

小型化可调谐外腔面发射绿光激光器

邱小浪¹, 陈雪花¹, 朱仁江^{1*}, 张鹏¹, 郭于鹤洋², 宋晏蓉²

¹重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 401331;

²北京工业大学应用数理学院, 北京 100124

摘要 以 InGaAs 多量子阱为有源区材料, 以对抽运光透明的 AlGaAs/AlAs 为后端分布布拉格反射镜材料, 采用后端抽运方式, 在腔内插入标准具作为滤波元件, 通过腔内倍频, 获得小型化可调谐的光抽运外腔面发射绿光激光器。作为滤波元件, 标准具可压窄基频光的光谱半峰全宽。为了阻止倍频光返回到增益芯片, 标准具镀有倍频光高反膜。激光器的基频光调谐范围超过 10 nm, 倍频绿光在中心波长 559 nm 处的调谐范围为 4 nm, 光谱半峰全宽为 1.0 nm, 最大输出功率为 65 mW。

关键词 激光器; 可调谐波长; 外腔面发射激光器

中图分类号 TN245

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0401002

Compact Tunable External-Cavity Surface-Emitting Green Laser

Qiu Xiaolang¹, Chen Xuehua¹, Zhu Renjiang^{1*}, Zhang Peng¹, Guoyu Heyang², Song Yanrong²

¹College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

²College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract By the use of a semiconductor gain chip with InGaAs multiple quantum wells as materials in the active region and the AlGaAs/AlAs, transparent to the pump light, as distributed Bragg reflectors, along with the end-pump geometry to simplify the device structure and an inserted etalon as the tuning element, an optically-pumped compact tunable external-cavity surface-emitting green laser is realized by the intra-cavity frequency doubling technology. The employed etalon narrows the laser linewidth as a tuning element. To prevent the second harmonic from returning to the gain chip, the etalon is coated with a high-reflectivity film at the wavelength of the second harmonic. The tuning range of the fundamental wave is over 10 nm and that of the second harmonic is 4 nm centering at 559 nm. The spectral linewidth of the second harmonic is 1.0 nm and the maximum output power is 65 mW.

Key words lasers; tunable wavelength; external-cavity surface-emitting lasers

OCIS codes 140.5560; 140.5960; 140.6810

1 引言

波长可调谐的小型化连续运转绿光激光器在光动力学治疗^[1]、激光多普勒测速^[2]、激光扫描共聚焦显微镜^[3]等方面具有十分重要的应用。在市场庞大的激光显示领域, 可调谐绿光激光器能够提供多个工作波长, 有效削弱激光显示中的散斑效应, 提升消费者的观看体验^[4]。

目前, 主要利用激光二极管抽运的固体激光技

术来获得高功率绿光激光器, 因为固体激光介质具有较高的增益, 并且其上能级寿命较长, 非常适合调 Q 运转, 从而提高基频光向绿光转换的倍频效率^[5-7]。但固体绿光激光器也存在不足之处, 比如固体激光介质对抽运光的吸收谱很窄, 因此它对抽运光源的波长漂移很敏感, 对激光二极管抽运源的稳定性要求极高; 此外, 一般的固体倍频绿光激光器中存在所谓的“绿噪声”, 其输出的绿光波长调谐范围非常有限。

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2018-12-27; 录用日期: 2019-01-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61575011)、重庆市基础研究与前沿探索重点项目(cstc2015jcyjBX0098)、重庆市基础研究与前沿探索一般项目(cstc2018jcyjAX0319)、重庆市高校创新团队项目(CXTDX2016 01016)

* E-mail: hhzrj@163.com

在连续运转、中小功率、可调谐绿光激光的应用中,可利用波导结构的周期极化非线性晶体通过对小型化、高效率的半导体激光器进行倍频来获得绿光。波导结构的周期极化非线性晶体不仅可以提高倍频转换效率,而且所允许的调谐范围比较宽^[8-9]。这种类型的激光器需要一个宽带可调谐的外腔光纤耦合激光二极管,用外部衍射光栅作为调谐元件,其所输出的绿光波长调谐范围达到 21 nm,最大输出功率超过 12 mW^[10]。

光抽运垂直外腔面发射激光器(VECSEL),又称半导体薄片激光器,综合了固体薄片激光器和半导体激光器的优点,可获得具有高光束质量和高输出功率的激光输出^[11-13],且波长可以利用能带工程根据需要进行设计,还可以方便地在腔内插入其他元件进行调谐、滤波或者锁模运转^[14-16],在生命科学^[17]、激光医疗^[18]、太赫兹波产生^[19]以及微量物证的提取^[20]等方面得到了广泛应用。

在其众多应用之中,外腔面发射器的一个重要应用是激光非线性频率变换^[21],其光束质量优良,在所使用的外腔结构中,可方便地在腔内插入非线性晶体,充分利用极高的腔内功率密度,获得较为理想的倍频转换效率。与倍频固体绿光激光器相比,用外腔面发射激光器腔内倍频获得的绿光有 2 个显著特点:1)不存在固体绿光激光器中的“绿噪声”,因为外腔面发射激光器所用的谐振腔很短,其增益介质是半导体材料,激光上能级寿命比固体工作物质小几个数量级^[22];2)半导体材料的增益带宽较宽,使得这种绿光激光器比固体绿光激光器具有更大的可调谐优势^[23]。

外腔面发射激光器中,单增益芯片输出的波长为 535 nm 倍频绿光的功率超过 7 W^[24]。采用多增益芯片级联的结构,美国相干公司在外腔面发射激光器中获得了功率超过 50 W 的 532 nm 连续绿光输出^[25]。在可调谐绿光方面,将长度为 11 mm 的三硼酸锂晶体(LBO)作为倍频晶体,将厚度为 2 mm 的双折射滤波片作为调谐元件,热沉温度为 2 °C 时,外腔面发射激光器输出的可调谐绿光最大输出功率超过了 4 W,在中心波长 525 nm 处激光波长的调谐范围达到 22 nm^[26]。

本文设计了一种小型化、中小功率的连续波长可调谐外腔面发射绿光激光器,它在室温下工作,使用简单的标准具作为调谐元件,具有结构紧凑、稳定

性能良好等优点,在激光光谱学、激光显示、科研仪器等方面具有较好的应用前景。

2 实验装置

实验的光路图见图 1(a),结构简图见图 1(b),装置实物如图 1(c)所示。将最大功率为 8 W 的 808 nm 光纤耦合输出激光二极管作为抽运源。抽运光斑经过直径比为 1:1 的成像聚焦透镜组,在增益芯片上成像。增益芯片与铜热沉相连,铜热沉上有锥形孔,允许抽运光通过。铜热沉与激光器底座、非线性晶体支架、输出镜支架、抽运系统支架等组成一体,可在增强激光器力学性能稳定性的同时,改善激光器的散热性能。

激光谐振腔由增益芯片后端的分布布拉格高反镜及耦合输出镜构成,耦合输出镜分别镀上反射率大于 99.5% 的高反(HR)膜和透射率大于 95% 的增透膜,分别对波长为 1100 nm 的基频光增反,对波长为 550 nm 的倍频光增透。在 10 mm 长的非线性晶体 LBO 两通光端面镀上增透膜,对波长为 1100 nm 的基频光增透,晶体处于光腔中尽量靠近增益芯片的位置,以获得尽可能小的基频光斑和尽可能大的基频光功率密度,即尽可能高的倍频转换效率。将用于波长调谐的标准具插在增益芯片及非线性晶体之间,微调标准具的水平偏转角度即可对激光波长进行调谐。

增益芯片底部分布布拉格反射镜由 30 对 1/4 波长层 AlAs/AlGaAs 组成,对 808 nm 抽运波长透明,对 1080 nm 设计波长高反,高反射率的反射带宽约 60 nm。分布布拉格反射镜上方为 15 个 InGaAs/GaAsP 多量子阱构成的有源区,设计发光的中心波长为 1080 nm。多量子阱中的势垒层 GaAsP 既是抽运光的吸收层,又是应变量子阱的应力补偿层。有源区后是高势垒的窗口层 AlGaAs,用以防止载流子扩散到芯片表面产生非辐射复合。最后的 GaAs 帽层是芯片的保护层,使外延结构免受氧化。

激光器工作过程中,有源区势垒层吸收抽运光子能量,产生光生载流子;光生载流子被量子阱俘获,在阱内产生受激辐射,为激光提供增益。每个量子阱在芯片的外延结构设计中都应该置于芯片内激光驻波场的波峰处,形成谐振周期增益结构^[27-28],使激光器获得最大的增益。

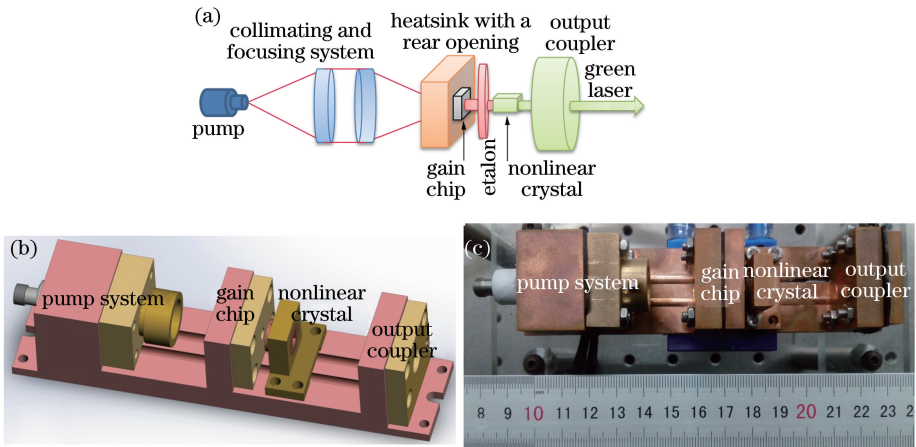


图 1 小型化可调谐外腔面发射绿光激光器。(a)光路图;(b)结构简图;(c)装置实物图
Fig. 1 Compact tunable external-cavity surface-emitting green laser. (a) Optical path;
(b) structural diagram; (c) physical map of setup

3 结果与分析

3.1 基频光

图 2(a)所示为基频光的激光光谱。激光器自由运转时,光谱的半峰全宽(FWHM)为 2.5 nm。外腔面发射激光器的光谱线宽是由半导体增益介质决定,这是因为半导体材料的能带结构决定了其增益谱较宽,有源区载流子浓度的变化又会引起折射率的变化,增加激光输出的相位噪声,进一步展宽激光光谱。当腔内分别插入厚度为 0.3 mm 和 0.15 mm 的未镀膜熔石英标准具时,激光光谱的半

峰全宽分别被压缩至 1.7 nm 和 1.4 nm。

标准具可在一定程度上压缩激光线宽,并对激光的振荡波长 λ 进行调谐,其调谐方程为

$$\lambda = \frac{2nd \cos \theta}{m}, \quad (1)$$

式中: n 为标准具材料折射率; d 为厚度; θ 为光线进入标准具的折射角; m 为干涉级次。

实验中微调标准具与正入射光线之间的夹角,即可实现对激光波长的调谐。当抽运功率为 4500 mW,热沉温度为 25 °C,标准具厚度为 0.15 mm 且对 550 nm 波长高反的情况下,基频光的

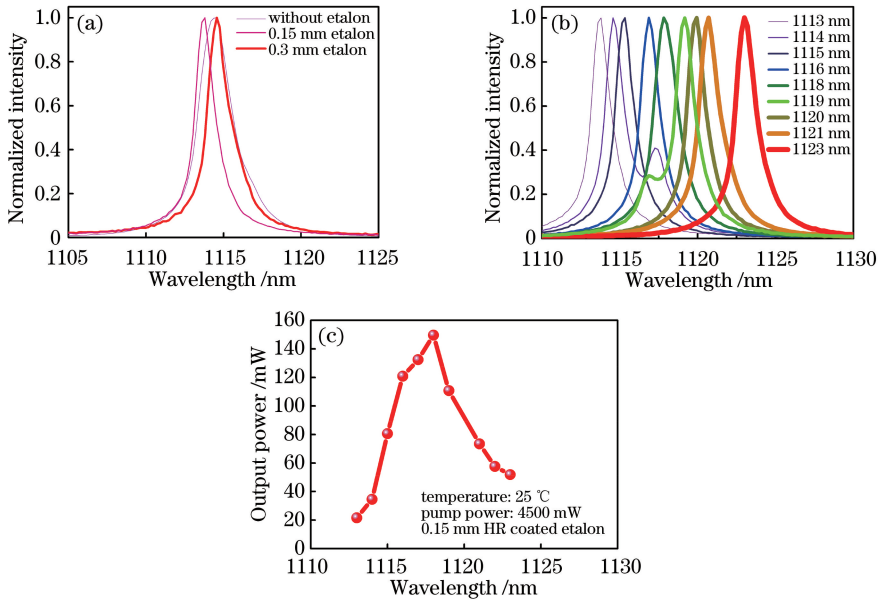


图 2 小型化可调谐外腔面发射绿光激光器的基频光输出性能。(a)激光光谱;
(b)可调谐波长的激光光谱;(c)可调谐波长的输出功率

Fig. 2 Output performances of fundamental wave of compact tunable external-cavity surface-emitting green laser.
(a) Laser spectra; (b) laser spectra of tunable wavelengths; (c) output power of tunable wavelengths

波长调谐输出如图 2(b)所示;图 2(c)所示为相同条件下,基频光调谐输出的功率曲线。由图 2(b)可知,基频光的中心波长为 1118 nm,其调谐范围大约为 10 nm,此范围主要受到阈值以上的增益谱宽度和倾斜后标准具引入的损耗两个因素制约。实验中标准具的最大倾斜角约为 10°。此外,用标准具作为调谐元件时,其输出存在模式跳变。在激光振荡从一个模式跳变到另一个模式的过程中,有时会发生多模工作的情况,如图 2(b)中的 1114 nm和 1119 nm 两个模式所示。此时需要将标准具继续同方向微调,即可完成振荡模式的完整跳变。由图 2(c)可知,1118 nm 附近的调谐输出功率最大,往短波长和长波长方向递减,最大输出功率约 150 mW。

3.2 倍频光

与 1000 nm 近红外波段内其他常用的非线性晶体相比,LBO 具有较大的倍频接收线宽和倍频接

收角、较小的走离角以及适中的有效非线性系数,因此 LBO 适用于基频光线宽较大的半导体激光器倍频。图 3(a)所示为腔内未插入标准具以及分别插入厚度为 0.3 mm 和 0.15 mm 的标准具后倍频激光的光谱半峰全宽,其大小分别为 1.8、1.5、1.0 nm。

当标准具厚度为 0.15 mm 且镀有 550 nm 高反膜,抽运功率为 4500 mW 时,室温下倍频绿光的波长调谐输出如图 3(b)所示。相同条件下,倍频绿光的调谐输出功率如图 3(c)所示。受制于基频光波长调谐范围,图 3(b)中绿光的波长调谐范围为 4 nm。与图 2(b)类似,从图 3(b)也可看出倍频光调谐过程中出现的多模工作情况,其原因皆为标准具调谐带来的模式跳变。与图 2(c)中基频光调谐输出功率对应,图 3(c)中调谐输出绿光在 559 nm 处的最大功率约 60 mW。在最大输出功率处,激光器的倍频转换效率为 40%,从抽运光到倍频光的总光-光转换效率为 1.3%。

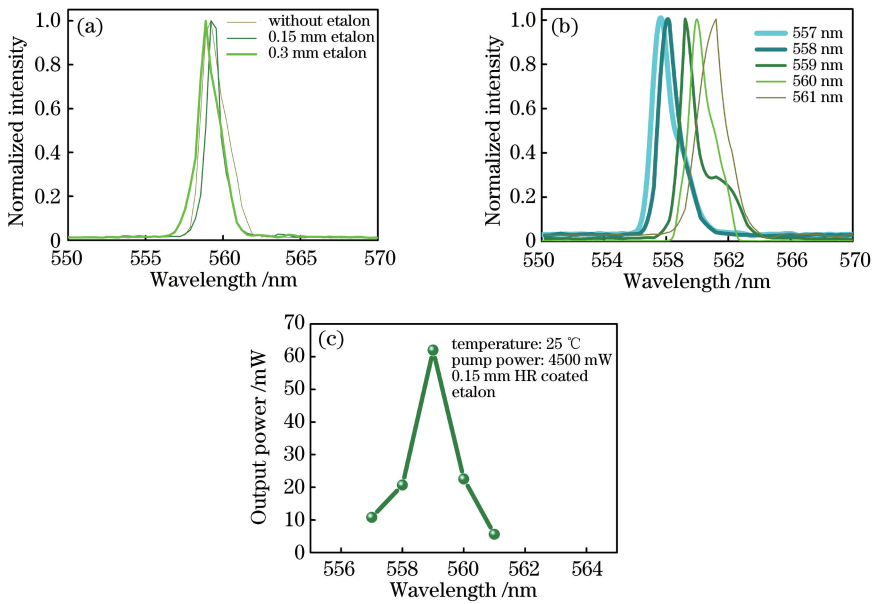


图 3 小型化可调谐外腔面发射绿光激光器的倍频光输出性能。(a)激光光谱;
(b)可调谐波长的激光光谱;(c)可调谐波长的输出功率

Fig. 3 Output performances of second harmonic of compact tunable external-cavity surface-emitting green laser.
(a) Laser spectra; (b) laser spectra of tunable wavelengths; (c) output power of tunable wavelengths

当谐振腔内不放置标准具、插入厚度为 0.15 mm 的未镀膜标准具、以及插入厚度为 0.15 mm 的镀有倍频光高反膜的标准具时,获得的绿光输出功率与抽运功率的关系如图 4 所示。很显然,标准具的插入不仅引入了一定的损耗,也在一定程度上压窄了基频光的线宽,提升了倍频转换效率,且对倍频绿光输出功率的提升起到了促进作用。此外,在图 1(a)所示的谐振腔结构中,当腔内循环的

基频光从输出镜返回到增益芯片的过程中,其所产生的倍频绿光也会返回到增益芯片,且其中的一部分会被增益芯片吸收,这不仅降低了倍频光的输出功率,同时又增加了增益芯片内的冗余热量,加剧了激光器的热效应,从而导致激光器基频光功率降低。利用折叠腔将倍频晶体置于谐振腔的另一条臂上,可以避免上述问题,且可以将凹面反射镜作为倍频晶体所在臂的后端镜,从而使得晶体能够较好地

于光束的束腰位置^[29-30]。但折叠腔的结构增加了谐振的复杂程度,降低激光器力学性能的稳定性的。因此,实验中仍保持谐振腔为直腔结构,但在厚度为 0.15 mm 的标准具表面镀上倍频光波长高反膜,以阻断倍频绿光返回到增益芯片。由图 4 可知,使用镀膜处理后的标准具明显提升了倍频绿光的输出功率,当抽运光功率为 4500 mW 时,所获得的绿光最大输出功率为 65 mW。

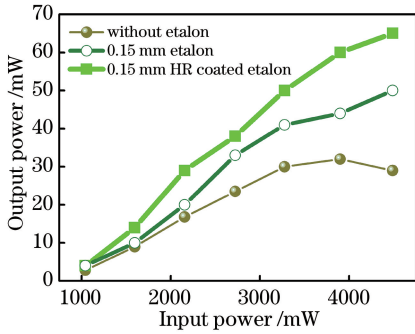


图 4 腔内插入不同标准具时绿光的输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 Output power of green laser versus pump power when different etalons employed in cavity

实验中绿光的输出功率、激光器的总光-光转换效率以及波长的调谐范围等主要性能指标都不理想,这主要是因为增益芯片的外延生长质量没有严格达到设计要求。有源区多量子阱的设计发光波长为 1080 nm,但外延生长过程中可能出现了一定程度的偏离,致使增益芯片发光的中心波长从设计波长 1080 nm 漂移至实际波长 1118 nm,所以增益芯片的量子效率的下降幅度较大;而较低的量子效率又意味着较为突出的热效应,使激光器陷入恶性循环,导致总输出功率不高,抽运光-基频光的转换效率仅为 3.3%。此外,虽然输出镜、倍频晶体、标准具等元件在镀膜时都考虑了 20 nm 的偏移量,即不是对 1080 nm 和 540 nm 波长,而是对 1100 nm 和 550 nm 波长进行镀膜,但这些元件用于实际激光波长为 1119 nm 和 559 nm 的谐振腔时,还是在一定程度上降低了谐振腔的品质因数,既削减了激光输出功率,又增大了激光器的半峰全宽,对激光器的性能均产生负面影响。相比较而言,实验获得的基频光-倍频光的转换效率(40%)较为理想,主要得益于腔内倍频过程中腔内基频光功率密度较高、标准具对基频光光谱线宽的微压缩,以及标准具对倍频光波长的高反镀膜这 3 个主要因素。

4 结 论

利用后端抽运、直线谐振腔以及对倍频光镀高反膜的标准具,设计制作了结构紧凑的可调谐外腔面发射绿光激光器。增益芯片的有源区为 InGaAs 多量子阱,势垒材料为既能对抽运光进行吸收产生光生载流子,又能作为补偿层补偿多量子阱生长过程中所引入应变的 GaAsP 材料。室温下,腔内插入厚度为 0.15 mm 的对倍频光镀高反膜的标准具,当抽运功率为 4500 mW 时,基频光的调谐范围为 10 nm,倍频光的调谐范围为 4 nm,基频光及倍频光的最大输出功率分别为 150 mW 和 60 mW,倍频转换效率为 40%。这种结构简单紧凑、力学性能稳定性良好的小型化可调谐连续运转绿光激光器,在激光扫描共聚焦显微镜等科研仪器方面具有十分重要的应用。由于增益芯片的实际发光波长严重偏离了设计波长,致使目前激光器的总光-光转换效率偏小。后续工作需进一步优化增益芯片的量子设计,并不断完善外延生长过程中的质量控制,获得量子效率高、增益系数大的优质增益芯片,提高激光器的总光-光转换效率,扩展基频光及倍频绿光的调谐范围,提升倍频绿光的输出功率。

参 考 文 献

- [1] Choudhary S, Nouri K, Elsaie M L. Photodynamic therapy in dermatology a review [J]. *Lasers in Medical Science*, 2009, 24(6): 971-980.
- [2] Albrecht H E, Borys M, Damaschke N, *et al.* *Laser doppler and phase doppler measurement techniques* [M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [3] Simbuerger E, Pflanz T, Masters A. Confocal microscopy: new lasers enhance live cell imaging [J]. *Physik Journal (Physics Best)*, 2008: 10-13.
- [4] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays a review [J]. *Applied optics*, 2010, 49(25): F79-F98.
- [5] Yuan L G, Jiang D S, Wang J J, *et al.* Green solid-state laser with 230 W output power [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 980-983.
苑利钢, 姜东升, 王建军, 等. 输出功率达 230 W 的绿光固体激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 980-983.
- [6] Huang Z M, Ren Z Y, Bai J T. 200 W quasi-continuous-wave green laser with a dual-resonator combined cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1331-1335.
黄智蒙, 任兆玉, 白晋涛. 200 W 双谐振腔组合单向输出准连续绿光激光器 [J]. *光子学报*, 2009, 38

- (6): 1331-1335.
- [7] Dudley D R, Mehl O, Wang G Y, *et al.* Q-switched diode-pumped Nd:YAG rod laser with output power of 420 W at 532 nm and 160 W at 355 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7193: 71930Z.
- [8] Fedorova A, Sokolovskii S, Battle R, *et al.* Green-to-red tunable SHG of a quantum-dot laser in a PPKTP waveguide[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(11): 790-795.
- [9] Jechow A, Menzel R, Paschke K, *et al.* Blue-green light generation using high brilliance edge emitting diode lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2010, 4(5): 633-655.
- [10] Fedorova K A, Battle P R, Livshits D A, *et al.* 517 nm-538 nm tunable second harmonic generation in a diode-pumped PPKTP waveguide crystal [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9347: 93470D.
- [11] Kuznetsov M, Hakimi F, Sprague R, *et al.* High-power (>0.5 -W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(8): 1063-1065.
- [12] Rahimi-Iman A. Recent advances in VECSELs [J]. Journal of Optics, 2016, 18(9): 093003.
- [13] Guina M, Rantamäki A, Härkönen A. Optically pumped VECSELs: review of technology and progress [J]. Journal of Physics D, 2017, 50(38): 383001.
- [14] Keller U, Tropper A C. Passively modelocked surface-emitting semiconductor lasers [J]. Physics Reports, 2006, 429(2): 67-120.
- [15] MacLean A J, Kemp A J, Calvez S, *et al.* Continuous tuning and efficient intracavity second-harmonic generation in a semiconductor disk laser with an intracavity diamond heatspreader [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008, 44(3): 216-225.
- [16] Laurain A, Myara M, Beaudoin G, *et al.* High power single-frequency continuously-tunable compact extended-cavity semiconductor laser [J]. Optics Express, 2009, 17(12): 9503-9508.
- [17] Esposito E, Keatings S, Gardner K, *et al.* Confocal laser scanning microscopy using a frequency doubled vertical external cavity surface emitting laser [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(8): 083702.
- [18] Kantola E, Rantamäki A, Leino I, *et al.* VECSEL-based 590-nm laser system with 8 W of output power for the treatment of vascular lesions [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 25(1): 7202108.
- [19] Blin S, Paquet R, Myara M, *et al.* Coherent and tunable THz emission driven by an integrated III-V semiconductor laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(4): 1-11.
- [20] Schulze M, Masters A. Optically pumped semiconductor lasers expand the scope of potential applications [J]. Laser Focus World, 2006, 42(12): 77-79.
- [21] Calvez S, Hastie J E, Guina M, *et al.* Semiconductor disk lasers for the generation of visible and ultraviolet radiation [J]. Laser & Photonics Review, 2009, 3(5): 407-434.
- [22] Steegmüller U, Kühnelt M, Unold H, *et al.* Green laser modules to fit laser projection out of your pocket [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6871: 687117.
- [23] Fan L, Fallahi M, Murray J T, *et al.* Tunable high-power high-brightness linearly polarized vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(2): 021105.
- [24] Lee J H, Lee S M, Kim T, *et al.* 7 W high-efficiency continuous-wave green light generation by intracavity frequency doubling of an end-pumped vertical external-cavity surface emitting semiconductor laser [J]. Applied physics letters, 2006, 89(24): 241107.
- [25] Chilla J, Shu Q Z, Zhou H, *et al.* Recent advances in optically pumped semiconductor lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6451: 645109.
- [26] Hein A, Menzel S, Unger P. High-power high-efficiency optically pumped semiconductor disk lasers in the green spectral region with a broad tuning range [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(11): 111109.
- [27] Jewell J L, Harbison J P, Scherer A, *et al.* Vertical-cavity surface-emitting lasers: design, growth, fabrication, characterization [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(6): 1332-1346.
- [28] Tropper A C, Hoogland S. Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. Progress in Quantum Electronics, 2006, 30(1): 1-43.
- [29] Fan L, Hsu T C, Fallahi M, *et al.* Tunable watt-level blue-green vertical-external-cavity surface-emitting lasers by intracavity frequency doubling [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(25): 251117.
- [30] Jiang L D, Zhang X H, Zhan X H, *et al.* Progress in frequency-doubled external-cavity surface-emitting lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 090001.
蒋丽丹, 张晓华, 詹小红, 等. 倍频外腔面发射激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 090001.