

基于超构表面光栅反射镜的垂直腔面发射激光器*

罗妍^{1) 2)} 郝永芹^{2†)} 闫观鑫²⁾ 林希宇²⁾ 吕朋林³⁾

- 1) (长春大学电子信息工程学院, 长春 130022)
- 2) (长春理工大学, 高功率半导体激光器国家重点实验室, 长春 130022)
- 3) (东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林 132000)

摘要: 研究制备了采用超构表面光栅 (MSG) 作为高反射率耦合输出镜的垂直腔面发射激光器 (VCSEL)。超构表面光栅由GaAs/AlO_x构成, 且光栅齿下包含一个与其同为GaAs材料的同质亚层, 从而形成零对比度界面, 可以有效降低界面应力, 而且仿真结果表明其对MSG的反射特性具有调制作用。实验结果表明, MSG-VCSEL实现了室温下稳定的TE偏振激射, 工作波长940 nm, 阈值电流 2mA, 25mA时单模光功率1.76mW, 且能够在整个工作范围内保持稳定的单模状态。这种与 VCSEL 同材料体系、结构简单的 MSG, 不仅便于器件的单片集成与微型化, 更以锁偏振、单模态的稳定输出为光谱学、原子钟等精密计量场景提供核心性能保障。

关键词: 超构表面光栅, 垂直腔面发射激光器, 偏振, 单模

基金: 基于半导体激光器的精密控制研究项目 (编号2024JBE02L19), 吉林省科技发展计划项目 (编号20200401073GX)。

同等贡献作者。

† 通信作者. E-mail: *celery1231cc@163.com

第一作者. E-mail: luoy@ccu.edu.cn

1 引言

VCSEL凭借其低阈值电流、高调制带宽、单纵模以及天然的高密度二维集成等优势, 已成为激光通信^[1-5]、激光雷达^[6-8]、生物医学^[9,10]以及3D传感^[11-16]等领域的理想光源。然而, 由于VCSEL固有的结构特性, 当其氧化孔径大于4 μ m时器件就表现出多模激射状态, 多模振荡的叠加不仅使共振谱展宽, 而且易出现模式竞争, 从而导致输出光谱和光功率的不稳定。此外, 由于VCSEL对称的圆形结构和DBRs反射镜均缺乏各向异性, 器件的偏振性较差, 而许多应用, 如量子通信、光谱学和原子钟, 都需要其在稳定且确定的偏振状态下运行^[17-21]。

2007年, 美国伯克利的Connie Chang-Hasnain研究团队首次报道了集成高对比度亚波长光栅反射镜的VCSEL^[22], 成功采用由GaAs/空气制成的悬浮亚波长光栅替代了P

型分布布拉格反射镜（DBRs），器件在850 nm波长下实现 TM偏振的单模激射。这一成果的发布，为探索VCSEL新型反射镜技术提供了一种有效且极具潜力的方案。此后，亚波长光栅反射镜及其在VCSEL应用的研究受到国际社会的广泛关注，使得这种新型反射镜的设计理论及其与VCSEL的集成方面均取得重要进展^[23-33]。例如，2013年，日本学者制备了以a-Si 高对比度光栅作为顶部反射镜的VCSEL^[26]。2020年，瑞典和台湾学者联合研制了首个集成超构表面光栅反射镜的电注入GaN基VCSEL^[29]。2022年，中国科学院半导体研究所的刘金安等报道国内首个集成空气悬浮式超构表面光栅反射镜的VCSEL，实现 TM偏振的单模激射^[31]。

文中设计并制备了由GaAs/AlOx构成的MSG作为高反射率耦合输出镜的VCSEL，该反射镜与VCSEL主体结构属同材料体系，无需额外生长或键合，即可与VCSEL单片集成，且因MSG光栅齿下包含一个与其同为GaAs材料的同质亚层，从而形成零对比度界面，有利于提高其长期工作的稳定性。仿真研究了TE偏振态下MSG反射特性，及同质亚层对MSG反射特性的调制作用，并详细分析了光栅形貌及入射角偏差等对MSG高反射带的影响。实验制备了MSG-VCSEL，器件展现出TE 偏振下的单模激射，工作波长 940nm，阈值电流 2mA，最大单模输出功率 1.76mW，且在整个工作范围内能保持稳定的单模运行。

2 理论模型及仿真计算

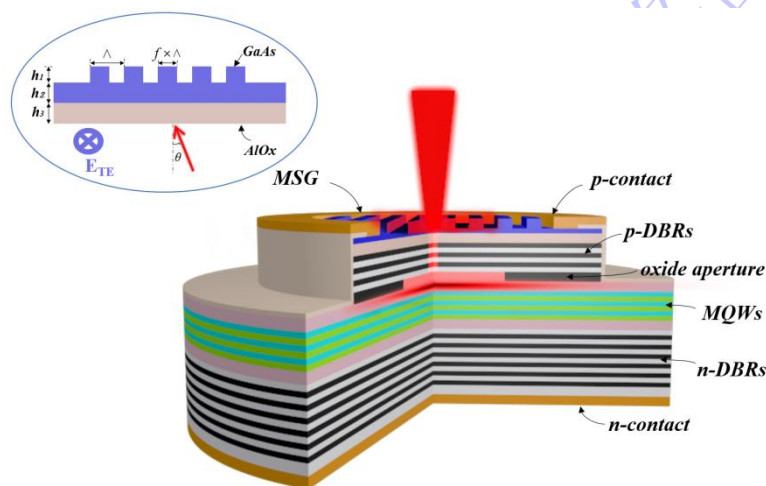


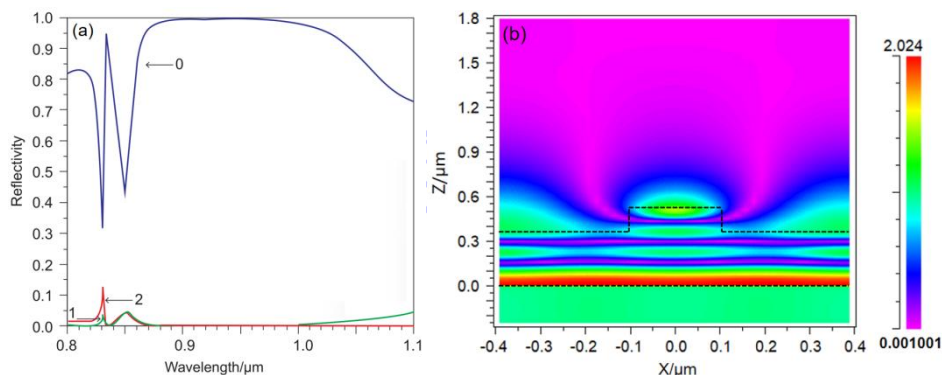
图1 MSG-VCSEL结构示意图, 放大图为MSG反射镜的截面示意图

Fig.1. Schematic diagram of the MSG-VCSEL structure, with the enlarged view showing the cross-sectional schematic diagram of the MSG reflector.

设计的MSG-VCSEL结构如图1所示。n-DBRs作为下反射镜由37对

$\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}/\text{GaAs}$ 构成，多量子阱有源区 (MQWs) 包含3个 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 量子阱，势垒材料为 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ，4对 $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}/\text{GaAs}$ 形成的P-DBRs和其上方的MSG共同构成上反射镜。MSG的光栅及其同质亚层材料均为GaAs ($n=3.52$)，而 AlO_x ($n=1.66$) 作为相位匹配层位于同质亚层下方， Λ 为光栅周期， f 为占空比， h_1 、 h_2 、 h_3 分别代表光栅层、同质亚层及相位匹配层的厚度。该结构优势在于：由AlAs氧化形成的低折射率相位匹配层 AlO_x 无需额外的生长工艺或刻蚀牺牲层技术，这有利于器件的单片集成，特别是同质亚层 h_2 不仅调制反射谱，而且将有效缓解相位匹配层制备中产生的应力，对提高光栅的稳定性具有重要意义。这种简单的薄层结构即能实现传统几十对DBRs的功能，不仅显著简化VCSEL器件结构并有利于改善器件的模式和偏振等性能。

MSG可被视为一维等效的超构介质薄膜，具备“等效介质”行为与“超构原子”调控的双重属性，从而突破了传统光栅的衍射极限，实现了对光波的相位、偏振等多维度的自由调控。由于超构光栅界面支持覆盖 2π 的突变相位分布，可对光束波前进行任意调控，其调控机制依赖于导模共振与布拉格散射的耦合行为，适合采用严格耦合波方法对MSG的反射特性进行仿真。设定光从MSG的 AlO_x 侧垂直入射 ($\theta = 0^\circ$)。图2a为仿真计算的TE偏振光入射时不同衍射级的反射谱 (光栅参数： $\Lambda = 0.781\mu\text{m}$ ， $f = 25.4\%$ ， $h_1 = 0.166\mu\text{m}$ ， $h_2 = 0.189\mu\text{m}$ ， $h_3 = 0.17\mu\text{m}$)。可以看出，在中心波长940nm附近，MSG仅存在0级衍射，反射率接近于1的高反射带宽约100nm，其衍射的光场图 (图2b) 也可以看出，在其上方几乎无能量透射出去。图2c可以看出，同质亚层对反射谱的调制作用明显，反射率超过99.5%的高反射区随其厚度呈非连续性且明显的带宽变化，因此对亚层的讨论分析非常必要。



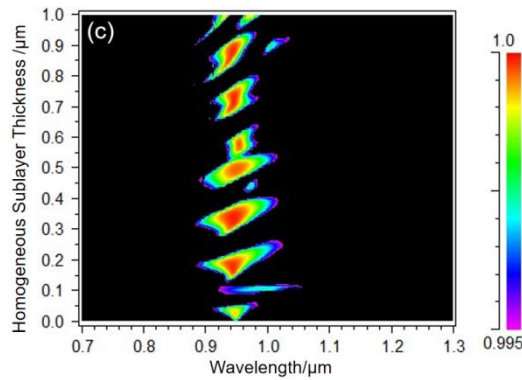


图2 TE偏振光从AlOx 侧垂直入射, (a)MSG不同衍射级的反射谱; (b)衍射的光场图; 及(c)MSG反射率随同质亚层厚度 h_2 的变化

Fig. 2. TE-polarized light is incident vertically from the AlOx side, (a) reflection spectra of different diffraction orders of MSG; (b) diffracted optical field patterns; (c); and the variation of MSG reflectivity with the thickness h_2 of the homogeneous sublayer; (c) variation of MSG reflectivity with the thickness h_2 of the homogeneous sublayer.

为便于MSG与VCSEL的集成, 要考虑实际光栅的侧壁形貌及入射光角度等对MSG反射特性的影响。图3讨论分析了光栅侧壁倾角 ψ 和入射角 θ 对TE-MSG反射率的影响, 并考虑了不同偏振入射光的反射特性差异。如图3a所示, TE入射光在光栅侧壁倾角 ψ 达到 15° 时, 其高反射带中心波长由940nm红移至946nm, 高反射带($R > 99.5\%$)略有变窄, 由97nm降至96nm, 说明TE-MSG具有很大的形貌容差。同时可以看出, TM偏振光的反射率均低于90%, 只有TE光表现出大于99.5%的高反射带, 表明其强的偏振选择性。图3b中, TM光的反射率随着入射角 θ 略有增加, 但其反射率仍低于90%, 无法满足VCSEL的激射条件。而当入射角 θ 大于 3° 时, TE光的反射率降至95%以下。仿真结果预示即使在较大氧化孔VCSEL中, 高阶横模将因大发散角被角度滤波抑制, 从而使基横模成为唯一激射模式。这与传统的单模VCSEL利用小氧化孔(一般小于 $4\mu\text{m}$)的衍射损耗抑制高阶模激射的物理机制有所不同。表1列出了优化的TE-MSG各个参数取值范围。

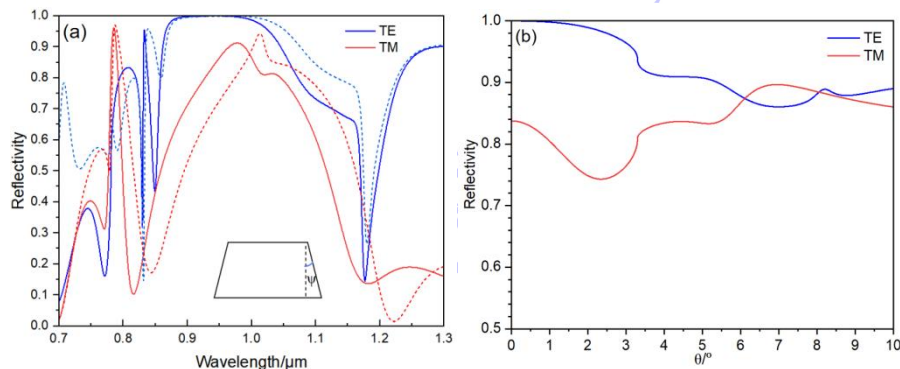


图3 (a)不同光栅侧壁倾角的TE-MSG反射谱, 实线代表 ψ 为 0° , 虚线代表 ψ 为 15° , (b)TE-MSG反射率随入射角 θ 的变化曲线

Fig. 3. (a) TE-MSG reflection spectra for different grating sidewall inclination angles, the solid lines represent $\psi=0^\circ$ and the dashed lines represent $\psi=15^\circ$; (b) curves showing the variation of TE-MSG reflectivity with the incident angle θ .

表1 TE-MSG反射镜的各参数优化区间 ($R_{TE} > 99.5\%$)
Table 1. optimization ranges of various parameters for the te-msg reflector ($R_{TE} > 99.5\%$)

Parameter	Tolerances
Λ	702-870nm
f	17.5-38.6%
h_1	150-182nm
h_2	132-221nm
h_3	140-220nm
ψ	0-15°

3 实验

MSG-VCSEL 的制备工艺与标准 VCSEL 的相似，特别之处在于MSG的制备和高品质一步双域氧化的控制。实验选用Aixtron公司的MOCVD进行外延生长，由于设计的MSG与VCSEL都属于GaAs材料体系，可通过一次外延生长实现，这对降低器件工艺复杂性和难度意义重大，同时外延生长技术又能提高MSG膜层厚度的控制精度。图4a为MSG-VCSEL外延片的局部SEM照片，可以看到实际生长的相位匹配层为AlAs，且其厚度大于设计值，这是考虑了AlAs氧化后的收缩效应。光栅几何参数和形貌直接影响MSG的反射性能，为此，采用电子束曝光和感应耦合等离子体刻蚀技术（ICP）进行光栅的制备。ICP腔室内气体Cl₂: Ar: BCl₃=20:5:5，通过优化腔室压强及ICP功率等工艺参数，实现了满足设计要求的近矩形光栅。进行一步双域氧化时，由于同时涉及氧化孔径处AlGaAs的局部氧化以及用于形成相位匹配层的AlAs全部氧化，既要保证精确地控制氧化孔径（约10 μ m），又要保证制备出高品质全氧化的相位匹配层AlO_x。为此，需要合理设计台面与氧化孔径的尺寸，同时通过调控氧化速率和采用氧化后阶跃式的热处理方法^[34]，缓慢充分地释放应力以进一步提高氧化的品质。图4a的内插图展示了制备的MSG的SEM照片，其中 $\Lambda=750\text{nm}$ ，占空比 $f=28\%$ ，

$h_1=170\text{nm}$, $h_2=200\text{nm}$, 各参数均处于容差范围内。氧化后形成的 AlOx 相位匹配层 $h_3=200\text{nm}$, 其厚度较原 AlAs 层明显减少, 但解理后仍无断裂或脱层等现象, 这归功于同质层对应力的有效释放和高品质氧化控制技术。图5为制备的MSG-VCSEL的金相显微照片, 内插图放大出光孔处的照片。

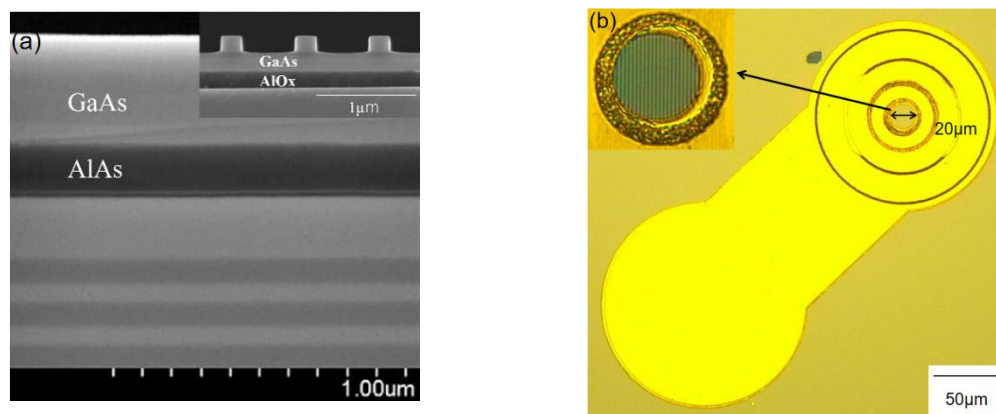


图4 (a) 制备的MSG的横截面扫描电子显微镜 (SEM) 照片; (b) MSG-VCSEL 的金相显微照片
Fig. 4. Cross-sectional scanning electron microscopy (SEM) image of the fabricated MSG; (b) Metallographic micrograph of the MSG-VCSEL.

4 MSG-VCSEL 的特性分析

MSG-VCSEL在片测试时的发光照片如图5a所示, 图5b为不同偏振态时测试的光谱, 可以看出器件只工作在TE偏振态下, 工作波长940nm, 且单模激射。如图5c所示, 激射波长随着温度的红移速率为 $0.06\text{nm}/^\circ\text{C}$, 红移主要源于带隙、折射率和腔长随温度的变化。图5d、e展示了器件在室温连续 (CW) 状态下测试的远场图和L-I-V曲线。可以看出, 器件的阈值电流为2mA, 电阻约 28Ω , 25mA时输出功率达1.76mW。且在7.5倍阈值电流下, MSG-VCSEL仍具有较对称的高斯远场分布。当电流达到25mA时, 尽管远场形状略有畸变, 但器件仍保持单模工作状态, 表明器件在整个工作过程中均能够保持稳定的单模激射状态, 这归因于MSG对入射光角度的高敏感度性, 这使得高阶模受到抑制, 从而使基横模成为唯一激射的模式。

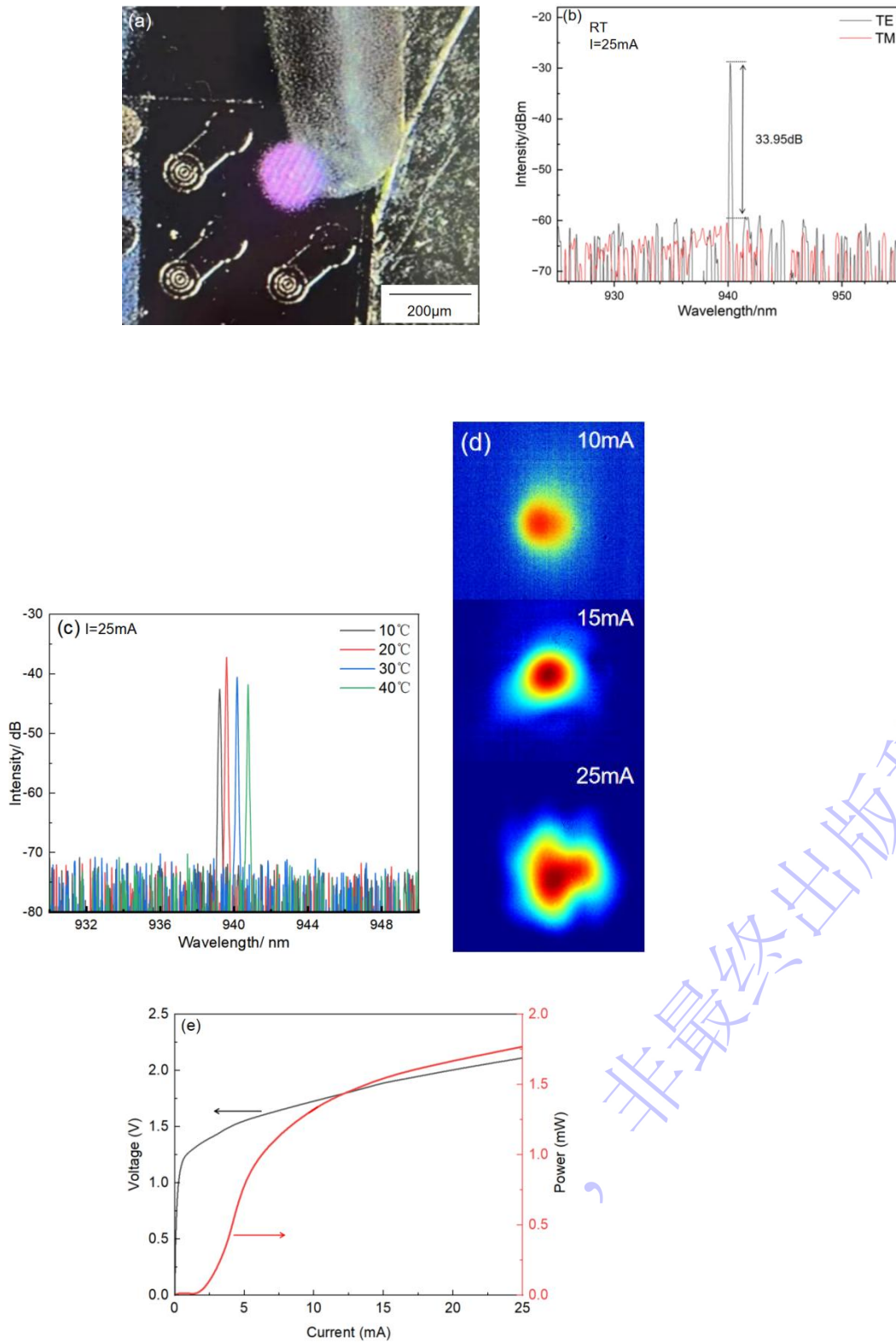


图5 (a) MSG-VCSEL在片测试时的发光照片; (b)不同偏振态时激光光谱; (c)不同温度时的激光光谱; (d) 不同注入电流时的远场图; (e) L-I-V 曲线

Fig. 5 . (a)Electroluminescence image of MSG-VCSEL during on-wafer testing; lasing spectra under different polarization states; (c) lasing spectra at different temperatures; (d) far-field patterns under different injection currents;(e) L-I-V curves.

5 结论

设计了超表面结构MSG，探讨了TE偏振的MSG作为940nm VCSEL耦合输出镜时其结构参数的优化区间，特别是仿真研究了同质亚层、光栅形貌及入射光角度等对其反射特性的作用规律。设计的MSG在940nm附近可实现近100nm的高反射带，且具有强的偏振选择性和角度敏感性，为MSG-VCSEL实现稳定偏振态下单模工作提供了保障。在仿真研究的基础上，结合MOCVD外延生长、ICP干法刻蚀及一步双域氧化等技术，制备出集成MSG反射镜的TE偏振单模VCSEL。实验测试结果表明，器件的阈值电流2mA，在25mA时最大单模输出功率达到1.76mW，且器件在工作范围内均能保持稳定的单模激射。MSG使VCSEL的结构更加简单，不仅符合其微型化和低成本的发展趋势，而且显著提高其模式和偏振特性，对加速其在原子钟、3D感知等高精尖领域的应用具有重要价值。

致谢：作者感谢清华大学-富士康纳米技术研究中心和中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所（SINANO）提供的技术支持。作者还要感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所提供的测试协助。

参考文献

- [1] Li M J, Li K, Chen X, Mishra S K, Juarez A A, Hurley J E, Stone J S, Wang C H, Cheng H T, Wu C H, Kuo H C, Tsai C T, Lin G R 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 868
- [2] Shih J C, Khan Z, Chang Y H, Shi J W 2021 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **28** 1
- [3] Hu S, Gu X, Ibrahim H R, Nakahama M, Shinada S, Koyama F 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 261110
- [4] Wu H, Fu W, Wu D, Feng M 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 011102
- [5] Śpiewak P, Sarzała R P, Wasiak M 2023 *Opt. Laser Technol.* **163** 109373
- [6] Khan Z, Shih J C, Chao R L, Tsai T L, Wang H C, Fan G W, Lin Y C, Shi J W 2020 *Optica.* **7** 267
- [7] Han Y, Li Z, Wu L, Mai S, Xing X, Fu H Y 2022 *J. Lightwave Technol.* **41** 412
- [8] Zhang C, Li H, Liang D 2024 *Nat. Commun.* **15** 1105
- [9] Huang Z, Zimmer M, Jetter M, Michler P 2020 *Opt. Lett.* **45** 1419

- [10] Mahzabeen F, Vermesh O, Levi J, Tan M, Alam I S, Chan C T, Gambhir S S, Harris J S 2021 *Biosens. Bioelectron.* **180** 112823
- [11] Liu C, Jiang Z, Wang X, Zheng Y, Zheng Y W, Wang Q H 2022 *Photonix.* **3** 20
- [12] Chen B, Claus D, Russ D, Nizami M R 2020 *Opt. Lett.* **45** 5583
- [13] Liu Y, Wang B, Zhang F, Guan B 2024 *Opt. Laser Technol.* **170** 110163
- [14] Wu Z L, Kang I, Yao Y D, Jiang Y, Deng J J, Klug J, Vogt S, Barbastathis G 2023 *eLight.* **3** 7
- [15] Yin W, Zhao H, Ji Y, Deng Z D, Jin Z H, Feng S J, Zhang X L, Wang H, Chen Q, Zuo C 2024 *ACS Photon.* **11** 498
- [16] Huang Z, Memmolo P, Ferraro P, Cao L 2022 *Photonix.* **3** 3
- [17] Elafandy R T, Kang J H, Mi C, Kim T K, Kwak J S, Han J 2021 *ACS Photon.* **8** 1041
- [18] Xie Y Y, Ni P N, Wang Q H, et al. Metasurface-integrated vertical cavity surface-emitting lasers for programmable directional lasing emissions[J]. *Nature nanotechnology*, 2020, 15(2): 125-130.
- [18] Xie Y Y, Ni P N, Wang Q H, Kan Q, Briere G, Chen P P, Zhao Z Z, Delga A, Ren H R, Chen H D, Xu C, Genevet P 2020 *Nat. Nanotechnol.* **15** 125
- [19] Yan G X, Hao Y Q, Zhang Q B 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 054204 (in Chinese) [闫观鑫, 郝永芹, 张秋波 2024 物理学报 73 054204]
- [20] Pan Z P, Li W, Lü J G, Nie Y W, Zhong L, Liu S P, Ma X Y 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 114203 (in Chinese) [潘智鹏, 李伟, 吕家纲, 聂语葳, 仲莉, 刘素平, 马骁宇 2023 物理学报 72 114203]
- [21] Li Y M, Wang X Y, Bai Z L, Liu W Y, Yang S S, Peng K C 2017 *Chin. Phys. B* **26** 040303
- [22] Huang M C Y, Zhou Y, Chang-Hasnain C J 2007 *Nat. Photon.* **1** 119
- [23] C Chase. 2011 High Contrast Grating VCSELs: Properties and Implementation on InP-based VCSELs. Ph. D. Dissertation (Berkeley:UC Berkeley)
- [24] Hashizume Y, Miyake Y, Matsutani A, Ohtsuki H, Koyama F, Chang-Hasnain C J, Willner A E, Zhou W 2012 *Proc. SPIE* **8270** 4
- [25] Chevallier C, Fressengeas N, Genty F, Jacquet J 2012 *Opt. Laser Technol.* **44** 626
- [26] Kashino J, Inoue S, Matsutani A, Ohtsuki H, Miyashita T, Koyama F 2013 *IEEE* **978** 4577
- [27] Li X S, Ning Y Q, Zhang X, Jia P, Chen Y Y, Qin L, Liu Y, Wang L J 2015 *Chin. J. Lumin.* **36** 806 (in Chinese) [李秀山, 宁永强, 张星, 贾鹏, 陈泳屹, 秦莉, 刘云, 王

立军 2015 发光学报 **36** 806]

[28]Marciniak M, Gębski M, Dems M, Haglund E, Larsson A, Riazat M, Lott J A, Czyszanowski T 2016 *Opt. Lett.* **41** 3495

[29]Chang T C, Hashemi E, Hong K B, Bengtsson J, Gustavsson J, Haglund Å, Lu T C 2020 *ACS Photonics* **7** 861

[30]Hong K B, Chang T C, Hjort F, Lindvall N, Hsieh W H, Huang W H, Tsai P H, Czyszanowski T, Haglund Å, Lu T C 2021 *Photonics Res.* **9** 2214

[31]Zhang J, Hao C X, Zheng W H, Bimberg D, Liu A J 2022 *Photonics Res.* **10** 1170

[32] Cui Y, Hu H W, Ji Y P, Kapraun J, Wang J X, Huang X L, Chang-Hasnain C J 2024 *Optica* **11** 1567

[33] Heermeier N, Janczak M, Gębski M, Marciniak M, Lott J A, Czyszanowski T, Reitzenstein S 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** 2402227

[34] Chen L, Luo Y, Feng Y, Yan C L, Fan J, Gao X, Zou Y G, Hao Y Q 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 0701023 (in Chinese) [陈磊, 罗妍, 冯源, 晏长岭, 范杰, 高欣, 邹永刚, 郝永芹 2020 中国激光 **47** 0701023]

录用稿件，非最终出版稿

Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Based on Metasurface Grating Reflector*

LUO Yan¹⁾²⁾ HAO Yongqin¹⁾ YAN Guangxin²⁾ LIN Xiyu²⁾ LV Penglin³⁾

1) School of Electronic and Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China

2) State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

3) School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132000, China

Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs) are widely used as light sources in optical communication, lidar, biomedicine, and 3D sensing due to their low threshold current, high modulation bandwidth, single longitudinal mode, and natural suitability for high-density two-dimensional integration. However, VCSELs have inherent limitations. When the oxide aperture exceeds 4 μm , multimode lasing is likely to occur, and their polarization performance remains poor. These issues hinder their use in applications such as quantum communication and atomic clocks. To overcome these limitations and enable device miniaturization, this study designs and fabricates a VCSEL incorporating a metasurface grating (MSG) as a high-reflectivity output mirror. The key innovation lies in an MSG structure compatible with the VCSEL material system. Composed of GaAs/AlO_x, the structure incorporates a GaAs homogeneous sublayer beneath the grating teeth to reduce interface stress. This sublayer also significantly modulates the reflectivity characteristics of the MSG. Simulations based on the rigorous coupled-wave method determine the optimal parameter range for the TE-polarized MSG. The results indicate a high-reflection band of nearly 100 nm around 940 nm, along with strong polarization selectivity and angle sensitivity. These properties support stable single-mode device operation. Experimentally, MOCVD epitaxial growth, ICP dry etching, and one-step dual-domain oxidation are combined to achieve monolithic integration of the MSG and VCSEL. Tests show that the device achieves stable TE-polarized lasing at

room temperature, with an operating wavelength of 940 nm, a threshold current of 2 mA, and a single-mode output power of 1.76 mW at 25 mA. Stable single-mode operation is maintained throughout. This study demonstrates that MSG simplifies the VCSEL structure and facilitates integration and miniaturization, aligning with low-cost development trends. It also addresses multimode lasing and poor polarization in conventional VCSELs, improves device stability, and lays the foundation for applications in high-precision fields, highlighting its theoretical and practical significance.

Keywords: Metasurface Grating, Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser(VCSEL), Polarization, Single-Mode

*Project supported by research on Precision Control Based on Semiconductor Lasers (No. 2024JBE02L19) and the Science and Technology Development Plan of Jilin Province (No. 20200401073GX).

#These authors contributed equally.

† Corresponding author.E-mail: *celery1231cc@163.com

The first author.E-mail: luoy@ccu.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿