

文章编号: 0253-2239(2006)06-0854-5

部分抽运的板条激光器的热效应分析*

程小劲 牛金富 徐剑秋

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 基于热传导方程和高斯-赛德尔数值计算方法, 对部分抽运板条激光器的温度分布、热应力和热致折射率变化等热效应进行了详细分析, 并与单侧抽运及双侧抽运方式进行了比较。结果表明, 设计合理的部分抽运板条激光器, 可以获得较高的抽运效率, 其热效应相比于均匀抽运的情况并没有显著劣化, 不论是采用锯齿形传播方式还是直线传播方式的激光器都可以获得较好的光束质量, 当一束高斯激光直线经过板条晶体中部时, 光束质量因子为 1.4, 若采用锯齿形传播方式, 则光束质量因子可提高到 1.1。

关键词: 固体激光器; 部分抽运; 数值计算; 热效应

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Thermal Effects in Partially Laser-Diode-Pumped Slab Lasers

Cheng Xiaojin Niu Jinfu Xu Jianqiu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: Based on the heat conduction equations and the Gauss-Seidel numerical method, the distribution of temperature, thermal stress and thermally induced refractive index in partially pumped slab lasers are analyzed and compared with single- and double-side pumped configurations. It is found that a partially pumped slab laser designed appropriately does not suffer more thermal distortion than that in the uniformly pumped ones, meanwhile maintaining high pumping efficiency. Whether the laser works in zigzag or straightforward path, good beam quality is achieved. If Gaussian beam passes the central portion of the crystal in straightforward path, the beam quality factor M^2 is 1.4, while in zigzag path M^2 is improved to 1.1.

Key words: solid-state lasers; partially pump; numerical calculation; thermal effect

1 引 言

相对于闪光灯抽运而言, 半导体激光抽运的固体激光器(DPL)具有以下优点: 转换效率高, 频率和输出功率稳定性高, 并且器件结构紧凑, 寿命长, 可维护性好。这些优点使得半导体激光抽运的固体激光器成为现今激光器技术的研究热点之一, 尤其是高功率半导体激光抽运的固体激光器(HPDPL)更是研究的重点, 其中固体板条激光器由于散热效果好, 抽运效率高等优点受到广泛重视^[1~3]。

在大功率板条固体激光器中, 为了得到尽可能大的抽运面积, 常采用面抽运的方式, 其具体抽运结构一般可以分为三类, 双侧抽运、单侧抽运和部分抽运。

其中双侧抽运结构的抽运均匀性最好, 但由于抽运光只是一次通过激光晶体, 抽运光的吸收不充分。采用单侧抽运和部分抽运结构可以提高抽运效率。但同时会加剧激光晶体的热畸变, 热畸变会引起激光器的光束质量和转换效率的下降, 限制了激光器输出功率的进一步提高, 因此需要对其热效应作深入的分析, 这对设计大功率的固体板条激光器尤其必要, 美国的 Q-peak 公司在这方面做过一些研究, 但根据其提供的资料看, Q-peak 公司产品的平均输出功率基本都在 100 W 以下, 未见到更高输出功率的报道。本文将从热传导方程出发, 利用有限差分法分析部分抽运时温度、热应力和热致折射率等热效应的影响, 并与双

* 中国科学院知识创新前沿基金资助课题。

作者简介: 程小劲(1978~), 男, 安徽人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事高功率固体激光器方面的研究。E-mail: chengxiaojin@tom.com

收稿日期: 2005-08-19; 收到修改稿日期: 2005-10-19

侧抽运和单侧抽运结构进行分析比较。

2 温度分布及热传导方程^[10~12]

图 1 所示的是三种抽运结构的示意图,抽运光由 yz 面耦合进入激光晶体。对于单侧抽运和部分抽运,在与抽运源相对的另一侧均镀上高反膜,提高

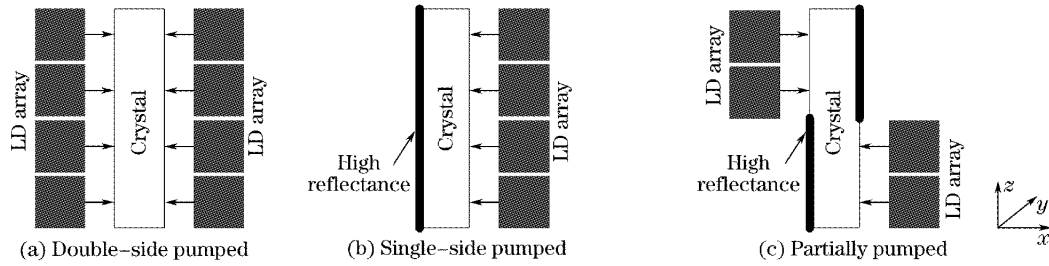


图 1 三种抽运结构的示意图

Fig. 1 Three pumping configurations

表 1 常、变量列表

Table 1 List of constants and variables

| Constants | | Variables | |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| k | Thermal conductivity 0.014 W · mm ⁻¹ · K ⁻¹ | Q | Thermal loading power per unit volume |
| η_H | Thermogenesis efficiency 0.3 | Q_0 | Thermal loading power per unit area |
| P_p | Pump power 1000 W | S | Pump area |
| l | Crystal length 50 mm | T | Temperature |
| w | Crystal width 10 mm | T_a | Average temperature |
| t | Crystal thickness 5 mm | T' | Deviation from average temperature |
| T_c | Cooling water temperature 15 °C | σ, σ_{ij} | Stress and stress components |
| k_λ | Photoabsorption coefficient 0.3 mm ⁻¹ | n | Refractive index |
| ν | Poisson ratio 0.3 | Δn_{temp} | Change in refractive index |
| α | Thermal expansion coefficient 5 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹ | | |
| σ_{max} | Stress fracture limit 1.7 × 10 ⁸ Pa | | |
| $\partial n / \partial T$ | Thermally induced refractive index coefficient 7.3 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹ | | |

激光晶体的温度分布由热传导方程来描述,当激光晶体处于温度平衡时,热传导方程可以表达成:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{Q(x, z)}{k}, \quad (1)$$

其中 $Q(x, z)$ 为单位体积中产生的热量。半导体抽运源的输出功率为 P_p , 则在激光晶体表面产生的热量为

$$Q_0 = \frac{\eta_H \cdot P_p}{S}, \quad (2)$$

其中 η_H 为光热转换效率,抽运面积 $S = l \cdot W$ 。考虑到抽运光在晶体内的吸收特性,处于抽运光照射范围内的晶体中产生的热量为

$$Q' = Q_0 \exp(-k_\lambda x), \quad (3)$$

则晶体中单位体积内产生的热量

$$Q(x, z) = -\frac{dQ'}{dx} = Q_0 k_\lambda \exp(-k_\lambda x), \quad (4)$$

了光的吸收效率。以 Nd:YAG 晶体为例,在吸收系数为 0.3 mm⁻¹ 时,双侧抽运对抽运光的吸收效率为 78%,单侧和部分抽运的吸收效率均为 95%。

表 1 是文中所用到的常量和变量,对于常量,给出了 Nd:YAG 晶体的相应参量。

由此得到了在 xz 平面内部分抽运的单位体积热量分布:

$$Q(x, z) = \begin{cases} k_\lambda Q_0 \exp(-k_\lambda x) & z \leq l/2 \\ k_\lambda Q_0 \exp[-k_\lambda(t-x)], & z \geq l/2 \end{cases} \quad (5)$$

在一维的情况下,可以直接用解析法求出晶体中温度分布:

$$T(x) = \begin{cases} -\frac{Qx^2}{2k} + C_1, & \text{抽运区域} \\ C_2 x + C_3, & \text{非抽运区域} \end{cases} \quad (6)$$

其中 C_1, C_2 和 C_3 为与散热条件有关的常量。

当考虑的温度分布大于一维时,用解析法计算方程(1)~(5)是比较困难的,常采用数值方法分析,目前有多种有限元商用软件可用于热分析,但为了解不同条件下热效应的影响,用高斯-赛德尔差分法来求解方程(1)~(5),方程(1)用差分形式表示为

$$\frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}}{(\Delta z)^2} = -\frac{Q(i,j)}{k}, \quad i = 2, 3, \dots, I-1; j = 2, 3, \dots, J-1 \quad (7)$$

求解时,为计算方便,取 $\Delta x = \Delta z$,则可改成

$$T_{i,j} = 0.25 \left[T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1} - \frac{Q(i,j)}{k}(\Delta x)^2 \right]. \quad i = 2, 3, \dots, I-1; j = 2, 3, \dots, J-1 \quad (8)$$

为了节约计算时间,提高计算效率,可以将一维解析解的结果作为多维计算的初值,以达到有效缩短迭代收敛时间的目的。

3 Nd:YAG 板条激光器的温度分布

为具体理解激光器中的热效应,以 Nd:YAG 晶体板条激光器为例,分析激光晶体中的温度分布。Nd:YAG 晶体板的尺寸为 50 mm × 10 mm × 5 mm,抽运光由 yz 面(见图 1)耦合进入激光晶体,温度的变化主要集中在 xz 两个方向,本文中只考虑 x, z 两个方向上的温度分布。

利用(8)式可以得到晶体中的温度分布。图 2 为三种抽运结构在相同的抽运条件下(总抽运功率,冷却方式等)温度的分布,可以看出,在同等条件下,双侧抽运的温度分布均匀性最好,其最高温度出现在 x 方向的中间,单侧抽运在 x 方向的均匀性不好,高温部分集中在 x 轴中间靠近抽运源的位置,而部分抽运时,虽然在每个抽运域内,高温依然是集中在靠近抽运源的位置,但由于每侧均有一个抽运源,所以在一定程度上可以改善 x 方向上温度分布的均匀性。

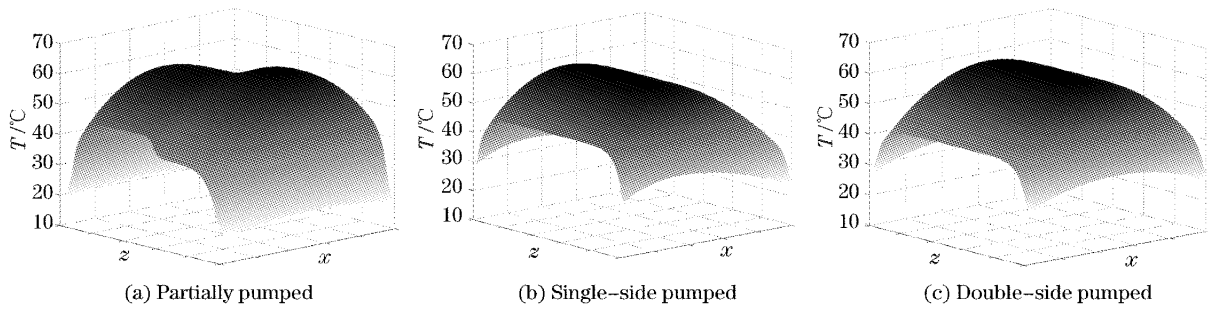


图 2 三种抽运结构下的温度分布

Fig. 2 Distributions of temperature in the three pumping configurations

4 Nd:YAG 板条激光器的应力分析

由于温度分布的不均匀,晶体内不同部分的热膨胀不同,而导致热应力,严重时会使晶体断裂,因此有必要研究晶体内部的应力分布。计算应力分布的关键在于计算晶体各部分相对于晶体平均温度的差值。

在稳态下,设已知截面相对温度分布为

$$T'(x, z) = \Delta T = T(x, z) - T_a, \quad (9)$$

该截面的应力分布可由以下公式算出:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \frac{E\alpha}{1-\nu} T'(x, z), \\ \sigma_{yy} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz}) - E\alpha T'(x, z), \end{cases} \quad (10)$$

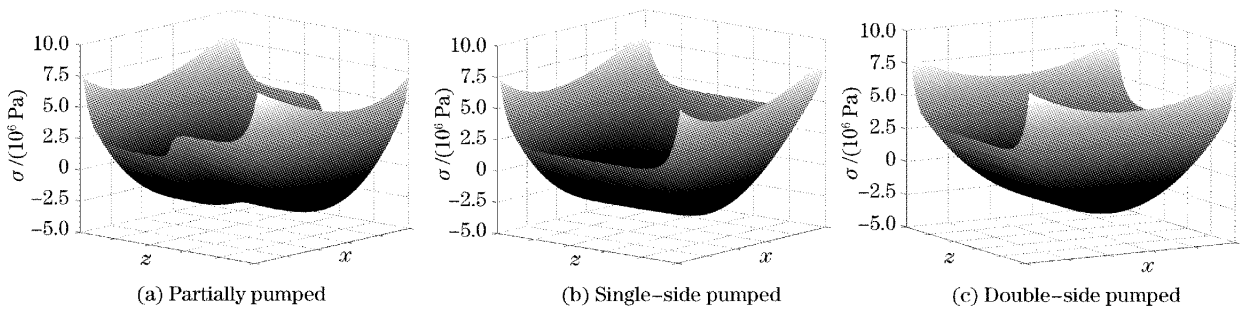


图 3 三种抽运方式下的 σ_{yy} 的分布

Fig. 3 Distributions of thermal stress σ_{yy} in the three pumping configurations

其中 E 为杨氏模量。 α 为热膨胀系数, $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ 分别为 x, y, z 方向的应力分量。图 3 为三种抽运结构下的 σ_{yy} 分布。可以看出, 双侧抽运、单侧抽运和部分抽运的最大表面应力比较接近, 只是中间部分的最大热应力出现的位置不同。在晶体的中部热应力小于 0, 因此为压力, 而在晶体表面为张力。Nd:YAG 晶体的所能承受的表面应力极限 σ_{\max} 为 1.7×10^8 Pa, 可以看出在抽运功率为 1 kW 的情况下, 三种抽运方式的最大表面应力只有表面应力极限的 0.02~0.03。若以应力极限的 0.2 为激光晶体的工作上限, 该 Nd:YAG 板条可以承受近 10 kW 的抽运平均功率。

5 部分抽运的 Nd:YAG 板条激光器的热致折射率^[10~14]

在温度变化不大时, 折射率的变化可以通过 (11) 式计算出:

$$\Delta n = \Delta n_{\text{temp}} + \Delta n_{\text{stress}} = \frac{\partial n}{\partial T} T'(x, z) + \Delta n_{\text{stress}}, \quad (11)$$

其中右边第一项表示由温度引起的折射率变化, 第二项为热应力导致的折射率变化, 其值一般只有第一部分的 1/10, 但会导致双折射效应。在板条激光

器中, 热致双折射的主轴与坐标轴平行。图 4(a) 给出部分抽运时折射率的变化, 图 4(b) 表示激光沿 z 轴方向上直线经过晶体后, 沿 x 轴的折射率变化量。可以看出由于单侧抽运和部分抽运结构有较高的抽运效率, 因而温度的上升较大, 折射率的总变化量也大于双侧抽运时的数值。由于抽运在左右两侧各有一个抽运源, 折射率变化在一定程度上相互补偿, 因此总折射率变化较单侧抽运小, 光束质量也应好于单侧抽运。

当采用部分抽运及抽运功率为 1 kW 时, 假设一束高斯激光直线经过板条晶体中部, 利用菲涅耳衍射积分, 计算得出光束质量因子为 $M^2 = 1.4$ 。当光束经过扩束覆盖整个通光口径时, 光束质量因子为 $M^2 = 2.7$ 。但采用锯齿形传播方式, 则光束质量因子可提高到 $M^2 = 1.1$, 这与 Kevin J. Snell 等人通过实验得到部分抽运的光束质量因子 M^2 一致^[14]。在同等条件下, 如果是单侧抽运, 当高斯激光直线经过板条晶体中部时可计算出光束质量因子变为 $M^2 = 1.7$, 光束经过扩束覆盖整个通光口径时, 光束质量因子为 $M^2 = 3.1$ 。可以看出, 同等条件下部分抽运的光束质量要好于单侧抽运。

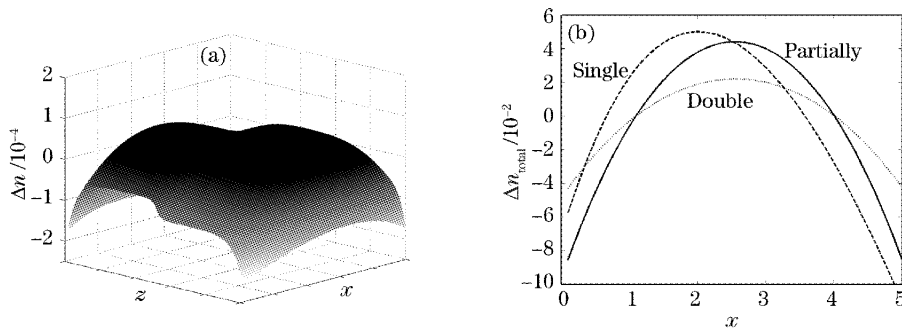


图 4 (a) 部分抽运时相对折射率的变化, (b) 相对折射率的总变化量

Fig. 4 (a) Distribution of thermally induced relative refractive index in partially pump configuration, (b) total varieties of thermally induced refractive index in the three pump configurations

6 结 论

利用热传导方程和高斯-赛德尔数值计算方法, 求解了部分抽运板条激光器的温度分布, 并进而得到了晶体中的热应力变化和热致折射率变化, 分析了这些热效应对激光器工作状态的影响, 同时估算了热效应导致的光束质量劣化。

参 考 文 献

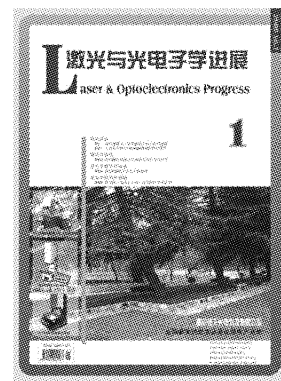
- 1 A. Bayramian, P. Armstrong, R. L. Brast *et al.*. System operations of mercury; a diode-pumped solid-state lasers [C]. *CLEO/Euro*, 2005. 1368
- 2 T. Kawashima, T. Kurita, O. Matsumoto *et al.*. Diode-pumped, thermally-edge-controlled slab-laser with high-energy and large-aperture [C]. *CLEO/Euro*, 2005. 473
- 3 C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disc laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2000, 6(4): 650~657
- 4 P. Shi, D. Li, H. Zhang *et al.*. An 110 W Nd:YVO₄ slab laser with high beam quality output [J]. *Opt. Commun.*, 2004, 229: 349~354
- 5 Z. Wang, T. Fang, X. Ye *et al.*. Planar waveguide lasers with unstable resonators and unbalanced edge pumping [C]. *ICONO/LAT2005*, Russia, MY15, 2005

- 6 Q. Liu, M. Gong, F. Lu *et al.*. 520-W continuous-wave diode corner-pumped composite Yb:YAG slab laser[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 726~728
- 7 Xiaoping Guo, Meng Chen, Gang Li *et al.*. Diode-pumped 1123-nm Nd:YAG laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 402~404
- 8 Zhang Bingyuan, Chen Meng, Li Gang *et al.*. Study on diode-side-pumped mode-locked laser with semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 59~62 (in Chinese)
张丙元, 陈 檬, 李 港 等. 激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 锁模激光器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 59~62
- 9 Gao Lanlan, Tan Huiming. Laser diode array pumped Nd:YAG/LBO high power blue laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1033~1035 (in Chinese)
高兰兰, 檀慧明. 激光二极管阵列抽运 Nd:YAG/LBO 大功率蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1033~1035
- 10 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser — Part 1: Theory [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(3): 289~300
- 11 T. J. Kane, J. M. Eggleston, R. L. Byer. The slab geometry laser — Part 2: Thermal effects in a finite slab[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**(8): 1195~1210
- 12 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Berlin, Springer-Verlag, 1996. 406~463
- 13 M. Sato, S. Naito, N. Iehisa *et al.*. Thermal analysis of high power LD pumped slab Nd:YAG laser[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **3889**: 182~189
- 14 K. J. Snell, D. Lee, K. F. Wall *et al.*. Diode-pumped, high-power CW and modelocked Nd:YLF lasers[C]. *ASSL*, Davos, Switzerland, 2000

"名家讲坛"征稿启事

为了让读者进一步全面了解光电子各领域的发展历程及研究进展,《激光与光电子学进展》杂志将从2006年下半年开始推出专题栏目“名家讲坛”,邀请国内外著名学者、教授、高级研发人员讲述激光与光电子技术发展过程中的关键技术、重要突破以及目前的研究热点。内容涉及理论探讨、技术突破、材料研发和市场开拓等相关领域。同时面向广大读者征稿,要求如下:

- 1、作者在激光与光电子应用领域具有一定造诣,并在某一方面有较深入的研究或对该领域的发展态势有较全面和前瞻的把握。
- 2、文章涉及内容应在激光与光电子领域占有重要地位,具有客观的总结性或者高度的前瞻性。
- 3、文章最好配有一定数量的图表(最好为彩色),字数不少于6000,最好不超过20000。
- 4、投稿同时,请作者提供作者简介,包括研究领域、研究成果等。
- 5、论文一经录用,本刊将优先发表,并酌付稿酬。
- 6、投稿地址:上海市800-211邮政信箱《激光与光电子学进展》编辑部



欢迎大家踊跃投稿,让我们共同期待“名家讲坛”的精彩呈现!

邮政编码: 201800

电子邮件: gwjg@mail.shcnc.ac.cn

联系电话: 021-69918166

《激光与光电子学进展》编辑部

主编 刘其元