文章编号：1672-8785(2022)12-0030-07

用于 VCSEL 的 Si 基零对比度光栅反射镜研究

郭 帅 晏长岭 方 铉 郝永芹*

（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：利用严格耦合波理论和时域有限差分方法设计了一种应用于 940 nm 垂直腔面发射激光器的 Si 基零折射率对比度光栅反射镜。对零对比度亚波长光栅(Zero-index-Contrast subwavelength Grating，ZCG)的高反射特性进行了研究，分析了 ZCG 实现宽带高反射的条件。此外，讨论了光栅结构参数对反射性能的影响并计算了制作公差，模拟分析了 ZCG 尺寸与垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser，VCSEL)氧化孔径尺寸对镜面损耗的影响。所设计的 ZCG 带宽可达 280 nm，$\Delta\lambda/\lambda_0=29.8\%$。该反射镜可以替代 VCSEL 中传统的分布式布拉格反射镜，降低了工艺难度和生长成本，同时有利于 VCSEL 与其他 Si 基光电子器件的集成。

关键词：垂直腔面发射激光器；零折射率对比度光栅；严格耦合波理论；时域有限差分

中图分类号：O472+.8 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2022.12.006

Study on Si-Based Zero-Contrast Grating Reflector for VCSEL

GUO Shuai，YAN Chang-ling，FANG Xuan，HAO Yong-qin*

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

Abstract：A silicon-based zero refractive index grating (ZCG) reflector for 940 nm vertical cavity surface emitting laser is designed by using strict coupled wave theory and time-domain finite difference method. The high reflection characteristics of ZCG are investigated，and the conditions for achieving broadband high reflection are analyzed. In addition，the effect of grating structure parameters on reflection performance is discussed and fabrication tolerances are calculated，and the effect of ZCG size and VCSEL oxide aperture size on mirror loss is simulated. The designed ZCG with a bandwidth of 280 nm，$\Delta\lambda/\lambda_0=29.8\%$，can replace the conventional distributed Bragg reflector in VCSELs，reduce the process difficulty and growth cost，and facilitate the integration of VCSELs with other Si-based optoelectronic devices.

Key words：vertical cavity surface emitting laser；zero-contrast subwavelength grating；rigorous coupled-wave analysis；time-domain finite-difference

收稿日期：2022-09-09

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

作者简介：郭帅 (1997-)，男，吉林长春人，硕士研究生，主要从事半导体激光器物理与技术方面的研究。

*通讯作者：E-mail：celery1231cc@163.com

0 引言

自 1979 年问世以来，VCSEL 以其独特的面发射结构以及众多优势(如小体积、低阈值电流、圆形光斑、易于二维集成等[1-4])，在半导体激光器领域引起了广泛的关注。近些年来，Apple 等消费电子厂商采用 VCSEL 作为 3D 感应模块的主要光源，使 VCSEL 激光器市场爆发[5-7]。与此同时，在智能汽车领域，采用 VCSEL 阵列的激光雷达(Light Detection And Ranging，LiDAR)成为自动驾驶必需的关键技术[8]。在快速增长的市场需求下，各大研究机构与厂商纷纷增大研究投入，期望获得低功耗、低成本、高稳定性的器件。典型 VCSEL 的有源区夹在两个分布式布拉格反射器(Distributed Bragg Reflection，DBR)之间，但 DBR 过多的层数会导致器件的串联电阻很大，并且不利于器件的小型化。最近几年，研究人员发现高对比度亚波长光栅(High-index-Contrast subwavelength Grating，HCG)具有宽带高反射率性能，可以在 VCSEL 设计中替代一部分或者全部 DBR 反射镜。用 HCG 替代传统的 p-DBRs [9-10]，在结构上减少了垂直厚度，在工艺上减少了外延材料生长时间和成本，简化了 VCSEL 结构，有效地降低了器件的串联电阻，并且有利于实现 VCSEL 微型化。目前 HCG-VCSEL 已在 850 nm、980 nm 及 1550 nm 等波段实现了单模单偏振激射[9,11-13]。

由同质材料构成的零对比度亚波长光栅(Zero-index-Contrast subwavelength Grating，ZCG)具有较 HCG 更简单的结构。由于易于制造且具有较好的环境热稳定性，ZCG 已作为窄带滤波器而广泛用于气体检测等领域[14-16]。研究表明，ZCG 亦有高反射特性。2014 年，Magnusson R 利用粒子群优化算法设计了一种基于 ZCG 的宽带反射镜。它在 1.5～2.1 μm 波段的反射率达到 99% [17]。2017 年，刘安金等人将 HCG 与 ZCG 作为 VCSEL 反射镜进行了理论对比分析。研究表明，两种类型的光栅都具有高于 99.5% 的反射率。与 HCG 相比，ZCG 具有更好的模式选择性，同时 ZCG 的制作工艺相对简单，但具有更严格的制造公差[18]。2018 年，Hogan B 等人通过在 ZCG 结构中引入刻蚀停止层，实现了对 ZCG 光栅深度的精准把控。但目前针对 ZCG 用于 VCSEL 的研究仍处于探索阶段，需要科研人员不断地完善其设计理论和制备技术[19]。

ZCG 反射镜的出现使得 VCSEL p 面反射镜多了一种选择。它的制作工艺简单，对于器件整体制备是高度简化的，同时其宽带高反射率性能不亚于 HCG 反射镜。本文在课题组以往研究的基础上[20-21]，探索用于 940 nm VCSEL 的 Si 基 ZCG 反射镜。利用严格耦合波分析(Rigorous Coupled Wave Analysis，RCWA)和时域有限差分法(Finite Difference Time Domain，FDTD)对其进行了仿真分析，深入研究了 ZCG 的反射特性，讨论了光栅制造公差对反射性能的影响。该研究对于实现 ZCG 与 VCSEL 的集成具有重要意义。

1 理论模型

如图 1 所示，ZCG 的结构从上至下分为光栅层和同质层。其中光栅层与同质层采用同一种材料，构成零对比度折射率。与需要去除光栅层下方的牺牲层而形成空气悬浮的 HCG 相比，这种设计减小了结构应力，提高了器件的稳定性，简化了制作工艺。将 Si 作为光栅材料，在 GaAs 表面采用等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition，PECVD)工艺沉积制成。PECVD 具有基底温度低、沉积速率快、成膜质量好等优点[22]，可以高效并低成本地将 ZCG 与 VCSEL 进行集成。而且，Si 与 GaAs 基材料具有较好的兼容性，已实现 Si 基底上生长的 GaAs 半导体激光器[23]。另外，Si 基 ZCG 还有利于 VCSEL 与其他 Si 基光电子器件的高效集成。

采用 RCWA 和 FDTD 对 ZCG 的反射特性以及光场进行仿真。RCWA 采用周期性边界条件，具有较快的计算速度并且占用较少的计算机内存。在 ZCG 设计的过程中可以迅速找

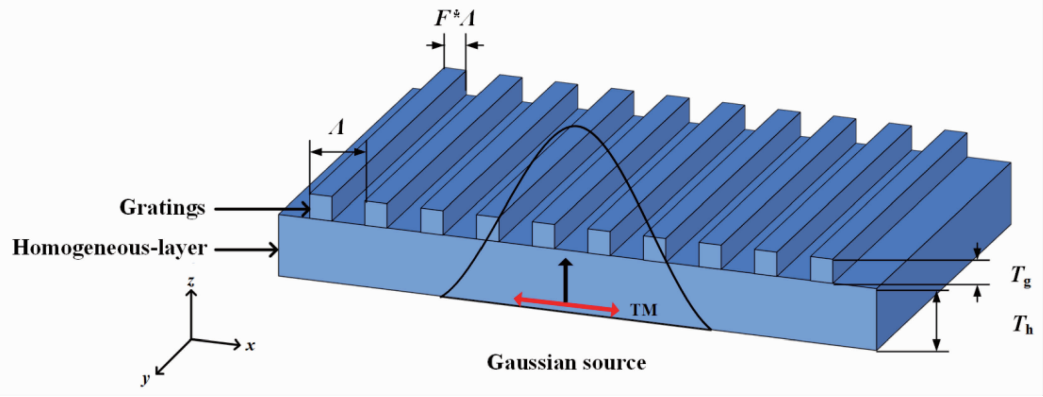

图 1 ZCG 的结构示意图

到满足宽带高反射条件的光栅参数。FDTD 方法将仿真空间网格化，求解三维矢量麦克斯韦方程；通过时域递推模拟波的传播过程，得出场分布，从时域信号中获得宽波段的稳态连续波结果。利用 FDTD 可以精确地得到 ZCG 光场仿真结果。设光栅的周期性方向为 x，入射光的垂直方向为 z，光由同质层侧垂直入射光栅。在应用 RCWA 仿真时，光栅被视为一维周期结构，即 x 方向具有无限周期，y 方向是无限长的，左右边界都具有周期性，同时光源采用平面波。FDTD 模拟的入射光源为高斯光源。相较于平面波，高斯光源更加符合器件出光模式。高斯光源存在两种偏振方向：横向磁场(Transverse Magnetic Field，TM)，其电场方向为 x 方向；横向电场(Transverse Electric Field，TE)，其电场方向为 y 方向。图 1 为 ZCG 的结构示意图。

2 仿真分析

图 2 模拟了 ZCG 光栅周期与波长对应的反射图谱，其中紫色区域表示反射率高于 99.5%，此时反射镜可以满足 VCSEL 激射条件。从图中可以看到，ZCG 的光栅周期与高反射带中心波长呈明显的正相关，光栅周期增大 100 nm，高反射带向长波方向偏移 22 nm 左右。图 3 表示 ZCG 在光栅周期为 390 nm 时的反射率图，其中蓝色线和绿色线分别为零级衍射和一级衍射。在高反射带范围内，零级衍射效率接近于 1，一级衍射效率则为 0。ZCG 的反射曲线出现了许多异常现象，其零级衍射的反射曲线中出现许多突然的转折点。这一现象被称为瑞利异常，且伴随着低阶衍射级的出现和消失。在图 3 的插图中可以明显观察到这一现象。在 ZCG 的反射曲线中还出现了一些平滑的光谱变化。这是表面或引导模激发引起的共振异常，使反射谱中出现高反射带。

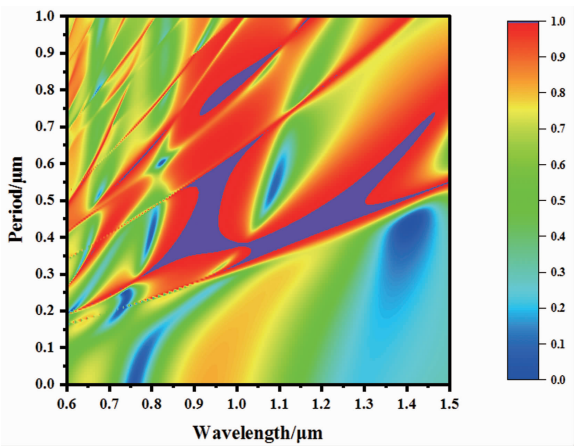

图 2 TM 模式下 ZCG 光栅周期与波长对应的反射谱

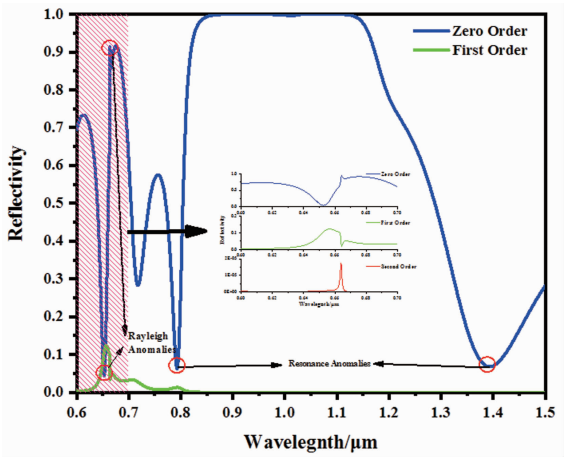

图 3 ZCG 在光栅周期为 390 nm 处的反射曲线

在 ZCG 反射镜的实际制备过程中，光栅实际结构参数存在误差。在 ZCG 设计中，应充分考虑光栅制造公差对器件反射性能的影响。表 1 给出了 $R\geqslant 99.5\%$ 时 ZCG 光栅周期 Λ、占空比 F、光栅厚度 T_g 和同质层厚度 T_h 的取值范围和带宽最大时的最优值。值得关注的是，由于光栅厚度直接影响布洛赫模间的干涉效应，光栅厚度相较于其他结构参量更加敏感，对应的制造公差也较小。图 4 给出了优化后的 TM-ZCG 反射谱。TM 偏振的高反射带位于 0.85～1.13 μm，带宽为 280 nm，$\Delta\lambda/\lambda_0=29.8\%$，同时 TE 偏振反射率低于 95%，具有明显的偏振选择性。

表 1 ZCG 各结构参数的取值情况($R\geqslant 99.5\%$)

结构参数	取值范围	最佳值
Λ	365～588 nm	390 nm
F	0.48～0.70	0.63
T_g	0.243～0.275 nm	255 nm
T_h	60～270 nm	200 nm

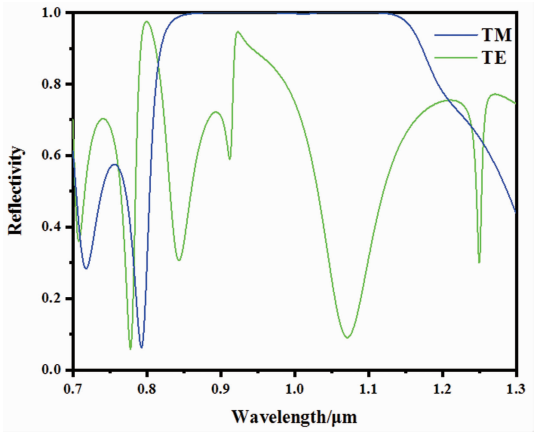

图 4 采用优化结构参数时的 TM-ZCG 反射曲线

在电子束直写技术形成光栅图形的过程中，光栅周期在设计版图过程中通过程序直接控制，制造误差相对较小；但占空比受曝光剂量较大的影响，不易精确控制。ZCG 的高反射率是各光栅参数共同作用的结果，因此可以通过仿真设计提高光栅厚度和占空比的制造容差。图 5 仿真了 ZCG 在 940 nm 处光栅厚度与占空比的反射谱，高反射率区域呈现“S”形。区域 1 中，ZCG 在较宽的占空比范围内都具有高反射率，占空比的制造容差范围为 50%～70%。而在区域 2 中，占空比的制造容差较小，光栅厚度的制造容差增至 250 nm～340 nm，相较于区域 1 提升了 3 倍。在 ZCG 设计和制造中，可以动态地选择光栅参数，在 ZCG 实现高反射率的同时具有更大的制造容差。图 6 计算了 ZCG 在不同光栅倾斜角度下的反射率。仿真结果显示，ZCG 在 0～13°光栅倾斜角度范围内仍保持高反射率，降低了光栅实际制作时的难度。

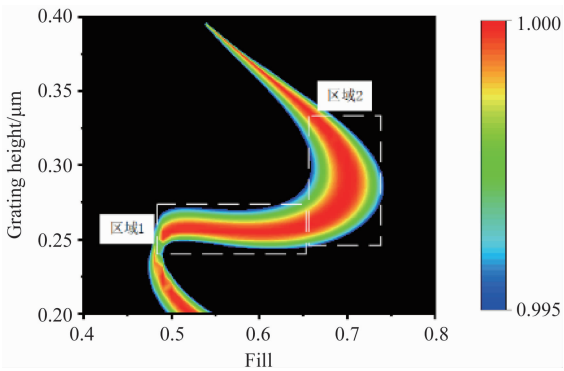

图 5 TM 模式下 ZCG 光栅厚度与光栅占空比的反射谱

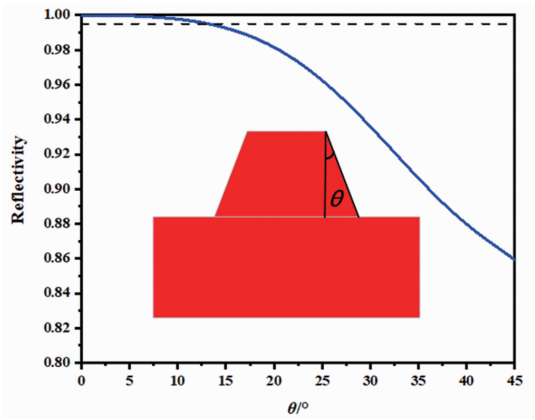

图 6 ZCG 在不同光栅倾斜角度下的反射曲线(虚线表示 $R=0.995$)

通过 FDTD 方法计算用于 VCSEL 的 ZCG 反射镜稳态场分布。为了使仿真结果更加符合器件的实际情况，在仿真模型中考虑了 VCSEL 的 GaAs 衬底以及用于保护器件的 SiO_2 钝化层，其中钝化层的厚度为 200 nm。光场分布如图 7(a)所示，光场能量主要集中在光栅齿中。图 7(b)给出了图 7(a)在 $x=0$ 时光场沿着

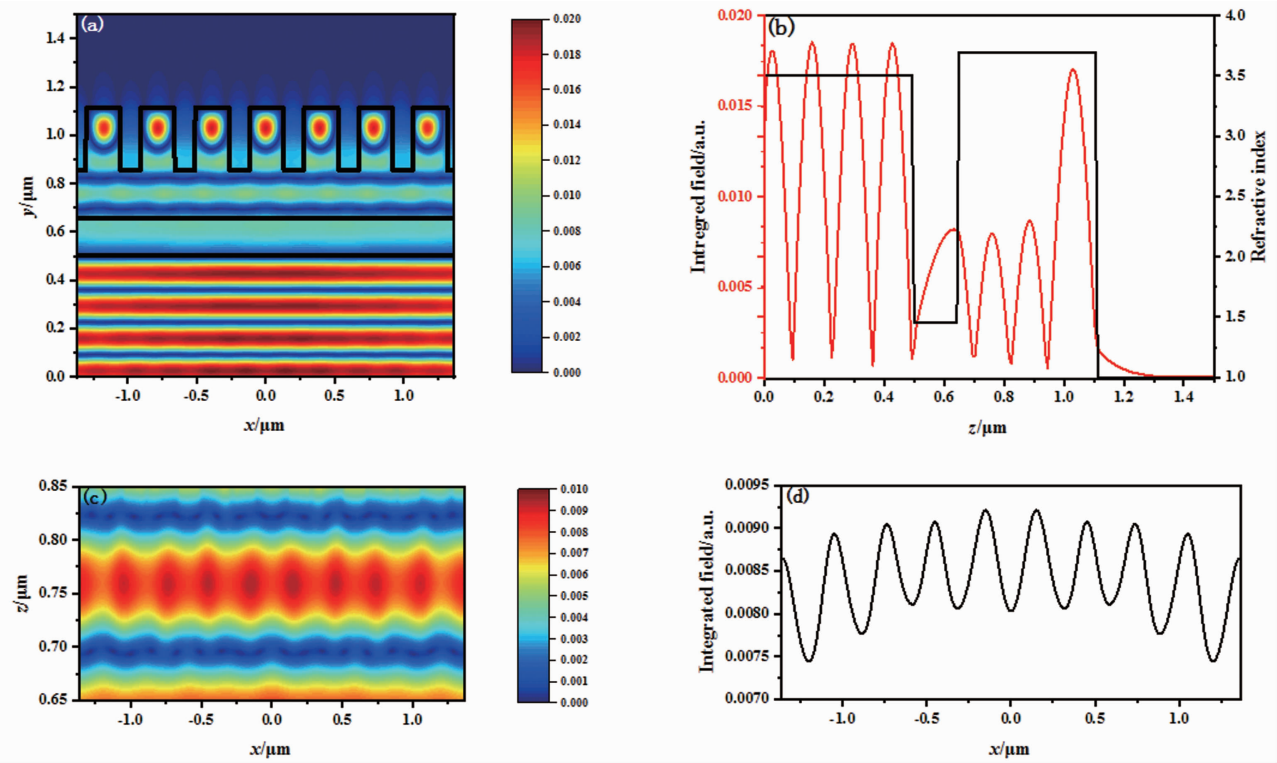

图 7 TM 模式下 ZCG 的光场分布：(a)x-z 平面下的光场分布；(b)在 $x=0$ 处光场沿着 z 向的分布；(c)ZCG 同质层 x-z 平面下的光场分布；(d)ZCG 同质层中心横截面的光场分布

z 向的分布。当光场传播到 ZCG 光栅之外的区域后，能量迅速下降至 0，此时光场在光栅界面处产生了相消干涉，实现了接近 100%的反射。从图 7(c)和图 7(d)观察到，同质层光场出现了对称周期分布，此时同质层在 ZCG 中充当波导层，ZCG 的同质层诱导了光栅模和波导模之间的耦合，从而提高了高反射带的波长范围。

光栅尺寸和 VCSEL 氧化孔径的关系直接影响 ZCG 的镜面损耗。为使模拟更加接近器件的实际情况，用 FDTD 方法仿真计算 ZCG 的反射率，改变光栅尺寸和氧化孔径，根据反射率计算出 ZCG 的镜面损耗。从图 8 的仿真结果中可以看出，当氧化孔径大于光栅尺寸时，ZCG 具有较大的镜面损耗。这是因为 ZCG 高反射镜不能覆盖整个光束，导致光能量损失。随着光栅尺寸的增大，镜面损耗逐渐减小，直到光栅尺寸增大至与氧化孔径大小大致相同时，镜面损耗不会发生显著变化。在激光器设计的过程中，要充分考虑光栅尺寸和氧化孔径对 ZCG 反射镜的影响，同时在设计高功率大氧化孔径的 VCSEL 时，应尽可能选择较大的光栅尺寸，降低反射镜的镜面损耗。

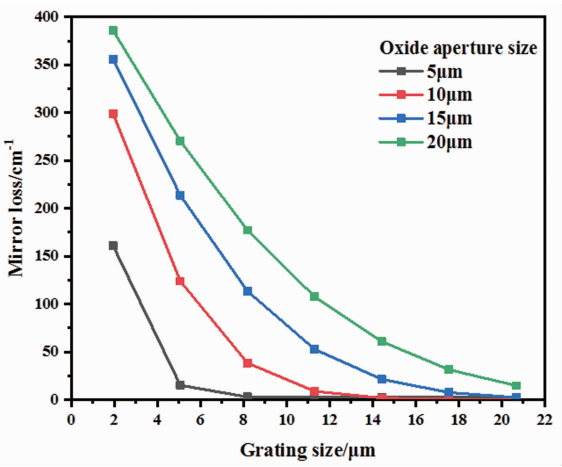

图 8 ZCG 在不同 ZCG 尺寸与氧化限制孔径尺寸下的镜面损耗

3 结束语

利用 RCWA 和 FDTD 方法，仿真研究了应用于 940 nm VCSEL 的 Si 基 TM-ZCG 反射镜，分析了 ZCG 的高反射特性。通过导模共

振理论与光场计算分析了 ZCG 实现宽带高反射率的原因，表面和引导模的激发引起了共振异常，ZCG 的同质层诱导了光栅模和波导模之间的耦合，提高了高反射带的带宽。考虑光栅实际制备过程中结构参数误差对反射性能的影响，设计了具有较大制造公差的 ZCG 反射镜，同时 ZCG 在光栅倾斜角度为 0～13°的范围内仍具有高反射率。设计的 TM-ZCG 的反射带宽达 280 nm，$\Delta\lambda/\lambda_0=29.8\%$，反射带宽度远远高于传统的 DBR 反射镜，完全能够满足激光器激射的要求。分析了光栅尺寸与氧化孔径大小对 ZCG 反射性能的影响，光栅尺寸与氧化限制孔径不匹配会导致反射镜出现较大的镜面损耗。设计的 Si 基 ZCG 制作工艺简单，器件的稳定性好，制作容差大，能够降低 VCSEL 器件的制作难度和成本，同时有利于 VCSEL 与其他 Si 基光电子器件的高效集成。接下来的工作是实现 ZCG 在 VCSEL 上的实际制备与测试，并研究其与器件集成后的特性以及对器件性能的改善作用。

参考文献

[1] Averlant E, Tlidi M, Thienpont H, et al. Experimental Observation of Localized Structures in Medium Size VCSELs [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(1): 762-772.

[2] Kasahara D, Morita D, Kosugi T, et al. Demonstration of Blue and Green GaN-Based Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers by Current Injection at Room Temperature [J]. *Applied Physics Express*, 2011, **4**(7): 072103.

[3] Shang J, Cong C, Wang Z, et al. Room-Temperature 2D Semiconductor Activated Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers [J]. *Nature Communications*, 2017, **8**(1): 1-7.

[4] Zhang J Y, Li X, Zhang J W, et al. Research Progress of Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, **41**(12): 1443-1459.

[5] Cheng C H, Shen C C, Kao H Y, et al. 850/940-nm VCSEL for Optical Communication and 3D Sensing [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, **1**(3): 180005.

[6] Li H Q, Ma X D, Yuan D Y, et al. Heterogeneous Integration of a III-V VCSEL Light Source for Optical Fiber Sensing [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(18): 4158-4161.

[7] Larsson A. Advances in VCSELs for Communication and Sensing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(6): 1552-1567.

[8] Kuo H C. High-Speed and High-Power 940 nm Flip-Chip VCSEL Array for LiDAR Application [J]. *Crystals*, 2021, **11**(10): 1237.

[9] Huang M, Zhou Y, Chang-Hasnain C J. A Surface-Emitting Laser Incorporating a High-Index-Contrast Subwavelength Grating [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 119-122.

[10] 刘安金. 单模直调垂直腔面发射激光器研究进展 [J]. **中国激光**, 2020, **47**(7): 63-78.

[11] Huang M C Y, Zhou Y, Chang-Hasnain C J. Nano Electro-mechanical Optoelectronic Tunable VCSEL [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(3): 1222-1227.

[12] Haglund E, Gustavsson J S, Bengtsson J, et al. Demonstration of Post-growth Wavelength Setting of VCSELs Using High-Contrast Gratings [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(3): 1999-2005.

[13] Chase C, Rao Y, Hofmann W, et al. 1550 nm High Contrast Grating VCSEL [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(15): 15461-15466.

[14] Foland S, Swedlove B, Nguyen H, et al. One-Dimensional Nanograting-Based Guided-Mode Resonance Pressure Sensor [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, **21**(5): 1117-1123.

[15] Mace L, Gauthier-Lafaye O, Monmayrant A, et al. Design of Angularly Tolerant Zero-Contrast Grating Filters for Pixelated Filtering in the Mid-IR Range [J]. *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, 2017, **34**(4): 657-665.

[16] Niraula M, Yoon J W, Magnusson R. Single-Layer Optical Bandpass Filter Technology [J].

Optics Letters, 2015, **40**(21): 5062-5065.

[17] Magnusson R. Wideband Reflectors with Zero-Contrast Gratings [J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(15): 4337-4340.

[18] Liu A, Zheng W, Bimberg D. Comparison Between High- and Zero-contrast Gratings as VCSEL Mirrors [J]. *Optics Communications*, 2017, **389**: 35-41.

[19] Hogan B, Lewis L, Romero-Vivas J, et al. Resonant Gratings with an Etch-Stop Layer and a Fabrication-Error Tolerant Design [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(10): 13205-13213.

[20] 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 [J]. **红外与毫米波学报**, 2019, **38**(2): 228-233.

[21] 罗妍, 郝永芹, 晏长岭. 940 nm VCSEL 高折射率对比度亚波长光栅反射镜的设计 [J]. **红外与毫米波学报**, 2021, **40**(6): 834-839.

[22] Nagasawa H, Shigemoto H, Kanezashi M, et al. Characterization and Gas Permeation Properties of Amorphous Silica Membranes Prepared via Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition [J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, **441**: 45-53.

[23] 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.