

# GaSb 基垂直腔面发射激光器 P 面反射镜优化设计

郝永芹<sup>1\*</sup>, 岳光礼<sup>1</sup>, 邹永刚<sup>1</sup>, 王作斌<sup>2</sup>, 晏长岭<sup>1</sup>, 马晓辉<sup>1\*</sup>

(1. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;  
2. 长春理工大学 科技部国家纳米操纵与制造国际联合研究中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对当前 2.0  $\mu\text{m}$  GaSb 基垂直腔面发射激光器发展中由于传统的 P 面分布布拉格反射镜(P-DBRs)带来的高电阻和严重光吸收这一瓶颈问题, 采用严格耦合波方法仿真设计了含高对比度亚波长光栅(HCG)的 P 面反射镜. 实验结果表明, 这种制备工艺简单的反射镜在 2.0  $\mu\text{m}$  中心波长附近, TM 波入射时反射率超过 99.5% 的高反射带宽为 278 nm, 反射率 99.9% 以上的高反射带宽达到 148 nm, 完全能够满足 VCSEL 对谐振腔镜的要求, 且能有效避免因异质外延等造成反射镜衍射特性劣化等问题.

**关键词:** 垂直腔面发射激光器; 碲化镓; 分布布拉格反射镜; 高对比度亚波长光栅

**中图分类号:** O472+.8 **文献标识码:** A

## Optimal design of P-side mirror for GaSb based vertical cavity surface emitting laser

HAO Yong-Qin<sup>1\*</sup>, YUE Guang-Li<sup>1</sup>, ZOU Yong-Gang<sup>1</sup>, WANG Zuo-Bin<sup>2</sup>, YAN Chang-Ling<sup>1</sup>, MA Xiao-Hui<sup>1\*</sup>

(1. National Key Laboratory of High-Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;  
2. International Joint Research Centre for Nano Handling and Manufacturing, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The high resistance and severe optical absorption brought by the traditional P-side distributed Bragg reflectors (P-DBRs) have been the bottleneck of the development of 2.0  $\mu\text{m}$  GaSb based vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs). For this reason, a P-side mirror with high contrast sub-wavelength grating (HCG) is designed and simulated by the rigorous coupled wave analysis method. The testing results show the HCG mirror, easy to make, has 278 nm bandwidth with reflectivity more than 99.5% and 148 nm bandwidth with reflectivity greater than 99.9% around the central wavelength of 2.0  $\mu\text{m}$  for TM mode. Such a mirror can fully meet the requirements of VCSELs, and can effectively avoid the problem of diffraction characteristics deterioration caused by heteroepitaxy and so on.

**Key words:** vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), gallium antimonide (GaSb), distributed Bragg reflectors (DBRs), high contrast subwavelength grating (HCG)

**PACS:** 07.10.Cm, 42.55.Px, 42.62.Fi

### 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有功耗低、发散角小、无像散圆形光斑、高调制带宽、波长稳定性好、低制作成本、可实现超小型的高密度二维集成等

优点,近年来取得快速发展,并在光通信、光互联等领域得到广泛应用.尤其是近期以 VCSEL 作为 3D 摄像和微型投影光源在智能手机和 AR 眼镜中的应用,VCSEL 更是受到全球的关注,各研究机构如 Finsar、Philips Photonics、II-VI、IQE 等纷纷加大 VC-

收稿日期:2018-09-20,修回日期:2018-12-20

Received date: 2018-09-20, revised date: 2018-12-20

基金项目:国家自然科学基金(11474038,61376045,11474036),吉林省科技发展计划项目(20180519018JH,20160101254JC),国家“111”计划(D17017)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11474038,61376045,11474036), Science and Technology Development Plan of Jilin Province of China (20180519018JH,20160101254JC), the “111” Project of China (D17017)

作者简介(Biography): 郝永芹(1972-),女,黑龙江铁力人,研究员,博士学位,主要研究领域为半导体光电子材料与器件.

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: hyq72081220@aliyun.com & mxh@cust.edu.cn

SEL 的研究投入,以期获得性能更优异的器件,满足快速增长的市场需求,国内北京半导体所、长春光机所等科研单位也在积极开展 VCSEL 相关研究工作<sup>[1-5]</sup>.

降低功耗是改善 VCSEL 性能最关键的环节. VCSEL 主要由 P、N 面的反射镜及夹在其间的量子阱有源区构成,由于有源区增益长度很短( $< 100$  nm),所以要求反射镜的反射率很高( $> 99.5\%$ )才能实现足够的光增益,因此 P、N 面的反射镜通常采用 20~40 对四分之一波长厚的高低折射率材料交替生长而成.而空穴的有效质量、迁移率等本征因素决定了 P-DBRs 的焦耳热和光吸收是器件功耗的最重要因素之一<sup>[6]</sup>.尤其对于长波长电泵浦 VCSEL 来说,P-DBRs 的高电阻特性和严重的光吸收更是制约其发展的主要瓶颈,目前长波长器件大多采用带隧道结的双 n 型 DBRs 反射镜结构<sup>[7-8]</sup>,可以有效降低电阻和光吸收.

1998 年,法国蒙彼利埃大学的 Baranov, A. N. 等研制出室温脉冲工作的电泵浦  $2.2 \mu\text{m}$  GaSb 基 VCSEL,阈值电流密度达  $2 \text{ kA}/\text{cm}^2$  以上<sup>[9]</sup>,但由于顶部 P-DBRs 的高功耗导致器件在近 10 年的时间里无法实现电泵浦器件的室温连续激光.直到 2006 年,德国学者研制出 GaSb 衬底上具有低电阻特性的 InAsSb(n++)/GaSb(p++)隧道结<sup>[10]</sup>,得益于此,电泵浦 GaSb 基 VCSEL 的研究取得了突破性进展.2008 年,德国慕尼黑工业大学的科研人员采用了结合隧道结的双 n 型 DBRs 反射镜结构,研制出首支室温连续工作的电泵浦 GaSb 基 VCSEL,波长  $2.3 \mu\text{m}$ ,功率  $87 \mu\text{W}$ <sup>[11]</sup>.但随着 VCSEL 波长的进一步拓展,器件仍表现了非常大的阈值电流密度,难以实现室温激光<sup>[12]</sup>.这是因为随着更长的激光波长,DBRs 的厚度越来越大,则由此产生的热和光吸收等物理问题及生长技术上的难度(如要求层厚的控制和掺杂剂的分布更精确)仍是制约器件发展的核心要素.

采用微纳结构高对比度亚波长光栅(HCG)取代传统的 P-DBRs,可有效降低 VCSEL 的电阻和光吸收.2007 年美国加州大学伯克利分校的 MICHAEL C. Y. HUANG 等首次验证了 HCG 可以替代 P-DBRs 应用于  $850 \text{ nm}$  VCSEL 中<sup>[13]</sup>,而后陆续报道了 HCG 成功应用于  $980 \text{ nm}$ 、 $1550 \text{ nm}$  VCSEL 的研究结果<sup>[14-15]</sup>,不过,其在  $2.0 \mu\text{m}$  波段 GaSb-VCSEL 上的应用尚未实现.2013 年 9 月,法国 Y. Laaroussi 等曾报道了他们制备的第一支集成 HCG 电泵浦  $2.0$

$\mu\text{m}$  波段 GaSb-VCSEL 的研究结果,器件室温脉冲条件下实现了电致发光,波长  $2.235 \mu\text{m}$ .但可惜的是,器件未实现激光的激光.其中最主要的原因在于集成在 VCSEL 上的 HCG 反射镜在谐振波长处的反射率只有  $97.8\%$ <sup>[16]</sup>,无法满足 VCSEL 的激光条件,因此 HCG 反射镜的设计和制备至关重要.2009 年,国内国防科技大学的郭楚才等人采用 FDTD 方法研究了亚波长光栅的反射特性,并通过电子束直写以及反应离子刻蚀等方法在硅片上制备具有较高反射率的亚波长光栅反射镜<sup>[17]</sup>.2012 年,北京工业大学报道了利用亚波长光栅对 VCSEL 偏振特性进行调制<sup>[18]</sup>.2015 年,哈尔滨工业大学报道了一种亚波长介质光栅波导结构,模拟结果显示它可以在大于  $40^\circ$  的入射范围内使目标波长的反射率  $R > 99\%$ <sup>[19]</sup>.2015 年长春光学精密机械与物理研究所报道了利用有限元分析软件模拟了高对比度光栅参数对反射率的影响<sup>[20]</sup>.

本文在深入研究 HCG 与 GaSb 基 VCSEL 集成中的实际物理问题和关键技术的基础上,采用严格耦合波方法对 HCG 反射镜进行优化设计,制备了 GaSb 衬底上的高反射率宽带 HCG 反射镜,这对于实现 HCG 与 GaSb 基 VCSEL 的集成,消除后期制作工艺及异质材料界面等因素产生的 HCG 衍射特性的劣化具有重要意义.

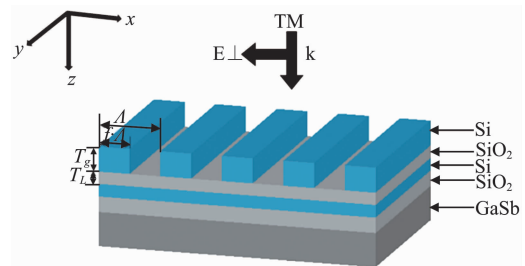


图 1 HCG 结构示意图  
Fig. 1 Scheme of the HCG

## 1 物理模型

微纳结构 HCG 的光栅周期小于入射光波长,只存在零级衍射波,且因光栅与周围介质大的折射率差从而容易形成具有高反射带宽的反射镜.但在材料选择方面,除考虑光栅与其亚层材料具有大的折射率差外,还要考虑 HCG 与 VCSEL 集成中的实际物理问题.如对于 GaAs 材料体系的 VCSEL,光栅材料与亚层材料选择 GaAs/ $\text{AlOx}$  将有利于 HCG 与 VCSEL 的集成通过一次外延生长实现( $\text{AlOx}$  可以通

过 Al<sub>0.98</sub>GaAs 或 AlAs 氧化形成), 而选择 SOI( silicon-on-insulator ) 结构 HCG 将有利于 VCSEL 与硅基光电子器件的集成. 本文中 HCG 采用 GaSb 衬底上的 Si/SiO<sub>2</sub> 材料, 如图 1 所示, 该模型综合考虑了 HCG 与 VCSEL 集成中的重要物理问题及外延生长和刻蚀等关键技术方面的因素: 第一, Si 和 SiO<sub>2</sub> 作为高低折射率材料, 大的折射率差 ( $\Delta n = 2.01$ ) 可以保证 HCG 具有满足 VCSEL 要求的高反射率和宽的反射带, 同时 PECVD 技术可实现 Si/SiO<sub>2</sub> 薄膜质量和厚度的精确控制, 无需复杂的二次外延技术; 第二, 低折射率亚层选择 SiO<sub>2</sub> 不仅克服了文献[16]中富 Al 的 AlGaAs 氧化所产生的应变效应, 而且对刻蚀工艺而言, 这种高选择比的异质界面将大大提高刻蚀精度, 这对提高布洛赫模间的干涉效应具有重要意义. 第三, 在低折射率亚层下方设计厚度为  $\lambda/4$  的 Si/SiO<sub>2</sub> 对, 可进一步补偿反射率, 增大制作容差. 第四, 选择 GaSb 衬底上的设计方案有利于 HCG 与 GaSb 基 VCSEL 的集成, 消除后期制作中因异质材料界面产生的 HCG 衍射特性变化.

根据严格耦合波理论, 合理设计 HCG 各项参数, 如周期、占空比、光栅深度、低折射率亚层的厚度等, 可以使入射光投射到光栅上的反射率接近 1. 为满足 VCSEL 腔镜的要求, HCG 需具有与 DBRs 反射镜相当的高反射带(反射率大于 99.5% 的带宽约 100 nm).

由于只存在零级衍射波, 由光栅衍射方程可知 HCG 的周期  $\Lambda$  满足下列条件:

$$\Lambda [n_1 \sin \theta_0 + \max(n_1, n_2)] < \lambda \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为入射光波长,  $n_1, n_2$  为空气 ( $z < 0$ ) 和低折射率亚层的折射率,  $\theta$  为入射角. 当入射光为 TM 偏振光时, 按照严格耦合波理论, 其与入射面  $x-z$  平

面相垂直的归一化磁场表示为<sup>[21]</sup>:

$$H_{in,y} = \exp[-jkn_1(x \sin \theta + z \cos \theta)] \quad (2)$$

入射波在空气和低折射率亚层中的归一化磁场分别表示为:

$$H_{1,y} = H_{in,y} + \sum_i R_i \exp[-jxk_{xi} - zk_{1,zi}] \quad (3)$$

$$H_{2,y} = \sum_i T_i \exp\{-j[xk_{xi} + (z - T_g)k_{2,zi}]\} \quad (4)$$

式中,  $R_i$  和  $T_i$  为光栅第  $i$  级反射衍射波和透射衍射波的归一化磁场振幅.  $k_{xi}$  为光栅第  $i$  级反射衍射波和透射衍射波波矢的  $x$  分量,  $k_{1,zi}$  和  $k_{2,zi}$  为光栅在空气和低折射率亚层中第  $i$  级反射衍射波和透射衍射波波矢的  $z$  分量. 在光栅区域中, 光波的电场和磁场可以由 Fourier 展开, 并满足麦克斯韦方程组, 求解可以得到  $R_i$  和  $T_i$ , 据此可求得光栅对于 TM 偏振光各级衍射波的衍射效率. 与之类似, 可以求得光栅对于 TE 偏振光各级衍射波的衍射效率.

## 2 仿真分析

结合 VCSEL 腔镜的高品质因子特性, 我们仿真研究了 2  $\mu\text{m}$  中心波长 TM 偏振 HCG 反射镜各结构参量对反射谱的作用规律, 各层材料折射率为:  $n_{\text{Si}} = 3.48$ ,  $n_{\text{SiO}_2} = 1.47$ ,  $n_{\text{GaSb}} = 3.9$ , 仿真结果如图 2 所示. 图 2(a) 中, 随光栅周期的增大, 高反射带 ( $R \geq 99\%$ ) 向长波方面移动, 在 800 nm 附近时高反射带最宽且反射率最高; 图 2(b) 的占空比也表面出与光栅周期类似的变化规律, 随数值的增大高反射带红移, 在 0.7 附近高反射带最宽, 但在 0.5 ~ 0.9 很宽的范围范围内反射率都超过 99%; 光栅深度直接影响着布洛赫模间的干涉效应, 从图 2(c) 也可以看出, 反射谱随光栅深度这一参量的变化较光栅周期

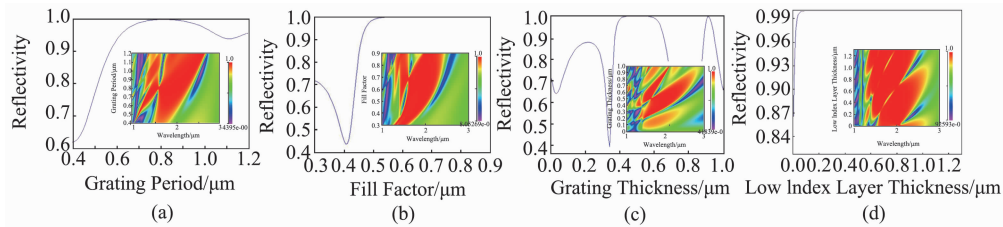


图 2 TM 偏振 HCG 反射镜各参量的反射图谱(图(a-d)分别给出了 HCG 反射率与光栅周期、占空比、光栅深度及低折射率亚层厚度的关系, (a)中插图为 HCG 反射率随波长和光栅周期的变化, (b)中插图为 HCG 反射率随波长和占空比的变化, (c)中插图为 HCG 反射率随波长和光栅厚度的变化, (d)中插图为 HCG 反射率随波长和亚层厚度的变化)

Fig. 2 Reflection spectrum of the TM-HCG parameters (Figures corresponding to the reflectivity of an HCG as a function of (a) the grating period, (b) fill factor, (c) grating thickness, and (d) low index layer thickness, respectively. The inset in (a) presents HCG reflectivity as a function of wavelength and grating period, the inset in (b) presents HCG reflectivity as a function of wavelength and fill factor, the inset in (c) presents HCG reflectivity as a function of wavelength and grating thickness, and the inset in (d) presents HCG reflectivity as a function of wavelength and low index layer thickness)

和占空比更加敏感,只在 500 nm 附近较窄的区间内高反射带最宽且反射率最大,继续增大或减少都引起反射率的急剧下降;亚层的厚度变化对高反射带的影响最小,从图 2d 中更高分辨率的曲线图可以看出,厚度大于 70 nm 时,反射率均可大于 99%,且高反射带宽变化不显著,不过对于 2.0  $\mu\text{m}$  中心波长,亚层厚度在 200 ~ 300 nm 范围内的高反射带较宽,且有利于采用 PECVD 技术实现对  $\text{SiO}_2$  薄膜质量和光学参数的控制. 表 1 给出了  $R \geq 99.9\%$  时各参量的取值范围和带宽最大时的优化数值.

表 1 TM-HCG 各参量取值情况 ( $R > 99.9$ )  
Table 1 The value of TM-HCG parameters ( $R > 99.9$ )

参量	取值范围	最佳
$\Lambda$	779 ~ 856 nm	817 nm
$f$	54.0% ~ 88.3%	69.8%
$T_g$	437 ~ 564 nm	500 nm
$T_l$	67 ~ 1300 nm	250 nm

基于上述的仿真分析,图 3 模拟了入射光正入射 HCG 反射镜表面的反射谱,结构参数为  $\Lambda = 817$  nm,  $f = 69.8$ ,  $T_g = 500$  nm,  $T_l = 250$  nm. 在 2.0  $\mu\text{m}$  波长附近, TM 模反射率大于 99.5% 的区间为 1700 ~ 2147 nm, 带宽宽度 447 nm, 体现了超宽带高反射特性. 在此区间内 TE 模最高反射率为 95.2%, 这是由于 HCG 下面的一对 Si/SiO<sub>2</sub> 布拉格光栅的偏振选择性较差, 因此 TE 模也表现了较高的反射率, 但也远未达到 99.5% 的器件激光要求, 因此它仍具有明显的偏振特性, 这对抑制跳模发生改善输出特性具有重要意义. 从右面的局部放大图可以看出反射率大于 99.9% 的带宽仍达到了 201 nm. 这与通常的 DBRs 反射镜相比, 不仅提供了足够高的反射率满足光在谐振腔内获得足够的光增益, 同时更宽的高反射带保证了腔模波长落在高反射带内, 使器件具有更大的制作容差.

以上结果是在入射光正入射光栅表面时得到的, 但对于实际 VCSEL 器件来说, 有时是顶发射结构, 即光从衬底一侧入射到 HCG 表面, 而越真实情况的模拟结果更有利于 HCG 与 VCSEL 的集成. 光栅参数不变, 光从衬底入射时仿真得到的反射谱形状与图 2 基本相同, 但我们关注的高反射带还是发生了细微变化: 反射率在 99.5% 以上的区间为 1758 ~ 2148 nm, 带宽 390 nm, TE 最高反射率为 94.9%; 反射率 99.9% 以上的区间为 1900 ~ 2080 nm, 带宽 180 nm, 即高反射带出现了窄化现象, 这是器件制作中尤其要注意的问题, 以防高反射带与激光波长的

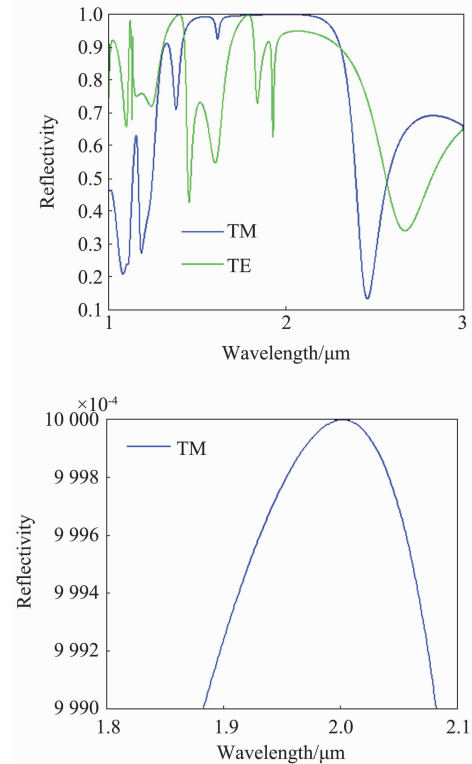


图 3 TM-HCG 反射谱, 右侧为左侧的局部放大图  
Fig. 3 Reflection spectra of the TM-HCG. The right figure is the partial enlarged detail of the left

偏离. 另外, 在实际器件集成时, HCG 的衬底材料通常不同 (Si, GaAs, GaSb 等), 仿真结果显示不同的衬底材料的光学参数对 HCG 的反射谱也会产生影响, 衬底材料折射率的变化也会引起高反射带覆盖率的变化.

此外, 偏振模式也会对 HCG 结构产生明显差别. 通常对于给定波长的 TE-HCG 较 TM-HCG 具有较大的周期, 较小的占空比及较浅的光栅深度, 但计算表明其高反射带宽较 TM-HCG 小很多, 因此设计时要综合考虑实际应用及制作技术方面的因素.

### 3 实验结果

采用等离子增强化学气相淀积设备 (PECVD) 在 GaSb 衬底上依次生长  $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}$  多层膜, 由于 GaSb 衬底与  $\text{SiO}_2$  的热膨胀系数差别较大 ( $\alpha_{\text{SiO}_2} \approx 0.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ ,  $\alpha_{\text{GaSb}} = 6.7 \times 10^{-6}/\text{K}$ ), 其上低应力高质量  $\text{SiO}_2$  的生长尤为重要. 电子束曝光技术进行光栅图形的制作, 感应耦合等离子体 (ICP) 进行 HCG 的干法刻蚀, 通过优化刻蚀气体的流量、配比、温度、压强及上下电极功率等工艺参数优化  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  的选择比、控制 Si 的刻蚀速率及刻蚀形貌. 从图 4 的 SEM 照片可以看出, 光栅侧壁较光滑且陡

直度很好,底部平坦,各层参数及形貌满足设计要求.

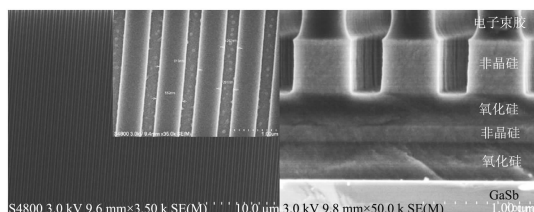


图4 HCG的SEM照片(左:电子束曝光,右:ICP刻蚀)  
Fig. 4 SEM photographs of the HCG (left:electron beam exposure, right:after etching by ICP)

采用 Lameda 950、IR/NIR Spectrometer 和 Spotlight 400 组成的红外显微系统、偏振器、金镜等对样品进行测试.从图5(a-b)可知,在 $2.0\ \mu\text{m}$ 中心波长附近,TM偏振模式HCG的反射率 $R \geq 99.5\%$ 的带宽范围 $1864 \sim 2140\ \text{nm}$ ,带宽 $278\ \text{nm}$ ,且在此区间内,TE偏振的反射率 $R < 95\%$ .图5c中TM偏振的反射率 $R \geq 99.9\%$ 的带宽达到了 $148\ \text{nm}$ .仿真结果与实验结果数值上存在偏差主要原因是在HCG制作过程中,实验技术上的限制因素使其结构参数和材料的光学参数与模拟参数间存在差异.首先各层薄膜实际生长的厚度和其折射率等光学参数会和理论值存在差异.其次,刻蚀工艺造成光栅槽深偏大或偏小都使高反射带变窄,它也是影响HCG反射特性最敏感的因素,因此精确控制刻蚀深度非常重要.另外,电子束曝光技术的分辨率将直接影响占空比,它的变化也会引起反射率和高反射带的平坦度和覆盖率的变化.因此在理论优化设计中必须考虑制作技术上的限制因素,尽可能地增大制作容差.上述研究结果表明,实验结果与仿真结果吻合很好,这种制备工艺简单的P面反射镜较传统的P-DBRs具有更大的高反射带宽,完全能够满足 $2.0\ \mu\text{m}$  GaSb基VCSEL的要求,而且大大降低了器件制备的复杂性、成本及技术难度.

#### 4 结论

设计并制备出用于 $2.0\ \mu\text{m}$  GaSb基VCSEL的TM偏振HCG型P面反射镜.通过分析HCG与VCSEL集成中的实际物理问题,如外延生长、刻蚀等关键技术方面的因素,及异质材料界面等引起HCG衍射特性的劣化,结合严格耦合波理论优化物理模型,仿真分析了HCG各参量对反射谱的作用规律,设计了高反射带宽大于 $200\ \text{nm}$  ( $R \geq 99.9\%$ ) HCG型P

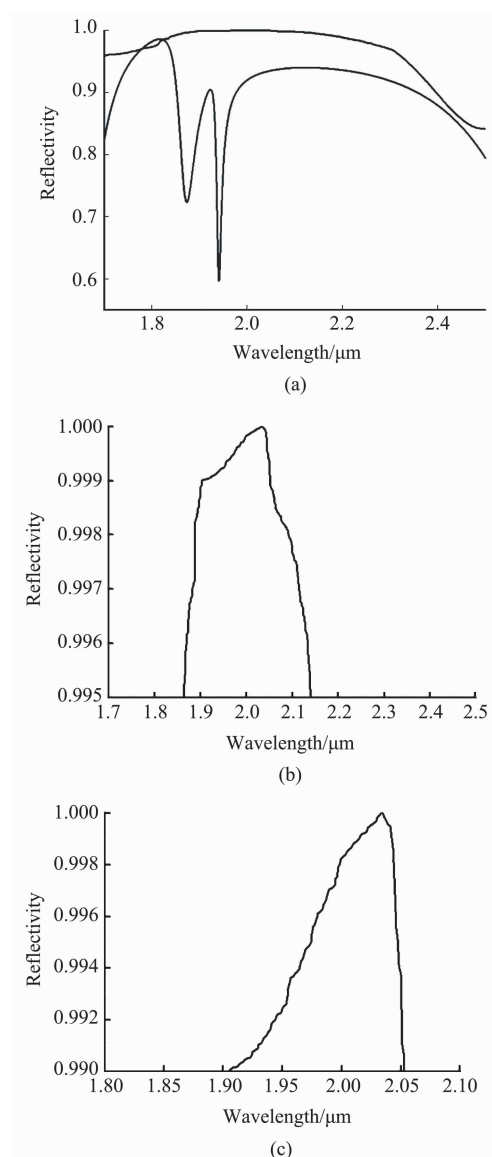


图5 实验测得HCG的反射谱(b-c)为(a)图中反射率分别超过99.5%和99.9%的放大图  
Fig. 5 Measured reflection spectrum of the HCG ((b) and (c) are magnified maps with a reflectivity exceeding 99.5% and 99.9%, respectively.)

面反射镜,并讨论了器件的实际出光方向,衬底材料及HCG偏振态等对反射镜的反射率及高反射带宽的影响.设计的反射镜具有制备工艺简单、制作容差大的优势.采用PECVD、ICP及电子束曝光技术制备了具有高反射带宽的HCG反射镜,TM偏振模式下,反射率 $R \geq 99.5\%$ 的带宽 $278\ \text{nm}$ ,反射率 $R \geq 99.9\%$ 的带宽仍可达 $148\ \text{nm}$ ,完全能够满足器件激光的需求,研究工作为改善电泵浦GaSb基VCSEL的性能及其波长拓展提供了理论和技术支持.

#### 致谢

感谢中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究

所付凯工程师在电子束曝光工艺上的大力协助。

## References

- [1] Tan Z W, Yang C C, Zhu Y X, *et al.* A 70 Gbps NRZ optical link based on 850 nm band-limited VCSEL for data-center intra-connects [J]. *Science China (Information Sciences)*, 2018, **61**(08): 83–89.
- [2] Guan B L, Liu X, Jiang X W, *et al.* Multi-transverse-mode and wavelength split characteristics of vertical cavity surface emitting laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(16): 164203.
- [3] ZHOU Guang-Zheng, YAO Shun, YU Hong-Yan, *et al.* Optimized design and epitaxy growth of high speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Acta Physica Sinica* (周广正, 尧舜, 于洪岩, 等. 高速 850 nm 垂直腔面发射激光器的优化设计与外延生长. *物理学报*), 2018, **67**(10): 104205.
- [4] Huang Y W, Zhang X, Zhang J W, *et al.* Non-periodic wide-angle beam steering HCG array for application in VCSEL [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2018, **37**(1): 20–25.
- [5] Wang X, Hao Y Q, YAN Chang-Ling, *et al.* High power single-higher-mode VCSEL with inverted surface relief [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2018, **37**(02): 168–172.
- [6] Grabherr M, Jager R, Miller M, *et al.* Bottom-emitting VCSEL's for high-CW optical output power [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 1998, **10**(8): 1061–1063.
- [7] LIU Cheng. Device processing and optoelectronic characterizations of long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology Chinese Academy of Sciences (刘成. 长波长垂直腔面发射激光器器件工艺与光电特性研究. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所), 2007.
- [8] Sanchez D, Cerutti L, Tournié E. Single-mode monolithic GaSb vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(14): 15540.
- [9] Baranov A N, Rouillard Y, Boissier G, *et al.* Sb-based monolithic VCSEL operating near 2.2  $\mu\text{m}$  at room temperature [J]. *Electronics Letters*, 1998, **34**(3): 281–282.
- [10] Dier O, Lauer C, Amann M C. n-InAsSb/p-GaSb tunnel junctions with extremely low resistivity [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(7): 419–420.
- [11] Bachmann A, Lim T, Kashani-Shirazi k, *et al.* Continuous-wave operation of electrically pumped GaSb-based vertical cavity surface emitting laser at 2.3  $\mu\text{m}$  [J]. *Electronics Letters*, 2008, **44**(3): 202–203.
- [12] Arafin S, Bachmann A, Vizbaras K, *et al.* 2010 22nd IS-LC International semiconductor laser conference; Large-aperture single-mode GaSb-based BTJ-VCSELs at 2.62  $\mu\text{m}$  [C]. Kyoto Japan: IEEE, 2010: 47–48.
- [13] Huang M C Y, Zhou Y, Changhasnain C J. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 119–122.
- [14] Kashino J, Inoue S, Matsutani A, *et al.* Photonics Conference: Transverse mode control of VCSELs using angular dependent high-contrast grating mirror [C]. USA: IEEE, 2013: 244–245.
- [15] Ferrara J, Yang W, Zhu L, *et al.* Heterogeneously integrated long-wavelength VCSEL using silicon high contrast grating on an SOI substrate [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(3): 2512.
- [16] Laaroussi Y, Chevallier C, Genty F, *et al.* Oxide confinement and high contrast grating mirrors for Mid-infrared VCSELs [J]. *Optical materials express*, 2013, **3**(10): 1576–1585.
- [17] GUO Chu-Cai, YE Wei-Min, YUAN Xiao-Dong, *et al.* Research on reflection characteristics of sub-wavelength gratings [J]. *Acta Optica Sinica* (郭楚才, 叶卫民, 袁晓东, 等. 亚波长光栅反射特性研究. *光学学报*), 2009, **29**(12): 3272–3276.
- [18] LI Shuo, GUAN Bao-Lu, SHI Guo-Zhu, *et al.* Polarization stable vertical-cavity surface-emitting laser with surface sub-wavelength grating [J]. *Acta Physica Sinica* (李硕, 关宝璐, 史国柱, 等. 亚波长光栅调制的偏振稳定垂直腔面发射激光器研究. *物理学报*), 2012, **61**(18): 184208.
- [19] TIAN H, CUI X, DU Y, *et al.* Broadband high reflectivity in subwavelength-grating slab waveguides [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(21): 27174.
- [20] LI Xiu-Shan, NING Yong-Qiang, ZHANG Xing, *et al.* Influence of grating parameters on reflectivity of Si/SiO<sub>2</sub> high contrast gratings [J]. *Chinese Journal of Luminescence* (李秀山, 宁永强, 张星, 等. Si/SiO<sub>2</sub> 高对比光栅参数对反射率的影响. *发光学报*), 2015, **36**(7): 806–810.
- [21] Tamir T, Wang H C. Scattering of electromagnetic waves by a sinusoidally stratified half-space: I. Formal solution and analytic approximations [J]. *Canadian Journal of Physics*, 1966, **44**(9): 2073–2094.