

文章编号: 0258-7025(2005)03-0297-04

高功率激光二极管端面抽运复合晶体 激光器的研究

李志刚^{1,2}, 熊政军², 黄维玲¹, 陈 涛², Nicholas Moore², G. C. Lim²

(¹ 华中科技大学激光工程技术研究院, 湖北 武汉 430074
² Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore 638075)

摘要 在高功率激光二极管抽运固体激光器中,热效应已成为获得高输出功率和高光束质量的最大阻碍因素。用有限元方法研究了高功率激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器中热透镜分布规律,提出了用复合晶体消除热透镜效应的方法。研究表明在端面抽运的传统单一 Nd:YVO₄ 晶体激光器中,由于抽运功率密度很高,热透镜效应非常严重,由端面变形而造成的热透镜效应约占整个热透镜效应的 50%;而采用复合晶体能够很好地消除由端面变形而造成的热透镜效应,同时得到很好的冷却效果,获得比采用传统单一晶体高出许多的基模输出功率和更好的光束质量。实验证明,采用复合结构晶体在 23 W 的抽运功率水平下得到了 11 W 的基模输出功率,光束质量因子 $M^2 < 1.5$,光-光转换效率达到 48%。

关键词 激光技术;激光二极管端面抽运;热透镜;有限元;Nd:YVO₄晶体;复合晶体

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Study of High Power Laser Diode End-Pumped Composite Crystal Lasers

LI Zhi-gang^{1,2}, XIONG Zheng-jun², HUAHG Wei-ling¹,
CHEN Tao², Nicholas Moore², G. C. Lim²

(¹ Institute of Laser Engineering & Technology, Huazhong University of
Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² Singapore Institute of Manufacturing Technology, 638075 Singapore)

Abstract Effect of thermal lensing is the main obstacle of getting high power and good beam quality in laser diode (LD)-pumped solid-state lasers. A theoretical investigation of effects of thermal lensing in an end-pumped Nd:YVO₄ laser is demonstrated using finite-element-method, showing that the thermal lensing effect in high power LD-pumped Nd:YVO₄ lasers is very serious, particularly the end deformation which accounts for 50% of the overall thermal lensing effect. The employment of a composite crystal has been demonstrated to be a useful method in relieving the thermal lensing, resulting in higher output power and better beam quality. The fundamental mode output power as high as 11 W has been achieved with 23 W pump power in composite crystal, the beam quality factor M^2 is less than 1.5, and O-O conversion efficiency is up to 48%.

Key words laser technique; LD-pumped solid state laser; thermal lensing; finite element method; Nd:YVO₄ crystal; composite crystal

1 引 言

激光二极管抽运固体激光器(DPSSL)由于其效率高、结构紧凑、光束质量好、寿命长、可靠性高的

特点已引起人们广泛的关注^[1~4],其主要目标是追求更高的输出功率和更好的光束质量。随着二极管激光器输出功率的不断提高和光纤耦合输出技术的

收稿日期:2003-10-08;收到修改稿日期:2003-12-16

作者简介:李志刚(1976—),男,武汉人,华中科技大学博士研究生,主要从事激光二极管抽运固体激光器的研究。

E-mail:lzgtg@sina.com, lzgtg@hotmail.com

出现,人们已经可以得到很高的抽运功率,但此时热效应已成为阻碍获得更高输出功率的关键因素之一。因此研究和消除这种热效应已成为一个非常重要的课题。目前虽然已有许多关于热效应研究的文献,但大多数的研究对象集中在 Nd:YAG 晶体上^[5]。而 Nd:YVO₄ 晶体由于本身的材料特性与 Nd:YAG 有很大差别,它们的热效应特性也很不相同。在端面抽运 Nd:YAG 激光器中,约 30% 的热透镜效应来自端面变形所造成的影响^[6]。最近的研究发现,在端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器中,由端面变形引起的热透镜效应占了整个热透镜效应的 50%,而采用一种复合结构的晶体,则能很好地消除由端面变形引起的热透镜效应。

2 理论模型

在激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器中,热透镜效应主要来自两个部分:一部分来自 Nd:YVO₄ 晶体的热光特性,晶体的折射率随温度的变化而变化,在抽运中心温度高,折射率变化大,在靠近抽运边缘部分温度低,折射率变化小,所以当光束经过该晶体时就会形成类似于透镜的光程差;另外一部分来自晶体的热机械特性,由于热膨胀过程,晶体端面也会由于热分布不均匀而形成类似球面透镜的曲面。当激光通过该晶体时,由于热效应而带来的总光程差可以表示为以下形式^[7]

$$\text{OPD}(x, y) = \int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} [T(0, 0) - T(x, y)] dz + n_0 \Delta u(x, y) + \sum_{i, j=1}^3 \int_0^l \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{ij}} \epsilon_{ij}(x, y) dz, \quad (1)$$

n 和 n_0 分别为晶体在温度 T 和室温 T_0 下的折射率, $\Delta u(x, y)$ 为热引起的端面变形量。(1)式第一项表示由于折射率变化而形成的光程差,第二项和第三项分别是由于端面变形和应力双折射的影响所形成的光程差。因为 Nd:YVO₄ 晶体本身具有很强的自然双折射特性,所以第三项的影响很小,可以忽略不计。在抽运区域,热透镜焦距可以近似地用球面透镜焦距计算公式来拟合^[7]

$$f(x, y) = \frac{(x^2 + y^2)/2}{\text{OPD}_0 - \text{OPD}(x, y)}, \quad (2)$$

OPD₀ 代表了轴心处的光程差,这里变量是 x, y 而不是 r ,这是因为 Nd:YVO₄ 晶体的热光特性并不是轴对称的。

3 实验装置

测量热透镜焦距的实验装置如图 1 所示。这个装置原理类似于泰曼-格林干涉仪^[7]。当氦氖激光通过 Nd:YVO₄ 晶体时,在晶体远离抽运端的端面上,入射光和抽运端面的反射光发生干涉而形成干涉条纹,经过透镜成像到 CCD 相机上,就可以记录出干涉条纹。利用这些干涉条纹就可以拟合得出热透镜焦距。实验中所使用的抽运光源是一个 30 W 光纤耦合输出的半导体激光器,光纤的芯径为 0.8 mm,数值孔径为 0.22,经过一对准直聚焦透镜后,光斑被聚焦成直径为 0.45 mm 的圆形光斑,实际入射到晶体上的最大抽运功率为 23 W。所使用的单一晶体大小为 3 mm×3 mm×5 mm;复合晶体由福建华科光电有限公司提供,其大小为 4 mm×4 mm×10 mm(理论模拟结果表明 3 mm×3 mm×10 mm 与 4 mm×4 mm×10 mm 的晶体的热透镜焦距没有大的区别,为了保证晶体的强度,这里选用了较大的晶体),其中非掺杂部分为 4 mm×4 mm×4 mm,掺杂部分为 4 mm×4 mm×6 mm,两种晶体掺杂的 Nd³⁺ 离子原子数分数为 0.5%。晶体抽运端面镀有 808 nm 的增透膜和 1064 nm 的高反膜,另外一端镀有 1064 nm 的增透膜。

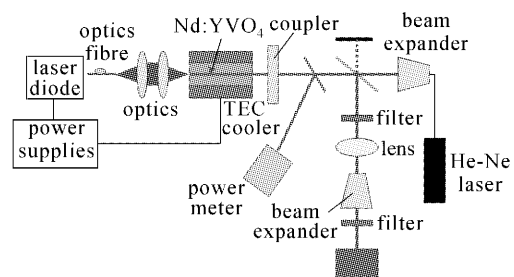


图 1 热透镜效应的测量装置原理图

Fig. 1 Experimental setup used to measure thermal lensing effect

4 结果和讨论

根据理论和边界条件,用有限元分析软件 ANSYS 分别模拟了不同功率水平下晶体的温度分布情况。图 2(a)给出了传统单一 Nd:YVO₄ 晶体的三维温度分布,其抽运光斑半径为 0.4 mm。图 2(b)给出了两种晶体在抽运中心沿着轴线方向上的温度变化分布,图 2(b)中横坐标零点是传统单一晶体的入射面,也是复合晶体掺杂部分和非掺杂部分的结合面,负坐标代表了复合晶体的非掺杂部分。

从图中可看出,在采用了复合晶体后,大量热通过非掺杂晶体的端面被传走,整个晶体温升大大降低,从 171 K 降低到 96 K,这说明复合晶体的非掺杂部分是一个很好的传热体,利用它可以大大减少晶体中的热积累。计算结果表明这两种晶体由于折射率变化形成的热透镜焦距相差并不大,只有 1%~5% 的差别,这是因为非掺杂晶体的散热主要还是通过径向散热实现的。

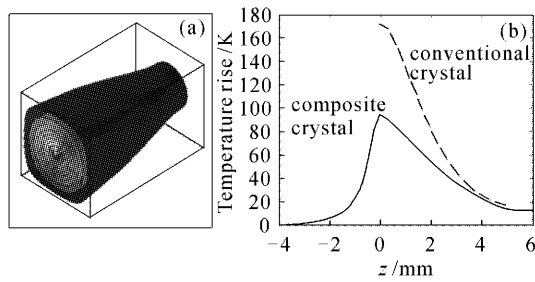


图 2 晶体在 20 W 抽运功率下的温度分布图

(a) 三维温度分布; (b) 轴线上温度分布

Fig. 2 Temperature distribution in the crystal with a pump power of 20 W and a waist radius of 0.4 mm
(a) 3D temperature distribution; (b) on-axis temperature rise

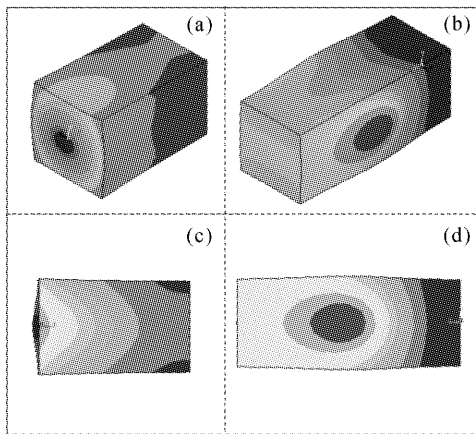


图 3 单一晶体和复合晶体在 20 W 抽运功率下的热变形图

(a) 单一晶体; (b) 复合晶体;

(c) 单一晶体的侧视图; (d) 复合晶体的侧视图

Fig. 3 Simulated thermal deformation of the crystals under 20 W pump power

(a) conventional crystal; (b) composite crystal;

(c) side view of conventional crystal;

(d) side view of composite crystal

虽然复合晶体并不能有效地减轻由于折射率变化而形成的热透镜效应,但是它可以有效降低晶体本身的温度,减小热应力,更重要的是它可以消除端面变形形成的热透镜效应。图 3 给出了晶体在 20

W 抽运功率下产生热变形后的形状。图 3(a)和(b)分别为传统单一晶体和复合晶体变形后的形状,图 3(c)和(d)分别为它们对应的侧视图。从图中可以看出,在抽运光入射端面,传统单一晶体的端面有一个很明显的类似于球面透镜的变形,在抽运端面,中心比边缘部分凸出 $0.43 \mu\text{m}$,另一端,中心比边缘凸出 $0.07 \mu\text{m}$;而在复合晶体中,两个端面的变形相对较小,在抽运端面,中心比边缘部分凸出 $0.19 \mu\text{m}$,在另一端,中心比边缘部分凸出 $0.05 \mu\text{m}$ 。这主要是因为采用了复合结构晶体后,整个晶体的温度大大降低,而且复合晶体温度最高点不在晶体端面而是在晶体内部(如图 2(b)所示),这部分的膨胀受到非掺杂部分晶体的限制,所以在采用了复合结构的晶体以后,可以较好地消除端面变形带来的热透镜效应。同时由于复合晶体的两个端面温度变化不大,这样不仅消除了端面的热变形,也使端面镀膜层不会因为高温和热应力而遭到破坏,而在采用传统的单一晶体时,由于端面的温升高达 171 K,所以端面镀膜层经常会有被破坏的情况发生。根据图 3 中端面变形计算得出的结果表明,传统单一 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体中由于端面变形而形成的热透镜焦距与折射率变化形成的热透镜焦距几乎相等;相比之下,复合结构晶体端面变形形成的热透镜效应则小得多,只占大约 10%。实验结果跟理论模拟结果吻合得很好。

由于复合晶体大大降低了 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的温度和热应力,从而很好地改善了端面变形带来的热透镜效应,在同样抽运功率水平下可以得到更高的输出功率和更好的光束质量。图 4 和图 5 分别给出了输出功率和光束质量随抽运功率的变化曲线。从图 4 可以看出,复合晶体的输出功率随着抽运功率的提高几乎呈线性增加,即使在较高的抽运功率水平下,斜率效率也一直保持在 48%,而传统单一晶体的效率则相对较低,为 35%。应当指出的是,当抽运功率超过 18 W 以后,单一晶体的输出效率反而增加,其中原因主要是随着抽运功率的增加,激光输出光束质量变差,变成多模输出,与抽运光的模式匹配反而变好。从图 5 可以看出,在使用了复合晶体以后,特别是在高功率抽运水平下,激光的输出光束质量与传统的单一晶体相比有了很大的提高,在高达 23 W 的抽运功率下输出激光的光束质量因子 M^2 仍然保持在 1.5 以下,而传统单一晶体在 18 W 的抽运功率水平下光束质量就开始明显变差,出现多模输出,在 23 W 时,输出光束质量因子 M^2 达到 2.5。

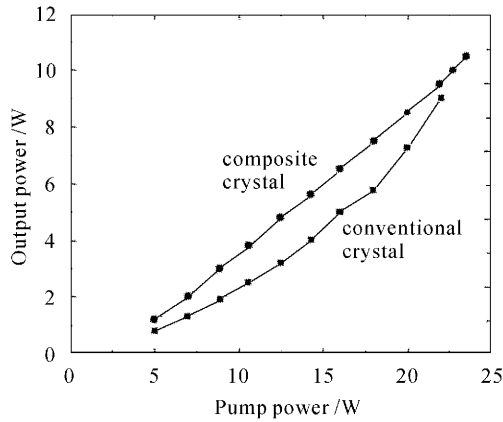


图4 激光输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig.4 Laser output characteristics as the function of incident pump power for conventional crystal and composite crystal

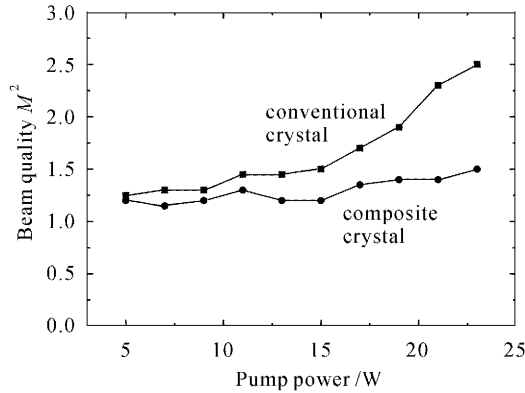


图5 激光输出光束质量随抽运功率的变化曲线

Fig.5 Laser output beam quality as the function of incident pump power for conventional crystal and composite crystal

5 结 论

从理论和实验上研究了激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器中的热透镜效应,理论模拟与实验结果吻合得很好。研究表明,复合晶体能够有效地降低晶体的温度,减小由端面变形带来的热透镜效应的影响,得到比传统单一晶体更高的基模输出功率和更好的光束质量。采用复合结构的 Nd:YVO₄ 晶体,在 23 W 的抽运功率下得到了 11 W 的基模输出功率,说明这种结构的晶体在获得大功率、高光束质量的固体激光器方面有很大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(6):895~912
- 2 S. B. Hutchison, A. M. Berezinskaya, A. B. Petersen *et al.*. High energy, high peak power diode pumped solid state lasers for materials processing [C]. *SPIE*, 1996, **2888**:121~124
- 3 M. S. Keirstead, T. M. Maer, S. B. Hutchison *et al.*. High repetition rate, diode-pumped, Q-switched Nd:YVO₄ laser [C]. *CLEO*, 1993, **11**:642
- 4 Zhang Hongrui, Gao Mingyi, Zheng Yi *et al.*. High power diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):19~21
张红瑞,高明义,郑 义等. 大功率激光二极管端面抽运的 Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):19~21
- 5 J. Frauchiger, Peter Albers, Heinz P. Weber. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped CW Nd:YAG lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):1046~1056
- 6 R. Weber, B. Neuenschwander, M. Macdonald *et al.*. Cooling schemes for longitudinally diode laser-pumped Nd:YAG rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(6):1046~1053
- 7 C. Pfistner, R. Weber, H. P. Weber *et al.*. Thermal beam distortions in end-pumped Nd:YAG, Nd:GSGG, and Nd:YLF rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(7):1605~1615