

LD 泵浦的 kHz, Er³⁺, Yb³⁺:glass 被动调 Q 微片激光器

郭娜, 惠勇凌, 蔡瑾鹭, 姜梦华, 雷 訇, 李 强

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要: 目前 1.5 μm LD 泵浦钇玻璃被动调 Q 微型激光器是军事激光测距的研究热点, 获得较高的激光重复频率和单脉冲能量尤为重要。文中主要报道了一种应用于激光测距领域的钇镱共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 微片激光器。激光器采用中心波长为 940 nm 的单管二极管为泵浦源, 钇镱共掺磷酸盐玻璃(Er³⁺, Yb³⁺:glass)作为增益介质, CO²⁺:MgAl₂O₄(CO:MALO)作为可饱和吸收体。通过分析泵浦光斑半径对模式匹配影响, 优化泵浦光斑半径, 实验分析可饱和吸收体初始透过率 T_0 和输出镜反射率 R 对输出激光参数影响, 优化 T_0 和 R 值。最终实验中采用增益预泵浦方式, 实现重频 1 kHz, 单脉冲能量 40 μJ, 脉宽 5.09 ns, 峰值功率 7.85 kW, 光束质量 $M^2=1.4$, 波长 1 535 nm 的稳定激光输出。

关键词: 微片激光器; 被动调 Q; 模式匹配

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1005002

LD pumped kHz Er³⁺, Yb³⁺:glass passively Q-switched microchip lasers

Guo Na, Hui Yongling, Cai Jinlu, Jiang Menghua, Lei Hong, Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: At present, 1.5 μm LD pumped Er-glass passively Q-switched micro-laser is a popular research direction in military laser ranging. Achieving high repetition rate and single pulse energy are very important indicators. In this paper, a kHz erbium-ytterbium co-doped phosphate glass passively Q-switched microchip laser for laser ranging was reported. The laser was pumped by a single diode with a center wavelength of 940 nm and erbium-ytterbium co-doped phosphate glass(Er³⁺, Yb³⁺:glass) as the gain medium, CO²⁺:MgAl₂O₄ (CO:MALO) as the saturable absorber. By analyzing the influence of the pump spot radius on the mode-matching, the pump spot radius was optimized. The effects of the initial transmittance (T_0) of saturable absorber and the reflectance R of output mirror on the output laser parameters were experimentally analyzed. In the final pre-pumping experiment, a Q-switched pulse was achieved, with repetition frequency of 1 kHz, wavelength of 1 535 nm, single pulse energy of 40 μJ, pulse width of 5.09 ns, peak power of 7.89 kW and beam quality of 1.4.

Key words: microchip laser; passively Q-switched; mode-matching

收稿日期: 2018-05-10; 修订日期: 2018-06-20

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2); 北京市教委基金(PXM2017-014204-500052)

作者简介: 郭娜(1993-), 女, 硕士生, 主要从事固体激光器方面的研究。Email: jszgn@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 李强(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事固体激光技术及加工系统方面的研究。Email: ncltlq@bjut.edu.cn

0 引言

高重复频率、窄脉宽、高峰值功率的 1.5 μm 人眼安全波段激光, 在激光测距领域得到广泛应用和关注。这是由于在利用激光进行测距时, 激光的重复频率越高、单脉冲能量越大, 其测量速度越快、精度越高、距离越远; 其次 1.5 μm 波长既处于“人眼安全波段”又处于“大气窗口波段”, 不仅对人眼安全而且对烟、雾穿透力强, 在军事测距中意义十分重大^[1-6]。

LD 泵浦掺 Er³⁺的磷酸盐玻璃激光器因其同时满足小体积、高峰值功率、低成本、高效率等要求, 成为目前直接获得 1.5 μm 激光输出的有效方式^[2,4]。传统的单掺 Er³⁺玻璃激光器, 由于 Er³⁺吸收带较弱, 且为三能级系统, 很难使 Er³⁺的上能级实现粒子数反转, 激光器效率很低。如果将 Er³⁺/Yb³⁺同时掺入基质中, 由于 Yb³⁺在 880~1 010 nm 有一个很强的吸收带, 能量从 Yb³⁺到 Er³⁺转换非常快, 且转换效率达到 95% 以上, 此时 Er³⁺上能级很容易实现粒子数反转输出激光, 激光器效率较高^[3]。

国内外关于 LD 泵浦 kHz, Er³⁺/Yb³⁺磷酸盐玻璃激光器已做出相关研究报道。1999 年^[7], Philippe. Thonyn 组实现了重复频率 0.3~1.6 kHz、单脉冲能量 1~15 μJ 的激光输出, 所采用的泵浦光斑半径在 50~100 μm 之间, 可饱和吸收体的初始透过率为 97%, 输出镜反射率为 98%; 2006 年^[8], 宋峰等人实现了重复频率 0.8~1.15 kHz、最大单脉冲能量 16 μJ 的激光输出, 所采用的泵浦光斑半径为 50 μm、可饱和吸收体的初始透过率为 96%、输出镜反射率为 99%; 2013~2016 年^[9-11], 波兰军事科技大学研究组做出相关报道, 实现了重复频率 1~4 kHz、最大单脉冲能量小于 20 μJ 的激光输出, 所采用的泵浦光斑半径为 50 μm、可饱和吸收体的初始透过率为 99%、输出镜反射率为 97.5%。由此看出, 前人在研究中实现 kHz 重复频率的激光输出时多采用较小的泵浦光斑半径 ω_p、较高的可饱和吸收体初始透过率 T₀ 和输出镜反射率 R。然而, 过小的 ω_p、过高的 T₀ 和 R 值会导致钕玻璃微片激光器输出激光单脉冲能量较小^[12-14]。

文中主要通过泵浦光斑半径 ω_p、可饱和吸收体初始透过率 T₀ 和输出镜反射率 R 进行优化, 在采用增益预泵浦方式下, 使钕玻璃被动调 Q 微片激光

器输出激光重复频率达 1 kHz 的同时也具有较高的单脉冲能量。首先, 为了获得一个合理的泵浦光斑半径 ω_p, 确保在整个泵浦功率范围内, 激光腔都具备良好的模式匹配, 文章从理论上分析了泵浦光斑半径 ω_p 对激光腔模式匹配影响; 其次, 对可饱和吸收体初始透过率 T₀ 和输出镜反射率 R 进行实验优化, 使激光器的重复频率和单脉冲能量同时达到要求; 最后, 采用优化结构, 获得了重复频率 1 kHz、单脉冲能量 40 μJ、脉宽 5.09 ns、峰值功率 7.85 kW、光束质量 M²=1.4、波长 1 535 nm 的稳定激光输出。

1 实验结构设计

实验结构原理如图 1 所示。泵浦二极管的中心波长为 940 nm; 泵浦方式为增益预泵浦^[15-16], 以提高输出激光的稳定性; 激光器采用平-平腔, 全反镜镀 940 nm 增透膜和 1 535 nm 全反膜; 输出镜镀 1 535 nm 部分反射膜和 940 nm 全反膜。增益介质是掺杂浓度为 1wt.%Er³⁺、21wt.%Yb³⁺的钕镱共掺磷酸盐玻璃; 可饱和吸收体为 CO²⁺:MgAl₂O₄, 将其与增益介质光学胶合。选择 CO²⁺:MgAl₂O₄ 的原因是: 在尖晶石中的 CO²⁺在 1.5 μm 激光波段左右有很宽的吸收带, 充足的激发态寿命(达 350±40 ns)^[4,14]和很小的激发态吸收损耗, 且其在 1.5 μm 的吸收截面面积(约 3.5×10⁻¹⁹ cm²)远大于钕玻璃发射截面面积(8×10⁻²¹ cm²)^[1,4], 腔内无需精准聚焦系统, 是目前研究微型化 1.5 μm 人眼安全激光器的首选调 Q 晶体。

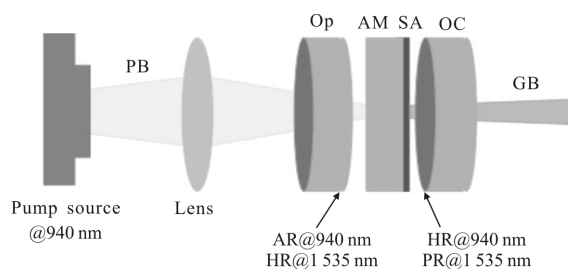


图 1 实验结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of experimental structure

2 实验优化与结果分析

在 LD 端面泵浦被动调 Q 激光器中^[17], 泵浦光斑大小 ω_p、可饱和吸收体初始透过率 T₀ 和输出镜反射率 R 是影响输出激光重复频率和单脉冲能量的重要

因素。因此,为了使得输出激光的重复频率和单脉冲能量同时满足要求,文中将对以上 3 个因素进行优化。

2.1 泵浦光斑大小的优化

由端面泵浦激光器增益介质的热透镜焦距公式(1)可知,泵浦光斑半径 ω_p 直接影响热透镜焦距 f_h ,而在有源腔中,增益介质热透镜效应相当于谐振腔中加入一个焦距为 f_h 的薄透镜,此时腔内任意处的振荡光半径会受到 f_h 的影响。因此,通过 f_h 可将泵浦光斑半径与振荡光半径联系起来。

端面泵浦激光器增益介质的热透镜焦距为^[10]:

$$f_h = \frac{2\pi K_c \omega_p^2}{P_{in} \eta_h (dn/dT + \alpha_c n_c)} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\alpha_p l_{glass})} \quad (1)$$

式中: K_c 为增益介质热传导率; η_h 为热负载比; n_c 为增益介质折射率; α_c 为热膨胀系数; α_p 为增益介质对泵浦光吸收系数; P_{in} 为泵浦光平均功率。

在有源腔中,考虑增益介质热透镜效应,经过高斯变换得到增益介质中心光斑半径^[12]:

$$\omega_3 = \omega_2 \left[1 + \left(\frac{\lambda L_1}{\pi \omega_2^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: L_1 为薄透镜到输出镜的距离。在平-平腔中, ω_2 为输出镜上基膜光斑尺寸,可近似为激光腰斑半径。通过 ω_3 可以考察泵浦光与振荡光在不同泵浦平均功率 P_{in} 下的匹配程度,基于前人研究^[7-11],主要对 3 种泵浦光斑半径进行模拟,如图 2 所示。

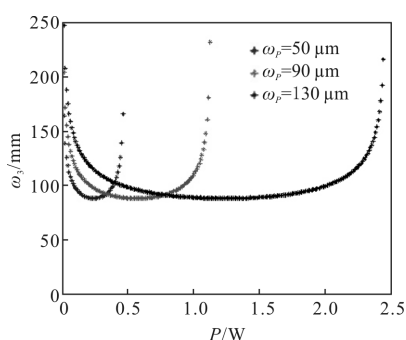


图 2 不同泵浦光斑半径下增益介质中心光斑半径随泵浦功率变化关系

Fig.2 Relation between the radius of the central spot in the gain medium and the pump power at different pump spot radius

从图 2 中可以看出,泵浦光斑半径越大, ω_3 平缓变化范围(模式匹配范围)越广,主要原因是增大泵浦光斑半径就是减小了同泵浦功率下增益介质端面

单位面积上的泵浦功率密度,从而减小热效应。泵浦光斑半径分别为 $\omega_p=50 \mu\text{m}$ 、 $\omega_p=90 \mu\text{m}$ 、 $\omega_p=130 \mu\text{m}$ 时,所对应的模式匹配范围分别为 0.15~0.45 W、0.3~1 W、0.45~2.3 W。考虑到实验中泵浦源输出光平均功率主要工作在 0.3~1 W 之间,因此选择 $\omega_p=90 \mu\text{m}$ 为合适泵浦光斑半径。

2.2 可饱和初始透过率 T_0 和输出镜反射率 R 的优化

确定泵浦光斑半径后,通过实验对可饱和初始透过率 T_0 和输出镜反射率 R 进行优化,使得输出激光重复频率稳定在 1 kHz 时,单脉冲能量得到提高。实验中直流分量为低于直流阈值 0.1 A,脉冲分量中重复频率始终为 1 kHz,泵浦脉宽为 45 μs ,调节泵浦脉冲幅值使得输出激光重复频率达到 1 kHz。

首先,对比不同可饱和吸收体初始透过率下的输出激光参数,如表 1 所示。

表 1 激光输出 1 kHz 时不同 T_0 对其他参数的影响
Tab.1 Influence of different T_0 on other parameters in laser output 1 kHz

T_0	R	P_{in}/W	$E/\mu\text{J}$	t_p/ns	P_p/kW	f/kHz
86%	90%	0.940	60	4.8	12.5	0.7~0.9
90%	90%	0.732	40	5.09	7.86	1
94%	90%	0.568	20	5.2	3.86	1

从表 1 中看出:当 $T_0=86\%$ 时,增大泵浦光平均功率,输出激光的重复频率在 0.7~0.9 kHz 范围内波动,即无法稳定实现 1 kHz。主要原因是: T_0 值过小,腔内吸收损耗较大,由图 2 看出,增大泵浦平均功率提高输出激光频率过程中,当 $P_{in}=0.940 \text{ W}$ 时,模式匹配曲线已经发生向上弯曲,增益介质热透镜效应明显,模式匹配变差,所以,此时输出激光重复频率无法稳定实现 1 kHz。

当 $T_0=90\%$ 和 $T_0=94\%$ 时,从图 2 中可以看出:两者泵浦功率都处于模式匹配范围比较平滑区域,所以激光都能实现稳定输出,且 $T_0=90\%$ 比 $T_0=94\%$ 时输出的单脉冲能量和峰值功率都高,脉宽也窄。因此,认为 $T_0=90\%$ 是合适的可饱和吸收体初透过率。

选定 $T_0=90\%$ 后,对输出镜反射率 R 进行优化,对比了不同输出镜反射率下输出激光参数,如表 2

所示。

表 2 不同 R 对其他输出参数的影响

Tab.2 Impact of different R on other output parameters

T_0	R	P_m/W	$E/\mu J$	t_p/ns	P_p/kW	f/kHz
90%	97%	0.605	15	5.25	2.85	1
90%	90%	0.732	40	5.09	7.86	1
90%	80%	0.846	44	5.01	8.78	0.9~1.1

从表 2 可以看出:当 $R=80\%$ 时输出激光的单脉冲能量和峰值功率均比 $R=90\%$ 、 $R=97\%$ 时高,脉宽也更窄,而此时输出激光的重复频率却在 0.9~1 kHz 范围内波动,即无法稳定实现 1.1 kHz。分析其原因与上述 $T_0=86\%$ 时类似,只是此时损耗增加是由输出引起。

当 $R=90\%$ 、 $R=97\%$ 时,两者泵浦平均功率均在模式匹配平滑范围内,增益介质热效应不明显,能够实现 1 kHz 输出。此时, $R=90\%$ 时输出激光的单脉冲能量和峰值功率都较 $R=97\%$ 高。

因此,综合考虑下,认为可饱和吸收体初始透过率为 $T_0=90\%$,输出镜反射率为 $R=90\%$ 为合适条件。在此条件下,当泵浦直流分量为 0.42 A,泵浦脉冲重复频率 1 kHz、幅值 9 A、脉宽 45 μs 时,实现了重复频率 1 kHz、单脉冲能量 40 μJ 、脉宽 5.09 ns、峰值功率 7.85 kW、光束质量 $M^2=1.4$ 、波长 1 535 nm 的调 Q 脉冲稳定输出。图 3 为输出激光脉冲序列图,图 4 为输出激光脉宽图,图 5 为远场光斑及光束质量测量图,图 6 为采用分辨率为 0.02 nm 的光谱仪(YOKOGAWA AQ6370C),测得室温下输出激光的光谱图,可看出输出激光中心波长为 1 535 nm 左右,线宽小于 0.02 nm。

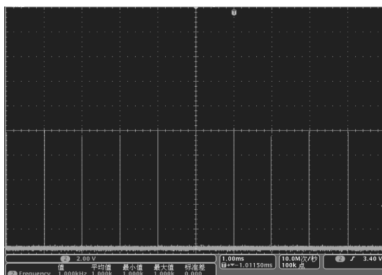


图 3 输出激光脉冲序列图

Fig.3 Pulse train of output laser

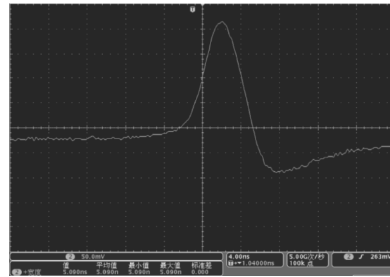


图 4 输出激光脉宽图

Fig.4 Pulse width of output laser

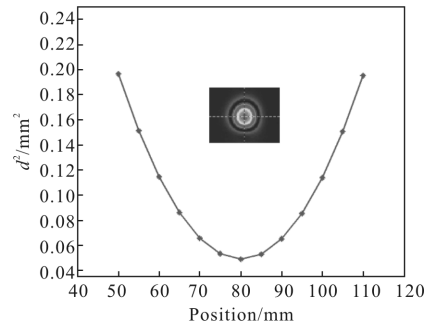


图 5 远场光斑及光束质量测量图

Fig.5 Far field facula and beam quality

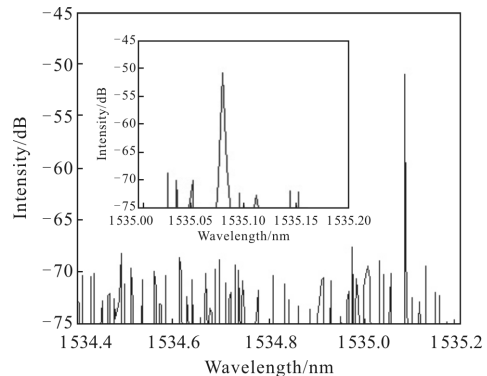


图 6 输出激光光谱图

Fig.6 Spectrum of output laser

3 结论

文中首先分析了前人报道中制约钕玻璃被动调 Q 微片激光器输出激光重复频率达 kHz 时单脉冲能量较低的主要原因(泵浦光斑半径小、可饱和吸收体初始透过率高、输出镜反射率高)。其次,通过采用单一变量方法对泵浦光斑半径、可饱和吸收体初始透过率、输出镜反射率三者进行优化,并最终实现了重复频率 1 kHz、单脉冲能量 40 μJ 、脉宽 5.09 ns、峰值功率 7.85 kW、光束质量 $M^2=1.4$ 、波长 1 535 nm 的稳定

激光输出。研究结果表明影响被动调 Q 输出激光重复频率和单脉冲能量的因素并不是单一的，且它们之间互相关联，必须通过实际优化才能使输出激光重复频率和单脉冲能量同时最佳。文中研究结果对 LD 端面泵浦的 kHz 钕镱共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 微片激光器研究具有一定参考意义。

参考文献:

[1] Karlsson G, Pasiskevicius V, Laurell F, et al. Diode-pumped Er-Yb:glass laser passively Q switched by use of Co^{2+} : MgAl_2O_4 as a saturable as a absorber [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(33): 6188-6182.

[2] Zhang Yulu, Hui Yongling, Jiang Menghua, et al. Experimental study of LD-pumped erbium ytterbium co-doped phosphate glass Q-switched microlaser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0305004. (in Chinese)
张宇露, 惠勇凌, 姜梦华, 等. LD 抽运钕镱共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 微型激光器实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 0305004.

[3] Liu Shujing. Er,Yb co-doped phosphate glass lasers [D]. Tianjin: Nankai University, 2003: 7-8. (in Chinese)
刘淑静. 1.5 μm Er,Yb:磷酸盐玻璃激光器[D]. 天津: 南开大学, 2003: 7-8.

[4] Guo Meng, Hui Yongling, Zhang Yulu, et al. A wide temperature range miniaturization eye-safe laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 27(4): 041019. (in Chinese)
郭猛, 惠勇凌, 张宇露, 等. 宽温度范围微型人眼安全激光器[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 041019.

[5] Song Xinxiang, Zhang Xiaoxia. Er^{3+} , Yb^{3+} co-doped phosphate glass laser and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(9): 33-36. (in Chinese)
宋新祥, 张晓霞. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺的磷酸盐激光玻璃及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(9): 33-36.

[6] Guo Tangyong, Wang Peiyuan, Li Xin, et al. Experimental result of high repeated rate laser ranging [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(6): 137-138. (in Chinese)
郭唐永, 王培源, 李欣, 等. 高重复频率激光测距及的实测结果[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(6): 137-138.

[7] Thony P, Fulbert L R, Besesty P, et al. Laser radar using a 1.55 μm passively Q-switched microchip laser [C]//SPIE, 1999, 3707: 616-623.

[8] Song Feng, Wu Zhaohui, Liu Shujing, et al. A passive Q-switched microchip Er/Yb glass laser pumped by laser diode [J]. *Chin Phys Lett*, 2006, 23(5): 1195-1197.

[9] Mlynczak J, Kopczynski K, Mierczyk Z, et al. Practical application of pulsed "eye-safe" microchip laser to laser rangefinders[J]. *Opto-Electron Rev*, 2013, 21(3): 332-337.

[10] Nabil Belghachem, Jaroslaw Mlynczak. Comparison of laser generation in thermally bonded and unbonded $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$:glass/ Co^{2+} : MgAl_2O_4 microchip lasers [J]. *Optical Materials*, 2015, 46: 561-564.

[11] Jarosław Młyńczak, Krzysztof Kopczyński, Nabil Belghachem, et al. Pulse laser head with monolithically thermally bonded microchip operating at 1.5 μm wavelength [C]//SPIE, 2016, 10159: 1015905.

[12] Jin Fengwen. The research of 100 kHz A-O Q-switched Nd:GdVO₄ laser [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 39-50. (in Chinese)
金凤文. 100 kHz 声光调 QNd:GdVO₄ 激光器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 39-50.

[13] Lan Xinju. Laser Technology [M]. Beijing: Science Press, 2009: 76-87. (in Chinese)
蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 76-87.

[14] Zhang X Y, Zhao S Z, Wang Q P, et al. Optimization of Cr^{3+} -doped saturable-absorber Q-switched lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(12): 2286-2294.

[15] Gong Mali, Yan Ping, Xie Tao, et al. Study of pre-pumping mechanism for passively Q-switched lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(7): 585-589. (in Chinese)
巩马理, 闫平, 谢韬, 等. 被动 Q 开关激光器的预抽运技术[J]. 中国激光, 2003, 30(7): 585-589.

[16] Wang Weiyu, Gong Mali, Liu Xingzhan, et al. Stability of passively Q-switched solid-state lasers and pre-pumping mechanism [J]. *Laser & Infrared*, 2000, 30 (2): 74-77. (in Chinese)
王为宇, 巩马理, 刘兴占, 等. 被动调 Q 固体激光器的稳定性及增益预泵浦技术[J]. 激光与红外, 2000, 30(2): 74-77.

[17] Wu Zhaohui, Song Feng, Liu Shujing, et al. Theoretical analysis and numerical calculation of LD pumped passively Q-switched Er^{3+} , Yb^{3+} co-doped phosphate glass lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(9): 4659-4664. (in Chinese)
吴朝晖, 宋峰, 刘淑静, 等. LD 抽运 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 激光器的理论分析和数值计算 [J]. 物理学报, 2006, 55(9): 4659-4664.

[18] Chen Y F, Kao C F, Huang T M, et al. Influence of thermal effect on output power optimization in fiber-coupled lasers-diode end-pumped lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 31(2): 29-34.