

· 特邀综述 ·

GaN 垂直腔面发射激光器研究进展

杨天瑞, 徐欢, 梅洋, 许荣彬, 张保平*, 应磊莹**

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)垂直腔面发射激光器(VCSEL)在近 20 年来获得了飞速发展,已成为下一代半导体激光器的研究热点。GaN 是制造从紫外波段到绿色波段光电子器件的绝佳材料,而 VCSEL 具有阈值和发散角小、调制速率高,以及输出光束呈圆对称等特点。首先回顾了基于 GaN 的 VCSEL 的发展历史,简要介绍了它的主要应用方向;然后讨论了反射镜与谐振腔设计与制造中的关键问题;接着分析了三种不同结构的 GaN VCSEL 的散热机理,并分析讨论了优化散热的策略;最后介绍了基于 GaN 的蓝色、绿色和紫外 VCSEL 的研究进展及最新思路。

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

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0701012

Development of GaN-Based Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Yang Tianrui, Xu Huan, Mei Yang, Xu Rongbin, Zhang Baoping*, Ying Leiyang**

School of Electronic Science and Engineering (National Model Microelectronics College), Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

Abstract GaN-based vertical-cavity surface emitting lasers (VCSELs) have undergone rapid advancement in the past 20 years and are considered a research hotspot for next generation semiconductor lasers. GaN is a versatile material for fabricating optoelectronic devices in ultraviolet, blue-violet, and green bands. The characteristics of VCSELs include output beam with circular symmetry, low thresholds, low divergence angles, and high-modulation speeds. In this paper, the development history of GaN-based VCSEL was first reviewed and some of their applications were discussed. Moreover, key challenges in the design and manufacturing of mirrors and cavities were discussed. Further, the heat dissipation mechanism of GaN-based VCSELs with three different structures and their optimization strategies were analyzed and discussed. Finally, research progress and latest advancements in GaN-based blue, green, and ultraviolet VCSELs were reviewed.

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

OCIS codes 140.7260; 140.5960; 140.6810

1 引言

氮化镓(GaN)基垂直腔面发射激光器(VCSEL)在高分辨率打印、固态照明、可见光通信、微型原子钟及传感器等方面具有巨大的应用前景和市场需求,近年来一直是国际高校研究机构和企业的研究热点。

传统的边发射激光器(EEL)从芯片边缘发射激光,而 VCSEL 是从芯片表面出射激光。EEL 的光发射窗口是尺寸在微米级的矩形口,由于衍射效应,

其光束为椭圆形;而 VCSEL 的光发射窗口是圆形的,故其发射光束具有圆形发散角,比 EEL 有更高的光纤耦合效率。VCSEL 不需要分割就可以简单实现二维集成,不仅可用于晶圆级测试,而且可以提供更高的输出功率。得益于短腔长和小尺寸的有源区,VCSEL 具有更低的阈值,激射波长的温度稳定性更好,调制速度也比 EEL 高得多^[1-2]。

基于 GaAs 材料体系的 VCSEL 的发光波长主要覆盖红外波段,目前在国内的研究已经相对成熟且已实现了商业化^[3-4]。而由于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的禁带

收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-02-22; 录用日期: 2020-02-26

基金项目: 科学挑战专题(TZ2016003)、国家重点研发计划(2016YFB0400803,2017YFE0131500)

* E-mail: bzhang@xmu.edu.cn; ** E-mail: lyying@xmu.edu.cn

宽度在 0.7~3.5 eV 范围内连续可调^[5], GaN 基 VCSEL 可以覆盖紫外到可见光波段,故其在波段上与 GaAs 基 VCSEL 形成了互补。

1.1 GaN VCSEL 的历史

VCSEL 的起源可以追溯到 1977 年,当时,东京工业大学的 Iga 教授^[6]提出了 VCSEL 的概念。1979 年,Iga 教授及其同事^[7]使用 GaAs 材料制造出了第一个 VCSEL 器件。从此,VCSEL 吸引了广大研究人员的注意,并于 1994 年开始商业化。最先实现商业化的 VCSEL 使用的是基于 GaAs 的材料系统,这种材料系统具有相对较大的折射率差和较小的晶格失配^[8]。只要调整 AlGaAs 或 InGaAs 有源层的成分,就可以在红光波段到近红外波段之间调整激光的波长^[9]。

相较于 GaAs 基 VCSEL 的迅速发展,GaN 基 VCSEL 的发展缓慢了许多,这是因为在当时生长高质量的 GaN 膜十分困难。1989 年,Amano 等^[10]在 GaN 中引入了 Mg 掺杂,首次成功实现了外延生长的 p-GaN 薄膜。1991 年,Nakamura 等^[11]提出了两步生长法,并采用该方法解决了 GaN 中 p 掺杂的问题。关于 GaN 基 VCSEL 的研究最早可以追溯到 1995 年,当时,Honda 等^[12]从理论上研究了紫外(UV) GaN 基 VCSEL 的阈值特性。1996 年,Redwing 等^[13]报道了第一款具有全外延 VCSEL 结构的光泵浦 GaN VCSEL,该结构将 10 μm 厚的 GaN 有源区夹在基于 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 多层结构(30 个周期)的分布式布拉格反射镜(DBR)之间;由于 DBR 的反射率较低且采用了较厚的块状 GaN 有源层,所以该激光器的阈值泵浦能量高达 2.0 MW/cm^2 左右。在接下来的 10 年中,东京大学^[14-16]、俄罗斯科学院^[17]、布朗大学^[18]、NTT 公司^[19]、首尔国立大学^[20]、加利福尼亚大学^[21]、台湾交通大学^[22-26]和厦门大学^[27-29]的研究人员展示了具有 InGaN 量子阱(QW)有源层和不同 DBR 结构的光泵浦 GaN VCSEL。

在实现光泵浦 GaN VCSEL 之后,研究人员将目光投向了更加接近应用的电泵浦 GaN VCSEL。台湾交通大学的 Lu 等^[30]在 2008 年报道了第一个电注入的 GaN 基 VCSEL,它具有一个 AlN/GaN DBR 底部外延和一个顶部电介质 DBR,并以 240 nm 厚的氧化铟锡(ITO)层作为电流扩散层,它可在 77 K 下以 462.8 nm 的波长实现连续波(CW)激光。同年,日亚公司的 Higuchi 等^[31]演示了通过激光剥离和晶圆键合技术制造的具有双介质膜

DBR 的 GaN VCSEL 的室温 CW 激光激射;在阈值电流密度为 13.9 kA/cm^2 的情况下,该 VCSEL 在 414 nm 处实现了激光发射,输出功率为 0.14 mW。从这一年开始,GaN VCSEL 进入了快速发展阶段。日亚^[32-33]、松下^[34]、索尼^[35-38]、斯坦雷电气^[39-41]等公司,以及台湾交通大学^[42-43]、加利福尼亚大学^[44-50]、洛桑联邦理工大学^[51]、厦门大学^[52-55]、名城大学^[56-60]、台湾大学^[61]和新墨西哥大学^[62]等都相继实现了电注入 VCSEL 的激射。时至今日,与第一个电泵 VCSEL 相比,该器件的性能已得到大大提高。2015 年,Izumi 等^[35]报道了采用外延横向过生长(ELO)技术制造的具有双介质膜 DBR 的 GaN VCSEL,该器件的发射波长为 454 nm,输出功率首次超过了 1 mW。2018 年,Kuramoto 等^[39]报道了波长为 441 nm、输出功率超过 6 mW 的 GaN VCSEL,该器件可以在 110 $^{\circ}\text{C}$ 以下保持激射;2018 年的下半年,他们^[40]又将激光器输出功率进一步提高到 16 mW;2019 年,Kuramoto 等^[41]报道了 16×16 的蓝色 VCSEL 阵列,其总输出功率为 1.19 W,这使得 GaN VCSEL 向实际应用跨进了一步。Mei 等^[54]报道了基于 InGaN 量子点(QD)的 VCSEL,将 GaN VCSEL 的发射波段推向了绿色波段,器件的发射波长从 491.8 nm 扩展到 565.7 nm,覆盖了大部分“绿色间隙(green gap)”。

1.2 VCSEL 的应用

1.2.1 高分辨率打印

在使用单个激光二极管的打印机中,激光斑需要先在每行内从左到右进行扫描,然后实现逐行打印。与单个激光管相比,VCSEL 阵列中的所有激光器件都可以同时发光,从而可以实现单行(一维阵列)或者多行(二维阵列)同时打印,在大大提高打印速度的同时,延长了激光打印机的使用寿命。为满足市场需求,富士施乐公司于 2003 年推出了世界上第一台激光打印机(DocuColor 1256 GA),其曝光系统中引入了 780 nm 的单模 8×4 GaAs VCSEL 阵列^[63]。VCSEL 具有均匀的性能、稳定的发散角和输出功率。GaN 基材料的发射波长较短,因此可以获得较小的衍射点,从而可以提高打印机的分辨率。将红外 VCSEL 与 GaN 基的蓝、绿 VCSEL 相结合,就可以实现全彩色打印。

1.2.2 固态照明

在固态照明(SSL)中,可见光商用 LED 存在严重的效率下降现象^[64]。而基于激光的光源可以在更高的电流密度下以峰值效率运行,并且可以规避

效率下降的限制^[65]。同时,VCSEL 体积小,可以定向提供对称的圆形光束,这种光束便于捕获和聚焦,有利于照明设备的小型化。另外,二维 VCSEL 阵列中的元件可以单独寻址,这一特性使其可以用于智能照明系统中动态发光模式的开发^[66]。

1.2.3 可见光通信

尽管 LED 的发展为可见光通信(VLC)系统的商业化铺平了道路,但由于与自发发射过程相关的载流子的寿命较长,因此发射器的性能会受到频谱带宽和慢频率响应的限制^[67]。与 LED 相比,VCSEL 可以提供光谱更窄、调制速度更高的光源,从而提升了可见光通信的响应速度,并且降低了能耗。

1.2.4 微型原子钟

原子钟可以分为微波原子钟和光学原子钟两种。理论上,光学原子钟具有更高的精度,因为它的频率比微波原子钟高 4 个数量级^[68]。芯片级的光学原子钟需要模块化和小型化,因此需要小尺寸和低功耗的光源。2000 年,Kitching 等^[69]报道了使用调制的 VCSEL 的全光原子钟,为大幅降低原子钟的尺寸和功耗铺平了道路。目前,低功率和稳定的 VCSEL 在芯片级光学原子钟中起着不可替代的作用^[70]。

1.2.5 传感器

VCSEL 可以方便地实现二维集成,温度稳定性高且能耗低,非常适合用于需要长时间工作的小型传感器中。2017 年,苹果公司首先在其产品 iPhoneX 中引入了基于 VCSEL 阵列的红外传感器,在手机上实现了人脸识别功能,引领了三维传感市场。另外,更大的高功率 VCSEL 阵列也可以作为激光雷达应用于汽车上^[71]。与红外 VCSEL 相比,利用波长较短的可见光 VCSEL 的传感器具有更高的空间分辨率。

2 GaN VCSEL 的设计与制造

2.1 谐振腔结构

第 1 节已经介绍了 GaN 基 VCSEL 的研究意义。在 VCSEL 的研制过程中,面临的一个问题就是如何形成谐振腔。1996 年,Redwing 等^[13]报道了第一款具有全外延 VCSEL 结构的光泵浦 GaN VCSEL,它采用了将 10 μm 厚的 GaN 有源区夹在 30 对基于 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 的 DBR 之间的结构,利用上下 DBR 形成了谐振腔。但是当时这些 DBR 的反射率仅为 84%~93%,从而导致 VCSEL 的激射泵浦能量阈值高达 2.0 MW/cm^2 左右。

与成熟的 AlGaAs/GaAs DBR 不同,如果用包括 AlN/GaN、AlGaIn/GaN、AlInN/GaN 和 AlGaIn/AlN 在内的 GaN 材料系统生长完全外延的 DBR 结构,就会不可避免地出现两个主要的固有缺点——相对较低的折射率差和较大的晶格失配,从而导致外延层破裂、缺陷增加、DBR 反射带宽窄和反射率不高等负面结果^[2]。因此,研究人员通过引入高折射率差的介电材料,如 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ 和 $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ 等,来增加 DBR 的反射率和减少 DBR 的对数。1998 年,Someya 等^[15]采用外延生长技术生长了 35 对基于 $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{N}/\text{GaN}$ 的底部 DBR 和一个含有 184 nm 厚 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 有源层的 3λ 腔,然后在其上生长了 6 对基于 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 的顶部 DBR,最终得到了一个外延/电介质混合的 DBR VCSEL;该 VCSEL 顶部和底部 DBR 的反射率分别为 98% 和 97%,该光泵浦 VCSEL 在 77 K 下于 381 nm 处激射,激射峰的半峰全宽为 0.1 nm。1999 年,Song 等^[72]在 5 个 InGaIn/GaN 量子阱有源区的两侧使用反应离子束溅射分别沉积了 31 层和 26 层 $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ 作为底部和顶部 DBR,得到了一个全电介质的 DBR VCSEL,其底部和顶部 DBR 的反射率分别是 99.9% 和 99.5%,品质因子 Q 值超过了 600。

如图 1 所示,在上述光泵浦 GaN VCSEL 的开创性工作中,研究者们开创了三类器件结构,分别为完全外延生长的 DBR^[13]、外延/电介质混合的 DBR^[9]和全电介质的 DBR^[19]。

GaN 基 VCSEL 的设计和制造必须考虑几个关键问题,其中包括结构中每一层的力学性能、光学特性和电导率。例如,在基于 GaN 的光电器件中,最常用的外延 DBR 是在蓝宝石衬底上生长的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 系统,但 GaN、AlN 和蓝宝石在 a 轴上的热膨胀系数分别为 5.59×10^{-6} 、 4.2×10^{-6} 、 $7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ^[73-75]。除了热膨胀系数的巨大差异外,GaN 和 AlN 之间还存在约 2.4% 的晶格失配,这会在外延层中引起拉伸应变,并导致裂纹形成,最终使得 AlN/GaN DBR 的光学质量下降^[76]。通过调节 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 化合物中 Al 或 Ga 的含量可以减少 DBR 沉积过程中的应变累积,并最大程度地降低裂纹形成的可能性,但是相应的层间折射率差也会降低,因此需要更多对 DBR 来维持高反射率^[66]。

为了解决氮化物 DBR 制备中存在的问题,研究人员采用了较低的外延生长温度^[77]以及在 AlN 基

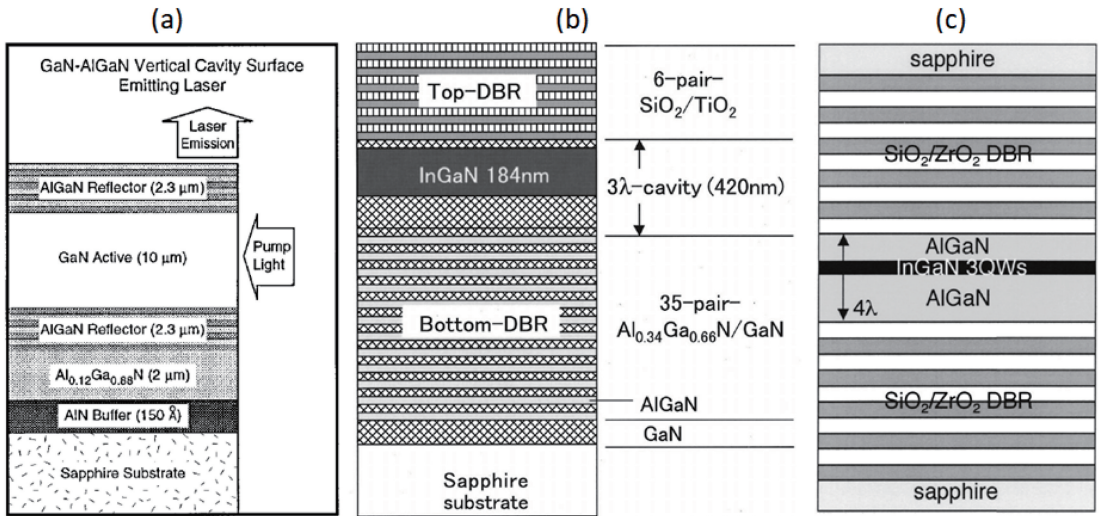


图 1 基于 GaN 的三种不同结构的 VCSEL 示意图。(a)全外延 DBR^[13]；
(b)混合外延/电介质 DBR^[9]；(c)双电介质 DBR^[19]

Fig. 1 Schematic illustrations of GaN-based VCSELs with three different configurations.

(a) Fully epitaxial DBR^[13] ; (b) hybrid epitaxial/dielectric DBR^[9] ; (c) double dielectric DBR^[19]

板上生长^[78]等可以帮助改善应变问题并获得高质量 AlN/GaN 异质界面的方法。Ive 等^[79]在 6H-SiC (0001) 晶片上生长了没有缓冲层的 AlN/GaN DBR,并证明了该结构可以达到 99% 的峰值反射率;他们认为,该 DBRs 结构接近应变补偿状态,可以抑制裂纹的形成,但其缺点是 SiC 晶片有更大的热膨胀系数(与广泛使用的蓝宝石衬底相比)。Carlin 等^[80]提出了另一种方法,即使用具有较小晶格失配的 20 对 AlInN/GaN DBR,获得了 90% 的峰值反射率和以 515 nm 为中心的 35 nm 高反射率带宽。对于 AlGaIn/GaN DBR,晶格失配在 ±0.5% 之内足可避免弛豫,但是在这种情况下,最大折射率差仅为 3% 左右。如果使用 AlInN/GaN DBR,则可以获得高达 7% 的折射率差,且可将晶格失配限制在 -0.25%~0.25%。但是,由于成分不均匀和相分离,难以生长高质量的 AlInN 薄膜。2019 年,斯坦福公司的研究人员^[41]开发成功并获得了迄今为止性能最好的蓝光 VCSEL,他们制造了一个 16×16 的二维 VCSEL 阵列,得到了 1.19 W 的输出功率。

与生长困难的外延 DBR 不同,包括金属氧化物在内的介电材料已经得到了很好的开发,并被广泛用于光学工业的薄膜涂层中^[76]。电介质 DBR 的制备方法有很多种,如溅射、电子束蒸发、化学气相沉积(CVD)、脉冲激光沉积(PLD)和原子层沉积(ALD)等。常用的电介质 DBR 包括 TiO₂/SiO₂、SiO₂/Ta₂O₅和 SiO₂/HfO₂等,它们具有更高的折射率差、更宽的高反带宽,以及能够用更少的 DBR

对数实现更高的反射率等特点,因此被成功用于 GaN 基 VCSEL 的制造中^[15,25,72]。

2.2 载流子输运与光损耗

在 VCSEL 的设计中,为了获取更强的发光,应使量子阱中的辐射复合最大化,这就要求尽量减小电流拥挤效应和减少泄漏到有源区外的载流子。2010 年,台湾交通大学的 Lu 等^[42]在有源区和 p-GaN 之间插入 24 nm 厚的 AlGaIn 作为电子阻挡层(EBL),并减薄 ITO 层,制成了混合 DBR VCSEL,该 VCSEL 的阈值电流密度很低,为 12.4 kA/cm²。目前,业界已公认通过插入 AlGaIn EBL 可以有效抑制电子溢出到 p-GaN 层;但与此同时,AlGaIn EBL 的大极化场在多量子阱(MQW)的最后一个势垒和 EBL 层之间引起了能带弯曲,从而降低了电子的有效势垒高度^[81]。为了解决该问题,研究人员已经尝试了几种电子阻层结构,例如 AlInN/GaN 超晶格(SL)EBL^[82]、Al 梯度体 AlGaIn EBL^[83]、多量子势垒(MQB)EBL^[84]。2014 年和 2015 年,台湾交通大学分别报道了用组分连续变化的 EBL (GEBL)^[83]和 MQB EBL^[84]取代传统块状 AlGaIn EBL 的方法。使用 GEBL 或 MQB EBL 之后,导带中的电子势垒高度增加,而价带中的空穴势垒高度减小,使得空穴在 EBL 内传输的能力及限制电子的能力得到提升,从而有利于减少电子泄漏和提升空穴注入效率。与使用常规块状 EBL 的 VCSEL 相比,使用 GEBL 和 MQB EBL 的混合 DBR VCSEL 表现出了室温连续波(RT-CW)激射,阈值电流密度

分别降低到 9.2 kA/cm^2 和 10.6 kA/cm^2 。

另外,由于电介质 DBR 是不导电的,所以一般通过腔内接触来注入电流,因此,电流扩散层是必需的。最常使用的电流扩散层材料是 ITO,但 ITO 存在以下几个问题:首先,ITO 具有相对较高的光吸收率(约为 1000 cm^{-1}),因此设计时必须将其置于驻波场的波节处,以减小吸收损耗^[66];其次,为了降低散射损耗,ITO 的表面粗糙度也应尽可能降低^[85];第三,为了能够承受较高的电流密度,ITO 与 p-GaN 之间需要形成电阻尽可能低的接触层^[86]。使用远程等离子体沉积或物理气相沉积来替代常用的溅射沉积更有利于形成低电阻的接触层。此外,有研究人员开发了在不同温度下沉积多层 ITO 以优化表面粗糙度^[85]和接触电阻率^[86]的技术。

目前,可以替代 ITO 作为电流扩散层的有薄金属层、石墨烯、隧道结等。薄金属层的电阻较低,可以实现与 p-GaN 的低电阻接触,但是如果不精确地将其放置在波节处,就会导致非常高的光吸收^[87]。石墨烯的单层光吸收损耗在可见光波长范围内为 2.3% ^[88],但到目前为止大多数生长石墨烯的方法都是先生成石墨烯然后将其转移到 GaN 上,这将导致较高的接触电阻。有研究人员尝试直接在 p-GaN 上生长石墨烯,如果该技术可以制得低电阻、高透明度且能承受高电流密度的石墨烯,则其可能是一个发展方向^[89]。目前,最有可行性的是隧道

结。通过生长埋层隧道结, Lee 等^[90]制造了阈值电流密度为 12 kA/cm^2 、输出功率约为 0.72 mW 的 GaN VCSEL。另外,埋层隧道结还被证明具有横向限制电流的功能^[91]。

3 VCSEL 的散热模型

VCSEL 具有体积小和电流密度高的特点,其有源区中的发热是不可忽视的问题。热效应会导致材料和器件的性能劣化,有源区增益下降,阈值电流上升,输出功率下降和谱线展宽等;更严重的是,热效应会使 GaN VCSEL 不稳定并缩短其寿命,这在实际应用中是致命的^[92-93]。因此, GaN VCSEL 的散热能力至关重要。Mei 等^[94]使用稳态三维圆柱散热模型,采用有限元方法(FEM)研究了具有三种典型结构的 GaN VCSEL 的热学性能,包括热通量、热阻和内部温度分布等。

图 2 所示为 GaN 基 VCSEL 的三种典型结构^[94],分别为混合 DBR 结构(结构 A)、采用衬底转移技术制成的双电介质 DBR 结构(结构 B),以及采用 ELO 技术制成的双电介质 DBR 结构(结构 C)。在模型的模拟中,假设热源集中放置在有源区内,热量主要通过基板从器件中散出,器件与空气之间的界面具有热绝缘功能。另外,假设三个器件的腔长相等,阈值电压 U_{th} 设置为 4.5 V ,阈值电流 I_{th} 设置为 8 mA 。

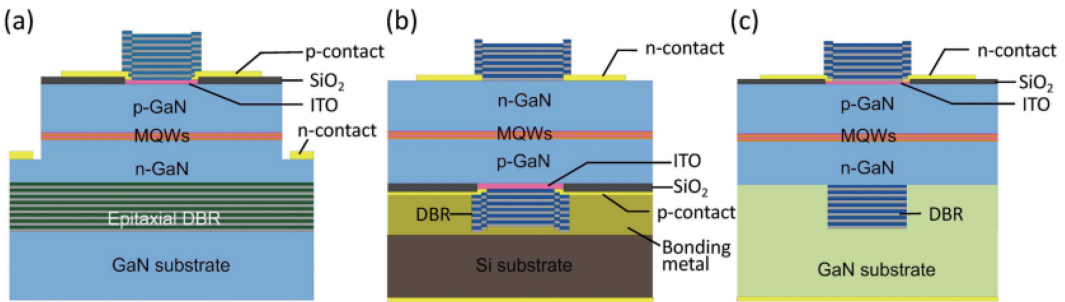


图 2 基于 GaN 的 VCSEL 的三种典型结构^[94]。(a)具有外延氮化物底部 DBR 的混合 DBR 结构(结构 A);(b)通过衬底转移技术制成的双电介质 DBR 结构(结构 B);(c)通过 ELO 技术制成的双电介质 DBR 结构(结构 C)

Fig. 2 Three typical structures of GaN-based VCSEL^[94]. (a) Hybrid DBR structure with epitaxial nitride bottom DBR (structure A); (b) double dielectric DBR structure (structure B) fabricated by substrate transfer technique; (c) double dielectric DBR structure (structure C) fabricated by ELO technique

对于具有混合 DBR 结构的 GaN VCSEL, AlN/GaN DBR 和 AlInN/GaN DBR 是最常用的两种外延底部氮化物 DBR。但是,这些材料的热导率很大 (AlN 和 $\text{Al}_{0.84}\text{In}_{0.16}\text{N}$ 的热导率分别为 $200 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 和 $4.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)^[95],所以这两种不同类型的 DBR 会极大地影响器件的热特性。

图 3(a)和图 3(b)分别显示了具有 AlN/GaN 和 AlInN/GaN 底部 DBR 的结构 A 的热通量曲线。对于这两个结构,有源区内的温升 ΔT 分别为 14.3 K 和 29 K ,分别对应于通过 $R_{th} = \Delta T / (U_{th} I_{th})$ 计算出的 397 K/W 和 806 K/W 的热阻,式中 R_{th} 、 ΔT 、 U_{th} 、 I_{th} 分别为热阻、温升、阈值电压、阈值电流。

$\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}/\text{GaN}$ DBR 结构器件的热阻约为 AlN/GaN DBR 结构器件的两倍,这主要是由于 $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}/\text{GaN}$ DBR 在垂直方向上的热导率低。具有结构 B 和 C 的 GaN VCSEL 的热通量曲线分别如图 3(c)和图 3(d)所示,有源区的温升分别为 39 K 和 37 K,分别对应于 1083 K/W 和 1027 K/W 的热阻。对于结构 B,垂直方向的传热是导热的主要途径,垂直方向的传热会受到电介质底部 DBR 和

SiO_2 电流限制层的阻碍,如图 3(c)中的热通量箭头所示。同样,结构 C 也具有电介质底部 DBR,并且热量直接通过 DBR 传递到基板也很困难。但是,结构 C 的有源区下方没有 SiO_2 电流限制层,允许热能沿横向扩散,然后绕过底部 DBR 传导至衬底,如图 3(d)中的箭头所示。通常,电介质底部 DBR 的热导率较低,所以双电介质 DBR 结构的 GaN VCSEL 的热阻比混合 DBR 结构大。

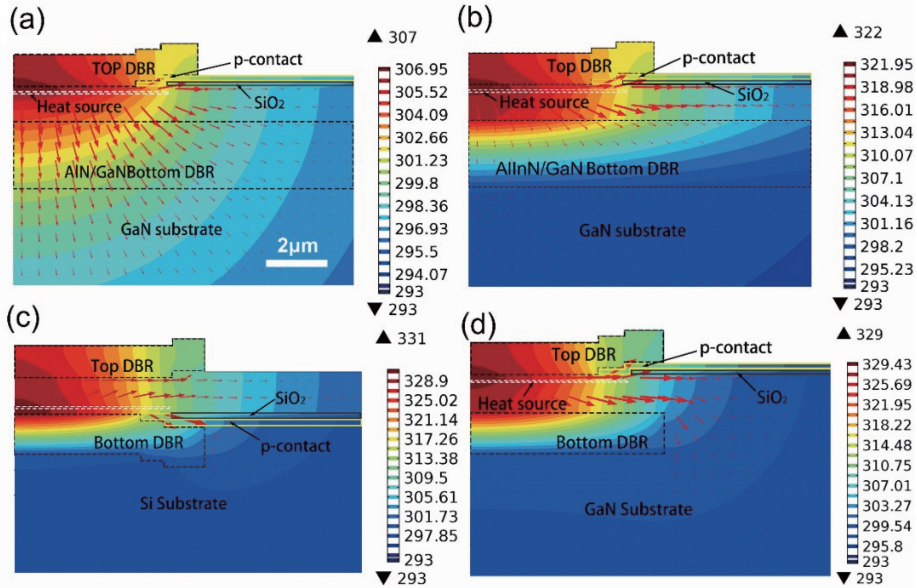


图 3 具有不同结构的 GaN VCSEL 中的热通量分布^[94]。(a)具有 AlN/GaN DBR 的结构 A; (b)具有 AlInN/GaN DBR 的结构 A; (c)结构 B; (d)结构 C

Fig. 3 Heat flux distributions in GaN VCSEL with different structures^[94]. (a) Structure A with AlN/GaN DBR; (b) structure A with AlInN/GaN DBR; (c) structure B; (d) structure C

腔长是 GaN VCSEL 的重要参数。仿真结果表明^[94],较厚的 n-GaN 层可以改善所有结构的散热性能。这是因为 GaN 具有较大的热导率,有利于热能从有源区向外扩散。在底部 DBR 这种热导率较低的结构中,散热性能改善得更明显。在结构 C 中,较厚的 n-GaN 可以使热量更容易绕过底部 DBR 传递,从而提高了器件的散热能力。由仿真结果可知,增加腔体长度是优化 GaN VCSEL 散热的有效方法。利用这种方法,斯坦雷电气公司和名城大学合作,在基于 AlInN DBR 的 VCSEL 中将最大输出功率提高了两倍,达到了 16 mW^[96]。

4 蓝紫光 GaN VCSEL

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 是一种 III/V 族半导体材料系统,其禁带宽度在 0.7~3.5 eV 范围内连续可调,因此,理论上 GaN 基 VCSEL 可以覆盖紫外到可见光波段的发射波长。而在该波段中,蓝紫光波段的 GaN

VCSEL 是目前报告得最多的。1999 年,俄罗斯科学院的 Krestnikov 等^[17] 生长了 37 个周期的 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ DBR 和 2λ 垂直腔,位于 2λ 腔中间的有源区是由超薄 InGaIn 插层组成的 InGaIn/GaN 多层结构(共 12 层),腔的另一侧是空气,不生长 DBR;在光泵浦下,他们在垂直腔或“表面”观察到了 401 nm 激光。同年,东京大学的 Someya 等^[16] 报道了第一个蓝光双 DBR GaN VCSEL,他们使用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术在蓝宝石衬底的(0001)面上生长了 43 对 $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{N}/\text{GaN}$ DBR 和 2.5λ 的 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 多量子阱,然后通过电子束蒸发在顶部沉积了 15 对 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ DBR,氮化物 DBR 和氧化物 DBR 的反射率分别是 98% 和 99.5%;在染料激光器($\lambda = 367$ nm)的照射下,VCSEL 在常温下于 399 nm 处激射,激射线宽小于 0.1 nm。这标志着有实用性的蓝色 VCSEL 可以在 GaN 材料系统中实现。

为了得到更高品质因子(Q)的谐振腔,研究人员使用双电介质 DBR 替代一边是外延 DBR、一边是电介质 DBR 的混合 DBR 结构。2000 年,美国布朗大学的 Song 等^[18]使用一系列复杂的工艺制作出了双电介质 DBR GaN VCSEL;具体的工艺流程如下:首先通过反应离子束溅射在带有蓝宝石衬底的 InGaN/GaN 晶片表面沉积 SiO₂/HfO₂ DBR,再将该结构的倒装芯片键合到永久性主体衬底(例如硅)上;接下来,采用激光剥离技术去除蓝宝石衬底,并使用湿法刻蚀去除 GaN 表面的残留,然后使用氯电子回旋共振(ECR)等离子体反应性离子刻蚀去除整个 GaN 缓冲层和一些相邻的 AlGaIn 层;最后,将第二个 HfO₂/SiO₂ DBR 直接沉积到暴露的 AlGaIn 层表面,完成器件的制备。得益于谐振腔的高 Q 值,器件在 T=258 K 下通过高频率脉冲光泵浦实现了准连续操作,激射波长为 403 nm。除了激光剥离蓝宝石衬底之外,也有研究人员采用湿法刻蚀去除 SiC 衬底^[19]。在 2005 年到 2007 年间,台湾交通大学的研究人员在室温下实现了混合 DBR 的 GaN VCSEL^[22]在 448 nm 处激射,以及具有双电介质 DBR 的 GaN VCSEL^[23]在 414 nm 处激射,并针对这些器件进行了深入的研究分析^[24-26]。

虽然光泵浦的蓝紫光 GaN VCSEL 一直在发展,但是直到 2008 年才实现电泵浦的 GaN VCSEL,这主要是因为有两大困难^[30]: 1) Al_xGa_{1-x}N 和 GaN 组成的 DBR 具有大的晶格失配和热膨胀系数差异,使得外延生长的 DBR 结构容易形成裂纹,裂纹会使其光反射率降低并增加散射损耗,而且有可能成为漏电流路径;而电介质 DBR 不导电,因此如何将电流有效地注入 GaN VCSEL 中是一个问题。2) 有效的电流注入需要低电阻和低光损耗的载流子注入路径,而 GaN 的 p 掺杂实现起来非常困难,因此如何将电流有效注入量子阱有源区是另一个需要考虑的问题。在多年光泵浦 GaN VCSEL 研发的基础上,台湾交通大学的研究人员^[30]于 2008 年制成了第一个电注入的 GaN VCSEL;该器件采用外延生长的 AlGaIn DBR 和 Ta₂O₅/SiO₂ 电介质 DBR 的混合结构,腔长为 5λ,中间有 10 对 InGaIn/GaN 多量子阱有源层;同时,该器件使用高度透明且导电的 ITO 作为电流扩散层;在 77 K 下,该器件在 462.8 nm 处实现了连续激射,阈值电流为 1.4 mA。

2008 年,日亚公司^[31]报道了 GaN VCSEL 的 RT-CW 工作性能:在 414 nm 处激射,阈值电流为

7 mA,阈值电压为 4.3 V。该器件采用了双电介质 SiO₂/Nb₂O₅ DBR,有源区由两对 InGaIn(9 nm)/GaIn(13 nm)多量子阱组成。该器件能实现 RT-CW 工作主要归因于两点:一是通过激光剥离和晶圆键合将器件安装在高导热性的 Si 基板上,改善了散热;二是通过生长 Nb₂O₅ 调整层来控制腔体的厚度,使得 ITO 层位于光场的波节处,有源区位于光场的波腹处,提升了增益,减小了损耗。虽然该器件的阈值电流密度较大,但其阈值电压却偏小,这是因为器件的无 p 型台面垂直结构规避了电流拥挤效应。2009 年,日亚公司的 Omae 等^[32]用 GaN 衬底替换蓝宝石衬底,生长了高质量的外延层,将器件的输出功率从 140 μW 提升到了 620 μW。之后,经过两年的外延结构和工艺条件的优化,日亚公司的 Kasahara 等^[33]制成了阈值电流为 1.5 mA、激射波长为 451 nm、最大输出功率可达 700 μW 的蓝光电泵浦 GaN VCSEL。

2012 和 2014 年,美国加州大学研制了两个非极性的 VCSEL 器件^[44-45],他们制备该器件所用方法的不同之处是:在非极性 m 面而非通常的 c 面 GaN 衬底上进行外延生长,然后使用带隙选择性光电化学蚀刻替代激光剥离技术来去除基板。在 m 面衬底上进行外延生长,可使两个器件的发光偏振度分别达到 72% 和 100%。高的偏振度有利于制造偏振锁定的 GaN VCSEL 阵列,在显示器、投影仪、传感器等的研制方面具有一定的应用价值。

厦门大学微纳光电子研究室对电注入蓝光 GaN VCSEL 进行了深入研究。2014 年,Liu 等^[32]通过两步衬底转移技术制造了 Q 值高达 3570 的高质量 VCSEL 器件,该器件具有由 12 对顶部和 17.5 对底部 ZrO₂/SiO₂ DBRs、5 对 InGaIn 量子阱以及 GaIn 阻挡层组成的耦合量子阱有源区。但使用胶键合的器件的散热能力较差,没有产生激射;改用金属键合后,得到了阈值电流低至 0.93 mA、激射波长为 424 nm 的 GaN VCSEL。

2016 年,索尼公司的 Izumi 等^[35]报告了 GaN VCSEL 在 RT-CW 条件下工作时,激射波长为 453.9 nm,输出功率达到了 1.1 mW,这是 GaN VCSEL 输出功率首次达到了 mW 量级。该器件的主要特色是腔体两侧均有电介质 DBR,其中一侧的 DBR 嵌入通过横向外延过生长技术生长的 n 型 GaIn 中。这种结构具有以下几个突出优点:1) 可以在腔体两侧形成高反射率的电介质 DBR;2) 通过外延生长很容易获得较短的腔体长度;3) 散热效率高。

名城大学的研究人员演示了 VCSEL 的多种改进方向。Furuta 等^[56]通过使用厚的 InGaN 有源层,并引入 AlInN/GaN DBR,得到了在 RT-CW 下工作的 GaN VCSEL,其阈值电流密度为 7.5 kA/cm²,峰值波长为 413.5 nm;在同样的 5QW 结构下,使用更厚的有源层有助于提高输出功率,降低阈值电流密度。Matsui 等^[57]报告了具有周期性增益结构(PGS)的 GaN VCSEL,该器件在 RT-CW 下工作,其阈值电流密度为 16.5 kA/cm²,工作波长为 409.9 nm;周期性增益结构的引入有利于将载流子均匀地注入到有源区中,提高光输出功率。Takeuchi 等^[60]生长了 n 型导电 AlInN/GaN DBR,

它可以直接注入电流。

2019 年,蓝紫光 GaN VCSEL 在增大输出功率和减小阈值电流方面都取得了突破。斯坦雷电气公司^[41]制造了一个 16×16 的二维 GaN VCSEL 阵列,如图 4 所示,得益于高质量的 AlInN/GaN DBR 及 SiO₂ 埋入式结构,该阵列的总输出功率达到了 1.19 W。索尼公司^[38]通过引入硼离子注入来进行横向电流限制,并使用曲面 DBR 进行横向光学限制,在 445.3 nm 处获得了激射。在衬底下方直接生长曲面 DBR 可以简化工艺,省去激光剥离和衬底转移的步骤,但却拉长了腔长,导致激射波长发生漂移。

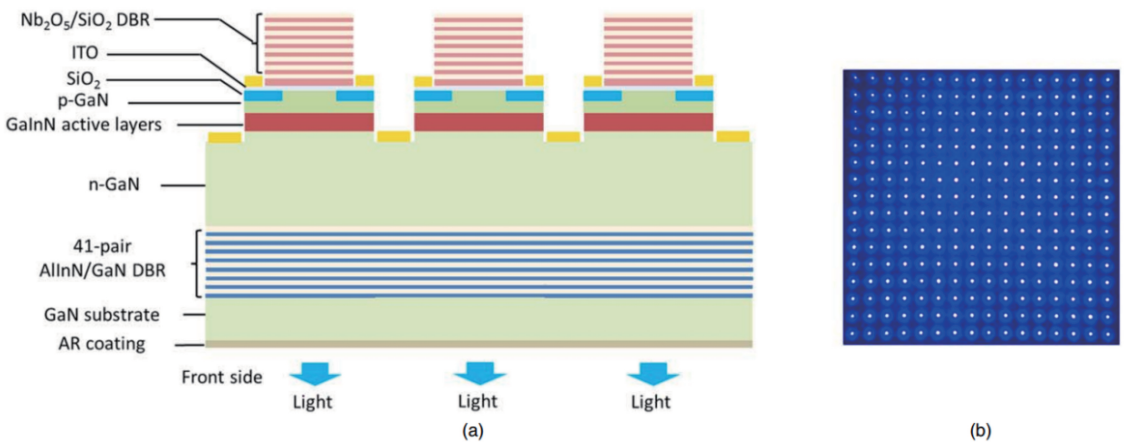


图 4 蓝色 VCSEL 阵列^[41]。(a)蓝色 VCSEL 阵列示意图;(b)在低于阈值条件下工作的蓝色 VCSEL 阵列的发射图像

Fig. 4 Blue VCSEL array^[41]. (a) Schematic of blue VCSEL array; (b) emission image of blue VCSEL array operating at below threshold

5 绿光 GaN VCSEL

InGaN QW 已被成功用于蓝色 LED 和 LD,目前也已有许多关于以 InGaN QW 作为有源层的蓝紫光 GaN VCSEL 的报道。从理论上讲,InGaN QW 可以覆盖到绿色及更长的波段,然而在绿色波段内,QW 结构通常会遭受低发射效率的困扰,这通常被称为“绿色间隙”^[97]。为了将发射波长延长到绿色波段,必须增加 InGaN QW 层中 In 的含量,为此,通常需要在低温下生长量子阱,但这会导致晶体质量降低。同时,由于 GaN 和 InN 之间的晶格常数差较大,因此 In 含量升高将导致更多的缺陷和更大的应变感应电场。缺陷是非辐射复合中心,内置电场会导致量子限制斯塔克效应(QCSE),该效应将电子和空穴拉开到量子阱的不同侧面,从而降低了复合效率^[98]。另外,GaN 基材料系统中载流子的有效质量较大,从而导致了较高的透明载流子密度^[99],是生产 InGaN QW 高性能绿色激光器的另

一个障碍。

然而,在量子点结构中,情况有所不同。众所周知,使用量子点作为有源区可以有效降低激光器器件中的阈值电流^[100]。GaN 基量子点是零维纳米级晶体,其中的电子和空穴被限制在很小的空间内,从而产生了具有 δ 函数态密度的离散态。而这种状态密度在量子点结构中有达到很高增益峰值的潜力。如果量子点足够小,则分立能级之间的能量差很大,电子往往集中在基态能级,因此可以忽略较高子带中的载流子,内部的载流子行为与单原子中的二能级系统相似。当量子点用作半导体激光器的增益介质时,激射性能最终与载流子的有效质量无关。除此之外,量子点中载流子的局域态可能会阻止它们被缺陷和位错捕获。用作发光器件的有源区的量子点通常通过应变驱动 SK 模式生长,与二维 QW 外延层的情况相比,可以显著减小残留在量子点中的应变。应变松弛能够减少 QCSE,从而降低辐射复合。这些特性表明,将 InGaN 量子点作为有源区,

可以制造出在“绿色间隙”发射的 VCSEL^[101]。

2008年, Cai等^[27]通过优化 InGaN/GaN QW 的生长, 首次实现了蓝绿色 GaN VCSEL 的光泵浦; 他们在室温下观察到了激光, 激光波长为 498.8 nm, 线宽为 0.15 nm。2016年, Weng等^[53]首次实现了电注入绿色 GaN VCSEL 的连续激光; 该 GaN VCSEL 器件采用 InGaN 量子点作为增益介质, 在 RT-CW 操作下激光波长为 560.4 nm, 并且具有 0.61 mA 的低电流阈值。2017年, Mei等^[54]同样使用 InGaN 量子点有源区器件, 通过调节腔长将该器件的波长从 491.8 nm (蓝绿色) 拓展到 565.7 nm (黄绿色), 覆盖了大部分的“绿色间隙”, 如图 5 所示。同年, Xu等^[55]通过使用量子阱有源区中的量子点

(QD-in-QW), 实现了电注入下同时发射蓝光和绿光的 GaN VCSEL; 该器件首先在约 2 μA 的阈值电流处激光, 发射波长为 545 nm 的绿光, 然后随着电流的进一步增加, 在 430 nm 处出现另了一个激光峰, 阈值电流约为 5 mA; 图 6 展示了不同注入电流下的发光光谱。2018年, Xu等^[102]通过将通常发射蓝光的 InGaN/GaN 量子阱与微腔相结合, 实现了基于量子阱中局域态发光的绿光 VCSEL。由于谐振腔效应, 与腔模共振的局域态的发光效率大幅提升, 使得在大注入电流下绿色 (峰值在 493 nm 附近) 发光得到迅速提升, 实现了激光; 图 7 给出了不同注入电流下的发光光谱^[102-103]。以上研究为绿光 VCSEL 的设计和制造提供了思路。

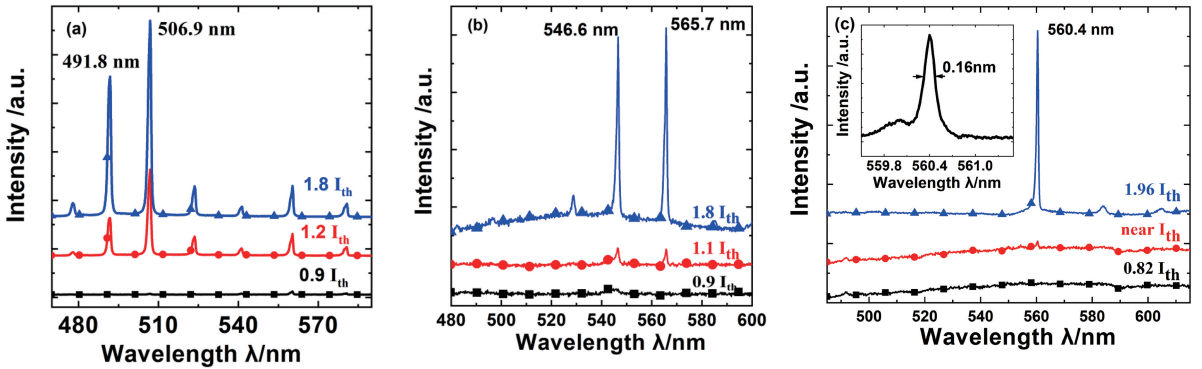


图 5 室温 CW 激光特性^[54]。(a) 腔长为 3041 nm 的样品在不同电流下的光谱; (b) 腔长为 2910 nm 的样品在不同电流下的光谱; (c) 腔长为 2652 nm 的样品在不同电流下的光谱。插图是以更高的分辨率测量的发射峰的线宽

Fig. 5 Room-temperature CW laser characteristic^[54]. (a) Spectra of sample with a cavity length of 3041 nm at different currents; (b) spectra of sample with a cavity length of 2910 nm at different currents; (c) spectra of sample with a cavity length of 2652 nm at different currents. Inset: linewidth of the lasing peak measured with a higher resolution

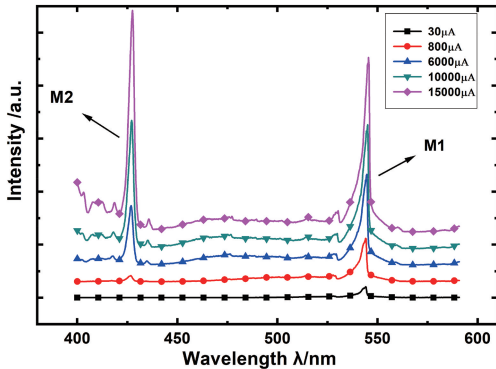


图 6 在室温下测量的各种注入电流下的激光发射光谱^[55]
Fig. 6 Laser emission spectra at various injection currents measured at room temperature^[55]

6 紫外 GaN VCSEL

紫外 GaN VCSEL 是最早报道的 GaN VCSEL。1996年, Redwing等^[13]报道的第一个光

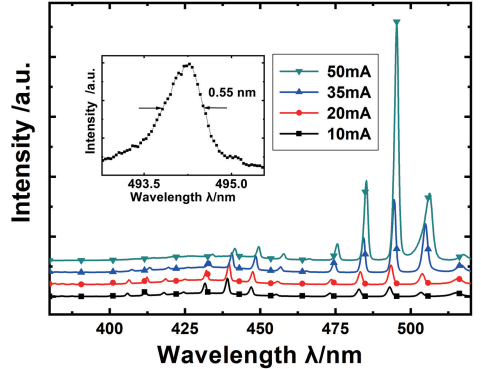


图 7 在不同电流下测得的 VCSEL 的 EL 光谱 (插图是以更高的分辨率测量的发射峰的线宽)^[102-103]
Fig. 7 EL spectra of the VCSEL measured at different currents (inset: linewidth of the lasing peak measured with a higher resolution)^[102-103]

泵浦 GaN VCSEL 的激光波长为 363.5 nm, 激光阈值约为 2 MW/cm²。在此之后, GaN VCSEL 发展

迅速, 20年来, 紫光、蓝光、绿光波段的 GaN VCSEL 都实现了光泵浦激射和电泵浦激射, 但是紫外 GaN VCSEL 的发展却遭遇了瓶颈, 至今没有人报道过电泵浦的紫外 GaN VCSEL。

相较于其他波段的 GaN VCSEL, 实现紫外波段 VCSEL 的技术难度很大, 面临着很多困难, 其中最主要的两个困难^[104]是: 一, 为了将发光波段向紫外延伸, 需要较高铝含量的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, 但是铝含量较大时, 就难以制备高电导率的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$; 二, III-N 型 DBR 在紫外光波段的反射率相对较低, 而且存在晶格失配、热膨胀系数失配、面内组分变化和折射率差等不足, 因此难以得到具有高反射率的 DBR。

2010年, 南洋理工大学的 Chen 等^[105]实现了由原位生长的底部 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 分布式布拉格反射器和顶部 $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ 介电镜组成的垂直腔结构; 该结构在 343.7 nm 处激射, 激射阈值为 $0.52 \text{ MW}/\text{cm}^2$; 他们采用纳米球光刻 (NSL) 制备了平均直径约为 500 nm 的纳米柱, 它可以提供优异的光学限制, 因此激射阈值较低。2015年, 佐治亚理工大学的 Liu 等^[106]实现了具有导电性能的 UV n-DBR 的 GaN VCSEL, 其激射波长为 367.5 nm, 激射阈值约为 $1 \text{ MW}/\text{cm}^2$; 次年, 他们^[107]又实现了在 374.9 nm 处的激射, 阈值功率密度为 $1.64 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 。2018年, 台湾交通大学的 Chang 等^[108]演示了第一个采用高对比度光栅 (HCG) 作为顶部反射镜的光泵浦 GaN VCSEL, 其激射波长为 369.1 nm, 并具有 $0.69 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 的低阈值。目前, HCG 已经在长波长的 VCSEL 中得到了广泛研究, 它具有小厚度、高反带宽以及允许通过光栅参数设置谐振波长等优点, 但其制造工艺特别复杂。2019年, 佐治亚理工大学的 Park 等^[109]通过引入气隙/ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ DBR 来增大折射率差, 进而实现了具有高反射率的 DBR; 该器件在光泵浦下于 375 nm 处激射, 阈值功率密度低至 $270 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 。

当将波段延伸至深紫外 (DUV) 波段时, GaN VCSEL 的激射就变得更加困难, 其腔体中有很高的光学损耗。Zheng 等^[110]详细分析了氮化物 DUV 微腔中的光损耗, 并成功制作了具有 AlGaIn 量子点有源层和双面 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ DBR 的 DUV 氮化物法布里-珀罗 (F-P) 微腔; 室温下该微腔的发射光谱如图 8 所示, 由腔模的 Q 值可以推导出腔内的光学损失为 103 cm^{-1} 。通过计算, Zheng 等^[110]认为光学损耗的主要来源是界面散射损耗, 而决定界面损耗

的两个关键参数是激光剥离后的界面粗糙度以及粗糙界面与驻波的重叠。这一研究成果为改善 DUV VCSEL 器件和降低其腔内损耗提供了有用的信息。

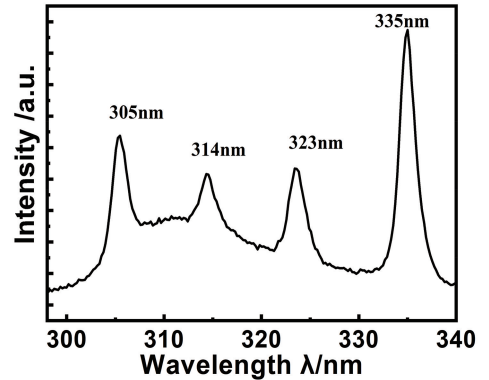


图 8 室温下微腔的发射光谱^[109]

Fig. 8 Emission spectra of the microcavity at room temperature^[109]

7 结束语

基于 GaAs 材料系统的 VCSEL 早已发展成熟, 并走向了市场, 而基于 GaN 材料系统的 VCSEL 如今正在迅速发展。据报道, 单管蓝光 VCSEL 的输出功率已达到几十毫瓦, 阵列蓝光 VCSEL 的输出功率达到了瓦量级, 可以预计在不久的将来会有蓝光 VCSEL 产品。此外, 利用量子点可以在很大程度上排除量子阱结构中存在的由电场和缺陷造成的影响, 消除较大载流子有效质量带来的较高透明载流子浓度的问题; 同时, 量子点具有很强的载流子局域作用, 可以突破传统的“绿色间隙”的限制, 获得很低阈值电流的绿光 VCSEL。另一种制作绿光 VCSEL 的方法是采用蓝光量子阱中的局域态, 加以谐振腔的共振作用来提高其辐射效率, 在大注入下实现绿光激光, 这种方法有利于获得高的输出功率。然而, 要实现产品化, 还要进一步提高绿光 VCSEL 的性能, 特别是提高其输出功率, 可能的途径包括阵列化、利用量子阱中的局域态、利用 QD-in-QW 有源区结构、优化 DBR 结构等方法。将 GaN VCSEL 覆盖的发光波段向更长波长 (如红光) 和更短波长 (如深紫外) 延伸是今后的研究方向, 这就要求根据设计波段来生长不同组分、不同结构的有源区, 以及与发光波长相匹配的具有高反射率、高质量的反射镜。无论从产业化看, 还是从科研方面看, 基于 GaN 的 VCSEL 比基于 GaAs 的 VCSEL 具有更大的挑战性。实现前者的技术瓶颈之一是材料问题: 1) 为了降低材料中的缺陷密度, 需要使用高质量的

GaN 衬底,但其生长依然十分困难,价格仍然昂贵;2)在蓝宝石或者硅衬底上进行外延生长的技术也需要改进,以获得高质量的外延材料和器件;3)在富 In 的 InGaN 中存在高密度缺陷和较大的极化场, QCSE 在空间上将空穴与电子分开,导致内量子效率降低和阈值电流增大;4)在深紫外波段,材料的掺杂和 DBR 的吸收损耗仍然是需要解决的关键问题。另一方面的瓶颈在于器件结构的设计:1)设计良好的电流扩展与接触结构,以减少载流子注入过程中的损耗;2)设计良好的光学限制结构,以减少光的损失;3)设计良好的散热结构,如拉长腔长、转移衬底等,同时要权衡由此带来的波长热稳定性的损失和工艺实现的困难。虽然存在着不少技术困难,但 GaN 基 VCSEL 的未来仍充满了机遇,在数据传输及智能传感领域,它将成为支持未来信息社会必不可少的关键组件。

参 考 文 献

- [1] Tatum J A. Evolution of VCSELs[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9001: 90010C.
- [2] Feezell D F. Status and future of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9363: 93631G.
- [3] Liu F H, Gong X, Zhang Y N, et al. Research progress on 808 nm VCSEL-array-pumped solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 120001.
刘芳华, 龚鑫, 张雅楠, 等. 808 nm 垂直腔面发射激光器阵列抽运的全固态激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 120001.
- [4] Wang X, Li W Y. Global patent distribution of vertical cavity surface emission laser(VCSEL) [J]. Information and Communications Technology and Policy, 2019(10): 14-16.
王潇, 李文宇. 垂直腔面发射激光器全球专利布局研究 [J]. 信息通信技术与政策, 2019(10): 14-16.
- [5] Ren G Q, Wang J F, Liu Z L, et al. Research progress on GaN single crystal growth[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(9): 1588-1598.
任国强, 王建峰, 刘宗亮, 等. 氮化镓单晶生长研究进展[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(9): 1588-1598.
- [6] Iga K. Surface-emitting laser-its birth and generation of new optoelectronics field [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1201-1215.
- [7] 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.
- [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] 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.
- [10] Amano H, Kito M, Hiramatsu K, et al. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI) [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1989, 28(12): L2112-L2114.
- [11] Nakamura S. GaN growth using GaN buffer layer [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, 30(10A): L1705-L1707.
- [12] 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(7A): 3527-3532.
- [13] Redwing J M, Loeber D A S, Anderson N G, et al. An optically pumped GaN-AlGaIn vertical cavity surface emitting laser[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(1): 1-3.
- [14] Chen S Q, Okano M, Zhang B P, et al. Blue 6-ps short-pulse generation in gain-switched InGaIn vertical-cavity surface-emitting lasers via impulsive optical pumping[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(19): 191108.
- [15] Someya T, Tachibana K, Lee J, et al. Lasing emission from an In_{0.1}Ga_{0.9}N vertical cavity surface emitting laser [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1998, 37(12A): L1424-L1426.
- [16] Someya T, Werner R, Forchel A, et al. Room temperature lasing at blue wavelengths in gallium nitride microcavities[J]. Science, 1999, 285(5435): 1905-1906.
- [17] Krestnikov I L, Lundin W V, Sakharov A V, et al. Room-temperature photopumped InGaIn/GaN/AlGaIn vertical-cavity surface-emitting laser [J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(9): 1192-1194.
- [18] Song Y K, Zhou H, Diagne M, et al. A quasicontinuous wave, optically pumped violet vertical cavity surface emitting laser [J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(13): 1662-1664.
- [19] Tawara T, Gotoh H, Akasaka T, et al. Low-threshold lasing of InGaIn vertical-cavity surface-emitting lasers with dielectric distributed Bragg reflectors[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(5): 830-832.

- [20] 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.
- [21] Geske J, Gan K G, Okuno Y L, et al. Vertical-cavity surface-emitting laser active regions for enhanced performance with optical pumping [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(9): 1155-1162.
- [22] Kao C C, Peng Y C, Yao H H, et al. Fabrication and performance of blue GaN-based vertical-cavity surface emitting laser employing AlN/GaN and Ta₂O₅/SiO₂ distributed Bragg reflector [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(8): 081105.
- [23] Chu J T, Lu T C, Yao H H, et al. Room-temperature operation of optically pumped blue-violet GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated by laser lift-off [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(4A): 2556-2560.
- [24] Chu J T, Lu T C, You M, et al. Emission characteristics of optically pumped GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(12): 121112.
- [25] Kao C C, Lu T C, Huang H W, et al. The lasing characteristics of GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser with AlN-GaN and Ta₂O₅/SiO₂ distributed Bragg reflectors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(7): 877-879.
- [26] Lu T C, Kao C C, Huang G S, et al. Optically and electrically pumped GaN-based VCSELs [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, August 26, 2007, Seoul, Korea. Washington DC: OSA: 2007: WA2_1.
- [27] Cai L E, Zhang J Y, Zhang B P, et al. Blue-green optically pumped GaN-based vertical cavity surface emitting laser [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(16): 972-974.
- [28] Zhang J Y, Cai L E, Zhang B P, et al. Low threshold lasing of GaN-based vertical cavity surface emitting lasers with an asymmetric coupled quantum well active region [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(19): 191118.
- [29] Liu W J, Chen S Q, Hu X L, et al. Low threshold lasing of GaN-based VCSELs with sub-nanometer roughness polishing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(20): 2014-2017.
- [30] 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.
- [31] 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: 121102.
- [32] 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: 052101.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Hamaguchi T, Nakajima H, Tanaka M, et al. Sub-milliamperethreshold 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.

- [42] 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.
- [43] Chang T C, Kuo S Y, Lian J T, et al. High-temperature operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(11): 112101.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] Xu R B, Mei Y, Zhang B P, et al. Simultaneous blue and green lasing of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, 32(10): 105012.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] Furuta T, Matsui K, Kozuka Y, et al. 1.7-mW nitride-based vertical-cavity surface-emitting lasers using AlInN/GaN bottom DBRs [C] // 2016 International Semiconductor Laser Conference (ISLC), September 12-15, 2016, Kobe, Japan. New York: IEEE, 2016: 16520483.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] Mishkat-Ul-masabih S M, Aragon A A, Monavian 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.
- [63] Mukoyama N, Otoma H, Sakurai J, et al. VCSEL array-based light exposure system for laser printing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6908: 69080H.
- [64] Kioupakis E, Rinke P, Delaney K T, et al. Indirect Auger recombination as a cause of efficiency droop in nitride light-emitting diodes [J]. *Applied Physics*

- Letters, 2011, 98(16): 161107.
- [65] Wierer J J, Jr, Tsao J Y, Sizov D S. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(6): 963-993.
- [66] Haglund Å, Hashemi E, Bengtsson J, et al. Progress and challenges in electrically pumped GaN-based VCSELs [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9892: 98920Y.
- [67] McKendry J J D, Massoubre D, Zhang S L, et al. Visible-light communications using a CMOS-controlled micro-light-emitting-diode array [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(1): 61-67.
- [68] Fang F, Zhang A M, Li T C. Time: from astronomical time to atomic time [J]. *Measurement Technique*, 2019(5): 7-10.
房芳, 张爱敏, 李天初. 时间: 从天文时到原子秒 [J]. *计量技术*, 2019(5): 7-10.
- [69] Kitching J, Knappe S, Vukicevic M, et al. A microwave frequency reference based on VCSEL-driven dark line resonances in Cs vapor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, 49(6): 1313-1317.
- [70] Miah M J, Al-Samaneh A, Kern A, et al. Fabrication and characterization of low-threshold polarization-stable VCSELs for Cs-based miniaturized atomic clocks [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1701410.
- [71] Warren M E, Podva D, Dacha P, et al. Low-divergence high-power VCSEL arrays for lidar application [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10552: 105520E.
- [72] Song Y K, Zhou H, Diagne M, et al. A vertical cavity light emitting InGaN quantum well heterostructure [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(23): 3441-3443.
- [73] Watanabe N, Kimoto T, Suda J. The temperature dependence of the refractive indices of GaN and AlN from room temperature up to 515 °C [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(10): 106101.
- [74] Strite S, Morkoç H. GaN, AlN, and InN: a review [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1992, 10(4): 1237.
- [75] Hiramatsu K, Detchprohm T, Akasaki I. Relaxation mechanism of thermal stresses in the heterostructure of GaN grown on sapphire by vapor phase epitaxy [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1993, 32(9A): 4042A.
- [76] Butté R, Feltn E, Dorsaz J, et al. Recent progress in the growth of highly reflective nitride-based distributed Bragg reflectors and their use in microcavities [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(10): 7207-7216.
- [77] Sohi P, Martin D, Grandjean N. Critical thickness of GaN on AlN: impact of growth temperature and dislocation density [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, 32(7): 075010.
- [78] Yagi K, Kaga M, Yamashita K, et al. Crack-free AlN/GaN distributed Bragg reflectors on AlN templates [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(5R): 051001.
- [79] Ive T, Brandt O, Kostial H, et al. Crack-free and conductive Si-doped AlN/GaN distributed Bragg reflectors grown on 6H-SiC (0001) [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(11): 1970-1972.
- [80] Carlin J F, Ilegems M. High-quality AlInN for high index contrast Bragg mirrors lattice matched to GaN [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(4): 668-670.
- [81] Han S H, Lee D Y, Lee S J, et al. Effect of electron blocking layer on efficiency droop in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(23): 231123.
- [82] Chung R B, Han C, Pan C C, et al. The reduction of efficiency droop by $Al_{0.82}In_{0.18}N/GaN$ superlattice electron blocking layer in (0001) oriented GaN-based light emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(13): 131113.
- [83] Lin B C, Chang Y A, Chen K J, et al. Design and fabrication of a InGaN vertical-cavity surface-emitting laser with a composition-graded electron-blocking layer [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(8): 085002.
- [84] Hsieh D H, Tzou A J, Kao T S, et al. Improved carrier injection in GaN-based VCSEL via AlGaN/GaN multiple quantum barrier electron blocking layer [J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27145.
- [85] Leonard J T, Cohen D A, Yonkee B P, et al. Smooth e-beam-deposited tin-doped indium oxide for III-nitride vertical-cavity surface-emitting laser intracavity contacts [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(14): 145304.
- [86] Wu T T, Lin C C, Wu Y L, et al. Enhanced output power of GaN-based resonance cavity light-emitting diodes with optimized ITO design [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(24): 3757-3763.
- [87] Feezell D F, Farrell R M, Schmidt M C, et al. Thin metal intracavity contact and lateral current-distribution scheme for GaN-based vertical-cavity lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(18):

- 181128.
- [88] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene photonics and optoelectronics [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 611-622.
- [89] Stattin M, de la Rosa C L, Sun J, et al. Metal-free graphene as transparent electrode for GaN-based light-emitters [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, 52(8S): 08JG05.
- [90] Lee S, Forman C A, Kearns J, et al. Demonstration of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with buried tunnel junction contacts [J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31621-31628.
- [91] Malinverni M, Martin D, Grandjean N. InGaN based micro light emitting diodes featuring a buried GaN tunnel junction[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(5): 051107.
- [92] Chen G. A comparative study on the thermal characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, 77(9): 4251-4258.
- [93] Osinski M, Nakwaski W. Thermal analysis of closely-packed two-dimensional etched-well surface-emitting laser arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, 1(2): 681-696.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] Kuramoto M, Kobayashi S, Akagi T, et al. High-power GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with AlInN/GaN distributed Bragg reflectors [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(3): 416.
- [97] 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.
- [98] Waltereit P, Brandt O, Trampert A, et al. Nitride semiconductors free of electrostatic fields for efficient white light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2000, 406(6798): 865-868.
- [99] Meney A T, O’Reilly E P, Adams A R. Optical gain in wide bandgap GaN quantum well lasers[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 1996, 11(6): 897-903.
- [100] Tao R C, Arakawa Y. Impact of quantum dots on III-nitride lasers: a theoretical calculation of threshold current densities [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(SC): SCCC31.
- [101] 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.
- [102] 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.
- [103] Mei Y, Xu R B, Ying L Y, et al. Room temperature continuous wave lasing of GaN-based green vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10918: 10918 H.
- [104] Detchprohm T, Li X, Shen S C, et al. III-N wide bandgap deep-ultraviolet lasers and photodetectors [J]. *Semiconductors and Semimetals*, 2017, 96(4): 121-166.
- [105] Chen R, Sun H D, Wang T, et al. Optically pumped ultraviolet lasing from nitride nanopillars at room temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(24): 241101.
- [106] Liu Y S, Haq A F M S, Kao T T, et al. Development for ultraviolet vertical cavity surface emitting lasers[C] // 2015 European Conference on Lasers and Electro-Optics-European Quantum Electronics Conference, June 21-25, 2015, Munich, Germany. Washington DC: OSA, 2015: PD_A_2.
- [107] Liu Y S, Saniul Haq A F M, Mehta K, et al. Optically pumped vertical-cavity surface-emitting laser at 374.9 nm with an electrically conducting n-type distributed Bragg reflector[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(11): 111002.
- [108] Chang T C, Kuo S Y, Hashemi E, et al. GaN vertical-cavity surface-emitting laser with a high-contrast grating reflector[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10542: 105420T.
- [109] Park Y J, Detchprohm T, Mehta K, et al. Optically pumped vertical-cavity surface-emitting lasers at 375 nm with air-gap/ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ distributed Bragg reflectors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10938: 109380A.
- [110] Zheng Z M, Li Y Q, Paul O. Loss analysis in nitride deep ultraviolet planar cavity[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2018, 12(4): 043504.