليزر وسوف نركز على نظرية تصميم المذبذب وخصائص عمله. ولكن، الأجزاء الأخرى المهمة اللازمة لتشغيل الليزر ككل مثل مصدر الطاقة ونظام التبريد سوف يتم شرحها خلال هذه الرسالة.

1.5 المذبذب Resonator

المذبذب ربما يكون هو الجزء الأكثر أهمية لأي جهاز ليزر. في داخل المذبذب، يتم تزويد الطاقة بواسطة المجال الكهرومغناطيسي الذي يتحول إلى مادة الوسط المنتج لليزر، والذي يحدث له انبعاث تلقائي للطاقة الإضافية، وبينما تبريد النظام يعمل على التخلص من الحرارة الزائدة المتولدة بواسطة الإثارة لعناصر النشطة. ودور المذبذب هو الحفاظ على شكل المجال الكهرومغناطيسي وتعويض الفقد فيه بواسطة المادة المكبرة من خلال عملية الانبعاث الاستحثاثي (Koechner, 1999). المرايا الموضوعة على طرفي المذبذب تعمل على عكس الفوتونات على المحور البصري، وهذا يكبر الشعاع ويعود الفقد في الطاقة المتبددة من المذبذب، والطاقة المفقودة بطرق أخرى. تستخلص الطاقة من المذبذب باستخدام مرايا ذات نفاذية جزئية بما يحقق الغرض الذي من أجله تم تصميم الليزر. هناك المزيد من الفقد يحدث بسبب العناصر البصرية المستخدمة داخل المذبذب وبواسطة الحرارة المتولدة داخل المذبذب (Bronski et al., 2002; Bronski and Machate, 2002). تزداد عملية الانبعاث الاستحثاثي في كل مرحلة في داخل مادة الليزر حتى تصل إلى مستوى التوازن (Hecht, 1994). ويصبح التكبير في النظام ثابت، كما هو معروف بواسطة معامل التكبير المشبع saturated gain coefficient. معامل التكبير المشبع يكون دائما اصغر من معامل تكبير الإشارة الصغيرة small signal gain coefficient، الذي يكون أثناء بداية تشغيل الليزر في غياب عملية الانبعاث الاستحثاثي (Koechner, 1999).

يتكون مذبذب الليزر من جزأين هما: المكبر الضوئي والمذبذب الضوئي. والمذبذب يجب أن يتكون من أجزاء أساسية موضحة في الشكل 1.5.



الشكل 1.5 الأجزاء الأساسية للمذبذب

مصدر ضخ الطاقة هو المسئول عن عملية انقلاب التعداد في مادة الليزر، وهذا يؤدي الى تخزين الطاقة في مستويات الطاقة العليا. إذا كان مجال الطاقة كبيرا بما فيه الكفاية للتغلب على الفقد الداخلي في النظام وتم تشغيله بواسطة إشعاع تلقائي ينبعث على محور الليزر، فإن النظام سوف يبدأ بالتذبذب بين المرأتين. يحدد المذبذب الطيف والاتجاه والخواص المكانية لشعاع الليزر. المرايا يجب أن تكون موضوعة على كلا الجانبين للمذبذب لتسمح بالتذبذب بالحدوث. احد المرأتين يجب أن تكون عاكسيتها 100%، والأخرى يجب أن تكون منقذة لتسمح بجزء بسيط من طاقة الليزر بالخروج من المذبذب. درجة النفاذية تعتمد على الغرض من استخدام الليزر. تصنع هذه المرايا عادة من زجاج الكوارتز وتكون مغطاة بطبقة ذات درجة عالية من الانعكاسية للحصول على انعكاسية تساوي 100% تقريبا اما المرآة الأخرى فتكون مغطاة بطبقة مضادة للانعكاس. ونظريا، يمكن للمذبذب ان يكبر نفسه حتى يصل إلى المالا نهائية إذا كانت المرايا المستخدمة ذات انعكاسية 100%. ولكن، هذا لا يمكن ان يتحقق نظرا للفقد الداخلي داخل تجويف الليزر (Koechner, 1999).

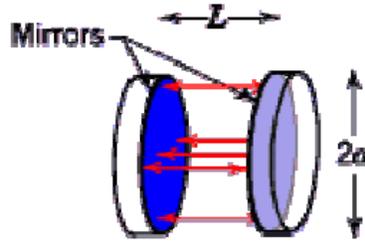
أبعاد المذبذب لليزرات Nd:YAG عادة تكون اكبر بكثير من الطول الموجي لليزر لتسمح بالتذبذب. المذبذبات عادة تكون مفتوحة وذلك للتقليل من عدد الأنماط الاهتزازية في تجويف الليزر. في المذبذب المفتوح، عدد قليل من الأنماط الاهتزازية يتطابق مع مبدأ تراكب الأمواج التي تنتشر بالقرب من محور المذبذب. والتي يكون لها قدر ضئيل من الفقد (Svelto, 1998). وكمثال على المذبذب هو مذبذب فابري بيروت (Fabry-Perot) الموضح في الشكل 2.5.



وللحصول على تذبذب بناء في داخل المذبذب، فإن طول المذبذب L يجب أن يكون مساويا لعدد n_i من أنصاف الأطوال الموجية

$$L = \frac{n_i \lambda}{2} \quad (2)$$

حيث أن λ هي الطول الموجي



الشكل 2.5 مذبذب فابري بيروت

إضافة إلى ذلك، هناك شرط ضروري وهو ان المجال الكهربائي للأمواج الكهرومغناطيسية الموقوفة يجب ان تكون صفر على المرأتين. وبعد هذه الجملة، فإن تردد المذبذب ν ، يمكن ان نعبر عنه بدلالة سرعة الضوء c .

$$\nu = n \left(\frac{c}{2L} \right) \quad (3)$$

البداية المبسطة للمذبذب المستوي فورا سوف تنحرف بواسطة الصعوبة العملية لضبط المرأتين بشكل دقيق ليسمح بتشغيل مستقر لليزر. والمصطلح مستقر stable يعرف بمبادئ معقدة. ولكن، للتسهيل في هذه المرحلة، سنستخدم تعريف سهل. وتعريف أدق سنوضحه لاحقا. في الحالة البسيطة، يتم الوصول إلى الحالة الحرجة للاستقرار إذا كانت أشعة الضوء المبدئية متوازية مع محور تجويف الليزر وتنعكس بشكل لا نهائي بين المرأتين. ولكن إذا افترضنا الآن إن أشعة الضوء انحرفت بشيء بسيط عن محور التذبذب، فإن المذبذب المستقر سوف يستمر في عكس الشعاع المنحرف. ولكي تتمكن من انجاز هذا، فإن المذبذب يجب ان يكون له قوة تبئير. هذا في الحالة المبسطة، يتم من خلال استخدام مرآة ذات تقعر بسيط. لذلك فإن المذبذب ذو المستوى المتوازي سوف يكون عند الشروط الحرجة للاستقرار إذا كانت المرايا مرتبة بشكل دقيقة ولكنها لا يمكن ان توفر أي نوع من قوة التبئير المطلوبة لتكيز الأشعة المنحرفة من الضوء. في حالة ليزر



Nd:YAG، البلورة نفسها سوف توفر قوة التنبير المطلوب نتيجة لتأثير العدسة الحرارية، ولهذا سوف تسمح بتشغيل مستقر (Hecht, 1992). البلورة تتصرف كأنها عدسة سميكة بقدرة انكسار تعتمد على مقدار الطاقة الداخلة عليها (Dascalu et al., 1998).

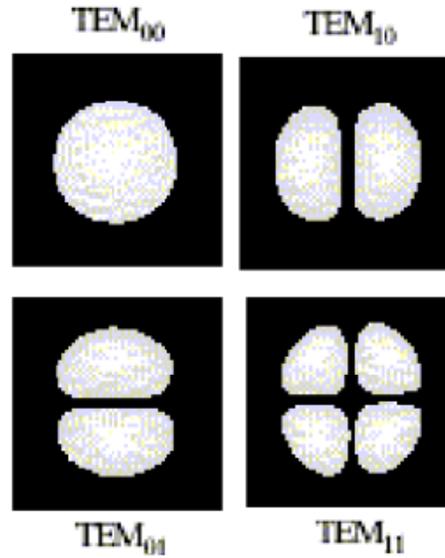
والمذبذبات التي لا تحقق الشروط الموضحة أعلاه تعتبر مذبذب غير مستقر، نتيجة لان أشعة الضوء تنحرف بعيدا عن المحور البصري للمذبذب. والعديد من الأشكال المستخدمة للمذبذب غير المستقر متوفرة، من هذه الأشكال المتوفرة على سبيل المثال هو استخدام مرآتين مختلفتين في الحجم، وبالتالي فإن الضوء ينعكس عن المرآة الكبيرة سوف يخرج من حول حواف المرآة الصغيرة. كلا النوعين (المستقر وغير مستقر) يقومان بتركيز الضوء على المحور البصري، يجعل المذبذب يعمل بكفاءة على استخلاص الطاقة من مركز مادة الليزر، ولكن بإهمال المناطق الخارجية. شكل الشعاع يكون في شكل توزيع جاوسيان، وله قمة كثافة طاقة عند المركز. هذا النوع من المذبذب يستخدم مع تكبير منخفض لإنتاج امواج ليزر متواصلة، مثل ليزر الهليوم نيون وليزرات Nd:YAG.

المذبذب غير المستقر سوف يركز الطاقة على الأسطح الخارجية لمادة الليزر ويكون له طاقة تساوي صفر على امتداد المحور البصري. هذا المذبذب يكون أكثر كفاءة لأنه يستخدم كمية اكبر من مادة الليزر للتكبير. هذا التشكيل يعمل أفضل في حالة الليزر النبضي وذو التكبير العالي. وبالرغم من أن شكل الشعاع يشبه الكعكة وشدة الأشعة معدومة في المدى القصير، ولكن شكل الشعاع يصبح أكثر نعومة عند مسافات بعيدة عن جهاز الليزر مما يعطي توزيع منتظم للطاقة.

أهمية خاصة في هذه العملية والاستفادة منها في الليزر هو نوع النمط الناتج للشعاع. اغلب الليزرات لا تعمل بنمط اهتزازي واحد، حيث يكون شعاع الليزر الناتج مكون من تداخل كل الأنماط الاهتزازية داخل المذبذب. وشكل الشعاع النهائي يمكن ان يتغير بواسطة العدسات والبصريات المستخدمة، وعلى كل حال، الكثير من الفقد متوقع. المذبذبات لها نوعين من الأنماط، هي الأنماط الطولية والأنماط العرضية. الأنماط العرضية ترى بوضوح على مساحة مقطع الشعاع. والأنماط الطولية تعكس الأنماط الاهتزازية المختلفة داخل تجويف الليزر في مدى اتساع ترددات الليزر. في معظم التطبيقات، فان الأنماط العرضية هي الأهم. والكثير من العمل تم في المراحل الأولية لتطوير الليزر لتصنيف الأنماط العرضية بالاعتماد على عدد النقاط الصفيرية التي تظهر على مساحة مقطع الشعاع على اتجاه المحورين. النمط الأساسي، الذي يكون له توزيع



جاوسيان بشدة عظمى عند المركز يعرف بالنمط TEM_{00} . والمعرف هنا عدد يعتمد على عدد الاصفار في كل محور، ومن الأنماط العرضية الشائعة موضح في الشكل 3.5.



الشكل 3.5 أنماط TEM الشائعة

حاليا فقط تستخدم مذبذبات مستقرة من مادة في الحالة الصلبة (Ifllaender, 2001). وقد ذكر من قبل ان الظروف المختلفة تحدد وجود المذبذب المستقر، عند هذه النقطة، سنقوم بتعريف دقيق باستخدام معامل الشعاع المركب، ومعامل الشعاع المركب سوف نناقشه في الجزء 7.

نظرة أدق لمذبذب الليزر تبين ان الشعاع يعمل رحلة كاملة خلال المذبذب، فانه يواجه مرأتين في كل رحلة ذهاب أو إياب. وباستخدام مبدأ انتشار شعاع جاوسيان، والذي سوف نناقشه بمزيد من التفصيل في الجزء 7، يمكننا ان نعرف المعايير لمذبذب المستقر. خلال رحلة واحدة خلال المذبذب، فان الشعاع سوف يعمل المسار التالي. يبدأ عن المرآة ذات الانعكاسية العالية، سيكون للشعاع قطر محدد والذي يتغير عندما ينتقل مسافة من المرآة إلى البلورة، يمر الشعاع خلال البلورة، ليصل إلى المرآة المقابلة. ولهذا فان المسار خلال المذبذب يتكون من 3 مصفوفات ABCD. المصفوفة الأولى تمثل المسار خلال الفراغ الحر حتى يصل الشعاع إلى سطح البلورة، المصفوفة الثانية تنمذج قوة التبئير بين سطحي الدخول والخروج للبلورة والتي يمكن اعتبارها على انها عدسة رقيقة، والمصفوفة الأخيرة تستخدم نموذج الانتشار الحر في الفراغ، أي من سطح الخروج للبلورة وحتى المرآة الثانية. معامل الشعاع المركب يحدد عند المرآة الأولى باستخدام نصف قطر التوقع وحجم الشعاع. هذه المعامل يستخدم بشكل متكرر بالاقتران مع المصفوفات



ABCD لنمذجة النظام البصري، والذي سيتم توضيحه في الجزء 7. وبعد تعريف المستوى المرجعي، فإن معامل الشعاع المركب يمكن أن تنتشر خلال المذبذب ويعود إلى المستوى المرجعي الأصلي. وبأخذ هذا في الحسبان فإن الرحلة الكاملة للشعاع حتى يعود إلى المستوى المرجعي الأصلي، والآن لدينا 6 مصفوفات تمثل الرحلة الكاملة للمذبذب. وبضرب هذه المصفوفات سوف يؤدي إلى المصفوفة المكافئة ABCD "M" للمذبذب،

$$M = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \quad (4)$$

باستخدام المعادلة 4، فإن حاصل ضرب معامل الشعاع المركب، q ، عند مواقع مختلفة داخل المذبذب يحدد من (Siegman, 1986)،

$$q = \frac{Aq + B}{Cq + D} \quad (5)$$

حيث

هي المصفوفة المطابقة لرحلة كاملة (ذهاباً وإياباً) للشعاع داخل المذبذب.

المذبذب يعتبر مستقر عندما تتحقق معايير الاستقرار:

$$\left(\frac{A+B}{2} \right)^2 < 1 \quad (6)$$

المذبذب المستقر سوف يكون محدد ومحصور بنصف قطر النمط TEM_{00} ، وهذا سوف يبقى صحيحاً في حالة مرايا غير محددة وحجم مادة ليزر غير محدد (Ifflaender, 2001). قيمة معامل الشعاع المركب تحدد عند مستوى واحد يجب أن تكرر نفسها بعد رحلة كاملة حتى نعتبر المذبذب مستقراً. والطريقة الموضحة أعلاه مشروحة لليزر HL506D في الملحق A. والحلول العددية المقابلة لمعامل الشعاع المركب يمكن أن تحدد باستخدام (Ifflaender, 2001)

$$\frac{1}{q} = \frac{D-A}{2B} \pm \frac{i}{2B} \sqrt{4 - (A+D)^2} \quad (7)$$



حيث i مؤثر العدد المركب. ولكي يبقى نصف قطر الشعاع في النطاق الحقيقي، فإن التعبير تحت الجذر التربيعي يجب أن يكون موجباً (Ifflaender, 2001).

1.1.5 المذبذب ذو المستوى المتوازي Plane-parallel resonators

استخدم في هذا البحث نظام ليزر يعمل بمذبذب ذو مستوى متوازي باستخدام مرايا مستوية. وفي هذه الحالة، فإن نصف قطر التقعر للمرآة الأمامية والخلفية يساوي مالانهاية. ومادة الليزر الفعالة عندما وضعت في تجويف المذبذب سوف تغير طور المسار الضوئي خلال التجويف، وكذلك سوف تغير أشكال الأنماط الاهتزازية.

التغير في المسار الضوئي يحدث نتيجة للعدسة الحرارية للبلورة ولتأثير الإجهاد الناشئ عن الانكسار birefringence. ومعظم الاضطراب يكون ناتج عن العدسة الحرارية في بلورة الليزر. هذا التأثير يمكن ان يمدج بواسطة عدسة رقيقة بسيطة ببعد بؤري فعال يساوي f . ومن الجدير ملاحظته، ان نموذج العدسة الرقيقة هي تقريب من الدرجة الأولى للنظام. تظهر بلورة Nd:YAG الكثير من السلوك المعقد والذي سوف نوضحه لاحقاً، وعلى كل حال، للتبسيط، سوف نستخدم عدسة رقيقة لبناء نموذج عمل المذبذب. والآن، باستخدام نموذج العدسة الرقيقة، والبعد البؤري للبلورة يمكن أن يحدد. وباستخدام البعد البؤري يمكن أن نحدد استقرار المذبذب باستخدام معاملين للمذبذب. هذين المعاملين هما دوال في طول المذبذب وفي الأجزاء البصرية داخل المذبذب، واللذان يعرفا على النحو التالي:

$$g_1 = 1 - \frac{L_2}{f} - \frac{L_0}{R_1} \quad (8)$$

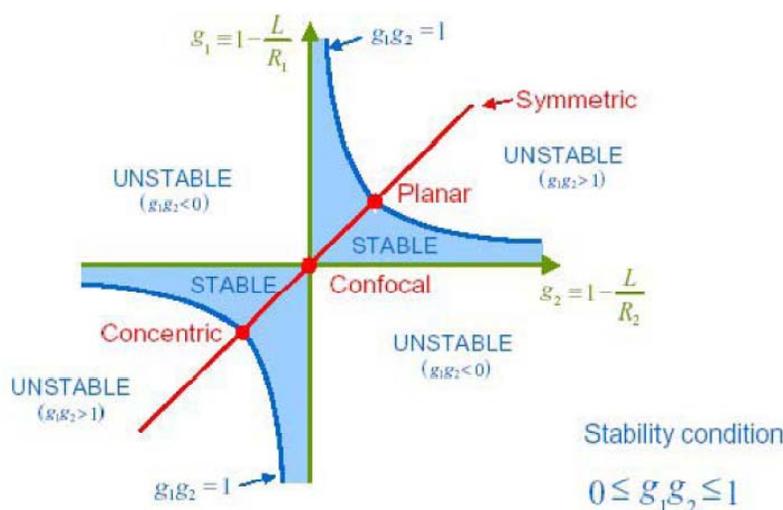
$$g_2 = 1 - \frac{L_1}{f} - \frac{L_0}{R_2} \quad (9)$$

حيث R_1 و R_2 هما نصف قطر كل مرآة، و L_0 تعرف على إنها



$$L_0 = L_1 + L_2 - \left(\frac{L_1 L_2}{f} \right) \quad (10)$$

و f هو البعد البؤري للعدسة الحرارية، و L_1 و L_2 هما المسافة من كل مرآة إلى العدسة الحرارية. ولان بلورة Nd:YAG اعتبرت في النموذج على إنها عدسة رقيقة وضعت بين المرآتين على مسافة متساوية منهما. فان البعد البؤري للعدسة يمكن أن يستخدم لتحديد معاملات المذبذب الذي يستخدم بشكل متكرر لتعريف استقرار المذبذب على مخطط الاستقرار g_1 و g_2 الموضح في الشكل 4.5.



الشكل 4.5 مخطط g_2 ، g_1 للاستقرار (Kaivola, 2002)

إذا كانت كلا المرآتين متماثلتين ولهما نصف قطر تقعر يساوي مالانهاية، يمكننا أن نقول إن النسبة بين معاملات المذبذب وحجم بقعة الليزر (نصف قطر الشعاع) تبقى ثابتة (Koechner, 1999)، أي ان

$$\frac{w_1^2}{w_2^2} = \frac{g_2}{g_1} \quad (11)$$

حيث إن w_1 و w_2 هما حجم خصر بقعة الليزر waist spot sizes و g_1 و g_2 هما معاملا المذبذب المقابلان على التوالي. كذلك فان المرايا المتماثلة تتطلب أن يعمل المذبذب على امتداد المحور المتماثل الموضح في الشكل 4.5. وبتبسيط المعادلة 11 فانه يتضح إن قطر الخصر عند



كلا المرآتين سوف يكون متماثل وبالتالي فان معاملات المذبذب يجب أن تكون متساوية. ومن المهم أن نلاحظ إن قطر الخصر للنمط TEM₀₀ عند احد المرآتين في أي مذبذب يمكن أن تحدد باستخدام معاملات المذبذب. وبمعرفة هذا، فان معاملات المذبذب يمكن أن تعرف من خلال البعد البؤري f ، ونصف قطر خصر الشعاع يمكن أن يعرف من خلال معاملات المذبذب على النحو التالي:

$$g = g_1 = g_2 = 1 - \frac{L}{2f} \quad (13)$$

$$w_1^2 = w_2^2 = \left(\frac{\lambda L}{\pi} \right) (1 - g^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

حيث L هو طول المذبذب، و λ الطول الموجي لشعاع الليزر و f البعد البؤري للعدسة الحرارية.

2.5 بلورات Nd:YAG

بلورة Nd:YAG أصبحت تستخدم بشكل كبير في الكثير من التبادلات التجارية والتطبيقات العسكرية، ويمكن القول انها من أهم المواد المتعلقة بليزرات الحالة الصلبة المتوفرة (VLOC, 2002). بلورة الـ YAG حاليا هي الوحيدة من بين مواد الحالة الصلبة التي لها القدرة على إنتاج شعاع ليزر مستمر (CORD, 2002). وكما ذكر سابقا، فهي بلورة أحادية $Y_3Al_5O_{12}$ حيث ان بعض ايونات اليوتريم تم إزالتها واستبدالها بايونات تريفيالانت النوديميوم. تم اختيار ايونات النوديميوم لأنها ذات حجم مماثل لايونات اليوتريم وبالتالي لن تؤثر على التركيب البلوري المكعب للبلورة، وكذلك لان لها خصائص ضخ عالية. تنمو بلورة Nd:YAG كبلورة مفردة في اتجاه $\langle 111 \rangle$ باستخدام طريقة Czochralski. هذه العملية تنتج معظم البلورات المتوفرة في يومنا هذا. وباستخدام هذه العملية، فان البلورات تنمو ككتلة معدنية كما في الشكل 5.5 حيث منها يتم عمل وتصنيع ساق مادة الليزر (VLOC, 2002).



شكل 5.5 كتلة Nd:YAG (VLOC, 2002).

يبلغ قطر الكتلة المعدنية حوالي 100mm، بطول يعتمد على التطبيق المطلوب والمرغوب فيه من البلورة. ونتيجة لدرجة ذوبان بلورة Nd:YAG العالية فإن نمو البلورة يتم في درجات حرارة عالية في بوتقة من الأريديوم (VLOC, 2002). كل بلورات Nd:YAG تنمو بهذه الطريقة تظهر قلب لامع يمتد على طول البلورة، وتعطي البلورة لون قرنفلي فاتح. تعتبر بطء عملية النمو من العوائق التي توجه هذه الطريقة، حيث تبلغ سرعة النمو ما يقارب 0.5 mm/h، ولنمو البلورة بالكامل يتطلب 35 يوم (VLOC, 2002). وعليه، فإن إنتاج البلورات بهذه الطريقة يعتبر مكلفا كثيرا، وبالرغم من أن هذه الطريقة تستخدم منذ 40 عاما، إلا أنه لا يوجد بديل أفضل لنمو بلورات Nd:YAG تم تطويره، حتى يومنا هذا. التحسينات والتطويرات مستمرة على مدى هذه السنين جعل من البلورات المنتجة حاليا قادرة على إنتاج طاقة عالية تصل إلى 700 وات من تجويف ليزر مفرد. والأهم من هذا هو البحث عن ليزر بقدرة عالية، وتم دمج أكثر من تجويف ليزر للحصول على المزيد من الطاقة. وحاليا يوجد ليزرات قوية جدا من Nd:YAG بالضخ الضوئي قادرة على إنتاج 6000 وات (Kumkar, 2002).

3.5 الخواص الفيزيائية والضوئية

بلورة Nd:YAG تظهر خواص جذابة تجعلها مفيدة كوسط لليزر. ولكي تكون البلورة مناسبة لليزر فإن البلورة يجب أن تكون شفافة لتسمح بمرور الضوء الناتج من الضخ الضوئي، وتمتص أقل قدر ممكن من الطول الموجي لليزر، ولها خواص ميكانيكية جيدة مثل التوصيل الحراري.



نظر للإجهاد الحراري العالي الذي تتعرض له البلورة نتيجة للضخ الضوئي، فإن المادة يجب ان تكون لها موصلية حرارية عالية ومعامل تمدد طولي صغير. هذه الخصائص مهمة لضمان تسرب الحرارة بشكل جيد وان البلورة لا تتغير أبعادها بشكل كبير أثناء التشغيل. درجة الذوبان للبلورة يجب أيضا أن تكون عالية بما فيه الكفاية بحيث أن الطاقة المستخدمة والحرارة الناتجة لا تصل بالبلورة إلى درجة الذوبان.

الخصائص البصرية للبلورة تجعلها خيار مثالي كمادة لليزر. البلورة نفسها هي بلورة متماثلة بصريا وتظهر تركيب بلوري مكعب. مادة الليزر هذه لها ميزة مهمة وهي إنها تستطيع أن تعمل بنظام المذبذب المستقر أو غير المستقر أو (2) كمكبر بسيط. ومن الخصائص البصرية المهمة لبلورة Nd:YAG موضح في الجدول 1.5.

الجدول 1.5 الخواص البصرية لبلورة Nd:YAG

Property	Value
Index of refraction	1.82
Extinction ratio	30 dB
dn/dT	$7.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Stimulated emission cross section	$2.8 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^2$

الخواص الفيزيائية للبلورة هي أيضا جذابة، فالتركيب مستقر في درجات الحرارة المنخفضة وحتى درجة الذوبان، ولا يوجد تغير في الطور من صلب إلى صلب لبلورة Nd:YAG تم الإشارة إليه من قبل (Koechner, 1999). ومن أهم الخواص الفيزيائية لبلورة Nd:YAG موضح في الجدول 2.5.

الجدول 2.5 الخواص الفيزيائية لبلورة Nd:YAG

Property	Value
Young's modulus	310 GPa
Poisson's ratio	0.27 (estimated)
Specific heat	0.14 cal/(g °C)
Coefficient of thermal expansion	$7.8 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Density	4.56 g/cm ³
Melting point	1970 °C

القسوة والصلابة للـ YAG أقل بقليل من الياقوت، ولكن البلورة يمكن أن تنتج باستخدام تقنيات التصنيع العادية ولا تظهر أي مشاكل مثل الكسر أو ما شابه. ومحاولات لزيادة مستويات التطعيم



بايونات النوديميوم من اجل الحصول على حبيبات أكثر وهذا تسبب في حدوث تشوهات في التركيب البلوري نظرا لان ايونات النوديميوم اكبر بشيء قليل من ايونات اليوتريوم، كذلك هذا يعمل على تقليل فترة عمر الفلوريسينيت. ومستوى التطعيم الحالي لا يزيد عن 2% نوديميوم للوزن الذري (Koechner, 1999).

مواصفات التصنيع لبلورات YAG هامة للغاية، ولكنها تعتمد على التطبيق المراد استخدامه من الليزر الناتج. يوضح الجدول 3.5 المزايا المتعلقة بنسبة القبول أو التجاوز لبلورات Nd:YAG. الحصول على سطحين متوازيين ومستويين على طرفي البلورة يعتبر من اهم الخصائص لضمان الحصول على زاوية قائمة مع المحور البصري للبلورة وجهاز الليزر، واي انحراف عن هذا يؤثر بشكل كبير على انحراف الشعاع عن مساره. أسطح متوازية، على امتداد قطر البلورة يعتبر عامل مهم للحصول على اعلى درجات التماثل.

الجدول 3.5 مقدار السماح او التجاوز في بلورة Nd:YAG

Tolerance type	Numerical tolerance
Flatness of ends	$\lambda/10$
Parallelism of end faces	± 4 arc sec
Perpendicularity of end faces	± 5 minutes
Physical dimensions (length)	± 0.5 mm
Physical dimensions (diameter)	± 0.025 mm

خشونة الاسطوانة، تعرف على إنها خشونة السطح الخارجي للبلورة والذي وجد انه يؤثر على تحديد اعلى قيمة لقدرة الليزر الناتج من البلورة، وكذلك مهم في تحديد حد الكسر (Schlueter and Markille, 2002). عادة يقوم مصنعو البلورات بتنفيذ فحص اختبار لقياس مستوى قدرة الضوء عند حالات استقطاب مختلفة التي تعبر في البلورة. وتتمثل طريقة الفحص العملية في تمرير شعاع ليزر هيليوم نيون من خلال مستقطبين، واللذان يكونا مثبتان قبل البلورة وفي البداية يكونا مرتبين على استقامة واحدة مع بعضهما البعض. بعد مرور الليزر خلال كلا المستقطبين، فان الشعاع يدخل في بلورة Nd:YAG، وبعد أن يخرج من البلورة يتم قياس مستوى القدرة له. قرائتين للقدرة يتم الحصول عليها، الأولى عندما يكون المستقطبين مرتبين مع بعضهما البعض والثانية عند لف المستقطب. والفرق في القدرة النافذة من خلال البلورة يتناسب مع مقدار الانكسار (VLOC, 2002). المزيد من التقييم على مساحات مختلفة من البلورة ممكن باستخدام مقياس تداخل Twyman-Green، وهذا يستخدم ليزر الهليوم نيون لإظهار أهداب التداخل في البلورة (VLOC, 2002).

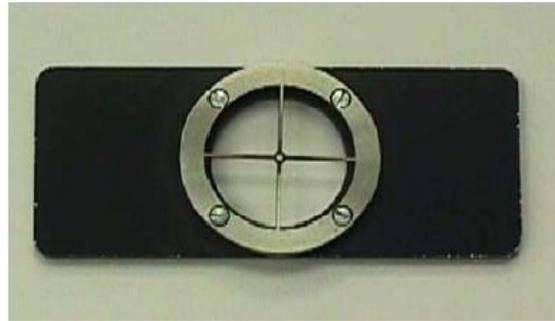


6. الطرق المتوفرة لقياس شعاع الليزر

خلال مرحلة المحاذاة الأولية وعلى مدى عمر الليزر، فانه من الضروري قياس بعض معاملات الشعاع. ومن هذه المعاملات: موقع الشعاع، ومستوى القدرة، وتوزيع الشدة، والتباعد، ونقطة التبئير، ومعامل M^2 .

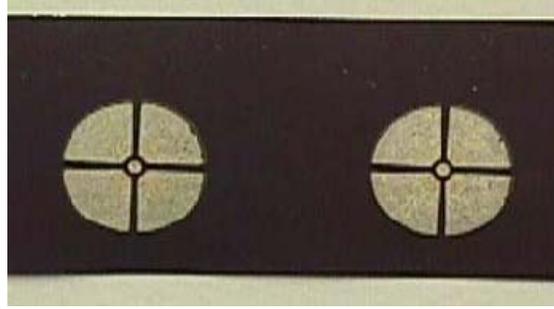
قياس قدرة شعاع الليزر الناتجة هي الأسهل. هذا القياس يمكن أن يتم باستخدام جهاز يشبه المسعر الحراري المستخدم لقياس التغير في درجة حرارة المادة الموضوعه في مسار شعاع الليزر، ومن ثم ربط هذا بالطاقة الحرارية الناتجة. هذا القياس يستغرق في العادة بضع دقائق، ليغطي كافة نطاق القدرة الناتجة عن الليزر، ولا يتطلب أي تعديلات على الليزر. ومن المهم أن تجرى القياسات على الليزر بدون استخدام عدسة مجمعة. إذا حدث وان نسيت ان تقوم برفع العدسة فان شعاع الليزر من المحتمل أن يصهر جهاز مقياس القدرة. ومثال على منحني القدرة الذي يمكن الحصول عليها بواسطة مقياس قدرة من Coherent موضح في الملحق B.

خلال مراحل المحاذاة يستخدم شريط مثبت عليه إشارة +. ومثال على هذا الشريط موضح في الشكل 1.6.



شكل 1.6 الشريط المستخدم لمحاذاة شعاع الليزر

ولتسهيل عملية المحاذاة، يستخدم ورق فوتوغرافي يستجيب لضوء الليزر. يستخدم الشريط المثبت عليه إشارة + للتأكد أن كل الأركان الأربعة للشعاع متماثلة، الشكل 2.6.



شكل 2.6 ورق تصوير فوتوغرافي للتحقق من شعاع الليزر

الطريقة العامة تتم عن طريق إطلاق شعاع الليزر على الورقة الفوتوغرافية والمثبتة خلف الشريط الذي عليه إشارة +، ولكن الليزر لا يحرق الورقة لان مستوى الطاقة يكون منخفض أو عدد قليل من نبضات الليزر يستخدم. يستخدم شريطين بإشارة + يتم محاذاتهما مع بعضهما البعض لاستخدامهما في ضبط محاذاة شعاع الليزر وهذه العملية مهمة جدا في حالة محاذاة أنظمة بصرية مثل مرايا أو عدسات، أو في حالة استخدام ألياف بصرية. وعلى كل حال، هذه الطريقة لا توفر صورة ثلاثية الأبعاد للشعاع وعليه يمكن أن يكون هناك بعض التشويشات في الشعاع. وبواسطة قياس شكل الشعاع الناتج عن حرق الورق الفوتوغرافية، يمكن قياس حجم بقعة الليزر.

توزيع شدة شعاع الليزر هي أيضا سهلة القياس باستخدام كاميرا CCD والبرامج الملحقة بها (Spiricon, 2002). وعلى كل حال، قبل أن يتم قياس الشعاع من المهم جدا ان تقلل شدة أشعة الليزر بقدر كبير حتى لا تحرق الجزء الحساس في الكاميرا. وتحدد الكاميرا شكل الشعاع في اتجاهين بالاعتماد على عناصر الصورة للكاميرا، وشدة الأشعة التي يلتقطها كل بكسيل في الصورة. النتيجة لهذا تكون إما سوداء أو بيضاء، وهذا يعتمد على نوع البرمجيات المستخدمة، وترجمة لونية لشكل الشعاع، مع ظهور توزيع مختلف للشدة يعكس مستوى الطاقة في المناطق السوداء أو البيضاء. مع استخدام نظام كمبيوتر متطور مدعم ببرمجيات حديثة وكاميرا عالية الجودة يمكن ان يتم تحويل هذه المعلومات إلى صورة ثلاثية الأبعاد لشكل شعاع الليزر. وقد تظهر بعض المشاكل خصوصا إذا لم يتم معايرة الكاميرا بشكل دقيق. كذلك ضبط الكاميرا بحيث يتجنب التقاط الإشارات الظاهرة في الخلفية والتي تعتبر تشويش. عندما يكون خصر الشعاع محدد على كاميرا CCD، فانه من الممكن ان يكون ذلك يغطي جزء قليل من بكسيالات الكاميرا. ولهذا فان أي تشويش موجود سوف يظهر له تأثير كبير وهذا سيسبب نسبة كبيرة من الخطأ في القياسات

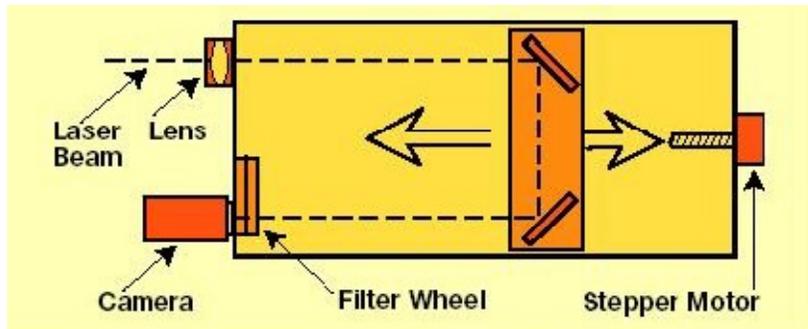


(Roundy, 1994). عدد كبير من المصانع مثل PRIMES (2002) و Spiricon (2002) طوروا طرق معقدة لحل مثل هكذا مشاكل والحصول على نتائج حقيقية تمثل شعاع الليزر.

طريقة سهلة لقياس تباعد شعاع الليزر هي في البداية تحديد قطر الشعاع عندما يخرج من الليزر. بعد ذلك يسمح للشعاع بالانتشار إلى مسافة محددة حيث يمكن قياس حجم بقعة الليزر. والتباعد في هذه الحالة يحسب ببساطة من خلال مقدار الزيادة في القطر لكل وحدة طول.

من الصعب قياس نقطة البعد البؤري ومعامل M^2 بطريقة يدوية ويتطلب قياسهما معدات خاصة. وفي العادة تقاس نقطة البعد البؤري نظريا ويتم التحقق منها بواسطة جهاز تحليل شعاع الليزر والذي يخضع للقياسات العالمية ISO. وبصفة عامة، قيمة M^2 تشير إلى مقدار قرب شعاع الليزر من توزيع جاوسيان، وتحديد أكثر في الجزء 1.6. .. ولكي نحصل على اكبر كفاءة ممكنة أثناء العمل فان الشعاع يجب أن يكون له شكل منتظم. ومثال على المنتج الحالي المتوفر لقياس M^2 يستخدم كاميرا CCD ومرآتين مثبتتين على قاعدة يمكن التحكم بها بدقة عالية جداً. بتحريك القاعدة والمرآتين، من الممكن تطويل مسار الشعاع وقياس غلاف الأشعة. وغلاف الأشعة يسمح لمن يجري التجربة بتحديد صورة كاملة للشعاع في مدى Rayleigh لنقطة البعد البؤري. ومدى Rayleigh للشعاع يعرف عمق التبئير للشعاع جاوسيان كما هو مبين في المعادلة 3.4. غلاف الأشعة يعرف بمجرد معرفة أبعاد خصر الشعاع. وعادة يقاس غلاف الأشعة على مسافة اكبر بأربع مرات من مدى Rayleigh للشعاع (DIN, 1999). ويتطابق قياس الغلاف مع قياس معامل تبئير الأشعة. والأدوات المستخدمة في القياس مصنعة بواسطة Spiricon Inc. موضحة في الشكل 3.6. ووصف دقيق لكيف يعمل محلل شعاع الليزر، مع التركيز على PRIMES

1.2.8 FocusMonitor موضع في الجزء



الشكل 3.6 محلل شعاع ليزر (Spiricon, 2002)



تعتبر عملية القياس الدقيق عامل مهم لكفاءة الليزر أثناء التشغيل. وتطويرات حالية تشمل دمج نظام القياس مع نظام الليزر حتى يتم مراقبة جودة شعاع الليزر أثناء الاستخدام وأي انحراف بسيط في مواصفات الشعاع يتم رصده بواسطة أجهزة القياس.

1.6 معامل تبئير شعاع الليزر

استخدم معامل تبئير شعاع الليزر لعدد من السنوات كطريقة لتقييم كفاءة الليزر. هذا المعامل القابل للقياس يعرف أيضا بـ M^2 ، يحدد كم قريب شعاع الليزر من الشعاع الجاوسيان المثالي. شعاع الليزر المثالي له قيمة M^2 تساوي 1، حيث أن الشعاع العادي سيكون له قيمة أكبر من 1. حديثا، منظمة المواصفات والمقاييس العالمية حدد معايير ومواصفات لاستخدام قياسات معامل M^2 والتي سوف تستخدم كدليل مرشد لجودة أشعة الليزر (Spiricon, 2002).

كل أشعة الليزر المتمثلة قطريا يمكن أن تميز بواسطة المعاملات الثلاثة التالية، موضع خصر الشعاع، قطر خصر الشعاع، وزاوية تباعد الشعاع في المدى البعيد. العامل الأخير يعرف على انه نصف زاوية التباعد الكلي المعطى بالمعادلة 39 (Koechner, 1999). باستخدام هذه المعاملات، فانه من الممكن حساب قطر الشعاع عند أي نقطة على امتداد محور انتشار الشعاع. وبهذا المعلومات، فان معامل تبئير الشعاع يمكن أيضا أن تحدد.

تحديد هذا المعامل ينجز عادة باستخدام نظام تحليل شعاع الليزر والذي يسجل حجم شعاع الليزر. وعادة فانه من المفضل ان نحصل على المعلومات من غلاف الأشعة ومن خلال مدى Rayleigh. مدى Rayleigh يعرف على انه المسافة التي يجب أن يسافر بها الشعاع لكي يزيد قطره بمقدار $\sqrt{2}$. وبأخذ القياسات على أكثر من مدى Rayleigh يسمح بتحليل الشعاع لتحديد موقع خصر الشعاع والذي يعرف على انه النقطة في مسار الانتشار التي يكون عندها قطر الشعاع اقل ما يمكن.

المعايير التي طورت من اجل قياسات معامل تبئير شعاع الليزر مدرجة تحت منظمة المواصفات والمقاييس العالمية EN ISO برقم 11146 في الولايات المتحدة أو في منظمة الصناعة الأوروبية DIN تحت رقم 11146 (DIN, 1999). والطرق المتبعة لأفضل قياسات لكل أشعة الليزر سواء المتمثلة قطريا أو غير المتمثلة مذكورة بشكل مفصل في وثائق DIN (1999). ومن اجل الهدف من التجارب التي سوف تجرى كجزء من هذه الرسالة، فانه يمكن الافتراض إن شعاع ليزر YAG



متماثل قطرياً. وهذا سوف يبسط الحسابات اللازمة لتحديد M^2 . ولكن كل هذه الحسابات أصبحت تنجز بواسطة برامج الكمبيوتر التي طورت بواسطة مصنعو محلل شعاع الليزر، وبتابع التعليمات الصادرة عن ISO. وتوضح معايير ISO بشكل مفصل كيف يجب أن نضع محلل أشعة الليزر بالنسبة لشعاع الليزر وكيف يجب أن يستخدم مع جهاز الليزر.

ولكي نقيس عوامل الشعاع الضرورية لحساب معامل تبئير الشعاع، فإن المحلل يجب أن يوضع عمودياً على محور انتشار الشعاع لكي يضمن توزيع شدة دقيق. وهذه القياسات يجب أن تنفذ بجوار خصر الشعاع، بغض النظر إذا كان الخصر قد تكون بوجود عدسة إضافية في النظام، أو إذا كان التبئير طبيعياً. القياسات يجب أن تكرر عند أكثر من موضع بجوار نقطة البعد البؤري، لكي يتم تحديد نقطة البعد البؤري بشكل صحيح. والمتطلبات طبقاً لمعايير ISO انه على الأقل 10 مستويات للقياس يجب أن تستخدم، مع تكرار القياسات 5 مرات على الأقل عند كل مستوى. نصف القياسات يجب أن توزع في حدود طول Rayleigh على كلا جانبي خصر الشعاع (DIN, 1999). وبفعل ذلك سوف يضمن أن محلل الأشعة سوف يكون قادراً على تحديد موقع خصر الشعاع والحصول على تمثيل دقيق للشعاع.

2.6 معامل حساسية بلورة Nd:YAG

معامل حساسية البلورة، والذي يعرف بـ M^{-1} ، ويمثل علاقة مهمة جداً بين قوة الضخ في الليزر والتغير المقابل في البعد البؤري للبلورة. إن التحديد التحليلي لهذا المعامل سوف نوضحه على النحو التالي. باستخدام المعادلة التي تعرف العدسة الحرارية، مع معامل حساسية البلورة، تم نمذجتها تحليلياً في الملحق C.

العدسة الحرارية للبلورة ناتجة عن الإجهاد الحراري المتولد في البلورة أثناء عملية الضخ. لهذا فإن تأثير العدسة الحرارية يعتمد بشدة على طاقة الضخ وعلى كفاءة نظام التبريد. وتأثير العدسة الحرارية مهم جداً ولا يمكن إهماله في تصميم وإنتاج أنظمة الليزر. كذلك، يجب ملاحظة انه في حالة أنظمة الليزر النبضي، فإن حالة الاتزان الحراري لا يمكن الوصول لها عند معدلات منخفضة اقل من 5Hz (Dascalu et al., 1998). هذه يمكن أن تهمل في هذه الحالة لان الليزر المستخدم هو من النوع المتواصل أي cw laser. والنتيجة النهائية للإجهاد الحراري هي اضمحلال في



جودة شعاع الليزر نتيجة للعدسة الحرارية واحتمال حدوث تشققات في بلورة الليزر إذا زادت الحرارة المسببة للإجهاد قدرة تحمل المادة (Clarkson and Hanna, 1998).

ولكي نتمكن من تحديد البعد البؤري للبلورة نظرياً، يجب علينا في البداية أن نعرف تأثير التغير في معامل الانكسار والذي يعتمد على كلا من الإجهاد ودرجة الحرارة. وهذا التأثير موضح بالمعادلة التالية:

$$n(r) = n_0 + \Delta n(r)_T + \Delta n(r)_s \quad (14)$$

حيث $n(r)$ هي التغير القطري في معامل الانكسار، و n_0 هو معامل الانكسار في مركز البلورة، و $n(r)_T$ هو التغير في معامل الانكسار كدالة في درجة الحرارة، و $n(r)_s$ هو التغير في معامل الانكسار كدالة في الإجهاد. الآن، فانه من المفيد أن نعرف الحرارة الناتجة لكل وحدة حجم، وكذلك Q في بلورة الليزر على النحو التالي:

$$Q = \frac{P_a}{\pi r_0^2 L} \quad (15)$$

حيث L هو طول بلورة الليزر، و r_0 هو نصف القطر الخارجي للبلورة، و P_a هو طاقة الامتصاص في البلورة عندما تكون قد وصلت إلى حالة الاستقرار. وهذا يعني أن الحرارة الممتصة تساوي الحرارة المفقودة من سطح البلورة بواسطة المبرد المستخدم والذي يعرف على النحو التالي:

$$P_a = 2\pi r_0 L h_c [T(r_0) - T_F] \quad (16)$$

حيث h_c هي معامل الانتقال الحراري بالتوصيل. و T_F هو درجة حرارة المادة المبردة، و $T(r_0)$ هي درجة حرارة السطح الخارجي للبلورة.

والآن باستخدام العلاقة المعرفة في المعادلة 14، فان معامل الانكسار كدالة في تغير درجات الحرارة يحدد بالتغير في درجة الحرارة بين الجدار الخارجي ومركز بلورة الليزر. كذلك مع الاستفادة من خواص المادة يمكن ربط معامل الانكسار لكل وحدة درجة حرارة، مع التغير الناتج عن التأثير الحراري على النحو التالي (Koechner, 1999)

$$\Delta n(r)_T = [T(r) - T(0)] \left(\frac{dn}{dT} \right) \quad (17)$$



حيث $T(0)$ هي درجة الحرارة عند مركز البلورة، و $T(r)$ هي درجة الحرارة عند مسافة r من مركز البلورة، و dn/dT هي التغير في معامل الانكسار بالنسبة إلى درجة الحرارة. والآن المعادلة 17 يمكن كتابتها بشكل آخر بالاعتماد على الحرارة المتولدة والموضحة في المعادلة 15 والتي تنتج (Koechner, 1999)

$$\Delta n(r)_T = -\frac{Q}{4k} \left(\frac{dn}{dT} \right) r^2 \quad (18)$$

حيث k هي الموصلية الحرارية. و $T(r)$ هي علاقة درجة الحرارة مع نصف القطر والتي تحدد على النحو التالي

$$T(r) = T(r_0) + \left(\frac{Q}{4k} \right) (r_0^2 - r^2) \quad (19)$$

حيث $T(r_0)$ هي درجة الحرارة على السطح الخارجي، و k الموصلية الحرارية، و r_0 هي نصف القطر الخارجي للبلورة.

عادة ما نقوم بنمذجة معامل الانكسار باستخدام المبادئ الأساسية حتى نحدد تقريبا سلوك معامل الانكسار في البلورة عندما تضخ بواسطة الطاقة الضوئية. ولكن، لمزيد من الدقة لتمثيل السلوك الضوئي في البلورة، فإن معادلات أكثر تفصيلا تحكم سلوك معامل الانكسار يجب أن تطور. ولقد تبين إن معامل الانكسار يتغير بمعادلة تربيعية مع نصف القطر، وعليه فإن الشعاع الضوئي سوف يتعرض لتغير رباعي في الطور عندما ينتشر على امتداد محور البلورة (Ifflaender, 2001). وهذا يشابه التأثير الذي يحدث بسبب عدسة كروية وعليه فإن معامل الانكسار يمكن أن ينمذج على النحو التالي (Koechner, 1999)

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{2r^2}{b^2} \right) \quad (20)$$

حيث b تعرف على إنها مشتقة مستعرضة. ولكن قبل تعريف حد المشتقة المستعرضة، فإن مبدأ الأنبوبة الرباعي يجب أن يوضح. إذا افترضنا إن شعاع الضوء بنصف قطر محدد ينتشر في البلورة، فإن الجزء الأقرب من الشعاع لحواف الخارجية للبلورة سوف يواجه منطقة ذات معامل انكسار منخفض من مركز البلورة. هذا سوف يؤدي إلى أن الجزء الخارجي للشعاع سوف ينتقل



بسرعة أكبر نتيجة لانخفاض معامل الانكسار، حيث إن الجزء الداخلي للشعاع يسافر في المنطقة ذات معامل الانكسار الأعلى بسرعة أقل. ونتيجة لهذا فإن الشعاع ينحرف باستمرار في اتجاه المحور المركزي للبلورة، هذا المبدأ يعرف أنبوبية رباعية مستقرة. والآن باستخدام المبدأ أعلاه يمكن أن نوضح إن معامل الانكسار سوف يتغير بشكل قطري ومحوري معا. بتعريف هذا التغير في معامل الانكسار نحصل على (Siegman, 1986)

$$n(r, z) = n_0(z) - \frac{1}{2} n_2(z) r^2 \quad (21)$$

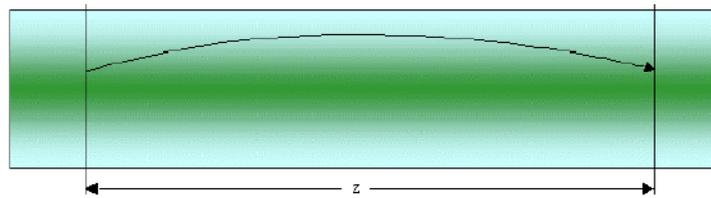
حيث $n_0(z)$ هو التغير على امتداد محور البلورة، و $n_2(z)$ يعرف على النحو التالي

$$n_2(z) \equiv - \left. \frac{\partial^2 n(r, z)}{\partial r^2} \right|_{r=0} \quad (22)$$

والمعامل المعروف في المعادلة 22 يمثل التقوس في معامل الانكسار عند المحور المركزي. باستخدام هذا المعامل ومعامل الانكسار على امتداد محور البلورة، يمكن أن نعرف الحد b في المعادلة 20 على النحو التالي (Siegman, 1986)

$$b^2 = \frac{n_2}{n_0} \quad (23)$$

وبشرح هذا المبدأ في الأنبوبية ذات التغير القطري في معامل الانكسار نحصل على الشكل 1.6.



الشكل 1.6 انتشار الشعاع في الأنبوبية

البعد البؤري للأنبوبية القطرية، وجدت إنها تشبه تلك التي وجدت في بلورة Nd:YAG، يكون على النحو التالي (Koechner, 1999)



$$f \cong \frac{b^2}{4n_0L} \quad (24)$$

حيث انه افترض ان البعد البؤري f يكون كبير جدا بالمقارنة مع طول البلورة L. التغير الكلي لمعامل الانكسار نتيجة للتأثير الحراري والإجهاد يمثل بالمعادلة التالية (Koechner, 1999)

$$n(r) = n_0 \left[1 - \frac{Q}{2k} \left(\frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\phi} \right) r^2 \right] \quad (25)$$

حيث n_0 معامل الانكسار في مركز البلورة، و α هي معامل التمدد الطولي، و $C_{r,\phi}$ هو الاستقطاب المعتمد على معامل elasto-optical لبلورة Nd:YAG. التغير في معامل الانكسار الناتج عن الإجهاد الحراري يعتمد على الاستقطاب للضوء الساقط. ولهذا فان يتطلب استخدام معاملين elasto-optical كما هو مبين في المعادلة 25، معامل واحد للمركبة المماسية للضوء ومعامل آخر للمركبة القطرية.

البعد البؤري للعدسة ذات معامل انكسار متغير طبقا للمعادلة 25 يعطى على النحو التالي (Koechner, 1999)

$$f = \frac{k}{QL} \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n_0^3 \right)^{-1} \quad (26)$$

ولكن، التشويه عند نهائي وجهي البلورة يشارك أيضا في التغير الكلي في البعد البؤري للبلورة. والبيانات العملية توضح ان للبلورات الاسطوانية، والتشويه الناتج عن الإجهاد على وجه البلورة وجد انه يحدث داخل منطقة تساوي تقريبا نصف قطر البلورة، كما تقاس من وجه البلورة. والانحراف عن الوجه المسطح I(r) يحدد من التمدد الحراري للمادة كما هو موضح على النحو التالي:

$$l(r) = \alpha r_0 [T(r) - T(0)] \quad (27)$$

حيث α هو معامل التمدد الحراري، و r_0 هي المنطقة من البلورة التي يحدث عندها التمدد، و $T(0)$ هي درجة الحرارة عند مركز البلورة. ونصف قطر التكور الناتج من التشويه يحدد بواسطة (Ifllaender, 2001)



$$R_d = -\left(\frac{d^2 l}{d^2 r}\right)^{-1} \quad (28)$$

وهذا يمكن أن يقرب باستخدام

$$R_d \cong \frac{r_0^2}{\Delta l} \quad (29)$$

حيث r_0 نصف القطر الخارجي للبلورة، Δl هي التغير في طول البلورة (Ifflaender, 2001). والبعد البؤري الناتج للبلورة والمتسبب بواسطة التشويه على وجهي البلورة، f ، يمكن أن نحصل عليه باستخدام معادلة العدسة السميكة والتي تكون (Koechner, 1999)

$$f^{-1} = k[\alpha Q r_0 (n_0 - 1)]^{-1} \quad (30)$$

حيث k هي الموصلية الحرارية، و α هي معامل التمدد الحراري، و Q معرفة في المعادلة 15، و r_0 هي نصف القطر الخارجي للبلورة، و n_0 هو معامل الانكسار عند مركز البلورة. وفي النهاية، فإن البعد البؤري الكلي للبلورة، هو جمع كل التغيرات المعتمدة على درجة الحرارة والإجهاد على الطرفين، يمكن أن يبين على انه (Koechner, 1999)

$$f = \frac{kA}{P_a} \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n_0^3 + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right)^{-1} \quad (31)$$

حيث A هي مساحة مقطع البلورة، و P_a هي حرارة الامتصاص.

الآن بمعرفة البعد البؤري لبلورة الليزر فانه من الممكن أن نربط هذه المعلومات مع الطاقة الداخل على نظام الليزر. ويربط هاذين المعاملين نحصل على معامل حساسية البلورة، و M^{-1} تعرف على إنها

$$M^{-1} = \frac{d\left(\frac{1}{f}\right)}{dP_m} \quad (32)$$

حيث f هي البعد البؤري للبلورة و P_{in} هي الطاقة الداخل على الليزر.



هذا المعامل سوف يسمح لنا بمعرفة كيف تتغير الطاقة الضوئية كاستجابة للتغير في الطاقة الداخلة للنظام. هذا المعامل مهم جدا خلال مراحل تصميم الليزر حتى نضمن إن المذبذب سوف يبقى يعمل خلال كل مدى طاقة التشغيل. ونظام الليزر يجب يكون قادرا على التعامل مع الكثير من التغيرات التي تؤثر على معامل الحساسية للبلورة، بما فيها عمر المصباح، ومصدر الطاقة، والتغيرات في نظام التبريد.



7. بصريات الشعاع الجاوسيان GAUSSIAN BEAM OPTICS

لكي نضع الأساسيات اللازمة للحسابات التي سوف نستخدمها خلال هذه الرسالة، فإننا سوف نقوم بعرض مختصر لأساسيات انتشار الشعاع الجاوسيان. وبالرغم من أن الشعاع ينتج من ليزر Nd:YAG معقد ويحتوي على العديد من الأنماط الاهتزازية، فإن تحليل بسيط يمكن أن ينفذ بواسطة افتراض أن الشعاع هو شعاع جاوسيان بسيط بنمط اهتزازي أساسي هو TEM_{00} . هذه النتائج في الشعاع المتماثل قطريا بسعة $A(r,z)$ ، ذات توزيع قطري، r ، وفي اتجاه المحور، z ، يمكن أن يمثل بالمعادلة (Ifflaender, 2001)

$$A(r, z) = A_0 \frac{w_{T0}}{w_0} \exp \left[-r^2 \left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{ik}{2R} \right) + i(k_w z - \varphi) \right] \quad (33)$$

حيث A_0 هو مقدار السعة عند مركز الشعاع عند الخصر، و w_{T0} هو مقدار نصف قطر خصر الشعاع، و w_0 هو نصف قطر الشعاع عند نقطة على امتداد خط انتشار الشعاع، و R تمثل بـ $R(z)$ وتعرف على أنها تحدد جبهة الموجة. وطول رايلي z_R يعرف على النحو التالي:

$$z_R = \frac{\pi w_{T0}^2}{\lambda} \quad (34)$$

والرقم الموجي k_w يمكن أن يحدد من

$$k_w = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (35)$$

والطور الطولي ϕ يعرف على النحو التالي:

$$\varphi = \arctan \left(\frac{z}{z_R} \right) \quad (36)$$

حجم بقعة الليزر كدالة في الموقع على امتداد انتشار الشعاع على المحور البصري يمكن أن تحدد باستخدام المعادلة التالية:



$$w_0^2(z) = w_{T0}^2 \left[1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2 \right] \quad (37)$$

حيث w_{T0} هو نصف قطر خصر الشعاع، z المسافة من المستوى المرجعي، و z_R هو طول ريلاي (Rayleigh). بتعريف مركز إحداثيات النظام عند خصر الشعاع، فان نصف قطر تكور جبهة الموجة يمكن ان يحدد على النحو التالي (Ifflaender, 2001)

$$R(z) = z_R \left(\frac{z_R}{z} + \frac{z}{z_R} \right) \quad (38)$$

المعاملين، w_{T0} و z_R المستخدمان في المعادلتين 37 و 38 يحددان معاملات شعاع جاوسيان، والذي منه يمكن تحديد كل المعاملات المرغوب فيها. يمكن التنبؤ بتباعد الشعاع بحيث نعرف كم سيكون قطر الشعاع عندما يسافر مسافة محددة. وخصر شعاع الليزر له خصائص ملحوظة. فعند خصر الشعاع يكون نصف قطر التكور غير محدود ($R = \infty$)، والشعاع سوف يكون له اصغر بقعة على امتداد مسار انتشار الشعاع. وعليه فان زاوية التباعد الكلية θ_0 للنمط الأساسي للشعاع سوف يحدد من خلال المعادلة التالية (Koechner, 1999)

$$\theta_0 = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{2w_0(z)}{z} = \frac{2\lambda}{\pi w_{T0}} = 1.27 \frac{\lambda}{(2w_{T0})} \quad (39)$$

حيث λ هي الطول الموجي لشعاع الليزر و w_{T0} هي حجم بقعة الليزر عند خصر الشعاع. والآن باستخدام التعريف يمكن تحديد حجم الشعاع على امتداد مسار الانتشار كما هو موضح في المعادلة 37 ونصف قطر التكور من المعادلة 38 فانه من الممكن تطوير معامل الشعاع المركب والذي يعتبر مهم جدا عندما تنتشر أشعة جاوسيان خلال النظام البصري. والمعامل $q=q(z)$ يمكن أن تحسب عند أي نقطة على امتداد مسار الانتشار والذي يعرف على النحو التالي (Ifflaender, 2001)

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{i\lambda}{\pi w_0^2} \quad (40)$$



$$q = \frac{R\pi w_0^2}{\pi w_0^2 - i\lambda R} \quad (41)$$

حيث R هي نصف قطر التكور لجبهة الموجة و w_0 هو نصف قطر الشعاع، و λ الطول الموجي لشعاع الليزر. المعادلة 40 تسمح لنا بتعريف نصف قطر الشعاع w_0 ونصف قطر التكور R بدلالة q كما هو موضح في المعادلات التالية (Ifflaender, 2001)

$$w_0^2 = -\frac{\lambda}{\pi} \left(\text{Im} \frac{1}{q} \right)^{-1} \quad (42)$$

$$R = \left(\text{Re} \frac{1}{q} \right)^{-1} \quad (43)$$

معامل الشعاع المركب بالارتباط مع طريقة المصفوفة ABCD يوفر تقريب من الرتبة الأولى في النظام البصري المحوري.

ولكي نصف انتشار الشعاع خلال النظام البصري، فقد تم ابتكار نظام المصفوفة ABCD. كذلك بالرجوع إلى مصفوفة الأشعة، فإنها تستخدم بشكل واسع لوصف انتشار الأشعة البصرية خلال العناصر البصرية المحورية (Siegman, 1986). والشعاع يمكن أن يتميز عند أي نقطة في مساره على امتداد المحور البصري بمعرفة الزاوية ϕ بالنسبة للمحور البصري، والمسافة المحورية dI بالنسبة إلى نقطة مرجعية معطاة. ولكن هذه الطريقة متحققة للأنظمة التي تكون فيها ϕ صغيرة، وهذا ما نسميه بالتقريب المحوري. رياضياً فإن التقريب متحقق إذا تحقق الشرط التالي:

$$\sin \phi \cong \tan \phi \cong \phi \quad (44)$$

إذا بدء الشعاع عند أي نقطة مركزية اختيارية فإن التكور يحدد بالعلاقة التالية:

$$R_1 = \frac{d_1}{\phi_1} \quad (45)$$



حيث d_l هي المسافة من النقطة المرجعية و ϕ_1 هي الزاوية المقاسة من المحور المرجعي. وإذا سافر الشعاع مسافة أكبر على امتداد المسار مسافة مقدارها L ، فإن المعاملات d_l و ϕ_1 تتغيران طبقاً للمعادلتين التاليتين:

$$d_2 = (1 \times d_1) + (L \times \phi_1) \quad (46)$$

$$\phi_2 = (0 \times d_1) + (1 \times \phi_1) \quad (47)$$

المعادلتين 46 و 47 يمكن أن تتحدان في معادلة مصفوفة (Ifflaender, 2001)

$$\begin{vmatrix} d_2 \\ \phi_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} d_1 \\ \phi_1 \end{vmatrix} \quad (48)$$

وبصفة عامة باستخدام المصفوفة ABCD كما يلي:

$$\begin{vmatrix} d_2 \\ \phi_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} d_1 \\ \phi_1 \end{vmatrix} \quad (49)$$

فإن المعاملات A و B و C و D تميز خواص التبئير المحورية لعنصر تحت الدراسة. وبهذه التعريفات يمكننا أن نربط الإزاحات الداخل والخارجة والميل للعناصر البصرية المحورية المختلفة (Siegman, 1986).

انتشار الشعاع خلال أي مادة متجانسة يمكن أن يمثل بالمصفوفة M والتي تساوي

$$M = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \quad (50)$$

وعليه، أي رتبة أولى من العنصر البصري مثل العدسات والمرايا وغيرها يمكن أن يمثل بالمصفوفة المكافئة M . والشكل الشائع للمصفوفة لحالات عديدة يمكن أن يوجد في المرجع (Ifflaender, 2001). كذلك فإن مصفوفة الشعاع التي تحدد أي عنصر أساسي يجب أن تحقق العلاقة التالية عندما نستخدم تعريف الميل العام (Siegman, 1986)

$$AD - BC = 1 \quad (51)$$



المصفوفة المكافئة M لنظام العناصر البصرية يساوي حاصل ضرب المصفوفات الممثلة لكل عنصر. وبالعودة للخلف وبإعادة فحص معامل الشعاع المركب الموضح في المعادلة 40، يمكننا الآن أن نعرف بدلالة المصفوفة ABCD على النحو التالي

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (52)$$

وهذا يسمح لقيمة q أن تنتقل بواسطة العناصر البصرية في النظام. والمعادلات التي تحول معاملات الشعاع هي (Ifllaender, 2001)

$$\frac{1}{R_2} = \frac{\frac{AC + (AD + BC)}{R_1} + BD \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{\lambda^2}{(\pi w_1^2)^2} \right)}{\left(A + \frac{B}{R_1} \right)^2 + \left(\frac{B\lambda}{\pi w_1^2} \right)^2} \quad (53)$$

حيث R هي نصف قطر التكور. وحجم الشعاع w_2 تحدد بواسطة

$$w_2^2 = w_1^2 \left[\left(A + \frac{B}{R_1} \right)^2 + \left(\frac{B\lambda}{\pi w_1^2} \right)^2 \right] \quad (54)$$

وزاوية التباعد θ هي

$$\theta^2 = w_1^2 \left[\left(C + \frac{D}{R_1} \right)^2 + \left(\frac{D\lambda}{\pi w_1^2} \right)^2 \right] \quad (55)$$

المعادلة 52 سوف تسمح لنا بمعرفة معاملات الشعاع المركب عند نقطة محددة لتنتشر في الشعاع من خلال أي عنصر بصري اختياري أو أي نظام وإعادة احتساب قيمة q جديدة عند موقع مختار، وعليه يمكن تحديد حجم الشعاع الجديد وقيم تباعده (Newport, 2002b)



3.2.8 خطوات الحساب

بتغير مصدر الطاقة الداخلة، فان حجم الشعاع عند مرآة الخروج تتأثر نتيجة للتغير في العدسة الحرارية للبلورة، وعليه فان هذا يؤثر بشكل مباشر على حجم الشعاع، w_0 عند نقطة القياس. وباستخدام قوانين انتشار الشعاع، وحساب حجم الشعاع عند المذبذب من قياس نصف قطر الشعاع، فانه من الممكن تحديد عوامل المذبذب كدالة في الطاقة الداخلة باستخدام (Koechner, 1999)

$$w_1^2 = \left(\frac{\lambda L}{\pi} \right) (1 - g_2)^{-1/2} \quad (58)$$

حيث L هي طول المذبذب، و λ الطول الموجي للشعاع و g_2 هي معامل المذبذب. باستخدام معامل المذبذب من المعادلة 58، والبعد البؤري للعدسة الحرارية المتكونة يساوي

$$f = \frac{1}{2} \frac{L}{(g_2 - 1)} \quad (59)$$

مع البعد البؤري للبلورة، بالاستناد إلى المعادلة 59 فانه من الممكن أن نحدد معامل حساسية البلورة من المعادلة 32.

4.2.8 الحسابات التحليلية

النتائج التي حصلنا عليها من التجارب العملية قورنت مع القيم النظرية التي حصلنا عليها من الطرق الموضحة في الجزء 2.6، والموضحة في الملحق A. ولكي نحدد الحرارة المتولدة في النظام، فان معلومات إضافية جمعت من الليزر. درجة حرارة البلورة، وكذلك درجات حرارة المبرد عند الدخول والخروج، كانت مطلوبة لحساب كمية الحرارة المسحوبة من البلورة. باستخدام هذه المعلومات وخواص المادة لبلورة الليزر، فانه من الممكن ان نحدد البعد البؤري نظريا للبلورة بالاعتماد على مقدار الطاقة الداخل على الليزر.



9. الاستخدامات المتوقعة والنتائج

النتائج التي حصلنا عليها في هذه الرسالة سوف تساهم في تحسين عملية إنتاج ليزرات Nd:YAG. بواسطة اختبار وفحص السلوك البصري للبلورة قبل تركيبها في جهاز الليزر، كما إنها سوف تمكن من تأسيس مدى عام لعوامل حساسية البلورة المقبولة والأبعاد البؤرية المناسبة لكل استخدام لجهاز الليزر. هذا سوف يضمن أن البلورات في كل ليزر سوف تعرض تقريبا نفس الخصائص البصرية قبل استخدامها في جهاز الليزر. وكنتيجة لذلك، فإن عملية المحاذاة سوف تكون سهلة ومن الممكن أن تتم بشكل أسرع وأفضل. لان جودة البلورة سوف يتم التحقق منها بعد تصنيعها أو إنتاجها، والتجميع النهائي وزمن الفحص سوف يكون أيضا اقل. والمزيد من التقييم لمعامل حساسية البلورة يمكن أن يؤدي إلى أن عامل المادة سوف يكون محدد للمنتج المصمم لها. هذا سوف يكون مهم بشكل خاص خلال مراحل التصميم لليزرات جديدة أو لتحسين المونتاجات الحالية من الليزرات. هذا العامل يمكن أيضا أن يستخدم لتحديد أفضل طاقة ضخ، وكذلك معرفة أفضل نقطة للبؤرة، ومن الممكن أن يتم تحسين خصائص الضخ لليزر لضمان الحصول على أفضل شعاع في تجويف الليزر وبهذا نحصل على أقصى طاقة.

11. التجربة العملية لتحديد معاملات البلورة

تم إدخال كل بلورة إلى داخل الليزر ذو التجويف الأحادي واختبارها تبعا للطريقة الموضحة في الوحدة العاشرة من هذه الأطروحة. المعلومات التي تم الحصول عليها بالمحاولات العملية استخدمت لاحقا في حساب البعد البؤري لكل بلورة و معاملات حساسيتها. رغم ذلك مناهج تحليل مختلفة قد لزمتم للوصول إلى نتائج معبرة. النتائج التي تم الحصول عليها موضحة في الجزء 11.1 إلى الجزء 11.3.

11.1 حساب البعد البؤري

حساب البعد البؤري للبلورة هو متطلب ضروري لتحديد معامل حساسية البلورة. ولقد استخدمت طرق مختلفة لحساب البعد البؤري. الطريقة الأصلية المقترحة موضحة في الجزء 11.1.1 بينما يوجد في الجزء 11.1.2 نسخة معدلة أكثر تعقيدا.



1.1.11 الحل للبعد البؤري باستخدام معاملات g

لقد تم تحديد المتغير المركب للشعاع باستخدام أنصاف أقطار عرض الشعاع المقاسة عند مستوى قياسات البؤرة. بإتباع الطريقة الموضحة في الجزء 7 عند قياس انتشار القيمة q خلال النظام البصري. و تم تحديد المتغير المركب للشعاع عند المرآة التي يخرج منها الليزر AR ومنه تم تحديد قيم أنصاف أقطار الشعاع.

وتم حساب متغير المذبذب باستخدام المعادلة 13. بعد تحديد متغير المذبذب كدالة في الطاقة الداخلة، وتم حساب البعد البؤري باستخدام المعادلة 56.

1.1.1.11 مناقشة

بإتباع طرق الحساب التي أشير إليها في الجزء 11.1.1، وجد أن الطريقة المستخدمة كانت غير مقبولة لمتطلبات هذه الأطروحة. والمعادلة التي استخدمت لتحديد قيمة المتغير g تفترض أن العدسات المركزة تقع في منتصف المذبذب وإنها تبقى ثابتة خلال مدي طاقة الليزر. ورغم ذلك في حالة ليزر الـ Nd:YAG فان العدسات تحكم بمعامل التركيز الحراري والذي يعتمد على طاقة ضخ الليزر. ان حسابات قيمة معامل g أعطت إما قيم مركبة أو قيم لا تتفق مع مواصفات الثبات كما يحتاجها المذبذب. بالرجوع إلى الشكل 5.4 فان النتائج التي تم التوصل إليها تقع في منطقة عدم الاستقرار في الرسم البياني للعلاقة بين g_1g_2 . وقد أجريت محاولة لاستخدام المركبة الحقيقية لمعامل المذبذب في حسابات لاحقة لتحديد البعد البؤري. رغم ذلك القيم التي تم التوصل إليها لم تتفق بشكل جيد مع القيم المنشورة سابقا في المراجع. نتيجة لهذه الحسابات فان طريقة أخرى يجب أن تستخدم لبرمجة سلوك العدسات الحرارية.

2.1.11 الحل للبعد البؤري التكرار الذاتي للمعامل q

نتيجة لعدم كفاية الطريقة المذكورة في الجزء 11.1.1 فقد تم تطوير طريقة جديدة لبرمجة التأثير الحراري للعدسات وسلوك شعاع الليزر أثناء انتشاره في المذبذب بفعالية أكبر. ونفس الطريقة كما في الجزء 11.1.1 اتبعت لتحديد قيمة المعامل q عند المرآة التي يخرج منها الليزر AR، النقطة التي يتم عندها أيضا تحديد حجم الشعاع. رغم ذلك عند هذه النقطة استخدم مفهوم جديد لبرمجة



المذبذب. باستخدام نموذج القناة المستقرة التربيعية لبلورة YAG تم الحصول على مصفوفة مكافئة ABCD للمذبذب. وتعريف القناة التربيعية المستقرة مبني على المتغير n_2 الذي نوقش في الجزء 6.2. ورغم ذلك يصعب استخدام أو تفسير هذا المتغير. لذا وبعد المزيد من الاطلاع على المنشورات تم اختيار متغير آخر لتعريف هذه القناة. هذا المتغير يسمى البعد البؤري المميز للبلورة، β ، ويعرف تبعاً لـ (Schlueter and Markille, 2002) كما يلي

$$\beta = \sqrt{\frac{4n_0}{n_2}}$$

حيث n_0 هو معامل الانكسار و n_2 هو الانحناء لأسفل.

المصفوفة التي تحدد القناة التربيعية هي (Ifflaender, 2001)

$$YAG(b) = \begin{bmatrix} \cos(bz) & (bn_0)^{-1} \sin(bz) \\ -n_0 b \sin(bz) & \cos(bz) \end{bmatrix}$$

حيث b معرفة كما في المعادلة 23. في هذه الأطروحة استبدلت المشتقة العرضية بالبعد البؤري المميز باستخدام العلاقة

$$b = \frac{2}{\beta}$$

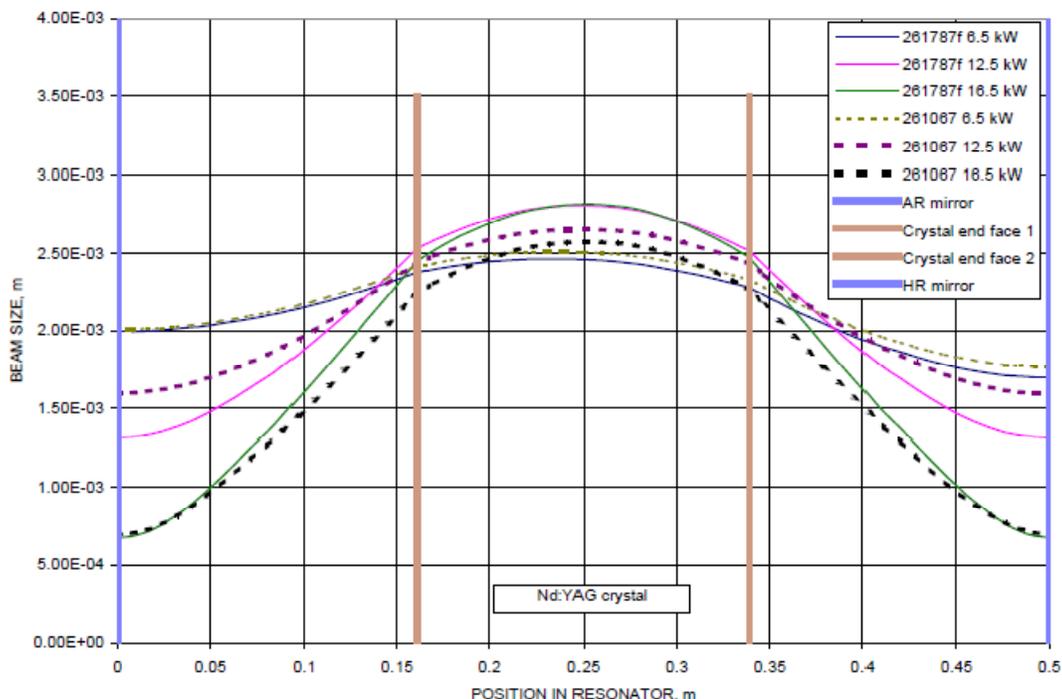
وبالتالي فان المصفوفة التي عرفت في المعادلة 61 قد أعيد كتابتها لتكتب بدلالة المتغير β . المصفوفة الناتجة للقناة التربيعية هي

$$YAG(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2}{\beta}z\right) & \left(\frac{2}{\beta}n_0\right)^{-1} \sin\left(\frac{2}{\beta}z\right) \\ -n_0 \frac{2}{\beta} \sin\left(\frac{2}{\beta}z\right) & \cos\left(\frac{2}{\beta}z\right) \end{bmatrix}$$



باستخدام مواصفات المذبذب المستقر وقيم q المكررة ذاتيا كما وردت في الجزء 5.1 فإنه من المعروف أن قيم q عند المرآة التي يخرج منها شعاع الليزر AR يجب أن تكرر نفسها بعد مرورها رحلة كاملة في المذبذب. هذا المتطلب لا بد من تحقيقه للحصول على مذبذب فعال ومستقر. بمعرفة قيم المتغيرات المركبة للشعاع عند المرآة AR يمكن حل المصفوفة المكافئة لإيجاد المتغير β والذي سيسمح بالتكرار الذاتي لقيم q . الحسابات الضرورية لإحدى البلورات كعينة موضحة في الملحق D.

بعد تحديد القيم المركبة لمتغيرات الشعاع المقابلة لكل قيمة لطاقة الضخ وإيجاد قيم β المقابلة فإن القيم الناتجة للبعد البؤري المميز استخدمت لبرمجة التأثير الحراري التجميحي في البلورة. بالتعويض عن قيم β المحسوبة في مصفوفة القناة التربيعية المستقرة أعطي مصفوفات مختلفة لهذه القناة مقابلة لكل قيمة من قيم طاقة الضخ. قيمة q عند المرآة البعيدة تنتشر خلال النظام وصولاً للمرآة ذات الانعكاس العالي HR. باستخدام قيم q المنتشرة خلال المذبذب يمكن حساب قيمة نصف قطر الشعاع بدلالة موقعه داخل المذبذب. نتائج الحسابات التي أجريت على عينيتين من البلورات موضحة في الشكل 11.11. البلورة رقم 261067 تخطت جميع قياسات الجودة بنجاح بينما البلورة رقم 261787f أنتجت شعاع غير منتظم الشكل عند استخدامها في جهاز ليزر قوته 4 كيلوات..



الشكل 1.11 حجم الشعاع في المذبذب كدالة في الطاقة الداخلة

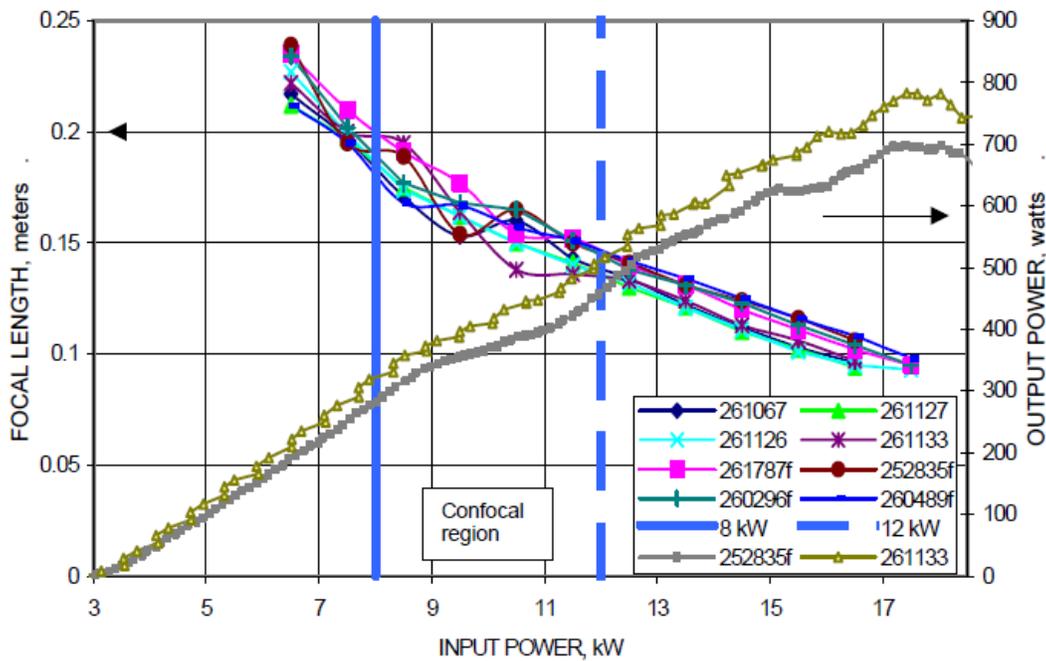
3.1.11 تحليل ومناقشة النتائج

عند إجراء الحسابات اللازمة لتحديد قيمة حجم الشعاع داخل المذبذب كان لا بد من مناقشة العديد من النقاط المتعلقة بالأخطاء المصاحبة للحسابات. المصدر الأكبر للخطأ ينتج من تحديد قيمة مسافة الانتشار بين العناصر الضوئية. فلقد لوحظ خلال حساب قيمة q عند المرآة البعيدة وجود مركبة حقيقية في قيمة q . هذا موضح في الملحق D . هذا يشير إلى أن الشعاع له انحناء محدود عند المرآة البعيدة. تحديداً، عرض الشعاع يتكون عندما يكون للشعاع سطح موجة مستوي وبالتالي يكون انحناء الشعاع لانهائي. هذا يستوجب أن تنعدم المركبة الحقيقية في متغير الشعاع المركب. تعريف المذبذب المستقر ذو المرآة المستوية ينص على أن عرض الشعاع يجب أن يتكون دائماً عند المرايا. وبالتالي فإن المتغير المركب للشعاع يجب أن يحتوي فقط على قيمة تخيلية عند المرايا. بعد إجراء بعض التحليل للنتائج وجد أن المسافة بين العناصر الضوئية لها التأثير الأكبر على هذا السلوك. نتيجة لهذا التأثير، المصفوفات التي تمثل المسافات المتغيرة المتكونة بين البؤرة والعدسة # 2 ضبطت لتقلل قيمة المركبة الحقيقية في المتغير المركب للشعاع، الشكل 10.1. مسافة الضبط



كانت تقريبا 10 مم . وجود انحناء لسطح الموجة عند المرآة البعيدة يؤثر أيضا على حجم الشعاع داخل المذبذب. وزيادة قيم انحناء الشعاع تعمل على تصغير حجم الشعاع عند المرآة عالية الانعكاس وينتج حجم شعاع غير متماثل التوزيع.

بالفحص الدقيق للشكل 11.1 عند مستوى طاقة متوسطه (12.5 كيلوات) كلا من البلورات المقبولة والمرفوضة يكون لها أنصاف أقطار مختلفة عند المرآة البعيدة. هذا الفرق يلاحظ أيضا عند المرآة القريبة ذات الانعكاس العالي ويكون أكثر وضوحا منه عند القيم المنخفضة والعالية للطاقة. هذه القيمة للطاقة تقع في منطقة التشغيل المتقطع للمذبذب. في مدى طاقة بين 8 إلى 12 كيلوات يمر المذبذب خلال البؤرة في منحنى العلاقة g_1g_2 الموضح في الشكل 5.4 (Kumkar, 2002). عدم الاستقرار هذا وضح لاحقا في الشكل 11.2 حيث وجد أن البعد البؤري لكل البلورات يتغير بطريقة لا يمكن التنبؤ بها.



الشكل 2.11 البعد البؤري كدالة في الطاقة الداخلة

أظهرت البلورة رقم 261787f أيضا أحجام أكبر للشعاع عند قيمة طاقة مساوية لـ 5.6 كيلوات و12.5 كيلوات بالمقارنة مع البلورة رقم 261067. اتساع عرض الشعاع للبلورات الرديئة قد يؤثر سلبا على أدائها عندما تدخل في الليزر ذو التجاويف المتعددة. رغم ذلك، تبقى نماذج المذبذب



والبلورة مجردة تقريبا للتصرف الحقيقي لكل مركبة. وهذه النماذج لا تأخذ بعين الاعتبار عدم الضخ للطرف البعيد للبلورة ولا أي من تشوهات الأوجه الطرفية. أيضا لا تتضمن أي تأثيرات لـ birefringence البلورة. إدخال هذه العوامل لاحقا في النموذج المعروض كجزء من هذه الرسالة ربما يعطي تمثيل أكثر واقعية للمذبذب. رغم ذلك تعقيدات تحديد آثار كل من هذه العوامل على منهج النمذجة يمكن أن يطغى على جدواه.

2.11 الحل لمعامل حساسية البلورة

باستخدام قيم β التي تم الحصول عليها لبرمجة التأثير الحراري للعدسات تم حساب البعد البؤري للبلورات. بتطبيق التقريب إن البعد البؤري للبلورة أطول من طول البلورة وأن البلورة تظهر سلوك مماثل لعدسة سميكة، فان البعد البؤري يمكن وصفه بالمعادلة (Koechner, 1999)

$$f = \frac{\beta^2}{4n_o L}$$

باستخدام المعادلة 64 يمكن أن يمثل البعد البؤري للبلورات كدالة في الطاقة الداخلة. هذا موضح بيانيا في الشكل 11.2. بعد إجراء بعض التقريبات على الشكل، وجد انه لا يمكن وضع أي مواصفات متقنة تساعد في الحكم على البلورات الجيدة أو الرديئة. أظهرت ستة بلورات من بين الثمانية التي تم اختبارها سلوك في مدى الطاقة من 8 إلى 12 كيلووات لا يتبع الشكل العام السائد عند قيم الطاقة الأعلى من 12 كيلووات. رغم ذلك، لان المذبذب يمر خلال البؤرة في هذه المدى لا يمكن استخدام السلوك الملاحظ كمقياس للحكم على الجودة. في جميع الأشكال لوحظ تميز قيم الطاقة 13.2 كيلووات حيث تمثل هذه القيمة منطقة التشغيل الفعلية لليزر.

المعلومات التي أوردها (Koechner 1999) تنص على أن قدرة التبئير تقريبا تتناسب طرديا مع الطاقة المدخلة بمعنى

$$f \propto P_m^{-1.5}$$

رغم ذلك، في حالة البلورات المختبرة كجزء من هذه الدراسة فان العلاقة بين البعد البؤري وطاقة الضخ وجدت متغيرة قليلا عما هي عليه في المعادلة 65 وتم إدراجها في الجدول 11.1 حيث R_2



هو معامل الارتباط. هذا الفرق يمكن إرجاعه إلى الاختلاف في خواص البلورات التي اختبرت في هذه الدراسة عن تلك التي نشرت عنها المعلومات. حيث كانت المعلومات المنشورة لبلورات أقصر ولم يتم إعطاء أي معلومات عن نسبة تطعيمها بعناصر أخرى أو نوع التجويف المستخدم. هذه العوامل قد يكون لها دورا مهما في قيمة قوة تبئير البلورة.

الجدول 1.11 البعد البؤري كدالة في طاقة الضخ

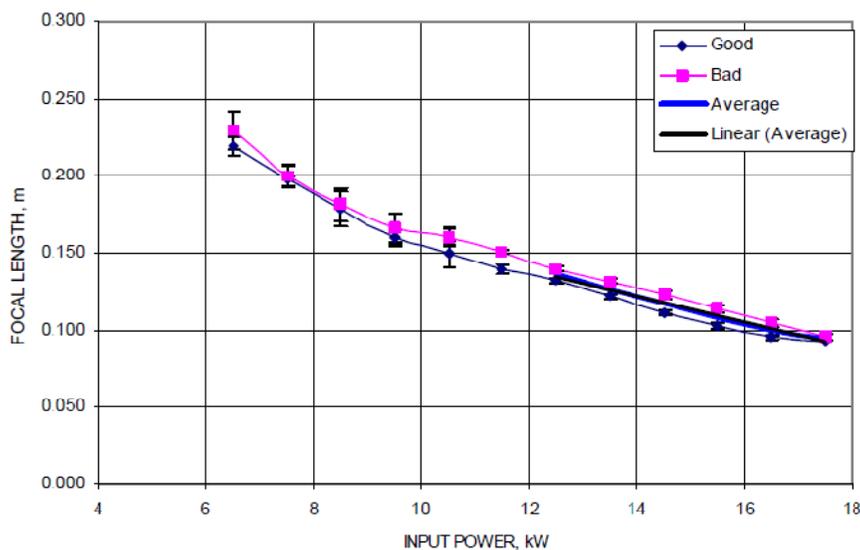
Crystal #	Power fit curve (Ax^b)	A	b	R ²
261787f	$1.2942x^{-0.8948}$	1.2942	-0.8948	0.988
252835f	$0.9945x^{-0.7842}$	0.9945	-0.7842	0.9661
260489f	$0.8305x^{-0.7178}$	0.8305	-0.7178	0.9672
260296f	$1.1247x^{-0.8393}$	1.1247	-0.8393	0.9796
<i>Average</i>		<i>1.061</i>	<i>-0.809</i>	<i>0.975</i>
<i>STDDEV</i>		<i>0.1966</i>	<i>0.0758</i>	<i>0.011</i>
261067	$1.0725x^{-0.8427}$	1.0725	-0.8427	0.9727
261126	$1.2392x^{-0.9037}$	1.2392	-0.9037	0.993
261127	$1.123x^{-0.866}$	1.123	-0.866	0.9864
261133	$1.1954x^{-0.8842}$	1.1954	-0.8842	0.9766
<i>Average</i>		<i>1.158</i>	<i>-0.874</i>	<i>0.982</i>
<i>STDDEV</i>		<i>0.0742</i>	<i>0.026</i>	<i>0.009</i>

نستطيع من خلال الشكل 11.2 ملاحظة أن البعد البؤري للبلورة يحافظ على الشكل العام المنحني الخطي، حتى بعد زيادة قيمة الطاقة المدخلة عن 12 كيلووات وخروج المذبذب من منطقة التبئير. نلاحظ تكون مجموعتين تميز البلورات الجيدة عن البلورات الرديئة. لمزيد من التحقق من جودة البلورات حسبت القيمة المتوسطة للبعد البؤري للبلورات وقورنت انظر الشكل 11.3. الجدول 11.3 يعرض قيم البعد البؤري للبلورات الجيدة والرديئة بينما قيم الانحراف المعياري تعرض في الجدول 11.4. وبالمزيد من التحقق من المعلومات في الشكل 11.3 لم يلحظ أن البلورات الجيدة تشغل مناطق مستقلة عن تلك التي تشغلها البلورات الرديئة. عندما تأخذ قيم الانحراف المعياري لحساب فترة الأمان الـ 68% والتي عينت باستخدام قيم الانحراف المعياري عند كل قيمة للطاقة المدخلة نجد أن كلا من البلورات الجيدة والبلورات الرديئة تشغل مناطق مختلفة على الرسم داخل حدود منطقة الأمان. قيم الحيود عن القيمة المثالية كانت $m = 0.004$ للبلورات الجيدة و $m = 0.005$ للبلورات الرديئة.



بملاحظة أن الشكل العام للمنحنى يبقى تقريبا خطي حتى بعد زيادة قيم طاقة الدخل عن 12 كيلوات لذا فقد تم اختبار منطقة تقاطع القيمة المتوسطة للبعد البؤري مع الطاقة المدخلة عند القيمة 12 كيلوات. لقد تم هذا من خلال عمل امتداد خطي للقيم المتوسطة للبعد البؤري عندما تزيد قيمة الطاقة المدخلة عن 12 كيلوات، كما في الشكل 11.3. تقاطعت منحنيات مجموعة البلورات الجيدة مع الطاقة المدخلة (12 كيلوات) عند القيمة $m = 0.1342$ بينما كانت القيمة للبلورات الرديئة مساوية لـ $m = 0.1446$.

الفرق في القيم التي يحدث عندها التقاطع وانفصال البلورات الجيدة عن الرديئة في نطاق الأمان يوحي بإمكانية استخدام البعد البؤري للبلورات للتمييز بين البلورات. للفصل بين المنطقتين تم تعيين القيم المتوسطة عند قيم طاقة أكبر من 12 كيلوات لكل من البلورات الجيدة والرديئة. بإتباع ذلك، قد رسم خط مستقيم مبني على القيمة المتوسطة لجميع البلورات والتي تم قياسها باستخدام المعادلة $y = -0.0085x + 0.2414$ والذي ينطبق على القيم المتوسطة حيث كانت R_2 مساوية لـ 0.994. انظر الشكل 11.3. القيم المتوسطة للبعد البؤري لجميع البلورات مدرج في الجدول 11.2. بالرغم من أنه لا يمكن التوصل إلى استنتاجات واضحة للتمييز بين البلورات الجيدة والرديئة باستخدام البعد البؤري للبلورة وحده يبقى من الممكن استخدامه إلى جانب متغيرات أخرى للتمييز بين البلورات.



الشكل 3.11 متوسط البعد البؤري



الجدول 2.11 متوسط البعد البؤري لكل البلورات

Input power (kW)	Average values good (m)	Average values bad (m)	Midpoint average (m)
12.5	0.132	0.140	0.136
13.5	0.122	0.132	0.127
14.5	0.112	0.123	0.117
15.5	0.103	0.114	0.109
16.5	0.096	0.105	0.100
17.5	0.093	0.096	0.095

الجدول 3.11 البعد البؤري لقيم كل البلورات الجيدة

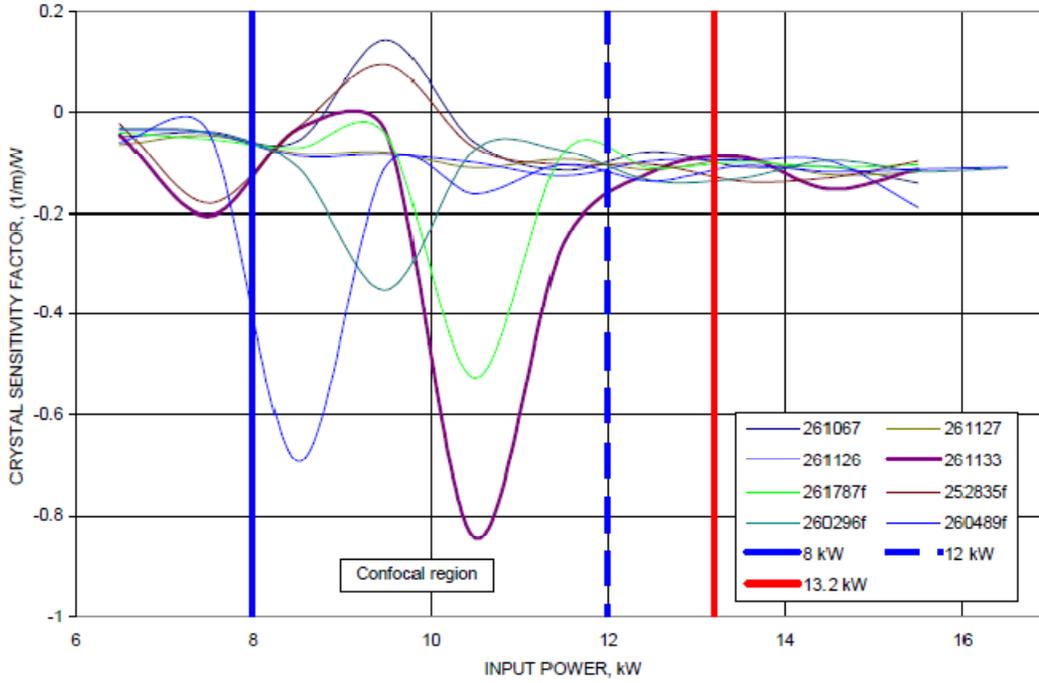
Input power (kW)	Crystal number				Average (m)	Std dev (m)
	261067 (m)	261127 (m)	261126 (m)	261133 (m)		
6.5	0.217	0.212	0.227	0.222	0.219	0.006
7.5	0.197	0.197	0.199	0.2	0.198	0.002
8.5	0.171	0.175	0.174	0.195	0.179	0.011
9.5	0.153	0.162	0.162	0.164	0.160	0.005
10.5	0.16	0.15	0.15	0.138	0.149	0.009
11.5	0.143	0.141	0.14	0.136	0.14	0.003
12.5	0.134	0.13	0.132	0.133	0.132	0.002
13.5	0.122	0.121	0.121	0.124	0.122	0.001
14.5	0.112	0.11	0.111	0.113	0.112	0.001
15.5	0.103	0.102	0.101	0.106	0.103	0.002
16.5	0.096	0.094	0.095	0.097	0.096	0.001
17.5			0.093		0.093	
Average					0.042	0.004



الجدول 4.11 البعد البؤري لكل البلورات الرديئة

Input power (kW)	Crystal number				Average (m)	Std dev (m)
	252835f (m)	261787f (m)	260296f (m)	260489f (m)		
6.5	0.239	0.235	0.234	0.212	0.23	0.012
7.5	0.195	0.21	0.202	0.195	0.201	0.007
8.5	0.189	0.191	0.177	0.168	0.181	0.011
9.5	0.154	0.177	0.168	0.167	0.167	0.009
10.5	0.165	0.154	0.165	0.157	0.160	0.005
11.5	0.15	0.152	0.151	0.151	0.151	0.001
12.5	0.141	0.14	0.138	0.142	0.140	0.002
13.5	0.131	0.131	0.131	0.134	0.132	0.002
14.5	0.124	0.12	0.123	0.125	0.123	0.002
15.5	0.116	0.111	0.113	0.116	0.114	0.002
16.5	0.106	0.102	0.104	0.108	0.105	0.006
17.5		0.095	0.095	0.098	0.096	0.002
Average					0.040	0.005

باستخدام المعلومات التي تم الحصول عليها عن قيم البعد البؤري لكل بلورة، قد تم تحديد معامل حساسية البلورة باستخدام المعادلة 32. تفاصيل الحسابات التي أجريت لتحديد قيم معامل الحساسية توجد في الملحق E. شكل 11.4 يوضح التمثيل البياني لمعامل حساسية البلورة. بالنظر إلى الشكل نجد أن معامل حساسية البلورة لا يمكن التنبؤ به في نطاق منطقة تبئير المذبذب تماما كغيره من المتغيرات. رغم ذلك بعد تجاوز القيمة 12 كيلووات للطاقة المدخلة وصولا إلى مناطق التشغيل الفعلية لليزر، تتميز قيم معاملات الحساسية للبلورات الجيدة عن الرديئة. لأن معامل حساسية البلورة لا يظهر أي مناطق اختلاف بين البلورات الجيدة والرديئة فإنه لا يمكن استخدامه كمتغير للتمييز بين البلورات.



الشكل 4.11 متغير حساسية البلورة

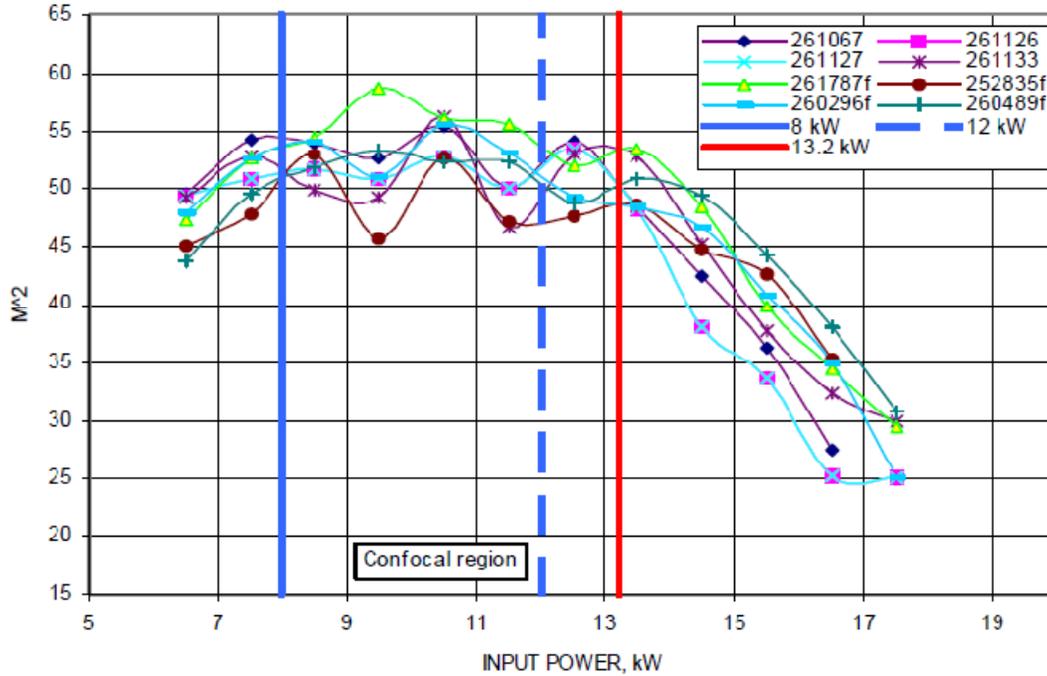
3.11 قياس معامل M^2

قياس معامل التركيز للشعاع كدالة في الطاقة المدخلة تم في نفس اللحظة مع قياسات أخرى نتيجة لطريقة عمل FocusMonitor. قيم M^2 حسب بناء على مقاييس ISO المعتمدة باستخدام عزم طاقة من الدرجة الثانية. تم تحديد قيم M^2 عند كل مستوى طاقة.

النتائج لجميع البلورات المقاسة معروضة في الشكل 11.5. من الشكل نلاحظ أن البلورات تظهر سلوك لا يمكن التنبؤ به في مدي التكبير في المذبذب. لا يمكن التوصل لأي استنتاجات بالاعتماد على هذا المدى وحده لأنه مدى تشغيل غير عادي لجهاز الليزر الذي سيتم إدخال البلورات به. القيمة الفعلية للطاقة المطبقة على البلورة عند استخدامها في جهاز ليزر قدرته 4 كيلوات وجدت تقريبا 13.2 كيلوات. بالعودة إلى شكل 11.5 مرة أخرى، يمكن ملاحظة أن جميع قيم M^2 تبدأ بالتناقص عند هذه النقطة.



قيم M^2 الموضحة في الشكل 11.5 تبدو وكأنها تتبع شكل منحنى تربيعي. وبالتالي تم تحديد خطوط اتجاه لكل منحنى ل M^2 ليساعد في محاولة الفصل بين البلورات الجيدة والرديئة . المعادلة التربيعية التي تم الحصول عليها إلى جانب معاملات الارتباط مدرجة في الجدول 11.5.



الشكل 5.11 معامل قابلية تنبير الشعاع

الجدول 5.11 التمثيل التربيعي لبيانات M^2

Crystal #	Quadratic fit equation (Ax^2+Bx+C)	A	B	C	R^2
261787f	$-0.5686x^2 + 11.814x - 4.5817$	-0.5686	11.814	-4.5817	0.9719
252835f	$-0.3383x^2 + 6.9319x + 14.785$	-0.3383	6.9319	14.785	0.7563
260489f	$-0.4729x^2 + 10.197x - 1.5206$	-0.4729	10.197	-1.5206	0.9468
260296f	$-0.4893x^2 + 9.8178x + 5.1205$	-0.4893	9.8178	5.1205	0.9659
Average		-0.4673	9.6901	3.4508	0.9102
STDEV		0.0956	2.0324	8.573	0.1032
261067	$-0.5724x^2 + 11.102x + 1.4391$	-0.5724	11.102	1.4391	0.9530
261126	$-0.4935x^2 + 9.4024x + 8.2454$	-0.4935	9.4024	8.2454	0.9397
261127	$-0.6x^2 + 11.649x - 1.8327$	-0.6	11.649	-1.8327	0.9633
261133	$-0.422x^2 + 8.3545x + 11.794$	-0.422	8.3545	11.794	0.8564
Average		-0.5	10.127	4.9116	0.9281
STDEV		0.08	1.5203	6.219	0.049



رغم ذلك، لم يمكن التوصل إلى أي استنتاجات من خلال المعلومات المعروضة في الجدول 11.5 باستخدام نماذج التماثل الرياضية. يختلف معامل الارتباط بين البلورات الجيدة والرديئة ما بين $(0.9281-0.9102 = 0.0179)$ ، وهذا وحده غير كافي لدعم أي استنتاجات. تبعا لهذا، وباستخدام المعلومات التي حصل عليها لكل بلورة والموجودة في الملحق F تم حساب القيم المتوسطة ل M^2 للبلورات الجيدة والرديئة. هذه القيم مثلت في الشكل 11.6 للمساعدة في ملاحظة أي انتظام في شكل تغير معامل تكبير الشعاع. الجدول 11.6 يعرض أيضا قيم الانحراف المعياري المقابلة والتي استخدمت في تحديد فترة ثقة الـ 68%. يمكن ملاحظة وجود منطقتين سائدتين تشغلها البلورات الجيدة والرديئة تظهر عند قيم للطاقة أعلى من 13.2 كيلووات. في المتوسط وجد أن قيم معامل تركيز الشعاع للبلورات الجيدة أصغر منه للبلورات الرديئة. مع الأخذ بعين الاعتبار قيم الحبيد لقياسية ومنطقة الثقة كما هي موضحة في شكل 11.6 فان عامل تكبير الشعاع يبدو واعد لاستخدامه كقيمة مميزة للبلورات. بناء على قيمة M^2 لجميع البلورات المقاسة تم الحصول على خط مستقيم يحقق المعادلة $y = -5.5925x + 125.19$. حيث قيمة $R_2 = 0.9953$ تظهر في شكل 11.6 خطية.

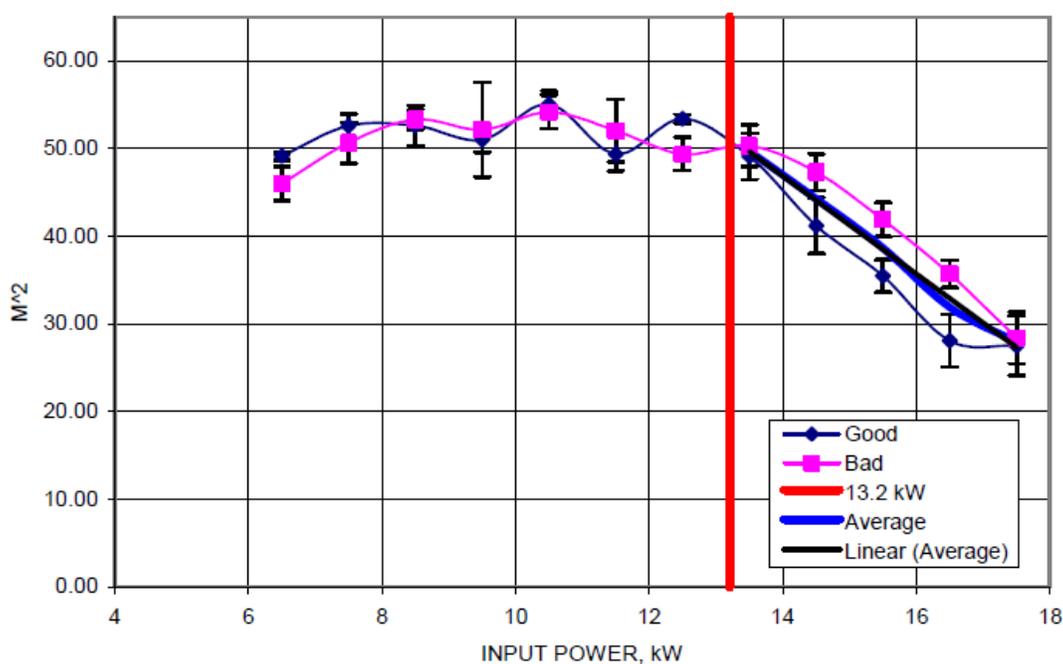
الجدول 6.11 متوسط القيم الخاصة بمعامل إمكانية تبشير الشعاع

Input power (kW)	Good crystals		Bad crystals	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
6.5	49.15	0.4509	46.03	1.96
7.5	52.6	1.41	50.65	2.368
8.5	52.65	2.296	53.35	1.139
9.5	51.03	1.441	52.18	5.389
10.5	55.05	1.546	54.2	1.92
11.5	49.4	1.93	52.08	3.58
12.5	53.4	0.496	49.4	1.87
13.5	49.13	2.629	50.33	2.379
14.5	41.23	3.217	47.33	2.079
15.5	35.48	1.839	41.9	1.954
16.5	28.1	2.971	35.7	1.568
17.5	27.5	3.39	28.4	2.93
Average		1.96		2.43



الجدول 7.11 متوسط إمكانية تبنير الشعاع لكل البلورات

Input power (kW)	Average values good	Average values bad	Midpoint average
12.5	53.40	49.40	51.40
13.5	49.13	50.33	49.73
14.5	41.23	47.33	44.28
15.5	35.48	41.90	38.69
16.5	28.10	35.70	31.90
17.5	27.50	28.40	27.95



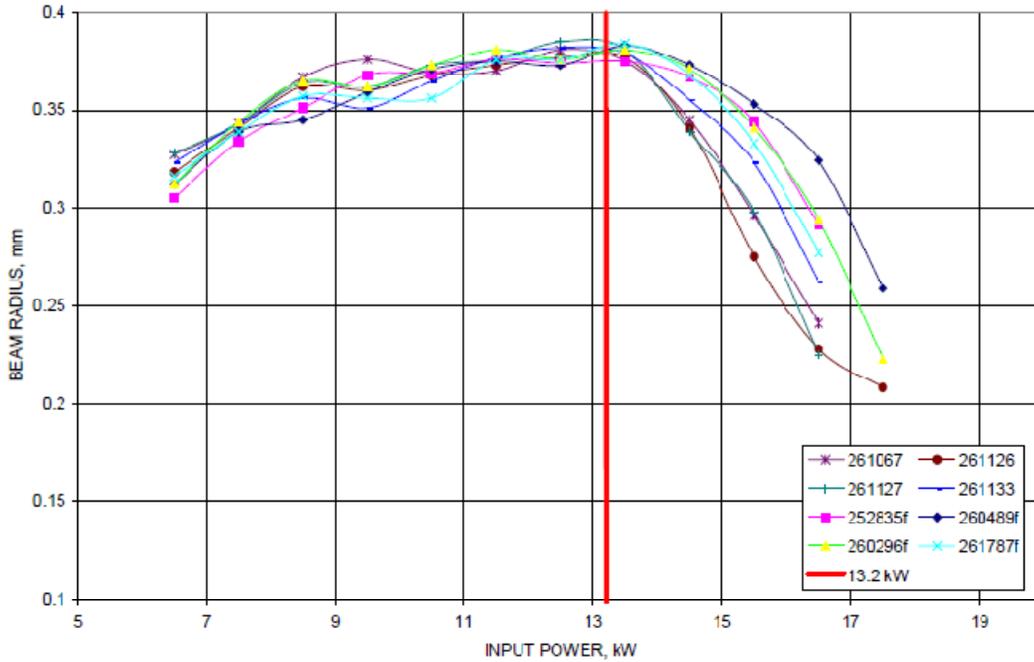
الشكل 6.11 متوسط معامل تبنير الشعاع

1.3.11 قياس حجم الشعاع

بمراقبة سلوك معامل تجميع الشعاع لفصله إلى منطقتين في نطاق تشغيل الليزر، افترض أن أحجام الشعاع يجب أن تسلك نفس السلوك. أحجام الشعاع الموضحة في الشكل 11.7 تعطي انطباع مبدئي بإمكانية فصل مناطق تخض البلورات الجيدة و أخرى للبلورات الرديئة.



النهج المتبع لتحديد القيم المتوسطة لكل من البلورات الجيدة والسيئة هو نفسه الذي اتبع في تعيين جميع القيم السابقة. باستخدام المعلومات التي تم الحصول عليها لجميع البلورات والمدرجة في الملحق F، تم تعيين فترة ثقة الـ 68% ثم مثلت بيانيا في الشكل 11.8 جنب إلى جنب مع القيم المتوسطة لكل من البلورات الجيدة والسيئة



الشكل 7.11 نصف قطر خصر الشعاع

ملخص لمتوسط القيم مدرج في الجدول 11.8، تحديد فترة الأمان اعتمد قيمة على الحيود عن القيم المتوسطة عند كل مستوى طاقة. القيمة المتوسطة للحيود عن القيمة القياسية كان mm 0.0071 للبلورات الجيدة و mm 0.0072 للبلورات الرديئة. من الواضح أن سلوك حجم الشعاع يماثل سلوك معامل تجميع الشعاع. بالمثل، يوجد فروق محددة بين البلورات الجيدة والرديئة. بالإضافة إلى ذلك، درجة الانفصال بين المنطقتين تسمح لمنطقة أمان 68% أن تضم المنطقتين في مساحات محددة فقط معظمها يقع في منطقة التبئير. هذا المنحنى يبدو أكثر تحديدا من جميع المتغيرات السابقة. من أجل تحديد نقطة الفصل بين المنطقتين تم تحديد القيمة المتوسطة لجميع البلورات المستخدمة. ملخص لجميع القيم مدرج في الجدول 11.8 ومثلت في صورة منحنى خطي في



الشكل 11.8. من خلال هذه المعلومات رسم خط مستقيم يحقق المعادلة
 $y = -0.0394x + 0.9209$, حيث قيمة معامل الارتباط R_2 كانت 0.982.

الجدول 8.11 متوسط قيم نصف قطر الشعاع

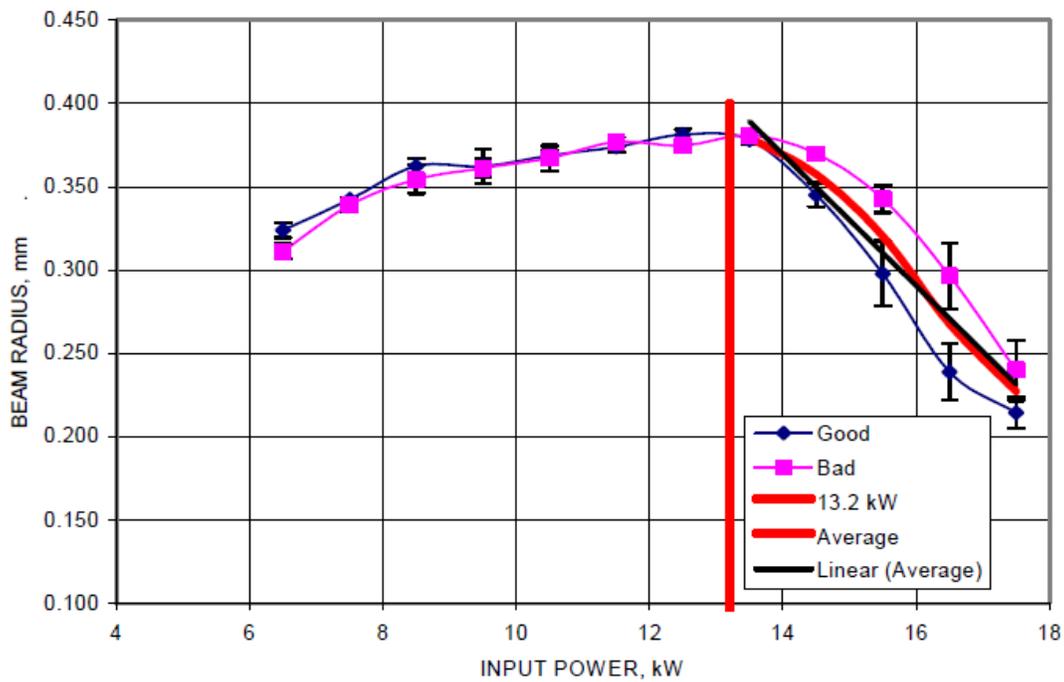
Input power (kW)	Good crystals		Bad crystals	
	Average (mm)	Std dev (mm)	Average (mm)	Std dev (mm)
6.5	0.324	0.0045	0.311	0.0045
7.5	0.343	0.001	0.339	0.0041
8.5	0.362	0.0046	0.355	0.0085
9.5	0.362	0.01	0.361	0.0051
10.5	0.369	0.0033	0.368	0.0077
11.5	0.374	0.0032	0.377	0.0027
12.5	0.381	0.0033	0.375	0.0015
13.5	0.378	0.0026	0.381	0.0040
14.5	0.345	0.0071	0.369	0.0028
15.5	0.298	0.0196	0.343	0.0083
16.5	0.239	0.0168	0.297	0.0197
17.5	0.215	0.0092	0.24	0.0180
Average		0.0071		0.0072

الجدول 9.11 متوسط نصف قطر الشعاع لكل البلورات المقاسة

Input power (kw)	Average Values Good	Average Values Bad	Midpoint avg
12.5	0.381	0.375	0.378
13.5	0.378	0.381	0.379
14.5	0.345	0.370	0.357
15.5	0.298	0.343	0.320
16.5	0.239	0.297	0.268
17.5	0.215	0.240	0.227



نفس المنهج الإحصائي الذي استخدم لبرمجة معامل تجميع الشعاع استخدم هنا مرة أخرى لبرمجة سلوك عرض الشعاع. استخدم منحنى تربيعي من الدرجة الثانية وأدرجت النتائج في الجدول 11.10 حيث R_2 هو معامل الارتباط . بالتحليل الإحصائي وجد أن القيمة المتوسطة لمعامل الارتباط للبلورات الجيدة والسينة تختلف فقط ب $(0.919-0.991 = 0.038)$. هذا الفرق ليس كافيا للتوصل إلى أي استنتاج رياضي قوي ليدعم استخدام هذا المعامل كمقياس لتميز جودة البلورات.



الشكل 8.11 متوسط حجم الشعاع



الجدول 10.11 المعادلات التربيعية التي تلائم لحجم الشعاع

Crystal #	Quadratic fit equation (Ax^2+Bx+C)	A	B	C	R^2
261787f	$-0.003x^2 + 0.0683x - 0.0081$	-0.003	0.0683	-0.0081	0.8037
252835f	$-0.003x^2 + 0.0704x - 0.0261$	-0.003	0.0704	-0.0261	0.923
260489f	$-0.003x^2 + 0.0689x - 0.0191$	-0.003	0.0689	-0.0191	0.8841
260296f	$-0.0037x^2 + 0.083x - 0.0784$	-0.0037	0.083	-0.0784	0.9147
Average		-0.0035	0.073	-0.0329	0.881
STDDEV		0.0004	0.007	0.0312	0.054
261067	$-0.0039x^2 + 0.0827x - 0.0572$	-0.0039	0.0827	-0.0572	0.9209
261126	$-0.004x^2 + 0.0856x - 0.0781$	-0.004	0.0856	-0.0781	0.9402
261127	$-0.0042x^2 + 0.09x - 0.0949$	-0.0042	0.09	-0.0949	0.8939
261133	$-0.003x^2 + 0.0704x - 0.0261$	-0.003	0.0704	-0.0261	0.923
Average		-0.004	0.088	-0.0641	0.919
STDDEV		0.0005	0.008	0.0296	0.019

11.4 المناقشة

بالرجوع إلى جميع المتغيرات المحسوبة والمقاسة كجزء من هذه الأطروحة وجد أن قيمة M^2 إلى جانب حجم الشعاع تشكل الطرق الأكثر أهمية في دراسة خصائص بلورات الليزر. معامل تبئير الشعاع يسمح بإجراء قياسات كمية لسلوك البلورة متبعين المقاييس المعتمدة من قبل منظمة المقاييس العالمية. و بالتالي، فإن قيمة M^2 قد اعتمدت بالفعل كطريقة لتقييم الليزر. رغم ذلك، فإن بلورات الليزر ستحتاج إلى المزيد من الاختبارات قبل إنشاء أي قيم مرجعية لـ M^2 لهذه البلورات. قياسات العامل M^2 تعطي صورة كاملة لما يحدث داخل المذبذب لكونه عامل ملازم لمصدر الشعاع.

صنفت البلورات كبلورات سيئة عندما كان قطر شعاعها كبير ويتناقص بمعدلات أبطأ بزيادة الطاقة المدخلة. أيضا، بلورة واحدة، 261133، تشغل منطقة بين الجيدة والرديئة. هذه البلورة قد ميزت عن باقي البلورات لملاحظة أي مشاكل محتملة خلال اختبارات الطور النهائية. خلال هذه الاختبارات، الليزر المستخدم به هذه البلورة واجه بعض المشكلات أثناء ربط الشعاع مع الألياف. رغم إن هذه المشكلات حلت بدون الحاجة إلى استبدال أي من البلورات، فإن مصدر هذه المشكلات قد يرجع إلى البلورة. و بالتالي، لا يوجد في الوقت الحالي أي معلومات استنتاجية لدعم هذا الادعاء. لابد من الإشارة أيضا إلى أن الشكل المنشئ بالبعد البؤري يتطابق مع التصرف الملحوظ من عامل



التركيز للشعاع وعامل حجم الشعاع. البلورات ذات الطول الموجي الأقصر في المتوسط لها حجم شعاع أصغر و قيم أصغر ل M^2 .

هذا كله يرجع لقدرة التركيز الإضافية للبلورة . يجب عدم التوقف عن المزيد من التحقق من هذه العلاقة لاحتمالية وجود علاقة واضحة.

عوامل أخرى للاعتبار

المواصفات التي تحدد البلورة الرديئة أو الجيدة حددت بطريقة ليست شديدة التخصيص. وبالتالي انه لمن الصعب إيجاد اختبار واحد أو متغير واحد يمكن بواسطته فصل البلورات الرديئة عن خط الإنتاج. حالياً، يوجد صفتين أساسيتين لتحديد البلورة الجيدة. الأولى، البلورة يجب أن تعطي أكثر من 700 وات والثانية، شكل الشعاع يجب أن يكون دائري بدون أي تشوهات. أثناء الاختبارات الأولية، وضعت البلورة وحدها في ليزر أحادي التجويف وبالتالي فان تصرف البلورة قد يتأثر عند وضعها في ليزر متعدد التجاويف. التأثير يختلف ايضاً على حسب ما إذا كانت البلورة جزء من المذبذب وسلاسل التضخيم. أيضاً، طريقة الدعم الميكانيكي المستخدمة لتثبيت البلورة داخل التجويف لها تأثير على سلوك شعاع الليزر خلال انتشاره في التجويف.

طرق التصنيع المستخدمة لإنماء بلورة Nd:YAG تبقى مجهولة "فن معتم" وبالتالي يصعب تحديد عوامل الإنماء التي لها تأثير كبير على حساسية البلورة أو على معامل تبئير الشعاع.

12 الخلاصة والتوصيات

هذه الأطروحة قدمت كدراسة تمهيدية للطرق المناسبة لدراسة خصائص بلورات Nd:YAG. التركيز كان على تحسين عملية الاختيار للبلورات التي سيتم استخدامها في ليزر Nd:YAG. المتعدد التجاويف. مصنعي الليزر يتوقون إلى تقصير وقت الإنتاج لتصبح عملية التجميع منتجة أكثر. البلورات المستخدمة في الليزر تشغل المساحة الأكبر في المشاكل التي تواجه إنتاجه. من المحتمل أن تتمكن البلورات من المرور بنجاح خلال كل مقاييس الجودة الحالية ورغم ذلك تبقى مظهرة لبعض السلوك الغير مرغوب به عند استخدامها في أجهزة الليزر ذات التجاويف المتعددة.



هذه الدراسة أجريت لتقييم المتغيرات المختلفة المؤثرة في خصائص البلورات والتي يمكن من خلالها فصل البلورات الجيدة عن الرديئة.

ثلاث متغيرات تم اختبارها من خلال التجارب التي أجريت في هذه الدراسة لإيجاد أي منها سيكون قادر على التمييز بين البلورات الجيدة والغير ذلك. النتائج أظهرت انه لا يمكن التمييز بين بلورات Nd:YAG تماما باستخدام متغير واحد فقط. رغم ذلك، معاملي تبئير الشعاع وحجمه أظهرها سلوكا مميزا. الطرق الإحصائية أظهرت إن هذه المتغيرات تكون مميزة في مواقع متعددة. هذه الملاحظات أنشأت مناطق للبلورات الجيدة ومناطق للبلورات الرديئة ويمكن استخدامها للحكم على البلورة قبل استخدامها في جهاز الليزر. معاملي تبئير الشعاع وعرضه أظهرها أكثر السلوك تميزا حيث كان متوسط المسافة الفاصلة بين متوسط القيم لكل مستوى قدرة لكل منهما هو 3.5 و 0.025 m على الترتيب. مع أخذ الـ 68% فترة ثقة بعين الاعتبار، يمكن ملاحظة أن هذه المتغيرات تظهر أكثر التوجهات تميزا.

البعد البؤري للبلورات لم يكن قيمة ذات فائدة مباشرة مما يتفق مع النتائج العملية. تصنيف البلورات إلى جيدة وسيئة بناء على انخفاض مسافة الفصل بين المناطق، 0.008، يمكن أن يوضح الفرق في معاملي تبئير الشعاع وحجمه. نتيجة لقدرة التركيز الضعيفة للبلورات الرديئة ينتج شعاع بعرض انتشار أكبر مما يعطي قيم أكبر لـ M^2 .

بني كلا من معاملي البعد البؤري وحساسية البلورة على تقريبات مطولة لسلوك بلورة Nd:YAG. ولابد من إيجاد طرق أكثر دقة لوضع نموذج لسلوك العدسات الحرارية للبلورات ولتحديد البعد البؤري للبلورات بدقة أكبر من أجل المزيد من الاستكشاف لهذه المتغيرات. لا توجد أي معلومات منشورة حول حساسية البلورات لاستخدامها في عمل مقارنات. فقط (Koechner 1999) تحدث عن هذا المتغير في سياق الحديث عن صفات المادة. في التجارب التي أجريت كجزء من هذه الأطروحة، عامل حساسية البلورة درس كمتغير مع القدرة المعطاة. ولذا فإن قيمته التي تعطي قيم كمية لجودة بلورة الليزر تحتاج لمزيد من التقييم. النتائج الحالية تظهر فقط اختلافات كبيرة في منطقة التركيز للمذبذب في حين إن المناطق الأخرى أظهرت قيم ثابتة لحساسية البلورة.



ولذا لكي يحدد سلوك البلورة تماما لابد من تحديد تأثير كل متغير يؤثر على شعاع الليزر الناتج أثناء عملية إنماء البلورة. في حال تم ذلك، يمكن ربط المتغيرات الثلاثة والتي تم دراستها من خلال هذه الأطروحة، معامل تبئير الشعاع، عرض الشعاع، حساسية البلورة، مع كل المتغيرات.

وجد إن عاملي معامل تبئير الشعاع و متغيراته التي يمكن قياسها مباشرة باستخدام الحجم القياسي هي القياسات التي يمكن أن تستخدم في التمييز بين البلورات المقبولة وغيرها. وبالتالي فإنه تبعا لرأي الكاتب وبناء على المعلومات التي تم الحصول عليها من خلال هذه الدراسة فإن عاملي معامل تبئير الشعاع وحجمه هما القيمتين الوحيدتين اللتان يجب استخدامهما حاليا في قياس مدى جودة بلورات الليزر. و بالتالي لزيادة شرعية الطريقة التي استخدمت في هذه الأطروحة لابد من إجراء المزيد من التجارب العملية في المستقبل للتأكد النتائج التي تم التوصل إليها هنا بصورة مستقلة.



الملحق A

انتشار شعاع Nd:YAG

باستخدام نموذج العدسة الرقيقة البسيطة لساق الـ YAG والمثبت على مسافات متساوية من المرايا داخل المذبذب، سوف نحسب حجم الشعاع عند مناطق مختلفة. المعادلات التالي سوف تستخدم لحساب خصر الشعاع عند مرآة خروج الليزر بافتراض أن البعد البؤري للساق معروف. البعد البؤري للساق اخذ من البيانات المنشورة في بحث Koechner (1999). كما ان الطريقة للمتغير انتشار الشعاع المركب خلال النظام البصري موضحة بالتفصيل بواسطة Ifflaender (2001) و Siegman (1986). وعند منطقة الخروج من المذبذب فان البرنامج سوف يتبع الشعاع على محور الانتشار حتى الوصول إلى جهاز تحليل الأشعة beam analyzer.

المتغيرات المعروفة لنظام الليزر ملخصة في الجدول A.1

الجدول A.1 المتغيرات المعروفة لشعاع الليزر.

Wavelength of YAG laser beam	$\lambda_{YAG} := 1.064 \times 10^{-6}$	m
Theoretical smallest value for M^2	$M_{squared} := 4.3$	

شعاع الليزر بقيمة M^2 اكبر من 1، سوف تسلك سلوكا مشابها لشعاع الليزر بطول موجي كبير. هذا الطول الموجي يمكن أن يحدد عن طريق ضرب قيم الطول الموجي لليزر بأصغر قيمة M^2 التي تم الحصول عليها نظريا (TRUMPF, 2002).

$$\lambda := \lambda_{YAG} M_{squared}$$

الطول الموجي الناتج يكون

$$\lambda = 4.575 \times 10^{-6} \text{ m}$$

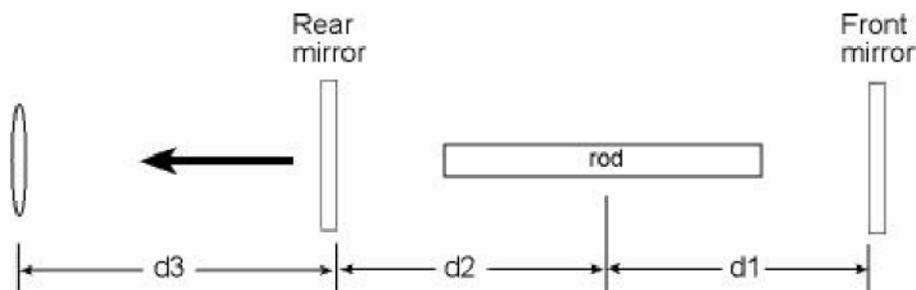
الأبعاد الفيزيائية للمذبذب معرفة في الجدول A.2. القيم حصلنا عليها بقياس إطار المذبذب وموقع المرآة العاكسة AR والمرآة ذات النفاذية HR لليزر HL506D المستخدم في التجارب.



الجدول A.2 تعريف متغيرات نظام الليزر

Distance front mirror to center of rod	$d1 := 0.240$	m
Distance from center of first rod to rear mirror	$d2 := 0.240$	m
Distance from rear mirror to beam expander	$d3 := 0.260$	m
Distance from beam expander to beam analyzer	$d4 := 0.4$	m
Focal length of rod (assumed from published values in Koechner, (1999) based on the average focal length of the two polarizations of light)	$FL := 0.30$	m
Focal length of beam collimating lens	$f := 0.260$	m

الأبعاد الملخصة في الجدول A.2 يمكن ان ترتبط مع الشكل A.1.



الشكل A.1 مسار انتشار الشعاع

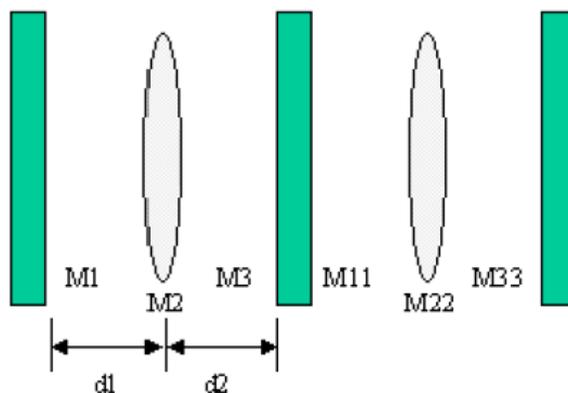
بإتباع الأسس المستخدمة لتعريف المذبذب المستقر الذي أشير إليه في المرجع Siegman (1986)، سوف نولد المصفوفة ABCD لدورة كاملة للشعاع في المذبذب. وبالعودة إلى الشكل A.2، فان هذه المصفوفات يمكن أن نكتبها على النحو التالي:

المصفوفة الناتجة عن رحلة كاملة يمكن ان تكتب على النحو



$$M1 := \begin{pmatrix} 1 & d1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M2 := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & FL \\ & 1 \end{pmatrix} \quad M3 := \begin{pmatrix} 1 & d2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M4 := \begin{pmatrix} 1 & d3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M5 := \begin{pmatrix} 1 & d4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (A.1)$$

$$M11 := M1 \quad M22 := M2 \quad M33 := M3$$



الشكل A.2 العدسة المكافئة في الشكل لدورة كاملة خلال المذبذب

المصفوفة المكافئة للدورة الكاملة خلال المذبذب ببساطة هي حاصل ضرب كل المصفوفات ABCD التي تمثل النظام (Siegman، 1986). ولهذا فان المصفوفة ABCD للرحلة الكاملة في المذبذب سوف تكون

$$RT := M33 \cdot M22 \cdot M11 \cdot M3 \cdot M2 \cdot M1 \quad (A.2)$$

وبحل المعادلة A.2 نحصل على

$$RT = \begin{pmatrix} -0.92 & 0.115 \\ -1.333 & -0.92 \end{pmatrix} \quad (A.3)$$

بعد ذلك يجب ان نقوم بالفحص لتحديد الاستقرار في المذبذب. وتعرف معايير الاستقرار على النحو التالي:



$$\left(\frac{A+B}{2}\right)^2 < 1 \quad (\text{A.4})$$

وهذه يمكن ان تقدر لنحصل على

$$\left(\frac{RT_{0,0} + RT_{1,1}}{2}\right)^2 = 0.846 \quad (\text{A.5})$$

بالاعتماد على المعادلتين A.4 و A.5 يمكننا ان نقول ان المذبذب مستقر.

القيمة q يمكن ان تحسب للتأكد انها تكرر نفسها بواسطة إجراء الحسابات التالية. التعريف الأساسي للقيمة q يكون على النحو التالي:

$$\text{InvQ1} := \left(\frac{RT_{1,1} - RT_{0,0}}{2 \cdot RT_{1,0}}\right) + \frac{i}{2 \cdot RT_{1,0}} \cdot \sqrt{4 - (RT_{0,0} + RT_{1,1})^2} \quad (\text{A.6})$$

ويمكن ان تقدر للحصول على

$$\text{InvQ1} = -0.294i \quad (\text{A.7})$$

ولكي نحصل على القيمة-q فإنه يجب اخذ معكوس المعادلة A.6.

$$Q1\text{sol} := \frac{1}{\text{InvQ1}} \quad (\text{A.8})$$

وبالتقدير العددي نحصل على

$$Q1\text{sol} = 3.402i \quad (\text{A.9})$$

وقيمة-q الثانية نحصل عليها باستخدام المعادلة التالية:

$$\text{InvQ2} := \frac{RT_{1,1} - RT_{0,0}}{2 \cdot RT_{1,0}} - \frac{i}{2 \cdot RT_{1,0}} \cdot \sqrt{4 - (RT_{0,0} + RT_{1,1})^2} \quad (\text{A.10})$$



وبأخذ المعكوس نحصل على

$$Q_{2sol} := \frac{1}{InvQ2} \quad (A.11)$$

ويتقدير النتائج في

$$Q_{2sol} = -3.402i \quad (A.12)$$

من المعادلتين A.9 و A.12 نحصل على القيمة- q ذات التكرار الذاتي. ومن تعريف المذبذب ذو السطح المتوازي يمكننا أيضا أن نعرف خصر الشعاع المتكون عند كلا المرآتين (Ifflaender، 2001).

والحل الذي حصلنا عليه في المعادلة A.12 يمكن أن يفحص باستخدام المصفوفة المكافئة ABCD التي حصلنا عليها من المعادلة A.2 وتطبيقها على القيمة- q على النحو التالي:

$$Q_{check} := \frac{(RT)_{0,0} \cdot Q_{2sol} + (RT)_{1,0}}{(RT)_{0,1} \cdot Q_{2sol} + (RT)_{1,1}} \quad (A.13)$$

وهذه يمكن أن تقدر لنحصل على

$$Q_{check} = -3.402i \quad (A.14)$$

بالمقارنة بين المعادلتين A.12 و A.14 يمكن أن نرى أن النتائج متماثلة.

باستخدام متغير الشعاع المركب q ، فإن خصر الشعاع يمكن أن يحسب على كلا المرآتين على النحو التالي:

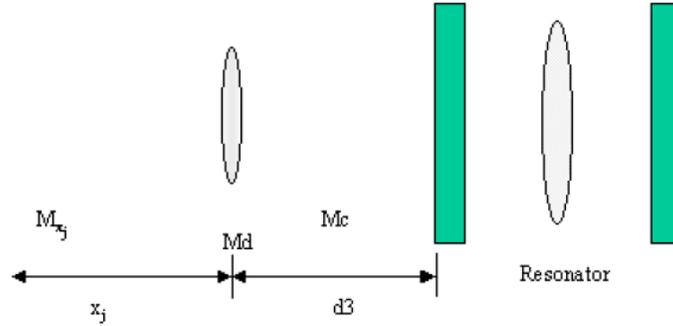
$$w_{mirror2} := \frac{\lambda_{YAG}}{\pi} \sqrt{\frac{-RT_{1,0}}{RT_{0,1}}} \quad (A.15)$$

ويتقدير حجم الشعاع نحصل على

$$w_{mirror2} = 1.152 \times 10^{-6} \text{ m} \quad (A.16)$$



والآن بمعرفة القيمة- q عند احد المستويات المرجعية (المراة)، فانه يمكن أن تنتشر خلال عناصر النظام البصري المختلفة لتصل إلى النقطة المطلوبة. والمصفوفات ABCD تعرف لكل مركبة من خلال انتشار الشعاع خلالها. والموقع وتسميات المصفوفة والأبعاد موضحة في الشكل A.3.



الشكل A.3 مسار انتشار الشعاع خارج المذبذب

المصفوفات المكافئة ABCD لكل مركب معرف في الجدول A.3

الجدول A.3 تعريف متغيرات النظام البصري

Distance from AR-mirror to 1st lens	$M_c := \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
ABCD for 1st lens	$M_d := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$
ABCD matrix to propagate beam after 1st lens	$M_{e_j} := \begin{pmatrix} 1 & x_j \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

والمتجه يعرف على انه انتشار الشعاع بعيدا عن العدسة على امتداد خط مستقيم. وعدد العناصر في المتجه يتحدد على النحو التالي:

$$j := 1..41 \quad (A.17)$$

والمتجه يعرف على النحو التالي:

$$x_j := \frac{d_3 \cdot (j - 1)}{10} \quad (A.18)$$



والمصفوفات ABCD تضرب للحصول على المصفوفة المكافئة التي تمثل النظام عندما تنتشر القيمة-q. والمصفوفة المكافئة تعرف على أن تكون

$$M_{\text{test } j} := M_{e_j} \cdot M_d \cdot M_c \quad (\text{A.19})$$

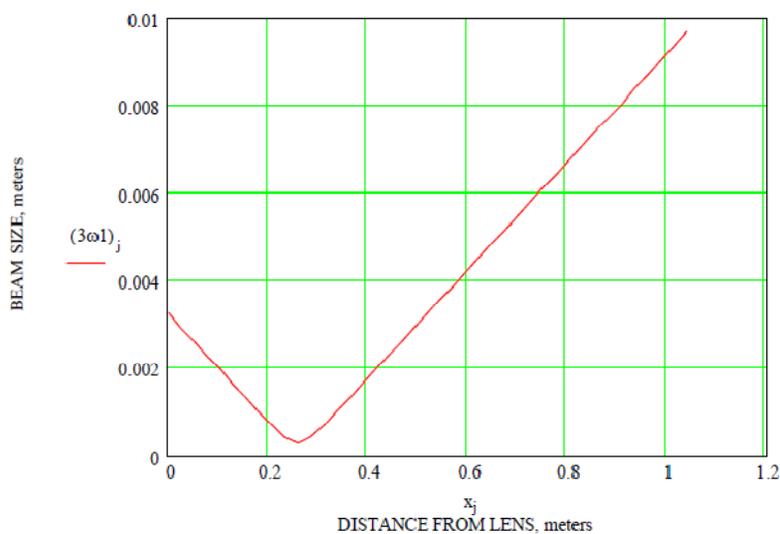
باستخدام متغير الشعاع المركب الموضح في المعادلة A.12، فإنه ينتشر خلال النظام باستخدام المصفوفة المكافئة كما هو موضح في المعادلة A.19. ومتغير الشعاع المركب الجديد يحدد على النحو التالي:

$$q_{\text{test } j} := \frac{\left(M_{\text{test } j} \right)_{0,1} + Q_{2\text{sol}} \cdot \left(M_{\text{test } j} \right)_{0,0}}{\left(M_{\text{test } j} \right)_{1,1} + Q_{2\text{sol}} \cdot \left(M_{\text{test } j} \right)_{1,0}} \quad (\text{A.20})$$

حيث القيمة-q الجديدة عند نقاط مختلفة خلال مسار الانتشار، فإنه يمكن تحديد خسر الشعاع على النحو التالي:

$$\omega_{1j} := \sqrt{\frac{-\lambda_{\text{YAG}}}{\pi \cdot \left(\text{Im} \left(\frac{1}{q_{\text{test } j}} \right) \right)}} \quad (\text{A.21})$$

النتائج في المعادلة A.21 موضحة في الشكل A.4.



الشكل A.4 حجم الشعاع كدالة في زيادة المسافة من عدسة التبرير



الملحق C

الاشتقاق الرياضي لتأثير العدسة الحرارية

القيمة النظرية لمعامل حساسية البلورة تحدد من استخدام المعادلات الموضحة أدناه. الحسابات تتبع الطريقة والمعادلات الموضحة بواسطة Koechner (1999) و Ifflaender (2001). البيانات العملية التي تم الحصول عليها من جهاز ليزر HL506D الذي استخدم لهذه التجارب. البيانات المستخدمة حصلنا عليها خلال تشغيل برنامج قياس قدرة الليزر. الحسابات توضح اعتماد نقطة البعد البؤري على التغير في درجات الحرارة. وكل النتائج تم حسابها باستخدام برنامج الماتكاد (Mathsoft، 2001).

التسميات والمتغيرات المستخدمة ملخصة في الجدول C.1.

الجدول C.1 تعريف المتغيرات

Wavelength of YAG light	$\lambda := 1.06 \cdot 10^{-4}$	cm
Index of refraction	$n_0 := 1.82$	
Thermal refractive index change	$dn_{dT} := 7.3 \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{C}$
Thermal expansion coefficient	$\alpha := 8.2 \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{C}$
Heat transfer coefficient	$h := 1.25$	$\frac{W}{cm^2 \cdot C}$
Thermal conductivity	$k := 0.13$	$\frac{W}{cm \cdot K}$
Outer radius of crystal	$r_0 := \frac{.635}{2}$	cm
Length of crystal	$L := 17.7$	cm
Cross sectional area of the crystal	$A := \pi \cdot r_0^2$	cm ²
Radius as a range variable	$r := 0, 0.001921 .. 0.317$	cm

قياس درجة حرارة البلورة تم استيرادها من قاعدة بيانات الناتجة بواسطة برنامج التحكم بالليزر (WinLAS) خلال عملية تشغيل البرنامج لفحص الطاقة الكهربائية. ونتيجة لعدد كبير من البيانات



(86) فان القائمة اختصرت لتوفير المساحة. كذلك، الطاقة الكهربائية الداخلة والخارجة لليزر تم استيرادها أيضا.

$T_L :=$ <table border="1"><thead><tr><th></th><th>0</th></tr></thead><tbody><tr><th>0</th><td>34</td></tr><tr><th>1</th><td>34</td></tr></tbody></table>		0	0	34	1	34	درجة حرارة الساق على الجانب الأيسر مقاسه بوحددة الدرجة المئوية $^{\circ}C$
	0						
0	34						
1	34						
$T_R :=$ <table border="1"><thead><tr><th></th><th>0</th></tr></thead><tbody><tr><th>0</th><td>29</td></tr><tr><th>1</th><td>29</td></tr></tbody></table>		0	0	29	1	29	درجة حرارة الساق على الجانب الأيمن مقاسه بوحددة الدرجة المئوية $^{\circ}C$
	0						
0	29						
1	29						
$P_{in} :=$ <table border="1"><thead><tr><th></th><th>0</th></tr></thead><tbody><tr><th>0</th><td>2.55</td></tr><tr><th>1</th><td>2.72</td></tr></tbody></table>		0	0	2.55	1	2.72	الطاقة الكهربائية الداخلة بوحددة kW
	0						
0	2.55						
1	2.72						
$P_{out} :=$ <table border="1"><thead><tr><th></th><th>0</th></tr></thead><tbody><tr><th>0</th><td>2.2</td></tr><tr><th>1</th><td>2.2</td></tr></tbody></table>		0	0	2.2	1	2.2	الطاقة الكهربائية الخارجة بوحددة W
	0						
0	2.2						
1	2.2						

بأخذ متوسط قراءتي درجات الحرارة التي حصلنا عليها من سطح البلورة، تمكنا من تحديد درجة الحرارة المتوسطة للبلورة. ويكون متوسط درجة الحرارة الخارجية للبلورة على النحو التالي:

$$T_{outer} := \frac{T_L + T_R}{2} \quad T(r_0) := T_{outer} \quad (C.1)$$

درجة حرارة السائل المبرد تأخذ من جهاز التحكم بالليزر، وتمثل درجة حرارة الماء في الخزان. هذا الماء استخدم للنظام المغلق للتبريد لمختلف أجزاء الليزر. ودرجة الحرارة يمكن ان تتغير خلال دورة تشغيل مصدر الطاقة، ولكن لا يوجد تفضيل في برنامج WinLAS لقياس درجة حرارة الخزان بالتزامن مع القياسات الأخرى. ولغرض هذه الدراسة التحليلية، فقد افترض ان درجة الحرارة تبقى ثابتة. ودرجة الحرارة المتوسطة افترضت إنها تبقى ثابتة عند



$$T_F := 23 \text{ C} \quad (C.2)$$

باستخدام المعادلات التي حصلنا عليها من Koechner (1999) فإن امتصاص الحرارة في البلورة مع توزيع درجة الحرارة يمكن ان يحسب باستخدام الطاقة المبددة بواسطة البلورة على النحو التالي:

$$P_a := 2\pi \cdot r_0 \cdot L \cdot h \cdot (T(r_0) - T_F) \quad (C.3)$$

من المعادلة C.3 فإن الحرارة المتولدة لكل وحدة حجم حصلنا عليها باستخدام

$$Q := \frac{P_a}{\pi \cdot r_0^2 \cdot L} \quad (C.4)$$

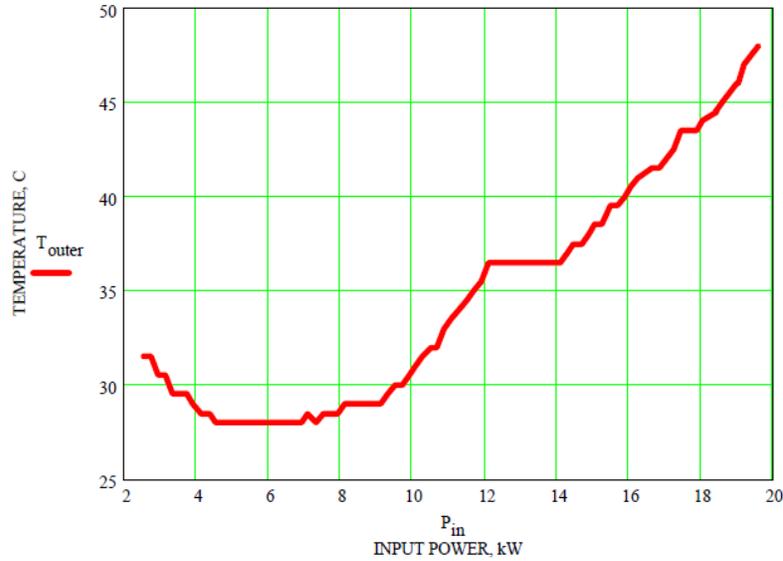
وبعد هذا فإن درجة الحرارة عند مركز البلورة هو

$$T_c := T_F + P_a \cdot \left(\frac{1}{4\pi \cdot k \cdot L} + \frac{1}{2\pi \cdot r_0 \cdot L \cdot h} \right) \quad (C.5)$$

والتوزيع القطري لدرجة الحرارة يمكن التعبير عنه على النحو التالي:

$$T(r) := \left[T(r_0) + \left(\frac{Q}{4k} \right) \cdot (r_0^2 - r^2) \right] \quad (C.6)$$

باستخدام البيانات التي حصلنا عليها من ليزر HL506D، فإن التغير في متوسط درجة الحرارة الخارجية للبلورة مع زيادة الطاقة موضح في الشكل C.1



الشكل C.1 مخطط لدرجة حرارة سطح البلورة مع الطاقة المستخدمة

ولكي نعرف التغير في موقع نقطة البؤرة لحالتي استقطاب الضوء، فإن الاستقطاب يعتمد على معامل المرونة الضوئية لـ Nd:YAG والذي نعرفه على النحو التالي:

$$C_T := 0.017 \quad (C.7)$$

للاستقطاب القطري للضوء، وللاستقطاب المماسي للضوء يكون

$$C_\phi := -0.0025 \quad (C.8)$$

بدمج هذين التأثيرين للإجهاد ودرجة الحرارة المعتمدة على التغير في معامل الانكسار، والتشويه على الوجهين، فإن المعادلات بواسطة Koechner (1999) تستخدم لكل استقطاب للضوء. والبعد البؤري للاستقطاب القطري للضوء يعطى بالمعادلة التالية:

$$f_T := k \cdot \frac{A}{P_a} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot dn_{dT} + \alpha \cdot C_T \cdot n_0^3 + \frac{\alpha \cdot r_0 \cdot (n_0 - 1)}{L} \right]^{-1} \quad (C.9)$$

والبعد البؤري للضوء المستقطب مماسيا يعطى على النحو التالي:



$$f_{\phi} := k \cdot \frac{A}{P_a} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{dn}{dT} \cdot dT + \alpha \cdot C_{\phi} \cdot n_0^3 + \frac{\alpha \cdot r_0 \cdot (n_0 - 1)}{L} \right]^{-1} \quad (C.10)$$

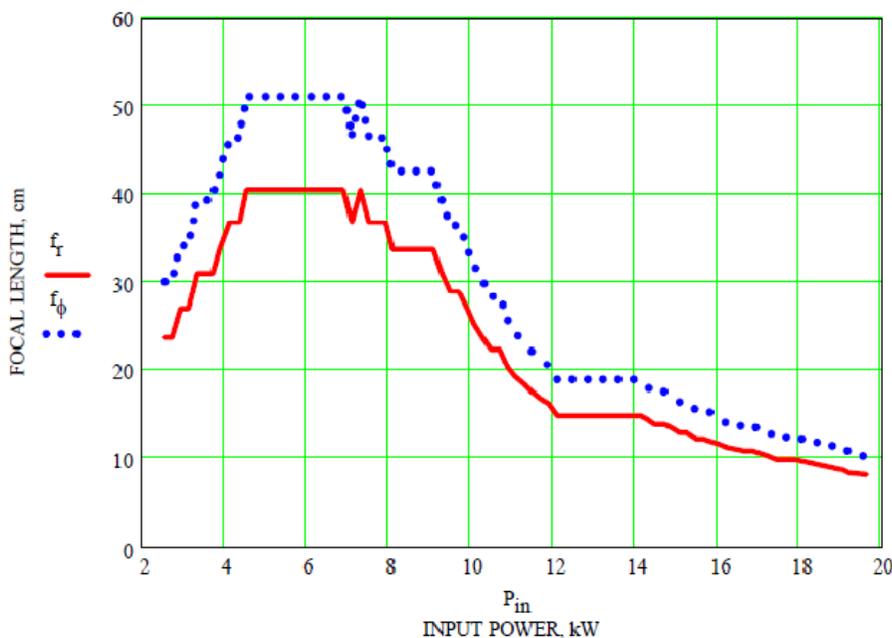
درجة الحرارة تعتمد على التغير في معامل انكسار والتي تشكل الجزء الأساسي في العدسة الحرارية، بحوالي 20%. التأثيرات لتحذب عند نهاية الوجه يؤثر بنسبة 6% (Koechner، 1999).

والتحليلات تبين ان البعد البؤري للبلورة موضح في الشكل C.2.

ومعامل حساسية البلورة يعرف على انه التغير في قدرة التنبير للبلورة كاستجابة للتغير في الطاقة الداخلة. وحساسية بلورة الليزر تعرف على النحو التالي:

$$\frac{d\left(\frac{1}{f}\right)}{dP_{in}} = M^{-1} \quad (C.11)$$

المعادلة C.11 فان الحد M يحتوي على كل معاملات المادة ومعامل الكفاءة η الذي يربط الطاقة الداخلة مع الطاقة المبددة في صورة حرارة، وكذلك الخسارة الناتجة عن عوامل أخرى.



الشكل C.2 البعد البؤري للضوء المستقطب ماسيا وقطريا



التغير في موقع البعد البؤري للبلورة تم تحديده في البداية بواسطة حساب مواقع التبئير بالاعتماد على الطاقة الداخلة واستقطاب الضوء. وهذا ينجز باستخدام المعادلات C.9 و C.10. وبأخذ معكوس البعد البؤري المحسوب، فان طاقة التبئير للساق يمكن ان نحصل عليها لكل حالة استقطاب.

ومعامل الانكسار يجب ان يعرف لكي تتمكن من حساب التغير في مواقع التبئير بين كل نقطة قياس. والمتغير j يمثل العدد الكلي للقياسات المستخدمة، و i تستخدم كمدي للتغير. كلا التغيريين يعرف على النحو التالي:

$$j := 86, \quad i := 1 \dots j \quad (C.12)$$

التغيرات في البعد البؤري الناتجة عن الطاقة الداخل موضحة أدناه، والقيم المحسوبة لكلا الحالتين من الاستقطاب. طاقة التبئير للبلورة تعرف على انها معكوس البعد البؤري، كما يلي:

$$F := f_T^{-1} \quad (C.13)$$

التغير في طاقة التبئير للضوء المستقطب قطريا بين كل نقطة من نقاط القياس تعطى على النحو التالي:

$$Fd_i := F_i - F_{i-1} \quad (C.14)$$

التغير في البعد البؤري للضوء المستقطب مماسيا يعرف أولا بأخذ معكوس البعد البؤري على النحو التالي:

$$F\phi := f_\phi^{-1} \quad (C.15)$$

وطاقة التبئير للتغير بين نقاط القياسات تعطى على النحو التالي:

$$F\phi d_i := F\phi_i - F\phi_{i-1} \quad (C.16)$$

نتائج هذه الحسابات في المعادلتين C.14 و C.15 موضحة في المعادلتين C.17 و C.18 على التوالي



$$\text{Frd} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 \\ \hline 2 & -4.943 \cdot 10^{-3} \\ \hline \end{array} \quad (\text{C.17})$$

$$\text{F}\phi\text{d} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 \\ \hline 2 & -3.91 \cdot 10^{-3} \\ \hline \end{array} \quad (\text{C.18})$$

الزيادة في الفرق في الطاقة الداخلة بين نقطتي قياس متتابعتين تحدد على النحو التالي:

$$\text{Pindiff}_i := \text{Pind}_i - \text{Pind}_{i-1} \quad (\text{C.19})$$

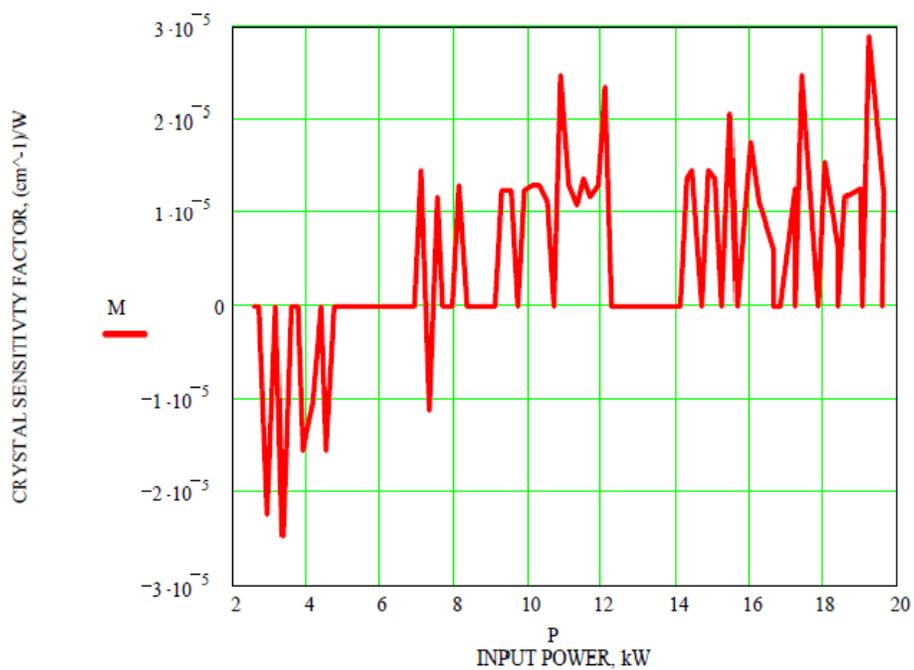
وبتعريف متغير حساسية البلورة على النحو التالي

$$M := \left(\frac{\text{Frd}}{1000 \text{Pindiff}} \right) \quad (\text{C.20})$$

والطاقة الداخلة على الليزر تعرف على انها متجه لتسهيل تمثيلها بيانياً:

$$P := \vec{P}_{\text{in}} \quad (\text{C.21})$$

معامل حساسية البلورة موضح في الشكل C.3. وقد حددها Koechner (1999) على أنها خاصية للمادة بقيمة تتراوح بين $0.5-1.0 \times 10^{-3}$ diopters/W. ومن الشكل 3 ومن المقارنة مع القيم المنشورة، يمكن ان نستدل على ان الساق حساس للتغيرات في طاقة الضخ. هذه النتائج أيضا لا تتوافق بشكل جيد مع القيم التي حصلنا عليها عمليا. وهذا من الممكن ان يعود الى التقريب الذي تم للحصول على البعد البؤري بطريقة تحليلية.



الشكل C.3 مخطط لمعامل حساسية البلورة مع الطاقة الداخلة

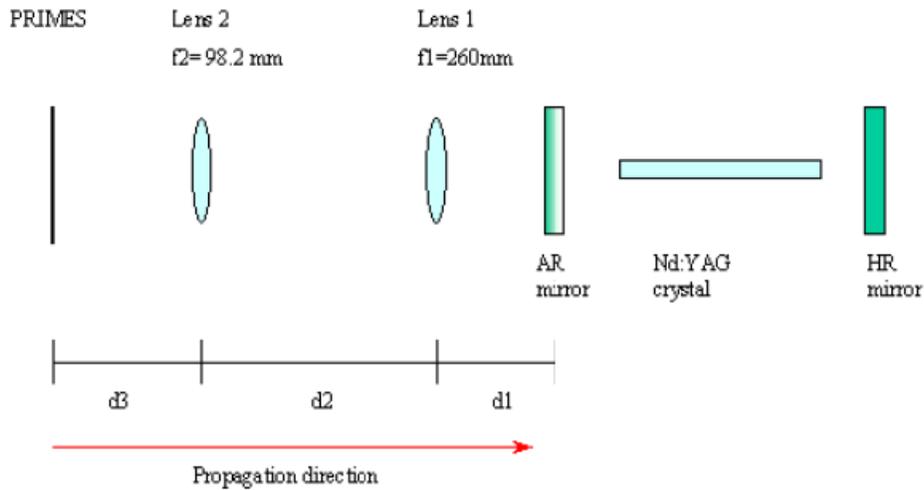


الملحق D

نموذج المذبذب

لكي نتمكن من حساب تأثير العدسة الحرارية الموجودة في المذبذب، تم تطوير نموذج باستخدام تقريب الأنبوبة الرباعية المستقرة لبلورة Nd:YAG. وتم تحديد قيم متغير الشعاع المركب عند مستوى المرآة العاكسة AR حيث يكون انتشار الشعاع للخلف، حيث تكون نقطة قيمة- q ذاتية التكرار قد حددت. تم حل نموذج المذبذب باختيار البعد البؤري المناسب للبلورة والتي تضمن قيمة- q ذاتية التكرار. وبعد تعيين قيمة β تم تحديد حجم الشعاع داخل المذبذب.

البيانات المستخدمة للحسابات تم الحصول عليها عند مراقب التنبير FocusMonitor من القياسات على البلورة ذات الرقم 261067 والتي اجتازت كل قياسات الجودة وتم اعتمادها على انها بلورة جيدة. والتجهيزات العملية للتجربة موضح في الشكل D.1، والمتغيرات معرفة في الجدول D.1.



الشكل D.1 التجهيزات العملية



الجدول D.1 تعريف متغيرات نظام الليزر

Distance from AR mirror to lens 1	$d1 = 0.260$	m
Distance from lens 1 to lens 2	$d2 = 0.9445$	m
Focal length of lens 1	$f1 = 0.260$	m
Focal length of lens 2	$f2 = 0.0982$	m
Length of resonator	$L = 0.5$	m

الطول الموجي لليزر الـ Nd:YAG هو

$$\lambda := 1.06 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

القيم المقاسة مراقب التنبير FocusMonitor حددت مستوى البؤرة. فنصف قطر الشعاع يعبر عنه بوحدة المتر والمسافة $d3$ ، من عدسة التنبير إلى مراقب التنبير بوحدة المليمتر. كل قيم القياسات رتب في شكل مجموعات لتسهيل الحسابات اللاحقة.

حجم الشعاع، ω_p ، ومعامل تبئير الشعاع M^2 ، والمسافة من عدسة التنبير إلى مراقب التنبير، $d3$ ، عرفت على النحو التالي:

$\omega_p :=$	0	$MSQ :=$	0	$d3 :=$	0
0	0.000327	0	49.5	0	100.83
1	0.000343	1	54.3	1	100.21
2	0.000367	2	54	2	99.63
3	0.000376	3	52.7	3	98.87
4	0.000369	4	55.4	4	99.03
5	0.00037	5	50	5	98.21
6	0.000381	6	54.1	6	97.45
7	0.000375	7	48.5	7	96.16
8	0.000345	8	42.4	8	94.76
9	0.000296	9	36.2	9	93.09
10	0.000241	10	27.5	10	90.93

تغير المسافة بين موقع خصر الشعاع حدد بواسطة مراقب التنبير والعدسة #2 بالتطابق مع طاقات الضخ المختلفة والمعرفة في المصفوفة ABCD على النحو التالي:

$$M1a := \begin{pmatrix} 1 & \frac{d3_{0,0} + 10.75}{1000} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D.1)$$



$$M1b := \begin{pmatrix} 1 & \frac{d3_{6,0} + 10.5}{1000} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D.2)$$

و

$$M1c := \begin{pmatrix} 1 & \frac{d3_{10,0} + 10}{1000} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D.3)$$

المصفوفات ABCD تعرف المركبات كل على حدا كما في الشكل 1 وهي على النحو التالي:

$$M2 := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f2} & 1 \end{pmatrix} \quad (D.4)$$

$$M3 := \begin{pmatrix} 1 & d2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D.5)$$

$$M4 := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f1} & 1 \end{pmatrix} \quad (D.6)$$

و

$$M5 := \begin{pmatrix} 1 & d1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D.7)$$

والمصفوفات المكافئة ABCD للنظام البصري خارج المذبذب يعرف باستخدام المواقع الثلاثة المحددة لخصر الشعاع أي على النحو التالي:

$$M_{eq1a} := M5 \cdot M4 \cdot M3 \cdot M2 \cdot M1a \quad (D.8)$$

$$M_{eq1b} := M5 \cdot M4 \cdot M3 \cdot M2 \cdot M1b \quad (D.9)$$

و

$$M_{eq1c} := M5 \cdot M4 \cdot M3 \cdot M2 \cdot M1c \quad (D.10)$$



والتقدير العددي للمعادلات D.8 وحتى D.10 ينتج على الشكل التالي:

$$M_{eq1a} = \begin{pmatrix} -2.648 & -0.035 \\ 22.963 & -0.07 \end{pmatrix} \quad (D.11)$$

$$M_{eq1b} = \begin{pmatrix} -2.648 & -0.026 \\ 22.963 & -0.154 \end{pmatrix} \quad (D.12)$$

و

$$M_{eq1c} = \begin{pmatrix} -2.648 & -7.223 \times 10^{-3} \\ 22.963 & -0.315 \end{pmatrix} \quad (D.13)$$

القيمة- q تحدد عند موقع الخصر باستخدام نصف قطر خصر الشعاع. وبالتعريف، فإن التحذب يجب ان يكون غير محدود عند خصر الشعاع وهذا ينتج عنه التالي:

$$INVq1a := \frac{-MSQ_{0,0} \lambda \sqrt{-1}}{\pi \cdot (\omega_{p,0})^2} \quad (D.14)$$

و

$$q1a := \frac{1}{INVq1a} \quad (D.15)$$

وللطاقة الداخلة بقيمة 6.5 kW، ينتج عنه متغير الشعاع المركب التالي قيمة عند مستوى القياس

$$q1a = 6.402i \times 10^3 \quad (D.16)$$

ونفس الشيء ينتج في متغير الشعاع المركب عند طاقات 12.5 kW و 16.5 kW وينتج عن ذلك

$$INVq1b := \frac{-MSQ_{6,0} \lambda \sqrt{-1}}{\pi \cdot (\omega_{p,6,0})^2} \quad (D.17)$$

$$q1b := \frac{1}{INVq1b} \quad (D.18)$$



$$q1b = 7.952i \times 10^{-3}$$

$$\text{INV}q1c := \frac{-MSQ_{10,0} \cdot \lambda \cdot \sqrt{-1}}{\pi \cdot (\omega_{P_{10,0}})^2} \quad (\text{D.18})$$

$$q1c := \frac{1}{\text{INV}q1c} \quad (\text{D.19})$$

و

$$q1c = 6.261 \times 10^{-3} \quad (\text{D.20})$$

القيمة- q عند موقع الخصر قيست بواسطة مراقب التبئير عندما كان الشعاع ينتشر خلال النظام البصري الى المرآة العاكسة AR. هذه انجزت عند كل خصر تم اختياره بواسطة المصفوفات المكافئة المناسبة كما في المعادلات D.8 وحتى D.10. والانتشار للقيمة- q أنجز باستخدام ما يلي:

$$q2a := \frac{M_{eq1a_{0,0}} \cdot q1a + M_{eq1a_{0,1}}}{M_{eq1a_{1,0}} \cdot q1a + M_{eq1a_{1,1}}} \quad (\text{D.21})$$

$$q2b := \frac{M_{eq1b_{0,0}} \cdot q1b + M_{eq1b_{0,1}}}{M_{eq1b_{1,0}} \cdot q1b + M_{eq1b_{1,1}}} \quad (\text{D.22})$$

و

$$q2c := \frac{M_{eq1c_{0,0}} \cdot q1c + M_{eq1c_{0,1}}}{M_{eq1c_{1,0}} \cdot q1c + M_{eq1c_{1,1}}} \quad (\text{D.23})$$

القيم- q عند المرآة العاكسة AR حصلنا عليها من المعادلات D.21 وحتى D.23 والتي قدرت لتكون على النحو التالي:

$$q2a = 5.652 \times 10^{-5} + 0.241i \quad (\text{D.24})$$



$$q_{2b} = 2.184 \times 10^{-3} + 0.14i \quad (D.25)$$

و

$$q_{2c} = -8.899 \times 10^{-4} + 0.052i \quad (D.26)$$

باستخدام حسابات قيم متغير الشعاع المركب عند المرآة العاكسة AR، فإنه من الممكن ان نحدد نصف قطر خصر الشعاع لكل طاقة ضخ على النحو التالي:

$$\omega_{oa} := \sqrt{\frac{-MSQ_{0,0} \cdot \lambda}{\pi \cdot \left(\text{Im} \left(\frac{1}{q_{2a}} \right) \right)}} \quad (D.27)$$

$$\omega_{ob} := \sqrt{\frac{-MSQ_{6,0} \cdot \lambda}{\pi \cdot \left(\text{Im} \left(\frac{1}{q_{2b}} \right) \right)}} \quad (D.28)$$

و

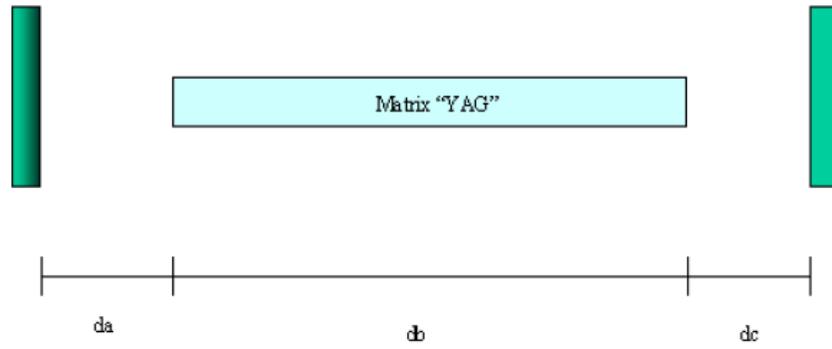
$$\omega_{oc} := \sqrt{\frac{-MSQ_{10,0} \cdot \lambda}{\pi \cdot \left(\text{Im} \left(\frac{1}{q_{2c}} \right) \right)}} \quad (D.29)$$

احجام الشعاع المحصل عند المرآة العاكسة AR ملخص في الجدول D.2

الجدول D.2 احجام الشعاع عند المرآة العاكسة AR

6.5 kW input power	$\omega_{oa} = 2.006 \times 10^{-3}$	m
12.5 kW input power	$\omega_{ob} = 1.596 \times 10^{-3}$	m
16.5 kW input power	$\omega_{oc} = 6.96 \times 10^{-4}$	m

المذبذب بالتالي معرف، وبلورة Nd:YAG موضوعة في شكل نموذج أنبوية رباعية مستقرة بمرآتين مستويتين متوازيتين على كلا الجانبين. تشكيل المصفوفة لأنبوية الرباعية المستقرة تم الحصول عليه من Siegman (1986). والتمثيل الجبري لنموذج المذبذب المستخدم موضح في الشكل D.2.



الشكل D.2 تسميات مصطلحات المذبذب

الابعاد المطلوبة والثوابت للحسابات القادمة موضحة في الجدول D.3.

الجدول D.3 قيم ثوابت المذبذب

Distance from AR mirror to crystal	$da = 0.161$	m
Distance from HR mirror to crystal	$dc = da$	m
Length of crystal	$db = 0.178$	m
Index of refraction	$n_0 = 1.82$	

ولكي نجعل نموذج الانبوبة الرباعية اكثر سهولة للتحليل فان التعويضات التالية تم عملها. والمشتقة العرضية b تعرف على النحو التالي:

$$b(n_2) := \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \quad (D.30)$$

وهذه مرتبطة بالبعد البؤري β بالمعادلة التالية:

$$b = \frac{2}{\beta} \quad (D.31)$$

ولهذا، فان البعد البؤري للبلورة β يمكن أن يعرف بدلالة معامل الانكسار n_0 والتحدب للأسفل، n_2 (Markille و Schlueter ، 2002). والعامل الإضافي 4 ينشأ من التعريف الموضح بواسطة Ifflaender (2001)، أي ان

$$\beta^2 = 4 \frac{n_0}{n_2} \quad (D.32)$$



والمصفوفة التي تمثل مسار واحد خلال بلورة YAG النمذجة بالأنبوبة الرباعية المستقرة تعرف بدلالة البعد البؤري β هي

$$YAG(\beta) := \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2}{\beta} \cdot db\right) & \left(\frac{2}{\beta} \cdot n_0\right)^{-1} \cdot \sin\left(\frac{2}{\beta} \cdot db\right) \\ -n_0 \cdot \frac{2}{\beta} \cdot \sin\left(\frac{2}{\beta} \cdot db\right) & \cos\left(\frac{2}{\beta} \cdot db\right) \end{bmatrix} \quad (D.33)$$

والمسافات من البلورة المقابلة لكل مرآة تعرف بواسطة المصفوفات ABCD:

$$M_x := \begin{pmatrix} 1 & da \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D.34)$$

و

$$M_y := \begin{pmatrix} 1 & dc \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D.35)$$

والمصفوفة المكافئة للرحلة الكاملة خلال المذبذب تحدد بواسطة المعادلة التالية:

$$M_{res}(\beta) := M_x \cdot YAG(\beta) \cdot M_y \cdot M_y \cdot YAG(\beta) \cdot M_x \quad (D.36)$$

باستخدام قيم التخمين للبعد البؤري والمعتمدة على القيم الموضحة في Ifflaender (2001) أي ان

$$\beta := 0.37 \quad (D.37)$$

المصفوفة المكافئة التي تمثل المذبذب والموضحة في المعادلة D.36 يمكن ان تقدر عدديا على النحو التالي:

$$M_{res}(\beta) = \begin{pmatrix} 0.059 & -0.085 \\ 11.747 & 0.059 \end{pmatrix} \quad (D.38)$$

وبمعرفة ان قيمة q يجب ان تكون ذاتية التكرار بعد رحلة كاملة خلال المذبذب، فان المعادلات المعروفة سوف تستخدم في الحسابات اللاحقة لضمان ان هذا الشرط متحقق أيضا. ومعادلة واحدة مطلوبة لكل مستوى طاقة داخلية أي ان:

$$Q_{2a}(\beta) := \frac{M_{res}(\beta)_{0,0} \cdot q_{2a} + M_{res}(\beta)_{0,1}}{M_{res}(\beta)_{1,0} \cdot q_{2a} + M_{res}(\beta)_{1,1}} \quad (D.39)$$



$$Q_{2b}(\beta) = \frac{M_{res}(\beta)_{0,0} \cdot q_{2b} + M_{res}(\beta)_{0,1}}{M_{res}(\beta)_{1,0} \cdot q_{2b} + M_{res}(\beta)_{1,1}} \quad (D.40)$$

و

$$Q_{2c}(\beta) := \frac{M_{res}(\beta)_{0,0} \cdot q_{2c} + M_{res}(\beta)_{0,1}}{M_{res}(\beta)_{1,0} \cdot q_{2c} + M_{res}(\beta)_{1,1}} \quad (D.41)$$

الحل لكل جزء يمكن ان نحصل عليه باستخدام برنامج الماتكاد والذي سوف يجد الحل للبعد البؤري المميز للبلورة لضمان تحقق متغير الشعاع المركب ذو التكرار الذاتي. والقيم المخمنة مبدئيا تعرف في المعادلة D.37. وللحل يستخدم conjugate gradient و لوغاريثم Levenberg-Marquardt. وفي البداية تم استخدام Levenberg-Marquardt الغير خطية ولكن الحلول التي حصلنا عليها بواسطة هذا الحل كانت في بعض الاحيان مختلفة بشكل كبير عن الحلول التي حصلنا عليها لمستويات الطاقة المتقاربة. وفي هذه الحالات فان الحل يجب ان يتغير باستخدام طريقة conjugate gradient والحلول مرة اخرى اتبعت النماذج المثبتة. هذا التأثير في البداية حجب خلال طاقة الادخال المنخفضة وفي بعض الاحيان لوحظ منطقة غير مستقرة في المذبذب. والطاقات العالية (>12.5 kW) تم حلها باستخدام طريقة Levenberg-Marquardt.

لطاقة ادخال تساوي 6.5 kW، فان الحل الجزئي لقيمة β . والمتطلبات لقيمة-q هو ان تكون ذاتية التكرار بعد رحلة كاملة خلال المذبذب وتعطى على النحو التالي:

$$Q_{2a}(\beta) = q_{2a} \quad (D.42)$$

وبرنامج الماتكاد ولد الحلول التالية لـ β لتحقيق هذا الشرط الموضح في D.42 على النحو التالي:

$$\text{sol} := \text{Find}(\beta) \quad (D.43)$$

وبالحساب نحصل على

$$\text{sol} = 0.541 - 7.744i \times 10^{-5} \quad (D.44)$$

المصفوفة معرفة في المعادلة D.39 تم تقديرها بالاعتماد على قيمة β والتي حصلنا عليها من المعادلة D.43 على النحو التالي:

$$Q_{2a}(\beta a) = 5.652 \times 10^{-5} + 0.241i \quad (D.45)$$



والطريقة المستخدمة لمستوى طاقة الادخال 6.5 kW هي نفسها التي اتبعت لـ 12.5 kW و 16.5 kW. ونتائج الماثكاد اعطت النتائج التالية:

وللطاقة الداخلة بمقدار 12.5 kW:

معطى هذه القيم

$$\begin{aligned}Q_{2b}(\beta) &= q_{2b} \\ \text{solb} &:= \text{Find}(\beta) \\ \text{solb} &= 0.417 - 2.231i \times 10^{-3} \\ \beta_b &:= \text{solb}\end{aligned}$$

وللطاقة الداخلة بمقدار 16.5 kW:

معطى هذه القيم

$$\begin{aligned}Q_{2c}(\beta) &= q_{2c} \\ \text{solc} &:= \text{Find}(\beta) \\ \text{solc} &= 0.351 + 3.995i \times 10^{-4} \\ \beta_c &:= \text{solc}\end{aligned}$$

وبحساب قيم البعد البؤري لكل قيمة من قيم الطاقة يكون

$$\beta_a = 0.541 - 7.744i \times 10^{-5} \quad (\text{D.46})$$

$$\beta_b = 0.417 - 2.231i \times 10^{-3} \quad (\text{D.47})$$

و

$$\beta_c = 0.351 + 3.995i \times 10^{-4} \quad (\text{D.48})$$

ويجب ان يتم التحقق من قيم β المحسوبة انها تسمح لتحقيق شرط ذاتية التكرار للقيمة-q. والجدول D.4 يوضح المقارنة.



الجدول D.4 مقارنة لمتغير الشعاع المركب

Input power	Original q -value	q -value based on β
6.5 kW	$q_{2a} = 5.652 \times 10^{-5} + 0.241i$	$Q_{2a}(\text{sol}) = 5.652 \times 10^{-5} + 0.241i$
12.5 kW	$q_{2b} = 2.184 \times 10^{-3} + 0.14i$	$Q_{2b}(\text{solb}) = 2.184 \times 10^{-3} + 0.14i$
16.5 kW	$q_{2c} = -8.899 \times 10^{-4} + 0.052i$	$Q_{2c}(\text{solc}) = -8.899 \times 10^{-4} + 0.052i$

البعد البؤري للبلورة المعتمد على قيمة البعد البؤري المميز يمكن ان يحدد باستخدام التقريب الموجود في Koechner (1999). والجزء الحقيقي فقط للبعد البؤري المميز β يمكن ان يحدد في المعادلة D.46 خلال المعادلة D.48. التقريب للبعد البؤري يكون على النحو التالي:

$$f = \frac{\beta^2}{4 n_0 \cdot L_{\text{rod}}} \quad (\text{D.49})$$

وطول البلورة معطى على النحو التالي:

$$L_{\text{rod}} := .178 \text{ m} \quad (\text{D.50})$$

والابعاد البؤرية المفردة للبلورة والتي تعتمد على الطاقة الداخلة تحدد باستخدام المعادلات التالية:

$$f_1 := \frac{\text{Re}(\beta a)^2}{4 n_0 \cdot L_{\text{rod}}} \quad (\text{D.51})$$

$$f_2 := \frac{\text{Re}(\beta b)^2}{4 n_0 \cdot L_{\text{rod}}} \quad (\text{D.52})$$

و

$$f_3 := \frac{\text{Re}(\beta c)^2}{4 n_0 \cdot L_{\text{rod}}} \quad (\text{D.53})$$

والابعاد البؤرية المحسوبة في المعادلات D.51 وحتى D.53 ملخصة في الجدول D.5.



الجدول D.5 اعتماد الطاقة على البعد البؤري

Input power	Focal length	Unit
6.5 kW	f1 = 0.226	m
12.5 kW	f2 = 0.134	m
16.5 kW	f3 = 0.095	m

المتجه معرف بانّه يسمح لانتشار الشعاع من المرآة العاكسة AR والى البلورة، وهذا يسمح لحجم الشعاع ان يرسم كدالة في الموقع داخل المذبذب في الحسابات القادمة.

$$j := 1..21 \quad (D.54)$$

$$x1_j := \frac{da \cdot (j - 1)}{20} \quad (D.55)$$

والمتجه بعد ذلك يمكن ان يعرف كمصفوفة ABCD مكافئة على النحو التالي:

$$\text{section4}_j := \begin{pmatrix} 1 & x1_j \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D.56)$$

والمتجه المعرف في المعادلة D.56 يستخدم لحساب الانتشار المتزايد في قيمة-q المحددة عند المرآة العاكسة وحتى سطح البلورة أي ان

$$q_{AR_roda_j} := \frac{(\text{section4}_j)_{0,0} \cdot q2a + (\text{section4}_j)_{0,1}}{(\text{section4}_j)_{1,0} \cdot q2a + (\text{section4}_j)_{1,1}} \quad (D.57)$$

$$q_{AR_rodb_j} := \frac{(\text{section4}_j)_{0,0} \cdot q2b + (\text{section4}_j)_{0,1}}{(\text{section4}_j)_{1,0} \cdot q2b + (\text{section4}_j)_{1,1}} \quad (D.58)$$

و

$$q_{AR_rodc_j} := \frac{(\text{section4}_j)_{0,0} \cdot q2c + (\text{section4}_j)_{0,1}}{(\text{section4}_j)_{1,0} \cdot q2c + (\text{section4}_j)_{1,1}} \quad (D.59)$$

وحجم الشعاع يمكن ان يحدد باستخدام النتائج من المعادلات D.57 وحتى D.59 و



$$\omega_{Ffacea_j} := \sqrt{\frac{-\lambda \cdot MSQ_{0,0}}{\pi \cdot \left(\text{Im} \left(\frac{1}{q_{AR_roda_j}} \right) \right)}} \quad (D.60)$$

$$\omega_{Ffaceb_j} := \sqrt{\frac{-\lambda \cdot MSQ_{6,0}}{\pi \cdot \left(\text{Im} \left(\frac{1}{q_{AR_rodb_j}} \right) \right)}} \quad (D.61)$$

و

$$\omega_{Ffacec_j} := \sqrt{\frac{-\lambda \cdot MSQ_{10,0}}{\pi \cdot \left(\text{Im} \left(\frac{1}{q_{AR_rodc_j}} \right) \right)}} \quad (D.62)$$

لكي نستطيع نمذجة سلوك الشعاع خلال البلورة فان قيمة q المحددة عند وجه البلورة يجب ان تنتشر خلال باقي البلورة. وهذا سوف يتحقق باستخدام البعد البؤري المميز β والذي تم حسابه سابقا. والحد db في المصفوفة والذي يمثل طول البلورة تم استبداله بمتجه ليتمكن الشعاع من الانتشار بتزايد خلال البلورة.

القيمة q حددت في البداية عند الوجه الأمامي للبلورة على النحو التالي:

$$q_{2Froda}^2 := \frac{q_{2a} \cdot Mx_{0,0} + Mx_{0,1}}{q_{2a} \cdot Mx_{1,0} + Mx_{1,1}} \quad (D.63)$$

$$q_{2Frodb}^2 := \frac{q_{2b} \cdot Mx_{0,0} + Mx_{0,1}}{q_{2b} \cdot Mx_{1,0} + Mx_{1,1}} \quad (D.64)$$

و



$$q^2_{Frodc} := \frac{q2c \cdot Mx_{0,0} + Mx_{0,1}}{q2c \cdot Mx_{1,0} + Mx_{1,1}} \quad (D.65)$$

والمتجه الذي يصف الانتشار المتزايد للشعاع خلال البلورة يعرف على انه

$$k := 1..21 \quad x^2_k := \frac{db \cdot (k - 1)}{20} \quad (D.66)$$

والقيمة المحسوبة للبعد البؤري المميز تم التعويض عنه في المصفوفة التي تمثل بلورة Nd:YAG والمعطاة في المعادلة D.33. وطريقة الحساب موضحة بالتفصيل للطاقة الداخلة عند قيمة 6.5 kW كما هو موضح بالمعادلات D.67 وحتى D.69. ونفس الطريقة اتبعت لباقي قيم الطاقة الداخلة الأخرى.

قيمة البعد البؤري المميز المعروف في المعادلة D.46 تم التعويض عنه في المصفوفة التي تمثل بلورة Nd:YAG لنحصل على

$$YAG_{roda_k} := \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2}{\beta} \cdot x^2_k\right) & \left(\frac{2}{\beta} \cdot n_0\right)^{-1} \cdot \sin\left(\frac{2}{\beta} \cdot x^2_k\right) \\ -n_0 \cdot \frac{2}{\beta} \cdot \sin\left(\frac{2}{\beta} \cdot x^2_k\right) & \cos\left(\frac{2}{\beta} \cdot x^2_k\right) \end{bmatrix} \quad (D.67)$$

القيمة q المحددة عند الوجه الأمامي للبلورة يعطى بالمعادلة D.63 والذي ينتشر خلال البلورة باستخدام

$$Q_{YAGroda_k} := \frac{\left(YAG_{roda_k}\right)_{0,0} \cdot q^2_{Froda} + \left(YAG_{roda_k}\right)_{0,1}}{\left(YAG_{roda_k}\right)_{1,0} \cdot q^2_{Froda} + \left(YAG_{roda_k}\right)_{1,1}} \quad (D.68)$$

وحجم الشعاع يحسب باستخدام النتائج من المعادلة D.68 ونحصل على



$$\omega_{Rfacea_k} := \sqrt{\frac{-\lambda \cdot MSQ_{0,0}}{\pi \cdot \left(\operatorname{Im} \left(\frac{1}{Q_{YAGrodak}} \right) \right)}} \quad (D.69)$$

والطريقة تبقى نفسها لمستويات طاقة الإدخال الأخرى. وفي التالي نتائج برنامج الماتكاد موضحة لمستويات الطاقة 12.5 kW و 17.5 kW وللطاقة الداخلة بمقدار 12.5 kW:

$$\beta = 0.417 - 2.231i \times 10^{-3} \quad (D.70)$$

$$YAG_{rod_bk} := \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2}{\beta} \cdot x_{2k}\right) & \left(\frac{2}{\beta} \cdot n_0\right)^{-1} \cdot \sin\left(\frac{2}{\beta} \cdot x_{2k}\right) \\ -n_0 \cdot \frac{2}{\beta} \cdot \sin\left(\frac{2}{\beta} \cdot x_{2k}\right) & \cos\left(\frac{2}{\beta} \cdot x_{2k}\right) \end{bmatrix} \quad (D.71)$$

$$Q_{YAGrod_bk} := \frac{\left(YAG_{rod_bk}\right)_{0,0} \cdot q_{2Frod_b}^2 + \left(YAG_{rod_bk}\right)_{0,1}}{\left(YAG_{rod_bk}\right)_{1,0} \cdot q_{2Frod_b}^2 + \left(YAG_{rod_bk}\right)_{1,1}} \quad (D.72)$$

و

$$\omega_{Rfaceb_k} := \sqrt{\frac{-\lambda \cdot MSQ_{6,0}}{\pi \cdot \left(\operatorname{Im} \left(\frac{1}{Q_{YAGrod_bk}} \right) \right)}} \quad (D.73)$$

وللطاقة الداخلة بمقدار 16.5 kW:

$$\beta = 0.351 + 3.995i \times 10^{-4} \quad (D.74)$$

$$YAG_{rod_c_k} := \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2}{\beta} \cdot x_{2k}\right) & \left(\frac{2}{\beta} \cdot n_0\right)^{-1} \cdot \sin\left(\frac{2}{\beta} \cdot x_{2k}\right) \\ -n_0 \cdot \frac{2}{\beta} \cdot \sin\left(\frac{2}{\beta} \cdot x_{2k}\right) & \cos\left(\frac{2}{\beta} \cdot x_{2k}\right) \end{bmatrix} \quad (D.75)$$



$$Q_{YAGrodck} := \frac{(YAG_{rodck})_{0,0} \cdot q^2_{Frodck} + (YAG_{rodck})_{0,1}}{(YAG_{rodck})_{1,0} \cdot q^2_{Frodck} + (YAG_{rodck})_{1,1}} \quad (D.76)$$

و

$$\omega_{Rfaceck} := \sqrt{\frac{-\lambda \cdot MSQ_{10,0}}{\pi \cdot \left(\operatorname{Im} \left(\frac{1}{Q_{YAGrodck}} \right) \right)}} \quad (D.76)$$

ومن الوجه الخلفي للبلورة فان قيمة-q سوف تنتشر بتزايد ايضا حتى المرآة المنفذة لليزر

.HR

ومرة اخرى المتجه الذي يصف الانتشار لقيمة-q حتى المرآة HR يعرف على النحو

التالي:

$$j := 1..21 \quad x3_j := \frac{dc \cdot (j - 1)}{20} \quad (D.78)$$

وبتعريف المتجه في حدود المصفوفة ABCD نحصل على

$$\text{section5}_j := \begin{pmatrix} 1 & x3_j \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D.79)$$

والقيمة-q يتم تحديدها عند الوجه الخلفي للبلورة بالانتشار المباشر لقيمة-q المحددة عند الوجه الأمامي في المعادلة D.63 خلال طول البلورة على الشكل الموضح التالي:

$$q^2_{Rroda} := \frac{YAG(\beta a)_{0,0} \cdot q^2_{Froda} + YAG(\beta a)_{0,1}}{YAG(\beta a)_{1,0} \cdot q^2_{Froda} + YAG(\beta a)_{1,1}} \quad (D.80)$$

وبانتشار قيمة-q من الوجه الخلفي للبلورة وحتى المرآة HR نحصل على

$$q^2_{plota}_j := \frac{(\text{section5}_j)_{0,0} \cdot q^2_{Rroda} + (\text{section5}_j)_{0,1}}{(\text{section5}_j)_{1,0} \cdot q^2_{Rroda} + (\text{section5}_j)_{1,1}} \quad (D.81)$$

باستخدام النتائج من المعادلة D.81 فان حجم الشعاع يحدد ليكون على النحو التالي:



$$\omega_{HRa_j} := \sqrt{\frac{-\lambda \cdot MSQ_{0,0}}{\pi \cdot \left(\operatorname{Im} \left(\frac{1}{q_{plota_j}} \right) \right)}}$$

(D.82)

والطريقة المماثلة اتبعت لقيم طاقة عالية.

وللطاقة الداخلة بمقدار 12.5 kW:

$$q^2_{Rrodb} := \frac{YAG(\beta b)_{0,0} \cdot q^2_{Frodb} + YAG(\beta b)_{0,1}}{YAG(\beta b)_{1,0} \cdot q^2_{Frodb} + YAG(\beta b)_{1,1}} \quad (D.83)$$

$$q_{plotb_j} := \frac{\left(\text{section5}_j \right)_{0,0} \cdot q^2_{Rrodb} + \left(\text{section5}_j \right)_{0,1}}{\left(\text{section5}_j \right)_{1,0} \cdot q^2_{Rrodb} + \left(\text{section5}_j \right)_{1,1}} \quad (D.84)$$

و

$$\omega_{HRb_j} := \sqrt{\frac{-\lambda \cdot MSQ_{6,0}}{\pi \cdot \left(\operatorname{Im} \left(\frac{1}{q_{plotb_j}} \right) \right)}}$$

(D.85)

وللطاقة الداخلة بمقدار 16.5 kW:

$$q^2_{Rrodc} := \frac{YAG(\beta c)_{0,0} \cdot q^2_{Frodc} + YAG(\beta c)_{0,1}}{YAG(\beta c)_{1,0} \cdot q^2_{Frodc} + YAG(\beta c)_{1,1}} \quad (D.86)$$

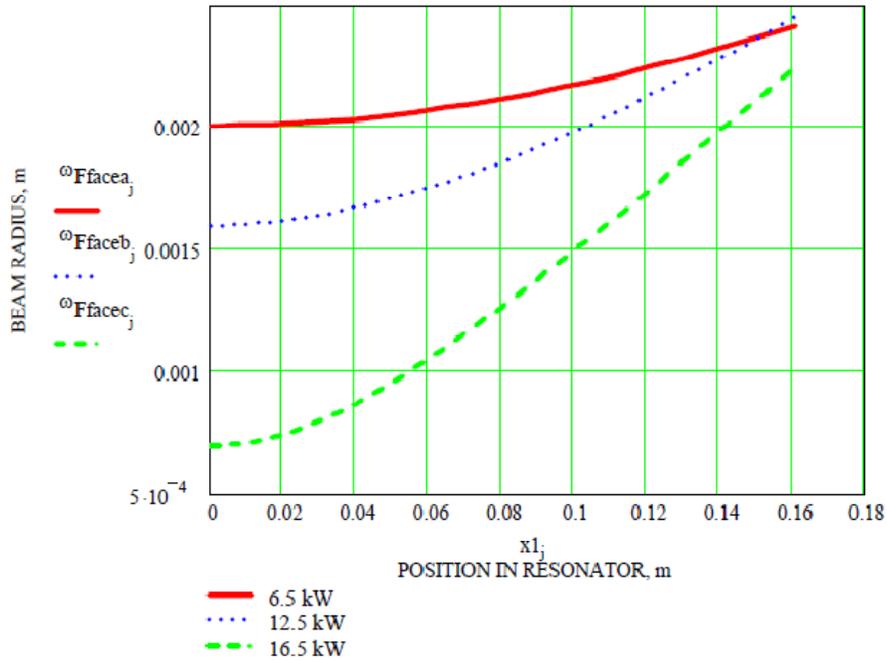
$$q_{plotc_j} := \frac{\left(\text{section5}_j \right)_{0,0} \cdot q^2_{Rrodc} + \left(\text{section5}_j \right)_{0,1}}{\left(\text{section5}_j \right)_{1,0} \cdot q^2_{Rrodc} + \left(\text{section5}_j \right)_{1,1}} \quad (D.87)$$

و

$$\omega_{HRc_j} := \sqrt{\frac{-\lambda \cdot MSQ_{10,0}}{\pi \cdot \left(\operatorname{Im} \left(\frac{1}{q_{plotc_j}} \right) \right)}}$$

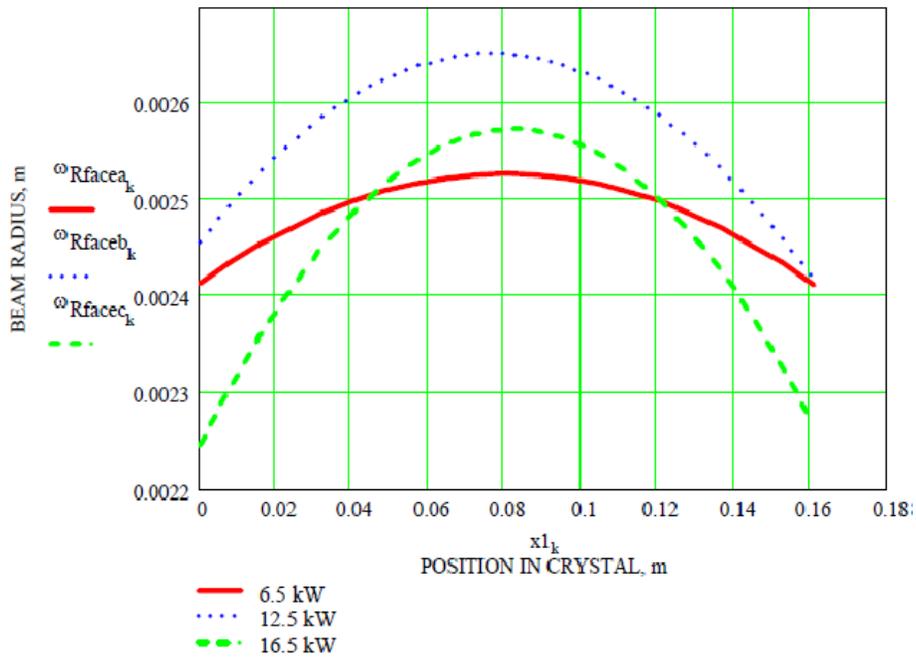
(D.88)

النتائج عن الحسابات المعتمدة على المعادلات D.60 و D.62 موضحة في الشكل D.3.



الشكل D.3 حجم الشعاع من المرآة العاكسة AR حتى وجه البلورة الأمامي

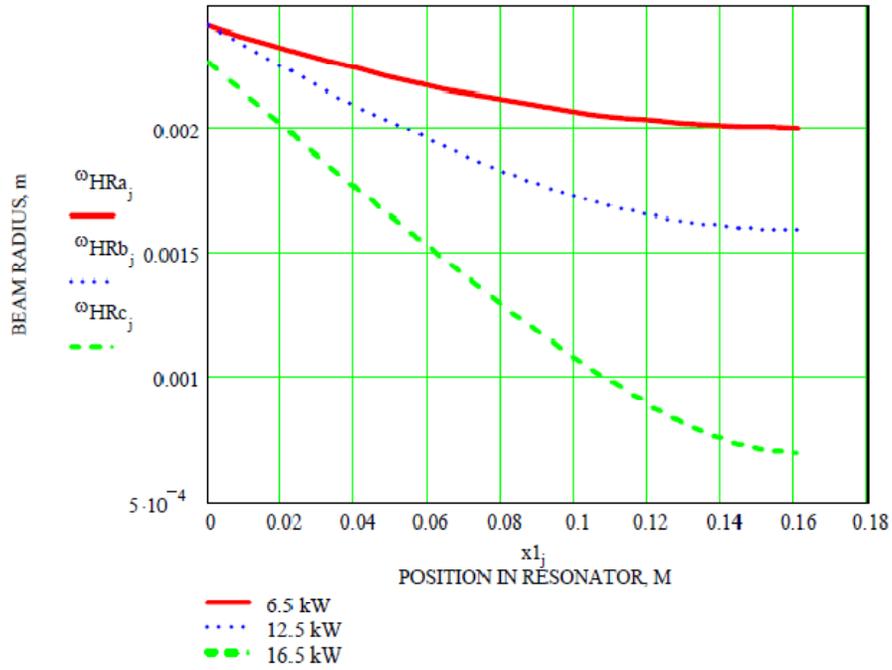
النتائج عن الحسابات المعتمدة على المعادلات D.69 و D.73 و D.77 موضحة في الشكل D.4.



الشكل D.4 حجم الشعاع خلال بلورة Nd:YAG



النتائج عن الحسابات المعتمدة على المعادلات D.82 و D.85 و D.88 موضحة في الشكل D.5.



الشكل D.5 حجم الشعاع من الوجه الخلفي للبلورة حتى المرآة المنفذة لليزر HR

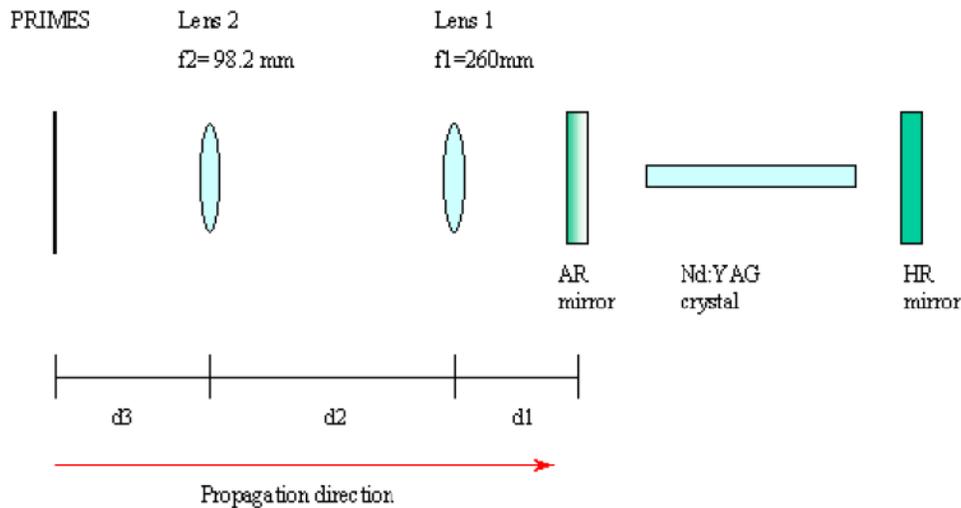


الملحق E

حساب البعد البؤري ومعامل حساسية البلورة

لكي نحدد معامل حساسية البلورة فان البعد البؤري يجب أن يحدد أولاً. ولكي ننجز هذا فان قيمة متغير الشعاع المركب عند مراقب التبئير FocusMonitor لمستوى القياس عندما كان الشعاع ينتشر إلى المرآة العاكسة AR. وعند هذه النقطة تم حل نموذج المذبذب للبعد البؤري المميز، β ، باستخدام مبدأ قيمة-q ذاتية التكرار. باستخدام القيمة المحسوبة للبعد البؤري المميز، فان البعد البؤري لكل بلورة تم حسابه. وبتابع ذلك فان معامل حساسية البلورة تم تحديده باستخدام حسابات التغير في البعد البؤري مع الطاقة الداخلة. هذا سمح لنا لتحديد كلا من البعد البؤري متغير حساسية البلورة كدالة في طاقة الإدخال.

البيانات الموضحة لعينة البلورة رقم 261787f، فشلت في تحقيق معايير الجودة التي وضعتها قسم إنتاج YAG في TRUMPF. وعندما ثبتت في الليزر فان البلورة عرضت انخفاضات متماثلة في شكل الشعاع. ولهذا تم إزالتها من الليزر واعتبرت على إنها غير مناسبة للليزرات ذات قدرة 4 kW. والتجهيزات العملية موضحة في الشكل E.1، والتعريف لكل متغير موضح في الجدول E.1.



الشكل E.1 التجهيزات العملية



الجدول E.1 تعريفات متغيرات نظام الليزر

Distance from AR mirror to lens 1	$d1 = 0.260$	m
Distance from lens 1 to lens 2	$d2 = 0.9445$	m
Focal length of lens 1	$f1 = 0.260$	m
Focal length of lens 2	$f2 = 0.0982$	m
Length of resonator	$L = 0.5$	m

الطول الموجي لليزر Nd:YAG هو

$$\lambda := 1.06 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

القيم المقاسة عند مراقب التنبير لمستوى القياس عرفت بعد ذلك. ونصف قطر الشعاع معبر عنه بوحدة المتر والمسافة $d3$ من عدسة التنبير وحتى جهاز مراقب التنبير عبر عنها بوحدة المليمتر. وكل القيم المقاسة رتبت في مصفوفة لتسهيل العمليات الحسابية المعتمدة عليها. حجم الشعاع ω_p ومعامل تنبير الشعاع M^2 والمسافة من عدسة التنبير ومراقب التنبير $d3$ عرفت على النحو التالي:

$\omega_p :=$

	0
0	0.000316
1	0.000339
2	0.000357
3	0.000356
4	0.000356
5	0.000376
6	0.000376
7	0.000384
8	0.000368
9	0.000333
10	0.000277
11	0.000238
12	

$MSQ :=$

	0
0	47.3
1	52.6
2	54.4
3	58.7
4	56.1
5	55.6
6	52
7	53.5
8	48.5
9	39.9
10	34.5
11	29.4
12	

$d3 :=$

	0
0	101.23
1	100.65
2	100.28
3	99.51
4	98.6
5	98.66
6	97.91
7	97.13
8	95.99
9	94.57
10	93.02
11	91.19
12	

والمصفوفات المطابقة ABCD لكل عنصر هو على النحو التالي:

$$M2 := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f2} & 1 \end{pmatrix} \quad (E.1)$$



$$M3 := \begin{pmatrix} 1 & d2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (E.2)$$

$$M4 := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ \frac{1}{f1} & 1 \end{pmatrix} \quad (E.3)$$

و

$$M5 := \begin{pmatrix} 1 & d1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (E.4)$$

وباستخدام القيمة المقاسة لـ M^2 ونصف قطر خصر الشعاع، فإن متغير الشعاع المركب عند مستوى القياس يمكن تحديده. والطرق الموضحة أدناه تبين الحسابات لمتغير الشعاع المركب للطاقة الداخلة عندما تساوي 6.5 kW. والطريق تكرر لمستويات الطاقة العالية. ومتغير الشعاع المركب يحدد باستخدام

$$INVq6_5 := \frac{-MSQ_{0,0} \cdot \lambda \cdot \sqrt{-1}}{\pi \cdot (\omega_{P_{0,0}})^2} \quad (E.5)$$

و

$$q6_5 := \frac{1}{INVq6_5} \quad (E.6)$$

ولكي تنتشر القيمة-q خلال النظام البصري قبل المذبذب، فإن مصفوفة إضافية يجب أن تعرف وتؤخذ في الحسبان تغير المسافة من مستوى القياس لمراقب التبيير وحتى عدسة التبيير. والمصفوفة المكافئة ABCD للطاقة الداخلة عندما تساوي 6.5 kW هي

$$M6_5 := \begin{pmatrix} 1 & \frac{d3_{0,0} + 10.5}{1000} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (E.7)$$



وبعد تحديد المسافة d3 فان المصفوفة المكافئة التي تمثل النظام البصري قبل المذبذب تحدد على إنها

$$M_{eq6_5} := M5 \cdot M4 \cdot M3 \cdot M2 \cdot M6_5 \quad (E.8)$$

وعند هذه النقطة، فان متغير الشعاع المركب قد تم قياسه عند مراقب التبشير لمستوى القياس وتم تحديده بالمعادلة E.6 والذي ينتشر حتى المرآة العاكسة AR باستخدام المعادلة التالية

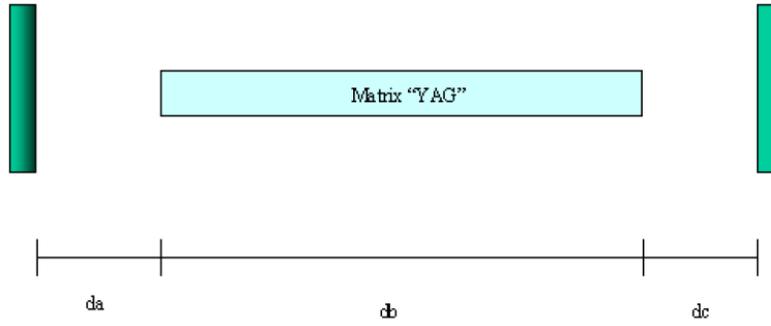
$$q2_6_5 := \frac{M_{eq6_5,0,0} \cdot q6_5 + M_{eq6_5,0,1}}{M_{eq6_5,1,0} \cdot q6_5 + M_{eq6_5,1,1}} \quad (E.9)$$

الطاقة الداخلة المحسوبة تعتمد على قيم متغير الشعاع المركب عند المرآة العاكسة والتي تساوي

	0
0	7.143·10 ⁻⁴ +0.249i
1	7.144·10 ⁻³ +0.227i
2	8.537·10 ⁻⁴ +0.208i
3	0.026+0.194i
4	0.024+0.168i
q2_values = 5	4.427·10 ⁻³ +0.165i
6	-1.375·10 ⁻³ +0.147i
7	-5.482·10 ⁻⁴ +0.134i
8	-7.327·10 ⁻⁴ +0.116i
9	-1.474·10 ⁻³ +0.098i
10	0.011+0.075i
11	7.223·10 ⁻³ +0.054i

(E.10)

وبعد تحديد معامل الشعاع المركب عند المرآة العاكسة AR، يمكن بناء نموذج المذبذب. وقد تم نمذجة بلورة Nd:YAG كأنبوبة رباعية مستقرة مع مرآتين مستويتين على كل الجانبين كما في الشكل E.2. وتم تكوين المصفوفة حسب ما هو مدرج في Siegman (1986). ومتغيرات المذبذب معرفة في الجدول E.2.



الشكل E.2 تعريفات المذبذب

الجدول E.2 قيم ثوابت المذبذب

Distance from AR mirror to crystal	$d_a = 0.161$	m
Distance from HR mirror to crystal	$d_c = d_a$	m
Length of crystal	$d_b = 0.178$	m
Index of refraction	$n_0 = 1.82$	

ولكي نجعل نموذج الأنبوبة الرباعية أسهل للتحليل فان التعويضات التالية تم استخدامها. والمشتقة العرضية b ، تعرف على النحو التالي:

$$b(n_2) := \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \quad (\text{E.11})$$

ويمكن ان ترتبط مع البعد البؤري المميز β من خلال المعادلة التالية:

$$b = \frac{2}{\beta} \quad (\text{E.12})$$

ولهذا، فان البعد البؤري المميز β يمكن أن يعرف بدلالة معامل الانكسار n_0 والتحدب للأسفل n_2 . والمعامل الاضافي 4 ينشأ من التعريف الموضح في Ifflaender (2001) أي أن،

$$\beta^2 = 4 \frac{n_0}{n_2} \quad (\text{E.13})$$

والمصفوفة التي تمثل مسار واحد خلال بلورة YAG والتي تم نمذجتها على إنها أنبوبية رباعية مستقرة وعرفت بدلالة البعد البؤري المميز β تكون على النحو التالي:



$$YAG(\beta) := \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2}{\beta} \cdot db\right) & \left(\frac{2}{\beta} \cdot n_0\right)^{-1} \cdot \sin\left(\frac{2}{\beta} \cdot db\right) \\ -n_0 \cdot \frac{2}{\beta} \cdot \sin\left(\frac{2}{\beta} \cdot db\right) & \cos\left(\frac{2}{\beta} \cdot db\right) \end{bmatrix} \quad (E.14)$$

والمسافات المطابقة من البلورة وحتى كل مرآة تعرف بواسطة المصفوفات التالية:

$$M_x := \begin{pmatrix} 1 & da \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (E.15)$$

و

$$M_y := \begin{pmatrix} 1 & dc \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (E.16)$$

والمصفوفة المكافئة للرحلة الكاملة خلال المذبذب تم تحديدها بالعلاقة التالية:

$$M_{res}(\beta) := M_x \cdot YAG(\beta) \cdot M_y \cdot M_y \cdot YAG(\beta) \cdot M_x \quad (E.17)$$

وباستخدام قيمة التخمين للبعد البؤري المميز المعتمدة على القيم المنشورة في بحث Ifflaender (2001) أي ان،

$$\beta := 0.37 \quad (E.18)$$

والمصفوفة المكافئة تمثل المذبذب موضحة في المعادلة E.17 ويمكن أن تقدر عدديا على النحو التالي:

$$M_{res}(\beta) = \begin{pmatrix} 0.059 & -0.085 \\ 11.747 & 0.059 \end{pmatrix} \quad (E.19)$$

بمعرفة قيمة q- وانه يجب أن تكون ذاتية التكرار بعد رحلة كاملة خلال المذبذب، فان المعادلات التي سوف تستخدم في ا لحسابات اللاحقة يجب ان تضمن تحقق هذا الشرط. وللطاقة الداخلة الابتدائية استخدمت طاقة قدرها 6.5 kW كمثال، واتبع نفس الطريقة للطاقات الأعلى. معادلة واحدة مطلوبة لكل مستوى طاقة أي ان،

$$Q_{2_6_5}(\beta) := \frac{M_{res}(\beta)_{0,0} \cdot q_{2_6_5} + M_{res}(\beta)_{0,1}}{M_{res}(\beta)_{1,0} \cdot q_{2_6_5} + M_{res}(\beta)_{1,1}} \quad (E.20)$$



الحل لكل جزء يمكن ان نحصل عليه باستخدام برنامج الماتكاد والذي سوف يجد الحل للبعد البؤري المميز للبلورة لضمان تحقق متغير الشعاع المركب ذو التكرار الذاتي. والقيم المخمنة مبدئيا تعرف في المعادلة E.18. وللحل يستخدم conjugate gradient و لوغاريثم Levenberg-Marquardt. وفي البداية تم استخدام Levenberg-Marquardt الغير خطية ولكن الحلول التي حصلنا عليها بواسطة هذا الحل كانت في بعض الأحيان مختلفة بشكل كبير عن الحلول التي حصلنا عليها لمستويات الطاقة المتقاربة. وفي هذه الحالات فان الحل يجب أن يتغير باستخدام طريقة conjugate gradient والحلول مرة أخرى اتبعت النماذج المثبتة. هذا التأثير في البداية حجب خلال طاقة الإدخال المنخفضة وفي بعض الأحيان لوحظ منطقة غير مستقرة في المذبذب. والطاقات العالية ($>12.5 \text{ kW}$) تم حلها باستخدام طريقة Levenberg-Marquardt. ولطاقة إدخال 6.5 kW ، فان جملة الحلة وضحت لحل β مع الشروط الابتدائية والمتطلبات الهامة. والمتطلبات هي ان تكون القيمة q ذاتية التكرار بعد دورة واحدة خلال المذبذب وتعطى على النحو التالي:

$$Q2_6_5(\beta) = q2_6_5 \quad (\text{E.21})$$

والماتكاد يولد حل لـ β والتي تحقق المطلوب والموضح في المعادلة E.21 والذي نحصل عليه من المعادلة التالية:

$$\text{sol6_5} := \text{Find}(\beta) \quad (\text{E.22})$$

وبتقدير هذا نحصل على

$$\text{sol6_5} = 0.552 - 9.914i \times 10^{-4} \quad (\text{E.23})$$

وباجراء الفحص للتأكد ان متغير الشعاع المركب هو في الحقيقة ذاتي التكرار. وهذا موضح على النحو التالي:

$$q2_6_5 = 7.143 \times 10^{-4} + 0.249i \quad (\text{E.24})$$

و

$$Q2_6_5(\beta6_5) = 7.143 \times 10^{-4} + 0.249i \quad (\text{E.25})$$



نتائج الحسابات لكل مستويات الطاقة الداخلة لضمان أن قيم- q الأصلية وتلك المحسوبة باستخدام البعد البؤري المميز تحقق شرط ذاتية التكرار كما هو موضح على النحو التالي:

	0
0	$7.143 \cdot 10^{-4} + 0.249i$
1	$7.144 \cdot 10^{-3} + 0.227i$
2	$8.537 \cdot 10^{-4} + 0.208i$
3	$0.026 + 0.194i$
4	$0.024 + 0.168i$
5	$4.427 \cdot 10^{-3} + 0.165i$
6	$-1.375 \cdot 10^{-3} + 0.147i$
7	$-5.482 \cdot 10^{-4} + 0.134i$
8	$-7.327 \cdot 10^{-4} + 0.116i$
9	$-1.474 \cdot 10^{-3} + 0.098i$
10	$0.011 + 0.075i$
11	$7.223 \cdot 10^{-3} + 0.054i$

$q2_values =$

	0
0	$7.143 \cdot 10^{-4} + 0.249i$
1	$7.144 \cdot 10^{-3} + 0.227i$
2	$8.537 \cdot 10^{-4} + 0.208i$
3	$0.026 + 0.194i$
4	$0.024 + 0.168i$
5	$4.427 \cdot 10^{-3} + 0.165i$
6	$-1.375 \cdot 10^{-3} + 0.147i$
7	$-5.482 \cdot 10^{-4} + 0.134i$
8	$-7.327 \cdot 10^{-4} + 0.116i$
9	$-1.474 \cdot 10^{-3} + 0.098i$
10	$0.011 + 0.075i$
11	$7.223 \cdot 10^{-3} + 0.054i$

$Q_calc =$

القيم المحسوبة للبعد البؤري المميز β باستخدام المعادلة E.22 عرفت في مصفوفة على النحو التالي:

	0
0	0.552
1	0.522
2	0.498
3	0.479
4	0.447
5	0.444
6	0.425
7	0.411
8	0.395
9	0.38
10	0.363
11	0.352

Beta =

(E.26)

والبعد البؤري للبلورة بالاعتماد على قيمة البعد البؤري المميز يمكن ان تحدد باستخدام التقريب الموجود في Koechner (1999). فقط الجزء الحقيقي للبعد البؤري المميز β هو الذي يعتبر. والتقريب للبعد البؤري يكون على النحو التالي:



$$f = \frac{\beta^2}{4 n_0 \cdot L_{rod}} \quad (E.27)$$

وباجراء الحل للبعد البؤري للبلورة باستخدام طاقة ادخال 6.5 kW نحصل على

$$f6_5 := \frac{Re(\beta6_5)^2}{4 \cdot n_0 \cdot L_{rod}} \quad (E.28)$$

والبعد البؤري على المعتمد على طاقة الإدخال على جهاز الليزر تعرف على انه المصفوفة المكونة من القيم التالية:

	0
0	0.235
1	0.21
2	0.191
3	0.177
4	0.154
focal_length=	5 0.152
6	0.14
7	0.131
8	0.12
9	0.111
10	0.102
11	0.095

(E.29)

والحسابات لمعامل حساسية البلورة تتطلب تعريف دليل يسمح بتشغيل مبسط مع استخدام المصفوفات. ولكي يتم تحديد معامل حساسية البلورة، فانه تم تحديد الفرق بين كل قيم البعد البؤري المحسوبة. وبتعريف الدليل على النحو التالي:

$$i := 10 \quad h := 1..i \quad (E.30)$$

والفرق في البعد البؤري المطابق لكل تغير في طاقة الإدخال إلى الليزر تحدد على النحو التالي:

$$\text{diff_f}_h := \text{focal_length}_h - \text{focal_length}_{h-1} \quad (E.31)$$

والتغير في الطاقة الداخلة على الليزر يحدد على النحو التالي:

$$\text{diff_P_in}_h := P_{in}_h - P_{in}_{h-1} \quad (E.32)$$

ومعامل حساسية البلورة يعرف على النحو التالي:



$$\text{Rod_sens}_h := \frac{1}{\text{diff_f}_h \cdot \text{diff_P_in}_h \cdot 1000} \quad (\text{E.33})$$

والتغير في البعد البؤري لليزر كما حسبناه باستخدام المعادلة E.31 هو

diff_f_h=

-0.025
-0.019
-0.014
-0.023
-1.903·10 ⁻³
-0.013
-8.98·10 ⁻³
-0.01
-9.198·10 ⁻³
-9.602·10 ⁻³

(E.34)

ومعامل حساسية البلورة M-1 يحدد باستخدام المعادلة E.33 وحصلنا على القيم التالية:

	0
0	-0.04
1	-0.053
2	-0.071
3	-0.044
4	-0.526
5	-0.078
6	-0.111
7	-0.098
8	-0.109
9	-0.104

(E.35)