



في الوقت الحالي يلعب الدايمود المستخدم في ضخ ليزر الحالة الصلبة دورا مهما في التطبيقات الصناعية. وخاصة في التطبيقات مثل الثقب الدقيق، واللحام، والقطع، وهناك حاجة ماسة لأشعة الليزر عالية الطاقة من النوعية الجيدة. ولذلك، فانه من المهم جدا حل مشاكل عديدة مثل العدسة الحرارية والإجهاد المسبب للتشققات والكسور في ساق الليزر الذي تواجه أنظمة ليزر الحالة الصلبة التي تعمل عند طاقات عالية. في ليزرات الحالة الصلبة، جزي من طاقة الضخ تتبدد على شكل طاقة حرارية، والذي يتم التخلص منها عن طريق التبريد الخارجي للمادة الفعالة لليزر. التزايد في درجة الحرارة الناتجة من محور الليزر وحتى السطح يكون هو المسئول عن التأثيرات الحرارية في المادة الفعالة لليزر (1). وببساطة، ثلاثة تأثيرات بصرية تساهم في وجود العدسة الحرارية:

- (1) التغير في معامل الانكسار مع درجة الحرارة dn/dT (التشتيت الحراري).
 - (2) الانحناء في نهاية الوجهين لساق الليزر بسبب التمدد الحراري (تأثير نهاية وجهي الليزر).
 - (3) الإجهاد المتسبب في ظاهرة الانكسار birefringence.
- التأثيرات الحرارية البصرية على أداء الليزر هي:
- (i) نطاق محدود للاستقرار في المذبذب.
 - (ii) التغير في خواص الشعاع مع تغير طاقة الضخ.
 - (iii) نقصان جودة الشعاع، (الزيادة في معامل M^2) نتيجة لتشوهات في الطور والنسبة الغير مرغوب فيها بين ساق الليزر وقطر النمط TEM_{00} .
 - (iv) التأثيرات الناتجة عن عدم الاستقطاب والتبئير المزدوج (مما يؤدي إلى تراجع في جودة شعاع الليزر).



النقطة (i) هي الأكثر حساسية في ليزرات الطاقة العالية، مع النقطة (iii) فان واحد له الخيار لتضييق نطاق الاستقرار مع الحفاظ على شعاع ذو جودة جيدة او الحصول على شعاع بنطاق استقرار كبير مع شعاع بجودة سيئة (2)، انظر النظرية أدناه للمزيد من التفاصيل.

التعويض الكامل لعدم الاستقطاب تم انجازه حاليا (3)، (4). الحلول لتعويض العدسة الحرارية باستخدام مرآة محدبة (5) أو بعدسة سالبة مثبتة في نهاية الساق (6،7) هي مخصصة لحالة الطاقة الثابتة ولكن لا تمتد إلى نطاق الاستقرار. التأثير الحراري المسبب لوجود عدسة ممكن ان يقلل من خلال استخدام التبريد الطولي لمادة ليزر فعالة على شكل قرص رقيق ولكن هذه التقنية ليست مناسبة للمواد ذات الامتصاص المتوسط مثل Nd:YAG (8)، ولا تزال تعاني من تشوهات بصرية كبيرة عند الطاقات العالية (9).

المشكلة الأساسية باستخدام التعويض للعدسة الحرارية هو الحفاظ على تعويض جيد مع التشويه الأمامي في الطور على نطاق واسع من طاقة الضخ. لان العدسة الحرارية في ساق الليزر تتغير مع طاقة الضخ المتغيرة، فان التعويض باستخدام عدسة يجب أن تكيف نفسها مع هذه التغيرات. وحديثاً، فان نظام التكيف الذاتي والذي يوازن العدسات الحرارية في مذبذبات الليزر مدرج في المرجع (10). يوضع داخل المذبذب ساق إضافية ذات معامل انكسار له اعتماد سالب على درجة الحرارة. والحرارة لهذا العنصر المكافئ من خلال امتصاص ضعيف لطاقة التجويف الداخلي لليزر يسبب عدسة سالبة. والحرارة من الليزر نفسه، فان العدسة ذاتية التكيف وكل المتغيرات تتعدل بشكل مناسب، وتوازن العدسة الموجبة في ساق الليزر. وكبديل أكثر دقة، فإننا هنا نعرض ساق مركبة مصنوعة Nd:YAG موضوعة بين ساقين من الزجاج أو العكس أي ساق من الزجاج محاطة بساقين من Nd:YAG، كما هو موضح في الشكل 1 و 2. في هذه الحالة فان مقاطع الزجاج تسخن بحرارة التوصيل من خلال زجاج الـ YAG ولا يتطلب هذا أي امتصاص. وبعد ذلك مباشرة، فان



العدسة الموجبة في مقطع Nd:YAG تتوازن مع العدسة السالبة في مقاطع الزجاج. وبوضوح، للحصول على تعويض جيد فان عنصر التعويض يجب ان يحتوي على تغير في معامل الانكسار dn/dT سالب وقوي. بالإضافة إلى أن عنصر التعويض يجب ان يكون تقريبا له نفس معامل التمدد الحراري مثل مادة الليزر للتغلب على مشكل الإجهاد الحراري بين مادة الليزر وعنصر التعويض. وللتحقيقات الموضحة في هذا التقرير، فان المحاكاة باستخدام العنصر المحدود finite element (FE) استخدمت لحساب الحرارة المتولدة على المسار البصري (OPD) اختصار لـ optical path difference وهذه النتائج استخدمت لتحليل التغير في قوة الانكسار الناتجة عن العدسة الحرارية في تركيب ساق Nd:YAG وساق زجاج (PK51A). ومقارنات في هندسة سيقان مختلفة وتوزيعات من الضخ موضحة هنا.

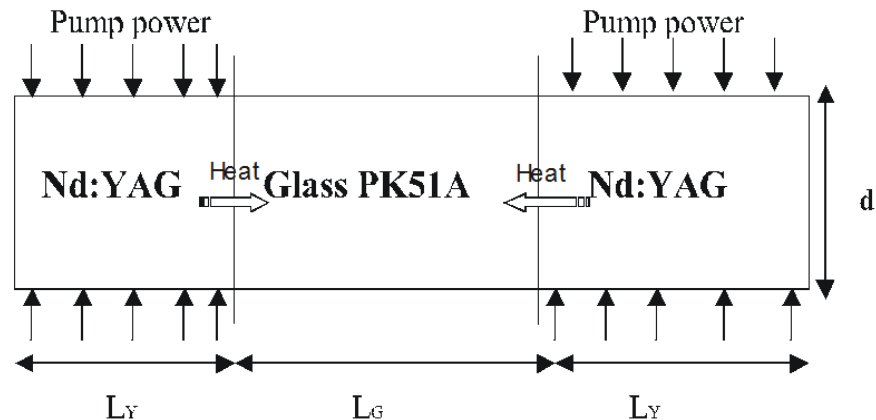
الشكل 1 يوضح التصميم الأول، الذي عرفناه باسم YGY. عنصر التعويض الزجاجي موضوع بين ساقين Nd:YAG. الشكل 2 يوضح التصميم الثاني والذي عرفناه باسم GYG، حيث أن Nd:YAG موضوع بين ساقين تعويض زجاجيين. في كلا التصميمين مقطع Nd:YAG يضخ بشكل عرضي. وتم فحص ودراسة عدد واسع من مختلف القوى وأشكال هندسية من Nd:YAG-الزجاج.

النظرية Theory

العدسات الحرارية The thermally induced lenses

في ليزر الحالة الصلبة، فان الاختلاف في طاقة الضخ عن طاقة فوتونات الليزر يتحول إلى حرارة. عند توزيع حراري معين فانه ذلك يتسبب في توزيع معين لدرجات الحرارة $T(x,y,z)$ كما هو محدد

بواسطة معادلة التوصيل الحراري. والتبريد عند السطح والتسخين في المادة سوف يؤدي إلى تزايد درجة الحرارة وبالتالي يتسبب في تدفق حراري.



الشكل 1 رسم تخطيطي لتصميم YGY. و L_Y هي طول بلورة Nd:YAG، و L_G طول الزجاج، و d هي قطر الساق المركب.

التشويه البصري الناتج في ساق الليزر ناتج عن التوزيع الغير منتظم لدرجات الحرارة في الليزر. لساق متجانس حراريا نصف قطره R_{rod} وطوله L_{rod} بحيث بان $L_{rod} \gg R_{rod}$ فان الاختلاف في درجات الحرارة ΔT بين سطح الساق ومركزه يعطى على النحو التالي المرجع (1)

$$\Delta T_{rod} = \frac{1}{4\pi \cdot K} \frac{P_{heat}}{L_{rod}}, \quad (1)$$

حيث K هي التوصيل الحراري للساق، و P_{heat} هي الطاقة الكلية المتحولة إلى حرارة. وهذا يعني انه لهذه الحالة الخاصة فان الاختلاف في درجة الحرارة بين سطح الساق ومركزه لا يعتمد على نصف القطر ولكن فقط على الحرارة المتبددة لكل وحدة طول من الساق.

الطاقة البصرية (الناتجة عن الانكسار) من مساهمة التشتت الحراري تعطى على النحو التالي المرجع (1)



$$D_{dn/dt} = \frac{dn/dt}{2 \cdot \pi \cdot K} \cdot \frac{P_{heat}}{R_{rod}^2} \quad (2)$$

التوزيع الغير منتظم لدرجة الحرارة أيضا يؤثر على السلوك الميكانيكي للمادة. الإجهاد الناتج عن الحرارة سوف يتسبب في حدوث تغيرات في معامل الانكسار نتيجة للتغيرات البصرية المرنة في معامل الانكسار. ومشاركة الطاقة البصرية من العدسة البصرية المرنة يعطى بالمرجع (1).

$$D_{r,\phi} = \frac{2 \cdot \Delta T_{rod} \cdot L_{rod}}{R_{rod}^2} (\alpha_{exp} \cdot C_{r,\phi} \cdot n_0^3), \quad (3)$$

حيث α_{exp} هي معامل التمدد الطولي للساق، و $C_{r,\phi}$ هي المعامل البصري المرن و n_0 هي معامل الانكسار الغير مشوش. والإجهاد المسبب للعدسة في المعادلة (3) يعتمد على الاستقطاب الموضعي للشعاع ويؤدي إلى ما يعرف بظاهرة التبئير المزدوج bifocussing effect. بالإضافة إلى الإجهاد يسبب تغيرات في معامل الانكسار الموضعي فان هذا يؤدي إلى حرارة تعمل على تشويه الاستقطاب.

المزيد من المساهمات للعدسة الحرارية الكلية يتسبب في انحناء لوجهي نهاية الساق وهذا ناتج عن التمدد الحرارية للساق. ومدى هذا التأثير هو تقريبا نصف قطر الساق عندما يكون الساق متجانس حراريا. وهذا يعني ان المنطقة الغير مضخة عند نهايتي الساق تكون اعرض من نصف قطر الساق، وتمدد الساق يكون متساوي لكل مساحة مقطع الساق. ولكل ساق ذو ضخ متجانس فان تأثير الطاقة البصرية لتأثير نهاية طرفي الساق تعطى على النحو التالي (المرجع (1))

$$D_{endeffect} = \frac{\alpha_{exp} \cdot (n_0 - 1)}{\pi \cdot K} \cdot \frac{P_{heat}}{L_{heat} \cdot R_{rod}} \quad (4)$$

وفي النهاية، إذا كان المذبذب طويل بالمقارنة مع طول ساق الليزر المتعرض لعملية الضخ، فان المساهمات المختلفة للعدسة الحرارية يمكن أن نعتبره مكون من مجموعة من العدسات الرقيقة



المتلاصقة مع بعضها البعض والطاقة البصرية للساق تعطي بجمع هذه العدسات كلها. وبإهمال الطاقة البصرية الضعيفة التي تكون موجودة بسبب عدسة ناتجة عن الإجهاد فان الطاقة البصرية الكلية للساق تعطى على النحو التالي:

$$D_{thermal} = D_{dn/dt} + D_{endeffect} . \quad (5)$$

تأثير العدسة الحرارية على خواص شعاع الليزر

تأثير العدسة الحرارية على شعاع الليزر سبق وان ذكر في المقدمة. في هذا الجزء نناقش العلاقة بين مدى الطاقة وجودة الشعاع.

سوف نبدأ من النتائج التي نشرت في المراجع (2، 11-12): بزيادة طاقة الضخ، يتغير البعد البؤري للعدسة الحرارية في وسط التكبير ويعدل من أنماط الليزر واستقرار المذبذب. المذبذب سوف يكون مستقرا في مدى محدد من طاقة الضخ وليكون هذا المدى هو ΔP . ومن المرجح (2) بمعزل عن الاستثنائين (نهاية الضخ و المذبذبات المتماثلة) فان الليزر بعدسة حرارية واحدة في تجويفه يكون عادة له منطقتين من الاستقرار بمدى ذو اتساع متساوي. وفي هذين المنطقتين من الاستقرار فان نصف قطر الأنماط عند موضع العدسة الحرارية يتغير بشكل كبير، يكون لانهاية عن أطراف مدى الاستقرار وقيمة دنيا w_{min} في أي منطقة بينهما. ولكي نحصل على جودة شعاع جيدة، فان نصف قطر الشعاع الجاوسين في الوسط يجب أن تكون اكبر ما يمكن. والعلاقة العامة بين اقل نصف قطر للنمط الأساسي w_{min} في ساق البلورة ومدى الطاقة البصرية ΔD_{therm} للعدسة الحرارية حيث يكون المذبذب مستقرا يعطى في المرجع (2) على النحو التالي:

$$\Delta D_{therm} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot w_{min}^2} , \quad (6)$$



حيث λ هي الطول الموجي لليزر. وبصفة عامة، في الليزر الذي يحتوي على عدسة حرارية واحدة في المذبذب، فإن نصف قطر الأنماط الأساسية تصل إلى الحد الأدنى $w_{\min}$ مرتين، مرة في كل مدى للمنطقتين المستقرتين المتساويتين الاتساع. ولكن، إذا كانت العدسة الحرارية موجودة بالضبط في المركز بين المرآتين المتماثلتين، فإن الفجوة بين منطقتي الاستقرار سوف تختفي (11، 2). منطقتي الاستقرار تندمجان لتشكل أكبر قيمة ممكنة من مدى الاستقرار (13) وهذا يعطى على النحو التالي:

$$\Delta D_{therm} = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot w_{\min}^2} \cdot \quad (7)$$

في التقريب من الرتبة الأولى، وبناء على المعادلة (2) و (4) و (5) فإن الطاقة البصرية للعدسة الحرارية الكلية يمكن التعبير عنها بالشكل التالي:

$$D_{therm} = P_{pump} \cdot \frac{D^*}{\pi \cdot w_p^2}, \quad (8)$$

حيث w_p هي نصف القطر الفعال لمنطقة الضخ و D^* ثابت، والذي نسميه بالطاقة البصرية النوعية ($mm^2 W^{-1} m^{-1}$). الطاقة البصرية النوعية تعتمد على طريقة التبريد و على نوع مادة بلورة الليزر.

ومن المعادلة (8) فإن المنطقتين ΔD_{therm} ومدى طاقة الضخ ΔP ترتبطان على النحو التالي:

$$\Delta D_{therm} = \Delta P_{pump} \cdot \frac{D^*}{\pi \cdot w_p^2}, \quad (9)$$

وبادخال المعادلة (7) فإن ΔP تكون على النحو التالي:

$$\Delta P = 4 \cdot \lambda \cdot \frac{w_p^2}{w_{\min}^2 \cdot D^*} \cdot \quad (10)$$

بافتراض إن كل الأنماط المستعرضة تتذبذب لها نصف قطر اصغر من نصف قطر منطقة الضخ، فإن معامل انتشار الشعاع M^2 يمكن يحسب بتقريب جيد باستخدام (انظر الملحق)



$$M^2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{w_p}{w_{\min}} \right)^2 + \frac{1}{2}. \quad (11)$$

بإدخال المعادلة (10) في المعادلة (11) فإن معامل جودة الشعاع يمكن أن نعبر عنها بالشكل التالي:

$$M^2 = \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{\Delta P \cdot D^*}{\lambda} \right) + \frac{1}{2}. \quad (12)$$

المعادلة (12) تخبرنا إن المدى الكبير لطاقة الضخ وجودة الشعاع لا يمكن أن تتحقق في نفس الوقت بدون المزيد من القياسات. ولكي نحافظ على مدى الاستقرار الكبير بشعاع بجودة عالية فإن قيمة الطاقة البصرية النوعية الكلية D^* يجب أن تقل. هذا يمكن أن ينجز بواسطة التعويض المناسب للعدسات الحرارية وهذا هو الهدف من هذه الدراسة. وفي كلا النموذجين المقترحين لتصميم وتركيب ساق الليزر، سوف نحاول أن نحصل على أقل قيمة لـ D^* لساق الليزر المركب.

تنفيذ كود العنصر المحدود finite-element

الساق المركبة التي تحت الفحص والتحقق منها في هذا البحث لا يمكن أن تتمذج بواسطة طريقة تحليلية بسيطة تلك التي نوقشت في الجزء السابق. وذلك بسبب التركيب المعقد كثيرا للساق التي نقوم بتجهيزها ولكي نحصل على معلومات تفصيلية أكثر عن التأثير الحراري لهذه العناصر فإن كود العنصر المحدود SESES finite-element (14) تم استخدامه. وفي الخطوة الأولى حل SESES معادلة التوصيل الحراري في الثلاثة أبعاد (معادلة بوزون) في ساق الليزر الذي يحتوي على مصدر حراري لا يعتمد على الزمن $q(x, y, z)$ ، وتوزيع درجة الحرارة المستقر $T(x, y, z)$ موضح في المعادلة التالية (المرجعين 15، 16)

$$\nabla^2 T(x, y, z) + \frac{q(x, y, z)}{K(T)} = 0, \quad (13)$$



الشروط الحدية المستخدمة لحل المعادلة (13) تعطى من خلال قانون نيوتن لتحول الحراري وهي

$$K \cdot \frac{\partial T}{\partial N} \Big|_s = h \cdot (T_c - T_s), \quad (14)$$

حيث T_c هي درجة حرارة المبرد والذي يفترض انه ثابت، T_s هي درجة الحرارة الموضعية على سطح الساق s ،

و N هي العمودي على السطح، و h هي معامل التحول الحراري (17).

برنامج محاكاة العنصر المحدود SESES finite element (14) يحسب توزيع درجة الحرارة

$T(x, y, z)$ كأساس يعتمد على الإزاحة الموضعية والإجهاد في البلورة وتأثير معامل الانكسار.

فرق المسار البصري في داخل الليزر

فرق المسار البصري optical path difference والذي نعرفه بالاختصار (OPD) يعطى

بواسطة الإزاحة في الطور الذي يعاني منه الضوء المنتشر خلال ساق الليزر بالمقارنة مع الانتشار

في الوسط بدون عائق. ونتيجة لتوزيع درجة الحرارة الغير متجانس، فان فرق المسار البصري

يكون دالة في البعدين المستعرضين x و y (انظر الشكل 3) وبإتباع المرجعين (18،19)، فان فرق

المسار البصري للشعاع الذي يعبر في الاتجاه z (الشكل 3) خلال البلورة والتي طولها l يعطى على

النحو التالي:

$$OPD_{calc}(x, y) = \int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} \cdot T(x, y, z) \cdot dz + (n_0 - 1) \cdot \Delta l(x, y), \quad (15)$$

حيث إن حد التكامل يحتوي على التشتت الحراري $\partial n / \partial T$ يصف مساهمة الجزء الحراري، أي أن

تكامل التغير في معامل الانكسار على طول مسار الشعاع الموازي لمحور الساق. والحد الذي

يحتوي على $\Delta l(x, y)$ يصف تأثير نهايتي الوجهين، أي التمدد المحوري في البلورة عند النقطتين

(x, y) و n هي معامل الانكسار للبلورة. ولكي نجد الطاقة البصرية للعدسة المكافئة فان القيمة

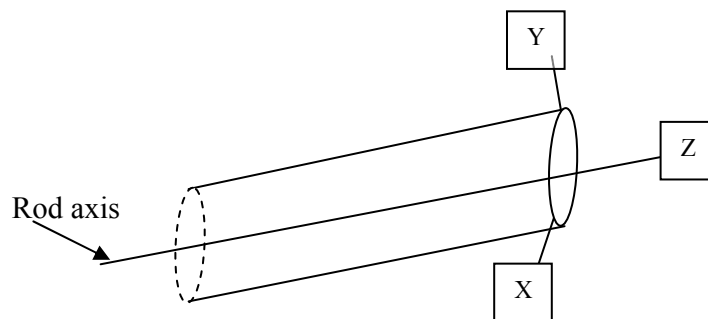


المحسوبة $OPD_{calc}(r)$ تم ملائمتها مع القطع المكافئ لـ $OPD_{lens}(r)$. فرق المسار للعدسة الرقيقة

الكروية الشكل بطاقة بصرية قدرها D تعطى على النحو التالي:

$$OPD_{lens}(r) = OPD_0 - \frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot D, \quad (16)$$

حيث r هو المسافة بين محور الساق وفرق المسار، وفرق المسار عند $r=0$.



الشكل 3 يوضح الإحداثيات الاسطوانية لساق الليزر.

تمت الترجمة بالمركز العلمي للترجمة

www.trgma.com

21-11-2009



- [1] W. Koechner, "Solid- State Laser Engineering", Series in Optical Science, Springer, Berlin, 1996.
- [2] V Magni, "Resonator for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability", App Opt., 25 (1), January 1986, pp. 107-117.
- [3] Q. Lü, N. Kugler, H.Weber, S. Dong, N.Müller and U.Wittrock, "A novel approach for compensation of birefringence in cylindrical Nd:YAG rods" Optical and Quantum Electronics, vol.28, pp.57-69, 1996.
- [4] N.Kugler, H.Weber, S.Dong, N.Müller, U.Wittrok, "A novel approach for compensation of birefringence-compensation two-rod Nd:YAG laser system", Applied Optics 36, 1997, 9359-9366.
- [5] C. M. Stickley, "Laser Brightness, gain and mode control by compensation for thermal distortion, IEEE J.Quantum Electron.QE-2, 511 1996.
- [6] L.M.Osternik and J.D.Foster," Thermal effect and transverse mode control in a Nd:YAG laser," Appl.Phys.Lett.12, 128 1968.
- [7] F.A. Levie, "TEM enhancement in CW Nd:YAG by thermal lensing compensation," IEEE J.Quantum Eelectron.QE-7, 170 1970.
- [8] Y. Lion, R. J. D. Miller and M. R. Armstrong "Pressure tuning of thermal lensing for high-power scaling", Optical Society of America vol.24, pp. 1343-1345,1999.
- [9] Chr. Stewen, M. Larionov, A. Giesen, "Yb:YAG thin disk laser with 1 kW output power" ASSL conference 13-16 February 2000, Davos Congress Center, Davos, Switzerland.
- [10] Thomas Graf, Rudolf Weber, Eduard Wyss, and Heins P. Weber, Photonic west, Conference on Laser Resonator III, 22-28 Jan.2000 San Jase, USA.
- [11] K. P. Driedger, R. M. Iffländer and H. Weber, "Multirod resonator for high solid state lasers with improved beam quality" IEEE J.Quantum Electron.24 (4), 4 April 1988, 665-674.
- [12] M.E. Innocenzi, Hura, C.L.Fincher and R.A. Fields,"Thermal moduling of contiuous-wave end-pumped solid state lasers", Appl. Phys. Lett. 56 (19), 7 May 1990,pp 1831-1833.
- [13] Th.Graf, J. E. Balmer, R. Weber, H. P. Weber, "Multi-Nd:YAG-rod variable-configuration resonator (VCR) end pumped by multiple diode-laser bars" Optics Comm. 159 (1999) 83-87.
- [14] Nm SESEStm (Semiconductor Sensor and actuator Simulation) is distributed by Numerical Modelling GmbH, c/o Winterthur Institute, Postfach, CH-8401 Winterthur, Switzerland.



- [15] J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn, J. Unternahrer and R. L. Byer, "The slab geometry Laser-part 1: Theory", IEEE J. Quant. Electron. vol.20, no.3, pp. 289-301, march 1984.
- [16] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, "Conduction of heat in solids", 2nd ed., Oxford: Clarendon, 1989.
- [17] W. Koechner, " Absorbed pump power, Thermal profile and stresses in a cw pumped Nd:YAG crystal", App. Opt., vol. 9, no. 6, pp. 1429-1434, June 1970.
- [18] A. K. Cousins, " Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods", IEEE J. Quant Electron., vol.28, no.4, pp.997-1009, April 1992.
- [19] C. Pfister, R. Weber, H. P. Weber, S. Merazzi and R. Gruber, "Thermal beam distortions in end-pumped Nd:YAG, Nd: GSGG, and Nd:YLF rods", IEEE J. Quant. Electron., vol.30, no. 7, pp.1605-1615, July 1994.
- [20] D. C. Brown, " Ultrahigh-Average Power Diode Pump nd:YAG and Yb:YAG lasers" IEEE J. Quant Electron., vol. 33, pp. 861-873 (1957).
- [21] Schott Glaswerke, Optische Glass, Hattenbergstrasse 10, W-6500 Mainz, Germany