

# 蓝绿光垂直腔面发射激光器的研究进展

曾丽娜<sup>1</sup>, 杨云帆<sup>1</sup>, 秦振<sup>2</sup>, 李林<sup>1\*</sup>, 刘兆悦<sup>1</sup>, 王睿璞<sup>1</sup>, 李再金<sup>1</sup>, 杨红<sup>1</sup>, 陈浩<sup>1</sup>,  
乔忠良<sup>1</sup>, 曲轶<sup>1</sup>, 刘国军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>海南师范大学, 物理与电子工程学院, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口

<sup>2</sup>吉林大学, 教育技术中心, 吉林 长春

Email: \*licust@126.com

收稿日期: 2021年6月30日; 录用日期: 2021年8月27日; 发布日期: 2021年9月3日

## 摘要

蓝绿光垂直腔面发射激光器(VCSEL)是一种重要的激光源, 具有圆形光斑、发散角小, 易于实现大规模阵列及光电集成等优势, 在高密度光存储、激光显示、激光照明、水下通信、海洋资源探测及激光生物医学等领域具有广阔的应用前景。介绍了蓝绿光VCSEL的性能优势和发展现状, 综述了蓝绿光VCSEL的研究进展, 讨论了其技术难题及发展前景。

## 关键词

垂直腔面发射激光器, 分布布拉格反射镜, 蓝绿光激光器, 纳米多孔氮化镓

# Research Progress on Blue-Green Vertical Cavity Surface Emitting Lasers

Lina Zeng<sup>1</sup>, Yunfan Yang<sup>1</sup>, Zhen Qin<sup>2</sup>, Lin Li<sup>1\*</sup>, Zhaoyue Liu<sup>1</sup>, Ruipu Wang<sup>1</sup>, Zaijin Li<sup>1</sup>,  
Hong Yang<sup>1</sup>, Hao Chen<sup>1</sup>, Zhongliang Qiao<sup>1</sup>, Yi Qu<sup>1</sup>, Guojun Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province,  
College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

<sup>2</sup>Center of Educational Technology, Jilin University, Changchun Jilin

Email: \*licust@126.com

Received: Jun. 30<sup>th</sup>, 2021; accepted: Aug. 27<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2021

## Abstract

Blue-Green Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) is an important laser source known for

\*通讯作者。

文章引用: 曾丽娜, 杨云帆, 秦振, 李林, 刘兆悦, 王睿璞, 李再金, 杨红, 陈浩, 乔忠良, 曲轶, 刘国军. 蓝绿光垂直腔面发射激光器的研究进展[J]. 光电子, 2021, 11(3): 89-96. DOI: 10.12677/oe.2021.113011

its superior advantages such as circular beam output, Small divergence angle, capable of realizing large scale arrays, and opto-electronic integration, etc. VCSELs emitting in the blue and green wavelength regions have broad application prospects in high-density optical storage, laser display, laser lighting, underwater communication, ocean resource exploration, and laser biomedical fields. We introduce the performance advantages and development status of the blue-green VCSELs, the research progress is reviewed, and its technical difficulties and development prospects are discussed.

## Keywords

VCSEL, Distributed Bragg Reflector, Blue-Green Laser, Nanoporous GaN

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近二十年来, GaN 基半导体材料在外延生长和光电子器件制备方面均取得了重大科技突破, 其中发光二极管(LED)和边发射激光器(EEL)已经实现产业化, 但是具有更优越特性的垂直腔面发射激光器(VCSEL)仍处于实验室研究阶段。VCSEL 的独特优点包括阈值电流低、易实现单纵模工作、调制频率高、发散角度小、圆形光斑、易与光纤耦合、不必解理即可完成工艺制作和检测, 易实现高密度二维阵列及光电集成等。蓝绿光 VCSEL 凭借以上优势, 在高密度光存储、激光显示、激光打印、激光照明、激光电视、水下通信、海洋资源探测及激光生物医学等领域具有广阔的应用前景。

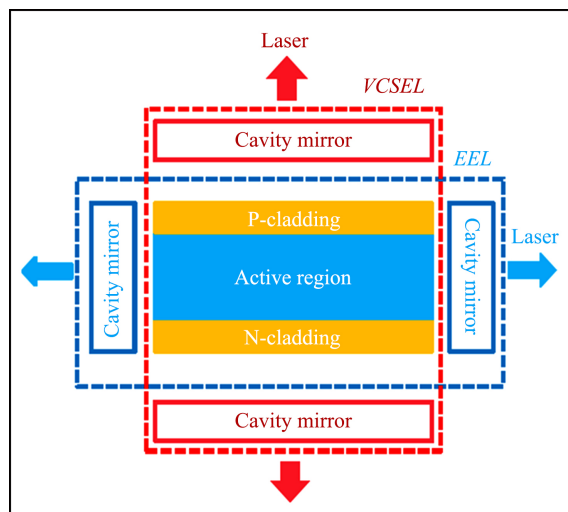
然而由于 VCSEL 谐振腔短(仅几微米长), 导致其单程增益长度也极短, 因此就要求制作的分布布拉格反射镜(DBR)材料质量必须良好, 还要求 DBR 的反射率极高(通常要求达到 99%以上)。与 GaN 基边发射激光器(EEL)或者 GaAs 基垂直腔面发射激光器(VCSEL)相比, GaN 基 VCSEL 的研究开发进展仍相对缓慢, 其主要原因是外延生长高质量的氮化物异质结(AIN/GaN、AlGaIn/GaN 或 AlInN/GaN) DBR 非常困难。研发 GaN 基 VCSEL 已经成为国内外光电子领域研究的前沿和热点[1]-[9], 国内外许多研发机构都投入了大量的人力和物力进行基础研究和应用开发, 争取早日实现实用化。我国在 GaN 基电注入蓝绿光 VCSEL 研究方面起步较晚, 与国际先进水平差距较大。

## 2. 蓝绿光垂直腔面发射激光器国内外研究现状

垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, 简称 VCSEL), 其谐振腔是由在有源区(Active Region)的上下两边形成两个具有高反射率的分布布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, 简称 DBR)构成, 激光沿着材料外延生长方向垂直出射。边发射激光器(Edge Emitting Laser, 简称 EEL)和垂直腔面发射激光器(VCSEL)结构示意图如图 1 所示。由于外延生长高质量的氮化物异质结 DBR 非常困难, 因此如何获得高质量的氮化物 DBR 成为 VCSEL 研究中最主要的难点。

为了降低外延生长氮化物异质结双 DBR 的难度, 研究人员报道了一些混合式 DBR 结构 VCSEL 的解决方案。例如, 采用氮化物异质结底部 DBR (Epitaxial DBR)和介质膜顶部 DBR (Dielectric DBR)组成的一种混合式 DBR 结构 VCSEL, 如图 2(a)所示, 在衬底上外延生长底部氮化物异质结 DBR 与发光层, 再镀膜沉积顶部介质膜 DBR。由于介质膜 DBR 不受晶格匹配的限制, 可以自由选用折射率差值大的两种介质材料, 因此更易于获得高反射率和高反射带宽。1999 年《Science》杂志[1]报道了日本东京大学的 Arakawa 研究组利用外延生长的 AlGaIn/GaN 底部氮化物 DBR 和  $ZrO_2/SiO_2$  顶部介质膜 DBR 组成的混合

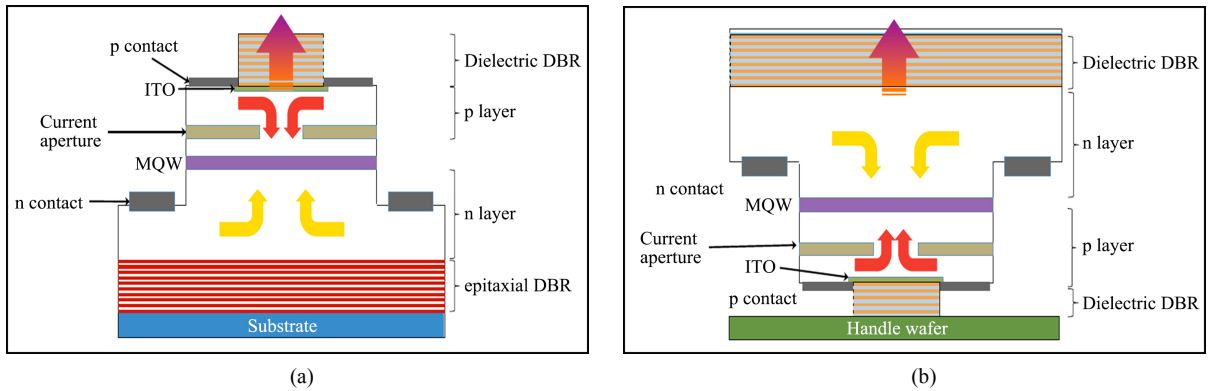
式 DBR 结构 VCSEL, 率先实现了室温光注入脉冲激励。2010 年台湾交通大学的 Hao-Chung Kuo 研究组 [2] 制备了 AlN/GaN DBR 和 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 介质膜 DBR 的混合式 DBR 结构 VCSEL, 实现了室温连续电注入激励, 阈值电流密度为 12.4 KA/cm<sup>2</sup>; 该研究组 2015 年实现了 VCSEL 的阈值电流密度为 10.6 KA/cm<sup>2</sup>, 输出功率达到 0.9 mW [3]。2012 年瑞士洛桑凝聚态物理研究所 Cosendey 等人 [4] 研制了 GaN 衬底上外延生长晶格匹配的 AlInN/GaN 底部 DBR 和 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 介质膜顶部 DBR 的混合式 DBR 结构 VCSEL, 实现了室温脉冲电注入激励。以上报道的混合式 DBR 结构 VCSEL 的确能降低外延生长氮化物异质结双 DBR 的难度, 但是外延生长高质量的 AlGaIn/GaN 底部氮化物 DBR 的难度依然很大。



**Figure 1.** Vertical cavity surface emitting laser (VCSEL, red dotted frame), Schematic diagram of the structure of the edge-emitting laser (EEL, blue dashed frame)

**图 1.** 垂直腔面发射激光器(VCSEL, 红色虚线框), 边发射激光器(EEL, 蓝色虚线框)结构示意图

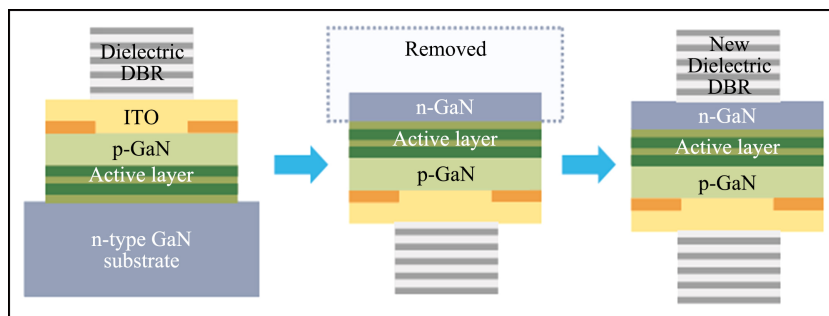
与此同时, 为了降低外延生长氮化物异质结双 DBR 的难度, 一些研究者提出了双介质膜 DBR 结构 VCSEL 解决方案。一些研究者提出了双介质膜 DBR 结构 VCSEL 解决方案。双介质膜结构 DBR (Dielectric DBR) VCSEL, 如图 2(b)所示, 即通过薄膜转移的方式去除原始衬底, 制备出由底部和顶部两部分介质膜 DBR 构成的 VCSEL。日本松下公司 [5] 和厦门大学张保平研究组 [6] 均实现了 ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 双介质膜 DBR 结构 VCSEL 室温连续电注入激励, 后者阈值电流密度降低至 1.2 KA/cm<sup>2</sup>。美国加州大学圣巴巴拉分校的 Nakamura 研究组 [7] 采用厚度小于 50 nm 的 ITO 膜内腔电极, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 双介质膜 DBR 结构 VCSEL 阈值电流密度达到 8 KA/cm<sup>2</sup>; 当该研究组进一步采用隧道结代替吸收系数较大的 ITO 膜内腔电极时, 阈值电流密度下降至 3.5 KA/cm<sup>2</sup>。2016 年日本索尼公司 [8] 报道了 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 和 SiN/SiO<sub>2</sub> 双介质膜 DBR 结构 VCSEL, 器件的发光波长为 453.9 nm, 阈值电流密度为 22 KA/cm<sup>2</sup>, 室温连续输出功率最高达到了 1.1 mW。2018 年索尼公司 [9] 报道了介质膜 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 双 DBR 结构 VCSEL, 并利用单微曲面镜对蓝绿光 VCSEL 侧向光场进行了限制, 虽然获得了较好的光束质量, 但是阈值电流密度却上升至 141 KA/cm<sup>2</sup>。以上研究结果表明, 利用双介质膜 DBR 结构 VCSEL 解决方案, 的确能有效降低氮化物异质结双 DBR 材料的制作难度。然而由于双介质膜 DBR 不导电, 因此目前电泵浦 VCSEL 均采用内腔接触 ITO 膜电极结构, 而 ITO 膜内腔接触电极会产生较高的吸收损耗, 大幅度增加器件的内部损耗, 导致 VCSEL 阈值电流密度明显升高。



**Figure 2.** (a) Schematic diagram of a hybrid DBR structure VCSEL composed of nitride DBR and dielectric film DBR; (b) Bottom and top dual dielectric membrane DBR Schematic diagram of structure VCSEL

**图 2.** (a) 由氮化物 DBR 和介质膜 DBR 组成的混合式 DBR 结构 VCSEL 示意图; (b) 底部和顶部双介质膜 DBR 结构 VCSEL 示意图

国内外的研究表明,若要获得外延生长高质量氮化物异质结 DBR,实现 GaN 基 VCSEL 室温下电注入激励,需要解决以下两个主要难题:首先需要解决高质量氮化物谐振腔的制作难题。高质量氮化物谐振腔难以制作的主要原因是:当采用外延生长氮化物异质结 DBR 时,高 Al 组分的 Al (Ga) N 与 GaN 之间存在较大的晶格失配和热失配,异质结外延生长过程中由于应力积累、热失配而产生晶格缺陷和开裂现象,这些都加大了外延生长高质量氮化物异质结 DBR 的难度,并导致 DBR 反射率降低[1] [2] [3]。GaN 和 AlN 的晶格失配为 2.4%,折射率差约为 0.4,外延生长过程中会产生位错和开裂现象,即使外延生长  $Al_{0.5}Ga_{0.5}N/GaN$  (折射率差约为 0.2)异质结构,也难以获得高质量的氮化物异质结 DBR。而采用与 GaN 晶格匹配的 AlInN 材料时,其中的 In 组分又极难控制,很难获得高质量的 AlInN/GaN 氮化物异质结 DBR,并且其较小的折射率差也使得其高反射带宽相对较窄[4]。尽管双介质膜 DBR 容易获得较高的反射率,但是 VCSEL 器件的制备过程相对复杂[5] [6] [7] [8] [9],主要制备流程如图 3 所示,首先在衬底上制作底部介质 DBR;其次通过薄膜转移的方式去除原始衬底;最后制作顶部介质 DBR,从而实现由底部和顶部介质膜 DBR 构成的双介质膜 VCSEL。其次需要解决 p 型 DBR 导电性差的难题。p 型 DBR 导电性差的主要原因是 AlGaIn/GaN DBR 为高阻特性,同时外延生长高 Al 组分 AlGaIn 十分困难。由于目前所采用的 p 型氮化物异质结 DBR 材料导电性较差,因而电注入 VCSEL 需要采用内腔接触 ITO 膜电极结构。尽管减小 ITO 膜电极厚度有利于降低光吸收,但是 ITO 膜过薄(小于 50 nm)又会明显加大 ITO 膜的工艺制作难度,明显增大器件的阈值电流密度。

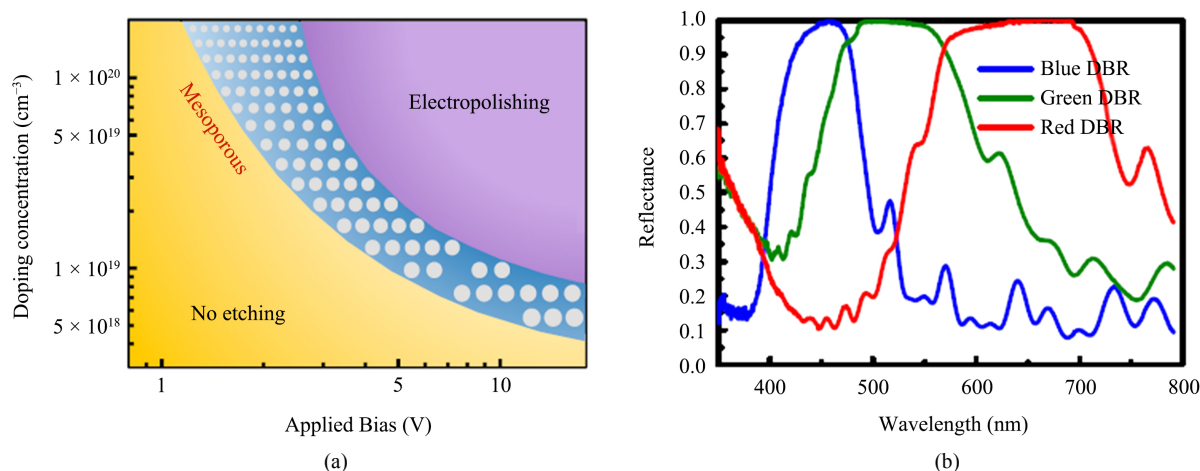


**Figure 3.** Schematic diagram of the main preparation process of a dual-dielectric film DBR structure VCSEL device

**图 3.** 双介质膜 DBR 结构 VCSEL 器件的主要制备流程示意图

### 3. 蓝绿光垂直腔面发射激光器国内外研究进展

国内外研究学者利用电化学刻蚀技术,把较高掺杂浓度的 n 型氮化镓( $n^+$ -GaN)样品作为阳极,浸泡在酸性[10]-[16]或碱性[17][18]电解质中,在一定电压的作用下, $n^+$ -GaN 会发生电化学刻蚀反应形成纳米多孔氮化镓(nanoporous GaN, 简写 NP-GaN)结构。2015 年耶鲁大学 Jung Han 研究组[13]报道了不同掺杂浓度的 n 型 GaN ( $n$ -GaN/ $n^+$ -GaN) DBR 样品中的  $n^+$ -GaN 在电化学刻蚀工艺过程中形成不同孔径尺寸的纳米多孔 GaN 结构的变化规律,如图 4(a)所示。由于该 GaN/NP-GaN 结构 DBR 具有折射率差值较大( $\Delta n \geq 0.5$ )的优势,因此使用较少对数的 DBR 就能够获得高反射率( $R > 99\%$ ),并且高反射带宽在红光-蓝绿光范围内可调,如图 4(b)所示。2015 年韩国全南大学[14]首次实现了 GaN/NP-GaN DBR 结构 VCSEL 光注入激射发光。2017 年耶鲁大学 Jung Han 研究组[19]报道了 GaN/NP-GaN DBR 结构蓝紫光 LED,2018 年该组又报道了一种具有纳米多孔氮化镓(NP-GaN)的 InGaN/GaN 微盘激光器[20]。这些研究结果表明了 GaN/NP-GaN 构成的 DBR 具有高反射率和良好的可控性,这都为制作高质量氮化物 VCSEL 谐振腔奠定了坚实基础。不同的电化学刻蚀反应条件下形成不同孔径的纳米空气孔 GaN 结构[21][22][23][24][25]。这些研究结果充分表明了 GaN/NP-GaN 构成的 DBR 具有高反射率和良好的可控性,能够用来制作高质量氮化物 VCSEL 谐振腔。这种具有较低折射率的纳米空气孔 GaN 材料仍然具备导电的特性,表明了这种 GaN/NP-GaN DBR 结构完全可以应用在电泵浦 GaN 基 VCSEL 中。

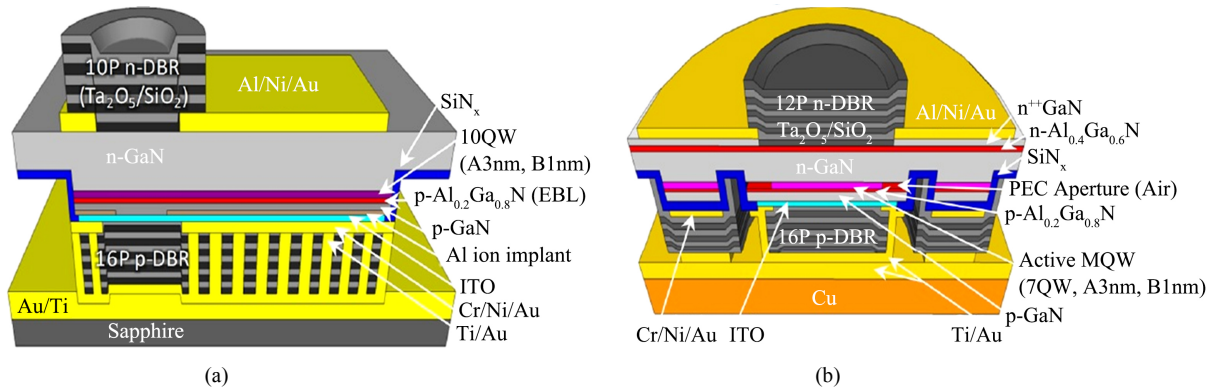


**Figure 4.** (a) Variation law of nanoporous GaN structure with different pore diameters [13]; (b) The reflectance spectra of three different nanoporous GaN DBR samples [13]

**图 4.** (a) 不同孔径的纳米多孔 GaN 结构的变化规律[13]; (b) 三种不同纳米多孔 GaN DBR 样品的反射谱[13]

最令人关注的是这种低折射率纳米多孔 GaN 材料仍然导电的特点,表明了 GaN/NP-GaN DBR 结构可以应用在电注入 GaN 基 VCSEL 中。2013 年中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所和台湾国立彰化师范大学[26][27]报道了隧道结 GaN 基边发射激光器(EEL)的输出特性的模拟研究,结果表明该结构能获得较低的阈值电流密度和串联电阻率,并能提高器件的输出功率。2015 年日本和美国的研究机构[28][29][30]报道了隧道结 GaN LED 器件的 I-V 特性得到了明显改善。美国加州大学圣巴巴拉分校的 Nakamura 研究组基于 ITO 膜内腔电极和 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 双介质膜 DBR 结构,研究了离子注入孔径(Ion Implanted Aperture)的电流注入孔径结构 VCSEL [31],结构示意图如图 5(a)所示,阈值电流密度为 16 KA/cm<sup>2</sup>;以及空气隙孔径(Air-gap aperture)电流注入孔径结构的 VCSEL [32],结构示意图如图 5(b)所示,阈值电流密度为 22 KA/cm<sup>2</sup>。2018 年该研究组基于 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 双介质膜 DBR 结构,研究了离子注入电流输入孔径

结构隧道结内腔接触的 VCSEL [33], 实现了室温连续输出  $140 \mu\text{W}$ , 器件的阈值电流密度为  $42.4 \text{ KA/cm}^2$ 。该研究组又通过优化外延生长 VCSEL 材料[34], 使器件输出功率提高到  $319 \mu\text{W}$ , 阈值电流密度降低至  $10 \text{ KA/cm}^2$ 。以上这些研究结果均为解决 p 型 DBR 导电性差的难题提供了新思路。然而, 美国加州大学所采用离子注入孔径和空气隙孔径电流注入孔径结构的 VCSEL 制备工艺, 均需要外延生长设备(MOCVD 或 MBE)进行 VCSEL 材料的二次外延生长, 在二次外延生长中将会引起材料表面粗糙问题。另外这种电流注入孔径结构均采用 ITO 膜电极, ITO 膜电极吸收引起的损耗以及 ITO/GaN 界面带来的损耗导致阈值电流密度较大。



**Figure 5.** (a) Schematic diagram of VCSEL with ion implantation aperture and current injection aperture structure [31]; (b) Schematic diagram of the VCSEL with the air gap aperture current injected into the aperture structure [31]

**图 5.** (a) 离子注入孔径的电流注入孔径结构的 VCSEL 示意图[31]; (b) 空气隙孔径电流注入孔径结构的 VCSEL 示意图[31]

#### 4. 结束语

不断改进的 VCSEL 电流注入结构能有效地限制侧向电流的扩散, 提高电流注入多量子阱有源区的均匀性, 降低器件的阈值电流密度, 从而实现电注入蓝绿光 VCSEL 器件。GaN 基 VCSEL 具有重要的应用前景, 推进电注入 GaN 基 VCSEL 的产业化进展, 必将产生重大的经济效益和社会效益。目前如何解决 VCSEL 电流注入孔径的制作难题, 突破电注入 GaN 基 VCSEL 的技术瓶颈, 为 GaN 基 VCSEL (紫外、蓝绿光)的研发提供一种新思路。

#### 基金项目

海南省自然科学基金(2019RC190, 2019RC192, 120MS031), 海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020ZD-12, Hnky2020-24), 海南省高等学校教学改革项目(Hnjg2021ZD-22), 国家级大学生创新创业训练计划项目(202011658007X), 海南省科技项目(ZDYF2020217, ZDYF2020020, ZDYF2020036), 国家自然科学基金项目(62064004, 61964007, 61864002), 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005), 和中国工程科技发展项目(19-HN-XZ-07)资助。

#### 参考文献

- [1] Someya, T., Werner, R., Forchel, A., Catalano, M., Cingolani, R. and Arakawa, Y. (1999) Room Temperature Lasing at Blue Wavelengths in Gallium Nitride Microcavities. *Science*, **285**, 1905-1906. <https://doi.org/10.1126/science.285.5435.1905>
- [2] Lu, T.-C., Chen, S.-W., Wu, T.-T., Tu, P.-M., Chen, C.-K., Chen, C.-H., Li, Z.-Y., Kuo, H.-C. and Wang, S.-C. (2010) Continuous Wave Operation of Current Injected GaN Vertical Cavity Surface Emitting Lasers at Room Temperature.

- Applied Physics Letters*, **97**, Article ID: 071114. <https://doi.org/10.1063/1.3483133>
- [3] Hsieh, D.H., Tzou, A.J., Kao, T.S., Lai, F.I., Lin, D.W., Lin, B.C., Lu, T.C., Lai, W.C., Chen, C.H. and Kuo, H.C. (2015) Improved Carrier Injection in GaN-Based VCSEL via AlGaIn/GaN Multiple Quantum Barrier Electron Blocking Layer. *Optics Express*, **23**, 27145-27151. <https://doi.org/10.1364/OE.23.027145>
- [4] Cosendey, G., Castiglia, A., Rossbach, G., *et al.* (2012) Blue Monolithic AlInN-Based Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diode on Free-Standing GaN Substrate. *Applied Physics Letters*, **101**, Article ID: 151113. <https://doi.org/10.1063/1.4757873>
- [5] Onishi, T., Imafuji, O., Nagamatsu, K., Kawaguchi, M., Yamanaka, K. and Takigawa, S. (2012) Continuous Wave Operation of GaN Vertical Cavity Surface Emitting Lasers at Room Temperature. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **48**, 1107-1111. <https://doi.org/10.1109/JQE.2012.2203586>
- [6] Liu, W.-J., Hu, X.-L., Ying, L.-Y., Zhang, J.-Y. and Zhang, B.-P. (2014) Room Temperature Continuous Wave Lasing of Electrically Injected GaN-Based Vertical Cavity Surface Emitting Lasers. *Applied Physics Letters*, **104**, Article ID: 251116. <https://doi.org/10.1063/1.4885384>
- [7] Leonard, J.T., Young, E.C., Yonkee, B.P., Cohen, D.A., Margalith, T., DenBaars, S.P., Speck, J.S. and Nakamura, S. (2015) Demonstration of a III-Nitride Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with a III-Nitride Tunnel Junction Intracavity Contact. *Applied Physics Letters*, **107**, Article ID: 091105. <https://doi.org/10.1063/1.4929944>
- [8] Hamaguchi, T., Fuutagawa, N., Izumi, S., Murayama, M. and Narui, H. (2016) Milliwatt-Class GaN-Based Blue Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Fabricated by Epitaxial Lateral Overgrowth. *Physica Status Solidi (A)*, **213**, 1170-1176. <https://doi.org/10.1002/pssa.201532759>
- [9] Hamaguchi, T., Tanaka, M., Mitomo, J., Nakajima, H., Ito, M., Ohara, M., Kobayashi, N., Fujii, K., Watanabe, H., Saito, S., Koda, R. and Narui, H. (2018) Lateral Optical Confinement of GaN-Based VCSEL Using an Atomically Smooth Monolithic Curved Mirror. *Scientific Reports*, **8**, Article No. 10350. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28418-6>
- [10] Chen, D.T., Xiao, H.D. and Han, J. (2012) Nanopores in GaN by Electrochemical Anodization in Hydrofluoric Acid: Formation and Mechanism. *Journal of Applied Physics*, **112**, Article ID: 064303. <https://doi.org/10.1063/1.4752259>
- [11] Park, J., Kang, J.-H. and Ryu, S.-W. (2013) High Diffuse Reflectivity of Nanoporous GaN Distributed Bragg Reflector Formed by Electrochemical Etching. *Applied Physics Express*, **6**, Article ID: 072201. <https://doi.org/10.7567/APEX.6.072201>
- [12] Lee, K.J., Kim, S.-J., Kim, J.-J., Hwang, K., Kim, S.-T. and Park, S.-J. (2014) Enhanced Performance of InGaIn/GaN Multiple Quantum-Well Light-Emitting Diodes Grown on Nanoporous GaN Layers. *Optics Express*, **22**, A1164-A1173. <https://doi.org/10.1364/OE.22.0A1164>
- [13] Zhang, C., Park, S.H., Chen, D., Lin, D.-W., Xiong, W., Kuo, H.-C., Lin, C.-F., Cao, H. and Han, J. (2015) Mesoporous GaN for Photonic Engineering-Highly Reflective GaN Mirrors as an Example. *ACS Photonics*, **2**, 980-986. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.5b00216>
- [14] Lee, S.-M., Gong, S.-H., Kang, J.-H., Ebaid, M., Ryu, S.-W. and Cho, Y.-H. (2015) Optically Pumped GaN Vertical Cavity Surface Emitting Laser with High Index-Contrast Nanoporous Distributed Bragg Reflector. *Optics Express*, **23**, 11023-11030. <https://doi.org/10.1364/OE.23.011023>
- [15] Tseng, W.J., van Dorp, D.H., Lieten, R.R., Vereecken, P.M. and Borghs, G. (2014) Anodic Etching of n-GaN Epilayer into Porous GaN and Its Photoelectrochemical Properties. *The Journal of Physical Chemistry C*, **118**, 29492-29498. <https://doi.org/10.1021/jp508314q>
- [16] Xiao, H.D., Cui, J.S., Cao, D.Z., Gao, Q.X., Liu, J.Q. and Ma, J. (2015) Self-Standing Nanoporous GaN Membranes Fabricated by UV-Assisted Electrochemical Anodization. *Materials Letters*, **145**, 304-307. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.01.078>
- [17] Soh, C.B., Tay, C.B., Tan, R.J.N., Vajpeyi, A.P., Seetoh, I.P., Ansah-Antwi, K.K. and Chua, S.J. (2013) Nanopore Morphology in Porous GaN Template and Its Effect on the LEDs Emission. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **46**, Article ID: 365102. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/36/365102>
- [18] Benton, J., Bai, J. and Wang, T. (2014) Utilisation of GaN and InGaIn/GaN with Nanoporous Structures for Water Splitting. *Applied Physics Letters*, **105**, Article ID: 223902. <https://doi.org/10.1063/1.4903246>
- [19] Zhang, C., Xiong, K.L., Yuan, G. and Han, J. (2017) A Resonant-Cavity Blue-Violet Light-Emitting Diode with Conductive Nanoporous Distributed Bragg Reflector. *Physica Status Solidi (A)*, **214**, Article ID: 1600866. <https://doi.org/10.1002/pssa.201600866>
- [20] Yuan, G., Zhang, C., Xiong, K.L. and Han, J. (2018) InGaIn/GaN Microdisks Enabled by Nanoporous GaN Cladding. *Optics Letters*, **43**, 5567-5570. <https://doi.org/10.1364/OL.43.005567>
- [21] Zhang, Y., Ryu, S.-W., Yerino, C., Leung, B., Sun, Q., Song, Q.H., Cao, H. and Han, J. (2010) A Conductivity-Based Selective Etching for Next Generation GaN Devices. *Physica Status Solidi (B)*, **247**, 1713-1716.

- <https://doi.org/10.1002/pssb.200983650>
- [22] Youtsey, C., Adesida, I. and Bulman, G. (1997) Highly Anisotropic Photoenhanced Wet Etching of n-Type GaN. *Applied Physics Letters*, **71**, 2151-2153. <https://doi.org/10.1063/1.119365>
- [23] Kibria, M.G., Zhao, S., Chowdhury, F.A., Wang, Q., Nguyen, H.P.T., Trudeau, M.L., Guo, H. and Mi, Z. (2014) Tuning the Surface Fermi Level on p-Type Gallium Nitride Nanowires for Efficient Overall Water Splitting. *Nature Communications*, **5**, 3825. <https://doi.org/10.1038/ncomms4825>
- [24] Sparreboom, W., van den Berg, A. and Eijkel, J.C.T. (2009) Principles and Applications of Nanofluidic Transport. *Nature Nanotechnology*, **4**, 713-720. <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.332>
- [25] Rotter, T., Mistele, D., Stemmer, J., Fedler, F., Aderhold, J., Graul, J., Schwegler, V., Kirchner, C., Kamp, M. and Heuken, M. (2000) Photoinduced Oxide Film Formation on n-Type GaN Surfaces Using Alkaline Solutions. *Applied Physics Letters*, **76**, 3923-3925. <https://doi.org/10.1063/1.126822>
- [26] Feng, M.X., Liu, J.P., Zhang, S.M., Jiang, D.S., Li, Z.C., Zhou, K., Li, D.Y., Zhang, L.Q., Wang, F., Wang, H., Chen, P., Liu, Z.S., Zhao, D.G., Sun, Q. and Yang, H. (2013) High Efficient GaN-Based Laser Diodes with Tunnel Junction. *Applied Physics Letters*, **103**, Article ID: 043508. <https://doi.org/10.1063/1.4816598>
- [27] Tsai, M.-C., Leung, B., Hsu, T.-C. and Kuo, Y.-K. (2013) Low Resistivity GaN-Based Polarization-Induced Tunnel Junctions. *Journal of Lightwave Technology*, **31**, 3575-3581. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2285405>
- [28] Minamikawa, D., Ino, M., Kawai, S., Takeuchi, T., Kamiyama, S., Iwaya, M. and Akasaki, I. (2015) GaInN-Based Tunnel Junctions with High InN Mole Fractions Grown by MOVPE. *Physica Status Solidi (B)*, **252**, 1127-1131. <https://doi.org/10.1002/pssb.201451507>
- [29] Akyol, F., Krishnamoorthy, S., Zhang, Y.W. and Rajan, S. (2015) GaN-Based Three-Junction Cascaded Light-Emitting Diode with Low-Resistance InGaN Tunnel Junctions. *Applied Physics Express*, **8**, Article ID: 082103. <https://doi.org/10.7567/APEX.8.082103>
- [30] Malinverni, M., Martin, D. and Grandjean, N. (2015) InGaN Based Micro Light Emitting Diodes Featuring a Buried GaN Tunnel Junction. *Applied Physics Letters*, **107**, Article ID: 051107. <https://doi.org/10.1063/1.4928037>
- [31] Leonard, J.T., Cohen, D.A., Yonkee, B.P., Farrell, R.M., Margalith, T., Lee, S., DenBaars, S.P., Speck, J.S. and Nakamura, S. (2015) Nonpolar III-Nitride Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Incorporating an Ion Implanted Aperture. *Applied Physics Letters*, **107**, Article ID: 011102. <https://doi.org/10.1063/1.4926365>
- [32] Leonard, J.T., Yonkee, B.P., Cohen, D.A., Megalini, L., Lee, S., Speck, J.S., DenBaars, S.P. and Nakamura, S. (2016) Nonpolar III-Nitride Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with a Photoelectrochemically Etched Air-Gap Aperture. *Applied Physics Letters*, **108**, Article ID: 031111. <https://doi.org/10.1063/1.4940380>
- [33] Forman, C.A., Lee, S.G., Young, E.C., Kearns, J.A., Cohen, D.A., Leonard, J.T., Margalith, T., DenBaars, S.P. and Nakamura, S.J. (2018) Continuous-Wave Operation of m-Plane GaN-Based Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers with a Tunnel Junction Intracavity Contact. *Applied Physics Letters*, **112**, Article ID: 111106. <https://doi.org/10.1063/1.5007746>
- [34] Lee, S.G., Forman, C.A., Lee, C.M., Kearns, J., Young, E.C., Leonard, J.T., Cohen, D.A., Speck, J.S., Nakamura, S. and DenBaars, S.P. (2018) GaN-Based Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers with Tunnel Junction Contacts Grown by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition. *Applied Physics Express*, **11**, Article ID: 062703. <https://doi.org/10.7567/APEX.11.062703>