

# GaN 基垂直腔面发射激光器的研究进展

应磊莹, 梅 洋, 张保平\*

(厦门大学电子科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** GaN 基垂直腔面发射激光器(VCSEL)是一种具有垂直出光结构的新型半导体激光器,其发光波长可覆盖整个可见光波段.与边发射激光器相比,VCSEL 具有单纵模工作、低阈值电流、圆形对称光斑、与光纤耦合效率高以及可以制备高密度二维阵列等优点,因此被认为是下一代半导体照明、微投影、全色显示、可见光通信等应用领域的理想光源. GaN 基 VCSEL 发展至今已经取得长足的进展,距离实现产业化应用也越来越近.本文对照目前已经发展成熟的 GaAs 基 VCSEL 的发展状况,综述了 GaN 基 VCSEL 的应用领域、发展现状、技术路线,并着重介绍了绿光 GaN 基 VCSEL 所取得的一系列进展,最后简述了 GaN 基 VCSEL 所面临的技术挑战.

**关键词:** GaN;垂直腔面发射激光器;绿光

中图分类号:TN 365

文献标志码:A

文章编号:0438-0479(2021)03-0472-12

垂直腔面发射激光器(VCSEL)是一种出光方向垂直于晶圆表面的半导体激光器.与传统的侧面出光的边发射激光器(EEL)相比,VCSEL 有更短的谐振腔与更小的器件尺寸,因此其阈值电流低,能实现单纵模工作以及高速调制.同时,VCSEL 的激光光束具有极好的圆形对称特性,能与光纤进行高效耦合.垂直腔面发射出光的器件结构使其可以被制备成高密度的二维器件阵列,实现更高的输出功率<sup>[1]</sup>.

VCSEL 早期研究主要集中在红光与近红外波段.1977 年东京大学的 Iga 首次提出 VCSEL 的构想<sup>[2]</sup>,此后在 1979 年与 1987 年,他所在研究组在 77 K 温度下分别实现了首支 GaInAsP/InP 与 GaAs/AlGaAs 的电注入脉冲激励 VCSEL<sup>[3-4]</sup>,并于 1989 年实现了 GaAs/AlGaAs VCSEL 的室温连续激励<sup>[5]</sup>.在这之后 GaAs 基 VCSEL 便开始迅速发展,在 1997 年实现了最早的商业化应用.目前近红外波段的 GaAs 基 VCSEL 已经在高速以太网、短距离光通信、数据中心以及超级计算机中的光互联、光纤局域网等应用领域中占据了绝大部分市场.2018 年,Apple 公司 iPhone X(<https://www.apple.com.cn>)所搭载的基于 VCSEL 阵列的三维面部识别传感器则为 VCSEL

开辟了一个新的广阔应用领域,深度传感也被业界认为是 VCSEL 技术从工业界转向消费领域的一个重大突破.此外 VCSEL 也在医疗、红外照明、激光雷达、原子钟等方面有着广泛的应用.

与 GaAs 基 VCSEL 的迅速发展并且成功实现商业化应用相比,GaN 基 VCSEL 前期的发展较为缓慢,这与 GaN 材料本身的特性直接相关. GaN 是一种第三代半导体材料,具有宽禁带、直接带隙、高发光效率、高振子强度等优点,通过调整合金组分,其发光波长可以覆盖整个可见光范围,因此是制备发光二极管(LED)以及激光二极管(LD)等光电器件的理想材料<sup>[6]</sup>.但是早期 GaN 材料面临着高质量外延生长与 p 型掺杂的难题,极大地限制了 GaN 基光电器件的发展.直到 20 世纪 90 年代,赤崎勇、天野浩与中村修二等使用低温成核层以及两步生长法制备出高质量的 GaN 单晶薄膜,并且解决了 p 型掺杂的难题,GaN 基光电器件才开始迅速发展<sup>[7-9]</sup>.2014 年他们三人因在 GaN 基蓝光 LED 中做出的卓越贡献被授予诺贝尔物理学奖.此后 GaN 基 VCSEL 开始逐步发展并吸引了众多研究者的注意,陆续有众多跨国企业和科研单位参与到器件的研发.企业主要来自日本,包括日亚化

收稿日期:2020-09-30 录用日期:2020-12-01

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0400803,2017YFE0131500);国家自然科学基金(61704140);科学挑战计划(TZ2016003)

\* 通信作者: bzhang@xmu.edu.cn

引文格式:应磊莹,梅洋,张保平. GaN 基垂直腔面发射激光器的研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2021,60(3): 472-483.

Citation: YING L Y, MEI Y, ZHANG B P. Progress of GaN based vertical cavity surface emitting lasers[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2021, 60(3): 472-483. (in Chinese)



学工业株式会社(简称日亚)<sup>[10-12]</sup>、松下电器产业株式会社(简称松下)<sup>[13]</sup>、索尼<sup>[14-16]</sup>和史丹利电器公司<sup>[17-19]</sup>;科研单位包括台湾交通大学(NCTU)<sup>[20-24]</sup>、加州大学圣巴巴拉分校<sup>[25-31]</sup>、洛桑理工大学<sup>[32]</sup>、厦门大学<sup>[33-35]</sup>、名城大学<sup>[36-39]</sup>、耶鲁大学<sup>[40]</sup>等。这也进一步说明了 GaN 基 VCSEL 具有极为诱人的应用前景。本文对照目前已经发展成熟的 GaAs 基 VCSEL 的发展状况,综述了 GaN 基 VCSEL 的应用领域、发展现状以及技术路线,并着重介绍了近年来 GaN 基绿光 VCSEL 所取得的一系列研究进展,最后简述了 GaN 基 VCSEL 所面临的技术挑战。

## 1 GaN 基 VCSEL 的应用领域

GaN 基 VCSEL 的发光波长主要在可见光波段,因此相比于近红外波段的 GaAs 基 VCSEL 有着独特的应用领域。其应用集中在半导体激光照明、可见光通信、激光投影与显示、高密度光存储、生物医疗、原子钟等<sup>[22]</sup>。

在激光照明领域,与 EEL 相比,VCSEL 更加适用于需要高度方向性光源的应用场景,比如酒店、剧场、博物馆等的情景照明、汽车与飞机头灯等。而且 VCSEL 出光方向为表面垂直出光,与现有成熟的 LED 制备与封装技术兼容,另外 VCSEL 可集成为高密度二维阵列,有望提供比单管 EEL 更高的发光功率。

在可见光通信方面,阶跃型塑料光纤在 570,650 和 780 nm 附近为低损耗窗口,因此黄绿光波段 GaN 基 VCSEL 可用于塑料光纤通信,且其具有比 LED 以及 EEL 更大的调制带宽<sup>[41]</sup>。另外,470~540 nm 波段是光在海水中传播的低损耗窗口,因此蓝绿光与绿光 GaN 基 VCSEL 也可应用于对海探测以及水下光通信领域<sup>[42]</sup>。GaN 基 VCSEL 在可见光通信中另一个重要应用为自由空间可见光通信,也被称为光保真(LiFi)<sup>[43]</sup>。作为 LiFi 系统的光源,GaN 基 VCSEL 可以达到比 LED 与 EEL 更高的调制速率,因此有更强的竞争力。

在激光投影与显示应用中,GaN 基 VCSEL 发光波长可以完整覆盖红绿蓝三基色,同时又有较好的方向性以及小发散角,因此非常适用于激光投影与显示。由于其单色性,GaN 基 VCSEL 可以覆盖更广的色域,实现更高的色彩饱和度。使用多个不同波长的绿光 VCSEL,配合蓝光与红光 VCSEL 光源,理论上基本可以覆盖全部色域,实现真正的全色显示。另外,GaN 基 VCSEL 的小体积以及低功耗也会使其更加适用于可移动或可穿戴电子设备如手机、智能手表、智

能眼镜等终端所集成的微投影设备中。

## 2 GaN 基 VCSEL 的发展现状与技术路线

GaN 基 VCSEL 的研究最早开始于 1995 年,东京工业大学的 Honda 等<sup>[44]</sup>对 GaN 基 VCSEL 的阈值特性进行了相关计算。1996 年,ATMI 公司<sup>[45]</sup>报道了首个光泵 GaN 基 VCSEL 激光。

2008 年,NCTU 的 Lu 等<sup>[24]</sup>制备出世界上第一支电注入 GaN 基 VCSEL,该器件实现了 77 K 温度下连续激光,激光波长为 462.8 nm,阈值电流密度为 1.8 kA/cm<sup>2</sup>。此后日亚、松下、索尼、洛桑理工大学、厦门大学、名城大学、耶鲁大学等研究单位都相继报道了电注入 GaN 基 VCSEL 的室温连续激光。至今,GaN 基 VCSEL 已经成功覆盖了从紫光至黄绿光的光谱范围<sup>[35]</sup>,最大单管光功率为 24 mW<sup>[46]</sup>,并且已经实现了发光功率超过 1 W 的蓝光 VCSEL 阵列<sup>[17]</sup>。

GaN 基 VCSEL 中谐振腔所用反射镜可分为混合分布布拉格反射镜(DBR)结构和双介质膜 DBR 结构。混合 DBR 结构中的上反射镜为介质膜 DBR,下反射镜为氮化物 DBR。而双介质膜 DBR 结构中的上下反射镜均为介质膜 DBR。在已经商业化的 GaAs 基 VCSEL 中,上下两个反射镜全部为外延生长的 AlAs/GaAs DBR。这是因为 GaAs 与 AlAs 晶格匹配,制备高反射率与高晶体质量的 AlAs/GaAs DBR 较为容易,这也是其能够快速实现商业化的重要原因<sup>[2]</sup>。但是在 GaN 基半导体材料系统中难以找到晶格匹配且同时具有高折射率差的两种半导体材料,因此生长出具有高晶体质量、高反射率的氮化物 DBR 极为困难。为此,GaN 基 VCSEL 通常采用混合 DBR 结构或者双介质膜 DBR 结构。

### 2.1 混合 DBR 结构 GaN 基 VCSEL

目前正在进行电注入混合 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 研究的科研小组主要有 NCTU、洛桑理工大学、名城大学以及史丹利电器公司。2008 年 NCTU 报道的首支电注入 GaN 基 VCSEL 便采取了混合 DBR 结构<sup>[24]</sup>,其下反射镜为 AlN/GaN DBR。由于 GaN 与 AlN 之间有约 2.4% 的晶格失配,他们在 DBR 内部插入 AlN/GaN 超晶格层进行应力调控,最终成功生长出无裂纹且反射率超过 99.4% 的氮化物 DBR,如图 1 所示。2012 年,洛桑理工大学报道了具有 41.5 对 Al<sub>0.8</sub>In<sub>0.2</sub>N/GaN 的电注入混合 DBR 结构 GaN 基 VCSEL<sup>[32]</sup>,如图 2 所示。当 In 组分为 0.18 时,AlInN 与 GaN 晶格匹配,因此可以交替外延生长多层

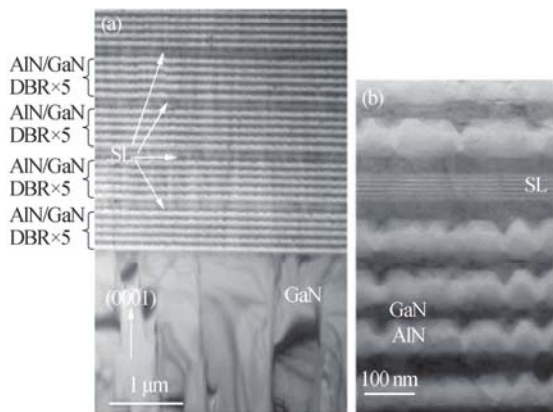
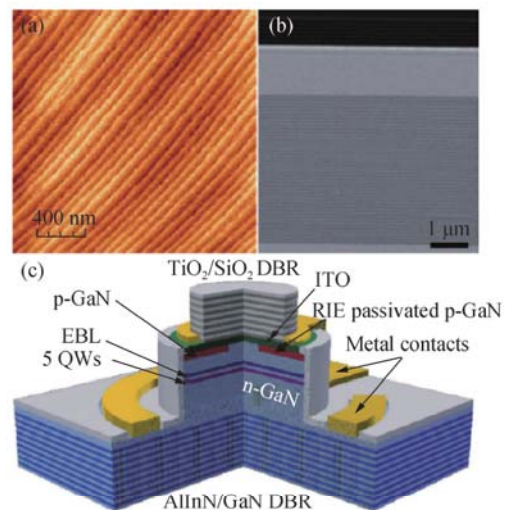


图1 NCTU 制备的插入超晶格的 AlN/GaN DBR 的透射电镜图<sup>[24]</sup>

Fig.1 Transmission electron microscope image of the AlN/GaN DBR inserted with super lattice reported by NCTU<sup>[24]</sup>

$\text{Al}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{N}/\text{GaN}$  而不产生裂纹和缺陷。此后基于  $\text{AlInN}/\text{GaN}$  混合 DBR 结构的 GaN 基 VCSEL 的研究主要集中在名城大学与史丹利电器公司。通过优化 DBR 外延生长条件,名城大学实现了反射率分别高达 99.9% 与 99.4% 以上的紫光与绿光  $\text{AlInN}/\text{GaN}$  DBR<sup>[39]</sup>。2016 年名城大学报道了具有 40 对  $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}/\text{GaN}$  的混合 DBR 结构 GaN 基 VCSEL,之后他们又连续报道了使用宽量子阱有源区<sup>[36]</sup>、具有导电性的  $\text{AlInN}/\text{GaN}$  的混合 DBR 结构 VCSEL<sup>[37]</sup>。2018 年,史丹利电器公司与名城大学在器件中引入横向  $\text{SiO}_2$  波导层,使得器件最大输出功率提升至 6 mW<sup>[18]</sup>。2019 年,通过增加谐振腔长度改善了器件的散热性能,器件光功率又大幅度提升至 22 mW 以上,并且器件最高工作温度达到 110 °C<sup>[19]</sup>。同年 8 月,他们又报道了  $16 \times 16$  的 VCSEL 阵列<sup>[17]</sup>,该阵列最大输出功率达到 1.19 W,同时具有良好的光束特性。

除了普通结构的氮化物 DBR 之外,新墨西哥大学于 2019 年报道了具有多孔结构下 DBR 的 GaN 基 VCSEL<sup>[47]</sup>,如图 3 所示。制备下 DBR 时依次生长 16



(a) 表面原子力显微镜图; (b) 截面扫描电镜 (SEM) 图; (c) 器件结构示意图。

图2 洛桑理工大学所报道混合 DBR 结构 GaN 基 VCSEL<sup>[32]</sup>  
Fig.2 GaN based VCSEL with hybrid DBR structure reported by Polytechnic University of Lausanne<sup>[32]</sup>

对非掺杂/重掺杂的 GaN 外延层,之后使用电化学腐蚀方式在重掺杂 GaN 中形成纳米孔洞。此种方式外延生长工艺更为简单,且较大的折射率差能使得纳米孔洞 DBR 具有较宽的高反带。2020 年,耶鲁大学报道了具有导电的多孔结构下 DBR 的 GaN 基 VCSEL 室温脉冲激励<sup>[40]</sup>,电流从下 DBR 通过时并未对器件阈值特性与斜率效率产生不良影响,器件阈值电流密度 42 kA/cm<sup>2</sup>,输出功率 0.12 mW。

## 2.2 双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL

双介质膜 DBR 结构 VCSEL 根据其制备方式有以下几种不同结构,如图 4 所示。图 4(a)为通过衬底转移方式制备,此种方式需要去除原始衬底并将半导体薄膜进行转移,增加了工艺复杂性,但同时也完全避开了外延生长氮化物 DBR 所面临的困难。目前采用此种技术路线的研究单位主要有日亚、松下、厦门

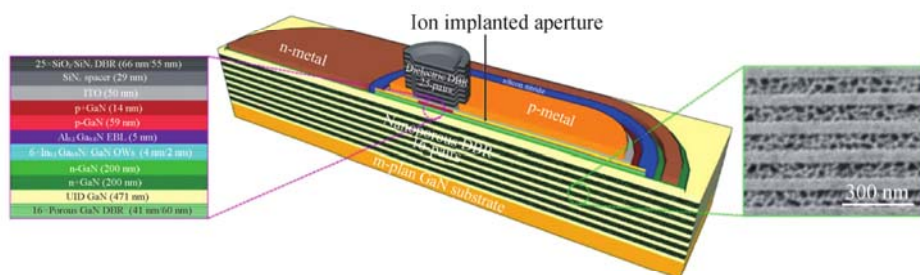


图3 新墨西哥大学所报道的纳米孔 DBR 结构 GaN 基 VCSEL<sup>[47]</sup>

Fig.3 Nanoporous DBR based GaN VCSEL reported by University of New Mexico<sup>[47]</sup>



大学、NCTU、加州大学圣巴巴拉分校. 图 4(b)和(c)分别为使用侧向外延以及在衬底侧直接制备球形

DBR 的器件结构示意图, 目前索尼采用这两种技术路线.

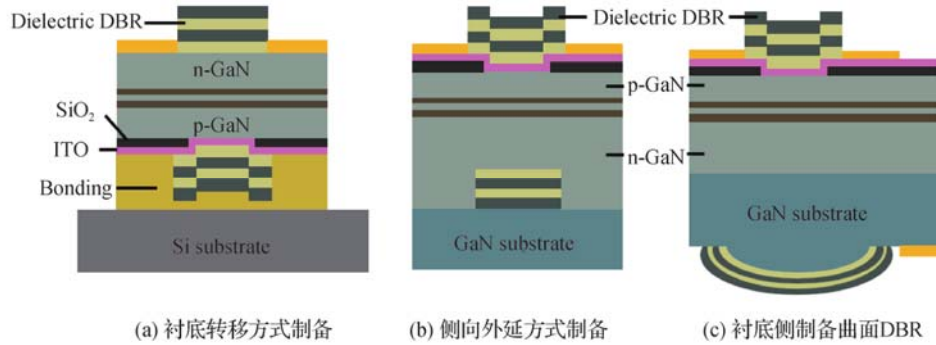


图4 双介质膜 DBR GaN 基 VCSEL 结构示意图

Fig. 4 Device structures of GaN based VCSELs with dual dielectric DBR

2008 年日亚报道了第一个双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL, 如图 5 所示<sup>[10]</sup>. 上下两个反射镜分别为 7 与 11.5 对  $\text{SiO}_2/\text{Nb}_2\text{O}_5$  介质膜 DBR, 激光波长 414 nm, 阈值电流密度  $13.9 \text{ kA}/\text{cm}^2$ , 输出功率  $0.14 \text{ mW}$ . 之后使用 GaN 衬底改善晶体质量, 器件的发光功率提升至  $0.7 \text{ mW}$ <sup>[12]</sup>, 并且实现了发光波长在 503 nm 的绿光 VCSEL 室温脉冲激励<sup>[11]</sup>. 2014 年, 厦门大学<sup>[33]</sup>报道了具有类似结构的 GaN 基 VCSEL, 器件发光波长为 422 nm, 阈值电流密度为  $1.2 \text{ kA}/\text{cm}^2$ ; 进一步通过使用 InGaN 量子点作为有源区并且使用 Cu 衬底改善散热性能, 实现了绿光 GaN 基 VCSEL

的低阈值室温连续激励, 发光波长分布在  $479.6 \sim 565.7 \text{ nm}$  之间, 覆盖了大部分绿光的范围<sup>[34-35]</sup>; 同样, 利用 InGaN 量子阱中的局域态, 并配合谐振腔效应, 在 2018 年又报道了发光波长在 493 nm 的绿光 VCSEL 室温连续激励<sup>[48]</sup>. 2020 年 NCTU 报道了首个上反射镜为介质膜光栅结构的电注入 GaN 基 VCSEL<sup>[49-50]</sup>, 如图 6 所示. 器件下反射镜为 12 对  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  介质膜 DBR, 上反射镜由条形纳米  $\text{TiO}_2$  光栅构成. 发光波长为 405 nm, 阈值电流  $I_{\text{th}}$  为 25 mA. 光栅上反射镜使得器件具有优异的偏振特性.

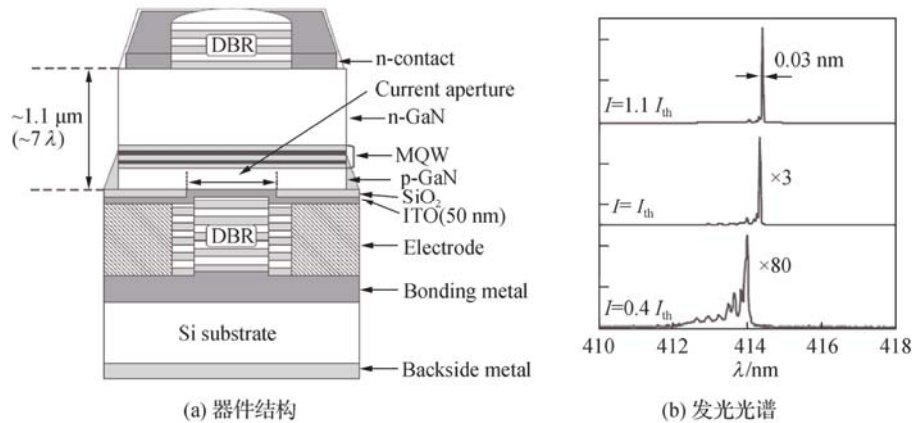
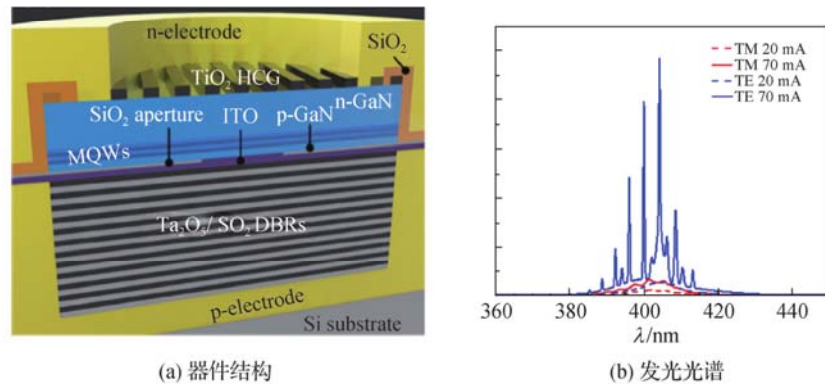
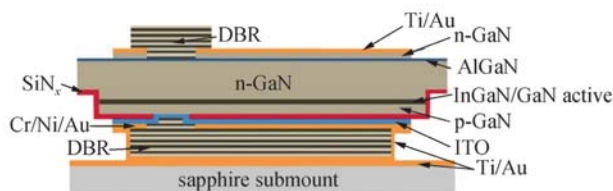


图5 日亚所报道的双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL<sup>[10]</sup>

Fig. 5 Dual dielectric DBR based GaN VCSEL reported by Nichia<sup>[10]</sup>

加州大学圣巴巴拉分校的相关研究主要集中在半极性与非极性 GaN 材料. 与极性面(c 面)InGaIn 量子阱相比, 非极性面(m 面)的量子阱有着更小的量子限制斯塔克效应(QCSE)、更低的透明载流子浓度以及更高的增益, 同时器件发光也具有良好偏振特性<sup>[51]</sup>. 2012 年, 他们报道了第一个非极性 GaN 基

VCSEL<sup>[28]</sup>, 如图 7 所示. 外延衬底为 m 面 GaN 衬底, 器件制备时使用电化学腐蚀的方式将衬底去除. 在之后的 2014—2018 年间, 他们又相继报道了偏振度 100%<sup>[27]</sup>、具有离子注入电流限制孔径<sup>[29]</sup>、具有光化学腐蚀形成的空气间隙型电流限制孔径<sup>[30]</sup>、具有隧道结电流扩展层等不同结构的非极性 GaN 基

图6 NCTU所报道的具有光栅结构上DBR的双介质膜DBR GaN基VCSEL<sup>[49-50]</sup>Fig. 6 Dual dielectric DBR based GaN VCSEL with up grating mirror reported by NCTU<sup>[49-50]</sup>图7 加州大学圣巴巴拉分校报道的非极性GaN基VCSEL<sup>[28]</sup>Fig. 7 Nonpolar GaN based VCSEL reported by University of California, Santa Barbara<sup>[28]</sup>

VCSEL<sup>[25-26,31]</sup>. 2016年他们率先尝试了对GaN基VCSEL进行高速调制测试,器件的-3 dB带宽达到1 GHz<sup>[52]</sup>.

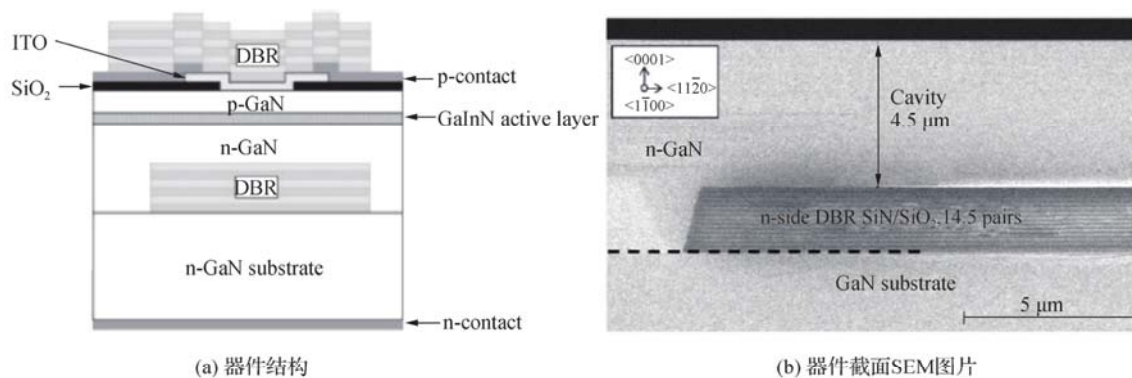
为了避免衬底转移过程中复杂的器件工艺,索尼在2015年与2018年分别报道了侧向外延<sup>[16]</sup>,以及在衬底侧制备球面DBR<sup>[53]</sup>来进行器件制备的方法.侧向外延是在生长半导体薄膜之前,先在GaN衬底上制备图形化的介质膜DBR,之后通过调控外延生长条件将DBR掩埋在GaN外延层中,如图8所示.但是侧向外延需要较为苛刻的生长条件,且在横向生长闭合的界面处位错密度较大.直接在GaN衬底背面制备曲面

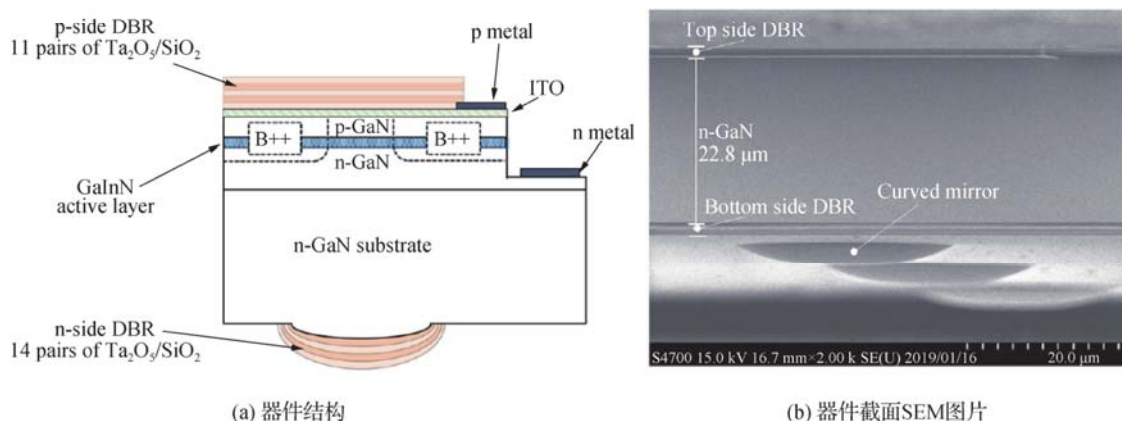
介质膜反射镜的器件结构如图9所示,DBR分别位于p-GaN侧与GaN衬底侧,因此不需要将GaN衬底去除.由于腔长较长,需要使用曲面DBR对光场加以横向束缚,减小衍射损耗<sup>[15]</sup>.之后通过优化限制孔径尺寸以及谐振腔长度,2019年索尼又分别实现了器件阈值电流为亚毫安量级以及最大输出功率为15 mW具有曲面DBR结构的VCSEL<sup>[15,54]</sup>.

### 3 绿光GaN基VCSEL

绿光是三基色之一,因此绿光VCSEL在微投影、全色激光显示、增强现实(AR)、虚拟现实(VR)等领域有着非常重要的应用.绿光波段也处于塑料光纤以及海水的低损耗窗口,因此可以应用于塑料光纤通信以及水下可见光通信.此外,绿光VCSEL在生物医疗领域也有很好的应用前景<sup>[55]</sup>.

但是与蓝光和紫光GaN基VCSEL相比,绿光GaN基VCSEL面临着更大的挑战与困难.在绿光波段,高质量、高发光效率的InGaIn量子阱的生长更为困难<sup>[8]</sup>.绿光量子阱中的高In组分会使InGaIn与

图8 索尼报道的通过侧向外延方式制备的双介质膜DBR GaN基VCSEL<sup>[16]</sup>Fig. 8 GaN based VCSEL with dual dielectric DBR fabricated by epitaxial lateral overgrowth reported by Sony<sup>[16]</sup>

图9 索尼报道的衬底侧具有曲面介质膜 DBR 的 GaN 基 VCSEL<sup>[53]</sup>Fig. 9 GaN based VCSEL with a curved bottom mirror dielectric DBR reported by Sony<sup>[53]</sup>

GaN 之间的晶格失配增大,造成较高的缺陷密度以及较大应力.同时,绿光量子阱外延生长需要更低的温度,晶体质量更难保证.量子阱中的缺陷会增加载流子的非辐射复合,而较大应力所形成的压电极化电场会带来 QCSE,降低发光效率. InGaN 量子阱在绿光波段发光效率降低,这也被称为“绿光带隙”<sup>[56]</sup>. 2010 年,日亚第一次报道了发光波长接近绿光的电注入 GaN 基 VCSEL<sup>[11]</sup>,但是其发光波长仅为 503 nm,器件只能工作在脉冲注入条件下,而且阈值电流较大.

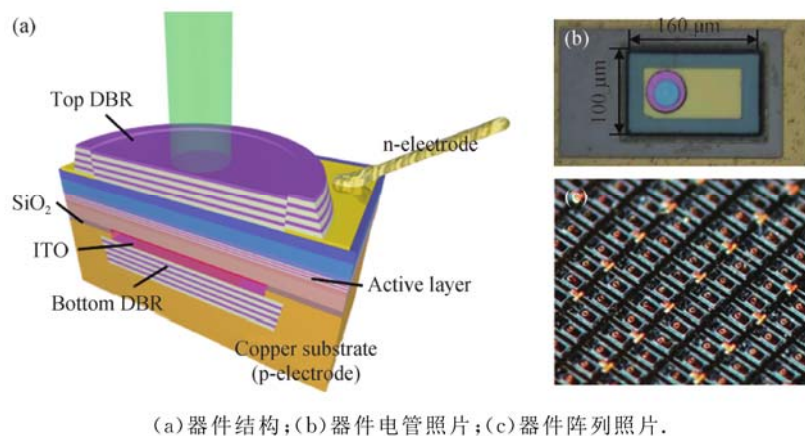
### 3.1 绿光 InGaN 量子点 VCSEL

针对绿光 GaN 基 VCSEL 中所面临的困难,2017 年,厦门大学的研究小组采用一种新的方式来制备绿光 GaN 基 VCSEL<sup>[34,57]</sup>,采用 InGaN 量子点代替量子阱作为有源区,并且使用电镀 Cu 衬底改善器件的散热特性,最终成功实现了绿光 GaN 基 VCSEL 的低阈值室温连续激射.器件结构及照片如图 10 所示.

使用量子点作为有源区能够有效降低激光器阈

值,提高器件温度稳定性<sup>[58-59]</sup>.量子点中的电子具有脉冲函数状的分立的态密度分布,因此具有比体材料以及量子阱更高的微分增益.此外,载流子被局域在量子点中,减小了被缺陷与位错等非辐射复合中心俘获的概率,量子点在一定程度上能够实现“缺陷免疫”<sup>[60]</sup>.另一方面,量子点在外延生长过程中通常是以应力驱动的 S-K (Stranski-Krastanow) 模式生长,因此量子点生长过程中存在应力释放,其内部的压电极化电场与 QCSE 也会得到减弱,发光性能进一步提升.

基于 InGaN 量子点制备的 GaN 基 VCSEL 发光光谱以及电流-电压-光功率特性如图 11 所示.3 个不同的器件在不同波长处展现出多纵模或单纵模发光,波长覆盖 480~560 nm 范围的绿光波段.图 12 为厦门大学绿光 InGaN 量子点 VCSEL 与国际其他研究小组研究结果的对比,使用 InGaN 量子点制备出覆盖绿光波段、阈值最低的 GaN 基 VCSEL.



(a) 器件结构; (b) 器件电管照片; (c) 器件阵列照片.

图10 厦门大学报道的绿光 InGaN 量子点 VCSEL<sup>[57]</sup>Fig. 10 Green InGaN quantum dot based VCSEL reported by Xiamen University<sup>[57]</sup>



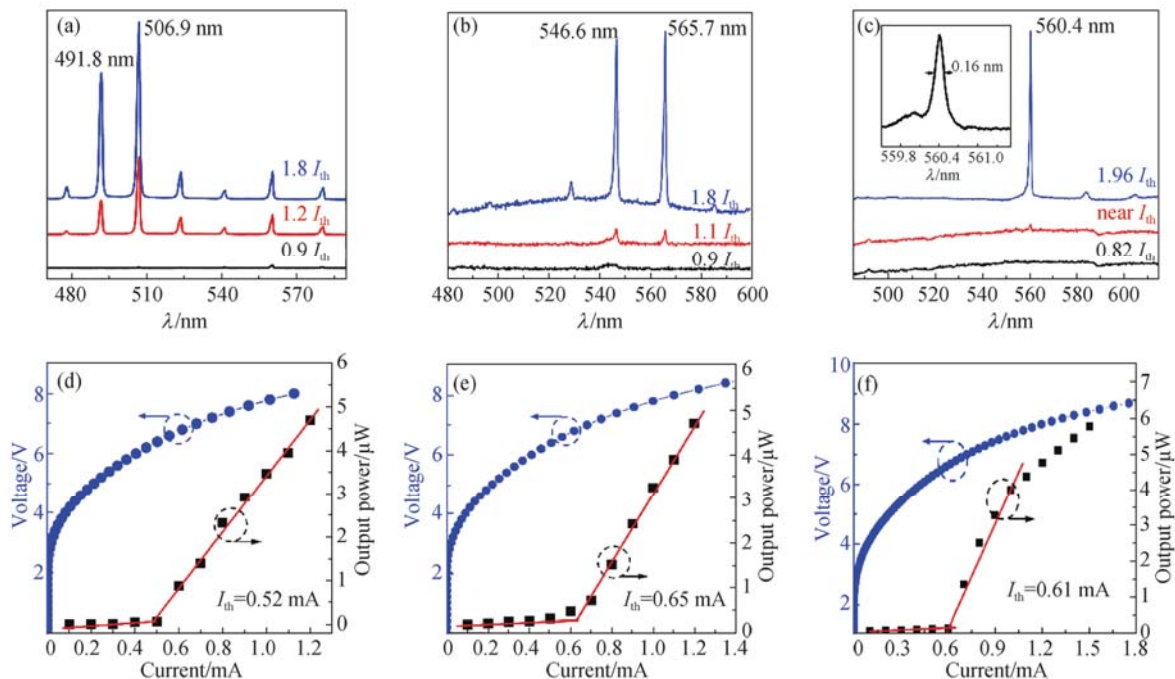


图 11 绿光 InGaN 量子点 VCSEL 的电致发光光谱(a~c)及对应的电流-电压-光功率特性曲线(d~f)<sup>[34]</sup>

Fig. 11 Electroluminescence spectrum (a-c) and corresponding current-voltage-optical power characteristic curves (d-f) of green InGaN quantum dot based VCSEL<sup>[34]</sup>

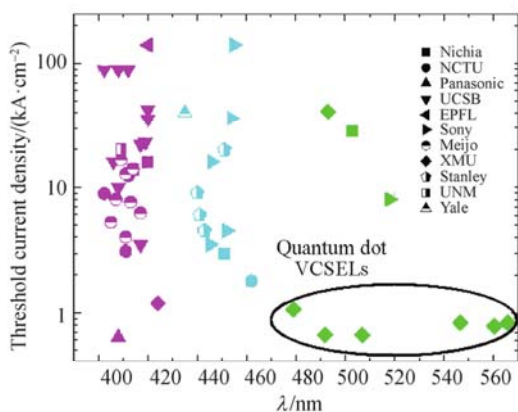


图 12 绿光量子点 VCSEL 器件特性与量子阱 VCSEL 器件特性的横向对比<sup>[34]</sup>

Fig. 12 Comparison of device performance between quantum dot based VCSELs and quantum well based VCSELs<sup>[34]</sup>

### 3.2 基于局域态的绿光 GaN 基 VCSEL

2018 年,厦门大学又报道了基于蓝光量子阱中局域态的绿光 GaN 基 VCSEL 室温连续激光<sup>[48]</sup>,器件同样为双介质膜 DBR 结构,器件性能如图 13 所示.器件发光波长主要分布在 493 nm,阈值电流为 32 mA,最大输出功率约 180  $\mu$ W.器件使用 2 对发光波长在 460 nm 的蓝光  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ (2.5 nm/6 nm)量子阱为有

源区,通过量子阱中的富 In 局域态,并配合谐振腔效应实现了绿光波段激光.这种方式避免了生长高 In 组分量子阱的问题,为绿光 GaN 基 VCSEL 的制备提供了新的思路.

### 3.3 半极性绿光 GaN 基 VCSEL

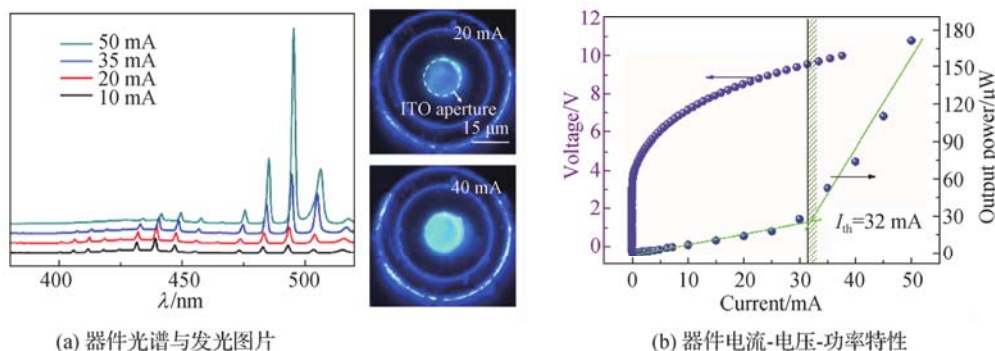
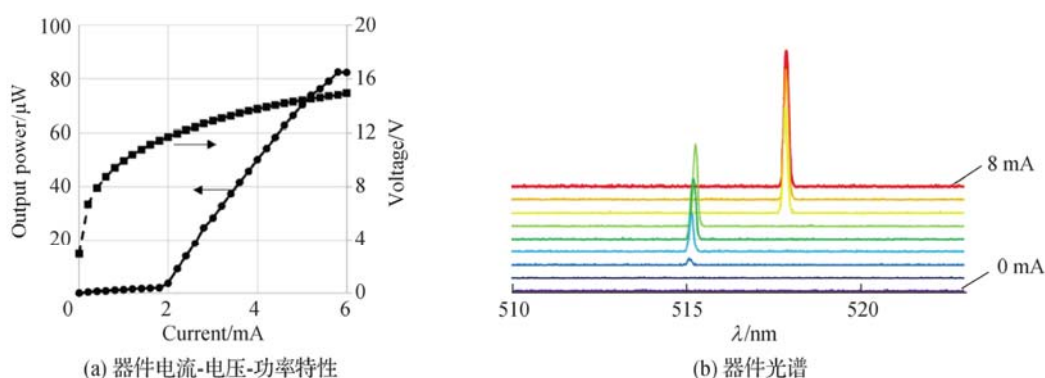
2020 年,基于半极性 InGaN 量子阱材料,索尼也同样报道了绿光 GaN 基 VCSEL 的室温连续激光<sup>[61]</sup>.他们在{20 $\bar{1}$ 1}面的半极性 GaN 衬底上外延生长了 4 对 InGaN 量子阱作为有源区,并且器件下 DBR 为 14 对直接在衬底侧制备的曲面  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  DBR.半极性 InGaN 量子阱中 QCSE 有显著减弱,且能够实现更加均匀的 In 组分分布.

器件阈值电流-电压-光功率特性以及发光光谱如图 14 所示,阈值电流 1.8 mA,激光波长 515 nm.通过使用绿光 VCSEL 配合蓝光和红光 VCSEL,他们也首次实现了全 VCSEL 产生的白光.

## 4 GaN 基 VCSEL 所面临的技术挑战

### 4.1 高质量高电导率氮化物 DBR 的外延生长

名城大学以及史丹利电器在基于  $\text{AlInN}/\text{GaN}$  混合 DBR 结构的 GaN 基 VCSEL 中已经取得较大进

图 13 厦门大学报道的局域态绿光 VCSEL 的发光特性<sup>[48]</sup>Fig. 13 Emission characteristic of green VCSEL based on localization states<sup>[48]</sup>图 14 索尼报道的半极性绿光 GaN 基 VCSEL 发光特性<sup>[61]</sup>Fig. 14 Emission characteristic of semi-polar green GaN based VCSEL reported by Sony<sup>[61]</sup>

展. 但是 AlInN/GaN DBR 的外延生长仍然面临着较大挑战. 这是因为 AlN 与 InN 的合适生长温度以及气压都有着巨大差异: AlN 的合适生长温度一般在 1 300 °C 以上, 而 InN 则小于 700 °C; AlN 的合适生长压强约为 10 kPa, 而 InN 为 100 kPa. AlInN 是 AlN 与 InN 的合金材料, 因此合适的生长条件极为苛刻, 且生长窗口很窄<sup>[39]</sup>. 另一方面, AlInN 的生长速率较慢, 虽然目前名城大学与史丹利电器已经将其生长速率提升到了 0.5 μm/h<sup>[39]</sup>, 但生长 40 对 AlInN/GaN DBR 仍需要 10 h 以上, 生产成本较大. 另外, Al<sub>0.82</sub>In<sub>0.18</sub>N 的热导率非常低, 只有约 4.3 W/mK<sup>[62]</sup>, 这也会极大影响器件散热特性. 另外一个需要解决的问题就是氮化物 DBR 的导电性. 因为高电导率氮化物 DBR 难以制备, 目前普遍采取腔内接触电极结构使注入电流绕过下 DBR. 但是这会造造成电流拥堵效应, 影响器件性能. 名城大学采用调制渐变掺杂的方法实现了具有导电性的 AlInN/GaN 混合 DBR 结构的 VCSEL 室温连续激励, 但是与下 DBR 不导电的 VCSEL 相比, 性能在一定程度上有所恶化, 说明导电性氮化物 DBR 还

有很大的优化空间.

## 4.2 光场的横向限制

GaAs 基 VCSEL 中的横向光场限制是通过 AlAs 进行氧化形成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 孔径来实现. 但是这种氧化工艺在 GaN 基材料体系中极难实现, 需要特别的器件设计以及制备工艺来对光场进行横向限制. 目前已有的做法为在 p-GaN 表面制备开有小孔的掩埋 SiO<sub>2</sub> 横向波导层. 但是有计算表明, 器件工作时 SiO<sub>2</sub> 波导层下表面的感应电荷所形成的势场会加剧电流在 p-GaN 中的横向扩散, 影响有源区的有效增益<sup>[63]</sup>. 2020 年, 史丹利电器与名城大学开发了更为简单的横向光场限制结构<sup>[46]</sup>. 他们使用电感耦合等离子体刻蚀 (ICP) 将 p-GaN 刻出具有 5 nm 高的圆柱形台面, ICP 刻蚀过的 p-GaN 区域则形成了高阻状态, 无需绝缘层来进行电流限制. 凸起的 p-GaN 圆柱台面能实现光场的横向限制, 器件结构如图 15 所示. 他们通过此种方式得到了目前 GaN 基 VCSEL 中最大的单管输出功率 24 mW (连续电流驱动下), 且器件的工作温度提升至 140 °C. 目前圆柱形台面的高度还有待进一步优



化以期取得更好的横向光场限制效果。

人们生活的方方面面带来巨大的影响。

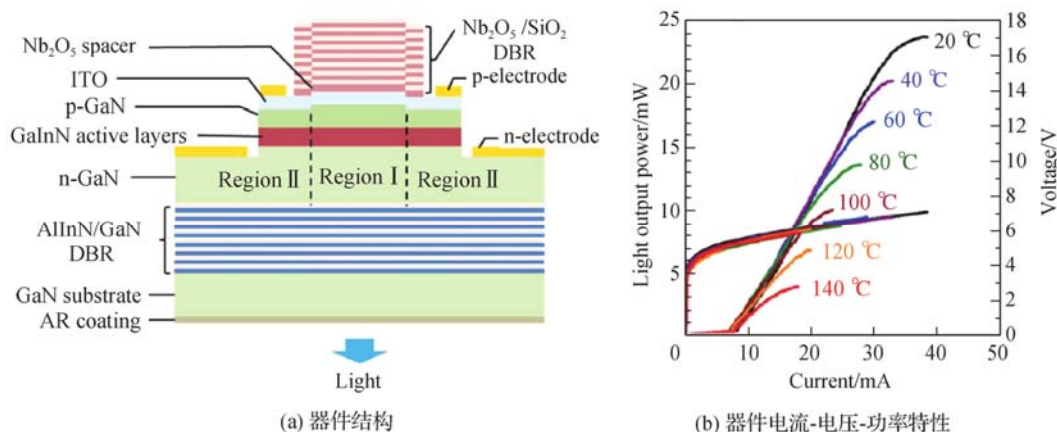


图 15 史丹利电器所报道的纳米高度圆柱形凸台限制结构 VCSEL 及器件特性<sup>[46]</sup>

Fig. 15 GaN based VCSELs with nano-height cylindrical waveguide reported by Stanley<sup>[46]</sup>

### 4.3 p-GaN 侧的电流扩展

与 GaAs 基半导体不同, p-GaN 往往具有较大的体电阻. 为了使电流能均匀注入限制孔径, 必须在 p-GaN 表面制备电流扩展结构. 目前常用的方法为沉积铟锡氧化物(ITO)透明导电层, 或者外延生长隧道结来进行电流扩展. 但是 ITO 层有较大的光吸收, 材料本身也比较昂贵; 生长隧道结则会使外延工艺更为复杂, 因此还需寻找更为简单有效的电流扩展方式.

### 4.4 高质量有源区的外延生长

虽然目前 GaN 基 VCSEL 已经取得较大单管输出功率, 但性能较好的器件需使用 GaN 单晶衬底来进行外延生长以减小晶体缺陷密度. 目前 GaN 单晶衬底仍然较为昂贵, 占据器件制备的大部分成本. 因此还需不断优化外延工艺, 以在更廉价的衬底如蓝宝石上获得更高质量的有源区材料.

## 5 总 结

自从 2008 第一支电注入器件被成功制备以来, GaN 基 VCSEL 已经取得了巨大的进展. 目前在紫光(约 400 nm)波段、蓝光(约 450 nm)波段以及绿光(500~560 nm)波段都已经实现了室温连续激光. 蓝光器件最大单管输出功率已经达到 24 mW, VCSEL 阵列输出功率已经达到 1 W 以上, 从输出功率来说蓝光 GaN 基 VCSEL 目前已经达到实用化水平. 当然, GaN 基 VCSEL 仍面临着诸多挑战, 世界范围内的研发人员正在努力解决晶体质量、器件寿命、生产成本以及晶圆大面积均匀性等问题. 这些技术问题解决之后, GaN 基 VCSEL 必将迎来商业化应用, 也势必会给

致谢: 特别感谢中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所刘建平研究员在材料外延方面的支持.

### 参考文献:

- [1] IGA K. Forty years of vertical-cavity surface-emitting laser: invention and innovation[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(8S2): 08PA01.
- [2] IGA K. Vertical-cavity surface-emitting laser: its conception and evolution[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(1): 1-10.
- [3] SODA H, IGA K, KITAHARA C, et al. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329-2330.
- [4] IGA K, KINOSHITA S, KOYAMA F. Microcavity GaAs/GaN surface-emitting laser with  $I_{th} = 6$  mA[J]. Electronics Letters, 1987, 23(3): 134-136.
- [5] KOYAMA F, KINOSHITA S, IGA K. Room-temperature continuous wave lasing characteristics of a GaAs vertical cavity surface-emitting laser[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(3): 221-222.
- [6] RUTERANA P, ALBRECHT M, NEUGEBAUER J. Nitride semiconductors: handbook on materials and devices[M]. Weinheim: Wiley, 2003.
- [7] BI W W, KUO H C, KU P C, et al. Handbook of GaN semiconductor materials and devices[M]. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017.
- [8] FUJITA S. Wide-bandgap semiconductor materials: for their full bloom[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(3): 030101.
- [9] HANADA T. Basic properties of ZnO, GaN, and related materials [M] // Oxide and nitride semiconductors.

- Heidelberg: Springer, 2009.
- [10] HIGUCHI Y, OMAE K, MATSUMURA H, et al. Room-temperature CW lasing of a GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser by current injection[J]. *Applied Physics Express*, 2008, 1(12): 121102.
  - [11] 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.
  - [12] OMAE K, HIGUCHI Y, NAKAGAWA K, et al. Improvement in lasing characteristics of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated using a GaN substrate[J]. *Applied Physics Express*, 2009, 2(5): 052101.
  - [13] ONISHI T, IMAFUJI O, NAGAMATSU K, et al. Continuous wave operation of GaN vertical cavity surface emitting lasers at room temperature[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(9): 1107-1112.
  - [14] HAMAGUCHI T, FUUTAGAWA N, IZUMI S, et al. Continuous wave operation of high power GaN-based blue vertical-cavity surface-emitting lasers using epitaxial lateral overgrowth[C]// *Gallium Nitride Materials and Devices X*. San Francisco: SPIE, 2016: 974817.
  - [15] HAMAGUCHI T, NAKAJIMA H, TANAKA M, et al. Sub-milliamper threshold continuous wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser with lateral optical confinement by curved mirror[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(4): 044004.
  - [16] IZUMI S, FUUTAGAWA N, HAMAGUCHI T, et al. Room-temperature continuous-wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated using epitaxial lateral overgrowth[J]. *Applied Physics Express*, 2015, 8(6): 062702.
  - [17] KURAMOTO M, KOBAYASHI S, AKAGI T, et al. Watt-class blue vertical-cavity surface-emitting laser arrays[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(9): 091004.
  - [18] KURAMOTO M, KOBAYASHI S, AKAGI T, et al. Enhancement of slope efficiency and output power in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with a SiO<sub>2</sub>-buried lateral index guide[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(11): 111104.
  - [19] KURAMOTO M, KOBAYASHI S, AKAGI T, et al. High-output-power and high-temperature operation of blue GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(11): 112101.
  - [20] HSIEH D H, TZOU A J, KAO T S, et al. Improved carrier injection in GaN-based VCSEL via AlGaIn/GaN multiple quantum barrier electron blocking layer[J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27145-27151.
  - [21] LIN B C, CHANG Y A, CHEN K J, et al. Design and fabrication of a InGaIn vertical-cavity surface-emitting laser with a composition-graded electron-blocking layer[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(8): 085002.
  - [22] LU T C, CHEN J R, CHEN S W, et al. Development of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(3): 850-860.
  - [23] LU T C, CHEN S W, WU T T, et al. Continuous wave operation of current injected GaN vertical cavity surface emitting lasers at room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(7): 071114.
  - [24] LU T C, KAO C C, KUO H C, et al. CW lasing of current injection blue GaN-based vertical cavity surface emitting laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(14): 141102.
  - [25] FORMAN C A, LEE S, YOUNG E C, et al. Continuous-wave operation of m-plane GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with a tunnel junction intracavity contact[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(11): 111106.
  - [26] FORMAN C A, JOHN T L, ERIN C Y, et al. Nonpolar GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[C]// 2016 International Semiconductor Laser Conference (ISLC). Piscataway: IEEE, 2016: 1-2.
  - [27] HOLDER C O, LEONARD J T, FARRELL R M, et al. Nonpolar III-nitride vertical-cavity surface emitting lasers with a polarization ratio of 100% fabricated using photoelectrochemical etching[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(3): 031111.
  - [28] HOLDER C, SPECK J S, DENBAARS S P, et al. Demonstration of nonpolar GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(9): 092104.
  - [29] LEONARD J T, COHEN D A, YONKEE B P, et al. Nonpolar III-nitride vertical-cavity surface-emitting lasers incorporating an ion implanted aperture[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(1): 011102.
  - [30] LEONARD J T, YONKEE B P, COHEN D A, et al. Nonpolar III-nitride vertical-cavity surface-emitting laser with a photoelectrochemically etched air-gap aperture[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(3): 031111.
  - [31] LEONARD J T, YOUNG E C, YONKEE B P, et al. Demonstration of a III-nitride vertical-cavity surface-emitting laser with a III-nitride tunnel junction intracavity

- contact[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(9): 091105.
- [32] COSENDEY G, CASTIGLIA A, ROSSBACH G, et al. Blue monolithic AlInN-based vertical cavity surface emitting laser diode on free-standing GaN substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(15): 151113.
- [33] LIU W J, HU X L, YING L Y, et al. Room temperature continuous wave lasing of electrically injected GaN-based vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251116.
- [34] MEI Y, WENG G E, ZHANG B P, et al. Quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers covering the 'green gap'[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(1): e16199.
- [35] WENG G E, MEI Y, LIU J P, et al. Low threshold continuous-wave lasing of yellow-green InGa<sub>0.5</sub>N-QD vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15546-15553.
- [36] FURUTA T, MATSUI K, HORIKAWA K, et al. Room-temperature CW operation of a nitride-based vertical-cavity surface-emitting laser using thick GaInN quantum wells[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(5S): 05FJ11.
- [37] IKEYAMA K, KOZUKA Y, MATSUI K, et al. Room-temperature continuous-wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with n-type conducting AlInN/GaN distributed Bragg reflectors[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(10): 102101.
- [38] MATSUI K, KOZUKA Y, IKEYAMA K, et al. GaN-based vertical cavity surface emitting lasers with periodic gain structures[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(5S): 05FJ08.
- [39] TAKEUCHI T, KAMIYAMA S, IWAYA M, et al. GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with AlInN/GaN distributed Bragg reflectors[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2019, 82(1): 012502.
- [40] ELAFANDY R T, KANG J H, LI B J, et al. Room-temperature operation of c-plane GaN vertical cavity surface emitting laser on conductive nanoporous distributed Bragg reflector[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(1): 011101.
- [41] CHIOU S W, LEE Y C, CHIH-SUNG C, et al. High-speed red RCLEDs and VCSELs for plastic optical fiber application [C] // *Light-emitting diodes: research, manufacturing, and applications IX*. San Jose: SPIE, 2005: 129-133.
- [42] LI C Y, LU H H, TSAI W S, et al. A 5 m/25 gbps underwater wireless optical communication system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 1-9.
- [43] HAAS H. High-speed wireless networking using visible light[J]. *SPIE Newsroom*, 2013. doi: 10.1117/2.1201304.004773.
- [44] HONDA T, KATSUBE A, SAKAGUCHI T, et al. Threshold estimation of GaN-based surface emitting lasers operating in ultraviolet spectral region[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995, 34: 3527-3532.
- [45] REDWING J M, LOEBER D A S, ANDERSON N G, et al. An optically pumped GaN-AlGa<sub>0.5</sub>N vertical cavity surface emitting laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69(1): 1-3.
- [46] KURAMOTO M, KOBAYASHI S, AKAGI T, et al. Nano-height cylindrical waveguide in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(8): 082005.
- [47] MISHKAT-UL-MASABIH S M, ARAGON A A, MONA-VARIAN M, et al. Electrically injected nonpolar GaN-based VCSELs with lattice-matched nanoporous distributed Bragg reflector mirrors[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(3): 036504.
- [48] XU R B, MEI Y, XU H, et al. Green vertical-cavity surface-emitting lasers based on combination of blue-emitting quantum wells and cavity-enhanced recombination[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(10): 4401-4406.
- [49] 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.
- [50] CHANG T C, KUO S Y, HASHEMI E, et al. GaN vertical-cavity surface-emitting laser with a high-contrast grating reflector[C] // *High Contrast Metastructures VIII*. San Francisco: SPIE, 2018: 105420T.
- [51] SCHWARZ U T, KNEISSL M. Nitride emitters go nonpolar[J]. *Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters*, 2007, 1(3): A44-A46.
- [52] SHEN C, LEONARD J T, YOUNG E C, et al. GHz modulation bandwidth from single-longitudinal mode violet-blue VCSEL using nonpolar InGa<sub>0.5</sub>N/GaN QWs [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*. San Jose: OSA, 2016: STh1L.2.
- [53] NAKAJIMA H, MITOMO J, FUJII K, et al. Recent progress in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers having dielectric distributed Bragg reflectors[C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*. San Jose: OSA, 2019: 109181J.
- [54] NAKAJIMA H, HAMAGUCHI T, TANAKA M, et al.



- Single transverse mode operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser with monolithically incorporated curved mirror[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(8):084003.
- [55] XU H, MEI Y, XU R B, et al. Green VCSELs based on nitride semiconductors[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, 59(SO):SO0803.
- [56] LANGER T, KRUSE A, KETZER F A, et al. Origin of the "green gap": increasing nonradiative recombination in indium-rich GaInN/GaN quantum well structures[J]. *Physica Status Solidi (c)*, 2011, 8(7/8):2170-2172.
- [57] MEI Y, XU R B, YING L Y, et al. Room temperature continuous wave lasing of GaN-based green vertical-cavity surface-emitting lasers [C] // *Gallium Nitride Materials and Devices XIV*. San Francisco: SPIE, 2019: 109181H.
- [58] ARAKAWA Y, SAKAKI H. Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current[J]. *Applied Physics Letters*, 1982, 40(11):939-941.
- [59] ARAKAWA Y. Progress in GaN-based quantum dots for optoelectronics applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(4): 823-832.
- [60] DAMILANO B, VEZIAN S, GRANDJEAN N, et al. Strong carrier localization in GaInN/GaN quantum dots grown by molecular beam epitaxy [J]. *JJAP* 1999, 38(12A):L1357-L1359.
- [61] HAMAGUCHI T, HOSHINA Y, HAYASHI K, et al. Room-temperature continuous-wave operation of green vertical-cavity surface-emitting lasers with a curved mirror fabricated on {20 $\bar{2}$ 1} semi-polar GaN[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(4):041002.
- [62] MEI Y, XU R B, XU H, et al. A comparative study of thermal characteristics of GaN-based VCSELs with three different typical structures[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2018, 33(1):015016.
- [63] GAO Y B, ZHANG Y H, CHU C S, et al. Effectively confining the lateral current within the aperture for GaN based VCSELs by using a reverse biased NP junction [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(4): 1-7.

## Progress of GaN based vertical cavity surface emitting lasers

YING Leiyang, MEI Yang, ZHANG Baoping\*

(School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** As a type of semiconductor lasers with the beam propagating vertically to the device top surface, GaN based vertical cavity surface emitting laser (VCSELs) can emit wavelengths that cover the full visible spectrum. GaN based VCSELs are Characterised with single longitudinal mode operation, low threshold current, circular beam profile, high coupling efficiency with optical fiber, and the capable of high density two dimensional array. Therefore, they are considered as the ideal light source for the next generation semiconductor lighting, microprojection, full color display, and visible light communication. To date, great progresses have developed in GaN based VCSELs and the commercialization is just around the corner. In this paper, comparing with the already commercialized GaAs based VCSELs, we review application fields, the current status, and the technical route of GaN based VCSELs. In addition, recent progresses in green VCSELs are emphasized, and challenges faced by GaN based VCSELs are discussed.

**Keywords:** GaN; vertical cavity surface emitting laser; green light