

# 与 GaAs 基 VCSEL 同材料体系高对比度亚波长光栅的设计

王凤玲, 陈磊, 张秋波, 徐莉, 李辉, 王海珠, 郝永芹\*, 马晓辉  
(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)

**摘要:**设计了一种用于 850 nm GaAs 基 VCSEL 的高折射率对比度亚波长光栅(HCG),整体结构采用 GaAs 材料体系,包含光栅层及为缓解其应力问题而设计的应力缓冲层和以 AlGaAs 或 AlAs 氧化后形成的  $\text{AlO}_x$  低折射率亚层。通过 Rsoft 软件对 HCG 的反射特性进行仿真研究,分析了不同光栅参数对反射谱的作用规律,重点探究了应力缓冲层和低折射率亚层对光栅特性的影响。设计了中心波长 850 nm 的 TM 模 HCG,反射率大于 99.9% 的带宽可达 91 nm,与中心波长之比达到 10.7%,同时 TE 模的反射率不超过 90%,显示出了良好的偏振选择性。该结构可以替代 VCSEL 中的 P 型分布式布拉格反射镜,提供高反射率、宽带宽,并改善由不同材料体系所导致的应力问题,提高器件稳定性。

**关键词:**垂直腔面发射激光器;高折射率对比度光栅;分布式布拉格反射镜;砷化镓  
**中图分类号:** O472 +.8 **文献标识码:** A

## Design of high contrast subwavelength gratings with GaAs-based VCSEL materials

WANG Feng-Ling, CHEN Lei, ZHANG Qiu-Bo, XU Li, LI Hui, WANG Hai-Zhu,  
HAO Yong-Qin\*, MA Xiao-Hui

(National Key Lab of High-Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A high-refractive-index contrast subwavelength grating (HCG) for 850 nm GaAs-based VCSELs was designed. The whole structure is based on GaAs material system, including a grating layer, a stress buffer layer designed to alleviate its stress problem and an  $\text{AlO}_x$  low refractive index sub-layer oxidized by AlGaAs or AlAs. The reflection characteristics of the HCG are simulated by Rsoft software, and the effects of different grating parameters on reflection spectrum are analyzed. In particular, the effects of stress buffer layer and low refractive index sub-layer on characteristics of gratings are investigated. The 850 nm TM mode HCG shows a very good reflection characteristic. It has a large reflection bandwidth of up to 91 nm with its reflectivity more than 99.9%, and the ratio with the center wavelength reaches 10.7%. Moreover, its reflectivity for TE mode is ensured to be lower than 90%, showing good polarization selectivity. This HCG can replace P-type distributed Bragg reflectors in VCSEL, providing high reflectivity, wide bandwidth, and good stability.

**Key words:** vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), high-refractive-index contrast grating (HCG), distributed Bragg reflectors (DBRs), gallium arsenide (GaAs)

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

收稿日期: 2019-10-09, 修回日期: 2019-12-17

Received date: 2019-10-09, Revised date: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(11474038); 国家自然科学基金青年科学基金(21707010)

**Foundation items:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (11474038); the National Science Foundation for Young Scientists of China (21707010)

**作者简介(Biography):** 王凤玲(1994—), 女, 吉林白城人, 硕士研究生, 2017年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事半导体激光器物理与技术方面的研究. E-mail: wangflling@qq.com

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: hyq72081220@aliyun.com

## 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有光束质量好、低功耗、低阈值电流、单纵模工作、易于高密度二维面阵集成及低制作成本等优势<sup>[1-3]</sup>,被广泛应用于光通信、光互联、光信息处理<sup>[4-5]</sup>,尤其是近年来快速发展的iPhone的3D传感技术、监控、无人机,以及AR/VR等。传统VCSEL的谐振腔是由上下分布式布拉格反射镜(DBR)构成,而DBR由光学厚度为 $\lambda/4$ 的高折射率层和低折射率层交替生长而成。为了实现极高的反射率(一般要大于99.5%),DBR的对数通常要达到20~40对,当DBR对数增大,一方面器件中的串联电阻变大,尤其对于P型DBR,由于空穴的有效质量较大且其迁移率较小,形成的同型异质结在界面处存在较大的势垒,导致更高的串联电阻以及严重发热,从而引起VCSEL内部温度升高,改变半导体材料的折射率和禁带宽度,从而影响器件性能。另一方面,当生长对数较多时,增加了工艺难度和DBR生长成本,并且不利于器件的小型化<sup>[6]</sup>。故从降低串联电阻以及器件小型化的角度出发,对P型DBR进行优化,是提高垂直腔面发射激光器性能的重要途径。

近年来,随着微加工技术和理论研究的发展,亚波长光栅越来越受到人们的关注。亚波长光栅是一种浮雕结构的光栅,光栅周期小于入射波长,只存在零级衍射波,高阶衍射波均为消逝波。在亚波长光栅的基础上,出现了高折射率对比度亚波长光栅(High-refractive-index Contrast Grating, HCG),它的突出特点是高折射率光栅层条纹完全被低折射率介质(通常为空气或者二氧化硅)包围,形成大的折射率差,通过调节光栅的材料、厚度、占空比和光栅周期等参数,反射率可达99.9%以上,可以用于替代VCSEL表面的p型DBR,达到减小由多层DBR引起的串联电阻高和吸收损耗大的目的,同时能够提高激光的输出质量,改善VCSEL的偏振特性,满足器件小型化的发展需求。

2004年,报道了一种用于 $1.55\ \mu\text{m}$  VCSEL的介质型宽带高反射率HCG,它使用Si与 $\text{SiO}_2$ 材料,在反射率 $R>99.9\%$ 的带宽( $\Delta\lambda$ )与中心波长( $\lambda_0$ )之比达到了17%<sup>[7]</sup>。2006年Michael C. Y. Huang<sup>[8]</sup>等人则首次将HCG集成到VCSEL顶部作为反射镜,器件实现了单纵模激射,且具有良好的偏振特性。近两年,本课题组报道了一种用于GaSb基VCSEL的 $2\ \mu\text{m}$ 波段HCG,在衬底上依次交替生长 $\text{SiO}_2$ 和Si,在

TM模式下, $R>99.9\%$ 的部分 $\Delta\lambda/\lambda_0>7.4\%$ <sup>[9]</sup>。以上光栅结构都可以在提供高反射率的同时达到很大的带宽,但其与VCSEL的材料体系不同,需要额外通过PECVD等其他方式进行 $\text{SiO}_2/\text{Si}$ 等介质膜的制备,且存在由于不同材料体系之间热膨胀系数的差异大而导致材料之间的应力问题以及薄膜的牢固度问题,影响器件的稳定性及性能。

研究了一种工作在850 nm波段TM模式下与GaAs基同材料体系的高折射率对比度亚波长光栅,应用严格耦合波方法对其特性进行仿真分析,并深入研究了应力缓冲层、低折射率亚层对HCG整体结构特性的影响。该结构在工艺上只需一次外延生长,就可以实现具有亚波长光栅的外延结构,这对简化器件制备过程,减弱因不同材料体系所产生的应力问题,提高其长期工作的稳定性具有重要意义。

## 1 结构设计

针对850 nm波段GaAs基VCSEL设计一种与其同材料体系的HCG来代替P型DBR,结构如图1所示,包括光栅层、应力缓冲层、低折射率亚层以及基底。光栅层、应力缓冲层和基底均由GaAs材料构成,低折射率亚层由富Al的AlGaAs或AlAs氧化而成,生成的氧化层结构致密稳定且折射率很低。由于生成的 $\text{AlOx}$ 体积要比原来收缩10%左右<sup>[10]</sup>,为了改善由低折射率亚层收缩产生的应力而导致薄膜稳定性差的问题,设计了应力缓冲层。高折射率的光栅层( $n=3.521$ )被低折射率的 $\text{AlOx}$ ( $n\approx 1.6$ )及空气所包围,形成了高折射率差,有利于获得高反射、宽带宽的HCG反射镜。该结构纵向尺寸小,结构简单,可以代替P型DBR,有效减小由多层DBR引起的串联电阻和光吸收引起的损耗,并有利于改善VCSEL的偏振特性,满足器件高性能小型化的发展需求。

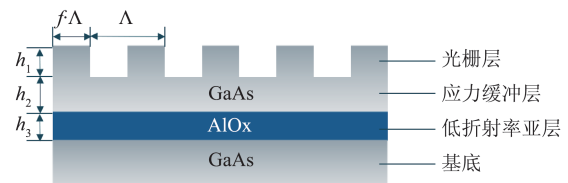


图1 光栅结构示意图:周期 $\Lambda$ ,占空比 $f$ ,光栅层厚度 $h_1$ ,应力缓冲层厚度 $h_2$ ,低折射率亚层厚度 $h_3$

Fig. 1 Schematic diagrams of the grating structure: period  $\Lambda$ , fill factor  $f$ , grating layer thickness  $h_1$ , stress buffer layer thickness  $h_2$ , low refractive index sub-layer thickness  $h_3$

亚波长光栅是一种浮雕结构的光栅,光栅周期小于入射波长,其周期要在一定的范围内,才能满足零级衍射<sup>[11]</sup>。亚波长光栅衍射效率的计算可以采用严格耦合波理论(RCWA),一维亚波长光栅的反射率可以表示为:

$$D_{ni} = |R_{s,i}|^2 \operatorname{Re} \left( \frac{k_{I,zi}}{k_0 n_I \cos \theta} \right) + |R_{p,i}|^2 \operatorname{Re} \left( \frac{k_{I,zi}/n_I^2}{k_0 n_I \cos \theta} \right), \quad (1)$$

$$D_{ii} = |T_{s,i}|^2 \operatorname{Re} \left( \frac{k_{II,zi}}{k_0 n_I \cos \theta} \right) + |T_{p,i}|^2 \operatorname{Re} \left( \frac{k_{II,zi}/n_{II}^2}{k_0 n_I \cos \theta} \right), \quad (2)$$

式中  $i$  表示衍射波的级次,  $\theta$  为入射角,  $k_0$  为入射波波矢,  $n_I, n_{II}$  分别是入射区与光栅区中介质的折射率,  $k_{I,zi}, k_{II,zi}$  分别是入射区与光栅区中沿  $z$  轴方向的波矢,  $R_{s,i}, R_{p,i}$  分别是反射波的归一化 TE 分量和 TM 分量,  $T_{s,i}, T_{p,i}$  分别是透射波的归一化 TE 分量和 TM 分量<sup>[12]</sup>。

同时, HCG 要满足 VCSEL 的腔镜要求, VCSEL 中品质因数越高, 谐振腔储存信号能量的能力越强, 品质因数可以表示为:

$$Q = \frac{2\pi\nu nL}{\lambda(1-r)}, \quad (3)$$

式中  $\nu$  为光波长的频率,  $L$  为谐振腔长度,  $\lambda$  为入射光波长,  $r$  为有效反射率<sup>[13]</sup>。从式(3)可知, 当腔长  $L$  非常短时, 若使谐振腔中有足够的光能量连续激发, 那么反射镜的反射率  $r$  必须足够大。由于 VCSEL 器件中光学谐振腔的长度  $L$  很短, 通常要求 DBRs 的反射率大于 99.5%, 且具有较宽的高反射带, 利于增大制作容差, 保证腔模位于高反射带内。因此, 在采用 HCG 代替 P 型 DBR 时, 设计中除要考虑其在中心波长位置具有接近于 1 的反射率外, 还要关注其高反射带的变化。

## 2 仿真分析

为使光栅在 TM 模式下 850 nm 处有高反射率宽带宽, 应用控制变量法对光栅不同参数进行仿真模拟, 确定参数范围, 图 2 是光垂直入射于光栅表面时 TM 模式下不同光栅参数与波长对应的反射率。从图 2(a) 可以看出, 中心波长决定光栅周期, 光栅周期的增加使高反射带向长波长方向漂移, 高反射带宽随之改变, 且周期在 0.372~0.467  $\mu\text{m}$  时均可得到极高的反射率 ( $R > 99.9\%$ )。对于图 2(b), 经过细致的仿真和计算, 占空比达到 54.1% 时最为合适, 此

时调制强度最强, 衍射效果最优, 带宽最宽。但在电子束曝光形成光栅中, 周期是相对容易实现的, 而占空比更难稳定, 考虑带宽以及中心波长位置应在 850 nm 附近, 确定占空比在 48%~60.4% 的误差允许范围, 此时均可满足反射率大于 99.9%。

图 2(c) 显示光栅厚度的变化对高反射率带宽以及中心波长位置影响较大, 且随着光栅厚度的改变, 高反射带存在周期性的变化。当光栅厚度为 0.251~0.262  $\mu\text{m}$  时, TM 模式下反射率可达 99.9%, 即使在较大范围内(光栅厚度为 0.241~0.271  $\mu\text{m}$ ), 亦可满足反射率在 99.5% 以上, 并在 0.257  $\mu\text{m}$  处具有最宽的高反射带。应力缓冲层是 GaAs 层未完全刻蚀所剩余的部分, 可改善由低折射率亚层收缩导致的应力问题, 提高薄膜的稳定性。从图 2(d) 可以看出, 其厚度的变化并未影响中心波长处的反射率, 反射率均满足  $R > 99.9\%$ , 但对高反射带宽影响很大, 高反射带宽大小呈周期性变化。结合实际器件的生长技术及 GaAs 材料的光吸收因素, 应力缓冲层的厚度也要适中, 因此综合考虑取值范围为 0.187~0.197  $\mu\text{m}$  ( $R > 99.9\%$ ), 且厚度为 0.191  $\mu\text{m}$  时具有较好的高反射特性。

为深入研究低折射率亚层的作用, 对比分析了有无低折射率亚层时的反射率图谱及其对 TM、TE 模式反射谱的影响, 如图 3 所示。对比图 3(a) 和 (b) 可知, 相同模式下, 低折射率亚层的存在能够明显扩宽高反射率带宽。图 3(c) 为 TM 模式下低折射率亚层厚度与波长对应的反射率图, 可以直观地看出当低折射率亚层厚度大于 0.1  $\mu\text{m}$  时, 均满足高反射率宽带宽的要求, 其厚度增加对高反射带以及中心波长位置的影响很小, 只呈现轻微的周期性波动, 某种意义上, 只需任取一个大于 0.1  $\mu\text{m}$  的数值都可以达到高反射率宽带宽。但图 3(d) 显示在距中心波长较近的 830 nm 附近 TE 模也表现出较高的反射率, 下面深入研究了低折射率亚层厚度对 TM、TE 反射率的影响, 如图 4 所示。

如图 4 所示, 在中心波长附近, TM 模具有接近于 1 的高反射带, 且随亚层厚度的增大高反射带宽也增大。但 TE 模在此区间内的变化则呈现随低折射率亚层厚度的增大, 反射率出现个别区域的迅猛增长。当厚度升至 0.1  $\mu\text{m}$  时, 833 nm 处的反射率达到了 89.3%; 当厚度大于 0.2  $\mu\text{m}$  时, 833 nm 处的反射率均达到 95% 以上, 此时 HCG 的偏振选择性越来越差。若使光栅具有良好的偏振选择性, 需要

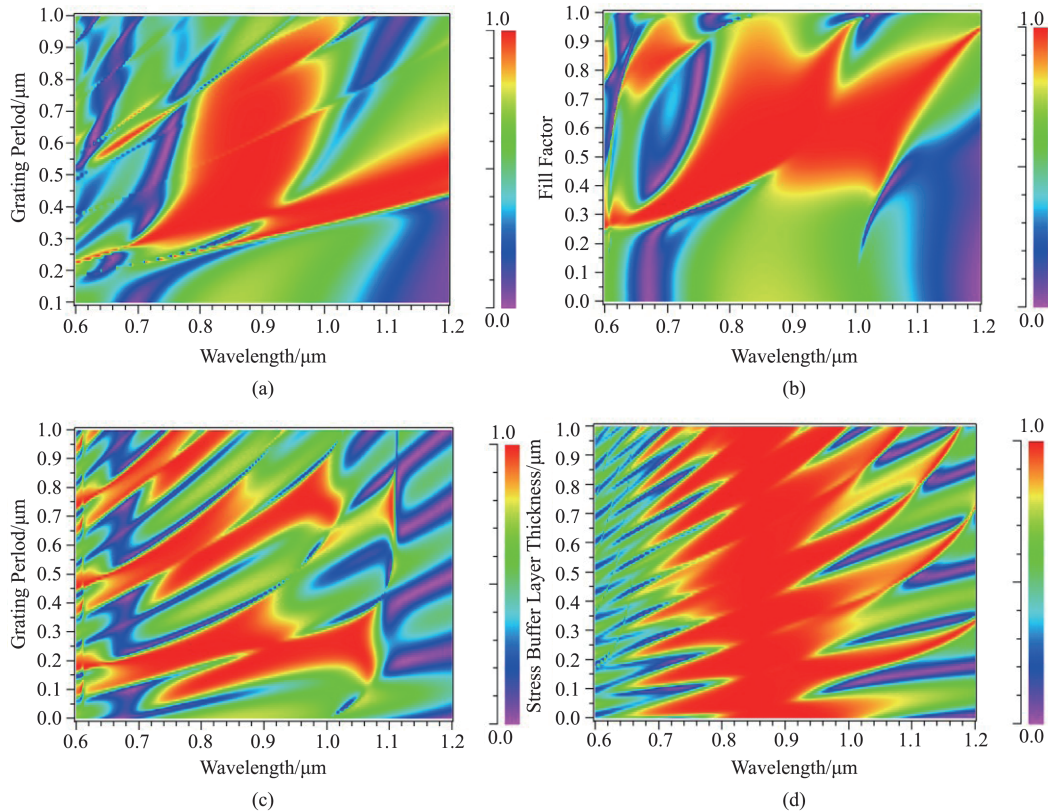


图2 TM模式垂直入射时不同光栅参数与波长对应的反射率:(a)光栅周期,(b)占空比,(c)光栅厚度,(d)应力缓冲层厚度

Fig.2 Reflectivity of different grating parameters versus wavelength for normal incidence in TM mode: (a) grating period, (b) fill factor, (c) grating thickness, (d) stress buffer layer thickness

TM反射率大于99.5%的同时,TE反射率小于90%。综合考虑TM-HCG的带宽及偏振特性,选取低折射率层厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ ,既保证了TM模式下具有较宽的高反射带,又满足TE模式下反射率小于90%,光栅的偏振选择性较好。此外,由于低折射率亚层的形成是由富Al的AlGaAs或者AlAs氧化而成,实际生长的AlGaAs或者AlAs层的厚度要考虑体积收缩因素的影响。

基于上述分析,选取一组参数设计了HCG,图5为光垂直于光栅表面入射情况下TM模的反射谱,反射率 $R > 99\%$ 的波带范围是 $0.778 \sim 0.923\ \mu\text{m}$ ,带宽宽度与中心波长比值 $\Delta\lambda / \lambda = 17\%$ 。在 $0.804 \sim 0.895\ \mu\text{m}$ 很宽的范围,反射率均达到99.9%以上,高反射带宽达到了91nm,带宽宽度与中心波长比值 $\Delta\lambda / \lambda = 10.7\%$ 。同时,在此范围内,TE模的反射率低于VCSEL的激射条件(最大反射率89.3%),有着良好的偏振选择性。

### 3 结论

设计了一种与850 nm VCSEL同材料体系的GaAs基TM偏振高折射率对比度亚波长光栅,基于

HCG的衍射特性及VCSEL的工作机理,采用严格耦合波方法仿真研究了各光栅参数对反射谱的作用规律。光栅周期、占空比对高反射带的位置和带宽影响较大,只在特定区域表现较宽的高反射带。但相比之下,高反射带对光栅厚度变化最为敏感,且随着光栅厚度的改变,高反射带呈周期性的变化。研究了为缓解应力问题而引入的应力缓冲层对光栅反射特性的影响,发现其厚度的变化几乎不影响中心波长附近的反射率,均满足 $R > 99.9\%$ ,但对高反射带宽影响很大,高反射带宽呈周期性变化。最后详细分析了低折射率亚层对HCG反射率特性的影响,研究表明低折射率亚层的存在明显扩宽了高反射率带宽,且当其达到某一值后,高反射带的位置及带宽几乎不受其厚度的影响,只呈现轻微的周期性波动。不过,深入研究表明其厚度对HCG的偏振特性有着不容忽视的作用,当其大于一定值后HCG的偏振性越来越差,因此,其厚度也要控制在适当的范围内。最终设计了具有宽带高反射特性的HCG,在TM模式下垂直于光栅表面入射时,反射率 $R > 99\%$ 时,在中心波长附近的高反射带宽达到

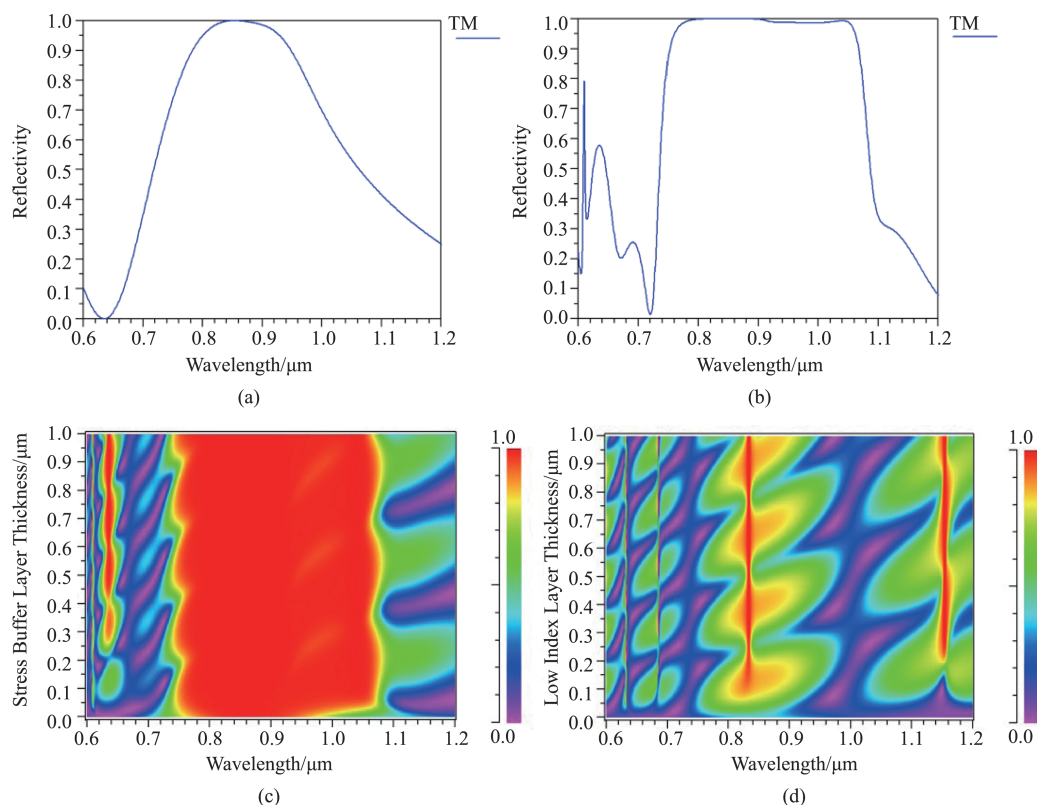


图3 (a)无低折射率亚层时 TM 模对应的反射率谱,(b)有低折射率亚层时 TM 模对应的反射率谱,(c)TM 模式下低折射率亚层厚度与波长对应的反射率,(d)TE 模式下低折射率亚层厚度与波长对应的反射率

Fig.3 (a) the reflectivity spectra of the TM mode when there is no low refractive index sub-layer, (b) the reflectivity spectra of the TM mode with the low refractive index sub-layer, and (c) reflectivity as function of low refractive index sub-layer thickness and wavelength in TM mode, (d) reflectivity as function of low refractive index sub-layer thickness and wavelength in TE mode

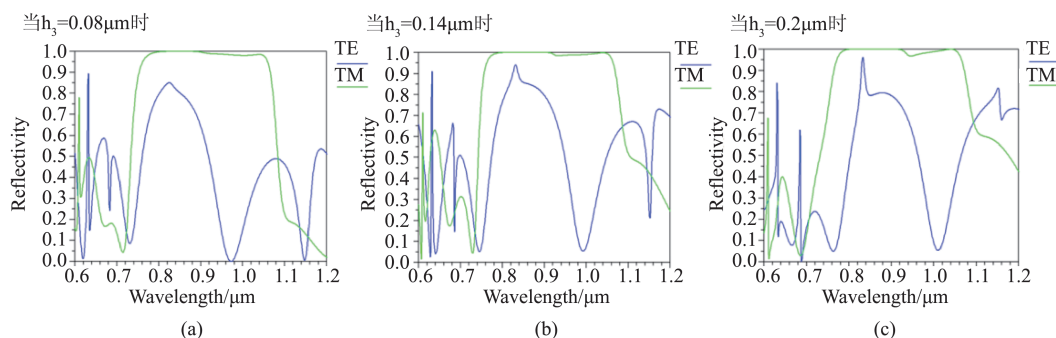


图4 不同低折射率亚层厚度时 TM 和 TE 模对应的反射率谱,(a)低折射率亚层厚度为  $0.08 \mu\text{m}$ , (b)低折射率亚层厚度为  $0.14 \mu\text{m}$ , (c)低折射率亚层厚度为  $0.2 \mu\text{m}$

Fig.4 Reflectivity spectra of TM and TE modes for different low refractive index sub-layer thicknesses, (a)the thickness of low refractive index sub-layer is  $0.08 \mu\text{m}$ , (b) the thickness of low refractive index sub-layer is  $0.14 \mu\text{m}$ , (c) the thickness of low refractive index sub-layer is  $0.2 \mu\text{m}$

$144 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda / \lambda = 17\%$ , 且反射率达到  $99.9\%$  以上的带宽达到了  $91 \text{ nm}$ 。设计的 HCG 不仅具有宽带高反射特性、更好的偏振特性及稳定性,且由于其与 VCSEL 同材料体系的特征,更易于实现 HCG 与 VCSEL 的集成。

## References

- [1] ZHANG Li-Sen. Structure design and fabrication of high power vertical cavity surface emitting laser [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, China(张立森. 大功率垂直腔面发射激光器的结构设计与研制. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2012.

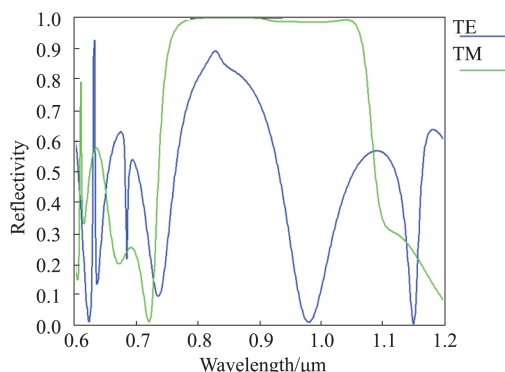


图5 TM和TE模对应的反射率谱:反射率 $R > 99.9\%$ ,带宽为91 nm ( $\Lambda = 0.38 \mu\text{m}$ ,  $f = 0.541$ ,  $h_1 = 0.257 \mu\text{m}$ ,  $h_2 = 0.191 \mu\text{m}$ ,  $h_3 = 0.1 \mu\text{m}$ )

Fig. 5 Reflectivity spectra corresponding to TM and TE modes: reflectivity  $R > 99.9\%$ , bandwidth is 91 nm ( $\Lambda = 0.38 \mu\text{m}$ ,  $f = 0.541$ ,  $h_1 = 0.257 \mu\text{m}$ ,  $h_2 = 0.191 \mu\text{m}$ ,  $h_3 = 0.1 \mu\text{m}$ )

- [2] HUANG Zhan-Chao. Studies of long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser materials and physics [D]. Shanghai: Shanghai institute of microsystem and information technology, Chinese Academy of Sciences, China (黄占超. 长波长垂直腔面发射激光器材料与物理研究. 上海:中国科学院上海微系统与信息技术研究所), 2006.
- [3] P. Q. Qiao, K. Li, K. T. Cook, *et al.* MEMS-tunable VCSELs using 2D high-contrast gratings [J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(4): 823-826.
- [4] WANG Li-Jun, Peng Hang-Yu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chinese Optics* (王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展. *中国光学*), 2015, **8**(4): 517-534.
- [5] Y. Y. Liu, X. Zhang, Y. W. Huang, *et al.* OPSR enhancement of high-temperature operating shallow-surface grating VCSELs [J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(16): 4486-4490.
- [6] Gebiski M, Dems M, Wasiak M, *et al.* Monolithic subwavelength high-index-contrast grating VCSEL [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(18): 1953-1956.
- [7] Mateus C F R, Huang M C Y, Deng Y, *et al.* Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(2): 518-520.
- [8] Huang M C Y, Zhou Y, Chang-Hasnain C J. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(5): 297-297.
- [9] HAO Yong-Qin, Yue Guang-Li, Zou Yong-Gang, *et al.* Optimal design of P-side mirror for GaSb based vertical cavity surface emitting laser [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郝永芹, 岳光礼, 邹永刚, 等. GaSb基垂直腔面发射激光器P面反射镜优化设计. *红外与毫米波学报*) 2019, **38**(2): 228-233.
- [10] Chevallier C, Genty F, Fressengeas N, *et al.* Robust design by antioptimization for parameter tolerant GaAs/AlOx high contrast grating mirror for VCSEL application [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(21): 3374-3380.
- [11] Brown S. Theory and simulation of subwavelength high contrast gratings and their applications in vertical-cavity surface-emitting laser devices [D]. Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011.
- [12] YUAN Hui, Zhou Jin, Wang Xiao-Wei, *et al.* Rigorous coupled-wave analysis of a new one-dimensional deep sub-wavelength grating [J]. *Chin. J. Lasers* (袁惠, 周进, 王晓伟, 等. 一维深亚波长光栅的耦合波分析及偏振特性的研究. *中国激光*) 2002, **29**(9): 795-800.
- [13] YAN Chang-Ling. Study on the fabrication and characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics & Fine Mechanics & Physics Academia Sinica, P.R. China (晏长岭. 垂直腔面发射激光器的研制及其特性分析. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2000.