

文章编号 1004-924X(2005)03-0253-07

VCSEL 直接倍频蓝光固态激光器的研究

马莹¹, 王成², 缪同群³

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 上海交通大学激光与光子生物医学研究所, 上海 200030; 3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 980 nm 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 采用直接倍频和在复合腔中倍频两种方式实现了 490 nm 蓝光输出。整形采用 0.23p@980nm 的自聚焦透镜 (GRIN lens), 倍频晶体选择非线性系数相对较大、允许角相对较宽的 LBO 晶体。在 VCSEL 输出功率为 530 mW 时, 选取透过波长为 980 nm、长度为 0.23 pitch 的自聚焦透镜整形, 倍频晶体选择 2 mm×2 mm×5 mm 的 LBO 晶体, 输出了 50 μW 的 490 nm 蓝光, 在增加了曲率半径 $R=50$ mm 的外腔镜后得到了 70 μW 的 490 nm 蓝光。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 直接倍频; 复合腔; LBO 晶体; 自聚焦透镜; 二次谐波振荡

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Blue light laser by direct frequency doubling of VCSEL

MA Ying¹, WANG Cheng², MIAO Tong-qun³

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*; 2. *Institute for Laser Medicine Bio-photonics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*; 3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*)

Abstract: A 980 nm vertical cavity surface emitting (VCSEL) laser realizes frequency doubled by directly doubling and compound cavity doubling and obtains 490 nm blue laser. GRIN lens are used for shaping beam and LBO crystal is employed for secondary harmonic generation (SHG). In the experiment, the output power of the fundamental frequency laser is 530 mW, Gauss beam is adjusted by one GRIN lens with a length of 0.23p@980 nm and a LBO crystal with dimensions of 2 mm×2 mm×5 mm. And 490 nm blue beam of 50 μW is obtained. By adding an external cavity mirror with a radius curvature of 50 mm, the output power of 490 nm blue beam is increased to 70 μW.

Key words: vertical cavity surface emitting laser; direct frequency doubling; compound cavity; LBO crystal; GRIN lens; secondary harmonic generation

收稿日期: 2005-02-22; 修订日期: 2005-04-18.

基金项目: 国家“863”资助项目 (No. 2002AA311050)

1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)是光通信中的一种深具潜力的固体激光光源,生产成本低,光束质量好,其圆形输出光束易与光纤耦合,因此在光通信领域取得了巨大的成功,但是将其用于固体激光器直接倍频还是一个全新的课题。2002年,德国Ulm大学研制成功VECSEL(Vertical extended cavity surface emitting lasers),并且将微透镜作为复合腔的腔镜^[1-2]实现了VCSEL的直接倍频。2003年,美国NOVOLUX公司的J G McInerney, A Mooradian等人研制出利用外加延长腔的垂直腔面发射半导体激光器(NECSEL)直接倍频输出490 nm和488 nm蓝光^[3-8],未经聚焦的情况下,在延长腔中插入非线性晶体后可以产生约40 mW TEM₀₀的490 nm激光输出,转换效率约为10%。由此可见,VCSEL有可能替代边发射半导体激光器成为最适合倍频的基频光光源。

2 实验设计

本实验采用了两种方式实现倍频输出,一种为垂直腔面发射激光器外腔直接倍频,另一种为垂直腔面发射激光器在复合腔中倍频(VECSELs)。

垂直腔面发射激光器外腔直接倍频的结构如图1所示:

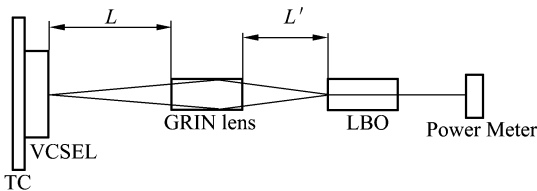


图1 垂直腔面发射激光器外腔直接倍频结构图

Fig. 1 Configuration of VCSEL direct frequency doubling in the outer cavity

在外腔直接倍频的结构设计时,选取自聚焦透镜对VCSEL的输出光束整形,自聚焦透镜的参数为:直径 $D=1.8\text{ mm}$,聚焦参数 $\sqrt{A}=0.330\pm 2.5\%$,数值孔径 $NA=0.46$,折射率 $N_0=1.599$, $T=89\%$ 。设自聚焦透镜长度为 Z ,使用ZEMAX软件进行模拟计算获得其理想长度。

VCSEL的发光面直径 $D=500\text{ }\mu\text{m}$,光束发散角(半角) $u=15^\circ$,在ZEMAX中近似认为发光面的光束是从 $u=15^\circ$ 的光束的反向延长线的交点处发出,且此发光点距离自聚焦透镜的近端面距离为 L ,成像点距自聚焦透镜另一端面的距离为 L' 。LBO的入射角也就是允许角等价于自聚焦透镜的出射角。LBO的允许角为 $0.24^\circ\times\text{cm}$,所以将VCSEL的光束发散角 $u=15^\circ$ 和LBO的允许角为 0.24° 归结为已知光束在自聚焦透镜上的入射角和出射角,通过ZEMAX计算选择自聚焦透镜合适的位置^[9-11]。经过ZEMAX的计算优化得到如图2所示的结构:

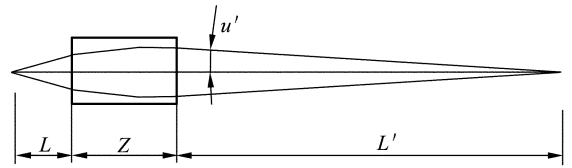


图2 ZEMAX计算自聚焦透镜位置

Fig. 2 Position of GRIN lens computed by ZEMAX

在ZEMAX中模拟计算得到,当自聚焦透镜的长度 Z 为恒定值时,像方孔径角 u' 随着物距 L 的增加而增大。图3所示为 $Z=2.55\text{ mm}$ 像方孔径角 u' 与物距 L 的关系。当 $L>3\text{ mm}$ 时,无法成像。

同理可得,当物距 L 为恒定值时,像方孔径角 u' 随自聚焦透镜长度的增加而增大。图4所示为 $L=1.7\text{ mm}$ 时像方孔径角 u' 与自聚焦透镜长度 Z 的关系。

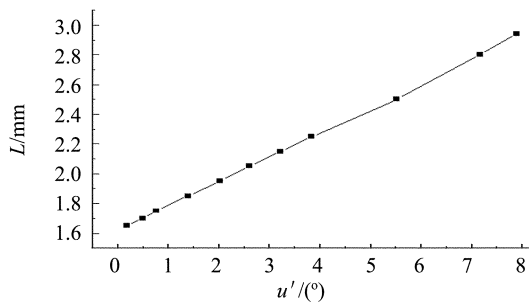


图 3 $Z=2.55$ mm 时像方孔径角 u' 与物距 L 的关系

Fig. 3 Relation ship between accepted angle u' and object distance L when $Z=2.55$ mm

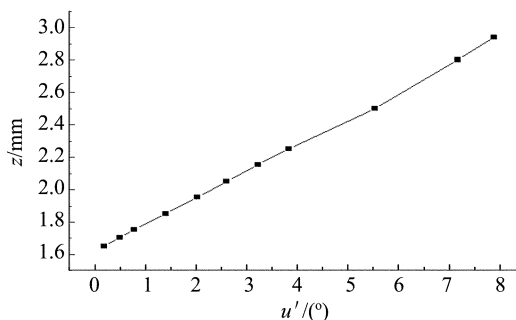


图 4 $L=1.7$ mm 时像方孔径角 u' 与自聚焦透镜长度 Z 的关系

Fig. 4 Relation between accept angle and GRIN lens length Z when $L=1.7$ mm

综合考虑物距和自聚焦透镜长度的关系,选择自聚焦透镜长 $Z=2.55$ mm,约为 0.1275 pitch。VCSEL 光束的反向延长线的交点到自聚焦透镜端面的距离 $L=1.7$ mm,光束经过自聚焦透镜后在 $L'=80$ mm 处成像大小为 $\omega'_0=2.864 \mu\text{m}$ 。像方孔径角(半角)为 0.485° 。

垂直腔面发射激光器在复合腔中倍频的结构如图 5 所示,filter 在这种结构中起的作用就是外腔镜的作用,能够提高倍频效率,使更多的能量耦合进入倍频晶体^[12-15]。

根据公式 $\omega^2 = \frac{4\lambda L_c}{\pi} \sqrt{\frac{R_c - L_c}{L_c}}$ 可以分析

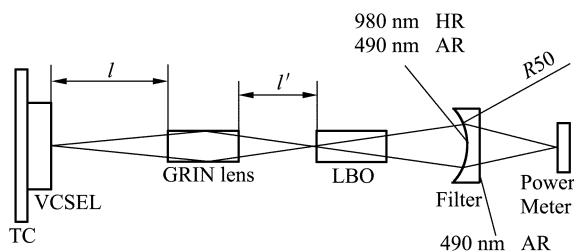


图 5 垂直腔面发射激光器在复合腔中倍频结构图

Fig. 5 Configuration of VCSEL direct frequency doubling in the compound cavity

模场直径、腔长和腔镜曲率半径的关系^[16],其中 R_c 为外腔镜的曲率半径, L_c 为腔长,从 LBO 晶体的右端面到腔镜表面的距离, λ 为基频波长。

当外腔镜的曲率半径分别为 $R_{c_1}=50$ mm, $R_{c_2}=100$ mm, $R_{c_3}=200$ mm 时,在 $\lambda=980$ nm 时,分别得到以下图 6-8。

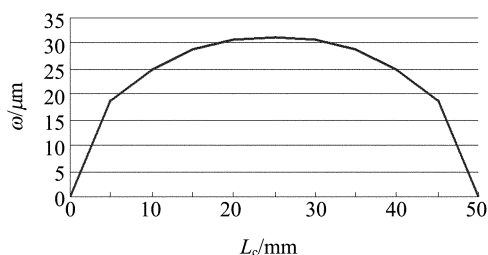


图 6 $R_c=50$ mm 时腔长与模场直径的关系
Fig. 6 Relation ship between cavity distance and the diameter of the mode field when $R_c=50$ mm

分析以上各图可以得到以下结论:

(1) 当腔长一定时,如 $L_c=25$ mm,模场直径分别为 $\omega_{50}=31.19 \mu\text{m}$, $\omega_{100}=54.03 \mu\text{m}$, $\omega_{200}=82.53 \mu\text{m}$,即外腔镜的曲率半径 R_c 越小,模场直径也越小。

(2) 同理当模场直径一定值时,外腔镜的曲率半径 R_c 越小,腔长也越短。

因此,选择 $R_{c_1}=50$ mm 的腔镜,腔长 $L_c=10$ mm 时得到模场直径为 $\omega_{50}=$

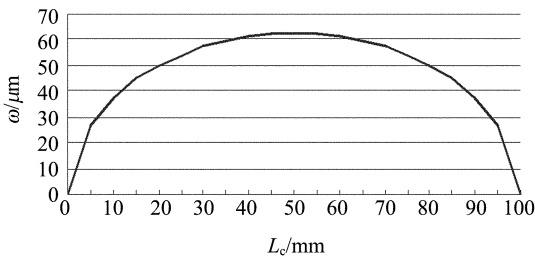


图 7 $R_c=100$ mm 时腔长与模场直径的关系

Fig. 7 Relation between cavity distance and the diameter of the mode field when $R_c=100$ mm

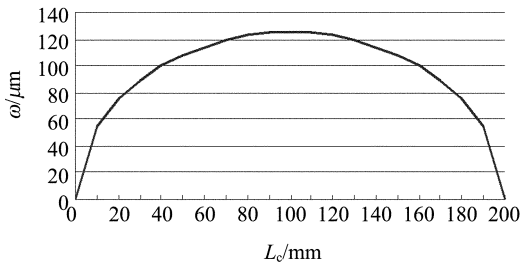


图 8 $R_c=200$ mm 时腔长与模场直径的关系

Fig. 8 Relation ship between cavity distance and the diameter of the mode field when $R_c=200$ mm

24.96 μm , 在电流 $I=2.5$ A 时, VCSEL 的输出功率为 530 mW, 功率密度为 2.71×10^4 W/cm²。

3 实验结果

实验中所选取的 LBO 晶体长度为 5 mm, 所对应的允许角为 $\Delta\varphi = \frac{0.24^\circ \times \text{cm}}{0.5 \text{ cm}} = 0.48^\circ$ 。

由于无法得到理论计算所得到的自聚焦透镜长度, 所以实验中使用的自聚焦透镜长度为 $Z=4.73$ mm, 约为 0.23 pitch, 其焦距为

$$f' = \frac{N_1}{N_0 \sqrt{A} \sin \sqrt{AZ}} = 1.8952 \text{ mm}$$

其中 N_0 为自聚焦透镜的折射率, $N_0 =$

1.599, $\sqrt{A}=0.33$, N_1 为与自聚焦透镜相邻介质的折射率。

在 ZEMAX 中计算得到 VCSEL 在距离自聚焦透镜前 $L=1.0$ mm 处时, 自聚焦透镜后的高斯光斑成像距离为 3.47 mm, 大小为 $\omega_0=0.008$ μm 。像方孔径角(半角)为 8.2° 。如图 9 所示:

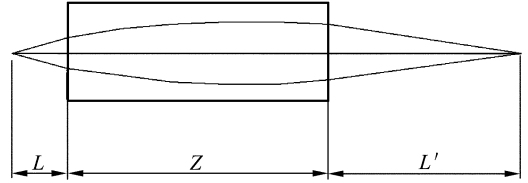


图 9 $Z_0=0.23$ pitch 时自聚焦透镜成像光路图

Fig. 9 Optical path of GRIN lens image when $Z_0=0.23$ pitch

但是由于高阶模式的存在, 实际得到的光斑大小比理论计算值要大。

图 10 是外腔直接直接倍频所得到的远场光斑图像

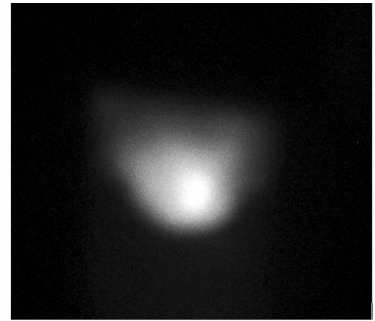


图 10 远场光斑

Fig. 10 Optical spot in the far field

外腔直接倍频的测量结果: 基频 980 nm 的光功率 $P_\omega = 530$ mW, 倍频后 490 nm 的光功率为 $P_{2\omega} = 50$ μW 。

增加复合腔后的测量结果: 基频 980 nm 的光功率 $P_\omega = 530$ mW, 倍频后 490 nm 的光功率为 $P_{2\omega} = 70$ μW 。

输出的 490 nm 蓝绿光经过格兰棱镜检偏后, 得到两明两暗的结果, 证明是线偏振光, 因此倍频出射的是激光, 而不是激发

的荧光。

实验结果受到很多因素的影响,因此不是很理想,主要的影响因素有:

3.1 偏振特性的影响

VCSEL的偏振方向是不稳定的,发出的光波是偏振方向在不停变化的线偏光,因此在诸多偏振态中所利用的只有符合条件的那部分偏振光,而这部分被利用的偏振光的能量是很低的,大部分的能量都集中在对倍频没有贡献的偏振态中^[17-18]。因此,倍频效率很低的最重要因素是偏振态的不确定导致相位失配。

3.2 发光区域面积与发散角的影响

实验中实际的功率密度约为 500 W/cm^2 ,聚焦系统没有达到要求,VCSEL的发光直径为 $500\text{ }\mu\text{m}$,而发散角的半角却达到了 15° ,为了满足匹配角所要求的允许角,只有以大的光斑面积或低的功率密度换得。在一定输入功率条件下,要提高功率密度必须缩小光斑面积。根据拉赫不变量^[19] $n_1 y_1 u_1 = n_2 y_2 u_2$,当像面面积缩小时必然导致像的发散角的扩大。像的面积和发散角的矛盾转化为功率密度与允许角的矛盾,取两者最佳配合值仍然无法实现较高的转换效率。所以,发光区面积与发散角是影响倍频效率的另外一个重要因素。

3.3 温度的影响

VCSEL的温度对于波长变化的影响是明显的,VCSEL的红移率为 0.06 nm/K ^[20],温度上升 33°C 时,波长将漂移 2 nm ,如果VCSEL的中心波长为 980 nm ,则将漂移出允许波长范围。实际中的中心波长为 983.6 nm ,可以通过调整LBO晶体的角度和方向来实现相位匹配,但是当调整好角度后,虽然温度的变化导致的失配可以由角度来补偿,但是温度是在不断地变化中,所以很难确定一个固定的角度。因此,控制VCSEL的温度是一项很重要的工作。虽然实验中已经采用了

12 V 、 20 W 致冷器,而且 $20\text{ k}\Omega$ 热敏电阻在工作时已经降到了 $10\text{ k}\Omega$,但是当电流设定在 3.5 A 以上不久就会自动断电保护。因此,VCSEL无法在更高的电流下工作,也就无法实现在更高功率下的倍频。

LBO晶体的温度变化对于倍频效率的影响是不大的,由于倍频效率很低,功率密度也很低,与损伤阈值相差了几个数量级,所以LBO的温度变化并不是很明显的,对于倍频效率的影响也是不大的。

3.4 VCSEL中心波长的影响

计算的相位匹配角是按照中心波长为 980 nm 设计的,因此晶体的切割角度也是按照中心波长为 980 nm 切割的,但是实际使用的VCSEL的中心波长为 983.6 nm ,所以实际利用的角度并不是晶体的切割角度,需要在调整架上进行调整。虽然可以通过调整晶体方向和角度找到最佳匹配角度,但中心波长的漂移也是不可忽视的影响因素。

3.5 LBO晶体镀膜的影响

实验中所使用的LBO晶体双面抛光,没有镀膜,这样会对透过率造成一定的影响。未镀膜的晶体表面的菲涅尔反射率大于 4% ^[19],所以会有一部分光的能量因此而损失。但这种影响并不是倍频效率低的主要因素。

3.6 自聚焦透镜的影响

理论计算所得到的自聚焦透镜长 $Z=2.55\text{ mm}$,约为 0.1275 pitch 。物距 $L=1.7\text{ mm}$,成像在自聚焦透镜后面 $L'=80\text{ mm}$,像斑大小 $\omega'_0=2.864\text{ }\mu\text{m}$ 。出射孔径角(半角)为 0.485° 。

实验中使用的自聚焦透镜长度为 $Z=4.73\text{ mm}$,约为 0.23 pitch ^[21],VCSEL在距离自聚焦透镜前 $L=1.0\text{ mm}$ 处,自聚焦透镜后的高斯光斑成像距离为 3.47 mm ,大小 $\omega_0=0.008\text{ }\mu\text{m}$ 。出射孔径角(半角)为

8.2°,而 LBO 晶体在 5 mm 长时的允许角为 0.48°,只有 5.8% 的能量位于允许角之内。

3.7 复合腔实际工作的情况

外腔镜的直径为 $D=4$ mm,腔长 $L_c=10$ mm,实际的光束在外腔镜处的光斑直径为 $d=2.88$ mm,虽然都位于腔镜范围之内,但是高阶模式的模场直径远大于 4 mm,只有基模耦合返回腔内,高阶的无法返回。因此,选择口径大的外腔镜有助于将更多的能量限制在延长腔之内。实验中,可以观察到,延长腔的作用并不是很有效果,因此改进延长腔的工作状况有待解决。

参考文献:

- [1] UNOLD H J, MAHMOUD S W, JAGER Z R, *et al.* Improving single-mode VCSEL performance by introducing a long monolithic cavity[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, 12(8): 939-941.
- [2] RAYMOND T D, ALFORD W J, RAWFORD M H, *et al.* Intra-cavity frequency doubling of a diode-pumped external-cavity surface-emitting semiconductor laser[J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(16):1451-1455.
- [3] WATSON J P, MCINERNEY J G, MOORADIAN A, *et al.* Compact, efficient visible lasers based on the Novalux extended cavity surface emitting laser(NECSEL) concept[Z].
- [4] UNOLD H J, GRABHERR M, EBERHARD F, *et al.* Increased-area oxidized single fundamental mode VCSEL with self-aligned shallow etched surface relief[J]. *Electron Lett.*, 1999, 35: 1340-1341.
- [5] KOZLOVSKY W J, RISK W P, LENTH W, *et al.* Blue light generation by resonator-enhanced frequency doubling of an extended-cavity diode laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 65(5): 525-527
- [6] STRZELECKA E M, MCINERNEYA J G, *et al.* High power, high brightness 980 nm lasers based on the extended cavity surface emitting lasers concept[J]. *SPIE*, 2003, 4993:57-67.
- [7] MCINERNEY J G, MOORADIAN A, LEWIS A, *et al.* Novel 980 nm and 490 nm light sources using vertical cavity lasers with extended coupled cavities[J]. *SPIE*, 2002, 4942:1-12.
- [8] LEE D, SHCHEGROV A V, STRZELECKA E M, *et al.* Second harmonic generation at 488 nm by intracavity doubling of extended-cavity surface-emitting lasers [J]. *SPIE*, 2003, 4972: 102-111.
- [9] 周崇喜, 杜春雷, 半导体激光器阵列光束准直和聚焦系统设计[J]. *光学仪器*, 2000, 22(6):25-29.
ZHOU CH X, DU CH L. Optical design of collimating and focusing optical system for semiconductor laser diode array[J]. *Optical Instruments*, 2000, 22(6):25-29. (in Chinese)
- [10] 张大勇, 周寿桓, 梁峰, 等. LD 光束经自聚焦透镜变换后的特性研究[J]. *激光与红外*, 2002, 32(3):171-176.
ZHANG D Y, ZHOU SH H, LIANG F, *et al.* Study on the characteristic of LD output beam transformed by GRIN[J]. *Laser and Infrared*, 2002, 32(3):171-176. (in Chinese)

4 结 论

本实验选择 1 W 的 980 nm VCSEL 作为基频光源,选择 0.23 pitch 的自聚焦透镜对光路整形,选取 5 mm 长的 LBO 晶体作为倍频晶体,在外腔直接倍频和增加复合腔两种情况下,分别得到蓝光输出,证明了 VCSEL 可以腔外直接倍频输出蓝光,而且复合腔结构能够提高 VCSEL 倍频效率。

致谢:实验中使用 VCSEL 器件由长春光机所激发态物理重点实验室半导体激光组^[22]提供,在此表示感谢。

- [11] 刘德森,高应俊. 变折射率介质的物理性质[M]. 北京:国防工业出版社,1989.
LIU D S, GAO Y J. *The physics characteristics variety refractive index medium*, 1.0 edition [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1989. (in Chinese)
- [12] 易亨瑜,李育德,陈梅. 适用于光化学反应的 CO 激光器单纵模复合腔研究[J]. 激光杂志,2001, 22(6):33-35.
YI H Y, LI Y D, CHEN M. Research on composite resonator of single longitudinal mode CO laser suitable for photochemistry[J]. *Laser Journal*, 2001, 22(6):33-35. (in Chinese)
- [13] 王加贤,吕凤萍,苏娅菲,等. Q 复合腔 Nd: YAG- Cr⁴⁺: YAG 激光器的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4):399-402.
WANG J X, LU F P, SU Y F. Investigation on a compound resonator Nd: YAG⁻ Cr⁴⁺: YAG laser with dual Q-Switching operation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(4):399-402. (in Chinese)
- [14] 郭长志. 半导体激光器模式理论[M]. 北京:人民邮电出版社,1989:58-61.
GUO CH ZH. *Semiconductor laser mode theory*[M]. Beijing: Public Posts and Telecommunications Press, 1989:58-61. (in Chinese)
- [15] 马海霞,楼祺洪,董景星,等. 一种改善激光器输出光束质量的新型谐振腔[J]. 中国激光,2003, 30(11):977-980.
MA H X, LOU Q H, DONG J X, et al. A novel resonator to improve the laser beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(11):977-980. (in Chinese)
- [16] KARDOSH I. VOIGNIER V. *Vertical extended cavity surface-emitting lasers* [D]. Annual Report, Optoelectronics Department, University of Ulm, 2002.
- [17] 伊贺键一,小山二三夫. 面发射激光器基础与应用[M]. 科学出版社,共立出版,2002,32-33:114-115.
The Foundation and application of Surface emitting Lasers, 1.0 edition [M]. Science Press, Gongli Press, 2002, 32-33:114-115.
- [18] YOSHIKAWA T, KAWAKAMI T, SAITO H, et al. Polarization controlled single mode VCSEL[J]. *IEEE J. Sel Topics in Quantum Electronics*, 1998, 34(6): 1009-1015.
- [19] 李景镇. 光学手册[M]. 陕西:陕西科学技术出版社.
LI J ZH. *Optical handbook*, 1.0 edition [M]. Shanxi: Shanxi Science Technology Press. (in Chinese)
- [20] 张存善,张延生,段晓峰. 垂直腔面发射激光器 DBR 结构反射特性分析[J]. 光电子·激光,2002, 13(1):34-36.
ZHANG C SH, ZHANG Y SH, DUAN X F. Analysis of reflectance characteristics of DBR in vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2002, 13(1):34-36. (in Chinese)
- [21] 西安同维通讯技术有限公司, TOWIN 自聚焦透镜使用说明书, 2.0 版[Z]. 2002.
Xi'an Towin communication technology Co., Ltd. TOWIN self-focusing lens user's guide, 2.0 edition [Z], 2002. (in Chinese)
- [22] 孙艳芳,金珍花,宁永强,等. 高功率底发射 VCSELS 的制作与特性研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5):449-453.
SUN Y F, JIN ZH H, NING Y Q, et al. Fabrication and experimental characterization of high power bottomemitting VECSELS [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(5):449-453.

作者简介:马莹(1981—),女,吉林长春人,中国科学院上海应用物理研究所同步辐射加速器束线工程部,研究方向为同步辐射加速器光束线压弯机构。Email: yiyima 8114@sina.com