

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0132-03

高斯光束单侧面抽运 Nd:YAG 板条热效应研究

王卫民^{1,2} 罗斌¹ 吕百达²

(¹ 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)
(² 四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)

摘要 根据高功率面阵二极管激光器的特点,设计波导板光学耦合系统,抽运梯形 Nd:YAG 板条,建立了高斯光束单侧面抽运 Nd:YAG 板条部分区间的热效应模型。利用 ANSYS 程序有限元法进行数值计算,获得板条内的温度场分布和板条宽度方向的热透镜焦距。对热透镜焦距进行实验测试,理论计算结果与实验结果相符。

关键词 高斯光束, 二极管抽运, 热透镜, 板条激光器

中图分类号 TN248.1⁺3 **文献标识码** A

Thermal Effect in Gaussian Beam Side-pumped Nd:YAG Slab Laser

WANG Wei-min^{1,2} LUO Bin¹ LÜ Bai-da²

(¹ Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900)
(² Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract The thermal effect of diode laser pumped solid-state slab laser is studied at the high repetition rates. Gaussian beam side-pumped modules is setup in the numerical calculation. The experimental data are consistent with the numerical calculation results.

Key words slab laser, thermal effect, Gaussian beam, solid-state slab laser

1 引言

二极管侧面抽运 Nd:YAG 板条激光器既适合于连续工作方式,也适合于准连续工作方式。在进行高平均功率的激光器的设计时,必须考虑热效应的影响。板条状增益介质的热流问题早已为人们所熟知^[1,2],由于闪光灯抽运的特点与二极管抽运的特点有所不同,且考虑到 Nd:YAG 为各向同性晶体,虽然二极管激光器发射的激光波长可以与激光增益介质的吸收谱相匹配,但由于增益介质的量子缺陷、杂质、荧光和超辐射等使增益介质吸收的抽运能量有部分转化为介质的热量,因增益介质的各边界的冷却条件不同,从而在介质内形成温度梯度,产生热致应力等。在同等条件下,二极管抽运的热效应比闪光灯抽运的热效应要小^[3],但在数百赫兹的工作频率下,其热效应仍然非常严重。

2 高斯光束单侧面抽运热效应的模型

建立的二极管侧抽运固体激光器使用了图 1 所示的抽运模型,面阵二极管激光器(4×4 bars)bar 与

bar 之间的间距为 1.2 mm,快轴方向的发散角为 40°,慢轴方向的发散角为 10°,增益介质为掺杂的 1.0at-% 的 Nd:YAG 梯形板条,抽运源对板条进行单侧面抽运,另一侧面用循环水冷却。研制的抽运光耦合光学系统为波导板结构,经过对波导板长度,进出口宽度的优化设计和实验测试,对 808 nm 的抽运光耦合效率达 90%^[4]。使用的 960 W 面阵二极管激光器(4×4 bar)经过耦合系统后相对光强的分布如图 2 所示,可近似地把图 2 所示的分布,看成是具有平顶分布的高斯光束,从而可以建立高斯抽运热效应模型。因研究的二极管侧面抽运固体激光器的工作频率(激光器的重复频率)在 400 Hz~1 kHz 之间,所使用板条的厚度小于 3.2 mm,频率在

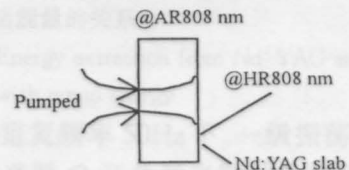


图 1 高斯抽运模型

Fig. 1 Module of Gaussian beam pumping

进行数值计算时用平均抽运的倒数远小于热弛豫时间。功率代表抽运功率,且不考虑热力等物理量随时间变化获得的温度场和应力分布为稳态解。采用有限元分析的方法对板条内温度场和应力分布进行计算。用方程进行计算时,单位体积内产生的热分布 $Q(x, y)$ 的计算,主要考虑微元的体积和其所处的位置。板条坐标系中 y 方向的 xy 平面内,输入的抽运分布近似为具有平顶分布的高斯光束,而沿板条长度方向(z 轴方向)抽运分布基本不变,所以抽运束分布可用下面的数学表达式表示

$$P_i(y, z) = P_p \exp[-(2y^2/\omega_p^2)] \quad (1)$$

其中 ω_p 是抽运束半宽度($1/e^2$ 处),而峰值功率密度 P_p 是由正式确定

$$P = P_p \iint \exp[-(2y^2/\omega_p^2)] dy dz \quad (2)$$

其中(2)式的积分是对整个板条区域,在计算模型中只需要输入平均功率 P 和抽运束宽度 ω_p ,就可以进行数值计算。由于假设在抽运光沿板条长度 z 轴方向的分布为常数,只需计算 xy 平面内的温度和应力分布,因此物理计算模型由三维简化为二维,可以大大地节约计算时间。在下面计算中,假设抽运束在板条内传输时,除强度发生变化外,其他因子不发生变化,而吸收的抽运功率转化为单位体积内的热可由正式表示

$$Q(x, y) = (1 - R)\zeta \times \{ \exp(-\beta x) + \exp[-\beta(2d - x)] \} P_i(y) \quad (3)$$

其中 R 为板条抽运面的反射率,一般实验中该面都镀上 808 nm 的增透膜,其值 $R \leq 1\%$ 。 β 为 Nd:YAG 材料对 808 nm 波长的吸收系数, β 由实验确定, d 为板条的吸收厚度, ζ 为介质吸收抽运功率转化为热功率的系数,板条在有激光发射时其值取 0.3(不同的文献有不同的取值 0.24~0.37^[5,6]),如果没有激光晶体,则 ζ 值比此值要大。

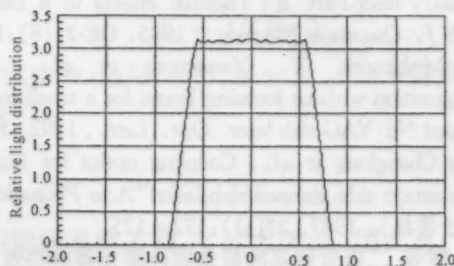


图2 面阵二极管激光器经耦合后的相对光强分布
Fig.2 Relative light distribution of the diode laser after coupling

3 数值计算结果与分析

在 ANSYS 程序上对热传导方程进行数值计算,使用的参数如下:抽运源的峰值功率为 960 W 的二维面阵二极管激光器(由 4×4 bars),每条峰值功率为 60 W,占空比为 20%,抽运光耦合系统的耦合效率为 90%,耦合系统与 Nd:YAG 接触面的出口宽度为 2.5 mm, Nd:YAG 板条的吸收厚度为 2.8 mm,宽度为 8 mm,上底面的长度为 41 mm,其对 808 nm 波长的吸收系数 $\beta = 3.2 \text{ cm}^{-1}$ (由实验测量而得), ω_p 的值为 2.5 mm,反射系数 $R = 1\%$, Nd:YAG 板条抽运对面用 12°C 的循环水冷却,水的流速为 1.5 m/s, Nd:YAG 板条与水接触的宽度为 6 mm,由于抽运区间只占 Nd:YAG 板条宽度的部分区域,在有限元分析时使用的网格划分,在抽运区间内网格分割较密,非抽运区较疏。板条另两个毛面用一定厚度的红外吸收材料和一定厚度的隔热材料进行处理,尽量减小这个方向的热流,两个毛面的热交换系数只有水冷面的 1/100,板条的其他面假设没有热交换。考虑到板条和抽运光的对称性,只计算了 1/4 模型的稳态温度场分布如图 3 所示。图 3 说明,由于二极管激光器是单侧面抽运,而抽运的对立面用循环水冷却,致使板条的抽运面的温度在 x 轴中是最高的,随着离冷却面的距离的减小,其温度逐渐下降。在 y 轴方向抽运区的温度最高,随着远离抽运区,其温度分布呈高斯下降趋势,这与高斯抽运光束相匹配。由于在 y 轴方向存在温度梯度,光束在板条内传输时,将在这个方向产生波前畸变。在 x 轴方向光束是按之字型传输的,虽存在温度梯度,但其产生的畸变被之字型光路所补偿。

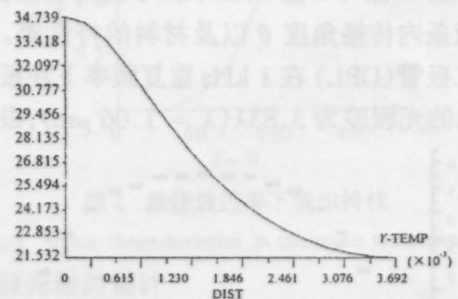


图3 板条横截面上 y 轴方向温度场分布
Fig.3 Temperature distribution of slab section in y direction

在抽运加载前,假设板条内无应力,且不受外力作用。抽运加载后,由于温度梯度的存在,增益介质中将产生热应力,热应力将引起板条发生形变,而形变将使光束波前产生畸变。如果已经计算获得板条

内温度场分布,就可通过热力耦合方法计算出应力分布

$$\sigma_{xx} = \beta(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - E\alpha T'(x, y) \quad (4)$$

其中 σ_{xx} 为 z 轴方向上的应力, σ_{xx} 和 σ_{yy} 分别是 x 轴和 y 轴方向的应力, 而 $T'(x, y)$ 则由方程(5) 确定

$$T(x, y) = T_0 + T'(x, y) \quad (5)$$

β 为泊松比, E 为杨氏模量, α 是热膨胀系数, T_0 为整个板条的平均温度, $T'(x, y)$ 为某一点处温度与平均温度的差。根据方程(5) 获得板条内的温度场分布, 通过解方程(4) 就可以获得应力分布。由于抽运的非均匀性, x 、 y 方向的应力分布并不对称, 因板条的侧面并不完全隔热, 板条的边缘通常是整个板条中温度最低的地方, 但其应力却是最大, 所以最有可能发生断裂的地方就是板条的棱和边缘。热致应力将引起 Nd:YAG 板条全反射面的变形, 计算抽运面发生的形变较大, 且形状就高斯形状一样。一般的情况下, 对板条的最佳冷却方式是对抽运面进行循环水冷却, 以减小抽运面的温度。在用有限元方法计算有限大小的板条的光路长度畸变时, 主要考虑板条的 y 轴方向上有温度梯度的存在, 其原因在于抽运光分布不均匀和隔热材料隔热性能不够好还有部分传热等, 将引起介质的折射率发生变化; 其次, 由于自由表面的存在, 板条全反射面产生形变, 形成凸面。侧面有温度梯度存在, 全反射表面凸起及应力造成光路变形, 从而形成 y 轴方向上的聚焦。在有限截面的锯齿形光路板条结构中, 光路长度畸变与平均温度 $\bar{T}(y)$ 成比例, 或是与 x 轴方向应力 $\sigma_{xx}(y)$ 的平均值成正比。任意点上, 光路长度畸变 $\Delta l(y)$ 可进行计算。其中 l 为几何路径长度, dn/dT_{slab} 的值与 B_{slab} 的值取决于光束的偏振态, 光束在板条内传播角度 θ 以及材料的特性等。计算激光器二极管(DPL) 在 1 kHz 重复频率下在板条宽度 y 方向的光程差为 3.83λ ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$), 根据光程

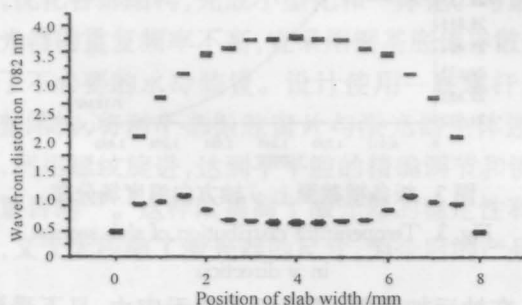


图4 计算的板条的柱透镜和热效应补偿

Fig.4 Calculation lens and thermal effect compensate of slab

差计算柱透镜焦距 $f = 0.89 \text{ m}$, 光程差随板条宽度方向的位置而发生变化如图5所示。图5说明板条激光器只有宽度方向有透镜效应, 板条之字型方向的热效应被光所补偿。产生的柱透镜是可以凹柱透镜进行补偿, 只要选择合适的凹柱面透镜焦距。

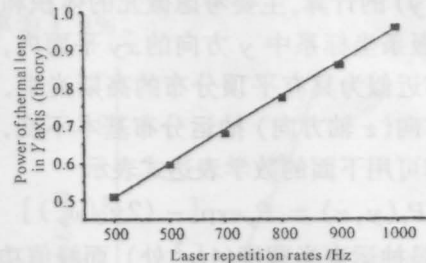


图5 测量的 DPL 热透镜焦距

Fig.5 Measure DPL thermal lens focus length

4 实验结果与讨论

设计实验对二极管激光器单侧抽运 Nd:YAG 板条的热透镜焦距进行测试, 用 He-Ne 激光经扩束镜扩束后其直径与板条的吸收厚度相一致, 通过抽运加载的 Nd:YAG 梯形板条, 再经过一个焦距为 80.5 cm 的柱透镜, 在光屏上形成聚焦线, 测量热透镜和柱透镜形成的组合透镜的焦距。在测量过程中假设形成的热透镜在 Nd:YAG 板条的中心, 通过测量板条中心到柱透镜间的距离, 以及组合透镜的焦距, 就可以计算出热透镜的焦距。当抽运源 DL 的工作频率为 1 kHz (200 μs 脉宽) 时, 测得板条热透镜在 y 轴方向的焦距 f_y 为 0.76 m, x 轴方向的焦距大于 3 m 以上。

参考文献

- 1 J. M. Eggleston *et al.*. The slab geometry laser-part I: Theory. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(3): 289~301
- 2 T. J. Kane, J. M. Eggleston, R. L. Byer. The slab geometry laser-Part II: Thermal effects in a finite slab. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(8):1195
- 3 A. Mishimori, T. Yamamoto *et al.*. Pumping configuration without focusing lenses for a small-sized diode pumped Nd:YAG slab laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1):40
- 4 Yang Chenglong *et al.*. Coupling optics for high power diode arrays side-pumped slab laser. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1987, **27**(z1):172~175
- 5 翟群等. 二极管侧泵浦板条固体激光器的热效应研究. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(4):611
- 6 D. C. Brown. Nonlinear thermal and stress effects and scaling behavior of YAG slab amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **32**(12):2393