

doi:10.3788/gzxb20134210.1158

Ho : YAG 激光器阈值特性理论分析

汪飞, 沈德元, 王屹山, 周伟, 马合峰

(中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘要:利用准三能级理论,建立了端面泵浦 Ho : YAG 激光器阈值理论模型,推导出 Ho 激光阈值泵浦功率表达式,并分析了阈值泵浦功率与介质吸收效率、输出镜透过率的关系.结果表明:Ho : YAG激光器属于低阈值激光器,合理选择激光器参量,采用 1 907 nm 泵浦或 1 930 nm“翼泵浦”方式,可使 Ho 激光阈值泵浦功率处于毫瓦级水平;选择合适透过率的输出耦合镜,可实现 Ho : YAG激光输出波长在 2 092 nm 和 2 124 nm 之间转换.

关键词:准三能级;Ho : YAG 激光器;阈值泵浦功率;翼泵浦

中图分类号:TN248

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)10-1158-5

Theoretical Analysis of the Ho : YAG Laser Threshold Characteristics

WANG Fei, SHEN De-yuan, WANG Yi-shan, ZHOU Wei, MA He-feng

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on the theory of quasi-three-level, a model of threshold pump power of Ho : YAG laser was built and the formula of threshold pump power of Ho laser was derived. The relationship between the threshold pump power and the absorption efficiency of gain medium or the transmission of output coupler was analyzed. The mW-level threshold pump power of Ho laser can be obtained by optimizing parameters of Ho laser, which was pumped at 1 907 nm or wing-pumped at 1 930 nm. Furthermore, center wavelength lasing at 2 092 nm or 2 124 nm should be achievable by choosing an output coupler of suitable transmission.

Key words: Quasi-three-level; Ho : YAG laser; Threshold pump power; Wing-pumped

0 引言

Ho³⁺ 离子的辐射波长在 2.1 μm 附近,位于人眼安全波段,且在大气中透过率高,在遥感探测、激光测距和激光雷达等领域有重要的应用前景^[1].同时,2.1 μm 处于水分子吸收峰,人体组织对其有很强吸收.用 Ho 激光进行医疗手术时,它在人体中的穿透深度仅几十微米,对人体周围组织的热损伤小,故在医学手术和治疗上的应用越来越广泛^[2].Ho 激光还可以作为泵浦源,通过晶体(如 ZGP 晶体)的非线性效应实现波长转换产生 3~5 μm 中红外激光^[3].近年来,随着 1.9 μm 的掺 Tm 光纤激光器的技术的不断成熟,Tm 激光共振泵浦 Ho 激光

得益于高的斯托克斯因子、低量子亏损热而得到广泛的研究^[4-5].不同基质材料 Ho 激光的实验研究已有报道,如 Ho : YAG^[6-8],Ho : YAP^[9],Ho : LuAG^[10]和 Ho : YLF^[11]等,而 Ho 激光的理论分析并不常见.1988 年 Fan 等^[12]首次利用准三能级模型对 Tm : Ho 激光器的阈值进行了分析,但未考虑高斯光束的传播特性;朱箭等^[13]对 Tm : Ho 激光器的阈值模型进行了重建;张新陆等^[14]分析了 (Tm, Ho) : YLF 激光的理论特性,但他们都将晶体长度近似为腔长.

本文根据准三能级理论,建立了端面泵浦 Ho : YAG激光理论模型,推导了 Ho 激光阈值泵浦功率表达式,并分析了阈值泵浦功率和激光器设计

基金项目:中国科学院“百人计划”资助

第一作者:汪飞(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤激光器和固体激光器. Email:wangfei@opt.cn

导师(通讯作者):沈德元(1962-),男,教授,博导,主要研究方向为光纤和固体激光技术. Email:shendeyuan@opt.ac.cn

收稿日期:2013-04-07;录用日期:2013-05-10

参量间的关系,发现在一定的谐振腔参量下,通过选择不同透过率的输出耦合镜,可以实现 Ho:YAG 激光输出波长在 2 092 nm 和 2 124 nm 之间转换.另外,当晶体掺杂浓度较小时,与 1 907 nm 泵浦方式相比,1 930 nm“翼泵浦”时 Ho 激光阈值泵浦功率偏高,且两种泵浦方式 Ho 激光阈值泵浦功率都处于低功率水平.

1 Ho 激光阈值泵浦功率的数学模型

在建立模型时做两点近似:1)泵浦光和激光均为 TEM₀₀ 模,且为圆对称高斯分布;2)激光上、下能级的粒子数遵从 Boltzmann 分布.从速率方程理论出发,在端面泵浦固体激光器中,反转粒子数密度 $\Delta N(r, z)$ 和腔内光子数密度 $\Phi(r, z)$ 满足的微分方程^[15]为

$$\frac{d\Delta N(r, z)}{dt} = (f_u + f_d)R\gamma_p(r, z) - \frac{\Delta N(r, z) - \Delta N^0}{\tau} - (f_u + f_d)c\sigma_e \Delta N(r, z)\Phi(r, z)/n \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi(r, z)}{dt} = \frac{\sigma_e c}{n_{\text{crystal}}} \int \Delta N\Phi(r, z)dV - \frac{\Phi}{\tau_c} \quad (2)$$

式中: ΔN^0 是热平衡时反转粒子数密度; Φ 为腔内总光子数; $\gamma_p(r, z)$ 和 $\varphi(r, z)$ 分别为归一化的泵浦光子数密度和激光光子数密度的概率分布; f_u 和 f_d 分别为激光上下能级的玻尔兹曼常量; σ_e 为受激发射截面; n 为晶体的折射率; c 为真空中光速; τ 为激光上能量寿命; τ_c 为腔内光子寿命;泵浦速率 R 为

$$R = \eta_p \eta_a P_{\text{in}}/h\nu_p = \eta_p P_{\text{in}}[1 - \exp(-l\alpha)]/h\nu_p \quad (3)$$

式中: P_{in} 为泵浦功率; η_a 为工作物质对泵浦光的吸收效率; ν_p 为泵浦光的频率; l 为晶体长度; α 为小信号吸收系数.

在整个增益介质中对泵浦光子密度和激光光子密度函数进行归一化,端面泵浦条件下,在单位体积中,归一化的泵浦光子数密度和激光光子数密度概率分布公式为^[13]

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

$$\varphi(r, z) = \frac{2 \cdot \exp[-2r^2/\omega_s^2(z)]}{\pi\omega_s^2(z)L_c} \quad (5)$$

式中 $\omega_p(z)$ 和 $\omega_s(z)$ 分别位置 z 处的泵浦光和激光光束的半径,令 ω_{p0} 和 ω_{s0} 分别泵浦光和激光束腰半径,它们分别位于晶体前端面($z=0$)和晶体后端面($z=d$)处.假设泵浦光和激光光束半径在晶体内保持不变,在 z 处的激光光斑近似等于激光束腰半径,即 $\omega_s = \omega_{s0}$.泵浦光斑在晶体内沿着 z 轴分布,当增益介质较短时,可用平均泵浦光斑半径 ω_p 代替 $\omega_p(z)$.

阈值泵浦功率求解过程中用到

$$\Phi(r, z) = \Phi\varphi(r, z), f = f_u + f_d$$

$$N_2^0 \ll N_1^0, \Delta N^0 \approx -N_1^0 = -f_d N_{\text{tot}}$$

$$\eta_a = [1 - \exp(-l\alpha)], \alpha = \sigma_p f_p N_{\text{tot}}$$

$$L_c = L + (n-1)l, \tau_c = \frac{2nL_c}{c\delta}, \delta \approx -\ln(R_1 R)$$

$$\omega_p^2 = \omega_{p0}^2 + \lambda_p^2 \cdot (l^2 - 3ld + 3d^2)/3\pi^2 \omega_{p0}^2 \quad (6)$$

式中: N_{tot} 为 Ho³⁺ 离子的总粒子数密度; N_2^0 、 N_1^0 分别为热平衡时激光上下能级粒子数密度; σ_p 为增益介质对泵浦光的吸收截面; f_p 为泵浦光下能级的玻尔兹曼常量; L 为谐振腔的长度; L_c 是腔的光学长度; δ 表示腔内往返损耗; R_1 和 R 分别为输入镜和输出镜对激光的反射率; λ_p 为泵浦光波长.

对于连续光运转, $\Phi(r, z)$ 和 $\Delta N(r, z)$ 不随时间变化,综合式(3)~(6)可求得激光振荡达到稳定时 $\Phi(r, z)$ 和 $\Delta N(r, z)$ 所满足的方程为

$$\Delta N(r, z) = \frac{\tau f R \gamma_p(r, z) - f_d N_{\text{tot}}}{1 + f \tau \sigma_e c \Phi(r, z)/n} \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_e c}{n_{\text{crystal}}} \int \Delta N(r, z)\varphi(r, z)dV - \frac{c\delta}{2nL_c} = 0 \quad (8)$$

当激光处于阈值时,腔内总光子数 $\Phi=0$,将式(7)代入式(8)可得阈值泵浦功率表达式为

$$P_{\text{in, th}} = \frac{\pi h \nu_p (\omega_{s0}^2 + \omega_p^2) [\delta + 2\sigma_e f_d N_{\text{tot}} l]}{4\eta_p \sigma_e f \tau \eta_a} \quad (9)$$

式中 δ 描述腔内往返损耗, $2\sigma_e f_d N_{\text{tot}} l$ 表示再吸收损耗,可以看出,泵浦光子产生的增益需克服再吸收损耗与腔内往返损耗.由式(9)可知,阈值泵浦功率与腔内损耗、热平衡时的基态粒子数、泵浦光斑和激光光斑大小、激光上下能级的玻尔兹曼因子以及晶体对泵浦光的吸收系数等有关系.

2 数值模拟结果与讨论

图 1 为 Ho:YAG 晶体吸收和荧光光谱图,由吸收光谱图可见,在 1.9 μm 处 Ho:YAG 有两个强吸收峰,其中最大吸收峰在 1 907 nm 附近,相对较弱的吸收峰在 1 930 nm 附近,对 Ho:YAG 激光

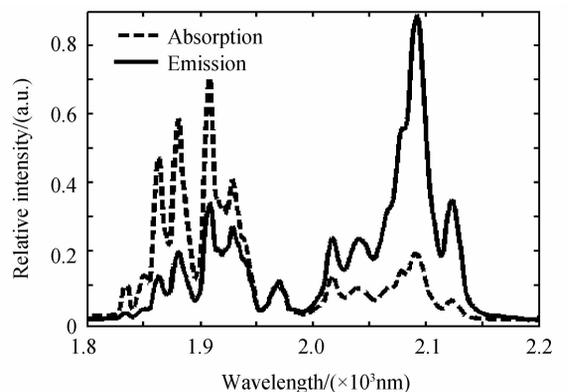


图 1 Ho:YAG 晶体吸收和荧光光谱

Fig. 1 Absorption spectrum and emission spectrum of Ho:YAG crystal

器而言,相比 1 907 nm 泵浦,1 930 nm“翼泵浦”具有较高的斯托克斯因子、较低的量子亏损热,更有利于实现高效率的激光输出.从 Ho:YAG 晶体的荧光光谱图可见, Ho:YAG 的最大发射峰在 2 092 nm 附近,次级发射峰在 2 124 nm 附近.

Ho:YAG 激光器谐振腔为典型的平凹腔,根据式(9),采用 MATLAB 软件进行数值模拟,可以得出 Ho 激光的阈值泵浦功率.模拟中各参量为:激光谐振腔长 L 为 20 mm; R_1 和输出耦合镜对泵浦光的反射率均取 0.998;输出耦合镜透过率 $T=1-R=10\%$; ω_{p0} 为 130 μm ; ω_{s0} 为 160 μm ;在室温条件(300 K)下, Ho:YAG 晶体折射率 n 为 1.83、掺杂浓度为 1.0 at. %、长度 l 为 14 mm、 N_{tot} 为 $1.3811 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. 泵浦光与激光参量如表 1 所示,表中的玻尔兹曼因子可根据 Ho³⁺ 的激光上下能级⁵I₇,⁵I₈ 分裂的 Stark 能级^[16] 理论计算所得.

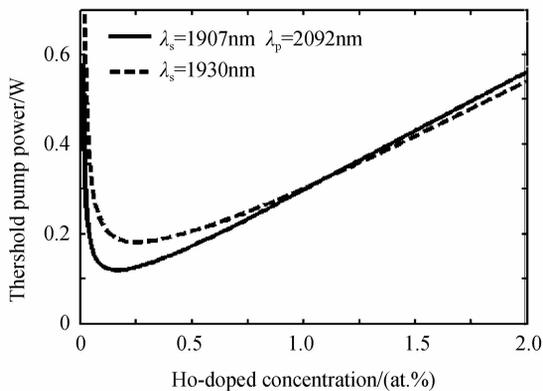
表 1 泵浦光与激光波长的相关参量

Table 1 The parameters of pump light and laser

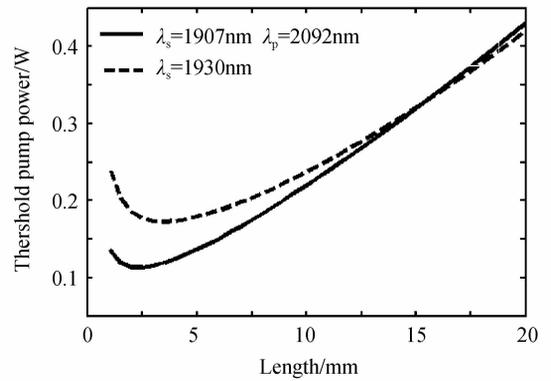
	$\lambda_p=1\ 907\ \text{nm}$		$\lambda_p=1\ 930\ \text{nm}$	
λ_s/nm	2 092	2 124	2 092	2 124
$\sigma_e/(\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$	13.2	5.85	13.2	5.85
$\sigma_p/(\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$	10.4	10.4	4.98	4.98
f_u	0.099 3	0.099 3	0.106 2	0.106 2
f_d	0.017 2	0.011 8	0.017 8	0.013 6
f_p	0.154 5	0.154 5	0.151 6	0.151 6
η_p	1	1	1	1

固定其他参量,仅改变其中某一个参量,从而分析该参量对阈值泵浦功率的影响.首先分析阈值泵浦功率与泵浦吸收的关系.根据式(9),阈值泵浦功率与吸收效率成反比关系,而吸收效率是吸收系数的函数,小信号的吸收系数 $\alpha = \sigma_p f_p N_{\text{tot}}$,由此可将阈值泵浦功率与泵浦吸收的关系转化为阈值泵浦功率与掺杂浓度、晶体长度的关系,如图 2.

图 2 显示了阈值泵浦功率与掺杂浓度和晶体长度的关系.由图 2(a)可知,在阈值泵浦功率最小值处,存在最佳的离子掺杂浓度.掺杂浓度不仅影响了



(a) Threshold pump power and doping content



(b) Threshold pump power and length of crystal

图 2 阈值泵浦功率与掺杂浓度和晶体长度的关系

Fig. 2 The relationship between the threshold pump power and doping content or length of crystal

晶体对泵浦光的吸收效率,同时也影响再吸收损耗,需要在两者之间达到平衡,故存在一个最佳的离子掺杂浓度.当掺杂浓度小于最佳掺杂浓度时,吸收系数小,阈值泵浦功率高,当掺杂浓度超过最佳掺杂浓度时,再吸收损耗增大,阈值泵浦功率增加.图 2(a)同时表明当掺杂浓度较小时,1 930 nm 泵浦吸收系数比 1 907 nm 泵浦时小,阈值泵浦功率偏高.当掺杂浓度增加到一定程度,由于 1 907 nm 的再吸收损耗相比 1 930 nm 的大,阈值泵浦功率偏高.

由图 2(b)可知,在谐振腔参量一定的情况下,存在最佳的增益介质长度^[13].当增益介质长度小于最佳值时,增益介质不能充分吸收泵浦功率,阈值泵浦功率较大.当增益介质长度大于最佳值时,一方面增益介质长度增大,使得基态再吸收损耗 $\sigma_e f_d N_{\text{tot}} l$ 增大而增加了阈值泵浦功率.另一方面,在一定的泵浦功率下,增益介质过长使得增益介质在远离泵浦源的一端反转粒子数密度较低甚至可能存在无反转粒子区域,这也就增加了阈值泵浦功率.图中可知,当长度为 14 mm 时,与 1 907 nm 泵浦相比,1 930 nm“翼泵浦”时增益介质对泵浦光的吸收小,激光阈值泵浦功率偏高,但两种波长泵浦时, Ho 激光阈值都处于低功率水平.

图 3 描述了输出耦合透过率对阈值泵浦功率的影响.由图可知阈值泵浦功率与透过率成对数关系,随着透过率从 0 至 1 增大,2 092 nm 比 2 124 nm 的激光所需阈值泵浦功率先大后小,且阈值近似相等时,图 3(a)和图 3(b)对应的透过率分别约为 17%、8%.由式(9)可知,激光增益需克服再吸收损耗与腔内往返损耗.当透过率较小时,增益主要用来克服再吸收损耗,与 2 124 nm 的激光相比,2 092 nm 的激光基态玻尔兹曼因子较高,再吸收损耗大,阈值泵浦功率偏高.当透过率增加到一定程度,腔内往返损耗占主要损耗,此时,2 092 nm 的激光得益于较大的

受激发射截面,阈值泵浦功率较小.因此,在一定的谐振腔参量下,通过选择合适透过率的输出耦合镜,可以实现 Ho:YAG 激光输出波长在 2 092 nm 和 2 124 nm 之间转换.

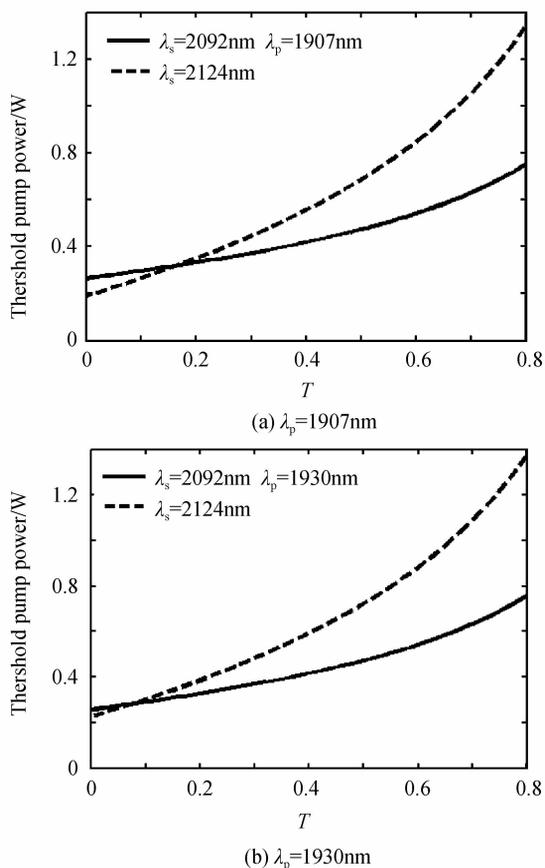


图 3 阈值泵浦功率与输出耦合透过率关系
Fig. 3 The relationship between the threshold pump power and transmission of output coupler

3 实验

Ho:YAG 激光采用简单的直线平凹腔, Ho:YAG 晶体掺杂浓度为 1.0 at%, 长为 14 mm, 谐振腔长约为 21 mm, 激光束腰半径约为 165 μm , 泵浦波长采用 1 933 nm 翼泵浦. 实验中输出耦合镜的曲率半径为 100 mm, 透过率分别为 5%、10%. 图 4 描

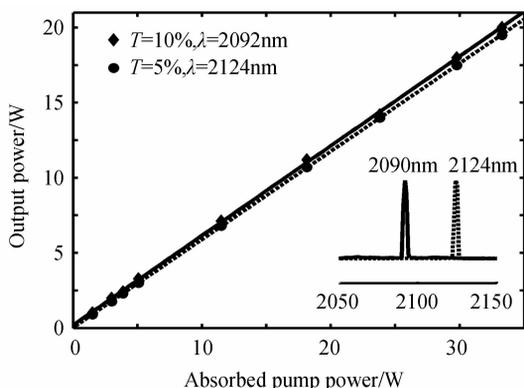


图 4 输出特性曲线(插图:输出光谱)
Fig. 4 The output power versus absorbed pump power (inset: the spectrum of Ho:YAG laser)

述了 Ho:YAG 激光输出特性曲线,插图是对应的输出光谱.当透过率分别为 5%和 10%时,获得功率分别为 19.5 W 和 20.2 W 的连续激光,相应的斜率效率分别为 57.2%和 58.7%,激光中心波长分别位于 2 124 nm 和 2 092 nm. 实验中保持其他参量不变,采用透过率分别为 5%和 10%的输出耦合镜,得到的 Ho 激光中心波长分别为 2 124 nm 和 2 092 nm,这与图 3 中的理论分析的结果相一致.

4 结论

本文根据 Ho³⁺ 准三能级理论,推导出 Ho:YAG 激光器阈值泵浦功率表达式,分析了阈值泵浦功率和激光器设计参量间的关系,得出 Ho:YAG 激光属于低阈值激光器,1 907 nm 泵浦或 1 930 nm “翼泵浦”方式下,阈值泵浦功率都处于 mW 级水平.此外在一定的谐振腔参量下,可通过选择合适透过率的输出耦合镜,实现 Ho:YAG 激光输出波长在 2 092 nm 和 2 124 nm 之间的转换.

参考文献

- [1] SCHOLLE K, LAMRINI S, KOOPMANN P, *et al.* 2 μm Laser sources and their possible applications[OL]//PAL B. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics. ZnTech. 2010-02-01[2013-04-07]. DOI: 10.5772/39538.
- [2] TEICHMAN J M, SCHWESINGER W H, LACKNER J, *et al.* Holmium: YAG laser lithotripsy for gallstones [J]. *Surgical Endoscopy*, 2010, **15**(9): 1034-1037.
- [3] MU X, MEISSNER H, LEE H-C. Ho:YAG laser pumped walk-off compensated mid-infrared ZGP optical parametric oscillation[C]. *SPIE*, 2011, **7917**: 7917DMI-7917DM6.
- [4] ABDOLVAND A, SHEN D Y, COOPER L J, *et al.* Ultra-efficient Ho:YAG laser end-pumped by a cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser [C]. *Advanced Solid-State Photonics San Antonio, Texas, Feb. 2, 2003*, **83**: 7-12.
- [5] SHEN D Y, ABDOLVAND A, COOPER L J, *et al.* Efficient Ho:YAG laser pumped by a cladding pumped tunable Tm: silica-fibre laser[J]. *Applied Physics B*, 2004, **79**(5): 559-561.
- [6] BUDNI P A, POMERANZ L A, MILLER C A, *et al.* CW and Q-switched Ho:YAG pumped by Tm:YALO [C]. *Advanced Solid State Lasers Coeur D'Alene, Idaho, Feb. 2, 1998*, **19**: 204-206.
- [7] BUDNI P A, LEMONS M L, MOSTO J R, *et al.* High-power/high-brightness diode-pumped 1.9- μm thulium and resonantly pumped 2.1- μm holmium lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electron*, 2000, **6**(4): 629-635.
- [8] MU X D, MEISSNER H, LEE H. C. High-efficiency high-power 2.097- μm Ho:YAG laser pumped mid-infrared ZGP optical parametric oscillation [C]. *SPIE*, 2010, **7686**: 7686OT1-7686OT7.
- [9] DUAN X, YAO B, YANG X, *et al.* Room temperature efficient actively Q-switched Ho:YAP laser [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(6): 4427-4432.
- [10] YAO B Q, DUAN X M, KE L, *et al.* Q-switched operation of an in-band-pumped Ho:LuAG laser with kilohertz pulse repetition frequency[J]. *Applied Physics B*, 2010, **98**(23): 311-315.

- [11] DERGACHEV A, ARMSTRONG D, SMITH A, *et al.* 3.4- μm ZGP RISTRA nanosecond optical parametric oscillator pumped by a 2.05- μm Ho : YLF MOPA system[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(22): 14404-14413.
- [12] FAN T Y, HUBER G, BYER R L, *et al.* Spectroscopy and diode laser-pumped operation of Tm, Ho : YAG[J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 1988, **24**(6): 924-933.
- [13] ZHU Jian, ZHANG Guang-yan, CHEN Xiao-bo. Theoretical analysis for Ho laser threshold[J]. *Acta Physica Sinica*, 1996, **45**(8): 1337-1343.
朱箭,张光寅 陈晓波. Ho 激光器阈值的理论分析[J]. *物理学报*, 1996, **45**(8): 1337-1343.
- [14] ZHU Xin-lu, WANG Xue-zhu, YAO Bao-quan. Theoretical investigation of a laser diode-pumped quasi-three-level 2 μm (Tm, Ho):YLF laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 787-792.
张新陆,王月珠,姚宝权. 激光二极管抽运的准三能级 2 μm (Tm, Ho):YLF 激光器的理论研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 787-792.
- [15] DUAN Wei-wen. Research on 1.94 Tm : YAP laser and in-band pumped Ho : YLF laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
段伟文. 1.94 μm Tm:YAP 激光器及其带内泵浦 Ho : YLF 的实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
- [16] GRUBER J B, SELTZER M D, PUGH V J, *et al.* Electronic energy level structure of trivalent holmium in yttrium aluminum Garnet[J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, **77**(11): 5882-5901.