

晶体热效应对激光二极管抽运调 Q 固体激光器 转换效率的影响

连晓娟 王石语 过 振 蔡德芳 文建国 李兵斌

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 研究了在考虑晶体热效应的情况下,如何最优化设计激光二极管(LD)端面抽运的固体激光器。综合考虑抽运光束分布、抽运功率、谐振腔结构以及激光介质的热效应对激光器转换效率的影响,给出设计激光器的一套仿真计算算法。结果表明,热致衍射损耗与抽运光半径、抽运功率、腔长、振荡光半径以及晶体材料有关,与输出镜透射率以及重复频率无关。在考虑热致衍射损耗的情况下,当抽运功率一定时,最佳的抽运光参数和谐振腔参数能使Nd:YAG的转换效率最大。

关键词 激光器;固体激光器;热效应;转换效率;激光二极管端面抽运;仿真算法

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0202002

Influence of Thermal Effect on Laser Diode Pumped Solid State Laser Conversion Efficiency

Lian Xiaojuan Wang Shiyu Guo Zhen Cai Defang Wen Jianguo Li Bingbin

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Under the influence of thermal effect, how to optimize the conversion efficiency of laser diode (LD) end-pumped solid-state lasers is analyzed. Considering the effect of pump beam distribution, the laser medium and the resonator structure, a simulation algorithm is designed to calculate the thermal effects and laser conversion efficiency. The results show that thermally induced loss is relevant to pump radius, pump power, cavity length, oscillation light radius and crystal materials. It is independent of output mirror transmission and repetition rate. Considering the existence of thermally induced loss, there are optimum pump parameters and resonator parameters which make the conversion efficiency of Nd:YAG largest when pump power is fixed.

Key words lasers; solid-state laser; thermal effect; conversion efficiency; laser diode end-pump; simulation algorithm

OCIS codes 140.3480; 140.3540; 140.3580; 140.6810

1 引 言

激光二极管(LD)端面抽运的调Q固体激光器(DPSSL)以高效率、长寿命、高稳定性、高光束质量及结构紧凑等优点引起人们的广泛关注,成为当今国际激光领域的研究热点之一,因此研究高效率的DPSSL具有重要的意义^[1]。DPSSL转换效率的提高意味着抽运光能量能够更加有效地转化成DPSSL振荡光输出,但是实际应用中晶体的热效应

破坏了抽运光与振荡光之间的模式匹配,导致晶体的光-光转换效率下降,限制了输出功率以及转换效率的提高^[2]。激光晶体热效应产生的原因主要有三方面:激光晶体折射率的变化、晶体的端面形变以及热应力效应^[3~6]。热效应产生的最重要的直接后果有两个:热透镜以及伴随热透镜的高阶球差导致的衍射损耗。热透镜效应的影响在相当程度上可通过合理的腔设计加以消除;而热透镜球差引起的衍射

收稿日期: 2010-08-11; 收到修改稿日期: 2010-10-11

作者简介: 连晓娟(1985—),女,硕士研究生,主要从事固体激光器热效应和转换效率等方面的研究。

E-mail: xjlian2005@126.com

导师简介: 王石语(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事新型光电子器件及大功率高重复频率激光二极管抽运固体激光器等方面的研究。E-mail: yshi@mail.xidian.edu.cn

损耗亦称之为热致损耗^[7],对于激光器的输出功率和转换效率有着决定性的影响。

杨阳等^[1]的调 Q 激光器优化设计未考虑晶体的热效应,本文主要研究考虑热效应的情况下,如何使 DPSSL 的转换效率最大化。给出了仿真计算算法,得到了晶体热效应引起的热致衍射损耗随参数的变化规律,并给出了最优化设计激光器的方案。

2 理论模型

2.1 热源模型

采用光纤耦合的 LD,输出光场分布近似用平顶光束表示,其归一化分布函数^[8~10]为

$$I(r, z) = \frac{2^{3/2} \alpha}{\pi^{3/2} \omega_p^2 [1 - \exp(-\alpha l)]} \times \exp(-2r^4/\omega_p^4 - \alpha z), \quad (1)$$

式中 α 为晶体对抽运光的吸收系数, ω_p 为抽运光半径, l 为晶体长度, z 为光束传播距离, r 为轴向距离。

晶体内部的热源函数为^[11]

$$Q(r, z) = P_{in} \eta_{heat} I(r, z), \quad (2)$$

式中 P_{in} 为抽运功率, η_{heat} 为晶体生热效率。

将(1)式代入(2)式得到

$$Q(r, z) = \frac{2^{3/2} \alpha \eta_{heat} P_{in}}{\pi^{3/2} \omega_p^2 [1 - \exp(-\alpha l)]} \times \exp(-2r^4/\omega_p^4 - \alpha z), \quad (3)$$

2.2 热传导方程的解

光纤耦合 LD 端面抽运 Nd:YAG 激光器中,稳态热传导方程为

$$-K_c \nabla^2 T(r, z) = Q(r, z). \quad (4)$$

稳态热传导方程的解的形式为

$$T(r, z) = \frac{1}{4\pi K_c} \int \frac{Q(x', y', z') dx' dy' dz'}{dv}, \quad (5)$$

式中 $T(r, z)$ 为晶体内的温度分布, K_c 为晶体的热传导系数。

2.3 热致衍射损耗

在抽运功率较低的情况下,热致折射率变化 $\Delta n(r, z)$ 主要由晶体的温度分布和热应力分布引起,表示为^[12]

$$\Delta n(r, z) = \Delta n(r, z)_T + \Delta n(r, z)_E = \Delta T(r, z) \left[\left(\frac{dn}{dT} \right) + n^3 \alpha C_{r,\theta} \right], \quad (6)$$

式中 $\Delta T(r, z) = T(r, z) - T(0, z)$, $C_{r,\theta}$ 为光弹性系数, $\Delta n(r, z)_T$ 为纵模折射率变化, $\Delta n(r, z)_E$ 为横模折射率变化。

根据像差衍射理论,基模高斯光束通过晶体时产生的热致衍射损耗为^[10]

$$\delta_{00} = 1 - \frac{\left| \iint_s \exp[ik\Delta n(r, z)] \exp[-r^2/\omega_s^2(z)] r dr d\theta \right|^2}{\left| \iint_0^{2\pi+\infty} \exp[-r^2/\omega_s^2(z)] r dr d\theta \right|^2}, \quad (7)$$

式中 $\Delta\varphi = ik\Delta n z$ 为热致衍射引起的波像差, $\omega_s(z)$ 为振荡光半径。

2.4 调 Q 过程的计算理论

LD 端面抽运的 Nd:YAG 激光器第一阶段的速率方程^[13~16]为

$$N(x, y, z) = p(x, y) \tau_f [1 - \exp(-t/\tau_f)], \quad (8)$$

$$S_0(x, y, z, t) = N_0(t) \{2/[\pi\omega_s^2(z)l]\} \times \exp\{-2[(x^2 + y^2)/\omega_s^2(z)]\}, \quad (9)$$

第二阶段的速率方程^[13~16]为

$$\frac{dN(x, y, t)}{dt} = -\frac{\sigma N(x, y, t)}{n_g} S_0(x, y, 0, t), \quad (10)$$

$$\frac{dN_0(t)}{dt} = \frac{\sigma}{n_g} \int N(x, y, t) S_0(x, y, 0, t) dx dy - \frac{c\delta_0}{2n_g l} N_0(t), \quad (11)$$

式中 $N(x, y, z)$ 为从端面观察到的反转粒子数的面密度, $p(x, y)$ 为单位时间抽运光向上能级抽运的粒子数密度, τ_f 为激光上能级荧光寿命, $S_0(x, y, z, t)$ 为基模振荡光子数密度, $N_0(t)$ 为腔内基模振荡光子总数, σ 为受激辐射截面, n_g 为增益介质折射率, δ_0 为基模腔内往返损耗率, l 为增益介质长度。仿真计算所用激光器物理参数如表 1 所示。

表 1 模拟计算中所用参数

Table 1 Physical parameters used in simulation

Parameters	Values
Pump wavelength /nm	808
Oscillation wavelength /nm	1064
Fluorescence lifetime / μ s	230
Radiation cross section /(10^{-20} cm ²)	33
Absorption coefficient /cm ⁻¹	7.1
Heat conductivity /[W/(cm·K)]	0.14
Quantum efficiency /%	75.9
Refractive index changes with temperature /(10^{-6} K ⁻¹)	7.3
Crystal length /mm	3
Gain medium refractive index	1.82

3 仿真计算算法

仿真计算步骤可分为三大过程：晶体内部温度分布的求解、热致衍射损耗的求解和调 Q 过程的计算。具体步骤如下：

1) 使用 Matlab 对稳态热传导方程的解(5)式进行数值积分,得到晶体内任意一点的温度值。

算法思想:将晶体中产生的热看成是由许多点热源构成,任意一点 (x, y, z) 处温度 $T(x, y, z)$ 是由所有点热源共同作用后的结果。点热源由(3)式给出,通过 Matlab 数值积分求解(3)和(5)式,能够得到晶体内任意一点的温度值 $T(r, z)$ 。

2) 求解热致衍射损耗。

算法思想:将步骤 1)得到的温度分布值代入(6)式,可求得任意一点的热致折射率变化 $\Delta n(r, z)$ 。然后数值积分求解(7)式,得到基模高斯光束通过晶体时产生的热致衍射损耗。

3) 调 Q 过程的计算,包括能量储存过程和能量释放过程,最后求得激光器的转换效率。

算法思想:能量储存过程,根据(8)和(9)式得出上能级粒子数的初始分布和振荡光归一化的分布函数。能量释放过程,由已得到的上能级反转粒子数的初始分布和振荡光归一化分布函数,以及步骤 2)中得到的热致衍射损耗,再根据(10)和(11)式得出光束在谐振腔内振荡时上能级反转粒子数的变化和腔内光子数的变化,进而得到所求的激光器输出功率和转换效率。

4 仿真计算结果与分析

4.1 抽运功率对热致衍射损耗和转换效率的影响

由图 1 可知,在其他条件一定的情况下(腔长为 10 cm,抽运光半径为 0.5 mm,输出镜透射率为 10%,重复频率为 20 kHz,输出镜曲率半径为 100 cm),当

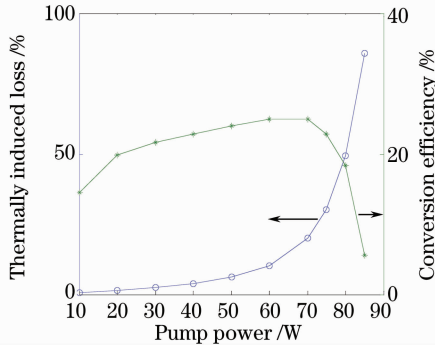


图 1 抽运功率对热致衍射损耗和转换效率的影响

Fig. 1 Influence of pump power with thermally induced loss and conversion efficiency

抽运功率增大时(从 10 W 逐渐增加到 100 W),热致衍射损耗增大,激光器的转换效率先增大后减小。由此可知,存在一个最佳的抽运功率使得激光器的转换效率最大。当抽运功率为 70 W 时,转换效率达到最大为 24.93%,此时热致衍射损耗为 20.04%。

4.2 抽运光半径对热致衍射损耗和转换效率的影响

由图 2 可知,在保证激光器的谐振腔稳定工作的情况下,当其他条件一定时(腔长为 10 cm,抽运光功率为 25 W,输出镜透射率为 10%,重复频率为 20 kHz,输出镜曲率半径为 100 cm),随着抽运光半径的增大,热致衍射损耗减小,激光器的转换效率先增大后减小。因此,存在唯一的最优抽运光半径使得激光器的转换效率最大,同时热致衍射损耗较小。当抽运光半径为 0.32 mm 时,最大转换效率为 34.14%,此时热致衍射损耗为 8.15%。

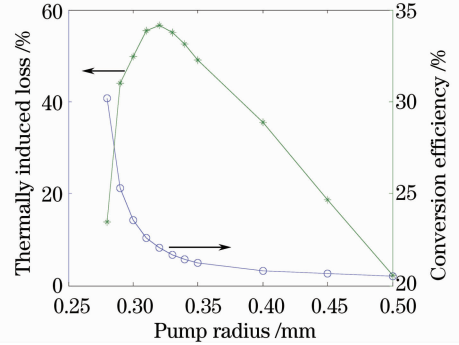


图 2 抽运光半径对热致衍射损耗和转换效率的影响

Fig. 2 Influence of pump radius on thermally induced loss and conversion efficiency

4.3 输出镜透射率对热致衍射损耗和转换效率的影响

由图 3 可知,在其他条件一定的情况下(腔长为 10 cm,抽运光功率为 25 W,抽运光半径为 0.32 mm,重复频率为 20 kHz,输出镜曲率半径为 100 cm),随

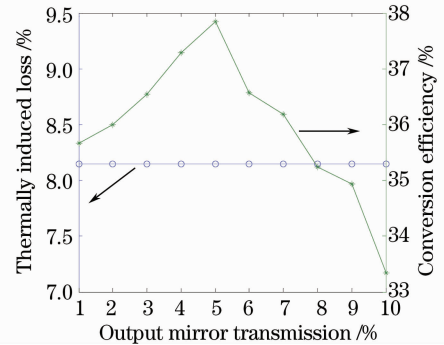


图 3 输出镜透射率对热致衍射损耗和转换效率的影响

Fig. 3 Influence of output mirror transmission with thermally induced loss and conversion efficiency

着输出镜透射率的增大,激光器的转换效率先增大后减小,热致衍射损耗保持不变。因此存在唯一的最优输出镜透射率使得激光器的转换效率最大,同时热致衍射损耗与输出镜透射率无关。当输出镜透射率为5%时,最大转换效率为37.85%,热致衍射损耗保持8.15%不变。

4.4 腔长的改变对热致衍射损耗和转换效率的影响

对于确定的晶体,当抽运光半径、抽运功率以及输出镜曲率半径一定时,振荡光半径取决于腔长的变化,图4(a)~(c)分别给出了腔长、振荡光半径以及 w_p/w_s 对热致衍射损耗和激光器转换效率的影响,图4(d)给出了振荡光半径, w_p/w_s 与腔长的关系(抽运光半径为0.32 mm,抽运光功率为25 W,输出镜透射率为5%,重复频率为20 kHz,输出镜曲率半径为100 cm)。

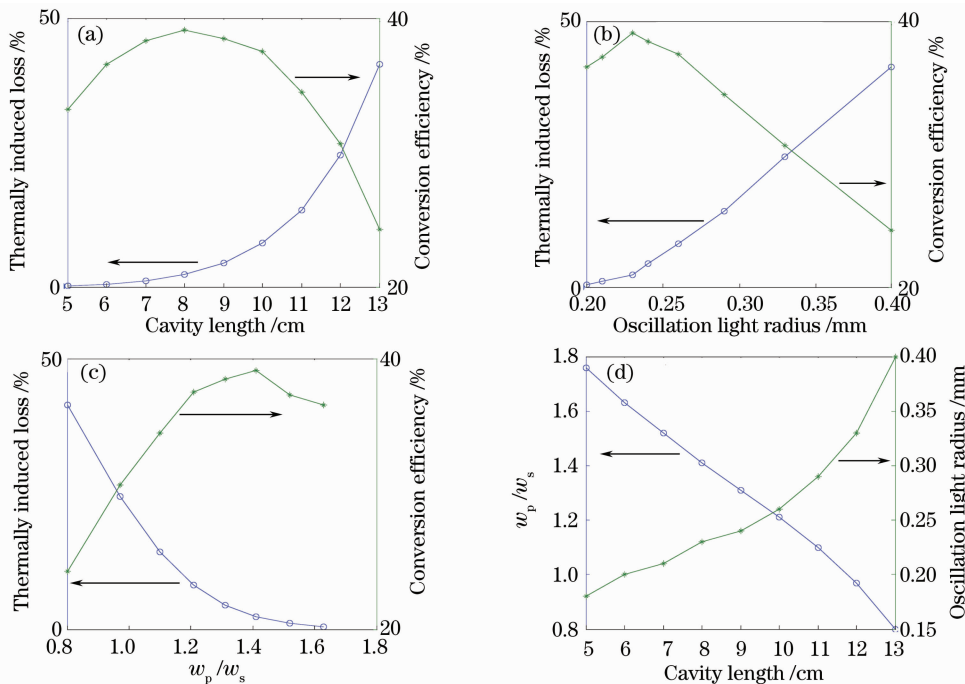


图4 不同因素对热致衍射损耗和转换效率的影响

Fig. 4 Changes of thermally induced loss and conversion efficiency with all kind of factors

4.5 重复频率对热致衍射损耗和转换效率的影响

由图5可知,在其他条件一定的情况下(抽运光半径为0.32 mm,抽运光功率为25 W,输出镜透射率为5%,腔长为8 cm,输出镜曲率半径为100 cm),重复频率增大,转换效率随之增大,当重复频率大于50 kHz后,变化趋势缓慢,而热致衍射损耗保持不变,因此热致衍射损耗与重复频率无关。当重复频率为70 kHz时,最大转换效率为42.66%,而热致衍射损耗保持2.3%不变。

由图4(a)可知,当抽运光半径和抽运功率一定时,随着谐振腔腔长的增大,激光器的转换效率先增大后减小,热致衍射损耗增大。因此存在唯一的最优腔长使得激光器的转换效率最大,同时热致衍射损耗较小。由图4(b)可知,当振荡光半径增大时,转换效率先增大后减小,热致衍射损耗增大,存在唯一的最优振荡光半径使得激光器的转换效率最大,同时热致衍射损耗较小。图4(c)显示,随着 w_p/w_s 的增大,热致衍射损耗降低,转换效率先增大后减小,也存在唯一的最优 w_p/w_s 使得激光器的转换效率最大。当抽运光半径取0.32 mm时,腔长大于13 cm后,谐振腔不稳定,激光器不出光,输出功率为0。当谐振腔稳定工作时,存在唯一的最优腔长使得激光器的转换效率最大。腔长为8 cm时,最大转换效率为39.13%,此时热致衍射损耗为2.3%。

5 实验验证

仿真计算热效应产生的热致衍射损耗与抽运光半径,抽运功率的变化规律与杨爱粉等^[10]的实验一致,验证了仿真算法步骤1)和步骤2)的正确性。

图6中的实验装置主要验证抽运光束分布和谐振腔参数对转换效率的影响规律。

图7分别给出了输出镜透射率、腔长、抽运功率和重复频率对Nd:YAG固体激光器转换效率影响的关系曲线。图7(a)为重复频率对DPSSL转换效率的影

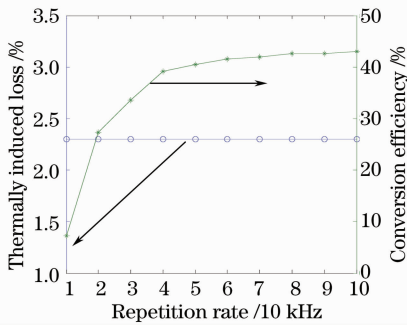


图5 重复频率对热致衍射损耗和转换效率的影响

Fig. 5 Influence of repetition rate with thermally induced loss and conversion efficiency

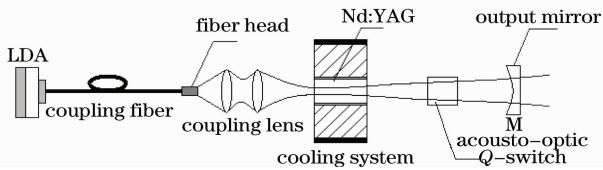


图6 实验所用激光器装置图

Fig. 6 Equipment of Nd:YAG laser

响(抽运功率为 20 W,输出镜透射率为 13.4%,抽运光半径为 0.3 mm,腔长为 8 cm);图 7(b)为输出镜透射率对 DPSSL 转换效率的影响(抽运功率为 20 W,重复频率为 20 kHz,抽运光半径为 0.3 mm,腔长为 8 cm);图 7(c)为抽运功率对 DPSSL 转换效率的影响(重复频率为 20 kHz,输出镜透射率为 13.4%,抽运光半径为 0.3 mm,腔长为 8 cm);图 7(d)为腔长对 DPSSL 转换效率的影响(抽运功率为 20 W,重复频率为 20 kHz,输出镜透射率为 13.4%,抽运光半径为 0.3 mm)。

由图 7 可知,仿真计算与实验结果保持一致,从而验证了仿真算法步骤 3)的正确性。仿真计算曲线与实验曲线存在差异的主要原因是,仿真计算过程中激光器的耦合效率为 100%,而实际中激光器的耦合效率达不到 100%。但是仿真计算曲线与实验曲线的走向趋势是完全一致的,从而验证了仿真计算的正确性。

表 2 给出了设计实例。

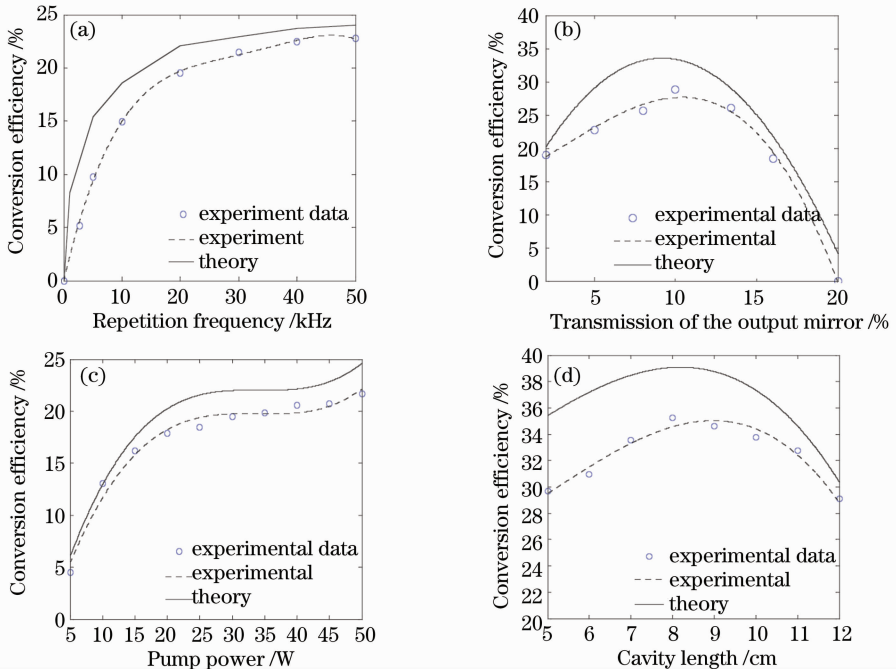


图7 激光器转换效率与各个因素的关系曲线

Fig. 7 Curve of conversion efficiency with all kind of factors

表 2 固体激光器设计实例

Table 2 Examples of laser design

P_m/W	w_p/mm	L/cm	$T/\%$	Repetition frequency /kHz	Loss /%	Conversion efficiency /%
10	0.29	10	1	70	1.32	45.65
15	0.31	8	1	70	1.09	44.81
25	0.32	8	1	70	2.30	43.61
50	0.38	7	1	70	3.10	41.76

由表 2 可知,当抽运功率一定时,存在最佳的抽运光束分布和谐振腔结构,使得激光器的转换效率最大。不同的抽运功率对应的最佳抽运光束分布和谐振腔结构不同,产生的热致衍射损耗不同。当抽运功率增大时,它所对应的最大转换效率下降,这主要是因为热致衍射损耗增大,与刘均海等^[7]的实验结果一致。

6 结 论

由于热效应对激光器的影响很大,因此在设计激光器时,要考虑热效应产生的损耗,尽量保证在热效应产生的损耗较小的情况下,使 DPSSL 的转换效率达到最大。

综合考虑抽运光束分布、激光介质以及谐振腔结构对热效应和激光器转换效率的影响,给出设计激光器的一套算法,该算法可作为设计高效率激光器的依据。

在实际设计激光二极管抽运固体激光器时,依据仿真计算得到的规律,得出理想的设计参数,再通过实验结果进行适当调整,即可得到比较理想的设计方案。根据前面的研究结果,理论设计的主要思路可归结如下:

1) 按照所需要的输出功率的数值,依据图 1,在热致衍射损耗较小的区域,即使 DPSSL 的转换效率较大的区域,确定较佳的抽运功率的数值。当抽运功率确定之后,可依据图 2,确定最佳的抽运光半径。

2) LD 端面抽运调 Q 固体激光器转换效率的高低,主要由抽运光光场与振荡光光场的耦合程度来决定。当抽运功率和抽运光半径确定以后,便可通过数值计算和图 3,4 求得最佳的输出镜透射率、腔长以及振荡光半径。一般情况下高重复频率时激光器的转换效率比低重复频率大,可根据实际要求来选择所需要的重复频率。

参 考 文 献

- 1 Yang Yang, Cheng Yin, Xu Mingshun *et al.*. Application of neural networks in design of Q-switched laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 646~651
杨 阳, 程 寅, 徐明顺等. 神经网络在调 Q 激光器优化设计上的应用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 646~651
- 2 Yang Hao, Zhang Yinke, He Yanping. Thermal effect of end-pumped laser crystal with circular cross-section[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 49~53
杨 浩, 张引科, 贺艳平. 激光二极管端面抽运圆截面激光晶体热效应[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 49~53
- 3 T. Y. Fan, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid-state laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6): 895~912

- 4 Zhang Shuaiyi, Huang Chunxia, Yu Guolei *et al.*. Thermal effects of laser crystal by laser diode end-pumped[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 333~337
张帅一, 黄春霞, 于果蕾等. 激光二极管端面抽运激光晶体的热效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 333~337
- 5 Shi Peng, Li Jinping, Li Long *et al.*. Influence of pump light distribution on thermal effects within Nd:YAG microchip laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 643~646
史 彭, 李金平, 李 隆等. 抽运光分布对 Nd:YAG 微片激光器热效应的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 643~646
- 6 Zhang Xiang, Su Likun, Cai Qing. Analysis of thermal effect and experimental test of beam wavefront aberration in all solid-state Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 802~807
张 翔, 苏礼坤, 蔡 青. 全固态 Nd:YAG 激光器热效应及输出光束波前像差分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 802~807
- 7 Liu Junhai, Lü Junhua, Lu Jianren *et al.*. Investigation of thermally induced losses in high-power laser-diode-array end-pumped Nd:YVO₄ solid-state lasers[J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2000, **17**(1): 48~53
刘均海, 吕军华, 卢建仁等. 高功率半导体激光器端面泵浦 Nd:YVO₄ 固体激光器热致损耗的研究[J]. *量子电子学报*, 2000, **17**(1): 48~53
- 8 Yang Yongming, Wang Shiyu, Cai Defang *et al.*. Thermal effect of end deformation in laser diode end pumped Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 582~586
杨永明, 王石语, 蔡德芳等. 激光二极管端面抽运 Nd:YAG 的端面形变[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 582~586
- 9 Tang Ke, Cai Defang, Wang Shiyu *et al.*. Effect of flat-topped beam pumping on the DPL[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(6): 679~682
唐 珂, 蔡德芳, 王石语等. 泵浦光为平顶光束对 DPL 泵浦效果的影响[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(6): 679~682
- 10 Yang Aifen, Guo Zhen, Wang Shiyu *et al.*. The thermal effect of flattened optical pumped DPL on output power [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 56~59
杨爱粉, 过 振, 王石语等. 平顶光端面抽运 DPL 中热效应对输出功率的影响[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 56~59
- 11 Song Xiaolu, Guo Zhen, Li Bingbin *et al.*. Influence of heat-dissipation methods on thermal distortion of laser rods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 351~357
宋小鹿, 过 振, 李兵斌等. 散热方式对激光晶体热畸变效应的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 351~357
- 12 Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 370~373
W·克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 370~373
- 13 Xie Wenjie, Tam Siuchung, Lam Yeeloy *et al.*. Influence of the thermal effect on the TEM₀₀ mode output power of a laser-diode side-pumped solid-state laser[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(30): 5482~5497
- 14 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. The Principles of Lasers [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 65~66, 146~148
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等. 激光原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 65~66, 146~148
- 15 Wang Shiyu, Xue Haizhong, Tang Yingde *et al.*. Study of the effect of the distribution of pumping light on the diode pumped solid-state laser. [J]. *J. Xidian University*, 2003, **30**(1): 75~80
王石语, 薛海中, 唐映德等. 泵浦光束空间分布对 DPL 性能的影响[J]. *西安电子科技大学学报*, 2003, **30**(1): 75~80
- 16 Wang Shiyu, Guo Zhen, Fu Junmei *et al.*. Effect of the pump light distribution on oscillation optical beam quality of the diode pumped laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **52**(9): 2995~3003
王石语, 过 振, 傅君眉等. 抽运光分布对二极管抽运激光器振荡光光束质量的影响[J]. *物理学报*, 2004, **52**(9): 2995~3003