

基于二维光栅的偏振无关波长可调谐垂直腔面发射激光器

江孝伟^{1,2*}

¹衢州职业技术学院信息工程学院, 浙江 衢州 324000;

²北京工业大学光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 为了能够实现垂直腔面发射激光器(VCSEL)偏振无关特性,提出了将偏振无关光栅与 half-VCSEL 集成的方法。基于严格耦合波法,分析了光栅参数对偏振无关二维光栅反射特性的影响,经过模拟计算,发现在光栅周期为 691~719 nm、光栅宽度为 408.73~467.60 nm 时,偏振无关二维光栅有 210 nm 的高反射带宽。将偏振无关二维光栅与中心波长为 1.55 μm 的 half-VCSEL 进行集成,得到了中心波长为 1.55 μm 的偏振无关波长可调谐 VCSEL,经过光学传输矩阵计算,可得该偏振无关波长可调谐 VCSEL 的波长调谐范围可达 93 nm。

关键词 光学器件; 光栅; 偏振无关; 垂直腔面发射激光器; 可调谐; 调谐范围

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0623003

Polarization-Independent Wavelength-Tunable Vertical Cavity Surface Emitting Laser Based on Two-Dimensional Grating

Jiang Xiaowei^{1,2*}

¹College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

²Key Laboratory of Optoelectronic Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract To realize a polarization-independent vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), the polarization-independent grating and the half-VCSEL are integrated. Based on the rigorous coupled wave analysis, the effects of grating parameters on the reflection characteristics of a polarization-independent two-dimensional grating are analyzed. The 210 nm high-reflection bands of the polarization-independent two-dimensional grating for a grating period of 691-719 nm and a grating width of 408.73-467.60 nm are obtained via analog computation. Then, the polarization-independent two-dimensional grating and the half-VCSEL with a 1.55- μm central wavelength are integrated to develop a polarization-independent wavelength-tunable VCSEL with the 1.55- μm central wavelength. The calculation based on an optical transmission matrix indicates that the wavelength-tuning range of 93 nm can be realized for the polarization-independent wavelength-tunable VCSEL.

Key words optical devices; grating; polarization-independent; vertical cavity surface emitting laser; tunable; tuning range

OCIS codes 230.1950; 250.7260; 310.5448; 140.3600

1 引 言

实现垂直腔面发射激光器(VCSEL)单偏振输出一直是 VCSEL 领域的研究热点,因为单偏振输

出 VCSEL 在原子钟^[1-2]、长距离光纤通信^[3-4]、气体探测^[5-6]等方面均有应用。近几年提出的实现 VCSEL 单偏振输出的方法包括光子晶体技术^[7]、介质光栅技术^[8-9]、金属光栅或金属纳米阵列技术^[10-11]

收稿日期: 2019-01-10; 修回日期: 2019-02-18; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61575008,61650404)、浙江省教育厅一般科研(Y201738091, Y201839950)、江西省教育厅科技(GJJ170819)、衢州市科技计划(2017G16)、赣南师范大学招标课题(16zb04)、智能制造工业与工业大数据技术应用创新团队(QZCX1801)

* E-mail: JosephJiangquzhi@126.com

以及液晶技术^[12-14]等,经广大科研工作者的研究和优化,这些方法已经逐步走向成熟。

因为偏振无关 VCSEL 对于横电模 (TE) 偏振和横磁模 (TM) 偏振具有相同的反射特性^[15],因此它可以在两个偏振上同时以相同波长进行激射,不仅能够应用于全光分组交换网络的光缓冲存储器^[16]中,也可以应用于多普勒测速^[17]。目前国内关于实现偏振无关的 VCSEL 的研究较少,2006 年 Dyomina 等^[18]提出在 VCSEL 有源区上下分别添加向列液晶,并且使有源区上下向列液晶在层平面上方向互相正交,从而实现波长可调谐偏振无关 VCSEL,但未分析结构参数对器件性能的影响;2013 年 Tsunemi 等^[19]提出利用高反射偏振无关的二维介质光栅替换上分布式布拉格反射镜 (DBR) 以实现偏振无关 VCSEL,但未研究波长可调谐。

本文提出利用偏振无关二维光栅 (PITDG) 代替 VCSEL 上反射镜,并利用微机械静电激励技术实现偏振无关波长可调谐 (PIWT) VCSEL。首先分析 PITDG 参数对光栅反射带宽的影响,将 PITDG 与 half-VCSEL (无上 DBR) 进行集成,形成 PIWT VCSEL,以研究较为合适的条件。

2 偏振无关二维光栅

图 1 所示为 PITDG 结构图,结构图自下而上分别是硅 (Si) 衬底、低折射率层 (SiO₂)、二维光栅层 (Si), Si 和 SiO₂ 的折射率分别为 $n_h = 3.48$ 和 $n_l = 1.45$, t_s 为 Si 衬底厚度, t_b 为低折射率层厚度, t_g 为光栅层厚度。为了保证二维光栅具有偏振无关的特性,需要使二维光栅在旋转 90° 后还是呈对称状态,故设定二维光栅在 x 、 y 方向的周期及宽度分别为 P 和 W ,且光栅周围均为空气。这里设 $t_s = 500$ nm, $t_b = 3000$ nm, $t_g = 500$ nm,入射光从光栅层垂直往

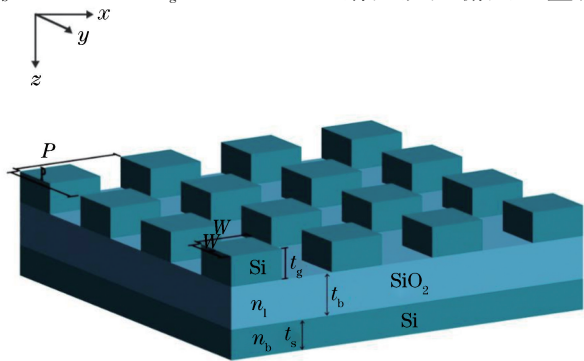


图 1 偏振无关二维光栅结构图

Fig. 1 Structural diagram of polarization-independent two-dimensional grating

下入射。

利用 EMT (Equivalent Medium Theory) 等效介质理论将光栅等效成一层薄膜,利用 EMT 将二维光栅等效成一层介质薄膜^[20]。EMT 二维光栅的等效折射率 N_{eff} 可以表示为

$$N_{\text{eff}}^4 = \frac{f_x \cdot N_{\text{TM}}^2 + (1 - f_x) \cdot n_h^2}{f_y \cdot N_{\text{TE}}^2 + (1 - f_y) \cdot n_h^2}, \quad (1)$$

式中: $f_x = W/P$ 和 $f_y = W/P$ 分别为二维光栅在 x 和 y 方向的占空比; N_{TE} 和 N_{TM} 分别为二维光栅对于 TE 和 TM 偏振的折射率。 N_{TE} 和 N_{TM} 分别满足

$$N_{\text{TE}}^2 = f_x \cdot n_l^2 + (1 - f_x) \cdot n_h^2, \quad (2)$$

$$N_{\text{TM}}^2 = f_y \cdot n_l^2 + (1 - f_y) \cdot n_h^2. \quad (3)$$

首先利用严格耦合波法 (RCWA) 分析了 PITDG 对于 TE 和 TM 偏振的反射率,结果如图 2(a) 所示,此时 $P = 700$ nm, $f_x = f_y = 0.5857$ 。从图 2(a) 中可以看到,TE 和 TM 偏振的反射率完全相同,体现该二维光栅的偏振无关特性, $R > 99\%$ 的反射带宽可以达到 210 nm。图 2(b) 是 35 对 DBR (AlGaAsSb/AlAsSb) 反射带宽与 PITDG 反射带宽的对比,从图中可以明显看出, PITDG 的反射带宽远大于 DBR 100 nm 的反射带宽,这使得以 PITDG 替代 VCSEL 上的 DBR 实现宽波长调谐范围 VCSEL 成为可能^[21]。 PITDG 的高反射是因为在入射波中有波长刚好符合 PITDG 导模的共振条件,该入射波长会与泄漏波导模相耦合,继而产生高反射,而 PITDG 具有高反射的宽反射带宽是由于入射波激起了多个泄漏模,且它们的共振波长相近。

利用 RCWA 分析光栅周期和占空比对 PITDG 反射率的影响,如图 3 所示。图 3(a) 是周期 $P = 700$ nm 时占空比对 PITDG 反射率的影响。通过分析可得:当 f_x 在 0.5839~0.66 范围内时, PITDG 反射带宽 ($R > 99\%$) 可以达到 210 nm;当 $f_x = 0.5839$ 时,高反射带宽范围为 1.40~1.61 μm ;当 $f_x = 0.668$ 时,高反射带宽范围为 1.44~1.65 μm 。此外,光栅宽度 W 存在 58.87 nm 的制造误差 [即 $W = (438.165 \pm 29.435)$ nm] 时, PITDG 可以保持 210 nm 的高反射带宽。

图 3(b) 是占空比 $f_x = 0.5857$ 时周期对 PITDG 反射率的影响。从图中可以看出,周期 P 存在 28 nm 的制造误差 [即 $P = (705 \pm 14)$ nm] 时,可以保证 PITDG 具有 210 nm 的反射带宽 ($R > 99\%$)。当 $P = 691$ nm 时,高反射带宽范围为 1.41~1.62 μm ;当 $P = 719$ nm 时,高反射带宽范围为

1.43~1.64 μm 。根据模拟结果,可在误差允许范围内制备 PITDG,目前 SiO_2 外延生长可以使用

PECVD 技术,而光栅格的形成可以利用电子束光刻和干法刻蚀工艺^[22]。

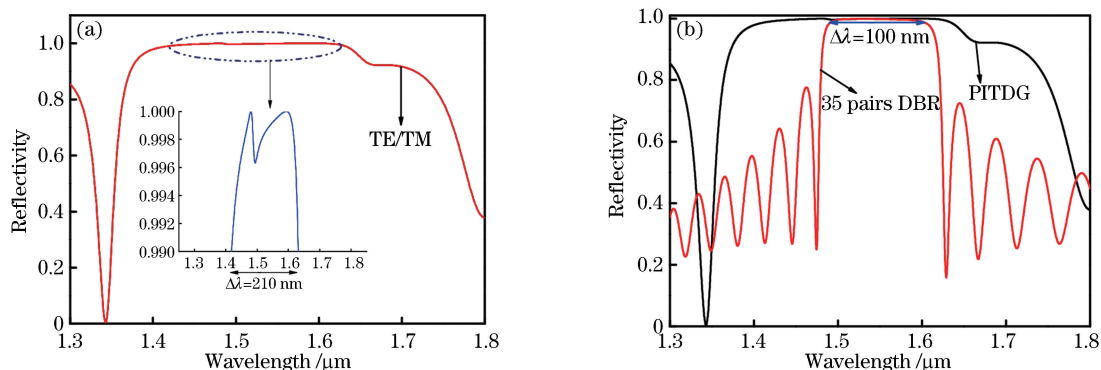


图 2 PITDG 和 DBR 的反射率。(a) PITDG 对不同偏振的反射率;(b) PITDG 与 DBR 的反射率对比
Fig. 2 Reflectivity of PITDG and DBR. (a) Reflectivity of PITDG under different polarizations;
(b) reflectivity comparison of PITDG and DBR

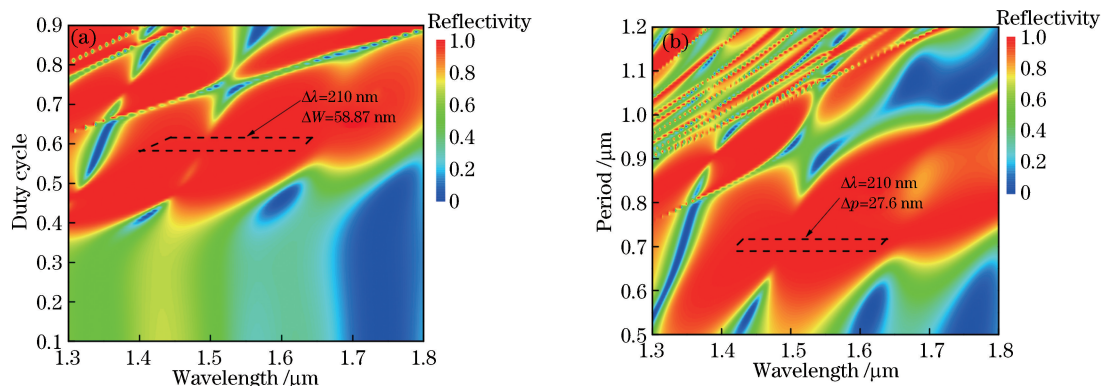


图 3 占空比和周期对 PITDG 反射率的影响。(a) 占空比;(b) 周期
Fig. 3 Effects of duty cycle and period on reflectivity of PITDG. (a) Duty cycle; (b) period

3 PIWT VCSEL 波长调谐范围

PITDG 具有高反射的宽反射带宽,因此它可以代替 VCSEL 的上 DBR 实现偏振无关宽波长调谐范围 VCSEL,具体结构如图 4 所示。在实验室中,可以使用阳极键合工艺^[23]集成 PITDG 与 half-VCSEL 以形成 PIWT VCSEL,该技术目前已成熟并广泛应用在 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 器件制造中。图 4 为 PIWT VCSEL 三维结构图,它由 InP 衬底、35 对 n 掺杂的下 DBR (下 DBR 由 AlGaAsSb/AlAsSb 交替生长而成,它们的厚度分别为波长的 1/4)、InP 延扩区、有源区 MQWS [Multiple quantum wells, 由 3 对量子阱 GaInAsP (7 nm)/AlGaInAs(10 nm)和包层 AlInAs 组成,量子阱增益在室温 $T=300\text{ K}$ 时的最大值刚好在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处,如图 5 所示]、湿法氧化形成的氧化限制层、2 对 p 掺杂的上 DBP、空气隙和 PITDG 组成。

PIWT VCSEL 实现波长调谐的原理是:在调谐

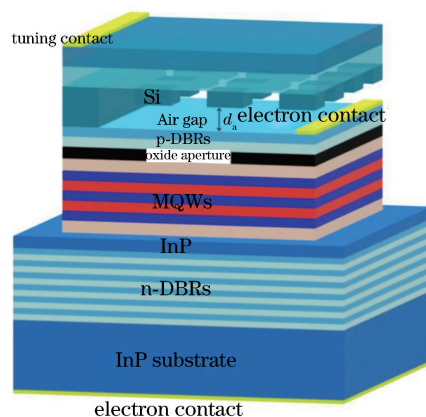


图 4 PIWT VCSEL 三维结构图

Fig. 4 Three-dimensional structure of PIWT VCSEL
电极添加电压,使 PITDG 与下电极产生电势差,从而在调谐电极和下电极之间形成平板电容,进而产生静电力。随着加在调谐电极上电压的增大,静电力增大,微机械悬臂梁弯曲,导致空气隙厚度 d_a 变窄,从而实现 VCSEL 的波长调谐。在 PIWT

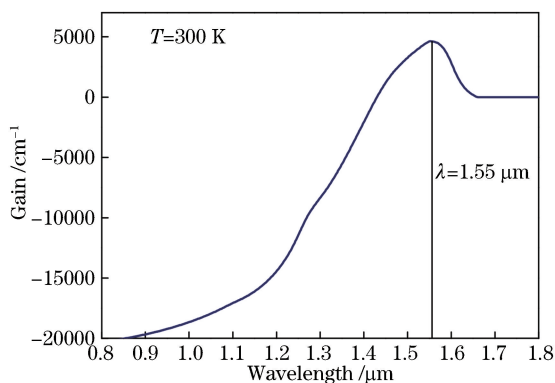


图 5 量子阱增益谱

Fig. 5 Gain spectrum of quantum well

VCSEL 波长调谐的模拟计算中,利用光学传输矩阵法^[24],先将 d_a 预先设置为 $2.158 \mu\text{m}$,然后逐渐减小 d_a ,以模拟因悬臂梁弯曲而使空气隙变窄的过程。

空气隙厚度 d_a 对 PIWT VCSEL 激光波长的影响如图 6 所示。从图 6 中可以看出,随着 d_a 的减少,PIWT VCSEL 激光波长先减小后突然变大,PIWT VCSEL 激光波长随着 d_a 的减小呈周期性变化,在每一个周期中 PIWT VCSEL 激光波长都有 93 nm 的变化幅度,由此可得 PIWT VCSEL 可以实现 93 nm 的波长调谐范围。

激光波长随 d_a 的减小呈周期性变化的表达式为

$$L_{\text{eff}} = \frac{\Delta\varphi_m}{2d\beta} = \frac{n_t n_b \lambda}{4n_c(n_t - n_b)}, \quad (4)$$

式中: $\Delta\varphi_m$ 为激光波长循环一周的相位; L_{eff} 为 PIWT VCSEL 的有效腔长, d 为 PIWT VCSEL 中某一层介质层的厚度; β 为波数; n_c 为有源区折射率; n_t 和 n_b 分别为 AlGaAsSb 和 AlAsSb 的折射率; λ 为激光波长^[25]。空气隙厚度 d_a 变窄,意味着 L_{eff} 减小,则激光波长 λ 下降;但是当 d_a 下降到一定厚度时,会使光在 PIWT VCSEL 谐振腔中传输相位的变化为 2π 的整数倍,则激光波长又会从 $1.49 \mu\text{m}$ 突变到 $1.583 \mu\text{m}$ 。

4 结 论

利用 RCWA 分析了光栅参数对 PITDG 反射率的影响,找出了最优的光栅参数范围,在最优光栅参数范围内 PITDG 具有 210 nm 的高反射 ($R > 99\%$) 带宽, W 和 P 的制造误差分别为 58.87 nm 和 28 nm。随后将 $P = 700 \text{ nm}$ 、 $f_x = f_y = 0.5857$ 的 PITDG 与 half-VCSEL 进行集成,形成 PIWT VCSEL,通过光学传输矩阵可得到中心波长为

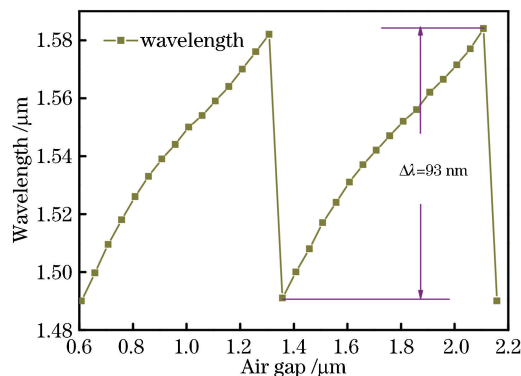


图 6 空气隙对激光波长的影响

Fig. 6 Effect of air gap on lasing wavelength

$1.55 \mu\text{m}$ 的 PIWT VCSEL 具有 93 nm 的波长调谐范围。

参 考 文 献

- [1] Al-Samaneh A, Bou Sanayeh M, Renz S, *et al.* Polarization control and dynamic properties of VCSELs for MEMS atomic clock applications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(15): 1049-1051.
- [2] Gruet F, Al-Samaneh A, Kroemer E, *et al.* Metrological characterization of custom-designed 8946 nm VCSELs for miniature atomic clocks [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5781-5792.
- [3] Parekh D, Zhang B, Zhao X X, *et al.* Long distance single-mode fiber transmission of multimode VCSELs by injection locking [J]. Optics Express, 2010, 18(20): 20552-20557.
- [4] Xie Y Y, Li J C, He C, *et al.* Long-distance multi-channel bidirectional chaos communication based on synchronized VCSELs subject to chaotic signal injection [J]. Optics Communications, 2016, 377: 1-9.
- [5] Ouvrard A, Garnac A, Cerutti L, *et al.* Single-frequency tunable Sb-based VCSELs emitting at $2.3 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(10): 2020-2022.
- [6] Zappe H P, Hess M, Moser M, *et al.* Narrowlinewidth vertical-cavity surface-emitting lasers for oxygen detection [J]. Applied Optics, 2000, 39(15): 2475-2479.
- [7] Xie Y Y, Kan Q, Xu C, *et al.* Single fundamental mode photonic crystal VCSEL with high power and low threshold current optimized by modal loss analysis [J]. Chinese Physics B, 2017, 26(1): 014203.
- [8] Chung I S. Study on differences between high contrast grating reflectors for TM and TE

- polarizations and their impact on VCSEL designs[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 16730-16739.
- [9] Zhang X W, Ning Y Q, Qin L, *et al.* Study of oxide-grating vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(11): 1517-1520.
张祥伟, 宁永强, 秦莉, 等. 氧化光栅型垂直腔面发射激光器的研究[J]. *发光学报*, 2013, 34(11): 1517-1520.
- [10] Berseth C A, Dwir B, Utke I, *et al.* Control of VCSEL polarization in arbitrary direction using metal gratings made by electron beam lithography [C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics (IEEE Cat. No. 99CH37013)*, May 28-28, 1999, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE, 1999: 483.
- [11] Onishi T, Tanigawa T, Ueda T, *et al.* Polarization control of vertical-cavity surface-emitting lasers by utilizing surface plasmon resonance[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, 43(12): 1123-1128.
- [12] Panajotov K, Dems M, Belmonte C, *et al.* VCSELs with nematic and cholesteric liquid crystal overlays [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8639: 86390A.
- [13] Wang H Y, Cheng Z, Zhao X X, *et al.* Polarization controlling of vertical cavity surface emitting laser with cholesteric liquid crystal overlay [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 111402.
王红英, 成桢, 赵小侠, 等. 表面涂覆胆固醇液晶-垂直腔面发射激光器的偏振特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 111402.
- [14] Xie Y, Beeckman J, Panajotov K, *et al.* Vertical-cavity surface-emitting laser with a chiral nematic liquid crystal overlay [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(1): 1500010.
- [15] Ikeda K, Takeuchi K, Takayose K, *et al.* Polarization-independent high-index contrast grating and its fabrication tolerances [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 1049-1053.
- [16] Katayama T, Ito J, Kawaguchi H. Polarization-dependent coupling between a polarization-independent high-index-contrast subwavelength grating and waveguides [J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(7): 072703.
- [17] Albert J, Soriano M C, Veretennicoff I, *et al.* Laser Doppler velocimetry with polarization-bistable VCSELs [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 1006-1012.
- [18] Dyomina I O, Dyomin A A, Sukhoivanov I A, *et al.* Polarization-independent microcavity with two phase layers [C]// *2006 International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling*, June 29-July 1, 2006, Kharkiv, Ukraine. New York: IEEE, 2006: 497-498.
- [19] Tsunemi Y, Yokota N, Majima S, *et al.* 1.55- μm VCSEL with polarization-independent HCG mirror on SOI [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28685-28692.
- [20] Jahns J J, Wyrowski F. *Diffractive optics for industrial and commercial applications* [M]. Berlin, Germany: Akademie Verlag, 1997: 15-20.
- [21] Qiao P F, Li K, Cook K T, *et al.* MEMS-tunable VCSELs using 2D high-contrast gratings [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 823-826.
- [22] Bekele D A, Park G C, Malureanu R, *et al.* Polarization-independent wideband high-index-contrast grating mirror [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1733-1736.
- [23] Zimin Y, Ueda T. Low-temperature anodic bonding of silicon and crystal quartz wafers for MEMS application [C]// *Sensors, 2010 IEEE*, November 1-4, 2010, Kona, HI, USA. New York: IEEE, 2010: 269-272.
- [24] Qiao P F, Su G L, Rao Y, *et al.* Comprehensive model of 1550 nm MEMS-tunable high-contrast-grating VCSELs [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8541-8555.
- [25] Guan B L, Guo X, Yang H, *et al.* Investigation and design of widely tunable vertical-cavity surface emitting lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(8): 4585-4589.
关宝璐, 郭霞, 杨浩, 等. 宽调谐范围垂直腔面发射激光器特性分析及设计 [J]. *物理学报*, 2007, 56(8): 4585-4589.