



·强激光物理与技术·

基于小角度 V 形腔光谱合束的半导体激光器和频

赵宇飞^{1,2}, 佟存柱², 魏志鹏¹

(1. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 发光学及应用国家重点实验室, 长春 130033)

摘 要: 通过小角度 V 形腔外腔光谱合束将两个 808 nm 半导体激光器合束, 提高半导体激光器的输出功率及光束质量。两个合束单元分别工作在 795.8 nm 和 800.5 nm, 将所获光束通过非线性光学方法进行频率转换。外腔光谱合束实现输出功率为 6.5 W 快慢轴光束质量 $M^2=2.2 \times 18.5$ 的光束输出, 所获光束慢轴 M^2 因子相较于自由运转单管激光器提高了 30%, 外腔光谱合束效率为 83%。基于所获光源, 实现了半导体激光器小角度 V 形腔外腔光谱合束和频, 获得输出功率为 18.3 mW 波长为 401.0 nm 的蓝光输出, 和频效率为 0.28%。

关键词: 半导体激光器; 外腔光谱合束; 高功率; 高光束质量; 和频

中图分类号: TN24

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230127

Sum frequency generation of semiconductor laser based on V-shaped spectral beam combining

Zhao Yufei^{1,2}, Tong Cunzhu², Wei Zhipeng¹

(1. Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Two 808 nm semiconductor lasers were combined by V-shaped spectral beam combining and locked at 795.8 nm and 800.5 nm respectively. The output power and beam quality in the slow axis were improved significantly. The sum frequency of semiconductor lasers was realized based on the laser source. A laser with an output power of 6.5 W and beam quality of $M^2=2.2 \times 18.5$ was obtained by the spectral beam combining. The M^2 in slow axis was improved by 30% and the combining efficiency was 83%. The sum frequency laser with 401.0 nm at a power of 18.3 mW was obtained and the efficiency of sum frequency generation was 0.28%.

Key words: diode laser, external cavity beam combining, high power, high beam quality, sum frequency generation

半导体激光器具有体积小、质量轻、光电转换效率高等优点, 近年来在光存储、医疗、显示和泵浦等领域中取得了重要应用^[1-3]。半导体激光器能够产生的激光频率覆盖范围广, 但是由于材料以及工艺等方面的限制, 其在短波长波段的效率较低, 极短波长的激光甚至不能直接产生, 这限制了半导体激光器的进一步发展和应用。非线性光学的方法可以实现激光频率转换, 将半导体激光器所产生的激光通过非线性晶体转换到特定的频率可以获取短波长激光。频率转换可以分为倍频(SHG)与和频(SFG)两种方式。1961年, Franken等利用红宝石激光器和石英作用, 首次观测到激光的倍频现象, 实现了频率转换。1970年, Edmonds H. D. 等通过倍频方式, 实现了半导体激光器的频率变换, 获得 15 μ W 倍频光输出。1991年, Yamamoto K. 等通过和频方法实现半导体激光器作为基频光的频率转换^[4-6]。2012年, André Müller等将两个单模锥形激光器利用 VBG 进行合束, 利用所获光源进行和频研究, 最终实现输出功率为 3.9 W 波长为 531.5 nm 绿光输出; 2015年, 该课题组在锥形激光器 VBG 合束和频的基础上增加

* 收稿日期: 2023-05-11; 修订日期: 2023-08-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(62025506)
联系方式: 赵宇飞, 1472529633@qq.com。
通信作者: 佟存柱, tongcz@ciomp.ac.cn;
魏志鹏, weizp@cust.edu.cn。

了一个晶体进行和频,实现了功率为 5 W 波长为 532 nm 光束输出^[7-8]。2016 年, Zhu zhanda 等将一个宽区半导体激光器阵列进行外腔光谱合束后将倍频晶体插入外腔中进行和频,最终得到输出功率为 93 mW 的蓝光光束输出,但由于基频光谱宽较宽,合束单元慢轴光束较差,系统的和频效率较低^[9]。

高功率高光束质量的基频光是实现频率转换的关键,合束技术可以有效提高半导体激光器光源的输出功率和亮度。根据合束单元之间是否相干,合束技术可以分为相干合束和非相干合束^[10-11]。相干合束技术需要控制合束单元之间的相位,系统复杂稳定性差,在实际应用中并不常见。非相干合束是目前获得大功率激光源的主要方法^[12-19]。美国麻省理工学院林肯实验室在 2000 年提出的外腔反馈光谱合束(SBC)可获得光束质量接近合束单元、输出功率数倍至百倍于合束单元的激光输出,是目前最佳的非相干合束方法^[20-22]。外腔光谱合束通常由前腔面镀增透膜的半导体激光器阵列、傅里叶传输透镜、衍射光学元件和输出耦合镜构成。半导体激光器阵列工作在由后腔面和输出耦合镜构成的外腔中,各个合束单元被锁定在邻近的波长上。通过外腔光谱合束所获光束的光谱由合束单元的波长构成。外腔光谱合束所获具有优秀的光束质量,但由于输出耦合镜将所有模式全部反馈至激光器,外腔光谱合束的光束质量受限于合束单元。离轴外腔光谱合束通过模式选择反馈的方法实现了突破合束单元光束质量的光束输出,小角度 V 形腔外腔光谱合束通过一个条形反射镜同时实现了激光器横向模式的选择和反馈,保证较高的合束效率的同时,所获得光束质量突破单管^[23-26]。

本文基于半导体激光器的小角度 V 形腔光谱合束将两个宽发射区边发射半导体激光器合束,进而利用所获的高光束质量高功率的光源进行和频研究。分析了基于半导体激光器小角度 V 形腔外腔光谱合束和频的输出功率、光束质量、合束效率和频效率等特性。

1 小角度 V 形腔光谱合束和频原理及实验

如图 1 所示,小角度 V 形腔半导体激光器光谱合束和频装置由外腔光谱合束(VSBC)、和频(SFG)两部分组成。外腔光谱合束部分由两个边发射半导体激光器(laser 1、laser 2)、两个快轴准直镜(FAC)、两个慢轴准直镜(SAC)、一个傅里叶变换透镜(L_1)、一个透射光栅(TG)和一个边缘锐利的高反射镜(L_2)组成。两个激光器发出的光束经过快慢轴准直后进行空间合束,空间合束后的光束通过傅里叶透镜按照不同的角度汇聚至光栅上,激光器的腔面和光栅分别放置于 L_1 的两个焦平面上。调整 L_2 与光束角度的和反馈量,使经过光栅衍射后的光束部分地反馈回至激光器中,合束单元 laser 1 和 laser 2 的后腔面与反馈镜 L_2 形成谐振腔,两个激光器锁定在特定波长,角度 α 根据实际情况调整至反射激光恰好反馈至激光器中,数值约为几度,根据 Lang-Kobayashi 理论^[27] 计算最小反馈量为 13.5% 可实现外腔锁定。为实现稳定的锁定,反馈至激光器光功率约为自由运转光束功率的 15%。根据光栅方程和激光器空间位置,每个激光器的工作波长可表达为^[28]

$$\lambda_i = d \left\{ \sin(\theta_{\text{ittrow}}) + \sin \left[\theta_{\text{ittrow}} + \arctan \left(\frac{ip}{f} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2$; p 为空间合束后两个激光器的距离; f 为傅里叶透镜的焦距; d 为光栅周期。符合光栅方程并按衍射角度入射的两束激光汇聚于光栅,经衍射后按照相同的出射角出射,合成一束。和频部分由聚焦透镜 L_3 、非线性晶体和双色镜 L_4 构成,合束后的光束经过聚焦镜 L_3 汇聚于非线性晶体进行和频。根据非线性光学,所获和频光谱可表达为

$$\lambda_{\text{SFG}} = 1 / (1/\lambda_1 + 1/\lambda_2) \quad (2)$$

式中: λ_{SFG} 、 λ_1 、 λ_2 分别为和频光束波长、第一个激光器和第二个激光器的工作波长。所获得的和频光束和基频光束通过双色镜 L_4 分离。

实验中所采用的激光器为 COS 独立封装,详细参数如表 1 所示。所采用的快轴准直透镜为焦距为 0.034 mm 的柱透镜,慢轴准直镜为焦距为 8mm 的柱透镜,傅里叶透镜为平凸透镜,焦距为 350 mm。所采用光栅为透射式光栅,衍射效率为 98%, L_2 为 K9 基底的镀金反射镜,反射率为 99.5%。为了更好地将合束光束汇聚至非线性晶体中,所采用的汇聚透镜 L_3 为非球面透镜,焦距为 50 mm。所采用的非线性晶体为偏硼酸钡晶体(BBO),尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm,晶体两端面镀中央波长 808 nm 和 400 nm 的增透膜,在中央波长±15 nm 处,透射率均大于 98.5%。本文中采取第一类相位匹配进行和频,室温下通过计算^[29],最佳方位角为 29.2°,晶体允许角为 0.71 mrad,允许线宽为 1.12 nm。所采用的双色镜 L_4 在 808 nm 处反射率大于 98.5%,在 400 nm 处透射率大于 96.8%。

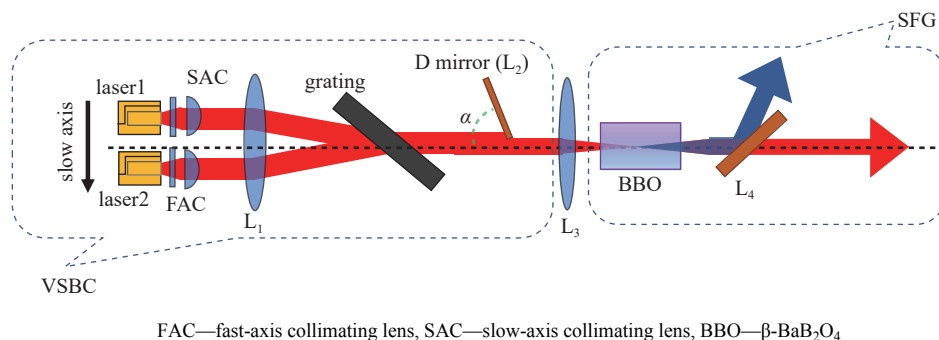


Fig. 1 Experimental setup diagram of sum frequency generation of semiconductor laser based on V-shaped spectral beam combining

图 1 半导体激光器小角度 V 形腔外腔光谱合束和频实验装置

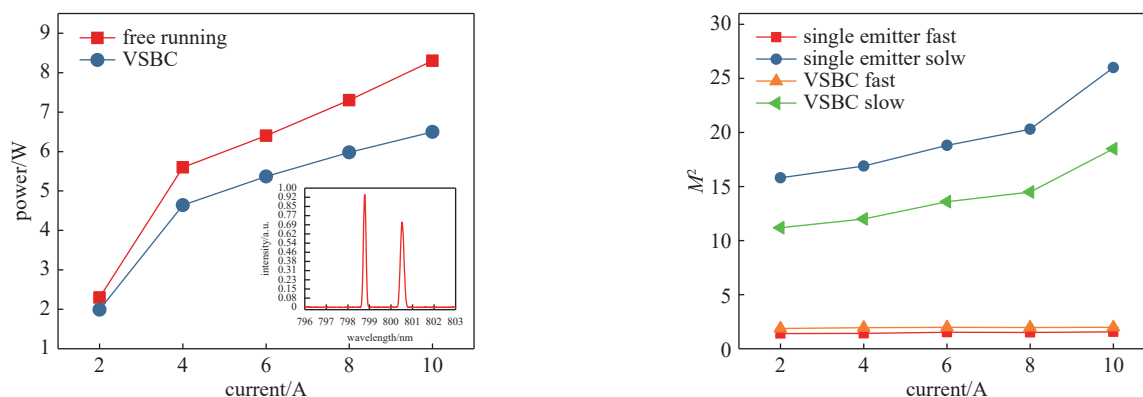
表 1 所采用半导体激光器的参数

Table 1 Structure parameters of the diode lasers used

central wavelength/nm	cavity length/mm	emitter width/ μm	θ_{fast} 95% power content/($^\circ$)	θ_{slow} 95% power content/($^\circ$)	front facet reflectivity	rear facet reflectivity/%	degree of TE polarization/%
808	3	120	75	15	2.5%	95	>95

2 实验结果及分析

在 20 $^\circ\text{C}$ 水冷主动散热下, 我们分别测量了两个半导体激光器自由运转的功率、光谱合束后的功率、合束后光谱以及光束质量。图 2(a) 为两个激光器在自由运转和小角度 V 形腔外腔光谱合束的功率随注入电流变化曲线。当驱动电流由 2 A 增加至 10 A 时, 两个激光器自由运转功率、合束后功率随注入电流增加而逐渐增大, 分别达到 8.3 W 和 6.5 W, 外腔光谱合束的合束效率为 83%, 外腔光谱合束的功率降低主要原因是光栅处的功率损失和反馈至激光器的光束。图 2(a) 插图为电流为 10 A 时合束后的两个激光器的光谱, 由图可见, 合束后的光谱由两个尖峰组成, 分别位于 795.8 nm 和 800.5 nm 处, 两个尖峰分别对应两个激光器波长取决于所用的傅里叶透镜焦距、光栅的光栅方程以及激光器位置。光谱特性说明两个激光器在外腔的作用下锁定在特定波长上。图 2(b) 为单管半导体激光器自由运转和合束后的快慢轴光束质量 M^2 随电流变化曲线, 由图可见, 单管半导体激光器自由运转 (single emitter fast) 和小角度 V 形腔光谱合束后 (VSBC fast) 的快轴方向光束质量因子 M^2 随电流增加缓缓增大, 并分别在 10 A 时达到最大。光谱合束后快轴光束质量略大于单管运行, 但数值上接近 2, 原因是傅里叶透镜的像差导致两个激光器在光栅处未完全重合, 小角度 V 形腔外腔光谱合束所得光束快轴光束质量与传统外腔光谱合束接近。自由运转时的单管慢轴方向光束质量 M^2 (single emitter slow) 和合束后的慢轴光束质量 (VSBC slow) 随着电流增加数值上迅速变大, 但合束后的慢轴光束质量始终优于单管激光器自由运转的慢轴光束质量, 在注入电流为 10 A 时, 单管激光器自由运转的慢轴方向光束质量 M^2 和合束后的慢轴光束质量 M^2 分别达到 26 和 18.5。由于慢轴方向光模式被部分反馈至激光器, 小角度 V 形腔可实现模式选择, 经过模式选择后的输出光光束质量得到提升, 相较单管半导体激光器小角度 V 形腔外腔光谱合束慢轴光束质量提高了 30%。



(a) power characteristics of the two lasers under free running and combined by V-shaped external cavity spectral beam combining (VSBC)

(b) beam quality characteristics of the laser and the combined laser

Fig. 2 Experimental result

图 2 实验结果

基于小角度 V 形腔外腔光谱合束所获得的激光, 我们进行了和频实验。图 3(a) 为和频后光束功率随着电流变化曲线, 从图中可知, 和频光束功率随注入电流增加逐渐增加, 在注入电流为 10 A 时达到最大, 数值为 18.3 mW, 和频效率为 0.28%。图 3(a) 插图所示为获得的和频光束的远场分布。图 3(b) 为所获光束的光谱图, 所获和频光束光谱由一个尖峰构成, 中央波长为 401.0 nm, 符合前文理论计算值。

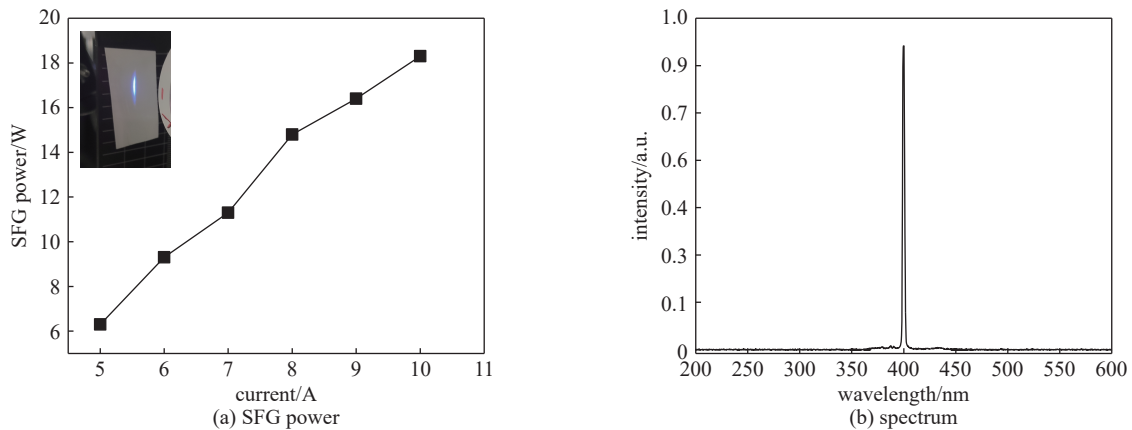


Fig. 3 Power of the blue output beam generated by SFG and characteristics spectral of the sum frequency generation

图 3 和频光束功率特性和光谱特性

3 结 论

通过小角度 V 形腔外腔光谱合束的方法提高半导体激光器光源的输出功率、改善合束后光束质量, 将所获光束进行和频。实现输出功率 6.5 W, 光束质量 $M^2=2.2 \times 18.5$ 的基频光。将所得基频光和频后, 实现 401.0 nm 输出功率为 18.3 mW 蓝光输出, 和频效率 0.28%。由于基频光束频率被外腔锁定, 因此所获和频光束的频率受环境等因素影响较小。和频效率较低的原因是基频光输出功率不足, 慢轴光束质量不够理想, 所采用非线性晶体为体材料晶体。在和频允许线宽范围内增加光谱合成的单元数量, 提高基频光功率、进一步改善基频光慢轴光束质量、级联多个非线性晶体、将体材料晶体替换为效率更高的周期性掺杂晶体等方法将进一步提高和频光输出功率。小角度 V 形腔外腔光谱合束和频为半导体激光器频率转换提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] Witte U, Schneider F, Traub M, et al. kW-class direct diode laser for sheet metal cutting based on DWDM of pump modules by use of ultra-steep dielectric filters[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22917-22929.
- [2] Pietrzak A, Zorn M, Huelsewede R, et al. Development of highly efficient laser diodes emitting around 1060nm for medical and industrial applications[C]// Proceedings of SPIE 10900, High-Power Diode Laser Technology XVII. 2019: 109000K.
- [3] Shimada N, Yukawa M, Shibata K, et al. 640-nm laser diode for small laser display[C]//Proceedings of SPIE 7198, High-Power Diode Laser Technology and Applications VII. 2009: 719806.
- [4] Franken P A, Hill A E, Peters C W, et al. Generation of optical harmonics[J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7(4): 118-119.
- [5] Edmonds H, Smith A. Second-harmonic generation with the GaAs laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1970, 6(6): 356-360.
- [6] Yamamoto K, Yamamoto H, Taniuchi T. Simultaneous sum-frequency and second-harmonic generation from a proton-exchanged MgO-doped LiNbO₃ waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58(12): 1227-1229.
- [7] Müller A, Jensen O B, Hasler K H, et al. Efficient concept for generation of diffraction-limited green light by sum-frequency generation of spectrally combined tapered diode lasers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3753-3755.
- [8] Hansen A K, Jensen O B, Andersen P E, et al. 5.5 W of diffraction-limited green light generated by SFG of tapered diode lasers in a cascade of nonlinear crystals[C]//Frontiers in Optics 2015. 2015: FTu2F. 3.
- [9] Zhu Zhanda, Jiang Menghua, Yu Haoyang, et al. Generation of blue light by sum-frequency generation of a spectrally combined broad-area diode laser array[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4712-4714.
- [10] 周朴, 粟荣涛, 马阎星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011—2020[J]. *中国激光*, 2021, 48: 0401003. (Zhou Pu, Suo Rongtao, Ma Yanxing, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0401003)
- [11] 王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 517-534. (Wang Liju, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517-534)
- [12] Zhu Hongbo, Lin Xingchen, Zhang Yawei, et al. kW-class fiber-coupled diode laser source based on dense spectral multiplexing of an ultra-narrow channel spacing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 24723-24733.

- [13] Zhu Hongbo, Duan Xiaoming, Fan Shengli, et al. Scalable structure of coherent polarization beam combining based on tapered diode laser amplifiers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 132: 106470.
- [14] Albrodt P, Niemeyer M, Crump P, et al. Coherent beam combining of high power quasi continuous wave tapered amplifiers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27891-27901.
- [15] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(6): 405-407.
- [16] Daniault L, Hanna M, Lombard L, et al. Coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 621-623.
- [17] 孟慧成, 谭昊, 李建民, 等. 半导体激光器光栅外腔光谱合束技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52: 020003. (Meng Huicheng, Tan Hao, Li Jianmin. Development of spectral beam combining of diode laser by grating and external cavity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52: 020003)
- [18] Zheng Ye, Yang Yifeng, Wang Jianhua, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [19] 禹伶洁. 激光合束专利技术现状及进展[J]. *中国新技术新产品*, 2020(5): 139-140. ((Yu Lingjie. Development of patent technology for laser beam combination[J]. *New Technologies & New Products of China*, 2020(5): 139-140)
- [20] Jung A, Song S, Kim S, et al. Numerical analyses of a spectral beam combining multiple Yb-doped fiber lasers for optimal beam quality and combining efficiency[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 13305-13319.
- [21] 张俊, 彭航宇, 曹军胜, 等. 970nm百瓦级半导体激光外腔反馈光谱合束光源[J]. *光学学报*, 2013, 33: 1114001. (Zhang Jun, Peng Hangyu, Cao Junsheng, et al. 970 nm hundred-watt level diode laser source by spectral beam combining with external cavity feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33: 1114001)
- [22] 王立军, 彭航宇, 张俊, 等. 高功率高亮度半导体激光器合束进展[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46: 0401001. (Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun, et al. Development of beam combining of high power high brightness diode lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46: 0401001)
- [23] Jechow A, Skoczowsky D, Lichtner M, et al. High-brightness emission from stripe-array broad area diode lasers operated in off-axis external cavities[C]// *Proceedings of SPIE 7583, High-Power Diode Laser Technology and Applications VIII*. 2010: 758312.
- [24] Vijayakumar D, Jensen O B, Thestrup B. 980 nm high brightness external cavity broad area diode laser bar[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5684-5690.
- [25] Sun Fangyuan, Shu Shili, Zhao Yufei, et al. High-brightness diode lasers obtained via off-axis spectral beam combining with selective feedback[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21813-21818.
- [26] Zhao Yufei, Sun Fangyuan, Tong Cunzhu, et al. Going beyond the beam quality limit of spectral beam combining of diode lasers in a V-shaped external cavity[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14058-14065.
- [27] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [28] 孟慧成, 武德勇, 谭昊, 等. 窄光谱高亮度半导体激光器光栅-外腔光谱合束实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42: 0302003. (Meng Huicheng, Wu Deyong, Tan Hao, et al. Experimental study on high brightness and narrow band of diode laser by spectral beam combining of grating-external cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42: 0302003)
- [29] 刘良清, 袁孝, 吕超. 双轴晶体和频晶体长度与允许参量分析[J]. *激光技术*, 2007, 31(3): 232-234,245. (Liu Liangqing, Yuan Xiao, Lü Chao. The crystal-length and acceptance parameters of SFG with biaxial crystals[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 232-234,245)