

GaN 垂直腔面发射激光器的发展与挑战(特邀)

石磊, 杨涛, 王亚超, 马立龙, 应磊莹, 梅洋*, 张保平**

厦门大学电子科学与技术学院(国家示范性微电子学院), 福建 厦门 361005

摘要 氮化镓(GaN)基垂直腔面发射激光器(VCSEL)的发光波长可覆盖整个可见光波段,具有阈值电流较低、发散角较小、单纵模工作,以及输出光束呈圆对称等优点,因此被认为是光存储、激光打印机、光通信、生物传感器等应用领域的理想光源。首先回顾了 GaN 基 VCSEL 的发展历史,简要介绍了它的应用领域;然后讨论了不同结构的 GaN 基 VCSEL 的发展路线;最后着重介绍了曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的发展背景、研究进展、设计和工艺制备中的关键问题以及面临的挑战。

关键词 激光器; 氮化镓; 垂直腔面发射激光器; 分布式布拉格反射镜; 曲面反射镜

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL241069

1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)的构想^[1]最早于 1977 年由东京工业大学的 Iga 提出,这一构想的动机源于当时边发射激光器(EEL)存在多方面的问题,包括 EEL 的制备与测试方法不适用于大规模生产、难以统一不同器件的激光波长,以及很难实现单纵模工作。1979 年, Soda 等^[2]在 77 K 温度下使用 GaAs 基材料首次实现了电注入 GaInAsP/InP VCSEL 的脉冲激射。与 EEL 相比, VCSEL 具有低阈值、较好的温度稳定性、低功耗、可制备二维阵列等优点^[3-4]。自从第一支 VCSEL 成功实现电注入激射之后,其逐渐成为国际上的研究热点。

早期的 VCSEL 研究主要基于 GaAs 基材料体系,其发光波长集中在近红外波段^[5]。1989 年 Koyama 等^[6]在室温下实现了 GaAlAs/GaAs VCSEL 的连续激射。此后, GaAs 基 VCSEL 进入迅速发展阶段, 808、850、980 nm 波长的 GaAs 基 VCSEL 陆续被研制成功^[7]。在 GaAs 基 VCSEL 的结构中, GaAs 与 AlAs 具有相对较大的折射率差和较小的晶格失配^[8],具有高电导率的 p 型与 n 型 GaAs/GaAlAs 分布式布拉格反射镜(DBR)的外延生长较为容易。因此,在 GaAs 衬底上可以生长 30 对 GaAs/GaAlAs DBR 并能达到 99.9% 的反射率。GaAs 基 VCSEL 电极一般都沉积在具有高电导率的 DBR 表面上,电流穿过 DBR 均匀注入谐振腔而不会产生拥堵效应^[9]。此外,在 GaAs 基 VCSEL 中,谐振腔内的 AlAs 层可被氧化成 Al₂O₃,进而形成氧化物窗口,实现对电流和光场的横向限

制^[10-11]。晶格匹配的材料体系和成熟的制备工艺促使 GaAs 基 VCSEL 在 1996 年成功实现了最早的商业化应用。目前, GaAs 基 VCSEL 已被广泛应用于短距离高速数据传输与通信、3D 智能感知、激光雷达、红外照明、数据中心等领域^[12-13]。

与近红外波段不同,可见光波段的 VCSEL 器件主要由 GaN 基材料制备。GaN 是一种宽带隙第三代半导体材料,其发光波长可从红外延伸至深紫外波段。此外, GaN 基半导体材料还具备击穿电场高、抗辐照能力强、化学稳定性好等优越性能^[14]。但是与 GaAs 基 VCSEL 的快速发展相比, GaN 基 VCSEL 在早期阶段发展较为缓慢,这是因为 GaN 单晶的外延生长非常困难。1989 年之后, Bi 等^[15-17]成功制备出高质量的 GaN 单晶薄膜,并克服了 p 型掺杂的技术难题。2008 年, Lu 等^[18]在 77 K 温度下实现了世界上第一支电注入蓝光 GaN 基 VCSEL 的连续激射。此后,许多研究团队开始专注于电注入 GaN 基 VCSEL 的设计与研发。多个高校和公司^[19-34]相继实现了电注入 GaN 基 VCSEL 的激射。迄今为止, GaN 基 VCSEL 的研究工作主要是基于法布里-珀罗谐振腔(F-P)结构开展的。虽然 F-P 型的 GaN 基 VCSEL 器件性能目前已经有了很大的提高,但距离商业化应用仍存在很大差距。国内外研究人员不断从各个方面寻求突破,平凹型谐振腔结构逐渐被大家关注。1966 年 Kogelnik 等^[35]指出平面反射镜和曲面反射镜可以构成一个稳定的激光器谐振腔。谐振腔内的光斑束腰位于平面反射镜处,可以极大降低衍射和散射损耗。1979 年, Iga 等^[36]利用化学刻蚀方法制备了含有

收稿日期: 2024-07-19; 修回日期: 2024-09-01; 录用日期: 2024-10-22; 网络首发日期: 2024-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20493, 62234011, 62104204)

通信作者: *meiyang@xmu.edu.cn; **bzhang@xmu.edu.cn

平面反射镜和曲面反射镜的 InP 基垂直腔发光二极管(LED),为曲面反射镜在 VCSEL 中的应用提供了实验依据。2003 年, Park 等^[37]在抛光后的蓝宝石衬底背面上,以曲面透镜作为下反射镜、平面 GaN 作为上反射镜,成功实现了室温下光注入 GaN 基 VCSEL 的脉冲激射。次年, Aldaz 等^[38]实现了具有曲面反射镜结构的电注入 GaAs 基 VCSEL 的连续激射,进一步证明了曲面反射镜应用在 VCSEL 中的可行性。2018 年, Hamaguchi 等^[39]成功实现了室温下电注入曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的脉冲激射,此后几年陆续实现了蓝光和绿光曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的室温连续激射。2023 年, Palmquist 等^[40]在室温下也成功实现了具有曲面 DBR 结构的非极性面(m 面)GaN 基 VCSEL 的连续激射。这一系列的研究成果表明具有曲面反射镜结构的 GaN 基 VCSEL 的应用前景十分广阔。

2 GaN 基 VCSEL 的应用场景

与 GaAs 基 VCSEL 相比, GaN 基 VCSEL 可以提供从紫外到可见光波段的发射波长,因此 GaN 基 VCSEL 在激光打印、半导体激光照明、激光显示、高密度光存储、光互连及水下通信等领域中具有广阔的应用前景^[41]。

在可见光照明领域, VCSEL 发射的光束方向性较强,适用于音乐节、演唱会、火车头灯与机场跑道等需要高度方向性光源的场景。另外, VCSEL 易于二维阵列集成,预计能够实现比单管 EEL 更低的能耗和更高的发光功率。在微显示领域,由于 GaN 基 VCSEL 发光波长连续可调,且光束质量好、发散角较小,使用 GaN 基 VCSEL 不仅可以增强色彩饱和度,还能拓展色域范围。GaN 基 VCSEL 在显示方面可应用于增强现实技术(AR)/虚拟现实技术(VR)、家庭影院、激光电视等领域。视网膜投影技术(RID)也是 GaN 基 VCSEL 在微显示领域的一个重要应用^[42]。2018 年, QD Laser 公司推出了首款基于激光视网膜投影技术的智能眼镜。基于 RID 的智能眼镜不仅能够实现更加自然和逼真的增强现实体验,还无需晶状体聚焦,可以有效减轻市面上 AR 与 VR 眼镜带来的眼部不适感。此外, GaN 基 VCSEL 还具有体积小和功耗低的优点,将在可穿戴电子设备(如健身追踪器、智能眼镜和智能手表等)领域中发挥重要作用。

GaN 基 VCSEL 在军事和医疗领域也有广泛的应用。蓝光和绿光波段是光在海水中低损耗传播的窗口。因此,蓝光与绿光 GaN 基 VCSEL 可用于潜艇通信和深海探测^[43]。在医疗领域,蓝色激光可以用于外科手术,而紫外激光可以用于癌症的早期治疗。在医学诊断中,使用波长为 410 nm 的激光诱导荧光,可以在不使用活检的情况下检测皮肤癌和食管癌^[44-45]。除此之外, GaN 基 VCSEL 还可以应用于激光美容等

领域。

3 GaN 基 VCSEL 的技术路线

VCSEL 中的光子在上下 DBR 之间反复振荡形成谐振。由于光在谐振腔内传播的单程增益很小,为确保达到激射条件(即增益大于损耗),谐振腔两端的 DBR 需要具有 99% 以上的高反射率以减少镜面损耗^[46]。GaN 基 VCSEL 的谐振腔结构可分为混合 DBR 结构和双介质膜 DBR 结构,如图 1 所示。前者谐振腔反射镜由氮化物的下 DBR 和介质膜材料的上 DBR 构成,后者上下反射镜均由介质膜 DBR 构成。混合 DBR 谐振腔结构较为简单,但是外延生长高反射率的氮化物 DBR 仍面临较大技术挑战。由于生长氮化物 DBR 的两种不同折射率材料如 GaN/AlN、GaN/AlGaIn 往往存在较大的晶格失配,因此外延生长的氮化物 DBR 一般会存在高密度位错甚至会产生裂纹。这不仅会降低 DBR 的反射率,还会影响其上生长的有源区质量。对于图 1(b)、(c)所示的双介质膜 DBR 结构,高反射率和宽高反带的介质膜 DBR 较容易实现,但是此类 VCSEL 器件会引入较为复杂的制备工艺,如衬底剥离、薄膜转移、侧向外延等。此外,器件性能的统一性也难以得到保证。

3.1 混合 DBR 结构 GaN 基 VCSEL

Lu 等^[18]于 2008 年报道了第一个具有混合 DBR 结构的电注入 GaN 基 VCSEL,其下反射镜为 29 对 AlN/GaN DBR,并在 77 K 下实现了波长为 462.8 nm 的连续激射。2010 年,他们通过将 30 nm 厚的氧化铟锡(ITO)层与重掺杂的 p 型 InGaIn 接触层相结合减少了光损耗,在室温下实现了发光波长为 412 nm 的混合 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 的连续激射^[48],阈值电流密度为 12.4 kA/cm²。由于 AlN/GaN DBR 中极大的应力带来的困难,晶格匹配 AlInN/GaN DBR 逐渐受到了人们的关注。Cosendey 等^[27]于 2012 年报道了 GaN 衬底上存在 41.5 对 Al_{0.8}In_{0.2}N/GaN 下 DBR 的 GaN 基 VCSEL,并实现了发光波长为 420 nm 的电注入脉冲激射。当 In 的原子数分数为 0.18 时, AlInN 与 GaN 晶格较为匹配,因此可以连续生长多对高质量 Al_{0.82}In_{0.18}N/GaN DBR。2016 年, Matsui 等^[49]报道了含有 40 对 Al_{0.82}In_{0.18}N/GaN 下 DBR 的 GaN 基 VCSEL,该器件的有源区采用周期性增益结构(PGS)提高了有源区与光场之间的耦合。之后他们又报道了一款混合 DBR 结构 VCSEL,该结构 VCSEL 采用宽量子阱有源区^[30]和具有导电性的 Al_{0.82}In_{0.18}N/GaN^[50]。2018—2024 年,研究者通过不断改善器件的结构设计以及制备工艺,快速提升了含有 AlInN/GaN 下 DBR 的混合结构 GaN 基 VCSEL 的性能。比如:采用掩埋 SiO₂ 电流限制层实现横向光场限制,斜率效率可达到 0.87 W/A,光输出功率为 6 mW^[51];通过增加谐振腔长

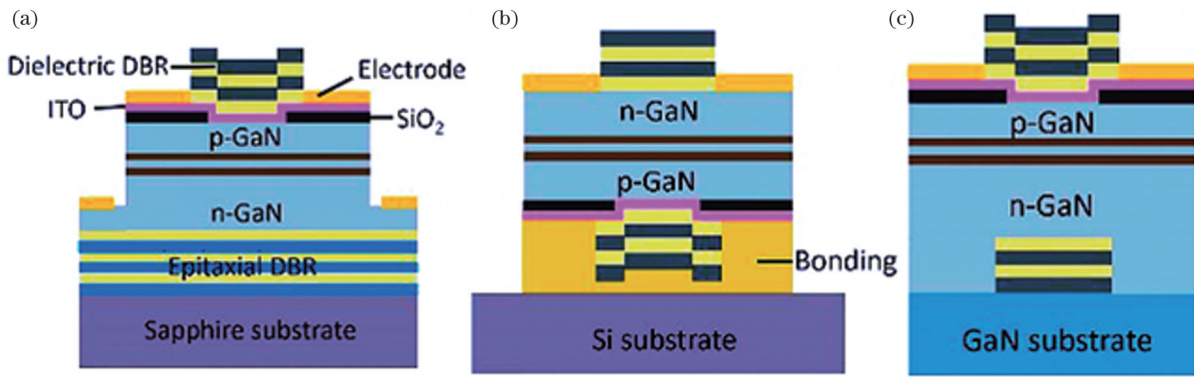


图1 GaN基VCSEL的两种不同结构示意图^[47]。(a)混合DBR结构VCSEL;(b)通过衬底转移方式制备的双介质膜DBR结构VCSEL;(c)通过侧向外延方式制备的双介质膜DBR结构VCSEL

Fig. 1 Schematic diagrams of two different structures of GaN-based VCSELs^[47]. (a) VCSEL with hybrid DBR structure; (b) VCSEL with double dielectric DBR structure fabricated by substrate transfer technique; (c) VCSEL with double dielectric DBR structure fabricated by epitaxial lateral overgrowth technique

度改善器件的散热性能,输出功率提升到15.7 mW^[52]。之后他们报道了16×16 VCSEL阵列的最大输出功率可达到1.19 W^[53]。除此之外,他们还提出采用纳米高度圆柱波导(NCW)结构替代掩埋式横向限制,有效地提高了横向电流和光场限制能力,最大输出功率可以达到23.7 mW^[54]。其器件结构、单管功率-电流($P-I$)特性曲线如图2所示。研究者此后通过原位反射率光谱测量技术,利用原位腔长控制方法开发了40对AlInN/GaN DBR,将片内厚度偏差降低至0.3%^[55]。同一年,他们通过原位腔长控制技术和非原位光谱测量方法,精确控制了GaN基VCSEL的腔长,器件激光波长为417.7 nm,墙插效率(WPE)最高可达到21.3%^[56]。日亚公司(Nichia)近年来也在AlInN/GaN混合DBR结构GaN基VCSEL方面取得了较大进展。2021年,日亚公司在c面GaN衬底上外延生长了高反射率的AlInN/GaN DBR,实现了毫瓦级的单模蓝光及绿光的室温连续激光^[57]。蓝光VCSEL的WPE为13.6%,寿命超过1000 h,在直径为

2 inch(1 inch=2.54 cm)的晶片上器件的良率超过了80%。表1总结了近年来混合DBR结构GaN基VCSEL的器件性能参数,其中 I_{th} 为阈值电流, J_{th} 为阈值电流密度, P_{max} 为最大输出功率,SE为斜率效率。虽然混合DBR结构VCSEL尤其是晶格匹配AlInN/GaN DBR已取得了较大的进展,但是AlInN和GaN材料之间的折射率差比较小(仅有9%),这导致DBR高反带宽比较窄。为了达到较高的反射率,通常需要外延生长40对以上的DBR结构。然而,Al_{0.82}In_{0.18}N材料中的In组分极难控制,且合适的生长窗口较窄,很难快速生长高质量的氮化物DBR^[58]。虽然名城大学与日亚在AlInN/GaN DBR生长方面进行了深入研究,但是最快生长速率仅为0.5 μm/h,单独生长40对AlInN/GaN DBR就需要将近12 h^[59]。生长成本较高也是阻碍GaN基VCSEL大规模生产的一个重要因素。除此之外,AlInN的热导率非常低,只有~4.3 W·mK⁻¹^[60],AlInN/GaN DBR会严重影响器件的散热,造成器件性能的劣化。

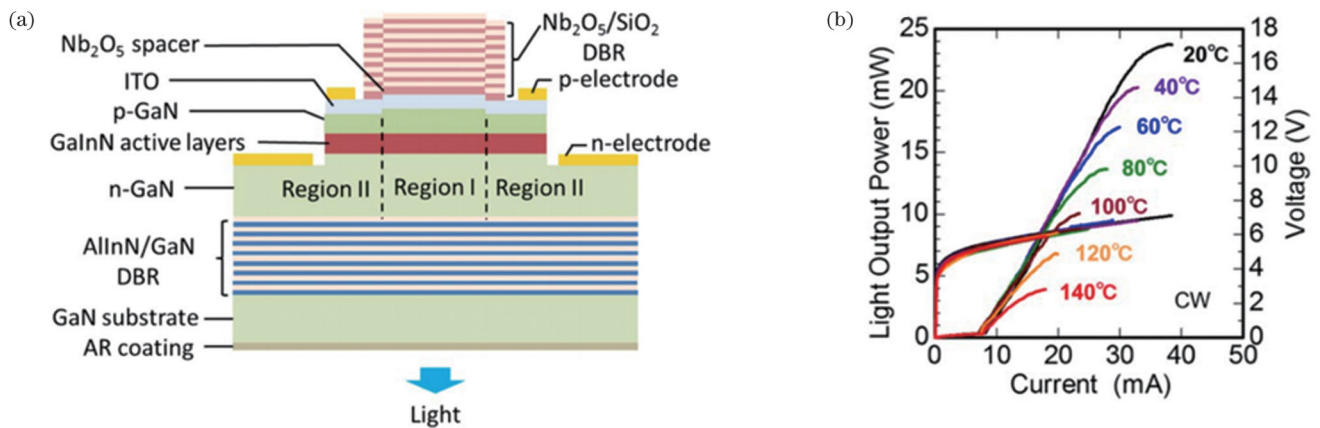


图2 具有NCW结构的GaN基VCSEL^[54]。(a)器件结构图;(b)器件的电流-功率和电流-电压特性曲线

Fig. 2 GaN-based VCSEL with NCW structure^[54]. (a) Device structure; (b) current-power and current-voltage characteristic curves of device

表1 混合 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 的性能总结
Table 1 Performance summary of GaN-based VCSELs with hybrid DBR structures

Ref.	Bottom DBR	Top DBR	Operation condition	Aperture / μm	Wavelength / nm	I_{th} / mA	J_{th} / (kA/cm^2)	P_{max} / mW	SE / (W/A)	WPE / %
[18]	AlN/GaN \times 29	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ \times 8	77 K, continuous wave	10	462.8	1.4	1.8			
[48]	AlN/GaN \times 29	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ \times 10	Room temperature, continuous wave	10	412	9.7	12.4			
[27]	Al _{0.8} In _{0.2} N/ GaN \times 41.5	TiO ₂ /SiO ₂ \times 7	Room temperature, pulsed laser	8	420	70	140			
[49]	Al _{0.82} In _{0.18} N/ GaN \times 40	Nb ₂ O ₅ /SiO ₂ \times 8	Room temperature, continuous wave	8	409.9	8.3	16.5			
[30]	AlInN/GaN \times 40	Nb ₂ O ₅ /SiO ₂ \times 8	Room temperature, continuous wave	8	413.5		7.5	0.045		
[50]	Al _{0.82} In _{0.18} N/ GaN \times 46 (n-type conducting)	Nb ₂ O ₅ /SiO ₂ \times 8	Room temperature, continuous wave	8	405.1	2.6	5.2			
[51]	AlInN/GaN \times 42	Nb ₂ O ₅ /SiO ₂ \times 10.5	Room temperature, continuous wave	8	441	3	6	6	0.87 (pulsed laser)	
[52]	AlInN/GaN \times 41	Nb ₂ O ₅ /SiO ₂ \times 10.5	From 20 °C to room temperature, continuous wave	8	440.1	4.5	9.0	15.7	0.87	8.9
[53]	AlInN/GaN \times 41	Nb ₂ O ₅ /SiO ₂ \times 10.5	From 20 °C to room temperature, continuous wave	6	447	140		1190		4.2
[54]	AlInN/GaN \times 40	Nb ₂ O ₅ /SiO ₂ \times 10.5	From 20 °C to room temperature, continuous wave	7/3	450	8.2/1.4		23.7/5	1.2/0.7	10/9.9
[57]	Al _{0.8} In _{0.2} N/GaN	Nb ₂ O ₅ /SiO ₂	Room temperature, continuous wave	4/5	442.3/ 514.9	0.4/2.8	3.2/14.3	>2.5/ >1.5		13.6/13.7
[56]	AlInN/GaN \times 40	Nb ₂ O ₅ /SiO ₂ \times 10	Room temperature, continuous wave	8/5	417.7	~5/2.5		13.1/ >12		15/21.3

3.2 双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL

2008年,日亚报道了第一个电注入双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL^[61],并在室温下实现了发光波长为 414 nm 的连续激光,阈值电流密度为 13.9 kA/cm²,输出功率为 0.14 mW。由于器件外延衬底为蓝宝石,因此在器件制备过程中需要将样品键合到 Si 支撑衬底上,并采用激光剥离的方法将蓝宝石衬底去除。此后,多所高校均采用衬底转移方式制备了双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL。衬底转移方式虽然会在一定程度上增加 VCSEL 制备工艺的复杂性,但是也避免了难以生长高质量氮化物 DBR 的问题。2009年,日亚采用 GaN 衬底进行外延生长以改善外延片的晶体质量^[31],将器件的输出功率提升至 0.8 mW,并且在室温下实现了波长为 503 nm 的 GaN 基 VCSEL 脉冲激光^[62]。2012年加州大学圣巴巴拉分校(UCSB)报道了第一个 m 面双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL,器件

脉冲激光波长为 411.9 nm^[63]。m 面上生长的 InGaN 量子阱的发光具有更优越的偏振特性,并且具有更高的增益和更小的量子限制斯塔克效应。在之后的 2014—2018年,厦门大学首先报道了蓝紫光波段的电注入双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 的室温连续激光^[26]。之后通过使用 InGaN 量子点作为有源区并使用高热导率的铜衬底改善散热性能^[64],厦门大学牵头的研发团队又成功实现了国际上首个绿光 GaN 基 VCSEL 的室温连续激光,器件发光波长在 479.6~565.7 nm 区间^[65]。通过利用 InGaN 量子阱中的局域态并配合谐振腔效应,他们也实现了发光波长为 493 nm 的绿光 VCSEL 室温连续激光^[66]。2023年,他们使用 InGaN 量子点作为有源区,利用短腔长($\sim 4\lambda$,其中 λ 为波长)将自发辐射耦合因子提高到 0.094,并有效降低了光损耗。此外,器件引入高热导率 AlN 层作为电流限制层以提高器件的散热效率,在室温下实现了发光波长为 524 nm 的

连续激光, 阈值电流密度仅为 $\sim 52 \text{ A/cm}^2$, 这是目前报道的最低阈值电流密度^[67]。器件结构与激光性能如图 3、4 所示。与传统的双介质膜 DBR 结构不同, 2020 年 Chang 等^[68]报道了第一个上反射镜为介质膜光栅结构的电注入 GaN 基 VCSEL, 器件上反射镜由条形纳米 TiO_2 光栅构成, 光栅上反射镜使得器件具有优异的偏振特性, 器件激光波长为 405 nm, 阈值电流为 25 mA。表 2 总结了近年来双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 的器件性能参数, 其中 HCG 为高折射率对比度光栅。双介质膜 DBR 结构 VCSEL 一般采用衬底转移法制备, 虽然避开了外延生长氮化物 DBR 所面临的困难, 但是也增加了器件制备工艺的复杂性。与氮化物 DBR 相比, 双介质膜 DBR 的散热特性更差, SiO_2 的热

导率只有 $1.5 \text{ W}\cdot\text{mK}^{-1}$ ^[69]。VCSEL 较低的散热效率会使器件运行时内部温度升高, 导致有源区增益下降、激光阈值升高等问题。因此, 如何解决双介质膜 DBR 结构的 GaN 基 VCSEL 的散热问题仍是一大难点。此外, 双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 一般采用蓝宝石衬底, 而异质外延生长的晶体质量普遍较差, 限制了 VCSEL 性能的进一步提升。GaN 基 VCSEL 的谐振波长由腔长决定, 所以谐振腔腔长必须精确控制。在双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 制备过程中多是采用化学机械抛光 (CMP) 工艺控制厚度, 但是 CMP 工艺难以保证 VCSEL 腔长的均匀性。因此, 双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 的产业化发展仍面临较大困难。

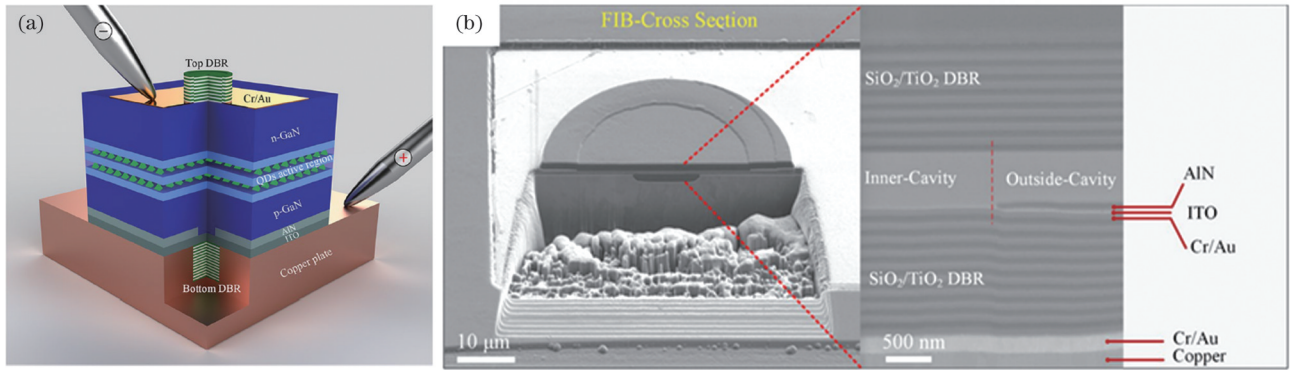


图 3 具有 InGaN 量子点有源区的 GaN 基 VCSEL 结构^[67]。(a) 器件结构示意图; (b) 器件的横截面

Fig. 3 Structure of GaN-based VCSEL with InGaN quantum dot active region^[67]. (a) Device structure diagram; (b) cross section image of device

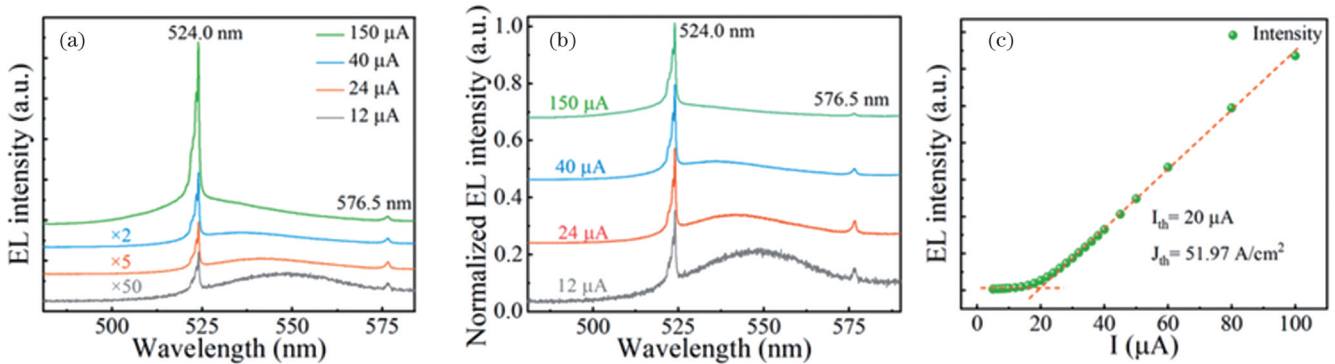


图 4 具有 InGaN 量子点有源区的 GaN 基 VCSEL 的激光性能^[67]。(a) 电致发光光谱; (b) 归一化的电致发光光谱; (c) 电致发光强度随电流的变化情况

Fig. 4 Laser emission performance of GaN-based VCSEL with InGaN quantum dot active region^[67]. (a) Electroluminescence spectra; (b) normalized electroluminescence spectra; (c) electroluminescence intensity versus current

为避免制备器件所需的衬底转移技术中的激光剥离以及化学机械抛光等复杂工艺, 日本索尼公司开发了侧向外延 (ELO) 工艺用于 GaN 基 VCSEL 的制备。通过侧向外延技术, 他们在样品外延阶段就将介质膜 DBR 掩埋到 n-GaN 中。2015 年, 索尼公司利用 ELO 技术在 n 型 GaN 衬底上成功制备了第一个电注入双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL, 室温下的激光波长为 446 nm, 光输出功率为 0.9 mW ^[33]。2016 年, 他们采用离

子注入电流限制孔径, 将光输出功率提升到 1.1 mW ^[70]。其器件结构图和横截面扫描电子显微镜 (SEM) 照片如图 5 所示。ELO 技术路线不仅简化了器件制作工艺, 还利用 GaN 衬底的高热导率改善了器件的散热特性, 谐振腔长也可通过外延得到精确控制。但是 ELO 技术需要非常严格的外延生长技术与条件, 并且在侧向外延闭合的界面处位错密度较大。基于此种技术路线的 GaN 基 VCSEL 近年来鲜有进一步报道。

表 2 双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 的性能总结

Table 2 Performance summary of GaN-based VCSELs with double dielectric DBR structures

Ref.	Bottom DBR	Top DBR	Operation condition	Aperture / μm	Wavelength / nm	I_{th} / mA	J_{th} / (kA/cm ²)	P_{max} / mW	SE / (W/A)	WPE / %
[61]	SiO ₂ /Nb ₂ O ₅ × 11.5	SiO ₂ /Nb ₂ O ₅ × 7	Room temperature, continuous wave	8	414	7	13.9	0.14		
[31]	SiO ₂ /Nb ₂ O ₅ × 11.5	SiO ₂ /Nb ₂ O ₅ × 7	Room temperature, continuous wave	8	420	8		0.62		
[62]	SiO ₂ /Nb ₂ O ₅ × 11.5	SiO ₂ /Nb ₂ O ₅ × 7	Room temperature, continuous wave/pulsed laser	8/10	451/503	1.5/22	3.28	0.7/0.8		
[63]	SiO ₂ /Ta ₂ O ₅ × 13	SiO ₂ /Ta ₂ O ₅ × 10	Room temperature, pulsed laser	10	411.9	80		0.0195		
[26]	ZrO ₂ /SiO ₂ × 17.5	ZrO ₂ /SiO ₂ × 14	Room temperature, continuous wave	10	422	0.93	1.2			
[64]	TiO ₂ /SiO ₂ × 12.5	TiO ₂ /SiO ₂ × 11.5	Room temperature, continuous wave	10	560.4	0.61	0.78			
[65]	TiO ₂ /SiO ₂ × 12.5	TiO ₂ /SiO ₂ × 11.5	Room temperature, continuous wave	10	491.8/565.7/560.4	0.52/0.65/0.61	0.66/0.83/0.78		6.2/7.64/11.82	
[66]	Ti ₃ O ₅ /SiO ₂ × 13.5	Ti ₃ O ₅ /SiO ₂ × 11	Room temperature, continuous wave	15	493	32	18	0.178		
[68]	SiO ₂ /Ta ₂ O ₅ × 12	TiO ₂ -HCG	Room temperature, pulsed laser	10	400	25	31.8			
[67]	TiO ₂ /SiO ₂ × 12.5	TiO ₂ /SiO ₂ × 8	Room temperature, continuous wave	7	524	0.02	0.05197			

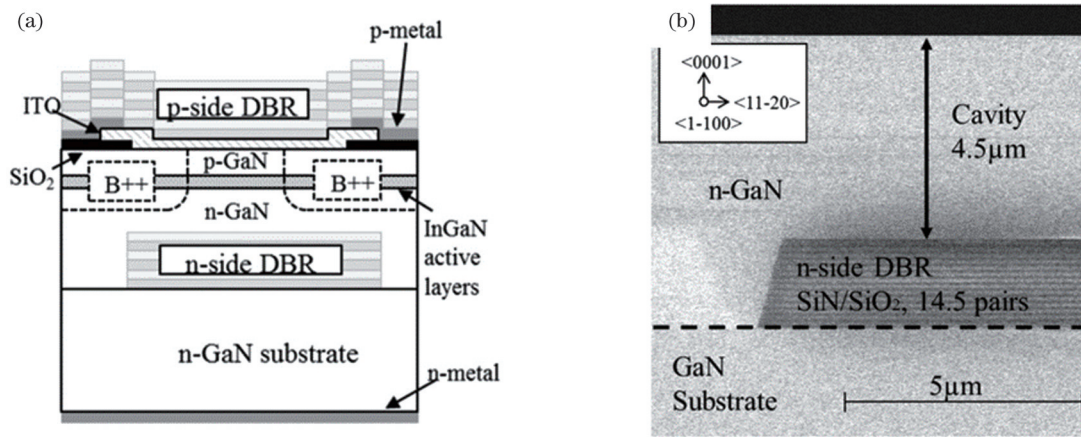


图 5 侧向外延方式制备双介质膜 DBR GaN 基 VCSEL^[70]。(a) 器件结构示意图；(b) 器件横截面 SEM 图像

Fig. 5 Fabrication of double dielectric DBR GaN-based VCSEL by epitaxial lateral overgrowth technique^[70]. (a) Device structure diagram; (b) cross-section SEM image of device

4 曲面反射镜 GaN 基 VCSEL

GaN 基 VCSEL 研究虽然已经取得了巨大进展,但是主流的两种 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 仍面临一些技术难点。如混合 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 存在外延生长氮化物 DBR 困难、生长时间长、成本高等问题;双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 面临制备工艺复杂、异质外延晶体质量差、谐振腔腔长均匀性差、难以量产等

难题。针对上述问题,2018 年 Hmaguchi 等^[39]提出了新型的含有曲面反射镜的 GaN 基 VCSEL,器件结构如图 6 所示。器件结构的外延生长使用 GaN 衬底,其中平面结构的介质膜上 DBR 位于 p-GaN 侧,曲面结构的介质膜下 DBR 位于减薄后的 GaN 衬底侧。器件制备时一般只需要将 GaN 衬底的厚度减薄至 20~50 μm 而不需要将其剥离。由于谐振腔包含了部分 GaN 衬底,其腔长要远大于传统结构的 GaN 基 VCSEL,此时器件背

面的曲面 DBR 具有良好的横向光场限制能力,可抑制大腔长带来的衍射损耗。与混合 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 相比,曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 结构避免了条件严苛以及成本高昂的氮化物 DBR 外延生长过程;与传统双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 相比,曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 结构不需要复杂的衬底转移工艺,GaN 单晶衬底上的同质外延生长使得有源区质量更高,这对于获取高性能激光器件至关重要。传统的法布里-珀罗(F-P)腔型 GaN 基 VCSEL 的腔长较短,一

般为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$,腔长轻微波动就会使器件激光波长发生较大的变化。相比之下,曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的平凹稳定腔结构具有极低的衍射损耗,因此其谐振腔长度($20\sim 50\ \mu\text{m}$)可以较大,并且抛光造成的腔长轻微波动不会对器件性能造成明显影响,确保了 GaN 基 VCSEL 阵列中器件性能的均一性。此外,长腔长的引入降低了 GaN 衬底抛光减薄的难度,也可显著提升器件的散热性能。以上曲面 DBR 结构器件的这些优势使得 GaN 基 VCSEL 的产业化具有良好的前景。

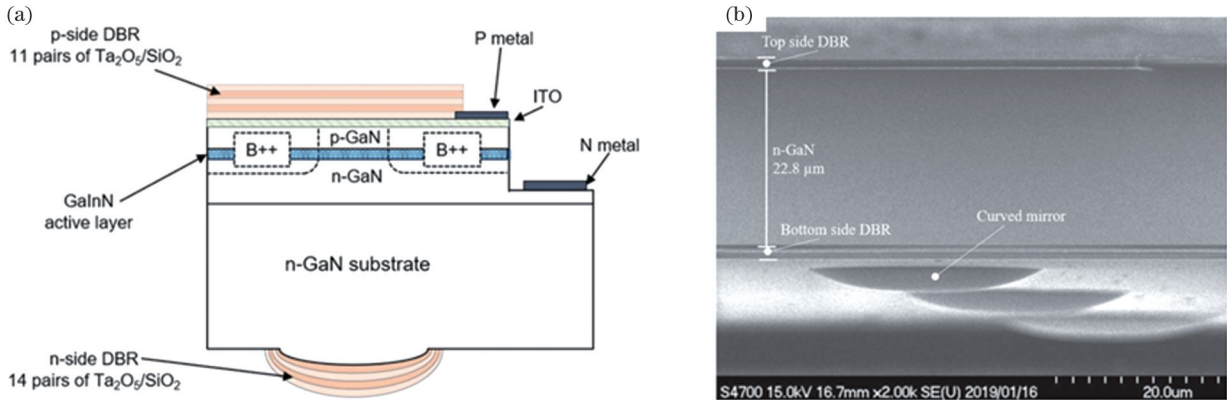


图 6 曲面反射镜 GaN 基 VCSEL^[71]。(a) 器件结构示意图;(b) 器件横截面 SEM 图像

Fig. 6 Curved mirror GaN-based VCSEL^[71]. (a) Device structure diagram; (b) cross-sectional SEM image of device

4.1 曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的研究进展

2018年, Hmaguchi等^[39]实现了第一支电注入曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的室温脉冲激光。器件的谐振腔长为 $28\ \mu\text{m}$, 曲面反射镜的曲率半径为 $74\ \mu\text{m}$ 。电流注入孔径为 $6\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 的器件的阈值电流分别为 $40\ \text{mA}$ 和 $70\ \text{mA}$, 激光波长为 $441\sim 455\ \text{nm}$, 如图 7 所示。器件的近场模式分布如图 8 所示, 模式光斑直径仅为 $2\ \mu\text{m}$, 远小于电流注入孔径的尺寸, 表明曲面 DBR 良好的横向光场限制能力。

2019年, Hamaguchi等^[71]将电流注入孔径缩小至 $3\ \mu\text{m}$, 并通过硼离子注入进行横向电流限制, 从而实现了第一支曲面 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 的电注入

室温连续激光, 器件腔长为 $25.6\ \mu\text{m}$, DBR 曲率半径为 $29.1\ \mu\text{m}$ 。图 9 为器件的 $P-I$ 特性曲线以及激光光谱, 阈值电流仅为 $0.25\ \text{mA}$, 对应阈值电流密度为 $3.5\ \text{kA}/\text{cm}^2$, 激光波长为 $445.3\ \text{nm}$ 。同一年, 同一研究组的 NaKajima等^[72]通过调整曲面 DBR 的曲率半径, 进一步将器件的输出功率提高到 $7.1\ \text{mW}$ 。在绿光波段, 曲面 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 研究也取得了较大进展。2020年, Hamaguchi等^[73]在 {20-21} 半极性 GaN 衬底上制备了曲面反射镜, 实现了电注入绿光曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的室温连续激光, 阈值电流密度为 $14.4\ \text{kA}/\text{cm}^2$, 激光波长为 $515\ \text{nm}$ 。如图 10 所示, 在半极性 GaN 衬底上制备的曲面反射镜在 $[-1014]$ 和 $[-12-10]$

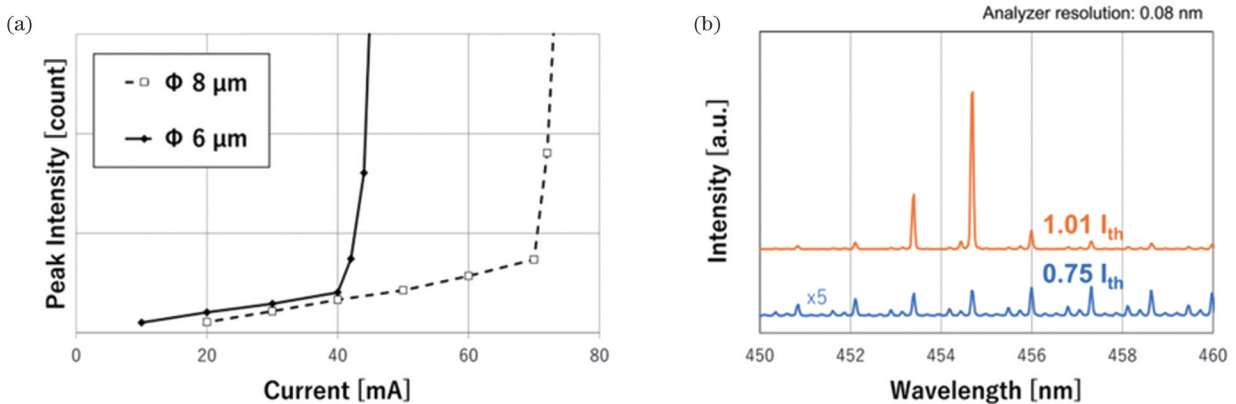


图 7 曲面反射镜 GaN 基 VCSEL^[39]。(a) 注入电流-输出强度曲线;(b) 电注入光谱(电流注入孔径为 $6\ \mu\text{m}$)

Fig. 7 Curved mirror GaN-based VCSEL^[39]. (a) Injection current-output intensity curves; (b) current injection spectra (current injection aperture of $6\ \mu\text{m}$)

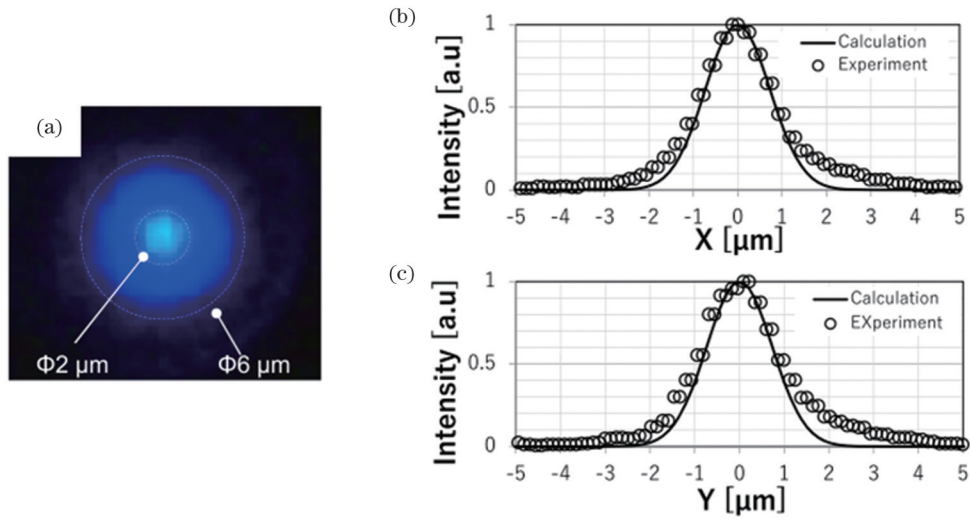


图 8 电流注入孔径为 $6 \mu\text{m}$ 的曲面反射镜 GaN 基 VCSEL^[39]。(a) 注入电流为 $1.1I_{th}$ 时的近场图形；(b)(c) 近场模式分布
Fig. 8 Curved mirror GaN-based VCSEL with current injection aperture of $6 \mu\text{m}$ ^[39]. (a) Near-field pattern when injection current is $1.1I_{th}$; (b)(c) near-field mode distributions

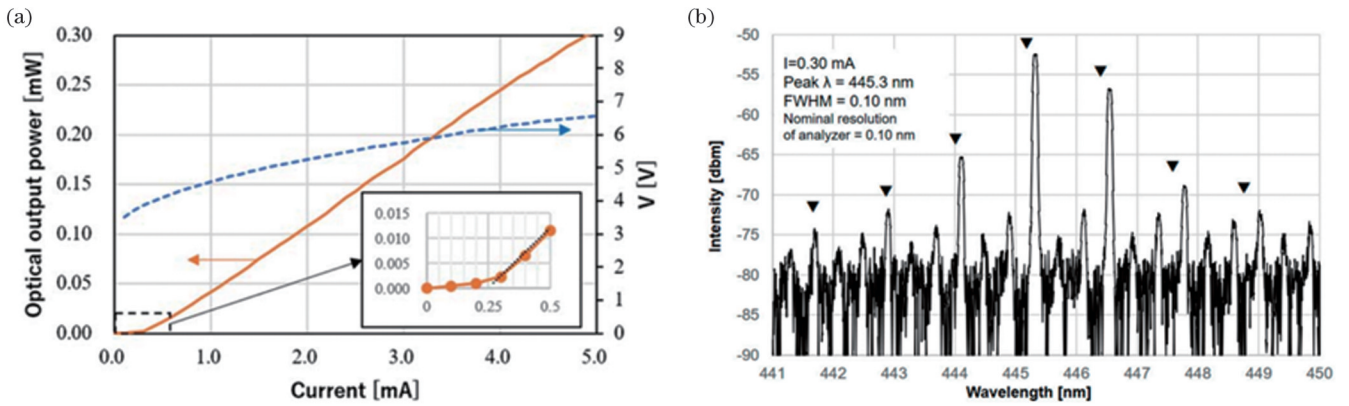


图 9 曲面反射镜结构的 GaN 基 VCSEL^[71] (电流注入孔径为 $3 \mu\text{m}$)。(a) 电流注入下的电流-电压和电流-功率曲线；(b) 0.3 mA 电流注入下的发射光谱图像
Fig. 9 GaN-based VCSEL with curved mirror structure^[71] (current injection aperture of $3 \mu\text{m}$). (a) Current-voltage and current-power curves under current injection; (b) emission spectrum at current injection of 0.3 mA

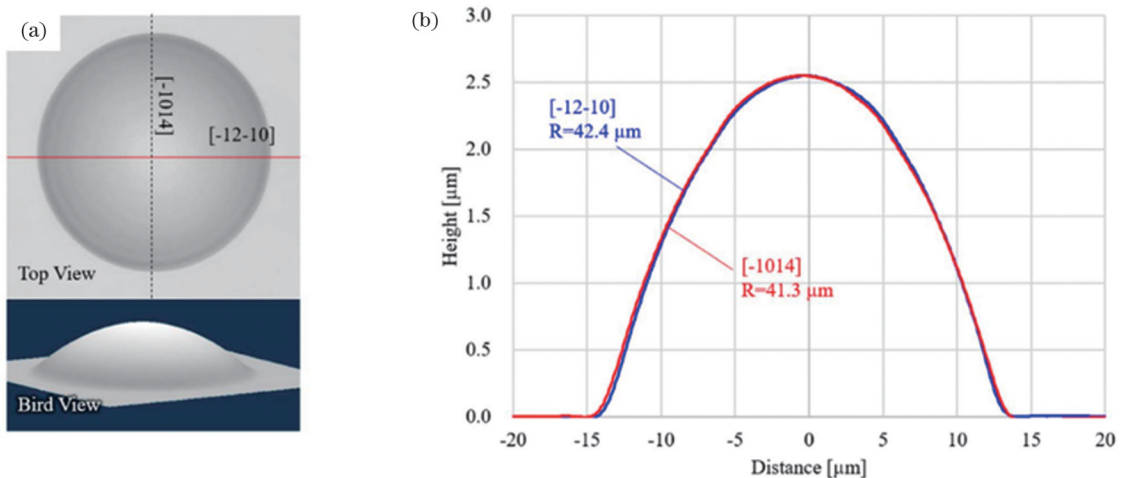


图 10 基于 GaN 制备的曲面透镜^[73]。(a) 曲面透镜的激光共聚焦扫描图像；(b) 曲面透镜不同方向的横截面轮廓
Fig. 10 Curved lens fabricated based on GaN^[73]. (a) Laser confocal scanning image of curved lens; (b) cross-sectional profiles of curved lens in different directions

两个方向上的曲率半径几乎相同,并且曲面表面都十分光滑,这说明 GaN 衬底上的曲面透镜的形貌在制备过程中不受 GaN 晶向的影响。他们还基于曲面反射镜结构的蓝光、绿光 VCSEL 以及 GaAs 基红光 VCSEL

搭建了初步的白光显示系统,如图 11 所示。2023 年,同一研究组的 Ito 等^[74]将曲面 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 的 WPE 进一步提高到 13.4%,且 VCSEL 阵列中每个器件的性能具有良好的均一性。

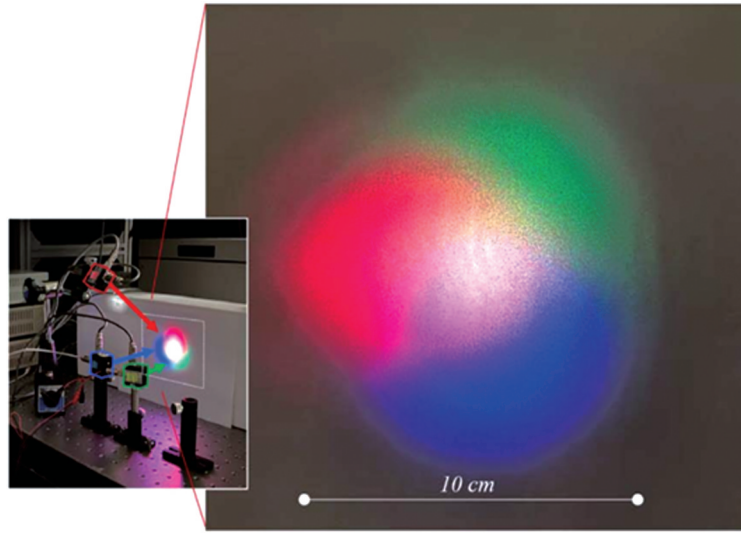


图 11 基于 VCSEL 的由红色、蓝色和绿色光束叠加而形成的白色光束^[73]

Fig. 11 White light formed by overlap of red, blue, and green beams based on VCSEL^[73]

除了索尼公司之外,加州大学圣巴巴拉分校的研究小组近期也报道了曲面 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 的研究成果。2023 年,Palmquist 等^[40]在室温下成功实现了曲面 DBR 结构 m 面 GaN 基 VCSEL 的连续激光,阈值电流密度为 7.3 kA/cm^2 。不同的是该器件的曲面透镜位于器件顶部,避开了曲面反射镜的支撑工艺。器件结构如图 12 所示,器件腔长为 $10.7 \mu\text{m}$,曲面反射

镜的曲率半径为 $31 \mu\text{m}$ 。次年,他们制备了器件顶端为 SiO_2 曲面透镜的 m 面 GaN 基 VCSEL^[75],器件的边模抑制比最高为 30 dB。但是 SiO_2 的折射率较低,导致曲面透镜的有效焦距增大,使得平面端的束腰尺寸比单纯 GaN 曲面透镜大 17%,削弱了器件的横向光场限制作用。表 3 总结了近年来曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的性能参数,其中 NP 为纳米多孔。

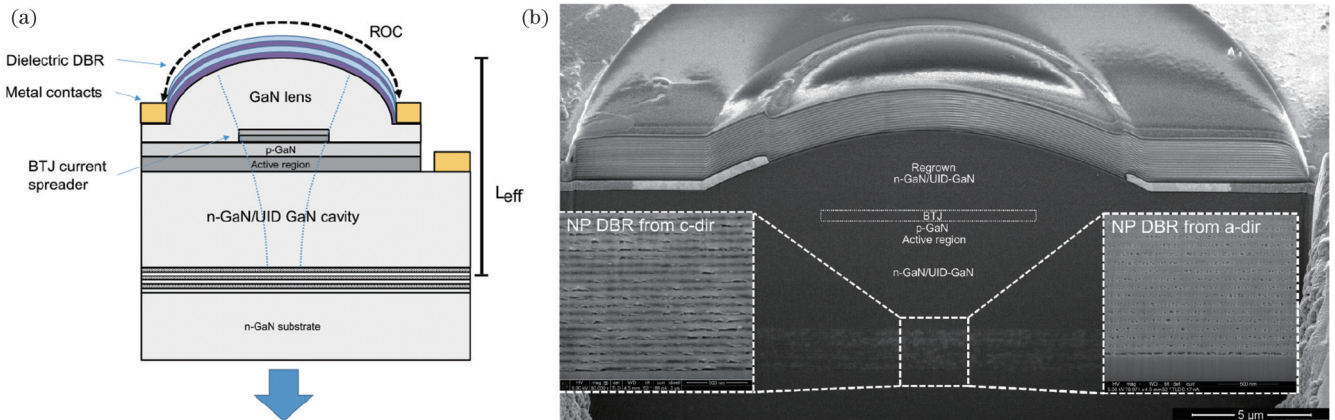


图 12 顶侧曲面反射镜结构 GaN 基 VCSEL^[40]。(a) 器件结构示意图;(b) 器件横截面 SEM 图像

Fig. 12 GaN-based VCSEL with top-side curved mirror structure^[40]. (a) Device structure diagram; (b) cross-section SEM image of device

4.2 曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的设计要点与关键工艺

4.2.1 曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的设计要点

曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 通过将光场束腰控制在平面反射镜一侧,实现了横向光场限制。然而,光场束腰半径决定了光场的横向尺寸,所以需要调

整曲面反射镜的曲率半径和谐振腔腔长,以精确控制光场束腰的位置和大小。此外,腔长还决定了谐振波长和纵向模式间距,所以必须选择合适腔长以确保纵模驻波分布与有源区增益区间重叠。因此,曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的设计需要综合考虑曲率半径、腔长、光场束腰半径和纵模间距等结构参

表 3 曲面反射镜结构 GaN 基 VCSEL 器件性能总结

Table 3 Performance summary of GaN-based VCSEL devices with curved mirror structures

Ref.	Bottom DBR	Top DBR	Operation condition	Aperture / μm	Cavity length / μm	Radius of curvature / μm	Wavelength / nm	J_{th} / (kA/cm ²)	P_{max} / mW	Crystal orientation of GaN	WPE / %
[39]	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×14	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×11.5	Room temperature, pulsed laser	8/6	28.3	74	441-445	141/139		{000-1}	
[71]	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×14	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×11.5	Room temperature, continuous wave	3	25.6	29.1	445.3	3.5	>0.3	{000-1}	
[72]	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×14	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×7	From 20 °C to room temperature, continuous wave	4/8	22	51/82	443.2		7.1/15.4	{000-1}	9.2%
[76]	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×14	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×11	Room temperature, continuous wave	4	23	52	451.8	4.5		{000-1}	
[73]	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×14	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×11.5	Room temperature, continuous wave	4	18.6	41.3/42.4	515.2	14.4		{20-21}	<0.1
[74]	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×14	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×7.5	Room temperature, continuous wave	3	29	33.5	442.1		7.6	{000-1}	13.4
[40]	NP DBR	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×16	Room temperature, pulsed laser/continuous wave	9	60.5λ	31	411	6.6/7.3	0.29/0.13	{10-10}	
[75]	NP DBR	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ ×16	Room temperature, continuous wave	10	65λ	120	404.5	14	0.37	{10-10}	

数,这些是实现器件高性能的关键因素。曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 中的高斯光束光场分布遵循以下理论公式^[77]:

$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{n\pi} \sqrt{LR - L^2}} \quad (1)$$

式中: δ 是高斯分布的标准偏差; n 是谐振腔介质的等效折射率; L 是谐振腔腔长; R 是曲面镜的曲率半径。可以看出,束腰半径($\omega_0 = 2\delta$)可以由 L 和 R 决定,且根据经典光腔理论, R 大于 L 时才能得到稳定的激光谐振腔。图 13 展示了 VCSEL 中高斯光束束腰尺寸

随着 L 和 R 的变化情况。对式(1)进行微分求解,当 $d\delta/dL=0$ 时, $R=2L$ 。如图 13(a) 所示, R 固定不变,当 $L=R/2$ 时, L 的小范围波动基本不会对束腰尺寸产生影响。图 13(b) 展示了束腰尺寸随 R 的变化情况, L 固定不变,在 $R=2L$ 附近,可以粗略估算出当 R 与 $2L$ 间存在 10% 偏移时束腰尺寸仅产生 $\sim 0.01 \mu\text{m}$ 的变化。由于器件的发散角与束腰尺寸呈倒数关系,也可以忽略 R 偏移对发散角的影响。因此,当 $R=2L$ 时,近场图案(NFP)和远场图案(FFP)基本不会受到 L 和 R 的影响^[78]。

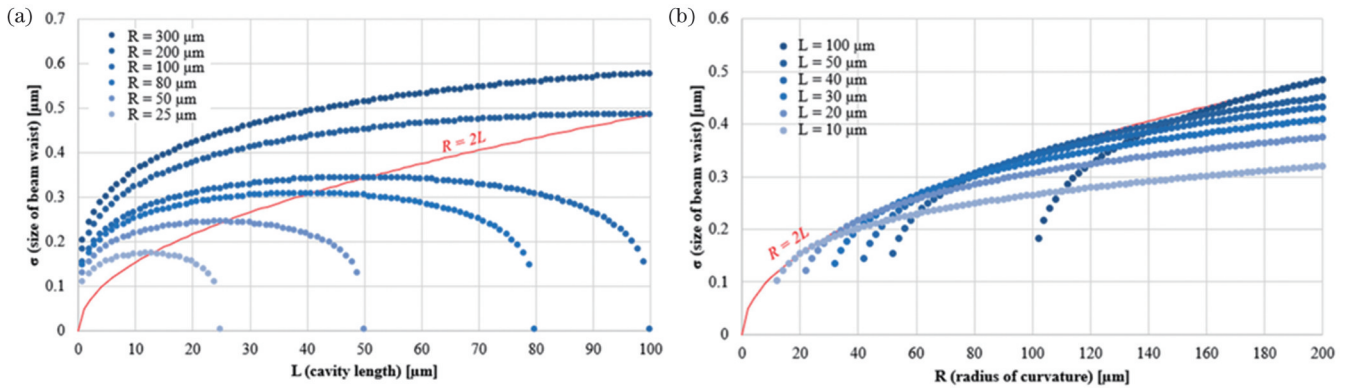


图 13 模拟曲面反射镜中的束腰尺寸随腔长和曲率半径的变化^[78]。(a)谐振腔腔长;(b)曲面反射镜的曲率半径

Fig. 13 Simulated beam waist size in curved mirror versus cavity length and curvature radius^[78]. (a) Resonant cavity length;

(b) curvature radius of curved mirror

VCSEL 纵模的间距由谐振腔的腔长决定,所以为了控制腔长,其中的一个纵模驻波分布必须与有源区

的增益区间重叠。纵模间距与谐振腔腔长满足以下关系^[79]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL \left[1 - (\lambda/n) \left(\frac{dn}{d\lambda} \right) \right]} \quad (2)$$

式中： $1 - (\lambda/n)(dn/d\lambda)$ 项对应材料折射率的色散。由式(2)可知，纵模间距与腔长成反比，腔长越长，纵模间距越小。如图 14 所示，当 $L > 10 \mu\text{m}$ 时，纵模间距小于几纳米，并且会随着谐振腔长度的增加进一步减小。在此种情况下，纵模间距远小于有源区增益谱的宽度，多个纵模驻波分布能够与有源区增益区间充分重叠，在谐振过程中可以获得足够的增益。因此，通过增加谐振腔长度，可以实现更窄的纵模间距，即使在没有精确控制谐振腔长度的情况下，纵模也能获得充分的增益直至激射。综上所述，当曲面反射镜的曲率半径大于谐振腔腔长时，特别是当 $R = 2L$ 且 $L > 10 \mu\text{m}$ 时，曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 更容易实现激射^[78]。

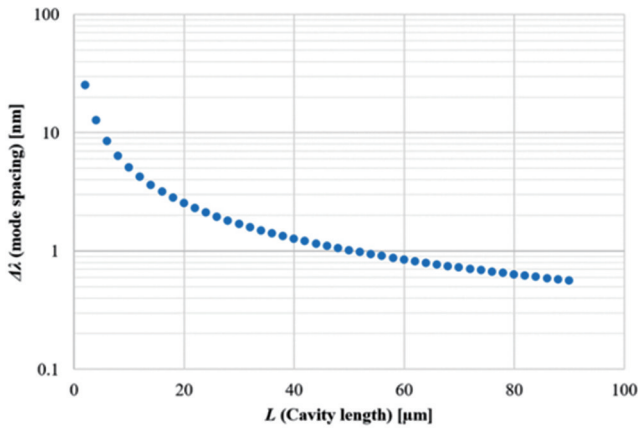


图 14 模拟纵模间距随谐振腔腔长增加的变化情况 ($\lambda = 445 \text{ nm}$, $dn/d\lambda = -0.001$, $n = 2.45$)^[78]

Fig. 14 Simulated longitudinal mode spacing versus resonant cavity length ($\lambda = 445 \text{ nm}$, $dn/d\lambda = -0.001$, $n = 2.45$)^[78]

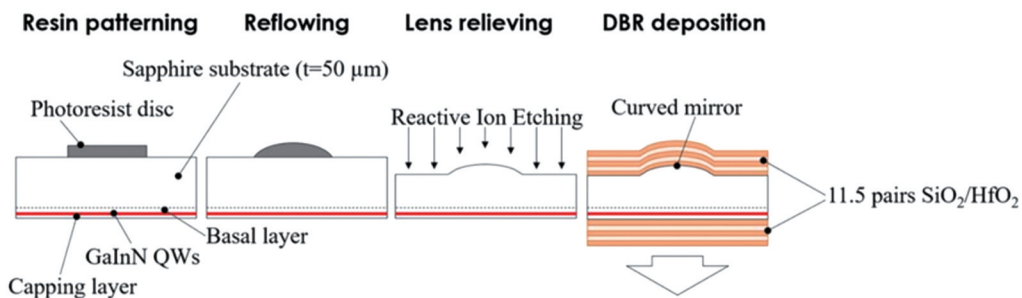


图 15 制备曲面反射镜的流程^[37]

Fig. 15 Process of fabricating curved mirror^[37]

4.3 曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的未来挑战

4.3.1 纵向模式控制

曲面反射镜结构 GaN 基 VCSEL 虽然显示出高稳定性、低阈值和高输出功率等优良特性，但是器件的长腔长会导致纵模间距很窄，从而很难实现单纵模激射，并且发光光谱容易随着注入电流的变化发生模式跳跃。这将降低 VCSEL 在光学相干断层扫描、光通信和原子钟等领域中的应用优势。国内外研究人员曾采

4.2.2 曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的关键工艺

曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 通过调整曲率半径控制谐振腔内的光场分布，所以如何精准调控曲率半径是曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 制备工艺中的重点。片上曲面透镜一般采用光刻胶回流和干法刻蚀的制备工艺^[35-38]。Park 等^[37]采用此方法在蓝宝石衬底上制备了曲面透镜，制备流程如图 15 所示。他们采用光刻胶作为掩模，通过高温烘烤得到光刻胶曲面掩模，并采用反应离子刻蚀将曲面图案转移到蓝宝石衬底上，从而实现了曲面透镜的制备。曲面透镜的曲率半径由曲面的底部直径和顶端高度共同决定，因此可以通过调整光刻胶曲面掩模制备工艺的参数来调控曲率半径。此外，通过干法刻蚀将光刻胶图案转移到衬底上可得到曲面透镜，所以 1:1 转移曲面图案也是调控曲率半径的关键工艺。粗糙的曲面透镜表面会引入额外的散射损耗，而衬底和光刻胶掩模表面的粗糙度以及干法刻蚀配方均会影响曲面透镜的表面形貌。因此，如何精准调控曲率半径并尽可能降低曲面透镜表面的粗糙度是制备工艺的重点和难点。2018 年，Hmaguchi 等^[39]利用类似的方法在 [000-1] GaN 衬底上制备了曲面透镜。由图 16(a)、(b) 可知，曲面透镜的俯视图和鸟瞰图都显示形成了光滑的曲面形状，且曲率半径可通过制备工艺精确控制。图 16(c) 显示了曲面透镜顶部的原子力显微镜 (AFM) 图像，测量的均方根 (RMS) 粗糙度为 0.2 nm，光滑的曲面极大降低了曲面反射镜的散射损耗。图 16(d) 显示了沉积后 DBR 的曲面反射镜横截面的透射电子显微镜 (TEM) 图像，每层 DBR 均平滑地沉积在曲面透镜外侧，并没有在沉积过程中增加表面的粗糙度。2023 年，Palmquist 等^[40]也利用此类方法，成功制备出曲面透镜。

用光子晶体、表面浮雕、反波导以及扩展谐振腔结构来控制 VCSEL 的单纵模，但是这些方法通常需要复杂的工艺、精确的设计以及自对准技术，目前主要应用于 850 nm 和 980 nm 波段的 VCSEL^[80]。高对比度光栅结构虽然能够避免复杂工艺并实现偏振控制和波长选择功能，但其制备条件较为苛刻，限制了 VCSEL 在工业生产中的应用^[81-84]。2022 年，Kearns 等^[85]通过将光学标准具与 DBR 相结合，在曲面反射镜侧制备了一个底

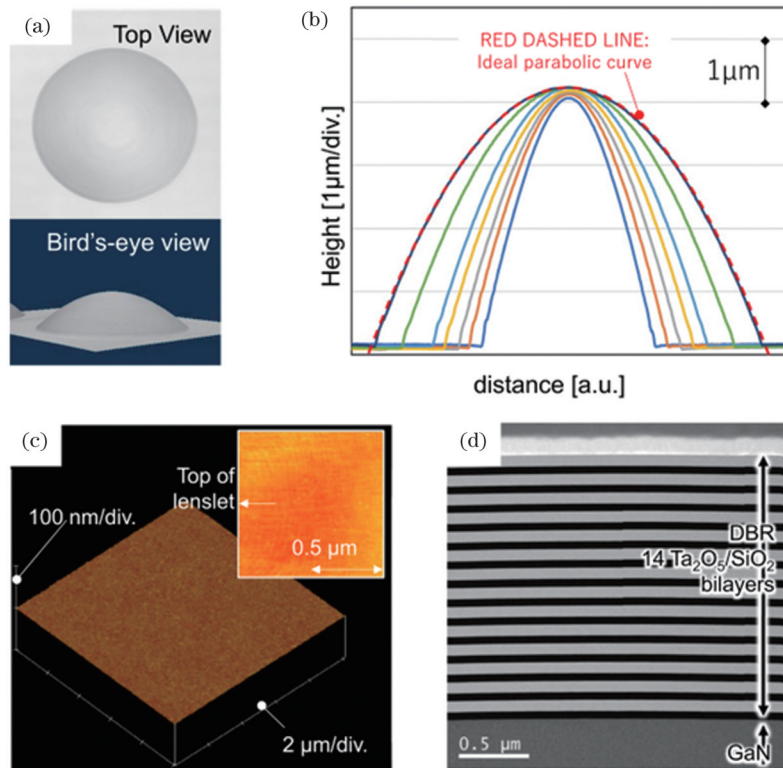


图 16 基于 GaN 制备的曲面透镜^[39]。(a)激光共聚焦显微镜图像；(b)横截面轮廓图；(c)曲面顶端原子力显微镜图像；(d)横截面透射电子显微镜图像

Fig. 16 Curved lens fabricated based on GaN^[39]. (a) Laser confocal microscope image; (b) cross-sectional profile image; (c) atomic force microscope image of top curved surface; (d) cross-sectional transmission electron microscope image

侧滤波镜,并利用光学标准具的反射率调制作用实现了波长选择,最终在腔长约为 $25\ \mu\text{m}$ 的曲面 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 中实现了单纵模激光。但是相关的研究还处于初步阶段,标准具本身存在的光吸收和散射损耗会导致斜率效率减半。

4.3.2 GaN 晶体的光吸收损耗与材料特性

在曲面反射镜结构的 GaN 基 VCSEL 中, n 型 GaN 一般是在掺杂 Si 的 GaN 衬底上外延生长得到的。然而, Si 掺杂的 GaN 的光吸收损耗与其掺杂水平成正比^[86]。谐振腔内较厚的 n-GaN 就存在 0.2% 甚至更高的光学损耗,所以控制 GaN 衬底中的掺杂水平对于降低谐振腔内部的损耗至关重要^[87]。此外, GaN 晶体具有机械硬度大、化学惰性强、常温下几乎不与现有的酸/碱试剂发生反应的特性,所以 GaN 在常规 CMP 加工中存在减薄速率极低、加工周期长等问题。虽然有报道称可以通过金刚石游离磨料研磨工艺提高 GaN 减薄速率,但是这种工艺会在晶片表面产生损伤层和亚表面损伤层^[88]。因此,如何在不损伤 GaN 衬底条件下快速减薄仍是一个工艺难点。另外的问题是缺乏极化调控。GaN 基半导体材料内部存在极强的极化效应^[89],而极强的极化电场将会对 VCSEL 有源区造成负面影响,如降低辐射复合效率、发光波长红移等^[90-91]。因此,需要找到合适的极化调控方法以提高器件性能。

4.3.3 激光光束的宽发散角

曲面反射镜结构 GaN 基 VCSEL 虽然具有较强的横向光场限制能力,但是平凹腔结构下激光的发散角要大于平平腔。上述曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的发散角 ($>8.5^\circ$) 比双平面镜结构 VCSEL 的发散角 (5.1°) 更大。对于曲面反射镜结构 VCSEL, 曲率半径增大不仅会削弱横向光场限制作用,还会降低远场模式的半峰全宽 (FWHM)。2022 年, Hayashi 等^[92] 固定电流注入孔径为 $8\ \mu\text{m}$, 制备了不同曲率半径 ($70\sim 1000\ \mu\text{m}$) 的曲面反射镜, 并探究了曲率半径尺寸对发散角的影响。研究表明, FWHM 随着 R 的增加而降低, 当 $R=988\ \mu\text{m}$ 时, 器件的发射角仅为 3.9° , 远小于之前报道的 GaN 基 VCSEL。但是 VCSEL 腔内的光场会随着曲率半径的增加而增大, 光损耗增加, 增益降低, 从而阈值电流密度也会随着曲率半径的增加而增加。因此, 当使用大曲率半径实现窄发散角时, 还需要考虑合适的方法消除其带来的负面影响。

4.3.4 VCSEL 的全色显示

VCSEL 在显示器领域有着广泛的应用, 所以必须考虑如何实现 VCSEL 的全色显示。目前, 在三原色中, 由于红光波段 GaN 基材料的生长和制备技术比蓝光和绿光波段更为复杂和困难, 红光 GaN 基 VCSEL 至今未见报道, 因此红光波段的 VCSEL 仍然是基于 GaAs 材料制备的。GaN 基 VCSEL 的研究一

般集中在蓝光和绿光波段,其中绿光波段的研究进展较为缓慢。绿光波段的 GaN 基 VCSEL 一般使用较高 In 含量的 InGaN 量子阱作为有源区。然而,高 In 含量会增大 GaN 与 InGaN 之间的晶格失配。此外,由于 In 在外延生长时的饱和蒸气压较高,通常需要在较低温度下生长 InGaN 以实现更高的 In 组分。但低温生长会导致材料中出现更高的缺陷密度。因此,高 In 组分的 InGaN 量子阱内一般会存在高密度缺陷、位错以及较大的应力。这些缺陷会增加非辐射复合,而较大应力则导致量子限制斯塔克效应(QCSE)加强,从而降低发光效率。这些问题导致 InGaN 量子阱的发光效率在绿光波段急剧降低,也就是所谓的“绿光带隙(green gap)”^[91]。如今研究人员通过在 VCSEL 中应用 InGaN 量子点和半极性衬底,已经实现了室温绿光连续激射,但仍面临很多技术难点。

5 结束语

主要讨论了曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的理论设计、制备工艺以及研究进展,并简单回顾了混合 DBR 结构和双介质膜 DBR 结构 GaN 基 VCSEL 的发展路线。虽然这两种结构的 GaN 基 VCSEL 研究已取得巨大进展,但是仍存在高质量 DBR 薄膜生长困难、制备工艺复杂等问题,无法实现大规模生产。然而,曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的出现为 GaN 基 VCSEL 的工业化生产开辟了一条新道路。曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的谐振腔结构具有极低的衍射损耗和散射损耗,因此其谐振腔腔长($>20 \mu\text{m}$)可以较大,这降低了 GaN 衬底抛光工艺的难度,且较大腔长也会提高器件的散热性能。此外,曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 的性能具有高度的一致性和均匀性。这些优势有助于加速 GaN 基 VCSEL 的商业化进程。当然,曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 仍面临诸多挑战,如很难实现单纵模激射、发散角较宽等。尽管如此,曲面反射镜 GaN 基 VCSEL 未来的发展潜力仍是巨大的,有望成为未来激光器领域的重要支柱。

参 考 文 献

- [1] Iga K. Vertical-cavity surface-emitting laser: its conception and evolution[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(1R): 1-10.
- [2] Soda H, Iga K I, Kitahara C, et al. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329-2330.
- [3] Tatum J A. Evolution of VCSELs[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9001: 90010C.
- [4] Feezell D F. Status and future of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9363: 93631G.
- [5] Guina M, Rantamäki A, Härkönen A. Optically pumped VCSELs: review of technology and progress[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(38): 383001.
- [6] 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.
- [7] Liu J L, Zhao F Y, Tang Z T, et al. Advances in high-power vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57(35): 353001.
- [8] Amano C, Tatenno K, Takenouchi H, et al. MOVPE growth of C-doped GaAs/AlAs DBRs for wafer fusion[J]. Journal of Crystal Growth, 1998, 193(4): 460-469.
- [9] Hamaguchi T, Nakajima H, Fuutagawa N. GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers incorporating dielectric distributed Bragg reflectors[J]. Applied Sciences, 2019, 9(4): 733.
- [10] Li H, Wolf P, Moser P, et al. Vertical-cavity surface-emitting lasers for optical interconnects[J]. SPIE Newsroom, 2014, 25: 126103.
- [11] 陈中标, 崔碧峰, 郑翔瑞, 等. 垂直腔面发射半导体激光器氧化优化研究[J]. 中国激光, 2024, 51(8): 0801003.
Chen Z B, Cui B F, Zheng X R, et al. Optimization of oxidation for vertical cavity surface emitting semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(8): 0801003.
- [12] Iga K. Forty years of vertical-cavity surface-emitting laser: invention and innovation[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(8S2): 08PA01.
- [13] 张星, 张建伟, 宁永强, 等. 高功率人眼安全波段垂直腔面发射激光器[J]. 中国激光, 2023, 50(19): 1901008.
Zhang X, Zhang J W, Ning Y Q, et al. Vertical-cavity-surface-emitting laser with high power in eye-safe band[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(19): 1901008.
- [14] Ruterana P, Albrecht M, Neugebauer J. Nitride semiconductors: handbook on materials and devices[M]. [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.
- [15] Bi W G, Kuo H C, Ku P C, et al. Handbook of GaN semiconductor materials and devices[M]. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017.
- [16] Fujita S. Wide-band gap semiconductor materials: for their full bloom [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(3): 030101.
- [17] Hanada T. Basic properties of ZnO, GaN, and related materials [M]//Yao T, Hong S K. Oxide and nitride semiconductors. Advances in materials research. Berlin: Springer, 2009, 12: 1-19.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Forman C A, Lee S, Young E C, et al. Continuous-wave operation of nonpolar GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10532: 105321C.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Mishkat-UI-Masabih S M, Aragon A A, Monavarian 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.
- [29] Yeh P S, Chang C C, Chen Y T, et al. GaN-based vertical-cavity surface emitting lasers with sub-milliwatt threshold and small divergence angle[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(24): 241103.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Kogelnik H, Li T. Laser beams and resonators[J]. Applied Optics, 1966, 5(10): 1550-1567.
- [36] Iga K, Kambayashi T, Wakao K, et al. GaInAsP/InP double-heterostructure planar LED's[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1979, 26(8): 1227-1230.
- [37] Park S H, Kim J, Jeon H, et al. Room-temperature GaN vertical-cavity surface-emitting laser operation in an extended cavity scheme [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(11): 2121-2123.
- [38] Aldaz R I, Wiemer M W, Miller D A B, et al. Monolithically-integrated long vertical cavity surface emitting laser incorporating a concave micromirror on a glass substrate[J]. Optics Express, 2004, 12(17): 3967-3971.
- [39] Hamaguchi T, Tanaka M, Mitomo J, et al. Lateral optical confinement of GaN-based VCSEL using an atomically smooth monolithic curved mirror[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 10350.
- [40] Palmquist N C, Anderson R, Kearns J A, et al. Long-cavity M-plane GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with a topside monolithic curved mirror[J]. Photonics, 2023, 10(6): 646.
- [41] 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.
- [42] Lin J G, Cheng D W, Yao C, et al. Retinal projection head-mounted display[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2017, 10(1): 1-8.
- [43] 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): 7904909.
- [44] Panjehpour M, Julius C E, Phan M N, et al. Laser-induced fluorescence spectroscopy for *in vivo* diagnosis of non-melanoma skin cancers[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2002, 31(5): 367-373.
- [45] Najda S P, Perlin P, Leszczyński M, et al. A multi-wavelength (u. v. to visible) laser system for early detection of oral cancer[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9328: 932809.
- [46] Leonard J T. III-nitride vertical-cavity surface-emitting lasers[D]. Santa Barbara: University of California, Santa Barbara, 2016.
- [47] 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.
- Ying L Y, Mei Y, Zhang B P. Progress of GaN based vertical cavity surface emitting lasers[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(3): 472-483.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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 SiO₂-buried lateral index guide[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(11): 111104.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] Kobayashi K, Nishikawa T, Watanabe R, et al. In situ center wavelength control of AlInN/GaN distributed Bragg reflectors with *in situ* reflectivity spectra measurements[J]. Physica Status Solidi (b), 2024, 261(11): 2400010.
- [56] Watanabe R, Kobayashi K, Yanagawa M, et al. Over 20% wall plug efficiency of on-wafer GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124(13): 131107.
- [57] Terao K, Nagai H, Morita D, et al. Blue and green GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with AlInN/GaN DBR[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11686: 116860E.
- [58] 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.
- [59] Kozuka Y, Ikeyama K, Yasuda T, et al. Growths of AlInN single layers and distributed Bragg reflectors for VCSELs[J]. MRS Online Proceedings Library, 2014, 1736(1): 101-106.
- [60] Zhang J, Tong H, Liu G Y, et al. Characterizations of seebeck coefficients and thermoelectric figures of merit for AlInN alloys with various in-contents[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(5): 053706.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] Holder C, Fezell D, Speck J S, et al. Demonstration of nonpolar GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8639: 863906.
- [64] Weng G E, Mei Y, Liu J P, et al. Low threshold continuous-wave lasing of yellow-green InGaN-QD vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Optics Express, 2016, 24(14): 15546-15553.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] Yang T, Chen Y H, Wang Y C, et al. Green vertical-cavity

- surface-emitting lasers based on InGaN quantum dots and short cavity[J]. *Nano-Micro Letters*, 2023, 15(1): 223.
- [68] Chang T C, Hashemi E, Hong K B, et al. Electrically injected GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with TiO₂ high-index-contrast grating reflectors[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(4): 861-866.
- [69] 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.
- [70] Hamaguchi T, Fuutagawa N, Izumi S, et al. Milliwatt-class GaN-based blue vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated by epitaxial lateral overgrowth[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2016, 213(5): 1170-1176.
- [71] Hamaguchi T, Nakajima H, Tanaka M, et al. Sub-milliwatt-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.
- [72] 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.
- [73] 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 - 21) semi-polar GaN [J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(4): 041002.
- [74] Ito M, Hamaguchi T, Makino T, et al. Highly efficient operation and uniform characteristics of curved mirror vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Physics Express*, 2023, 16(1): 012006.
- [75] Palmquist N C, Kearns J A, Gee S, et al. Demonstration of III-nitride vertical-cavity surface-emitting lasers with a topside dielectric curved mirror[J]. *Applied Physics Express*, 2024, 17(1): 016504.
- [76] Nakajima H, Hamaguchi T, Tanaka M, et al. Recent progress in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with lateral optical confinement due to an incorporated curved mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10918: 109181J.
- [77] Aldaz R I, Wiemer M W, Miller D A B, et al. Monolithically integrated long vertical cavity surface laser incorporating a concave micromirror on a glass substrate[C]//The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS, November 11, 2004, Rio Grande, PR, USA. New York: IEEE Press, 2004: 332-333.
- [78] Hamaguchi T. GaN-based VCSELs with a monolithic curved mirror: challenges and prospects[J]. *Photonics*, 2023, 10(4): 470.
- [79] Schubert E F, Wang Y H, Cho A Y, et al. Resonant cavity light-emitting diode[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 60(8): 921-923.
- [80] 王翔媛, 崔碧峰, 李彩芳, 等. 垂直腔面发射激光器横模控制方法的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(7): 0700008.
- Wang X Y, Cui B F, Li C F, et al. Research progress of transverse mode control for vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 0700008.
- [81] 艾星辰, 田思聪, Ahamed Mansoor, 等. 单模电注入面发射激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(17): 1700002.
- Ai X C, Tian S C, Ahamed M, et al. Research progress in single-mode electrically injected surface-emitting lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(17): 1700002.
- [82] 梁宏进, 邹永刚, 范杰, 等. 表面高阶曲线光栅半导体激光器横模特性分析[J]. *中国激光*, 2024, 51(8): 0801006.
- Liang H J, Zou Y G, Fan J, et al. Transverse mode characteristics analysis of semiconductor laser with high-order surface curved gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(8): 0801006.
- [83] Hong K B, Chang T C, Hjort F, et al. Monolithic high-index contrast grating mirror for a GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(11): 2214-2221.
- [84] Wu T T, Wu S H, Lu T C, et al. GaN-based high contrast grating surface-emitting lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(8): 081111.
- [85] Kearns J A, Hamaguchi T, Hayashi K, et al. Longitudinal mode control in long cavity VCSELs with a curved mirror[J]. *Applied Physics Express*, 2022, 15(7): 072009.
- [86] Oshima Y, Yoshida T, Watanabe K, et al. Properties of Ge-doped, high-quality bulk GaN crystals fabricated by hydride vapor phase epitaxy[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2010, 312(24): 3569-3573.
- [87] Hamaguchi T, Tanaka M, Nakajima H. A review on the latest progress of visible GaN-based VCSELs with lateral confinement by curved dielectric DBR reflector and boron ion implantation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(SC): SC0806.
- [88] Aida H, Takeda H, Kim S W, et al. Evaluation of subsurface damage in GaN substrate induced by mechanical polishing with diamond abrasives[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 292: 531-536.
- [89] Park S H, Chuang S L. Comparison of zinc-blende and wurtzite GaN semiconductors with spontaneous polarization and piezoelectric field effects[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(1): 353-364.
- [90] Leroux M, Grandjean N, Lügt M, et al. Quantum confined Stark effect due to built-in internal polarization fields in (Al, Ga)N/GaN quantum wells[J]. *Physical Review B*, 1998, 58(20): R13371-R13374.
- [91] Langer T, Kruse A, Ketzner 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.
- [92] Hayashi K, Hamaguchi T, Kearns J A, et al. Narrow emission of blue GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with a curved mirror[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 1536905.

Development and Challenges of GaN-Based Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (Invited)

Shi Lei, Yang Tao, Wang Yachao, Ma Lilong, Ying Leiyang, Mei Yang*, Zhang Baoping**
*School of Electronic Science and Engineering (National Model Microelectronics College), Xiamen University,
 Xiamen 361005, Fujian, China*

Abstract

Significance Gallium nitride (GaN)-based vertical cavity surface-emitting lasers (VCSELs) exhibit luminescence wavelengths that

span the entire visible spectrum. They present several advantages, including a reduced threshold current, narrower divergence angle, single longitudinal mode operation, and a circularly symmetric output beam. GaN-based VCSELs have the potential to supersede conventional light-emitting diodes (LEDs) and edge-emitting lasers (EELs) as optimal light sources for applications such as semiconductor laser illumination, laser displays, high-density optical storage, optical interconnects, and underwater communications. Over the past two decades, significant advancements in technology have positioned them as a focal point of research for next-generation semiconductor lasers.

Progress The resonant cavity structures of GaN-based VCSELs are primarily classified into two types: hybrid distributed Bragg reflector (DBR) and dual-dielectric film DBR structures. In the hybrid DBR configuration, the upper reflector comprises a dielectric-film DBR, whereas the lower reflector consists of a nitride DBR. In contrast, the dual-dielectric-film DBR structure utilizes dielectric-film DBRs for both the upper and lower reflectors. Despite the significant advancements in the prevalent DBR configurations of GaN-based VCSELs, several technical challenges persist. For instance, the hybrid DBR structure faces issues such as complex epitaxial growth of the nitride DBR, extended growth durations, and high costs. Conversely, the dual-dielectric film DBR structure encounters issues such as elaborate fabrication processes, suboptimal quality of heteroepitaxial crystals, insufficient uniformity of cavity length, and challenges in mass production. To address these challenges, Hamaguchi *et al.* (2018) introduced an innovative GaN-based VCSEL featuring a curved mirror, marking the first instance of room-temperature pulsed lasing with electrically injected curved-mirror GaN-based VCSELs. This design mitigates the need for the demanding and expensive nitride DBR epitaxial growth process prevalent in hybrid DBR structures. Additionally, curved-mirror GaN-based VCSELs eliminate the complex substrate transfer process associated with dual-dielectric film DBR structures, facilitating homoepitaxial growth on GaN single-crystal substrates. This advancement yields high-quality active regions, which are crucial for high-performance laser devices. The planar-concave stable cavity structure of the curved mirror GaN-based VCSELs demonstrates extremely low diffraction loss, accommodating an extended cavity length (20–50 μm). This characteristic not only simplifies GaN substrate polishing and thinning, but also significantly enhances the thermal performance of the devices. The advantages of the curved-mirror structure suggest a promising trajectory for the commercialization of GaN-based VCSELs. In 2019, the same research group achieved the inaugural room-temperature continuous lasing of a GaN-based VCSEL with a curved DBR structure, achieving a threshold current of only 0.25 mA. Concurrently, Nakajima *et al.* increased the output power to 7.1 mW by optimizing the curvature radius of the curved DBR. In 2020, Hamaguchi *et al.* demonstrated room-temperature continuous lasing of a green VCSEL with a curved mirror on semi-polar GaN substrates and pioneered preliminary white-light display systems using blue and green VCSELs with curved mirrors, alongside GaAs-based red VCSELs. In 2023, Ito *et al.* further enhanced the wall-plug efficiency (WPE) of a curved GaN-based VCSEL to 13.4% while maintaining consistent performance across all devices in the VCSEL array. Palmquist *et al.* achieved continuous room-temperature lasing of a GaN-based VCSEL with a curved DBR structure incorporating a top-surface lens, thus eliminating the need for a curved mirror support process. The following year, they fabricated an m-plane GaN-based VCSEL with a SiO_2 curved top lens, achieving a maximum side-mode suppression ratio of 30 dB.

Conclusions and Prospects The GaN-based VCSEL with a curved-mirror structure, while exhibiting commendable attributes such as high stability, uniformity, low threshold, and substantial output power, is nonetheless confronted with several technical challenges: 1) the extended cavity length of the device, which results in a very narrow longitudinal mode spacing, complicates the attainment of single longitudinal mode operation and induces mode hopping in the emission spectrum with variations in injection current; 2) the substrate employed for the epitaxial growth of the device is Si-doped GaN, where the optical absorption loss is directly proportional to the doping level. Consequently, precise control of the doping level in the GaN substrate is essential for minimizing internal losses within the resonator cavity; 3) the high mechanical hardness and pronounced chemical inertness of GaN crystals render conventional chemical-mechanical polishing techniques challenging. Consequently, achieving the required substrate thickness without inflicting damage remains a significant processing challenge; 4) despite the robust lateral optical confinement provided by the curved-mirror structure, the laser divergence angle tends to be large due to the extended cavity length. Notwithstanding these technical challenges, the development of curved-mirror GaN-based VCSELs is promising. Addressing these issues is expected to facilitate the eventual commercialization of GaN-based VCSELs.

Key words lasers; gallium nitride; vertical-cavity surface emitting lasers; distributed Bragg reflector; curved reflector