

# 亚波长光栅调制的偏振稳定垂直腔面发射激光器研究\*

李硕 关宝璐 史国柱 郭霞<sup>†</sup>

(北京工业大学, 新型光子器件实验室, 北京 100124)

(2012年2月5日收到; 2012年3月13日收到修改稿)

基于微光学技术设计得到了偏振稳定垂直腔面发射激光器结构, 将亚波长光栅结构集成在上分布布拉格反射镜表面, 光栅周期小于材料中光波长, 透射波和反射波中仅包含零级衍射, 避免了高级次衍射造成的损耗. 集成光栅后不同偏振方向光阈值增益不同, 从而实现偏振控制. 实验结果显示, 集成亚波长光栅结构后, 整个激射过程中偏振方向被固定在平行于光栅槽方向上, 获得偏振稳定激光输出, 正交偏振抑制比大于 12 dB, 且阈值电流仅增大 7.14%.

**关键词:** 垂直腔面发射激光器, 亚波长光栅, 偏振稳定

**PACS:** 42.55.Px, 42.25.ja, 42.60.Lh

## 1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 凭借低阈值电流、单色性好、高调制带宽、集成度高和易与光纤耦合等优点, 在激光打印、自由空间光互联、光存储和光通信等诸多领域有着重要应用<sup>[1]</sup>. 然而, 常规 VCSEL 由于采用圆柱对称波导结构, 且有源区各向异性较弱, 因此缺乏有效的偏振控制机制. 沿 GaAs 或 InP 衬底 (100) 面外延的常规 VCSEL 具有两个正交偏振基态, 其电场分别沿 [110] 和 [1 $\bar{1}$ 0] 方向偏振随温度、注入电流和光反馈变化, 偏振方向将在这两个方向上发生转换. 受电光效应影响, 偏振跳变还会伴随约 0.1 nm 的微小波长变化<sup>[2]</sup>. 偏振转换现象将对一些偏振敏感应用产生不良影响. 例如, 数据通信中导致信噪比的下降和误码率的上升<sup>[3]</sup>, 在激光倍频中因相位失配而导致倍频效率降低<sup>[4]</sup>. 具有偏振稳定光输出的 VCSEL 将在光通信系统、集成原子钟、激光倍频、气体探测和光谱分析等领域有着重要应用<sup>[5,6]</sup>.

为使 VCSEL 获得偏振稳定光输出, 人们采用

包括光子晶体、非对称氧化孔径、非对称电流注入、非 (100) 面外延和表面光栅等方法<sup>[7-10]</sup>, 有效的实现了 VCSEL 偏振稳定光输出. 其中表面光栅技术与现有工艺兼容, 偏振稳定性好, 且可单片集成, 成为近几年研究的热点. 通常引入的光栅结构周期小于真空中光波长, 但大于材料中光波长. 反射波中包含高级次衍射, 导致衍射损耗增大, 阈值电流比引入光栅前增大 40% 以上<sup>[10,11]</sup>.

本文采用新型亚波长光栅偏振稳定垂直腔面发射激光器结构, 将亚波长光栅 (SWG) 集成在上分布布拉格反射镜 (DBR) 表面, 光栅周期小于材料中光波长. 透射波和反射波中仅包含零级衍射, 有效避免了高级次衍射造成的损耗. 集成 SWG 后的上反射镜对两个正交偏振态光波有不同反射率. 由于 VCSEL 阈值增益对反射率变化极为敏感, 导致两个偏振态有大阈值增益差, 具有较大阈值增益的偏振态受到抑制, 从而实现偏振控制. 实验结果显示, 集成 SWG 后, 整个激射过程中偏振稳定, 正交偏振抑制比 (OPSR) 大于 12 dB, 且阈值电流仅增大 7.14%. 所设计的基于亚波长光栅结构的偏振稳定 VCSEL 具有结构简单、可单片集成和损耗小等

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB604902) 和国家自然科学基金 (批准号: 60908012) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: guo@bjut.edu.cn

特点. 为实现高功率、低阈值、偏振稳定的下一代高效率 VCSEL 半导体发光光源提供了很好的理论和实验基础.

## 2 器件结构与制备

表面亚波长光栅 VCSELs 整体结构如图 1 所示, 器件外延结构是利用金属有机化学气相沉积设备 (MOCVD) 在 n 型 GaAs 衬底上生长得到, 衬底上生长了 36 对  $\lambda/4$  厚度的  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  下 DBR. 再向上是光学厚度为  $1\lambda$  的有源区, 包括 3 个  $\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$  (6 nm)/ $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}$  (4 nm) 应变量子阱和  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  过渡层, 之后是 30 nm 的  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  用作氧化限制层, 24.5 对厚度  $\lambda/4$  的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  构成的上 DBR. 最外层薄膜重掺杂作为欧姆接触层. 设计激光波长为 980 nm. 器件制备整体过程如下: 首先用电感耦合等离子体刻蚀 (ICP) 技术刻蚀出直径  $60\ \mu\text{m}$  的圆形台阶, 直至氧化限制层侧边暴露. 然后, 在  $430\ ^\circ\text{C}$ 、湿氮环境中进行横向氧化, 得到直径  $5\ \mu\text{m}$  的氧化孔径, 实现对光和电流的限制. 再淀积  $\text{SiO}_2$  和涂覆聚酰亚胺来防止漏电, 并使台阶间缝隙平整化. 溅射 350 nm Ti/Au 作为正面电极和 300 nm Au/Ge/Ni/Au 作为背面电极, 在  $430\ ^\circ\text{C}$  下 35 s 进行快速退火处理. 接下来采用电子束光刻 (E-Beam) 技术在 VCSEL 表面光刻出 SWG 图形, SWG 完全覆盖氧化孔径. 最后采用 ICP 技术刻蚀出矩形亚波长表面光栅, 光栅沿 [110] 晶向放置. 光栅周期为  $T = 200\ \text{nm}$ , 槽深为  $h = 110\ \text{nm}$ , 光栅脊为  $d = 140\ \text{nm}$ , 占空比  $f = d/T = 0.7$ . 为方便说明, 规定电场偏振方向垂直于光栅槽为 TM 波, 平行于光栅槽为 TE 波.

本文采用的光栅结构周期小于材料中光波长, 高衍射级次成为倏逝波<sup>[12]</sup>, 上反射镜反射波和透射波中仅包含零级衍射, 可等效视为具有双折射效应的薄膜, 因此避免了高级次衍射造成的损耗. 有研究表明, 光栅周期越小, TE 和 TM 波有效折射率差越大<sup>[13]</sup>. 本文中光栅由  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  材料组成, 对应波长 980 nm 时折射率为 3.512. 根据光栅方程, 垂直入射条件下光栅周期小于 280 nm 时, 高衍射级次消失. 考虑实际工艺水平, 我们将周期固定为 200 nm. 为进一步掌握亚波长光栅对 VCSEL 的

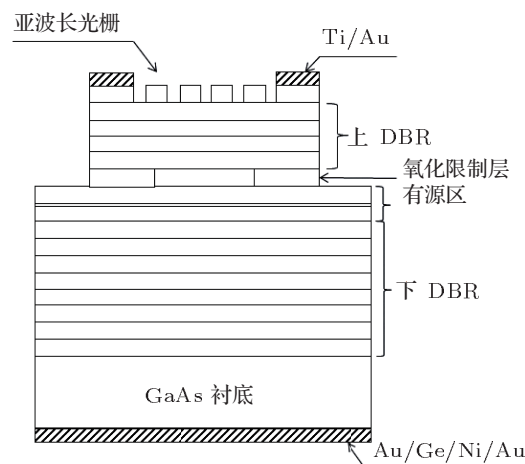


图 1 亚波长光栅 VCSEL 结构示意图

调制作用, 本文对集成 SWG 结构后 VCSEL 上反射镜反射率、腔模位置和阈值增益进行了研究. 由于设计的结构中所用光栅的周期小于材料中光波长, 传统标量衍射方法无法准确描述光栅的衍射行为. 本文采用严格耦合波理论和增强透射矩阵法<sup>[14]</sup>模拟多层膜系集成光栅后的反射行为. 反射镜的第  $m$  级反射衍射效率为

$$\begin{cases} \eta_{rm}(\text{TE}) = |R_m(\text{TE})|^2 \text{Re} \left( \frac{k_{1,zm}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right), \\ \eta_{rm}(\text{TM}) = |R_m(\text{TM})|^2 \text{Re} \left( \frac{k_{1,zm}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right), \end{cases} \quad (1)$$

式中  $m$  是第  $m$  级反射衍射系数,  $k_{1,zm}$  是入射介质中的  $z$  方向光波矢,  $k_0$  是真空中光波矢,  $n_1$  是入射介质折射率,  $\theta$  是入射角. 模拟计算中根据亚波长光栅 VCSEL 器件实际情况, 假设光波从有源区垂直入射上反射镜, 仅包含零级衍射.

图 2 给出了上反射镜对 TE 和 TM 波反射率随光栅槽深和占空比变化关系, 图中用颜色变化表示反射率的变化. 当  $h = 0$ , 即未刻蚀光栅时, 上反射镜为高低折射率  $\lambda/4$  厚度薄膜周期堆叠而成的 DBR 结构. 入射光和反射光相位满足相长干涉条件, 产生高反射, TE 和 TM 波反射率均为 99.54%. 当  $f = 0$ ,  $h = 71\ \text{nm}$  时, 顶层的  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  层厚度降至 0 nm, 露出  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  层, 此时入射光和反射光反相相消干涉, 反射率出现极小值. 集成 SWG 后情况与之类似, 光栅破坏了 DBR 的周期性结构, 导致反射率比未刻蚀光栅时总体有所下降, 并随顶层相位波动变化, 顶层相位和反射相位反相时出现极小值. 根据电磁场边界条件, TE 和 TM

波具有不同反射相位, 因此反射率出现差异. 比较图 2(a), (b), 可以清楚地看到占空比在 0.6—0.8 范

围内, TE 波和 TM 波反射率差相对较大. 在此范围内选取占空比, 有利于获得更好的偏振控制效果.

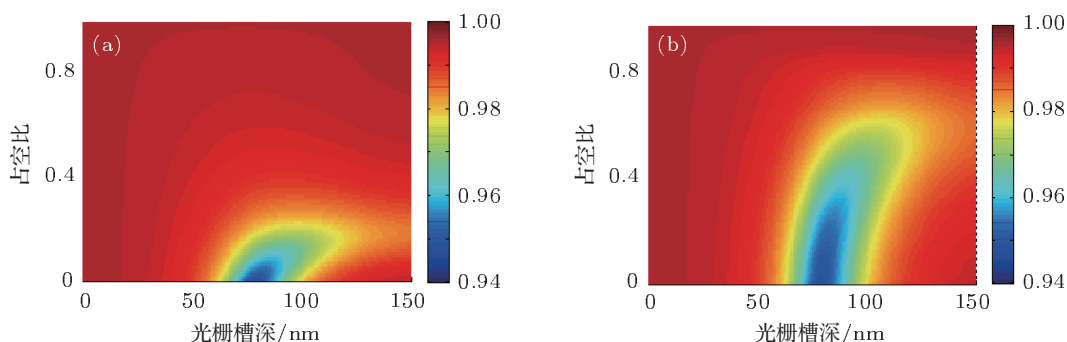


图 2 上反射镜反射率 (a) TE 波; (b) TM 波

图 3 是 TE 和 TM 波腔模位置随光栅槽深和占空比的变化关系. 集成 SWG 后, TE 和 TM 波腔模位置出现微小差异. 这是由于反射相位变化, 造成上反射镜穿透深度变化, 即

$$L_{\text{eff}} = -\frac{1}{2} \frac{d\varphi_r}{d\beta}, \quad (2)$$

其中  $\varphi_r$  是反射相位,  $\beta$  是波矢量. VCSEL 有效腔长为有源区长度和上、下反射镜穿透深度之和. 因此 VCSEL 有效腔长也随反射相位而增大或减小, 导致腔模位置蓝移或红移. TE 和 TM 波谐振波长差异, 将导致其对应增益谱位置变化, 即两个偏振模式获得增益不同, 从而对最终偏振状态产生影响.

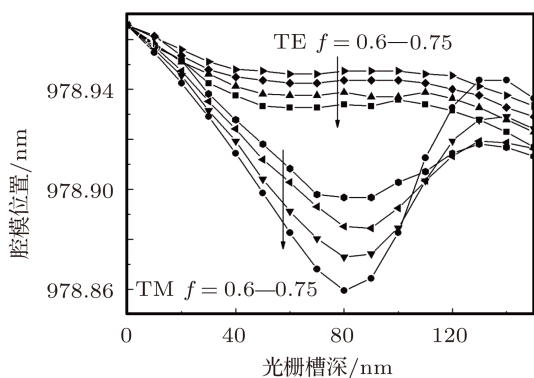


图 3 腔模位置随光栅槽深和占空比的变化关系

为实现激光震荡, 激光器有源区需提供阈值增益:

$$\begin{cases} g_{\text{th}}(\text{TE}) = \alpha_a + \frac{1}{\Gamma_r d_a} \left[ \alpha_i (L_{\text{eff}}(\text{TE}) - d_a) + \ln \frac{1}{\sqrt{R_t(\text{TE}) R_b(\text{TE})}} \right], \\ g_{\text{th}}(\text{TM}) = \alpha_a + \frac{1}{\Gamma_r d_a} \left[ \alpha_i (L_{\text{eff}}(\text{TM}) - d_a) + \ln \frac{1}{\sqrt{R_t(\text{TM}) R_b(\text{TM})}} \right]. \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\alpha_i$  是谐振腔中包括俄歇复合、吸收、衍射和散射在内的总损耗,  $\alpha_a$  是有源区总损耗,  $\Gamma_r$  是光场限制因子,  $R_t$  和  $R_b$  是上下反射镜反射率.  $L_{\text{eff}}$  是将 VCSEL 等效成 F-P 腔结构的有效腔长,  $d_a$  表示有源区长度. 由于 VCSEL 有源区长度极短,  $R_t$  和  $R_b$  微小的改变都会使总阈值增益剧烈变化. 集

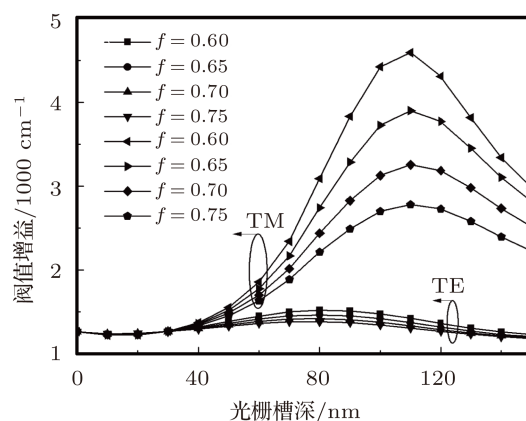


图 4 阈值增益随光栅的变化关系

图 4 是 VCSEL 阈值增益随光栅的变化关系.

成光栅后,腔模位置和反射率都发生不同程度变化,其中反射率变化起主要作用.集成光栅后,TE波阈值增益明显大于TM波,因此TM波在偏振模式竞争中被抑制.相同槽深条件下,TE和TM波阈值增益随占空比增大而增大,但其阈值增益差随占空比增大而减小.选择小占空比,可以有更大阈值增益差,更易实现偏振控制.而选择大占空比,阈值增益更小,可有效降低阈值电流.可见存在一个最优占空比,在满足偏振控制同时,阈值增益最小.

### 3 测试结果与分析

图5显示了VCSEL器件显微镜照片及光栅区域SEM照片.虚线框中区域刻蚀了表面亚波长光栅,将氧化孔径完全覆盖.图5右侧为光栅区域SEM照片,放大50000倍.图6给出了同一样品集成光栅前后偏振相关功率-电流-电压( $P-I-V$ )特性曲线,样品氧化限制孔径 $5\ \mu\text{m}$ .图6(a)中,样品在室温连续电流注入下实现激射,阈值电流 $0.21\ \text{mA}$ ,峰值光功率 $1.36\ \text{mW}$ .达到阈值后,基横模以TE偏振态激射,TM波光功率主要由自发辐射贡献.随着注入电流不断增大,中心区域载流子因基模激射而消耗较大,出

现低载流子密度的烧孔区域.注入电流达 $4\ \text{mA}$ 时,第一个高阶模获得较高增益满足阈值条件开始激射,且偏振方向垂直于基模.因此出现偏振功率跳变.图6(b)中,样品集成了SWG,光栅周期 $200\ \text{nm}$ ,占空比 $0.7$ ,槽深 $110\ \text{nm}$ .室温连续电流注入下实现激射,阈值电流 $0.225\ \text{mA}$ ,峰值光功率 $1.77\ \text{mW}$ .从激光开始激射,到光功率达到峰值,整个激射过程中偏振状态被固定为TE波,TM波光功率主要由自发辐射贡献.定义正交偏振抑制比 $\text{OPSR} = 10 \cdot \log(P_{\text{TE}}/P_{\text{TM}})$ ,集成光栅后OPSR超过 $12\ \text{dB}$ .据图4中模拟结果,该器件集成光栅后TM模阈值增益是TE模的 $2.43$ 倍.同TE模相比,TM模需要更大增益才可激射.但两个偏振模式谐振波长差小于 $0.1\ \text{nm}$ ,获得的增益基本相同.因此TM模被抑制,TE模激射.比较图6(a),(b),刻蚀光栅后,反射率下降,使微分量子效率提高,因此峰值光功率提高 $30.15\%$ .由于反射率下降,造成镜面损耗增大,同时刻蚀光栅时侧壁非完美光滑平面,散射损耗增大.但因避免了高级次衍射造成的损耗,故阈值电流仅增大 $7.14\%$ .由于光栅槽深仅 $110\ \text{nm}$ ,且刻蚀在表面,对有源区电流分布影响极小,刻蚀前后 $I-V$ 特性曲线基本重合,串联电阻并未增大.

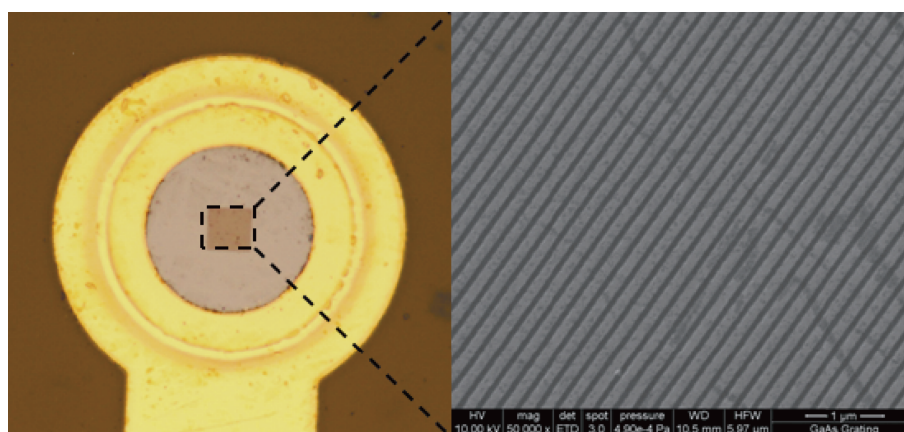


图5 VCSEL显微镜及SEM照片

图7为室温下测量得到的VCSEL输出光谱特性曲线.可以看出,峰值波长为 $980\ \text{nm}$ ,光谱半峰宽为 $1.6\ \text{nm}$ ,呈单纵模激射,表现出良好的激射特性.除电流变化外,温度变化也会导致偏振跳变.图8显示了 $15\ ^\circ\text{C}$ — $75\ ^\circ\text{C}$ 温度范围内,连续电流

注入条件下偏振相关 $P-I-V$ 特性.在该温度范围内VCSEL保持偏振稳定,OPSR均大于 $12\ \text{dB}$ .阈值电流在随温度增大先减小再增大, $35\ ^\circ\text{C}$ 时腔模和增益峰匹配,达到最小值.由于各层材料折射率和热膨胀系数随温度变化,导致激射波长随温度增加

红移. 激光波长的红移速率约为 0.06—0.08 nm/K, 15 °C—75 °C 将红移约 4 nm. 该波长范围内, TE 波和 TM 波反射率差始终大于 1.5%, 在整个红移过程中 TM 模都因有更大的阈值增益而被抑制, 保证了 VCSEL 实现偏振稳定输出.

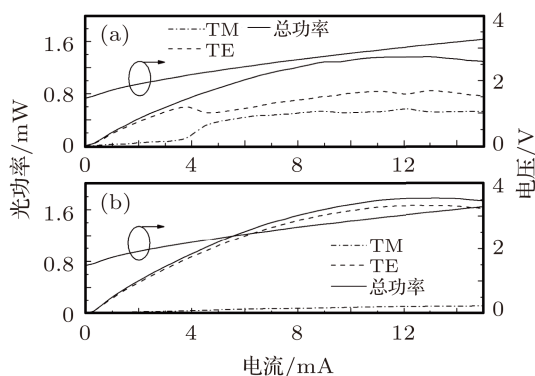


图 6 VCSEL 偏振相关  $P-I-V$  特性曲线 (a) 集成光栅前; (b) 集成光栅后

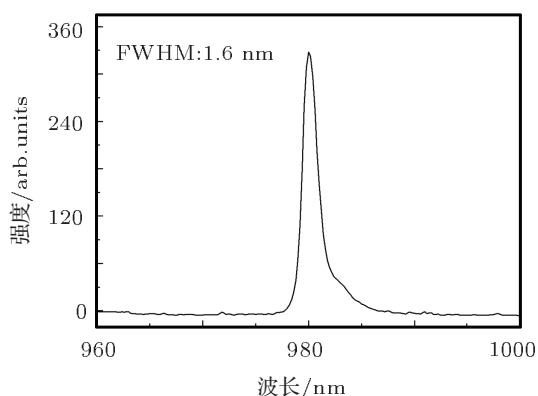


图 7 VCSEL 光谱特性曲线

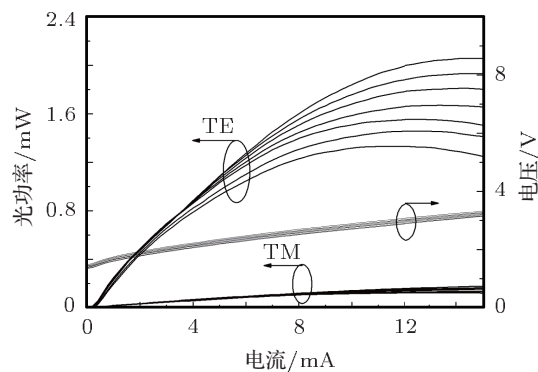


图 8 15 °C—75 °C 范围内 VCSEL 偏振相关  $P-I-V$  特性曲线

## 4 结论

本文将微光学技术和 VCSEL 激光器相结合, 利用先进半导体微细加工工艺制备了亚波长光栅调制的偏振稳定 VCSEL 器件. 所设计的光栅周期小于材料中光波长, 高衍射级次消失, 避免高衍射级次造成损耗. 通过对 SWG 调制作用的讨论, 可知优化占空比可以进一步降低阈值增益. 实验结果显示, 整个激励过程中, 偏振被固定在平行于光栅槽方向上, 获得偏振稳定激光输出. OPSR 大于 12 dB, 且阈值电流仅增大 7.14%. 所设计的基于亚波长光栅的偏振稳定 VCSEL 具有结构简单、与现有工艺兼容、引入损耗小、偏振稳定性好等特点. 为实现高功率、偏振稳定可控制的下一代高效率 VCSEL 半导体发光光源提供了良好的实验和理论基础.

- [1] Yang H, Guo X, Guan B L, Wang T X, Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **57** 2959 (in Chinese) [杨浩, 郭霞, 关宝璐, 王同喜, 沈光地 2007 物理学报 **57** 2959]
- [2] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [3] Tayahi M B, Lanka S, Wang J, Catsten J, Hofmann L, Sukanta S 2006 *Proc. of SPIE* **6132** 61320B
- [4] Ma Y, Wang C, Miao T Q 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 253 (in Chinese) [马莹, 王成, 缪同群 2005 光学精密工程 **13** 253]
- [5] Michalzik R, Ostermann J M, Al-Samaneh A, Wahl D, Rinaldi F, Debernardi P 2009 *14th Optoelectronics and Communications Conference Hong Kong July 13–17, 2009* 1
- [6] Samaneh A A, Sanayeh M B, Renz S, Wahl D, Michalzik R 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1049
- [7] Yan Z, Lin C H, Coldren L A 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 305
- [8] Chua C L, Thornton R L, Treat D W, Donaldson R M 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1631
- [9] Boutami S, Benbakir B, Leclercq J L, Viktorovitch P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 1105
- [10] Ostermann J M, Debernardi P, Jalics C, Kroner A, Riedl M C, Michalzik R 2005 *Opt. Commun.* **246** 511
- [11] Ostermann J M, Debernardi P, Jalics C, Kroner A, Feneberg M, Riedl M C, Michalzik R 2004 *Proc. of SPIE* **5364** 201
- [12] Santos J M, Bernardo L M 1997 *Appl. Opt.* **36** 8935
- [13] Gustavsson J S, Haglund Å, Vukušić J A, Bengtsson J, Jedrasik P, Larsson A 2005 *Opt. Express* **13** 6626
- [14] Moharam M G, Pommet Drew A, Grann Eric B 1995 *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 1077

# Polarization stable vertical-cavity surface-emitting laser with surface sub-wavelength gratings\*

Li Shuo Guan Bao-Lu Shi Guo-Zhu Guo Xia<sup>†</sup>

(*Photonic Device Research Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

(Received 5 February 2012; revised manuscript received 13 March 2012)

## Abstract

By introducing sub-wavelength grating into an oxide-confined 980-nm vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL), the VCSEL with a stable polarization is realized. A sub-wavelength zero-order grating period is smaller than the wavelength in the semiconductor medium. This choice avoids a reduction in efficiency due to higher diffracting light. After the grating is etched, the threshold gains of E-fields parallel and perpendicular to the grating grooves direction are different. The polarization therefore would be controlled. Good laser characteristics are obtained: the orthogonal polarization suppression ratio is over 12 dB and the threshold current increases just 7.14%.

**Keywords:** vertical-cavity surface-emitting laser, sub-wavelength gratings, polarization stability

**PACS:** 42.55.Px, 42.25.ja, 42.60.Lh

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB604902), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60908012).

<sup>†</sup> E-mail: guo@bjut.edu.cn