

784.9 nm 和 808 nm 激光二极管抽运 Tm/Ho 键合激光器

王娟^{1,2}, 黄海洲^{1,2}, 黄见洪¹, 陈金明¹, 邓晶¹, 翁文¹, 戴殊韬^{1,2}, 吴鸿春¹, 林文雄^{1*}

¹中国科学院福建物质结构研究所光电材料化学与物理重点实验室, 福建 福州 350002;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 研究了室温下 784.9 nm 和 808 nm 的激光二极管(LD)抽运 Tm/Ho 键合激光器,增益介质是由 Tm:YAG 和 Ho:YAG 晶体扩散键合而成的 Tm/Ho:YAG 键合晶体;对两种 LD 抽运源下的 Ho 激光性能,包括输出功率、光束质量、输出波长进行对比。低抽运吸收功率下,采用 808 nm LD 抽运的激光器效率稍低于 784.9 nm LD,验证了基于 Tm/Ho 键合增益介质这一新型激光实现机制在抽运波长选择上的宽可适用性。在 784.9 nm 的抽运波长下,实现了室温下最高 1.89 W 的激光输出,光-光转换效率为 26.4%,斜率效率为 40.78%;在常规 808 nm LD 的抽运下,实现了室温下最高 1.74 W 的激光输出,光-光转换效率为 24.4%,斜率效率为 40.31%。两种抽运条件下,最高输出功率所对应的激光波长均在 2122 nm 附近。

关键词 激光器; Ho 激光器; Tm/Ho:YAG; 激光二极管抽运; 2.1 μm 激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1001004

784.9 nm and 808 nm Laser Diode Pumped Tm/Ho Bonded Laser

Wang Juan^{1,2}, Huang Haizhou^{1,2}, Huang Jianhong¹, Chen Jinming¹, Deng Jing¹,
Weng Wen¹, Dai Shutao¹, Wu Hongchun¹, Lin Wenxiong^{1*}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract 784.9 nm and 808 nm laser diode (LD) pump Tm/Ho bonded laser is studied at room temperature. The gain medium is a Tm/Ho:YAG bonded crystal formed by diffusion-bonding of Tm:YAG and Ho:YAG crystals. The Ho laser properties pumped by the two LDs are compared, including output power, beam quality, and wavelength. At low pump absorption power, the efficiency of laser pumped by 808 nm LD is slightly lower than that of the 784.9 nm LD, which verifies the wide applicability of the new laser realization mechanism based on Tm/Ho bonded gain medium in pump wavelength selection. Using 784.9 nm LD, the maximum output power of 1.89 W is obtained at room temperature, with an optical conversion efficiency of 26.4% and a slope efficiency of 40.78%. Using 808 nm LD, the maximum output power of 1.74 W is obtained at room temperature with an optical conversion efficiency and a slope efficiency of 24.4% and 40.31%, respectively. Under the two pump conditions, the laser wavelength corresponding to the maximum output power is near 2122 nm.

Key words lasers; Ho laser; Tm/Ho:YAG; laser diode pumped; 2.1 μm laser

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.3070

1 引言

掺 Ho 固体激光器产生的 2.05~2.2 μm 波段

激光具有良好的大气穿透性和人眼安全特性,在激光雷达^[1]、激光测距^[2]和医学^[3]等领域有着广泛的应用。掺有三价 Ho 离子(Ho³⁺)的钇铝石榴石增

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-05-14; 录用日期: 2018-05-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104502, 2016YFB0701004)

* E-mail: wxlin@fjirsm.ac.cn

益介质 Ho:YAG 可以产生 2.1 μm 以上波长的激光输出,是实现 3~5 μm 光学参量振荡器的重要抽运源^[4-6]。此外, Ho:YAG 增益介质具有较长的激光上能级⁵I₇ 寿命(8.5 ms)与较大的受激发射截面($9 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$)^[7],被广泛应用于高平均功率/峰值功率的 2.1 μm 激光研究中,包括连续输出(CW)^[8]、调 Q^[9] 和稳频^[10] 等。

由于 Ho³⁺ 在 800 nm 波段没有吸收带,无法利用常用的激光二极管(LD)实现腔外抽运。Ho 激光器中常以吸收带在 750~800 nm 的 Tm³⁺ 离子作为共掺离子,以实现从 LD 抽运光到 Ho 激光的能量转移^[11-12]。由于 Tm³⁺ 和 Ho³⁺ 之间存在较多的能量转换^[13], Tm³⁺ 和 Ho³⁺ 共掺的机制在室温条件下难以实现瓦级的输出功率^[14-15]。近年来, Ho 激光器常用 1.9 μm 的 Tm 块体激光器^[16]、光纤激光器^[17] 和 1.9 μm 的 LD^[18] 来抽运。2012 年, Shen 等^[19] 利用两个正交极化的 1.9 μm Tm:YLF 块体激光器进行双端面抽运,在 162.3 W 的入射功率下获得了 103 W 的连续输出功率,对应的斜率效率为 67.8%。2014 年, Kwiatkowski 等^[20] 在 20 W 1.9 μm 窄线宽 Tm 光纤激光器抽运条件下,实现了 13.3 W 的连续激光输出功率,光-光转换效率为 70.37%。在外腔共振抽运的 Ho 激光器中, 1.9 μm 全固态 Tm 激光与 1.9 μm LD 相比,体积相对庞大,激光效率偏低^[21]。2015 年, Berrou 等^[22] 报道了一种 1.9 μm 光纤耦合 LD 抽运的调 Q Ho:YAG 激光器,获得最高 18 W 的连续输出功率,相应的光-光转换效率为 34.6%,在调 Q 操作中,最大的脉冲能量为 8.7 mJ。由于 1.9 μm LD 的线宽通常大于 15 nm,在增加驱动电流时,会产生明显的波长漂移^[1.3 nm/°C]^[23],这些都对 1.9 μm LD 抽运 Ho 激光器的研究产生一定的限制。将掺 Tm 增益介质插入 Ho 激光器谐振腔的抽运方式同样受到国内外学者的关注,这种腔内抽运机制有利于直接应用常规的 750~800 nm LD。Zhu 等^[24] 报道了一种 LD 抽运的 Tm:YLF 激光器腔内抽运 c 轴切割 Ho:YAP 激光器,得到最高 8 W 的连续输出功率,斜率效率为 10.9%。Huang 等^[25] 采用窄线宽 785 nm LD 作为抽运源,在 Tm:YAG 腔内抽运 Ho:YAG 激光器,实现最高 8.03 W 的 2122 nm 激光输出,光-光转换效率达到 32%。

在 1 μm 波段,将 Cr⁴⁺:YAG 晶体与 Nd:YAG 晶体进行扩散键合,可以在 800 nm LD 抽运下直接获取调 Q 脉冲输出^[26]。还有基于 Nd:YVO₄ 键合

Nd:GdVO₄ 晶体以实现双波长锁模脉冲输出的报道^[27]。但在 2 μm 波段上,尚未见通过键合不同激活离子掺杂的增益介质来实现特定激光输出性能的报道。最近,本实验室报道了基于 Tm:YAG 扩散键合 Ho:YAG 晶体(Tm/Ho:YAG)的新型 Ho 激光实现机制,在 785 nm LD 抽运下实现了 6 W 的室温 Ho 激光输出^[28]。

为了进一步探索该 Ho 激光实现机制在抽运源选择上的宽适用性,采用常规的 808 nm LD 对 Tm/Ho:YAG 激光器进行抽运,并与 785 nm LD 抽运下的斜率效率、光-光转换效率和光束质量等激光输出性能进行对比,并首次在 808 nm 抽运源的抽运下实现了瓦级的 Ho 激光输出。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。激光器的抽运光源分别为 808 nm 和 784.9 nm 波长的光纤耦合 LD,光纤的芯径为 400 μm ,数值孔径为 0.22,其中 784.9 nm LD 为 0.1 nm 窄线宽波长锁定激光器。抽运光通过两个焦距为 40 mm 的平凸透镜所组成的共轭成像系统将抽运光斑聚焦到增益介质上。Tm/Ho:YAG 键合晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×14 mm,其中掺 Tm 部分的原子掺杂率为 3.5%,长度为 8 mm,掺 Ho 部分的原子掺杂率为 0.6%,长度为 6 mm。晶体的两端镀增透 750~850 nm 和 1900~2160 nm 波段的膜层,4 个侧面用铝箔包裹并嵌入到铜制热沉中进行水冷控温,温度为 15 $^{\circ}\text{C}$ 。采用平凹腔结构,腔长为 30 mm。输入镜 M1 为平面镜,增透 750~850 nm 波段并高反 1800~2200 nm 波段。耦合输出镜 M2 为 800 nm 曲率半径的平凹镜,对 Tm 激光的 1900~2020 nm 波段高反,对 2080~2200 nm 波段的透过率为 10%。采用高反 1900~2200 nm 并增透 780~850 nm 的 45°的二色镜对 Ho 激光和 LD 抽运光进行分离。

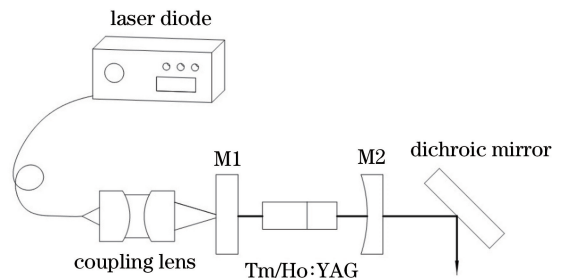


图 1 Tm/Ho:YAG 激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of composite Tm/Ho:YAG laser

3 实验结果及分析

采用紫外可见近红外分光光度计 (Lambda-950, PerkinElmer 公司, 美国) 在室温条件下对 3.5% Tm:YAG 晶体的吸收谱进行了测量, 如图 2 所示。由图 2 可知, Tm:YAG 晶体的吸收峰在 780.6 nm 和 785.4 nm, 对应的吸收系数分别为 3.03 cm^{-1} 和 2.90 cm^{-1} 。两个吸收峰的峰值相近, 二者之间的间距为 5 nm, 这一差别不会导致明显的量子损耗。采用 784.9 nm 窄线宽 LD 进行抽运, 尽可能匹配 Tm:YAG 晶体的最佳抽运峰位^[29]。808 nm LD 的中心波长则偏离了 Tm:YAG 的吸收峰, 而且输出波长出现了明显的漂移。表 1 为不同驱动电流下 808 nm 抽运光的输出光谱参数, 以及基于 LD 光谱与吸收光谱之间的交叠程度所计算的掺 Tm 部分的有效吸收系数。由表 1 可知, 808 nm LD 的发射波长随驱动电流的增加出现红移, 从而导致掺 Tm 部分对抽运光的有效吸收效率不断下降。图 2 为掺 Tm 部分和掺 Ho 部分的吸收光谱和 LD 的发射光谱。根据 6 mm 掺杂长度和 10 mm 掺杂长度下 Tm:YAG 激光器在低耦合透过率下的输出光谱范围, 图 2 的插图所示为腔内 Tm 激光的大致输出波

长范围 (2013 ~ 2017 nm), 该波长范围正好位于 Ho:YAG 晶体在 2017 nm 的侧吸收峰内。耦合输出镜对 785 nm 和 808 nm 的抽运光具有大于 60% 的透过率^[29], 并且耦合输出镜反射的抽运光在空间上高度发散, 而晶体的横截面积很小, 可以忽略经耦合输出镜反射的未吸收抽运光的影响^[30]。因此, 在晶体后直接测量了未被吸收的抽运功率, 从入射抽运功率中减去未被吸收的抽运功率, 从而得到吸收抽运功率。

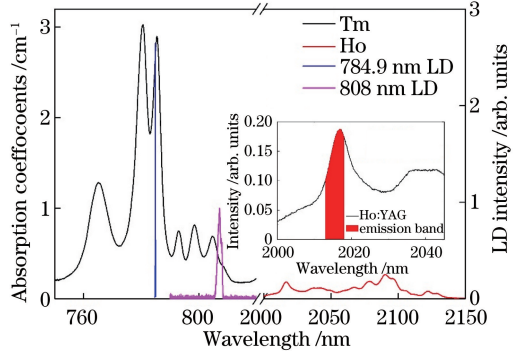


图 2 掺 Tm 部分和掺 Ho 部分的吸收光谱和 LD 的发射光谱 (插图: 掺 Ho 部分的侧吸收峰与掺 Tm 部分的激光发射带)
Fig. 2 Absorption spectra of Tm:YAG and Ho:YAG crystals and the emission spectra of LD (inset: emission band of Tm:YAG laser that could be absorbed by Ho:YAG)

表 1 不同驱动电流下 808 nm LD 的输出光谱参数和在 Tm/Ho:YAG 中的有效吸收系数

Table 1 808 nm LD spectral parameters at different driving currents and the corresponding effective absorption coefficients

Item	Current / A						
	1.6	2	2.5	3	4	4.25	4.25
Absorbed power / W	2.50	3.49	4.55	5.32	6.05	6.72	7.12
Central wavelength / nm	805.60	805.84	806.13	806.55	806.81	807.09	807.25
Spectral linewidth / nm	1.40	1.36	1.50	1.42	1.52	1.58	1.62
Effective absorption coefficient / cm^{-1}	0.628	0.595	0.553	0.510	0.476	0.447	0.438

同样的谐振腔结构和温度条件下, 采用 784.9 nm 和 808 nm LD 分别抽运 Tm/Ho:YAG 激光晶体, 测得两组输出功率曲线, 如图 3 所示。在 808 nm LD 抽运条件下, 当吸收的抽运功率达到最高 7.12 W 时, 激光输出功率为 1.74 W, 斜率效率为 40.31%, 光-光转换效率为 24.44%, 抽运阈功率为 2.63 W。为了方便对比分析, 将 Ho 激光器对 784.9 nm LD 的抽运吸收功率控制在 7 W 附近, 并在 7.16 W 的抽运吸收功率下得到了 1.89 W 的 Ho 激光输出, 斜率效率为 40.78%, 光-光转换效率为 26.4%, 抽运阈功率为 2.4 W。分别测量了 784.9 nm 和 808 nm LD 抽运下, 1 h 内保持最高输出功率的激光的稳定性。784.9 nm LD 抽运条件下, 测得涨落的均方根误差为 0.26%; 808 nm LD

抽运条件下, 测得涨落的均方根误差为 0.31%, 激光系统稳定性能良好。

与 784.9 nm LD 相比, 使用 808 nm LD 时, Ho 激光器的阈功率相对较高, 输出功率、斜率效率和光-光转换效率均有所下降, 可能是 808 nm 抽运光对掺 Tm 部分的激发效率较低所致^[25], 但受限当前 808 nm LD 的最高抽运功率, 光-光效率和斜率效率在当前的 LD 吸收功率范围内差别并不显著。

在抽运功率范围内, 两条输出功率近似呈线性增加, 说明谐振腔一直处于稳定状态, 热效应没有对激光的输出性能产生显著影响, 因此 Ho 激光器能够产生近衍射极限的光束质量。采用狭缝扫描式光束质量分析仪 (NanoModeScan, Ophir-Photon 公司, 以色列) 对光束质量进行分析, 在各自最高输出

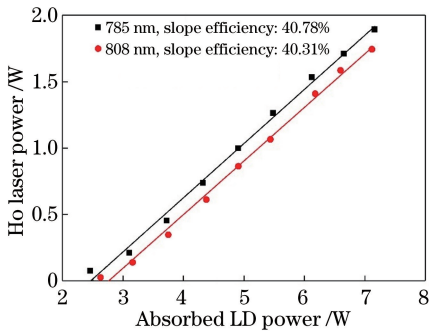


图 3 Tm/Ho:YAG 激光器在自由运转状态下的功率特征变化
Fig. 3 Output power characteristic change of Tm/Ho:YAG laser under free running state

功率下,采用 784.9 nm 和 808 nm LD 抽运下的光束质量因子 M^2 分别为 1.16 和 1.23,如图 4 所示。图 4 中的插图为在 808 nm LD 抽运下的 Ho 激光输出功率为 1.74 W 时的二维和三维光斑轮廓,可以观察到输出光斑为共心分布的 TEM₀₀ 模。结果表明,采用 784.9 nm 和 808 nm 的 LD 抽运 Tm/Ho:YAG 激光晶体均能得到较为良好的激光高斯光束。

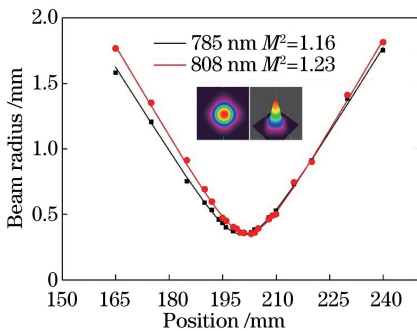


图 4 在最高输出功率下测得的 Tm/Ho:YAG 激光器的光束质量(插图:光斑的二维和三维图)
Fig. 4 Beam quality measured at the maximum output power of Tm/Ho:YAG laser (inset: two-dimensional and three-dimensional beam profiles)

采用分辨率为 4 GHz 的中红外光谱仪(721-IR, Bristol 公司,英国)测量最高输出功率下的 Ho 激光光谱,如图 5 所示。在 784.9 nm LD 抽运下,激光器的中心波长为 2122.4 nm(半峰全宽为 0.16 nm)。在 808 nm 抽运下,激光发射的中心波长为 2122.2 nm(半峰全宽为 0.18 nm),两者的波长差别并不明显。同时并没有观测到 Tm 激光的波长信号,表明最高输出功率下 Tm 激光始终处于阈值状态,能够有效禁锢在谐振腔内对掺 Ho 部分进行共振抽运。结果表明,采用 808 nm LD 对掺 Tm 部分进行侧翼抽运,同样可以在 Tm/Ho 键合激光器上产生 2.1 μm Ho 激光输出,表明新型 Ho 激光实现

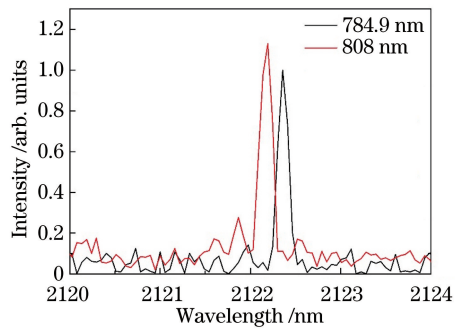


图 5 在最高输出功率下的 Tm/Ho:YAG 激光器的激光发射谱

Fig. 5 Tm/Ho:YAG laser emission spectrum at the maximum output power

方式在抽运波长选择上具有灵活性。

4 结 论

研究了常规 750 ~ 800 nm 波段 LD 抽运下 Tm/Ho 键合激光器的激光输出性能,首次采用 808 nm LD 获得瓦级的 Ho 激光输出,并在同等抽运功率范围内与采用 784.9 nm LD 抽运时的激光输出功率、光-光转换效率和光束质量等参数进行对比。在 LD 吸收功率约为 7 W 时,采用 784.9 nm LD,激光最高输出功率为 1.89 W,斜率效率为 40.78%,光-光转换效率为 26.4%,光束质量 $M^2 = 1.16$,输出激光波长为 2122.4 nm;采用 808 nm 常规 LD,最高激光输出功率为 1.74 W,斜率效率为 40.31%,光-光转换效率为 24.44%,光束质量因子 $M^2 = 1.23$,输出激光波长为 2122.2 nm。由于 784.9 nm LD 波长位于掺 Tm 部分的最佳抽运峰位附近,能够在同一吸收抽运功率下产生更高的激光增益,因此具有更高的斜率效率和光-光转换效率以及低的激光阈值。但在当前的抽运功率范围内,不同抽运波长下的激光性能的差别并不明显,都能产生近衍射极限的瓦级 2122 nm 激光输出。因此,本文论证了所提出的 Tm/Ho 键合激光器在抽运波长选择上的宽可适用性,有利于在常规 LD 的抽运下高效率地获取室温 Ho 激光输出。

参 考 文 献

- [1] Sungdo C, Kin P C, Dennis K K. Tunable 2.1 μm Ho lidar for simultaneous range-resolved measurements of atmospheric water vapor and aerosol backscatter profiles [J]. Applied Optics, 1991, 30 (27): 3938-3943.
- [2] Sammy W H, Paul J M S, Charley P H, et al.

- Coherent laser radar at 2 μm using solid state laser [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 4-15.
- [3] Michael F D, Janet M P, Gary S F. Holmium laser surgery[J]. *Orthopedics*, 1993, 16(5): 563-566.
- [4] Budni P A, Pomeranz L A, Lemons M L, *et al.* Efficient mid-infrared laser using 1.9- μm -pumped Ho:YAG and ZnGeP₂ optical parametric oscillators [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(5): 723-728.
- [5] Alex D, Darrel A, 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.
- [6] Kieleck C, Eichhorn M, Hirth A, *et al.* High-efficiency 20-50 kHz mid-infrared orientation-patterned GaAs optical parametric oscillator pumped by a 2 μm holmium laser[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(3): 262-264.
- [7] 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 Electronics*, 1988, 24(6): 924-933.
- [8] Chen H, Shen D Y, Zhang J, *et al.* In-band pumped highly efficient Ho:YAG ceramic laser with 21 W output power at 2097 nm[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9):1575-1577 .
- [9] Ji E, Nie M M, and Liu Q. 13.5 mJ polarized 2.09 μm fiber-bulk holmium laser and its application to a mid-infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017,15(9): 091402.
- [10] Zhang Y X, Gao C Q, Wang Q, *et al.* Single-frequency, injection-seeded Q-switched Ho:YAG ceramic laser pumped by a 1.91 μm fiber-coupled LD [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27805-27811.
- [11] French V A, Petrin R R, Powell R C, *et al.* Energy-transfer processes in Y₃Al₅O₁₂:Tm, Ho [J]. *Physical Review B: Condensed Matter* 1992, 46(13): 8018-8026.
- [12] Ling W J, Xia T, Dong Z, *et al.* WS₂ saturable absorber for passively Q-switched Tm, Ho:LLF lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703020.
令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于 WS₂可饱和吸收体的被动调 Q Tm, Ho:LLF 激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703020.
- [13] Rustad G, Stenersen K. Modeling of laser-pumped Tm and Ho lasers accounting for upconversion and ground-state depletion[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(9): 1645-1656.
- [14] Zhao Y G, Wang Y C, Zhang X Z, *et al.* 87 fs mode-locked Tm, Ho:CaYAlO₄ laser at ~ 2043 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 915-918.
- [15] Li L, Ju Y L, Dai T Y, *et al.* L-shaped single-longitudinal-mode Tm, Ho:YAG lasers based on twisted mode cavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081408.
李莉, 鞠有伦, 戴通宇, 等. 基于扭转模腔的 L 形单纵模 Tm, Ho:YAG 激光器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 081408.
- [16] Budni P A, Ibach C R, Setzler S D, *et al.* 50 mJ, Q-switched, 2.09 μm holmium laser resonantly pumped by a diode-pumped 1.9 μm thulium laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(12): 1016-1018.
- [17] Wang F, Shen D Y, Fan D Y, *et al.* Efficient Ho:YLF laser pumped by tunable Tm-doped fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1727-1731.
王飞, 沈德元, 范滇元, 等. 可调谐掺铥光纤激光器共振抽运的 Ho:YLF 固体激光器 [J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1727-1731.
- [18] Barnes N P, Amzajerdian F, Reichle D J, *et al.* Diode pumped Ho:YAG and Ho:LuAG lasers, Q-switching and second harmonic generation [J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(1): 57-66.
- [19] Shen Y J, Yao B Q, Duan X M, *et al.* 103 W in-band dual-end-pumped Ho:YAG laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3558-3560.
- [20] Kwiatkowski J, Jabczynski J K, Zendzian W, *et al.* High repetition rate, Q-switched Ho:YAG laser resonantly pumped by a 20 W linearly polarized Tm: fiber laser [J]. *Applied Physics B*, 2014, 114(3): 395-399.
- [21] Lamrini S, Koopmann P, Schäfer M, *et al.* Directly diode-pumped high-energy Ho:YAG oscillator [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 515-517.
- [22] Berrou A, Ibach T, Eichhorn M. High-energy resonantly diode-pumped Q-switched Ho³⁺:YAG laser [J]. *Applied Physics B*, 2015, 120(1): 105-110.
- [23] Ji E C, Liu Q, Cao X Z, *et al.* Resonantly fiber-coupled diode-pumped Ho³⁺:YLiF₄ laser in continuous-wave and Q-switched operation [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(7): 1-8.
- [24] Zhu G L, He X D, Yao B Q, *et al.* Ho:YAP laser intra-cavity pumped by a diode-pumped Tm:YLF laser [J]. *Laser Physics*, 2012, 23(1): 015002.
- [25] Huang H Z, Huang J H, Liu H G, *et al.* Efficient 2122 nm Ho:YAG laser intra-cavity pumped by a narrowband-diode-pumped Tm:YAG laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 3952-3955.
- [26] Zayhowski J J, Dill C. Diode-pumped passively Q-

- switched picosecond microchip lasers [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(18): 1427-1429.
- [27] Liang H C, Huang T L, Chang F L, *et al.* Flexibly controlling the power ratio of dual-wavelength SESAM-based mode-locked lasers with wedged-bonded Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ crystals [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1-5.
- [28] Huang H Z, Huang J H, Ge Y, *et al.* 2.1 μm composite Tm/Ho:YAG laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1271-1274.
- [29] Huang H Z, Gao P, Liu H G, *et al.* Validation of spectrum method for improving efficiency of continuous-wave & Q-switched Tm-doped yttrium aluminum garnet laser [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2018, 61(3): 034221.
- [30] Ji E C, Liu Q, Nie M M, *et al.* High-slope-efficiency 2.06 μm Ho:YLF laser in-band pumped by a fiber-coupled broadband diode [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1237-1240.