

晶体热效应对 LD 端面泵浦固体激光器 优化设计的影响*

郑加安 赵圣之 王青圃 张行愚 陈 磊

(山东大学光学系, 济南 250100)

摘 要 考虑了激光介质因受热不均匀而引起的热效应对激光器衍射损耗和谐振腔基模尺寸的影响, 利用 M^2 因子来描述泵浦光在激光介质中的传播规律, 根据泵浦光在激光介质中的有效泵浦体积最小以提高泵浦效率这一判据, 给出了含有泵浦光束质量因子 M_p^2 和激光介质参量在内的端面泵浦固体激光器的优化设计曲线, 利用这些曲线可方便地指导完成激光器的最佳化参量选择. 利用上述理论, 对 LD 端面泵浦光纤耦合输出的 Nd:YVO₄ 激光器进行了研究, 实验结果和理论分析相符合.

关键词 晶体热效应; 衍射损耗; 优化设计

0 引言

LD 端面泵浦固体激光器因其泵浦光束质量好、泵浦效率高、体积小等优点, 光纤耦合输出可以使泵浦源与激光器分开, 因此成为人们研究的热点. 在泵浦源输出功率有限的情况下, 对激光腔进行优化设计是提高转换效率的重要途径之一. 基于四能级空间速率方程的稳态分析和光束亮度理论, 在激光器优化设计方面已报道过许多理论模型和实验^[1-8], 在激光介质中泵浦光有效泵浦体积最小的条件下^[9], 给出了优化设计理论方法.

随着泵浦功率的提高和大功率端面泵浦固体激光器的出现, 晶体的热效应几乎影响到激光器性能的各个方面, 诸如: 谐振腔的稳定性、腔模尺寸、模间耦合效率、输出光束质量等, 是高功率激光器系统设计时首要考虑的因素之一^[10]. Chen Y F^[7] 等人考虑了热致衍射损耗的影响, 在热平衡条件下对光纤耦合输出 LD 泵浦固体激光器进行了优化设计的研究, 理论分析发现腔模与泵浦光有效泵浦尺寸的半径之比随着泵浦功率的提高而略小于 1, 但在该理论中作者采用了非相干光近轴近似, 夸大了激光器对泵浦源的要求, 同时晶体热效应对腔模尺寸的影响也没有加以考虑. 近来, Jabczynski J K^[8] 同时考

虑了热效应引起的衍射损耗和腔模尺寸的变化, 分析了晶体热效应对输出功率及耦合效率、腔内损耗的影响, 但该作者提供的剩余热致位相差是基于实验观察到的现象而人为引入的, 对激光器的优化设计也没有进行系统的研究, 因此不能对激光器腔参量的选择提供指导意义.

本文的主要工作是利用 M^2 因子来描述泵浦光在晶体中的传播规律, 考虑热效应引起的衍射损耗和腔模尺寸变化的影响, 在晶体中泵浦光有效泵浦体积最小的前提下, 对光纤耦合输出端面泵浦固体激光器的优化设计进行系统分析, 给出输出功率最佳化时相应参量的变化规律, 其结论可指导我们完成对腔参量的选择. 文中最后给出了 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 激光器的实验研究, 实验结果与理论分析相符合.

1 理论分析

图 1 给出了典型的 LD 端面泵浦固体激光器腔型示意图. 激光晶体的后截面 M₁ 镀振荡模的全反膜, 设晶体的长度为 l , 折射率为 n , 输出耦合镜的曲率半径为 R , 谐振腔的光学长度为 L .

*国家博士点基金和山东大学杰出青年奖励基金资助项目

收稿日期: 2000-12-08

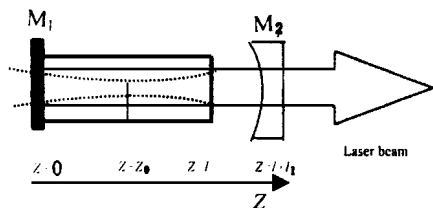


图1 典型的LD端面泵浦Nd:YAG激光器实验装置图
Fig.1 A typical scheme of LD end-pumped Nd:YAG laser

1.1 晶体热效应对腔模尺寸变化和衍射损耗的影响

在求解晶体内部温度分布时,假定热负荷能量分布与泵浦光的空间分布相同,同时忽略晶体纵向热能消耗,认为热流沿晶体径向流动.在良好的冷却条件下,晶体边缘温度基本和环境温度相同.对光纤耦合输出的泵浦光,若以有效平均泵浦半径来代替空间各处的泵浦光束半径,其分布形式可写为¹¹

$$P(r,z)=\begin{cases} P_{in}\eta/\pi\tilde{\omega}_p^2l & (r^2\leq\tilde{\omega}_p^2) \\ 0 & (r^2\geq\tilde{\omega}_p^2) \end{cases} \tag{1}$$

式中, P_{in} 为晶体 M_1 端面处的泵浦功率, $\eta=1-e^{-\alpha l}$ 为吸收系数为 α 的晶体吸收率, $\tilde{\omega}_p^2$ 为泵浦光在晶体中的有效泵浦光束半径,其定义为¹

$$\tilde{\omega}_p^2=l^{-1}\int_0^l\omega_p^2(z)e^{-\alpha z}dz \tag{2}$$

$\omega_p(z)$ 为泵浦光在晶体中 z 处的光束半径,满足高斯光束传播规律

$$\omega_p^2(z)=\omega_{p0}^2[1+((z-z_0)/z_R)^2] \tag{3}$$

ω_{p0} 为泵浦光束腰, z_0 为束腰在晶体中的位置, z_R 为泵浦光瑞利长度,满足

$$z_R=\pi\omega_{p0}^2/\lambda_pM_p^2 \tag{4}$$

λ_p 为泵浦光波长, M_p^2 为描述泵浦光束质量的特征因子.

在晶体内部达到热平衡后,由式(1)可得相应的温度场分布⁷

$$\begin{aligned} \Delta T(r,z) &= T(r,z)-T(r_b,z) \\ &= \frac{\xi P_{in}\eta}{4\pi K_c l} \begin{cases} 1+\ln(r_b^2/\omega_p^2)-r^2/\omega_p^2 & (r^2\leq\omega_p^2) \\ \ln(r_b^2/r^2) & (r^2\geq\omega_p^2) \end{cases} \end{aligned} \tag{5}$$

ξ 为热负荷比,即晶体中吸收的泵浦能量转为热能比例, K_c 为晶体的热导率, r_b 是晶体的半径尺寸.

晶体的热效应主要包括三个方面:热致折射率、热致形变和热致双折射,但后者要比前两个方面弱得多,因此在考虑热效应对腔模尺寸变化和衍射损耗影响可忽略不计,则由温度场引起的单

程光程差为¹⁰

$$\begin{aligned} OPD(r) &= \int \Delta T(r,z)(dn/dT+\alpha_r n)dz \\ &= \frac{(dn/dT+\alpha_r n)\xi P_{in}\eta}{4\pi K_c} \\ &\quad \begin{cases} 1+\ln(r_b^2/\omega_p^2)-r^2/\omega_p^2 & (r^2\leq\omega_p^2) \\ \ln(r_b^2/r^2) & (r^2\geq\omega_p^2) \end{cases} \end{aligned} \tag{6}$$

由式(6)知,热效应引起的相位差横向轮廓呈抛物-对数分布,在泵浦区域内抛物型相位差分布引起的热透镜焦距为

$$f_T=\frac{2\pi K_c}{dn/dT+\alpha_r n}\frac{\omega_p^2}{\xi P_{in}\eta}\beta(\omega_p^2/P_{in}\eta) \tag{7}$$

对 α 切割的Nd:YVO₄晶体而言¹², $K_c=5.23\times 10^{-3}\text{Wmm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $dn/dT=3\times 10^{-6}/\text{K}$, $\alpha_r=4.43\times 10^{-6}/\text{K}$, $n=2.183$, $\xi=0.24$,由此可得 $\beta=1.08\times 10^{-4}\text{mm}^{-1}\text{W}^{-1}$,晶体的这部分相位差可视为热效应的一阶近似,等效为一理想的薄透镜,因此仅影响谐振腔的稳定性和腔模尺寸变化,而不会给谐振腔带来额外的损耗.将晶体的热透镜效应等效为一谐振腔后腔凹面镜,则在相应泵浦功率下,谐振腔后腔镜处的基模半径可由矩阵理论来求得

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \omega_0^2\sqrt{L/R}[(1-L/f_T) \\ &\quad \cdot (L/f_T+L/R-L/Rf_T)]^{1/2} \end{aligned} \tag{8}$$

ω_0^2 是不考虑热效应时对应的腔模尺寸: $\omega_0^2=(\lambda/L)(R/L-1)^{1/2}$,由于腔模光束尺寸沿纵向的变化很小,因此可认为晶体内部腔模光束尺寸与后腔镜处的基模尺寸相等.

在考虑晶体的热致衍射损耗时,为了简化,我们选择热效应一阶近似下对应的相差球面为参考平面来计算晶体中心到晶体边缘的剩余相差

$$\Delta Q(r)=\frac{\pi P_{in}}{\beta\lambda}\begin{cases} 1+\ln(r_b^2/\omega_p^2) & (r^2\leq\omega_p^2) \\ r^2/\omega_p^2+\ln(r_b^2/r^2) & (r^2\geq\omega_p^2) \end{cases} \tag{9}$$

由象差的衍射理论可知引起的衍射损耗为¹³

$$\delta_{\text{dif}}=1-\left|\frac{\int_0^{\omega_p}\exp[i\Delta Q(r)]\exp(-2r^2/\omega^2)rdr}{\int_0^{\omega_p}\exp(-2r^2/\omega^2)rdr}\right|^2 \tag{10}$$

图2给出了不同腔长时谐振腔的衍射损耗随泵浦功率的变化关系.由图可以看出,对同一腔长时,衍射损耗随着泵浦功率的提高而呈超线性增长,从而导致激光器输出功率最终趋于降低;在同一泵浦功率下,腔长越长,对应腔模的光束半径就越大,由于热效应引起的衍射损耗就越大.

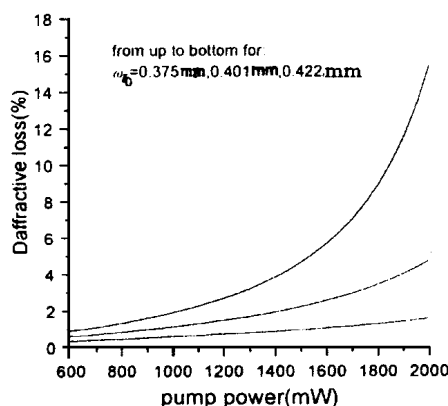


图2 谐振腔在不同腔长时的衍射损耗

Fig 2 The relationship between diffraction loss and pump power with different cavity length

另外,随着泵浦功率的提高,谐振腔将由一稳定状态向非稳态过渡,在此过程中腔内谐振模的光束尺寸将由一有限值变得非常大.当 $\omega \ll r_b$ 时,由晶体有限尺寸而引入的孔径衍射损耗可以忽略,但是当 ω 大到一定程度时,这种损耗的影响将越来越明显. δ_{dif} 的计算比较麻烦,这种损耗也对谐振腔的影响也越来越明显,精确地计算孔径损耗需要采用Fox-Li技术来计算,但这种方法太复杂,对于高斯光束来讲可采用下式来近似¹⁴

$$\delta_{\text{dif}} = 1 - \frac{\int_0^r \exp(-2r^2/\omega^2) r dr}{\int_0^r \exp(-2r^2/\omega^2) r dr} = \exp(-2r_b^2/\omega^2) \quad (11)$$

1.2 激光器稳态运转时的输出

基于四能级空间速率方程分析,可得激光器稳态运转时的输出-泵浦关系⁴

$$P_{\text{out}} = (T/\delta) \eta \eta_0 (P_{\text{in}} - P_{\text{th}}) \quad (12)$$

式中 T 为输出镜耦合透射率, $\delta = \delta_{\text{r dif}} + \delta_{\text{a dif}} + \delta_0 + T$ 为腔内损耗, $\eta = \eta \lambda_0/\lambda$, η 为量子效率, δ_0 为腔内被动损耗, η_0 为腔模与泵浦光束之间的模间耦合效率⁷,将腔内光子空间分布函数代入后可得

$$\eta_0 = m [1 - \exp(-2/m)]^2 / [1 - \exp(-4/m)], m = \omega^2/\omega_0^2 \quad (13)$$

P_{th} 是激光器的泵浦阈值

$$P_{\text{th}} = (\delta I_s/2\eta) \pi \omega_0^2 [1 - \exp(-2/m)]^{-1} \quad (14)$$

$I_s = h\nu/\sigma T$ 为饱和光强.图3给出不同泵浦功率时激光器输出功率与腔长(这里和以下部分为了便于比较而以不考虑热效应影响时相应腔长下的光束半径来代替)的关系,可以看出对一定的泵浦功率激光器存在一最佳腔长,使得输出功率达到

最大,随着泵浦功率的增加,其最佳长度也在相应的发生变化.因此需要对激光器腔参量进行优化选取.

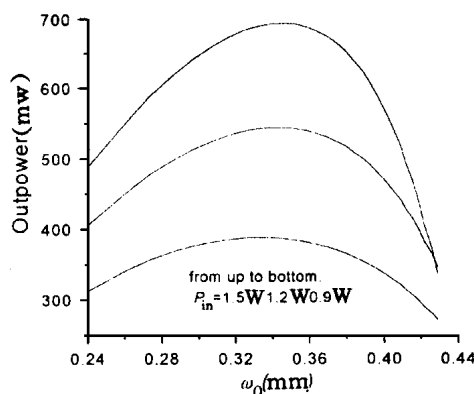


图3 不同泵浦功率时激光器输出功率与腔长的关系

Fig 3 The relationship between output power and cavity length for different pump power

2 激光器腔参量的最佳化

在激光介质中泵浦光的有效泵浦体积越小,泵浦功率密度就越高,从而使得泵浦效率也就越大.由式(2)、(3)可得泵浦光束有效泵浦体积最小的泵浦位置¹

$$z_{0, \text{opt}} = \alpha^{-1} + (1 - \eta^{-1})l \quad (15)$$

相应的有效泵浦半径为

$$\omega_0^2 = (\omega_0^2/\alpha) [\eta_+ z_R^{-2} (l^2 - l^2/\eta_+ \eta/\alpha^2)] \quad (16)$$

由式(15)、(4)可求得相应的最佳化泵浦半径 ω_0^2 的大小.由式(12)、(13)、(14),通过输出功率对腔长进行求导,可求得一定泵浦功率下的最佳化腔长,将该值代入其它各式可求得相应的其它各量的大小.图4和图5分别给出了对于不同泵浦光束质量下输出功率最佳化时,不考虑热效应时对应的腔模半径(ω_0)和腔模半径(ω)与泵浦功率的关系.从图中可以看出, ω_0 随着泵浦功率的增加而增大(相应的腔长变长),与泵浦半径之比大于1;但考虑晶体的热效应后在泵浦功率较低时对应 ω 与泵浦半径之比随着泵浦功率的增加而增大,当泵浦功率达到一定程度时,该比值反而降低,这是由于晶体的热效应改变了谐振腔的腔模半径所致,在整个泵浦范围内腔模的半径大约是泵浦有效半径尺寸的70%左右.另一方面,最佳化腔模半径(ω)随着泵浦光束质量特征因子 M^2 的增加而增大,这是因为 M^2 因子越大,对应的有效泵浦半径也就越大,因此泵浦光对晶体热效应的影响变弱.

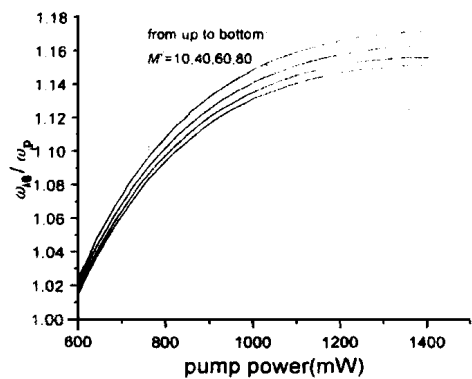


图 4 不同 M^2 因子最佳化腔长与泵浦功率的关系
Fig 4 The relationship between optim ized cavity length and pump power for different M^2 factor

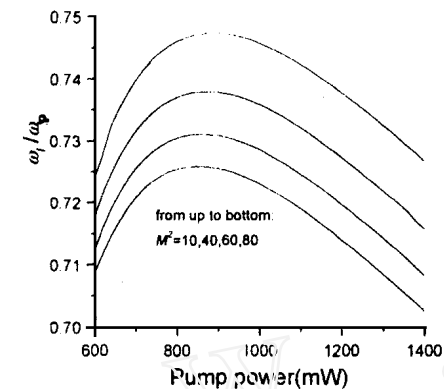


图 5 不同 M^2 因子最佳化时腔模尺寸与泵浦功率的关系
Fig 5 The relationship between optim ized cavity mode width and pump power for different M^2 factor

图 6、7、8 和 9 分别给出了不同光束质量时最佳化时模间耦合效率(MCE)、衍射损耗、激光器阈值和输出功率与泵浦功率的关系。在泵浦功率较低时,耦合效率随着泵浦功率的增加而增大,但与不考虑热效应影响时相比,该值并不随着泵浦功率的增加而趋于饱和,相反该效率达到一最大值后反而下降。谐振腔阈值和衍射损耗随着泵浦功率的增加而增大,从图中可以看出,泵浦光束

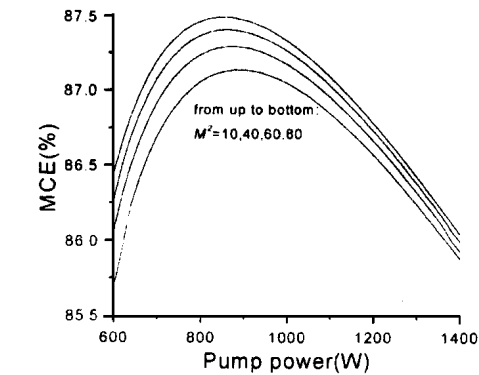


图 6 最佳化时模间耦合效率与泵浦功率的关系
Fig 6 The relationship between mode-coupling efficiency and pump power for different M^2 factor

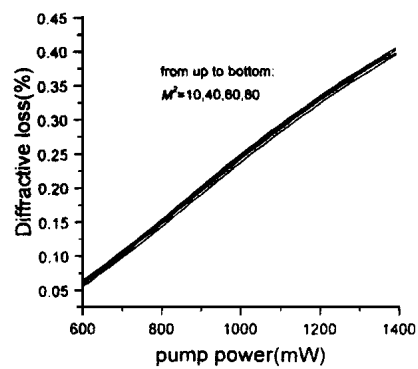


图 7 最佳化时衍射损耗与泵浦功率的关系
Fig 7 The relationship between diffraction loss and pump power for different M^2 factor

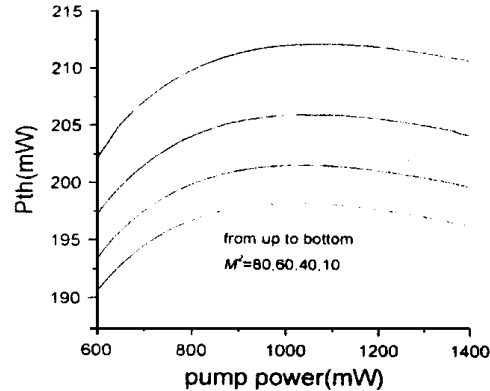


图 8 最佳化输出时泵浦阈值与泵浦功率的关系
Fig 8 The relationship between threshold and pump power for different M^2 factor

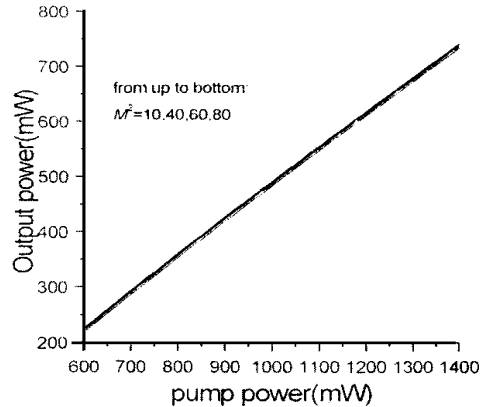


图 9 最佳化输出时输出功率与泵浦功率的关系
Fig 9 The relationship between outpower and pump power for different M^2 factor

质量对激光器最佳化参量选择有着明显的影响,光束质量越高,相应的振荡阈值也就越低,但与低功率泵浦下不考虑热效应时的最佳化相比, M^2 因子对输出功率的影响并不显著。利用这些曲线,可方便地指导我们完成对激光器参量地选取。

3 实验

实验装置如图 1 所示,Nd:YVO₄ 晶体 α 切

割, 掺杂浓度为 1at %, 尺寸为 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 5\text{mm}$, 通光方向长度为 5mm , 吸收系数为 0.532mm^{-1} , 其中 M_1 面镀 808nm 高透、 1064nm 高反的双色介质膜, 用来作平凹腔的后腔镜, 晶体用铝箔包裹置于紫铜块中通过循环水进行冷却. 泵浦源是中科院半导体所生产的半导体激光器, 目前最大输出功率约 1.8W , 光纤耦合输出, 光纤芯径为 0.4mm , 数值孔径为 $NA = 0.37$, 由这些参量可得泵浦光质量因子 $M = 17.2$. 实验过程中通过恒温循环器控制半导体激光器的工作温度以保持输出波长位于 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的吸收峰处. 耦合系统采用自聚焦透镜, 传输效率约为 90% , 泵浦光经自聚焦透镜后的束腰半径大约为 0.3mm , 位于晶体内部距晶体 M_1 面约 0.3mm 处. 激光腔采用的是平凹结构, 凹面镜的曲率半径为 2m , 对 1064nm 的透过率为 8% , 用 LPE-1B 能量计测量输出光功率.

图 10 给出了腔长分别为 20mm 和 60mm 时

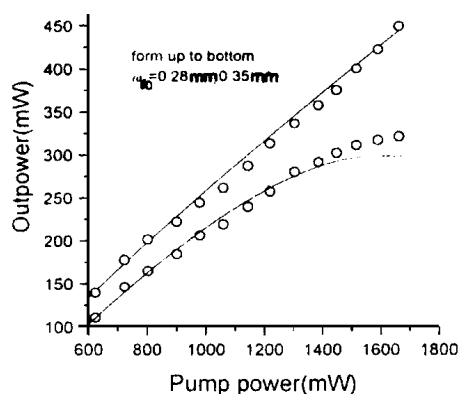


图 10 腔长为 20mm 和 60mm 时输出功率与泵浦功率的关系

Fig. 10 The relationship between output power and pump power with cavity length 20mm and 60mm

激光器输出功率与泵浦功率的关系, 其中图中的圆点为实验测量值, 实线为考虑晶体衍射损耗时的理论计算曲线. 相应的参量如下^{1,6}: $\sigma = 1.6 \times 10^{-18}\text{cm}^2$, $\tau = 9.8 \times 10^{-6}\text{s}$, $\eta = 0.71$, $\omega_0 = 0.112\text{mm}$, $I_s = 3.4 \times 10^4\text{mW/mm}^2$, $\delta = 0.88$, $n = 2.183$. 图 11 给出了泵浦功率为 1.6W 时, 输出功率与腔长的关系, 对应的腔长分别为 20mm 、 30mm 、 40mm 、 50mm 和 60mm . 从两图可以看出实验结果与理论分析相符.

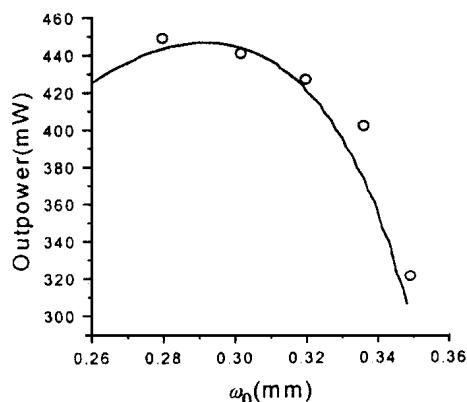


图 11 泵浦功率为 1.6W 时输出功率与腔长的关系

Fig. 11 The relationship between output power and cavity length at pump power 1.6W

4 结论

我们用 M^2 因子描述泵浦光在激活介质中的传播规律, 考虑介质热效应对谐振腔模式尺寸和衍射损耗的影响, 给出了输出功率最佳化时的优化曲线, 研究了 M^2 因子对激光器泵浦阈值、耦合效率、束腰比以及输出功率的影响, 为最佳化端面泵浦激光器提供了有益的指导. 我们以自聚焦透镜耦合, LD 纵向泵浦的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光器进行研究, 理论和实验相符.

参考文献

- 1 郑加安, 赵圣之等. LD 纵向泵浦固体激光器腔参数优化. 光电子·激光, 2000, 11(5): 436~440
- 2 Hall D G. Optimum mode size criterion for low-gain lasers Appl Optics, 1991, 20(9): 1579~1583
- 3 Fan T Y, Sanchez A. Pump sources requirement for end-pumped lasers IEEE J Quantum Electronics, 1990, 26(12): 311~316
- 4 L aporta P, Brussard M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers IEEE J Quantum Electronics, 1991, 27(10): 2319~2326
- 5 Chen Y F, Kao C F, Wang S C. Analytical model for the design of fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers Opt Commun, 1997, 133: 517~524
- 6 Chen Y F, Liao T S, et al. Optimization of fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers: influence of pump-beam quality. IEEE J Quantum Electronics (QE), 1996, 32(11): 2010~2016

- 7 Chen Y F, Huang T M, et al Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: Influence of thermal effect. *IEEE J Quantum Electronics*(QE), 1997, 33(8): 1424~ 1429
- 8 Jabczynski J K. Modeling of diode pumped laser with pump dependent diffraction loss. *Opt Commun*, 2000, 182: 413~ 422
- 9 Hall D G, Smith R J, Rice R R. Pump-size effects in Nd:YAG lasers. *Appl Optics*, 1980, 19(18): 3041~ 3042
- 10 郑加安, 赵圣之, 王青圃等. LD 端面泵浦Nd:YAG 固体激光器热效应研究. *光子学报*, 2000, 29(12): 1121~ 1126
- 11 Taira H T, Tulloch W M, Byer R L. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of CW Yb:YAG lasers. *Appl Optics*, 1997, 36(9): 1867~ 1874
- 12 郑加安, 赵圣之, 王青圃等. LD 端面泵浦固体激光器稳态运转时热焦距的测量. *中国激光*(已录用)
- 13 Born M, Wolf E. *Principle of optics*. Pergamon Press, Fifth edition, 1975
- 14 Honea E C, Beach R J, Mitchell S C. 183-W, $M^2 = 2.4$ Yb:YAG Q-switched laser. *Opt Lett*, 1999, 24(3): 154~ 156

INFLUENCE OF THERMAL EFFECT IN GAIN-MEDIA ON OPTIMUM DESIGN OF LD-END PUMPED SOLID STATE LASER

Zheng Jiaan, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu, Zhang Xingyu, Chen Lei

Optics Dept of Shandong University Jinan P. R. China 250100

Received date: 2000-12-06

Abstract The influence of thermal effect of gain-media on diffractive loss of the laser and the size of the fundamental resonant mode are considered. By using M^2 factor to describe the quality of pump light, optimization design curves are presented according to the criteria of minimum effective pump volume of pump light in gain media. The effects of pump light quality factor (M_p^2) and parameters of gain media on optimization design are analyzed in detail. One can realize the selection of optimum parameters by using those curves. Basing on above theory, the characteristics of fiber-coupling LD end-pumped Nd:YVO₄ laser are studied, the experimental results agree with theoretical predict.

Keywords Thermal effect; Diffractive loss; Optimum design



Zheng Jiaan was born in Rizhao, Shandong province, in September 1974. He graduated from optronic information & engineering department of Shandong University in 1997 and received the B. S. degree. In the same year, he became a graduate student of the same department and directly worked toward Ph. D. degree. His research interest is the nonlinear optics.