

半导体抽运的 Er:YAG 陶瓷单频脉冲激光器

王硕^{**}, 史阳, 李尚桦, 宋睿, 高明伟, 王庆, 高春清^{*}

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 利用掺铒钇铝石榴石(Er:YAG)单块非平面环形腔(NPRO)激光器作为种子源,通过注入锁定技术研制了半导体抽运的 Er:YAG 陶瓷单频脉冲激光器。在重复频率为 200 Hz 的条件下,获得了脉冲能量为 11.45 mJ、脉冲宽度为 174 ns 的 1645 nm 单频脉冲输出,在 x 和 y 方向上的 M^2 因子分别为 1.45 和 1.42,脉冲光与种子光拍频信号的频谱半峰全宽为 2.67 MHz。实验表明,Er:YAG 陶瓷作为增益介质在产生 1.6 μm 激光方面具有较好的性能。此激光器可在激光雷达领域作为多普勒相干测风激光雷达和遥感激光雷达的光源。

关键词 激光器; 半导体抽运; 注入锁定; 全固态激光器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0914003

Diode-Pumped Single-Frequency Er:YAG Ceramic Pulsed Laser

Wang Shuo^{**}, Shi Yang, Li Shanghua, Song Rui,

Gao Mingwei, Wang Qing, Gao Chunqing^{*}

School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract By using injection-locking technique, we develop a diode-pumped Er:YAG ceramic single frequency pulsed laser seeded by an Er:YAG nonplanar ring oscillator (NPRO) laser. The 1645 nm single frequency laser with output energy of 11.45 mJ, pulse width of 174 ns and pulse repetition rate of 200 Hz, is obtained. The corresponding M^2 -factors are 1.45 and 1.42 in x and y directions, respectively. The full width at half-maximum (FWHM) of the frequency spectrum of the heterodyne beating signal between the pulse and the seed is 2.67 MHz. The result indicates that Er:YAG ceramics have good performance in generating 1.6 μm lasers. This single-frequency pulsed laser can be employed as the seed of coherent wind lidars and remote sensing lidars in the field of laser lidar.

Key words lasers; diode pump; injection-locking; solid-state lasers

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3520; 140.3580

1 引 言

1.6 μm 单频固体激光器被广泛地应用于激光雷达领域,例如测风激光雷达、差分吸收激光雷达、相干成像激光雷达等^[1-3]。在这些实际应用中通常需要使用输出能量高、线宽窄的脉冲激光器,而注入锁定技术则是获得单频脉冲激光器的一种较为常用的技术手段。单块非平面环形腔(NPRO)掺铒钇铝石榴石(Er:YAG)激光器具有输出激光单频特性好、稳定性高等优点,常被用作种子激光器^[4]。2014年,Deng等^[5]报道了矩形环形腔的种子注入 Er:YAG 单频脉冲激光器,种子激光器为 1645 nm

的 Er:YAG NPRO 激光器,获得了脉冲能量为 3.5 mJ、重复频率为 100 Hz、脉宽为 195 ns 的单频脉冲激光输出。2015年,Yao等^[6]研制了蝶形腔的种子注入 Er:YAG 单频脉冲激光器,种子激光器同样为 Er:YAG NPRO 激光器,最终得到了 2.9 mJ 的单频脉冲激光输出,重复频率为 100 Hz,脉宽为 160 ns。Wang等^[7-8]报道了利用 Er:YAG NPRO 作为种子激光器的光纤激光器抽运的 Er:YAG 单频脉冲激光器,在重复频率为 200 Hz 的条件下获得了 4.75 mJ 的单频脉冲激光输出,脉冲宽度为 336 ns。

半导体激光器(LD)和掺铒(Er)光纤激光器都可用来作为 Er:YAG 激光器的抽运源。相比之下,

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-04-21; 录用日期: 2018-05-25

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405203)

* E-mail: gao@bit.edu.cn; ** E-mail: 3120130287@bit.edu.cn

半导体激光器结构简单、输出功率较大、价格较低^[9-11]。近年来,1470 nm LD被大量用于Er:YAG激光器的抽运源。2010年,Chang等^[10]利用两台300 mW的1470 nm LD作为抽运源研制了Er:YAG单频激光器,得到了30 mW、波长为1645 nm单频连续输出。同年,又利用40 W、1470 nm LD抽运的Er:YAG板条,在调Q运转下得到了2.3 mJ的1645 nm脉冲激光输出,脉宽为100 ns,重复频率为250 Hz^[12]。2016年,Yu等^[13]报道了1617 nm的Er:YAG脉冲激光器,泵源为两台100 W的准连续输出的1470 nm LD,利用腔内双晶体结构获得了20.5 mJ的激光输出,脉宽为52 ns,重复频率为50 Hz。

Er:YAG晶体和Er:YAG陶瓷均可用作1.6 μm 激光器的增益介质,相比之下,Er:YAG陶瓷的优势是生长时间短、成本低、掺杂浓度灵活。近几年,Er:YAG陶瓷受到了越来越多的关注^[14-15]。2014年,Wang等^[16]报道了输出波长为1645 nm的Er:YAG陶瓷激光器,抽运源为1532 nm的Er,Yb

光纤激光器,获得了3.7 mJ的脉冲激光输出,脉冲宽度为82 ns,重复频率为200 Hz。2015年,Dai等^[17]用1532 nm LD双端抽运Er:YAG陶瓷,得到了0.84 mJ的1645 nm脉冲激光输出,脉冲宽度为48.03 ns,重复频率为100 Hz。

本文在已有的种子注入Er:YAG晶体单频脉冲激光器工作的基础上^[18],选取LD抽运的Er:YAG NPRO激光器作为种子激光器,利用Er:YAG陶瓷作为增益介质,优化了脉冲从动激光器腔型,成功实现了注入锁定,在200 Hz的重复频率下获得了11.45 mJ的1645 nm单频脉冲激光输出,输出脉冲宽度为174 ns,在 x 和 y 方向上的 M^2 因子分别为1.45和1.42,拍频信号的频谱宽度(半峰全宽,FWHM)为2.67 MHz。

2 实验装置

半导体抽运的Er:YAG陶瓷单频脉冲激光器实验装置图如图1所示。系统由种子激光器、脉冲从动激光器和电路控制系统组成。

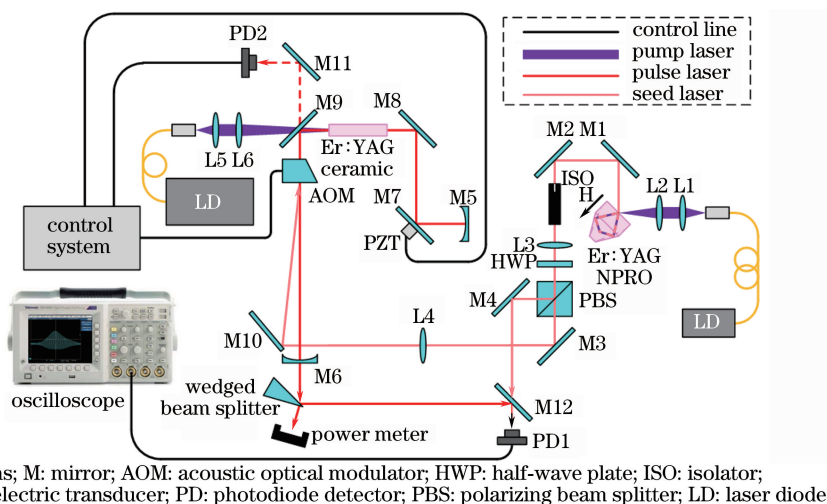


图1 半导体抽运的Er:YAG陶瓷单频脉冲激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of diode-pumped Er:YAG ceramic single frequency pulsed laser

种子激光器为 s 偏振输出的Er:YAG NPRO单频激光器,抽运光入射面和激光出射面为同一平面,该平面镀有对1470 nm波段高透、对1645 nm的 s 偏振光透过率为18%的激光介质膜。为了降低能量上转换(ETU)效应带来的影响,Er:YAG NPRO的掺杂原子数分数为0.5%。种子激光器的抽运源为一台1470 nm LD,通过连续抽运的方式使种子激光器输出单频连续激光。M1、M2、M3和M4为对1470 nm高透、对1645 nm高反的 45° 双色镜。种子光经偏振分束器(PBS)分为两束,其中 p

偏振光作为种子注入到脉冲从动激光器中, s 偏振光作为本振光与脉冲从动激光器输出的单频脉冲激光进行拍频,验证输出结果的单频性。一片1645 nm的半波片被置于PBS之前,用来调节注入光与拍频光的强度。L3和L4分别为焦距为750 mm和500 mm的透镜,种子光经由L3和L4聚焦在Er:YAG陶瓷中。根据ABCD矩阵可计算出种子光和振荡光在Er:YAG陶瓷中的光斑半径分别为 $420 \mu\text{m}$ 和 $445 \mu\text{m}$,模式匹配较好。在抽运功率为9.44 W的条件下,种子激光器输出功率为

278 mW, 波长为 1645.280 nm。

脉冲从动激光器的抽运源为一台 46 W 的光纤耦合输出 LD, 波长为 1470nm, 抽运方式为连续抽运。抽运光经由透镜 L5 和透镜 L6 聚焦进入 Er:YAG 陶瓷中, 在陶瓷中心处光斑半径为 415 μm , 与振荡光光斑半径 445 μm 相匹配。所用的 Er:YAG 陶瓷尺寸为 $\Phi 4 \times 50$ mm, 掺杂原子数分数为 0.25%, 且两端面均镀有对抽运光和激光的高透介质膜。陶瓷由钢铂包裹后安装在铜质夹具中, 并由半导体制冷器 (TEC) 将温度控制在 18 $^{\circ}\text{C}$ 。M5 为曲率半径为 600 mm 的端镜, 表面镀有对 1470 nm 高透、对 1645 nm 高反的介质膜。M6 为曲率半径为 750 mm 的输出镜, 表面镀有对 1645 nm 透过率为 20% 的介质膜。M7、M8、M9、M10 和 M11 均为对 1470 nm 高透、对 1645 nm 高反的 45 $^{\circ}$ 双色镜。种子光由 M10 反射, 从声光调制器 (AOM) 的一级衍射级注入到脉冲从动激光器中。除实现种子注入外, AOM 的另一个作用是作为 Q 开关使激光器进行调 Q 运转。输出的脉冲激光经楔镜分光, 较强的透射光由功率计接收; 较弱的反射光经白片 M12 反射, 与种子光合束进行拍频, 拍频信号由探测器 PD1 探测并传至示波器显示。

压电陶瓷 (PZT) 安装在 M7 上, 置于 M11 后的探测器 PD2 用于探测谐振信号, PZT 和 Q 开关均由电路控制系统控制。激光器工作过程如下: 开始时, Q 开关处于关断状态, 激光器谐振腔内损耗较大, 无法形成激光输出, 反转粒子数不断累积, 电路控制系统加载在 PZT 上的扫描电压信号使 PZT 持续形变从而带动 M7 连续调节腔长; 当探测到谐振信号峰值时, 加载到 PZT 上的电压回到探测到峰值时的电压并保持不变, Q 开关打开, 腔内损耗减小, 形成单频巨脉冲输出; 脉冲输出结束后, 电路控制系统控制 Q 开关再次关断, 进入下一个工作周期^[19]。

3 实验结果及分析

图 2(a) 为未注入时, 不同重复频率下的脉冲能量与抽运功率的关系。在重复频率为 1000, 750, 500, 250, 200 Hz 的条件下分别获得了 5.97, 7.48, 10.59, 15.19, 15.89 mJ 的脉冲能量输出。为了得到高能量的单频脉冲结果, 在 200 Hz 的重复频率下进行了注入锁定实验, 所获得的单频脉冲能量和脉冲宽度随抽运光功率的变化关系如图 2(b) 所示。最高单频脉冲能量为 11.45 mJ, 对应的脉冲宽度为 174 ns。

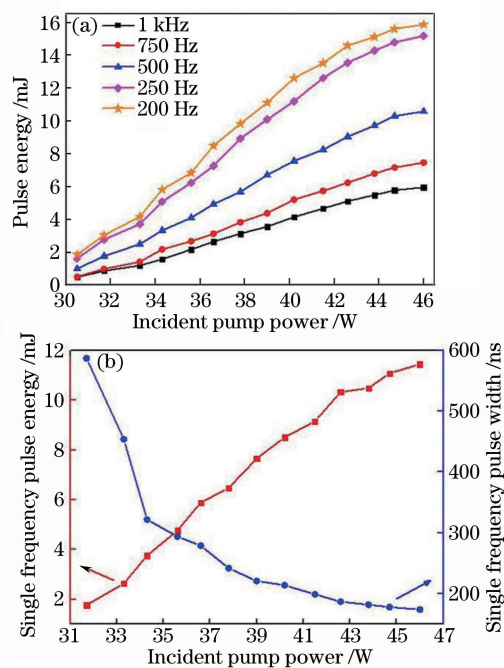


图 2 脉冲能量和脉宽与抽运功率的关系。(a)未注入时, 不同重复频率下的脉冲能量与抽运功率的关系; (b)重复频率为 200 Hz 时, 单频脉冲能量和脉宽与抽运功率的关系
Fig. 2 Pulse energy and pulse width versus incident pump power. (a) Pulse energy versus incident pump power under different pulse repetition rates without injection; (b) single frequency pulse energy and pulse width versus incident pump power at repetition rate of 200 Hz

分别测量了在未注入时和注入后的光谱, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示。由图可见, 在未注入时, 1645 nm 和 1617 nm 均出现在光谱中, 这表明有超过 14% 的 Er^{3+} 被激发到了激光上能级^[20]。注入后光谱中只存在纯净的 1645 nm 激光, 说明种子的注入及腔长的锁定对 1617 nm 的激光产生了抑制作用。图 3(c) 和图 3(d) 分别为未注入时和注入后的脉冲波形, 比较可以发现, 注入后的脉冲波形更为光滑且脉宽变窄。未注入时, 脉冲中存在多个纵模, 频率接近的纵模会形成拍频, 使脉冲包络中出现明显的毛刺; 注入后, 脉冲中仅存在单一纵模, 因此脉冲波形更为光滑。由于种子光的存在, 注入后上能级粒子的受激辐射更强, 反转粒子完全消耗所需时间缩短, 因此脉宽变窄。

图 4(a) 和图 4(b) 分别为在最高单频脉冲能量为 11.45 mJ 时所探测到的外差拍频信号和通过对拍频信号进行快速傅里叶变换 (FFT) 所计算得出的频谱图。由频谱图可得到中心频率为 63.91 MHz, 频谱的 FWHM 为 2.67 MHz。

图 5(a) 为脉冲建立时间随抽运功率的变化关

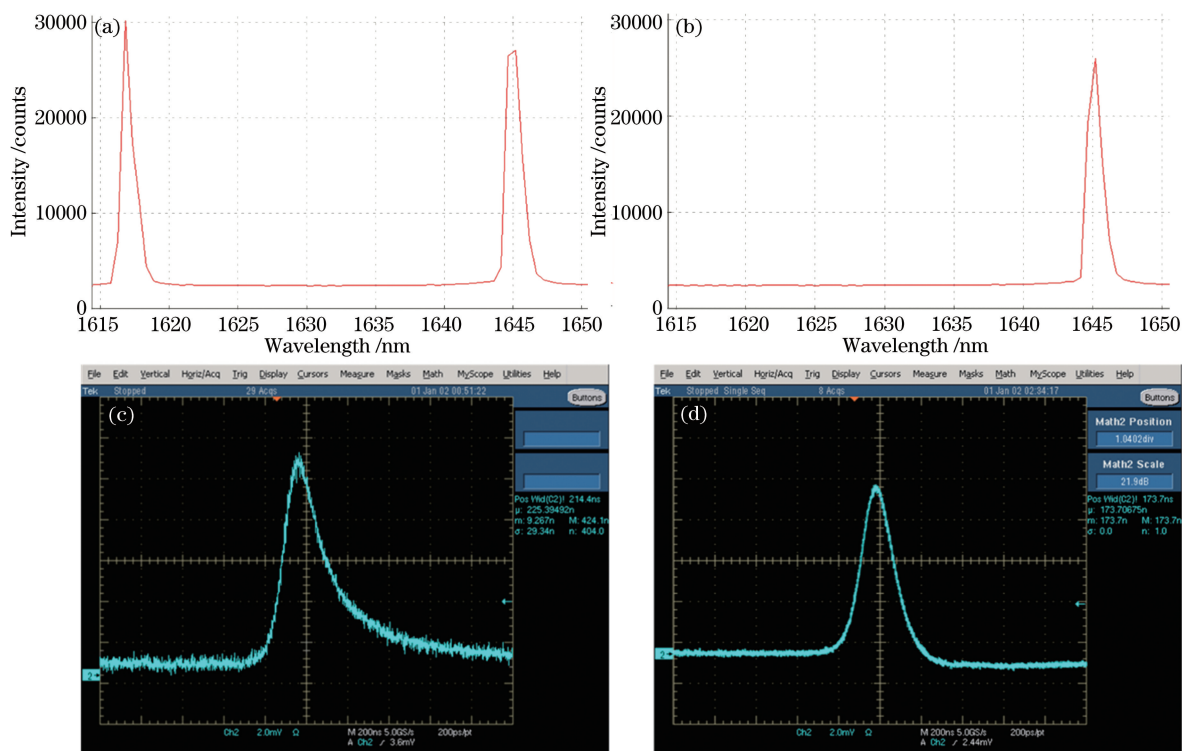


图 3 光谱和波形图。(a)未注入时的光谱；(b)注入后的光谱；(c)未注入时的脉冲波形；(d)注入后的脉冲波形
 Fig. 3 Spectra and waveforms. (a) Spectrum before injection; (b) spectrum after injection; (c) pulse waveform before injection; (d) pulse waveform after injection

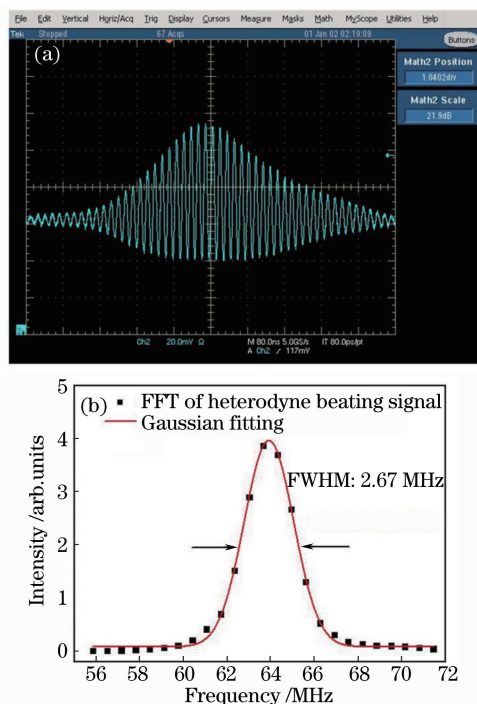


图 4 外差拍频信号。(a)单频脉冲的外差拍频信号；
 (b)外差拍频信号的频谱
 Fig. 4 Heterodyne beating signal. (a) Heterodyne beating signal of single frequency pulse; (b) frequency spectrum of heterodyne beating signal

系,从图中可以看出注入后的脉冲建立时间比未注入时的短,这是因为未注入时脉冲的建立主要依靠上能级粒子的自发辐射,而注入后由于种子光的存在,上能级粒子受激辐射更强,缩短了脉冲建立时间。图 5(b)为在最高单频脉冲能量下所测量的光束质量结果。经计算, x 和 y 方向上的 M^2 因子分别为 1.45 和 1.42。

对激光器在最高单频脉冲能量下的能量稳定性进行测量。最高单频脉冲能量下 30 min 内的能量稳定性如图 6 所示,30 min 内,能量抖动小于 0.87%。

4 结 论

研制了一种 1470 nm LD 抽运的种子注入 Er:YAG 陶瓷单频脉冲激光器,种子源为 1645 nm 的 Er:YAG NPRO 单频激光器,在重复频率为 200 Hz 时,获得了 11.45 mJ 的单频脉冲激光输出,脉冲宽度为 174 ns,对应的 x 和 y 方向 M^2 因子分别为 1.45 和 1.42,拍频信号的频谱宽度为 2.67 MHz。结果表明 Er:YAG 陶瓷可用于产生性能良好的 1.6 μm 激光。同时,也为半导体抽运的种子注入 Er:YAG 陶瓷单频脉冲激光器在激光雷达领域的应用提供了参考。

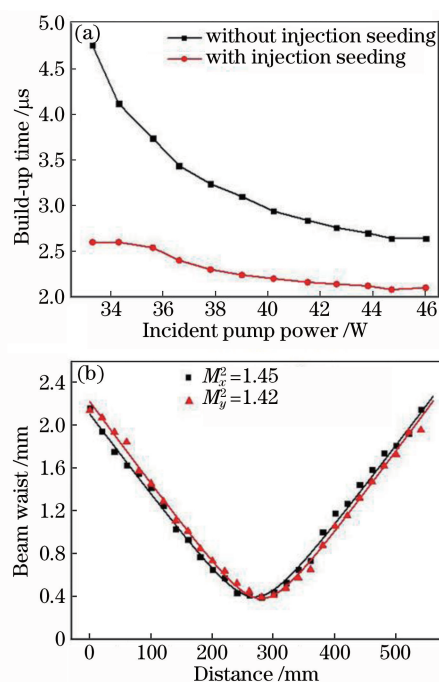


图 5 注入脉冲参数的变化。(a)脉冲建立时间与抽运功率的关系；(b)半导体抽运的Er:YAG陶瓷单频脉冲激光器的光束质量

Fig. 5 Change of parameters of input pulse. (a) Build-up time versus pump power; (b) beam quality of diode-pumped Er:YAG ceramic single-frequency pulsed laser

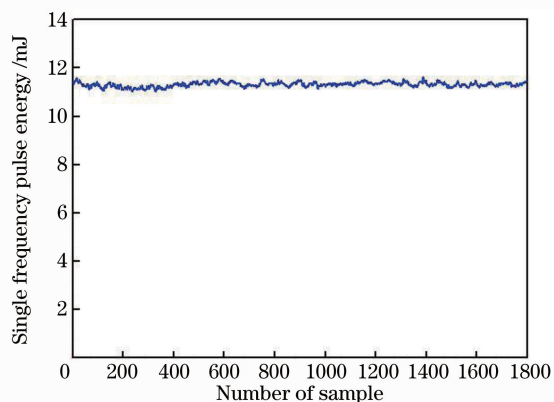


图 6 最高单频脉冲能量下 30 min 内的能量稳定性
Fig. 6 Energy stability under highest energy of single-frequency pulse in 30 min

参 考 文 献

- [1] Chen D W, Birnbaum M, Belden P M, *et al.* Multiwatt continuous-wave and Q-switched Er:YAG lasers at 1645 nm: performance issues[J]. Optics Letters, 2009, 34(10): 1501-1503.
- [2] Stoneman R C, Hartman R, Schneider E A, *et al.* Eyesafe diffraction-limited single-frequency 1-ns pulsewidth Er:YAG laser transmitter[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6552: 65520H.
- [3] Wang X, Fritsche H, Lux O, *et al.* Dual-wavelength Q-switched Er:YAG laser around 1.6 μm for methane differential absorption lidar[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(11): 115804.
- [4] Wang R, Gao C Q, Zheng Y, *et al.* A resonantly pumped 1645 nm Er:YAG nonplanar ring oscillator with 10.5 W single frequency output[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 955-957.
- [5] Deng Y, Yu X, Yao B Q, *et al.* Single-frequency, Q-switched Er:YAG at room temperature injection-seeded by an Er:YAG nonplanar ring oscillator[J]. Laser Physics, 2014, 24(4): 045809.
- [6] Yao B Q, Deng Y, Dai T Y, *et al.* Single-frequency, injection-seeded Er:YAG laser based on a bow-tie ring slave resonator[J]. Quantum Electronics, 2015, 45(8): 709-712.
- [7] Wang R, Ye Q, Zheng Y, *et al.* Single frequency operation of a resonantly pumped 1.645 μm Er:YAG Q-switched laser [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8959: 89590F.
- [8] Ye Q, Gao C Q, Wang S, *et al.* Single-frequency, injection-seeded Q-switched operation of resonantly pumped Er:YAG ceramic laser at 1645 nm[J]. Applied Physics B, 2016, 122(7): 198.
- [9] Liu M H, Cui B F, He X, *et al.* Study of high power semiconductor laser with low threshold current [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0502001.
刘梦涵, 崔碧峰, 何新, 等. 大功率低阈值半导体激光器研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0502001.
- [10] Chang N W H, Hosken D J, Munch J, *et al.* Stable, single frequency Er:YAG lasers at 1.6 μm [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(7): 1039-1042.
- [11] Kong Z Z, Cui B F, Huang X Z, *et al.* Study on performance improvement of high power semiconductor lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 071403.
孔真真, 崔碧峰, 黄欣竹, 等. 大功率半导体激光器性能改善的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071403.
- [12] Chang N W H, Simakov N, Hosken D J, *et al.* Resonantly diode-pumped continuous-wave and Q-switched Er:YAG laser at 1645 nm [J]. Optics Express, 2010, 18(13): 13673-13678.
- [13] Yu Z Z, Wang M J, Hou X, *et al.* High-energy resonantly diode-pumped Q-switched Er:YAG laser at 1617 nm[J]. Applied Physics B, 2016, 122(4): 84.

- [14] Zhang C, Shen D Y, Wang Y, *et al.* High-power polycrystalline Er:YAG ceramic laser at 1617 nm[J]. Optics Letters, 2011, 36(24): 4767-4769.
- [15] Zhu Z X, Wang Y, Chen H, *et al.* A graphene-based passively Q-switched polycrystalline Er:YAG ceramic laser operating at 1645 nm [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(5): 055801.
- [16] Wang Y, Zhao T, Shen D Y, *et al.* Resonantly pumped Q-switched Er : YAG ceramic laser at 1645 nm[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24004-24009.
- [17] Dai T Y, Deng Y, Ju Y L, *et al.* Continuous-wave and actively Q-switched resonantly dual-end-pumped Er : YAG ceramic laser emitting at 1.6 μm [J]. Quantum Electronics, 2015, 45(12): 1098-1100.
- [18] Gao C Q, Shi Y, Ye Q, *et al.* 10 mJ single-frequency, injection-seeded Q-switched Er : YAG laser pumped by a 1470 nm fiber-coupled LD [J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(2): 025003.
- [19] Zhang Y S, Gao C Q, Gao M W, *et al.* Frequency stabilization of a single-frequency Q-switched Tm : YAG laser by using injection seeding technique[J]. Applied Optics, 2011, 50(21): 4232-4236.
- [20] Kim J W, Shen D Y, Sahu J K, *et al.* High-power in-band pumped Er : YAG laser at 1617 nm [J]. Optics Express, 2008, 16(8): 5807-5812.