

# 940 nm VCSEL 高折射率对比度 亚波长光栅反射镜的设计

罗 妍, 郝永芹\*, 晏长岭

(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:** 研究了一种 940 nm GaAs 基 VCSEL 的高折射率对比度亚波长光栅反射镜(HCG), 采用 GaAs/AlO<sub>x</sub> 光栅结构, 讨论了 TE 偏振时光栅结构中各参数对反射光谱的作用规律, 分析 TE、TM 不同偏振时反射镜的结构特点, 及形貌误差对高反射带的影响。设计的 TE-HCG 的高反射带中心为 940 nm, 在 0.888~0.985 μm 波长范围内, TE 波反射率大于 99.5%, TM 波反射率低于 90%, 高反射带宽 97 nm,  $\Delta\lambda/\lambda_0 > 10\%$ 。该反射镜可以与 VCSEL 采用一次性外延生长技术制作, 且具有结构简单, 制作容差大, 且偏振稳定的优势, 不仅有利于改善器件性能, 且大大降低 VCSEL 的制作难度和成本。

**关键词:** 高折射率对比度; 亚波长光栅; 垂直腔面发射激光器; 严格耦合波理论

**中图分类号:** O472; +.8 **文献标识码:** A

## Design of high refractive index contrast subwavelength grating reflector for 940 nm VCSEL

LUO Yan, HAO Yong-Qin\*, YAN Chang-Ling

(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 940 nm GaAs-based VCSEL is reported. The reflector is composed of GaAs and AlO<sub>x</sub>. The effects of the grating parameters of TE-HCG on refractivity are discussed in detail. And the structural characteristics of TE-HCG and TM-HCG are analyzed, especially the influence of their topography errors on the high reflection band. The 940 nm TE-HCG has a large reflection bandwidth of up to 97 nm with its reflectivity for TE incident light more than 99.5%, and the ratio of Ratio of high reflection band to central wavelength is more than 10%. But for TM incident light its reflectivity is less than 90%. It is worth mentioning that the VCSEL with such a TE-HCG can be prepared by one-time epitaxial growth technology, which helps to improve the performance of the device. Furthermore, it greatly reduces the manufacturing difficulty and cost of a VCSEL.

**Key words:** high-refractive-index contrast, subwavelength grating, vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), rigorous coupled wave analysis (RCWA)

**PACS:**

### 引言

与边发射半导体激光器相比,垂直腔面发射激光器有着更为优越的性能,如无像散的圆形光束、发散角小、较低的阈值电流、易于二维阵列集成等,这些优异特性使得 VCSEL 在各个领域得到了广泛

应用,例如消费电子 3D 成像、VR/AR、无人机避让等,尤其是中高端智能手机推出 3D 人脸识别系统,使得 VCSEL 的市场需求呈爆炸式增长。940 nm VCSEL 以更大测距范围使人脸识别,手势识别等应用更加方便,同时其测量精度和感应速度亦有较大

收稿日期:2020-11-05,修回日期:2021-04-21

Received date:2020-11-05, Revised date:2021-04-21

基金项目:国家自然科学基金(11474038),吉林省科技发展计划项目(20200401073GX)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11474038), Jilin Science and Technology Development Plan of China (20200401073GX)

作者简介(Biography): 罗妍(1988-),女,博士研究生,主要从事半导体激光器物理与技术方面的研究。E-mail:luoyan0326@163.com

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

提升。随着5G时代的到来,高宽带、低延时应用的需求,诸如自动驾驶、AR、VR等应用场景都将会在5G环境下实现,而VCSEL将成为这些应用的主要动力。然而,VCSEL存在多模激射以及偏振方向不稳定等缺陷,这将严重影响其在人脸识别等3D感知领域的应用,因此获得性能更优异的VCSEL仍是当前科研人员面临的重要课题。

VCSEL具有均匀对称的圆形谐振腔,有源区有着各向同性的增益结构,各向异性较弱,且在激光器激射时的阈值电流附近两个相互正交的偏振方向会出现激烈的模式竞争效应,随着注入电流大小的改变,两个偏振方向也会发生偏振开关效应,导致输出光偏振不稳定。目前,控制偏振方法主要有电光双折射<sup>[1]</sup>、外腔反馈<sup>[2]</sup>、金属介质光栅<sup>[3]</sup>和浅表浮雕结构<sup>[4]</sup>等。对VCSEL的偏振控制应用最广泛的就是亚波长光栅<sup>[5-6]</sup>,其采用电子束曝光技术在常规VCSEL出光窗口上制备出光栅,利用亚波长光栅独特的衍射特性控制出射光偏振方向沿着正交或平行于光栅条的方向。特别值得关注的是,通过合理设计光栅参数,可以使其具有极高的反射率,取代VCSEL中传统的DBRs反射镜,从而解决因DBRs反射镜带来的器件电阻大和严重的光吸收等问题。

近年来,科研人员采用高折射率对比度亚波长光栅(High-refractive-index Contrast Grating, HCG)作为VCSEL反射镜的研究取得重要进展。2007年美国加利福尼亚大学伯克利分校Michael C. Y. Huang等首次报道了将HCG反射镜应用于VCSEL的研究成果<sup>[7]</sup>。采用HCG作为VCSEL顶部反射镜,在波长0.8~0.88 μm范围中, TM波反射率高于99.9%, TE波反射率低于95%,器件实现了850 nm单模激射,且TM、TE输出功率的偏振抑制比达到20 dB。此后,集成HCG反射镜VCSEL的相关研究引起广泛关注<sup>[8-10]</sup>。2011年法国洛林大学Christyves Chevallier等理论研究了GaSb基HCG反射镜<sup>[11]</sup>,其由SiO<sub>2</sub>/Si对交替构成,反射中心波长2.3 μm,反射带宽118 nm。2013年Christyves Chevallier进一步优化设计了用于2.3 μm GaSb基HCG反射镜<sup>[12]</sup>,该结构由GaAs材料体系构成,中心波长处TM波反射率大于99.5%, TE波反射率低于70%,并具有425 nm带宽。2013年日本东京工业大学的Junichi Kashino等报道了集成a-Si HCG反射镜的980nm VCSEL<sup>[13]</sup>,器件单模激射,阈值电流1 mA,最大输出功率0.5 mW。2020年瑞典查默斯理工大学

Åsa Haglund教授研究团队与中国台湾交通大学卢廷昌教授研究团队合作,成功制作出首个电激发的集成HCG反射镜的GaN基VCSEL,此研究成果荣登四月ACS Photonics期刊,并获选为封面文章<sup>[14]</sup>。

HCG反射镜不仅为VCSEL提供与传统DBR一样甚至更宽的高反射带,而且具有低损耗、偏振稳定的特点,同时可进一步降低器件的制作难度和成本。使用HCG反射镜取代布拉格反射镜,使元件整体厚度减少40%,并让激光极化方向具有可控性,使得元件应用上更具潜力。本文在课题组以往研究的基础上<sup>[15-16]</sup>,仿真研究了用于940 nm VCSEL的GaAs基TE-HCG反射镜,优化了结构参数,并与TM-HCG进行对比,分析二者在结构特性和反射性能上的差异。

## 1 结构设计

940 nm GaAs基高折射率对比度光栅反射镜如图1所示,包括周期 $\Lambda$ ,占空比 $f$ ,光栅层厚度 $T_g$ ,应力缓冲层厚度 $T_l$ ,低折射率亚层厚度 $T_a$ 。HCG光栅的周期小于入射波长,电磁波入射到其表面时,只存在零级衍射,高阶衍射波均为消逝波,此时可以将HCG等效为一层介质薄膜,通过调整周期、占空比等参量可以使其反射率大于99%。采用简单层结构的HCG反射镜取代20~40对DBRs反射镜,将有效解决VCSEL中由于DBRs反射镜带来的器件电阻大和严重的光吸收问题,且大大降低器件的制作难度和成本。结构设计中,引入由AlAs氧化形成的AlO<sub>x</sub>低折射率亚层( $n \approx 1.6$ ),利用其与高折射率GaAs光栅层( $n \approx 3.538$ )形成较大折射率差,进而增加反射带宽度,达到大宽带、高反射率的光学指标。AlAs氧化后厚度会产生变化,为提高光栅的稳定性,在光栅制作中增加厚度 $T_l$ 的GaAs应力缓冲层。由于HCG的TE模与TM模的等效折射率以及能带结构不同,集成HCG后的反射镜两个正交偏振态光波有不同反射率,并且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。设计的HCG作为VCSEL顶部反射镜,替代传统的DBR,具有与VCSEL材料属同体系,可实现HCG与VCSEL集成时一次外延生长,制作工艺简单,易于集成的特点,不仅大大降低了器件的制作难度和成本,而且器件具有低功耗、偏振稳定的性能优势。

HCG光栅参数的优化是设计的关键,不仅使其

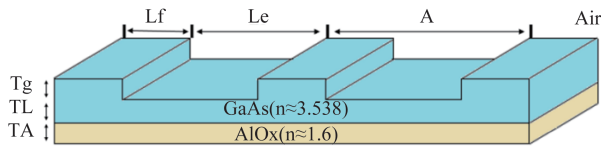


图1 HCG反射镜示意图

Fig. 1 Schematic diagram of HCG

具有较宽的高反射带,同时也要满足 VCSEL 激光发射的条件,HCG 的反射率大于 99.5% 以满足 VCSEL 的腔镜要求。由于亚波长光栅的周期小于入射波长,当电磁波入射到其表面时,只存在零级衍射波,高阶衍射波均为消逝波。亚波长光栅的衍射效率可以表示为<sup>[17]</sup>:

$$D_{ri} = |R_{s,i}|^2 \operatorname{Re} \left( \frac{k_{1,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) + |R_{p,i}|^2 \operatorname{Re} \left( \frac{k_{1,zi}/n_{II}^2}{k_0 n_1 \cos \theta} \right), \quad (1)$$

$$D_{ti} = |T_{s,i}|^2 \operatorname{Re} \left( \frac{k_{1,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) + |T_{p,i}|^2 \operatorname{Re} \left( \frac{k_{1,zi}/n_{II}^2}{k_0 n_1 \cos \theta} \right), \quad (2)$$

其中  $i$  表示衍射级次,  $\theta$  为入射角,  $k_0$  为入射波波矢,  $n_1$ 、 $n_{II}$  分别是入射区与透射区的折射率,  $k_{1,zi}$ 、 $k_{1,zi}$  分别是入射区与透射区中沿  $z$  轴方向的波矢,  $R_{s,i}$ 、 $R_{p,i}$  为横电波和横磁波的电磁场反射,  $T_{s,i}$ 、 $T_{p,i}$  为横电波和横磁波的电磁场透射振幅,  $\operatorname{Re}$  表示取实部。从式 (1-2) 可知光栅的反射率不仅与入射光自身的 TE、TM 分量有关,还与入射角  $\theta$  和光栅自身参数(周期、占空比、折射率)有关,因此可以通过优化相关的参数来提高对应波长入射光的反射率。由于 VCSEL 有源区长度极短,集成 HCG 后,TE、TM 波腔膜会出现微小差异,这是由于反射相位变化造成反射镜穿透深度变化<sup>[18]</sup>:

$$L_{\text{eff}} = -\frac{1}{2} \frac{d\phi_r}{d\beta}, \quad (3)$$

式中,  $\phi_r$  为反射相位,  $\beta$  为波矢。因此,在采用 HCG 代替 P 型 DBR 时,设计中除要考虑其中心波长位置具有高反射率外,还要关注其高反射带的变化,保证腔膜位于高反射带内。

## 2 仿真分析

首先对中心波长 940 nm 的 TE-HCG 仿真分析,设光垂直于低折射率亚层表面入射,通过控制变量法对光栅参数进行模拟并确定优化范围,采用基于严格耦合波理论(RCWA)计算的 Rsoft 软件进行仿真。

从图 2(a)可以看出光栅周期对高反射带的影响较大,且中心波长决定了光栅周期,随着光栅周

期的增加,中心波长向长波长漂移,高反射带也随之改变,光栅周期在 0.702~0.870  $\mu\text{m}$  具有很宽高反射带,而周期的具体取值受 HCG 自身各参数之间的相互影响。根据等效介质理论,HCG 反射镜的偏振特性是一种形式双折射效应,其根本原因是光栅介质对电磁波的周期性调制,因此光栅参数中占空比的优化选择也是非常重要的。图 2(b)中显示占空比在 17.5%~38.6% 很大的范围内均具有很宽的高反射带。图 2(c)是光栅层厚度与波长对应的反射率图。由图看出光栅厚度的变化对中心波长以及反射率的影响非常明显,选择适当的厚度区间才能获得优良的 HCG,当光栅层厚度在 0.148~0.190  $\mu\text{m}$  范围时高反射率带较宽且趋于平缓,且当光栅层厚度在 0.150~0.182  $\mu\text{m}$  范围时反射率高于 99.5%。

高反射带宽与低折射率亚层有着紧密联系,设计的低折射率亚层由富 Al 的 AlGaAs 或 AlAs 氧化而成,氧化过程会产生收缩效应,为了改善其收缩引起的应力问题,设计了应力缓冲层。图 2(d)是应力缓冲层厚度对反射率的影响,从图中看出随着应力缓冲层厚度的增加,高反射带呈周期性变化,结合实际器件的生长技术以及器件的厚度要求,其厚度取值范围为 0.132~0.221  $\mu\text{m}$ 。

图 3 显示低折射率亚层的厚度高于 0.046  $\mu\text{m}$  时均具有很宽的高反射带,它的存在能够显著拓宽高反射带,这是因为它不仅提供了高折射率对比度,同时又充当了光栅衍射波的相位匹配层,有利于提高反射率和带宽。在厚度 0.17  $\mu\text{m}$  时,中心波长处高反射率带宽最宽。

同理,讨论分析了 TM-HCG 的结构参数对中心波长及反射率的影响,表一列出了 TE、TM 两种偏振模式下各参数的优化区间,图 4 给出了 TE-HCG 和 TM-HCG 的反射谱。可以看出,TE-HCG 的高反射带位于 0.888~0.985  $\mu\text{m}$ ,带宽 97 nm,其中 TE 波反射率大于 99.5%,且在此区间 TM 波反射率低于 90%, $\Delta\lambda/\lambda_0=10.3\%$ ;TM-HCG 的反射率大于 99.5% 的带宽 188 nm,且在此区间 TE 波反射率低于 70%, $\Delta\lambda/\lambda_0=20\%$ 。对比分析可知,TM-HCG 具有更宽的高反射带和较好的偏振选择性,但 TE-HCG 具有更大的光栅周期,较小的占空比,更浅的光栅槽深度等优势,可大大降低器件制备的难度。因此对于器件的设计,除了要考虑 HCG 要满足 VCSEL 实现激励所需的高反射带之外,还要考虑实际应用所需的偏

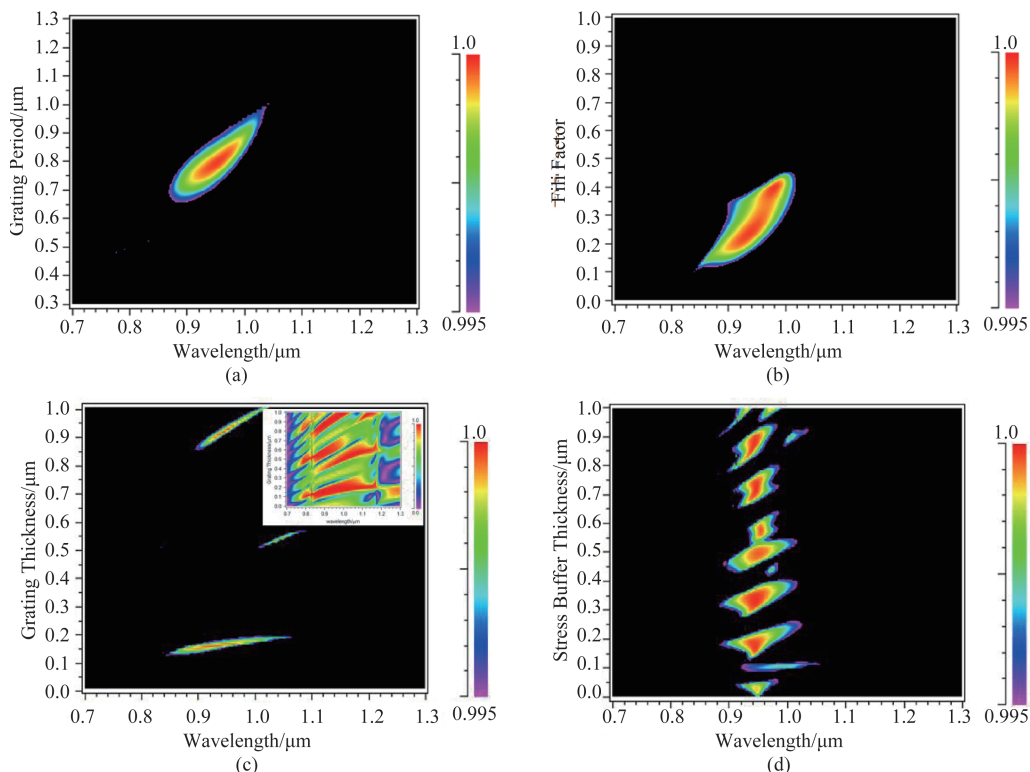


图2 TE模式时不同光栅参数与波长对应的反射率(a)光栅周期,(b)占空比,(c)光栅层厚度,(d)应力缓冲层厚度

Fig. 2 Reflectance of different grating parameters versus wavelength in TE mode (a) grating period, (b) grating thickness, (c) grating thickness, (d) stress buffer layer thickness

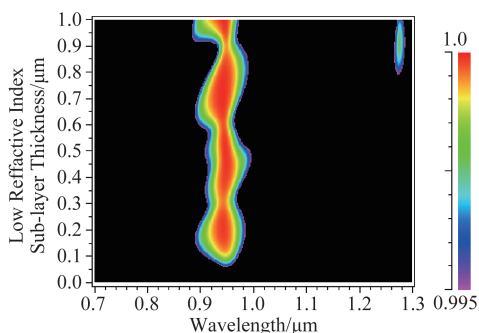


图3 TE模式下低折射率亚层厚度与波长对应的反射率

Fig. 3 Reflectivity as function of low refractive index sub-layer thickness and wavelength in TE mode

振态,特别要考虑实际器件的中心波长及制备方面限制因素的影响。

上述采用严格耦合波方法得到了不同偏振状态下最佳光栅结构参数,但在实际制作过程中,由于受限于微加工技术的控制精度,光栅制作工艺过程中存在误差,实际制作的矩形光栅通常为梯形结构,为此仿真研究了非矩形的光栅形貌对反射镜的反射率及高反射带的影响。图5-6为TE-HCG、TM-HCG光栅上、下占空比之差分别为5%、10%、

表1 TE、TM模式下各个参数优化区间

Table 1 Optimal range of parameters for TE and TM

Parameter	Tolerances for $R_{TE} >$	
	99.5% at $\lambda_0$	99.5% at $\lambda_0$
$T_g$	150~182 nm	213~269 nm
$T_L$	132~221 nm	88~127 nm
$T_A$	140~220 nm	130~185 nm
$\Lambda$	702~870 nm	376~467 nm
$F$	17.5~38.6%	56.5~66.8%

15%的反射谱。通过对比发现,TE-HCG随着光栅上、下部占空比之差的增大,高反射带的带宽变化不大,高反射带的中心向长波方向发生了略微偏移,在占空比之差达到15%时中心波长偏移6 nm,高反射带宽96 nm。而TM-HCG随着光栅上、下部占空比之差的增大,高反射带中心向长波方向发生较大偏移,在占空比之差达到10%时高反射带中心偏移至963 nm,且当占空比之差15%时,高反射带形貌出现严重劣化。由此可见,TE-HCG比TM-HCG具有更大的形貌容差,更有利于实现在垂直腔面发射半导体激光器上的单片集成。

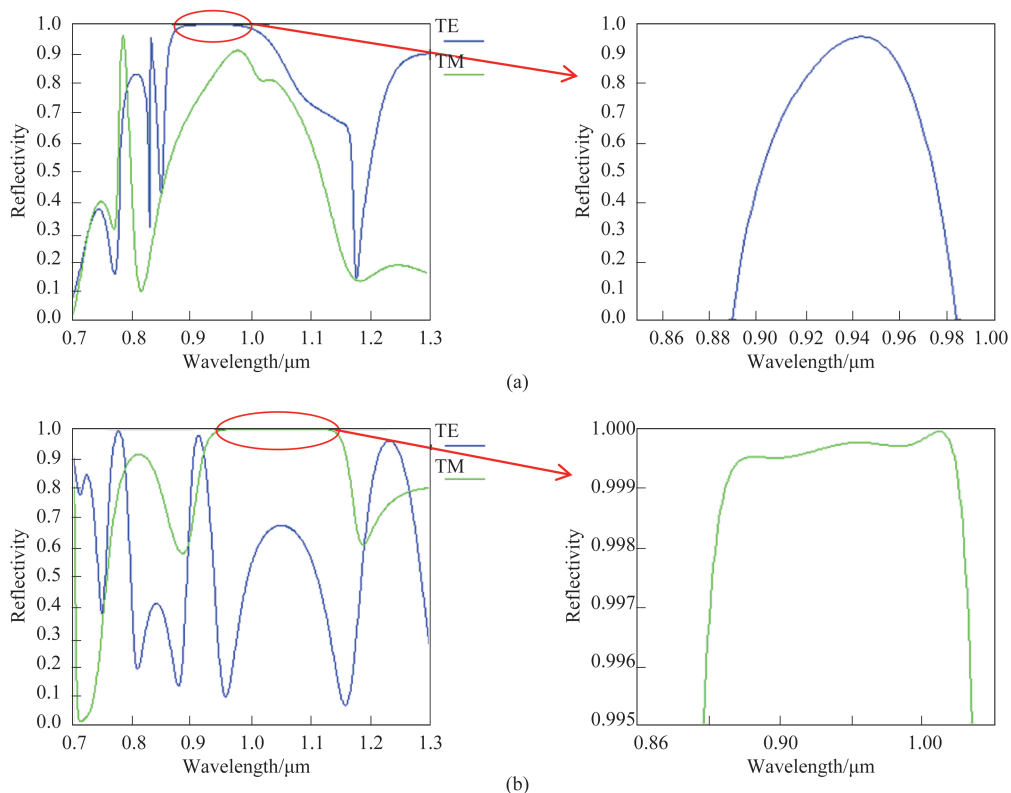


Fig. 4 (a) Reflectivity spectrum of TE-HCG ( $A=0.781 \mu\text{m}, f=0.254, T_g=0.166 \mu\text{m}, T_L=0.189 \mu\text{m}, T_A=0.17 \mu\text{m}$ ), (b) Reflectivity spectrum of TM-HCG ( $A=0.416 \mu\text{m}, f=0.618, T_g=0.242 \mu\text{m}, T_L=0.109 \mu\text{m}, T_A=0.175 \mu\text{m}$ )

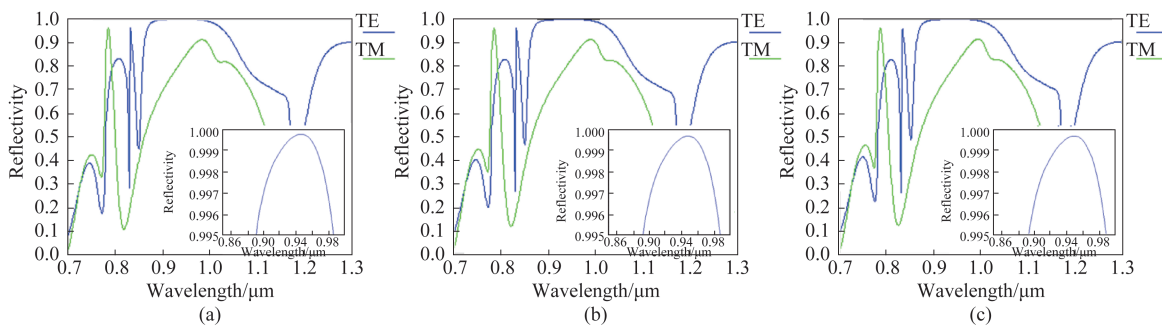


图5 TE-HCG的反射率谱,光栅上、下部占空比差分别为5%、10%、15%

Fig. 5 The reflectivity spectrum of TE-HCG and the fill factor difference between the upper and lower gratings is 5%, 10% and 15%

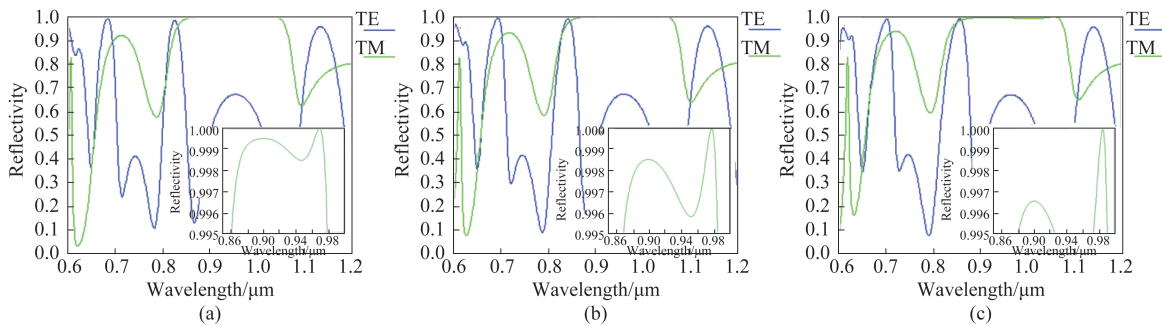


图6 TM-HCG的反射率谱,光栅上、下部占空比差分别为5%、10%、15%

Fig. 6 The reflectivity spectrum of TM-HCG and the fill factor difference between the upper and lower gratings is 5%, 10% and 15%

### 3 结论

采用严格耦合波方法,设计了一种可应用于940 nm VCSEL的TE-HCG,讨论分析了光栅结构中各参数对反射谱的作用规律,以及应力缓冲层、低折射率亚层对反射率和高反射带宽的影响。设计TE-HCG应用于VCSEL的顶部反射镜,在中心波长940 nm处有高反射率宽带宽,在0.888~0.985  $\mu\text{m}$ 波长范围内,TE波反射率大于99.5%的带宽97 nm,  $\Delta\lambda/\lambda_0=10.3\%$ ,且在此区间TM波反射率低于90%。在此基础上,讨论分析了它与TM-HCG在结构和特性上的差异。TM-HCG具有更宽的高反射带和更好的偏振性,但TE-HCG具有更大的光栅周期,较小的占空比,更浅的光栅槽深度等优势,在制作工艺上更易于制备。最后详细对比研究了非矩形光栅形貌对不同偏振态的HCG反射特性的影响,研究表明随着光栅上、下部占空比差值的增大,TE、TM偏振的HCG高反射带均出现窄化且高反射中心均表现向长波方向移动的趋势,但相比之下,TM-HCG受非矩形光栅形貌误差的影响较大。TM-HCG光栅上、下占空比之差达到10%时,中心波长偏移至963 nm,且在占空比之差15%时高反射带形貌出现严重劣化。而TE-HCG的光栅上、下占空比之差达到15%时中心波长偏移6 nm,高反射带宽仍达到96 nm。由此可见,设计的TE-HCG更有利于其在940 nm VCSEL上的单片集成,具有结构简单、低损耗、偏振稳定、制作容差大的特点,可大大降低器件的制作难度和成本。

### References

- [1] XING Jun-Hong, JIAO Ming-Xing, LIU Yun. Design and experimental study of electro-optically tunable single frequency Nd:YAG laser at 1064 nm [J]. *Chin. J. Lasers*(邢俊红,焦明星,刘芸. 电光可调谐1064 nm单频Nd:YAG激光器设计与实验研究. *中国激光*)2014, **41**(3):0302007.
- [2] ZHONG Dong-Zhou, CAO Wen-Hua, WU Zheng-Mao, et al. Vector polarization mode switch mechanism of the vertical-cavity surface-emitting laser with anisotropic optical feedback injection[J]. *Acta Phys. Sin.*(钟东洲,曹文华,吴正茂,等. 各向异性光反馈注入的垂直表面发射激光器的矢量偏振模转换机理. *物理学报*)2008, **57**(3):1548-1556.
- [3] ZHANG Xiang-Wei. Polarization control of high-power vertical-cavity surface-emitting lasers [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics&Fine Mechanics &Physics Academia Sinica, P. R. China(张祥伟. 高功率垂直腔面发射激光器的偏振控制. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2013.
- [4] LI Xiu-Shan. Polarization and high-order mode control of vertical cavity surface emitting lasers [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics & Fine Mechanics &Physics Academia Sinica, China(李秀山. 垂直腔面发射激光器高阶模式及偏振控制. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2015.
- [5] Hofmann W, Chase C, Müller M, et al. Long-wavelength BTJ-VCSEL with high-contrast grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(18):1953-1956.
- [6] Christopher Chase. High Contrast Grating VCSELs: Properties and Implementation on InP-based VCSELs [D]. Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley, 2011.
- [7] HUANG M C Y, ZHOU Y, Chang-hasnain C J. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast sub-wavelength grating[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**:119-122.
- [8] Hashemi E, Bengtsson J, Gustavsson J S, et al. TiO<sub>2</sub> membrane high-contrast grating reflectors for vertical-cavity light-emitters in the visible wavelength regime [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2015, **33**(5):050603.
- [9] Li K, Chase C, Qiao P, et al. Widely tunable 2017-nm VCSEL with high-contrast grating mirror [J]. *Opt. Express*, 2017, **25**(10):11844.
- [10] Chang T C, Hong K B, Kuo S Y, et al. Demonstration of polarization control GaN-based micro-cavity lasers using a rigid high-contrast grating reflector[J]. *Sci. Rep.* 2019, **9**:13055.
- [11] Chevallier C, Fressengeas N, Genty F, et al. Mid-infrared sub-wavelength grating mirror design: tolerance and influence of technological constraints[J]. *IOP science*, 2011, **13**(12):125502.
- [12] Chevallier C, Frédéric Genty, Fressengeas N, et al. Robust design by anti-optimization for parameter tolerant GaAs/AlO<sub>x</sub> High Contrast Grating mirror for VCSEL application [J]. *Journal Of Lightwave Technology*, 2013, **31**(21):1-7.
- [13] Kashino J, Inoue S, Matsutani A, et al. Transverse Mode Control of VCSELs Using Angular Dependent High-contrast Grating Mirror [J]. *IEEE*, 2013, **5**(13):244-245.
- [14] Chang T C, Hashemi E, Hong K B, et al. Electrically injected GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with TiO<sub>2</sub> high-index-contrast grating reflectors [J]. *ACS Photonics*, 2020, **7**(4):861-866.
- [15] XIE Jian-Lai. Design of 2  $\mu\text{m}$  Subwavelength Grating with Wide Broadband and High Reflectivity [D]. Changchun University of Science and Technology(谢检来. 2  $\mu\text{m}$ 波段宽带高反射率亚波长光栅的设计. 长春理工大学), 2018.
- [16] WANG Feng-Ling, CHEN Lei, ZHANG Qiu-Bo, et al. Design of high contrast subwavelength gratings with GaAs-based VCSEL materials[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王凤玲,陈磊,张秋波,等. 与GaAs基VCSEL同材料体系高对比度亚波长光栅的设计. *红外与毫米波学报*) 2020, **39**(1):19-24.
- [17] 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.
- [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 Phys. Sin.* (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.