宽禁带半导体材料与器件专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022060903

GaN基高速蓝绿光光源的研究进展

李振浩，汪　莱*，郝智彪，罗　毅，孙长征，韩彦军，熊　兵，王　健，李洪涛

（清华大学 电子工程系/北京国家信息科学技术研究中心，北京 100084）

摘　要： 随着射频通信频谱资源的逐渐饱和，局域范围内高速通信亟需开辟一条新的赛道，而可见光通信得益于光的大带宽本质和通信范围有限而频谱免许可，是传统通信的理想补充之一。GaN基蓝绿光发光光源近十年来的快速发展，特别是性能优良的小尺寸高速光源micro-LED的发展，使其成为“万物互联”的物联网时代终末端通信的重要促进力量。文章分蓝绿光micro-LED和带有谐振腔的GaN基蓝绿光光源（含超辐射发光二极管和激光器）两个主要类别，回顾了蓝绿光高速光源的发展历程和最新进展，主要包括micro-LED结构与阵列、面发射腔增强光源、边发射腔增强光源三个方面。

关键词： 光通信；氮化镓；高速；micro-LED；谐振腔

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0405－25

Research Progress of GaN-based High-speed Blue and Green Light Source

LI Zhenhao, WANG Lai, HAO Zhibiao, LUO Yi, SUN Changzheng,
HAN Yanjun, XIONG Bing, WANG Jian, LI Hongtao

(Beijing National Research Center for Information Science and Technology (BNRist),
Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, CHN)

Abstract: With the gradual saturation of the spectrum resources of radio frequency communication, there is an urgent need to open up a new race track for local high-speed communication, while visible light communication benefits from the nature of large bandwidth and spectrum license-free since limited communication range, which is one of the ideal supplements of traditional communication. The rapid development of GaN-based blue-green light source in the past decade, especially the development of micro-LED as the small size and high speed light source with excellent performance, has made it an important driving force for terminal communication in the "Internet of Everything" era of Internet of Things. In this paper, the development history and recent progress of blue-green high-speed light sources are reviewed from two main categories: blue-green micro-LED and GaN-based blue-green light sources with resonators (including super-luminescent diodes and lasers). It mainly includes three aspects: micro-LED structure and array, surface emitting cavity enhanced light source and edge emitting cavity enhanced light source.

Key words: optical communication; gallium nitride; high-speed; micro-LED; resonator

收稿日期：2022－06－09.

基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFA0716400)；国家自然科学基金项目(62150027, 61975093, 61991443, 61927811, 61875104).

* **通信作者：**汪　莱

E-mail: wanglai@tsinghua.edu.cn

0 引言

蓝、绿光是照明光源中的重要组分，将高速蓝绿光光源与现有照明设施集成，可实现可见光通信。在一些特定场景中，如塑料光纤、水下等，蓝、绿光由于特有的低损耗特性，成为传递信息的高效渠道。下面将展开介绍蓝、绿光的几个典型应用场景。

(1) 可见光无线通信(Light Fidelity，Li-Fi)

基于 GaN 的可见光光源，因其环保节能、生产成本低廉的特质，已经成为现代社会照明、显示的主力。通信方面，随着人们对高速率无线通信需求的不断增长，原本非常有限的射频信号波段已经难以承担。由频率带宽的理论计算公式：

$$\Delta f = \left(\frac{c}{\lambda^2}\right) \cdot \Delta\lambda \tag{1}$$

频率带宽与波长的平方成反比，可见光波长相比于通常在数百兆赫兹至数吉赫兹的射频通信频段要短很多，因此，可见光通信的频率范围远大于射频频段，在 380～750 THz，增大了约 6 个数量级。

未来 6G 通信将更多的终端设备纳入互联网，超高清、超低时延的通信需求促使人们另辟蹊径。Li-Fi 之父、德国物理学家 Harald Haas 提出将已经广泛安装的照明设备用于通信，一个设备同时实现照明、显示与通信[1-3]。在众多人员聚集、停留的室内场合[4]，Li-Fi 是对 Wi-Fi(Wireless Fidelity)的重要补充[5]，而在电磁敏感和强电磁环境区域，如机场、加油站、矿井、核电站、太空等，Li-Fi 是代替射频通信的最佳选择之一[6]。同时，Li-Fi 局限于特定区域，阻断光线传播即可有效防止信息泄漏与窃听，具有高保密性的特征。正因为特定的传播范围，利用可见光波段实现局部空间内信息互通也不需要获得通信许可，大大节省通信成本。

(2) 塑料光纤(Plastic Optical Fiber，POF)通信

过去几十年中，以金属为波导的电线逐渐被光通信取代。石英光纤与红外激光搭配，实现了洲际的高速信息互联，成为了信息骨干网络长距离、大容量传输的主动脉。光数据传输到电数据传输的界限已经缩短到信息传递的最后 10 m，以车载光网络、光纤入室为代表，被细小拆解的信息像毛细血管网一样连接着无数的终端，信息传递高速公路的特征由长跑道、超大容量转变为多跑道、小容量。对传输带宽要求的降低以及应用于面向广大群众的消费电子，信息传递的性价比成了不可忽视的要求。高成本的石英光纤不再适合毛细血管网络的搭建，当前广泛使用的铜线消耗大量电能，而成本低廉、安装方便、抗震抗弯能力强的 POF 成了连接高密度终端的最佳选择之一。塑料光纤中蓝绿光损耗最小，成本低，适用于各类恶劣环境的 GaN 基蓝绿光源无疑成为了 POF 的最佳搭档[7]。

(3) 水下无线光通信(Underwater Wireless Optical Communication，UWOC)

对海洋资源的进一步开发，使对水下大容量通信的需求快速增长。陆地上采用的射频信号在海水中严重衰减，仅适用于数米距离内的数据传输[8-9]，无法广泛用于水下通信。而一直以来普遍使用的水下声波，因其固有的低载波频率(数十千赫兹)，数据传输速率局限在千比特每秒量级[10]，无法实现高传输速率和低延迟[11]，但在长距离应用中具有不可取代的地位。蓝绿光为海水中的“透明窗口”，具有远低于其他波段的吸收系数[12]。光的调制带宽远大于声波，因此水下高速蓝绿光可以提供高清图像传输所需的数据速率，实现大容量、低时延的实时数据传输。相比于声波和射频，蓝绿光还具有低成本、低功耗的优势[13]。

面向以上应用需求，本文主要介绍基于 InGaN 有源区的高速蓝绿光 micro-LED(阵列)和腔增强光源的发展历程和研究现状。

1 微尺度发光二极管(micro-LED)

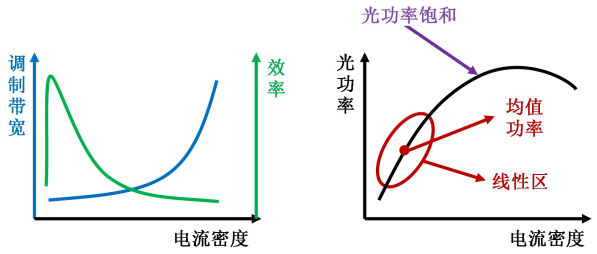
1.1 micro-LED 用于光通信的优势和挑战

LED 实现光通信的方式通常为在一定直流偏置下进行小信号调制。随调制频率增大，小信号的光功率通常会降低，当其降到最大值的一半时，调制频率是光源通信性能的一个重要参数，通常称作光的－3 dB 带宽。由于光功率与电参数的平方成正比，光的－3 dB 带宽与电的－6 dB 带宽等效，而对整个光通信系统来说，更关注小信号的电功率降到一半时，对应的调制带宽，因此通常所说的调制带宽指电的－3 dB 调制带宽。传统直径达到毫米以上的 LED，虽然整体器件注入电流高、亮度高，但是由于大面积芯片产生大量热量，导致单位面积的电流密度、光功率密度并不高。同时，p 电极与 n 电极正对面积大，电容大，造成 RC 时间常数过大。以上原因导致当前商用 LED 的－3 dB 光调制带宽在数十兆赫兹范围内[14]。由 LED 的－3 dB 带宽的近似计

算公式 $f_{-3\,\mathrm{dB}}=\frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau}=\frac{\sqrt{3}}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{\mathrm{DLT}}}+\frac{1}{\tau_{\mathrm{RC}}}\right)$ 可知，要提高 LED 的调制带宽，需要减小 LED 结构中微分载流子寿命 τ_{DLT} 和 RC 时间常数 τ_{RC}[15]。通常情况下，蓝光 LED 的载流子复合寿命大于等于 10 ns[16]。RC 时间常数主要与器件尺寸有关，通常以缩小器件尺寸的方式来减小 RC 时间常数对调制带宽的影响，部分研究表明，100 μm 以下的器件，限制调制带宽的主要因素是微分载流子寿命[17]。电流密度增高可以部分屏蔽极化电场、减弱量子限制斯塔克效应（Quantum Confine Stark Effect，QCSE）[18]，同时增强非辐射复合，让载流子消耗更快，减小复合寿命[19]。小电流下调制带宽主要受载流子寿命的限制，当注入电流密度增加到一定程度时，RC 时间常数会成为限制调制带宽的主导因素[20]。缩小 RC 时间常数要求减小器件尺寸，而小尺寸的器件由于电流分布的改善[21-24]、自加热效应相对较弱[25-26]，更容易达到高注入电流密度[19,27]，同时，表现出更好的老化特性[28]。因此，小尺寸的 micro-LED 成了高速光源的理想选择之一。

值得注意的是，micro-LED 的调制带宽和量子效率存在固有的矛盾，大注入电流时，虽然可以实现较高的调制带宽，但量子效率下降严重[29-30]，光功率饱和，如图 1 所示。从载流子动力学的角度分析导致光功率饱和的主要物理层原因，由于有源区载流子捕获效率有限，大量载流子没有进入势阱中复合，而是直接从有源区泄漏，这就导致注入在增加，但是光功率没有随之增大。同时，大注入下有源区非辐射复合产生大量热，而高有源区温度会进一步引起非辐射复合增强，进入恶性循环。温度升高还会导致载流子热逃逸现象更加显著。

光功率饱和进而会对光源通信性能造成影响[31]，如图 1(b)所示，主要体现在对线性区间长度的限制。从调制方式的角度来说，开关键控 OOK 是最简单的调制方式，对线性区长度要求不高，但是频谱效率低、数据速率低。而频谱效率很高的多进制正交幅度调制（M-ary Quadrature Amplitude Modulation，M-QAM）-正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，OFDM）调制对线性区长度的依赖性很强，要求调制范围在线性区间内。调制信号进入非线性区间会导致信号失真、误码率增加。线性区越长，可承载更高阶的多进制正交幅度，数据速率也能大大增加。



（a）　调制带宽和效率随电流密度的变化　（b）　光功率随电流密度的变化

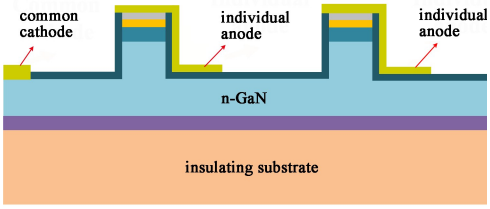
图 1　调制带宽、效率和光功率随电流密度的变化曲线

1.2　不同极性面的 micro-LED

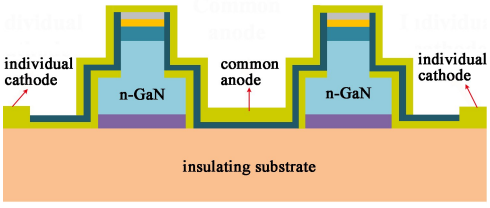
1.2.1　极性面

GaN 基 LED 外延衬底使用最多的是 *c* 面蓝宝石衬底，在其上得到的 LED 是极性面 LED。英国 University of Strathclyde 的 Martin D. Dawson 课题组在 2010 年采用 *c* 面蓝宝石制作的直径为 72 μm、峰值波长为 450 nm 的 AlInGaN 基 micro-LED 实现了 245 MHz 的−3 dB 调制带宽[32]。随后他们研究了不同像素直径和不同峰值波长的 micro-LED，将 450 和 520 nm 器件的调制带宽提升到了 400 MHz 以上[19,33-34]。2016 年他们通过将台面深蚀刻到衬底（图 2）、改进 p 接触和有源区形状进一步将直径为 24 μm、波长为 450 nm 的蓝色 micro-LED 的调制带宽提高到 833 MHz（16 kA/cm^2）[35]。2017 年，他们将 micro-LED 与 n 型 CMOS 集成，在 17.7 kA/cm^2 的工作电流密度下实现了 2.0 mW 的光功率和 440 MHz 的调制带宽[36]。复旦大学 Tian 等在 *c* 面蓝宝石衬底上先后制作了直径为 80 μm、峰值波长为 440 nm[37] 和直径为 40 μm、峰值波长为 445 nm[38] 的 micro-LED 并封装，调制带宽分别为 160 和 230 MHz，其中后者的发光功率为 0.8 mW。台湾新竹清华大学的 Liao 等在 2014 年制作的直径为 75 μm、峰值波长为 500 nm 的绿光 *c* 面 micro-LED，在 50 mA 注入电流下调制带宽达 463 MHz，光功率达 1.6 mW[39]。随后，他们进一步延长发光波长，降低工作电流密度，获得了峰值波长为 520 nm 的绿光 LED，直径为 75 μm 的器件在 1.132 kA/cm^2 的注入电流密度下获得调制带宽为 340 MHz。同时，在 679 A/cm^2 的低电流密度下，使用正交幅度调制-正交频分复用（QAM-OFDM）调制方式，数据速率达到 2.16 Gb/s[40]。中科院半导体所的 Cao 等，将直径为 30 μm 的蓝光 micro-LED 与 CdSe/ZnS 量子点相结合，制作了带宽为 637.6 MHz 的白光 LED，采用非归零开关键控（Non-

Return-to-Zero On-Off Keying, NRZ-OOK), 在 4.35×10^{-8} 的误码率下实现了 675 Mb/s 的数据率[41]。



(a) 传统结构



(b) 台面深刻蚀结构[36]

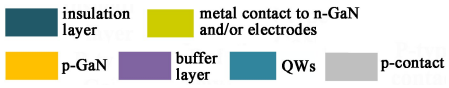
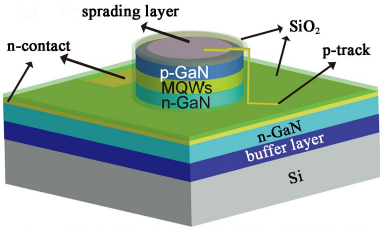
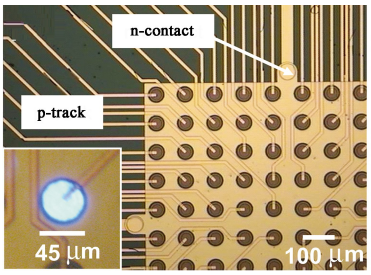


图 2 传统和台面深刻蚀结构示意图

除了蓝宝石,(111)面的硅衬底也被用来生长高速 micro-LED。Tian 等用(111)面硅衬底生长的 GaN 外延结构制作的像素直径为 45 μm 的 micro-LED(图 3),实现了 270 MHz 的调制带宽[42]。



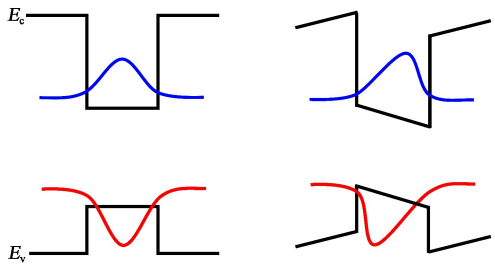
(a) 硅衬底 micro-LED 结构



(b) 阵列显微镜照片[42]

图 3 硅衬底 micro-LED 结构示意图和阵列显微镜照片

GaN 基 c 面 LED 沿着(0001)轴生长,由于缺乏反演对称性,存在很强的极性。同时 InGaN 量子阱和 GaN 势垒之间存在晶格失配,会产生较大的压电极化场。如图 4 所示,极化电场导致量子阱内电子和空穴波函数的空间分离、辐射复合速率下降、载流子寿命变长,即量子限制斯塔克效应(QCSE)[43],从而降低了调制带宽。随注入电流增加,载流子浓度增大,由于库伦屏蔽效应减弱了极化场的影响,电子空穴复合速率变快。

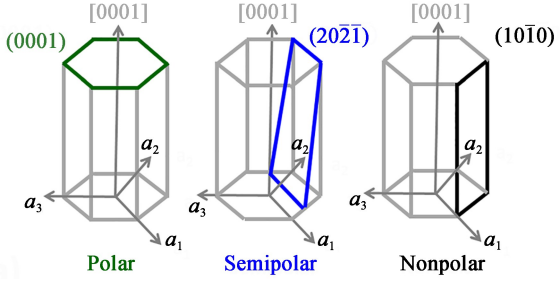


(a) (b)

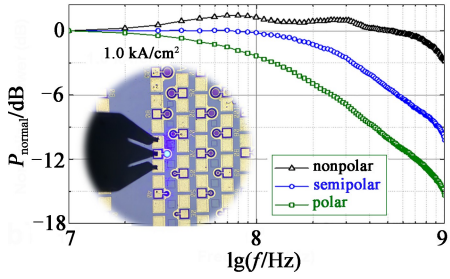
图 4 压电极化场示意图。(a) 无极化场存在时电子空穴波函数空间重叠;(b) 极化场的存在导致电子和空穴波函数空间分离[44]

1.2.2 非极性面

改变外延生长的晶向,从而规避极化场的影响[45-48]。因此,不少研究组采用半极性、非极性的 GaN 同质衬底外延 LED,以减小 QSCE 效应对载流子复合的影响,如图 5(a)。新墨西哥大学的 Monavarian 等对比不同极性 LED 调制带宽,研究表明非极性、半极性器件在低注入下具有较极性器件更大的调制带宽[49],如图 5(b)。



(a) 不同极性面示意图



(b) 不同极性面器件调制带宽随电流密度的变化关系[49]

图 5 不同极性面示意图及器件调制带宽随电流密度变化的关系

同组的 Rashidi 等用非极性 m 面 GaN 衬底外延制作了直径为 80 μm、峰值波长为 454 nm 的 micro-LED，在 1 kA/cm^2 的注入电流密度下，−3 dB 调制带宽和输出光功率分别达 1.5 GHz 和 1.2 mW。他们使用速率方程方法推导出 LED 的小信号等效电路，并同时将电路的阻抗、频率响应与 LED 的测量阻抗、频率响应进行拟合，从而提取 RC 时间常数和微分载流子寿命。他们提出在低电流密度下，RC 时间常数相对于微分载流子寿命可以忽略不计，但在较高电流密度下，RC 时间常数与微分载流子寿命具有相同的量级，调制带宽的饱和最终受到 RC 效应的限制[50]。他们的结论进一步证明了 micro-LED 带宽的两个主要限制因素，RC 时间常数和微分载流子寿命，分别在高、低电流密度范围起主导作用。

1.2.3　半极性面

半极性面对 In 原子排斥作用比非极性面小，可以实现更高 In 组分的有源区[51]。台湾交通大学和厦门大学的 Chen 等制备了如图 6 所示的直径为 50 μm 的(20$\bar{2}$1)半极性面绿光 micro-LED，使用原子层沉积(ALD)制备 30 nm 厚的 Al_2O_3 钝化层以降低侧壁漏电流，在 2.0 kA/cm^2 的电流密度下，获得了 756 MHz 的−3 dB 调制带宽和非归零开关键控(NRZ-OOK) 1.5 Gb/s 的数据速率[51](图 7)。University College Cork 的 Dinh 等报道了一种像素直径为 50 μm、波长为 450 nm 左右的蓝光(11$\bar{2}$2)半极性面 LED，在 204 A/cm^2 的注入电流密度下带宽达到 1 030 MHz，在 510 A/cm^2 的注入电流密度下背对背非归零开关键控(NRZ-OOK)数据传输速率达到 2.4 Gb/s[52-55]。后续，他们制作并比较了不同尺寸 4 和 8 nm 阱宽的单量子阱(11$\bar{2}$2)半极性面 LED，发现后者带宽更大。直径为 30 μm 的器件在 385 A/cm^2 的注入电流密度时获得超过 800 MHz 的带宽；直径为 50 μm 的器件在 319 A/cm^2 注入时，使用非归零开关键控(NRZ-OOK)和正交频分复用(OFDM)调制方式，分别获得 1.5 和 1.8 Gb/s 的数据速率[17]。UCSB 的 Khoury 等通过在单一晶圆上生长制作顶部 445 nm 蓝色和底部 565 nm 黄色量子阱的双发光峰 LED，首次实现了单片集成的白光(20$\bar{2}$1)半极性面 LED，避免了商用白光 LED 方案中黄色荧光粉长衰减寿命导致频率响应慢的限制，直径为 20 μm 的器件实现了 660 MHz 的调制带宽[56]。

虽然半极性、非极性器件可以在较低的电流密度下获得较高的调制带宽，但使用半极性、非极性蓝宝石衬底进行异质外延的器件晶体质量差，发光性能差。而目前自支撑半极性、非极性 GaN 同质衬底难以实现大尺寸制备，并且价格十分昂贵，阻碍了其产业化的进一步推动。

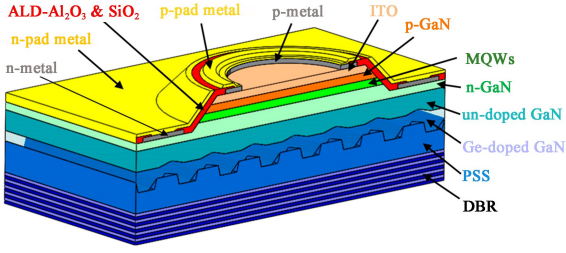
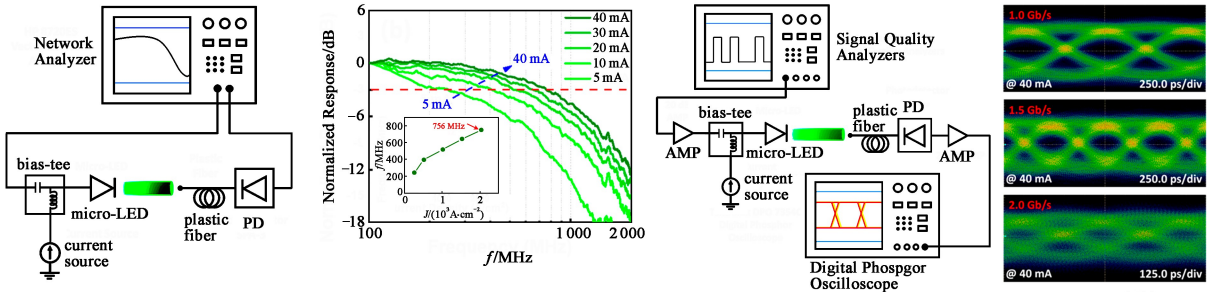


图 6　(20$\bar{2}$1)半极性面绿光 micro-LED 结构示意图[51]



(a)　调制带宽测试原理示意图　(b)　调制带宽测试结果　(c)　数据速率测试原理示意图　(d)　数据速率测试结果

图 7　(20$\bar{2}$1)半极性面绿光 micro-LED 的调制带宽和数据速率测试原理及结果[51]

1.3　有源区结构

有源区的形貌与结构决定了载流子输运与复合的快慢。

1.3.1　有源区厚度

减小有源区厚度，可以增大有源区载流子浓度，进而减小微分载流子寿命、加快 LED 的调制速度[57]。有源区厚度减小同时也减弱了极化效应，增大电子、空穴波函数的重叠，增大复合概率，进而加快载流子复合。

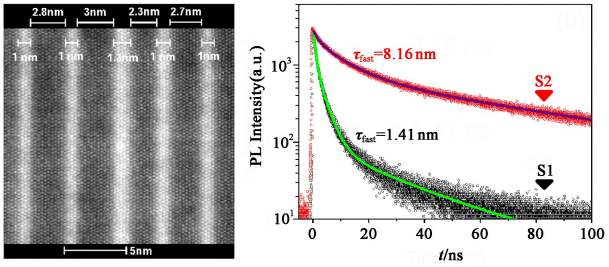
厦门大学的 Zheng 等将 10 周期多量子阱有源

区结构的 LED，制作成直径为 30 μm 的 micro-LED，峰值波长约为 448 nm，在 100 mA 的偏置电流下－3 dB 调制带宽达 161 MHz，光功率达 5.6 mW，可以看到较多的量子阱数量有利于提高光功率，但限制了调制带宽[27]。

NCU 和 UCSB 的研究人员将中心波长为 500 nm、直径分别为 50 和 75 μm 的 micro-LED 的有源区多量子阱 MQW 数量减少到 4 个周期，以使有源区载流子密度更高，减小了自发辐射的时间，在 40 mA 的小偏置电流下，直径为 50 μm 的器件具有 0.4 GHz 的－3 dB 调制带宽，直径为 75 μm 的器件调制带宽则为 0.21 GHz，通过直径 500 μm 的 BK-7 透镜与 SI-POF 耦合，50 m 距离达到了非归零开关键控(NRZ-OOK)1.07 Gb/s 的通信速率[58]。减少势垒厚度可以减小量子阱内部极化场，增强空穴注入量子阱，使得载流子分布更均匀。2016 年他们将势垒厚度从 17 nm 减少到 5 nm，进一步提高复合速率和效率。直径为 50 μm、中心波长为 480 nm 的器件实现了 1 GHz 的－3 dB 调制带宽和 1.7 mW 的光输出[59]。随后采用光功率更高的直径为 75 μm 的 micro-LED 进行了通信速率的测试，通过带有直径为 500 μm 的透镜 TO 封装后，用于 POF 通信，分别用非归零开关键控(NRZ-OOK)、4 脉冲幅度调制(4-PAM)，在 1 m 传输距离下实现了 5.5 和 5.8 Gb/s 的数据速率[60]。

Kamran 等通过将 InGaN 量子阱和 GaN 势垒的厚度分别从传统的 3 和 10 nm(S2)减小到 1 和 3 nm(S1)(图 8)，缩短了有源区中的微分载流子寿命，也抑制了 QCSE 效应。通过时间分辨光致发光测得载流子寿命仅 1.41 ns。2.5 kA/cm^2 的注入电流密度下，将 c 平面蓝宝石衬底上制作的 LED 的－3 dB 调制带宽从 214 MHz 增加到 536 MHz。因为 QCSE 效应的影响，有源区的厚度与载流子输运时间关系密切，这一点在低注入时的 c 面蓝宝石衬底制作的器件上尤为显著。经过有源区整体厚度的减少，在 56 A/cm^2 的低注入电流密度下，带宽也达到了 120 MHz[61]。在此基础上，Xu 等基于 3 周期、厚度为 1 nm 的 InGaN 量子阱，在 5 996 A/cm^2 注入电流密度下实现了调制带宽最高可达 1.5 GHz 的 micro-LED。使其工作在 1.3 GHz 下实现正交频分复用(OFDM)1 m、5.27 Gb/s 的数据传输[62]。

复旦大学的 Yuan 等制作了势垒厚度分别为 5，10 和 13 nm 的 InGaN micro-LED，以研究不同势垒厚度在 QCSE 效应上的区别，以及其对器件调制带宽和发光性能的影响。结果表明，较薄的势垒厚度有利于降低 QCSE、提高调制带宽，但会导致外量子效率的减小。除了跟上述其他团队类似的关于势垒厚度与带宽的关系，他们还进行了速率测试，其结果表明，更厚势垒的器件即使调制带宽更低，但是由于效率较高，光功率更高，可实现更高数据速率[63]。



(a) (b)

图 8 有源区厚度优化测试结果。(a) 厚度 1 nm 量子阱和 3 nm 势垒的高角度环形暗场扫描透射电子显微镜(HAADF-STEM)横截面图像；(b) S1 和 S2 器件在电流密度 2.5 kA/cm^2 下的归一化功率响应[61]

台湾大学的 Lan 等比较了单个 QW 和 3 个 QW 有源区的器件的频率响应，单 QW 器件的－3 dB 调制带宽和数据速率分别是 3 个 QW 器件的 1.6 倍和 2 倍。当器件处于微尺度时，调制带宽不受 RC 的限制，而受复合寿命的限制。单 QW 器件具有更高的局部载流子密度，因此复合速率更高、载流子寿命更短[64]。

在半极性器件中，新墨西哥大学的 Okur 等比较了不同量子阱厚度对内量子效率和载流子寿命的影响，量子效率随量子阱厚度的减小而减小，不同厚度辐射寿命相近，但非辐射寿命随势垒厚度减小而减小[65]。Monavarian 等比较了相同有源区体积情况下，单量子阱和多量子阱器件带宽和效率的区别，结果表明多量子阱器件带宽更高，单量子阱器件的 IQE 更高。他们估算了载流子复合和逃逸的时间，发现在低电流密度下，多量子阱结构具有更快的 SRH 复合、辐射复合；在高电流密度下，多量子阱结构的强库伦增强捕获过程大大减小了微分载流子寿命；而俄歇复合在高电流密度下对调制速度并不起主导作用[66]。在有源区靠近 n 侧的多量子阱势垒中引入 n 掺杂，台湾中央大学的 Shi 等获得了 330 MHz 带宽的绿光光源[67]。

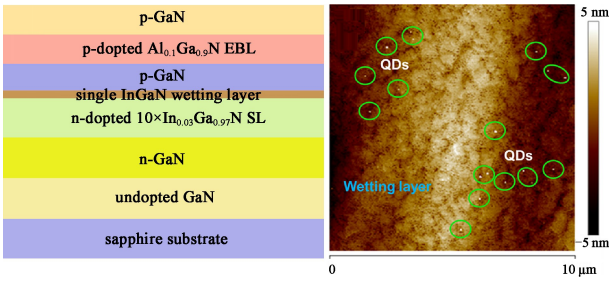
以上结果表明，有源区层数、厚度的减小增大了调制带宽，但不可避免地会引起效率偏低、光功率偏

低的问题。光源高速性能同时包括调制带宽和光功率，层数的改变对调制带宽和光功率的影响程度不同，实际应用场景中决定数据速率时两者所占权重也不同，后续研究中需要兼顾两者，进一步协调改善性能。

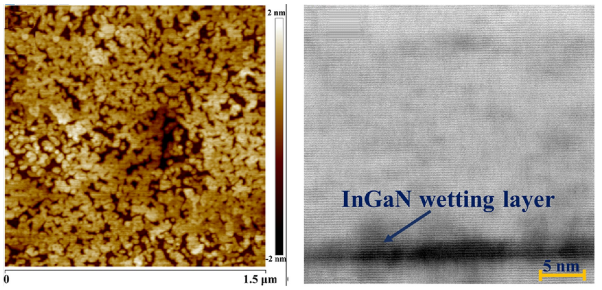
1.3.2　低维结构有源区

量子阱有源区由于有较大应力存在，应力产生的压电极化增强了 QCSE 效应，导致电子空穴波函数进一步分离，复合概率降低，载流子寿命增加，限制了调制带宽。而量子点结构，在形成的过程中，充分释放了下层应力，点状区域晶体质量好[68-69]，在很大程度上消除了 QCSE 效应对载流子复合的影响[70-73]。不同于量子阱的一维限制，三维限制的量子点具有很强的载流子限制效应，同时由于量子点有源区的 In 团簇效应，载流子在有源区的分布并不均匀，In 组分高的量子点内部分布有更多的载流子，让有效载流子复合区体积大大缩小，具有很高的局部载流子浓度。以上这些因素进一步增加了载流子的复合概率，具有更快的载流子复合速率[74]，进一步提升了调制带宽。并且，量子点有源区由于载流子复合有效区域局限在点状结构内，远离侧壁，减小了由于刻蚀损伤引起的非辐射复合的影响。因此，量子点有源区是高速 LED 有源区结构的理想选择之一。

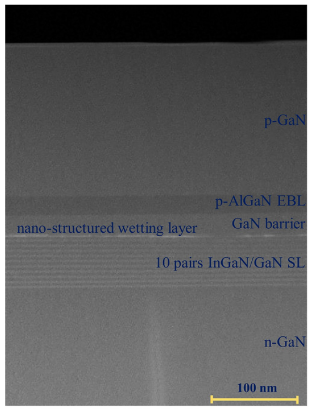
清华大学 Wang 等利用生长中断法在蓝宝石衬底上生长了浸润层发光的类量子点 InGaN 纳米结构，并制作了直径分别为 50 和 75 μm 的蓝光 micro-LED，如图 9(a)，(e)。浸润层是形成 QD 之前的下层应力释放层，表面具有三维沟壑状微纳结构，如图 9(b)，(c)，(d)所示，这些结构中几乎不存在应变，具有较高局部载流子密度，因此具有极短的载流子寿命。TRPL 测试表明载流子寿命为 1.4 ns，其中 50 μm 器件可以在 2.55 kA/cm^2 电流密度下实现 1.6 GHz带宽[75]，75 μm器件可以在 528.5 A/cm^2 电流密度下实现 1.3 GHz 带宽[76]。但由于前者的光功率较弱，仅采用后者进行了可见光通信的实验研究。实现了空间距离 3 m、非归零开关键控(NRZ-OOK)数据速率 2 Gb/s 和正交相移键控-正交频分复用(QPSK-OFDM)数据速率 4 Gb/s 的可见光通信系统[76]；实现了 1 m 自由空间加 2 m 水下距离的非归零开关键控(NRZ-OOK)2 Gb/s 数据速率[77]。他们也利用交替通断源的外延方法，在 c 面蓝宝石上生长了无浸润层 VW 模式[78]的 InGaN 量子点，制作的直径为 50 μm 的绿光芯片，在 509 A/cm^2 的注入电流密度下实现了 1.3 GHz 的调制带宽[79]。



(a)　结构示意图　　(b)　10 μm×10 μm AFM 图



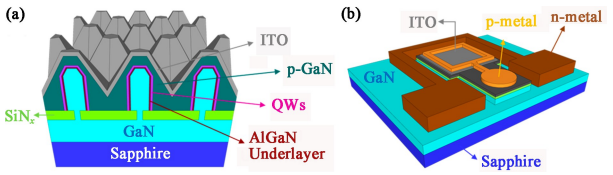
(c)　1.5 μm×1.5 μm AFM 图　(d)　高角度环形暗场扫描电子显微镜图



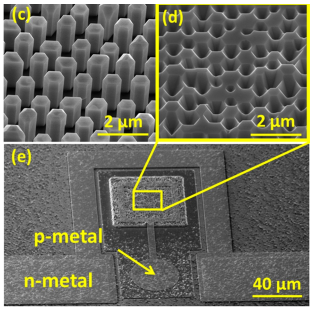
(e)　放大亮场(BF)STEM 图[76]

图 9　蓝光 micro-LED 结构及浸润层相关测试结果

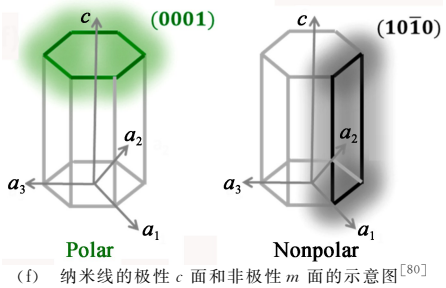
利用其他一些低维结构也可以实现应力释放和更高的电流密度，从而减小载流子复合寿命，增大器件的调制带宽。新墨西哥大学的 Nami 等制作了核壳纳米线结构的 micro-LED(图 10)用于显示和可见光通信[80]，纳米线 micro-LED 避免了平面结构小型化过程中尺寸效应对器件性能的影响，他们用小信号等效电路进行分析，确认 RC 寄生延迟对调制速度的影响可以忽略不计，注入电流密度为 1 kA/cm^2 时的调制带宽约为 1.2 GHz。



(a),(b) 基于 GaN/InGaN 核壳纳米线的 micro-LED 器件结构示意图



(c) 有源区生长;(d) p-GaN 生长;(e) 器件制作后的 GaN 纳米线的扫描电子显微镜图像



(f) 纳米线的极性 c 面和非极性 m 面的示意图[80]

图 10 核壳结构的 micro-LED 器件结构及相关测试结果

1.4 micro-LED 阵列

上文中提到,缩小芯片尺寸可以提高调制带宽,但尺寸缩小不可避免地会造成光功率降低。光通信中光源光功率的重要程度不亚于调制带宽。通信系统中重点关注的两点性能分别是数据传输速率和通信距离,而数据速率由调制带宽和信噪比共同决定。根据香农-哈特利定理[81-82],信道最大传输速率 $D=B\log_2(1+S/N)$,其中 B 是信道带宽,S 是带宽内接收信号的平均功率,N 是假定为白高斯噪声的平均功率。光功率决定了通信链路的传输距离,不足够大的光功率会导致接收端信噪比 S/N 低、信号失真,进而增大误码率、降低通信速率[83]。Tsonev 等制作的 450 nm 蓝光直径为 50 μm 的 micro-LED 的调制带宽只有 60 MHz,但是数据速率超过了 3 Gb/s,这归因于较大的光功率(4.5 mW)和短空间传输距离(5 cm)下多阶调制方式[84]。高速 micro-LED 在一定直流偏置下工作,电压小信号对发光进行调制,而由于量子效率下降(图 1),光功率随电压的变化并不总是线性的,小信号只能工作在线性区间,超出线性区会导致信号失真、接收端对信号误判、误码率升高。因此,micro-LED 阵列成了兼顾高调制带宽和高光功率输出以实现高数据率的必经之路。

根据实际应用需求的不同,阵列主要分为两类,一是阵列内所有像素联动的单信道阵列,二是阵列内每个像素独立调制的单独寻址多信道阵列。其中,提升光功率的主要是单信道阵列。单信道阵列根据像素间连接方式的不同,又分为串联阵列和并联阵列。而多信道阵列,即使每个像素调制带宽有限,多个像素协同工作,预计仍可获得较大的数据速率。

表 1 将近年来文献报道的一些串联、并联 micro-LED 阵列的通信性能进行了总结。由于大多数报道中单独寻址阵列的高速性能测试是针对阵列中的单颗像素,在表 2 中,本文将近年来文献报道的一些单颗 micro-LED 和单独寻址 micro-LED 阵列的高速性能进行了总结。

表 1 文献报道的串联、并联 micro-LED 阵列通信性能

晶面	时间	波长/nm	芯片尺寸/μm	阵列规模	带宽/MHz	功率/mW	通信距离/m	调制方式	数据率/(Gb/s)	参考文献
c 面	2019	450	40	串联 3×3	285@3.2 kA/cm^2	18.0@3.2 kA/cm^2	0.3	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.95@1 592.4 A/cm^2	[85]
c 面	2019	450	40	串联 3×3	285@3.2 kA/cm^2	18.0@3.2 kA/cm^2	0.3	4 脉冲幅度调制(4-PAM)	2.37@1 592.4 A/cm^2	[85]
c 面	2019	450	40	串联 3×3	285@3.2 kA/cm^2	18.0@3.2 kA/cm^2	0.3	正交频分复用(OFDM)	4.81@1 074.8 A/cm^2	[85]
c 面	2020	430～440	14	并联 2×5	616@12.98 kA/cm^2	6.47@12.98 kA/cm^2	1(POF)	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1@100 mA	[86]
c 面	2020	450	20	串联 3×3	980@11.15 kA/cm^2	10@11.15 kA/cm^2	5	正交频分复用(OFDM)	10.11@8.12 kA/cm^2	[83]
c 面	2020	450	20	串联 3×3	980@11.15 kA/cm^2	10@11.15 kA/cm^2	20	16 正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	1.61@8.12 kA/cm^2	[83]
c 面	2020	450	60	串联 3×2	338.5@30 mA	15@>50 mA	1.5	正交频分复用(OFDM)	4.92@30 mA	[87]
c 面	2020	450	80	串联 3×2	263@50 mA	21@>50 mA	3	正交频分复用(OFDM)	3.22@30 mA	[87]
c 面	2020	450	80	串联 3×2	263@50 mA	21@>50 mA	4.5	正交频分复用(OFDM)	3.4@30 mA	[87]
c 面	2020	N/A	30	串联 6×6	401@60 mA	356.7@60 mA	N/A	非归零开关键控(NRZ-OOK)	0.8@60 mA	[88]
(20$\bar{2}$1)面	2021	550	50	并联 2×3	1 102@100 mA	2.2@120 mA	0.25	正交幅度调制-正交频分复用(QAM-OFDM)	4.343@100 mA	[89]
(20$\bar{2}$1)面	2021	537	50	并联 2×2(TO 封装)	800@23 mA	0.3@1 kA/cm^2	0.5	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.5@23 mA	[90]
(20$\bar{2}$1)面	2021	537	50	并联 2×2(TO 封装)	800@23 mA	0.3@1 kA/cm^2	0.5	比特加载-离散多音频(BL-DMT)	5.02@23 mA	[90]

表 2　文献报道的单颗 micro-LED 和单独寻址 micro-LED 阵列通信性能

晶面	时间	波长/nm	芯片尺寸/μm	阵列规模	带宽/MHz	功率/mW	通信距离/m	调制方式	数据率/(Gb/s)	参考文献
c 面	2008	510	76	单颗	330@2.2 kA/cm^2	264 μW(POF 耦合)	无	无	无	[67]
c 面	2010	450	72	单独寻址 16×16	245@20 mA	1	BtB	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1@40 mA(单颗)	[32]
c 面	2012	450	44	单独寻址 8×8	435	N/A	BtB	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1(单颗)	[19,33]
c 面	2012	520	34	单独寻址 8×8	415	N/A	BtB	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.1(单颗)	[33]
c 面	2012	450	24	单独寻址 8×8(与 CMOS 集成)	185@8.8 V	N/A	BtB	CMOS 控制的非归零开关键控(NRZ-OOK)	0.512@7.5 V(单颗)	[19]
c 面	2012	500	75	单颗	210@40 mA	N/A	50(光纤)	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.07@40 mA	[58]
c 面	2012	500	50	单颗	400@40 mA	N/A	无	无	无	[58]
c 面	2013	450	99	单独寻址 16×16(与 CMOS 集成)	150@6.5 V	N/A	BtB	非归零开关键控(NRZ-OOK)	0.375@6.5 V/像素,四像素一起工作 1.5	[91]
c 面	2014	450	50	单颗	60@40 mA	4.5	0.05	正交幅度调制(QAM)-正交频分复用(OFDM)	3@40 mA	[84]
c 面	2014	500	75	单颗	463@50 mA	1.6@50 mA	无	无	无	[39]
c 面	2014	470	45	单独寻址 10×10	270@110 mA	N/A	N/A	非归零开关键控(NRZ-OOK)	0.4@80 mA(单颗)	[42]
c 面	2016	450	24	单独寻址环形 15 像素	833@16 kA/cm^2	2.7@19.5 kA/cm^2	0.5	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.7(单颗)	[35]
c 面	2016	450	24	单独寻址环形 15 像素	833@16 kA/cm^2	2.7@19.5 kA/cm^2	0.75	脉冲幅度调制(PAM)	3.5@5 V(单颗)	[35]
c 面	2016	450	24	单独寻址环形 15 像素	833@16 kA/cm^2	2.7@19.5 kA/cm^2	0.75	直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)	5@5 V(单颗)	[35]
c 面	2016	480	50	单颗	1 000@90 mA	1.7	无	无	无	[59]
c 面	2017	450	24	单独寻址 6×6(与 CMOS 集成)	440@17.7 kA/cm^2	2.0@17.7 kA/cm^2	0.5	非归零开关键控(NRZ-OOK)	0.3@9 V/像素,四像素一起工作 0.18	[36]
c 面	2017	440	80	单独寻址	160@61 mA	~1.1	水下 0.6	开关键控(OOK)	0.8@88 mA(单颗)	[37]
c 面	2017	440	80	单独寻址	160@61 mA	~1.1	水下 5.4	开关键控(OOK)	0.2@88 mA(单颗)	[37]
c 面	2017	445	40	单独寻址	230@35 mA	0.8@35 mA	3	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.3@35 mA(单颗)	[38]
c 面	2017	445	40	单独寻址	230@35 mA	0.8@35 mA	10	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1@35 mA(单颗)	[38]
c 面	2017	445	40	单独寻址	230@35 mA	0.8@35 mA	16	非归零开关键控(NRZ-OOK)	0.87@35 mA(单颗)	[38]
c 面	2017	青色	47	单颗	960@90 mA	N/A	无	无	无	[60]
c 面	2017	480	75	单颗	700@100 mA	N/A	无	无	无	[60]
c 面	2017	480	75	单颗	470@80 mA(TO 封装后)	0.7	1(POF)	非归零开关键控(NRZ-OOK)	5.5@80 mA	[60]
c 面	2017	480	75	单颗	470@80 mA(TO 封装后)	0.7	50(POF)	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.3@80 mA	[60]
c 面	2017	480	75	单颗	470@80 mA(TO 封装后)	0.7	1(POF)	4 脉冲幅度调制(4-PAM)	5.8@80 mA	[60]
c 面	2017	480	75	单颗	470@80 mA(TO 封装后)	0.7	50(POF)	4 脉冲幅度调制(4-PAM)	1.3@80 mA	[60]
c 面	2017	448	30	单独寻址	161@100 mA	5.6@100 mA	无	无	无	[27]
c 面	2018	520	75	单颗	340@1.132 kA/cm^2	3.44@20 mA	BtB(光纤)	正交幅度调制(QAM)-正交频分复用(OFDM)	2.16@679 A/cm^2	[40]
c 面	2018	440	300	单颗	536@2.5 kA/cm^2	N/A	无	无	无	[61]

（续表 2） 文献报道的单颗 micro-LED 和单独寻址 micro-LED 阵列通信性能

c 面	2019	白光（蓝光 micro-LED＋CdSe/ZnS 量子点）	30	单颗	白光 637.6@20 kA/cm^2	7.2@15 kA/cm^2	N/A	非归零开关键控（NRZ-OOK）	白光 0.675@10 kA/cm^2	[41]
c 面	2019	蓝绿色	20	各一颗	蓝 134，绿 144	蓝 1.04@138 A/cm^2，绿 0.34@2.8 kA/cm^2	0.3	正交幅度调制（QAM）－直流偏置光正交频分复用（DCO-OFDM）＋双波长多路复用调制（WDM）	1.79@蓝 138 A/cm^2，绿 2.8 kA/cm^2	[92]
c 面	2019	蓝紫色	20	各一颗	蓝 134，紫 427	蓝 1.04@138 A/cm^2，紫 0.85@2.8 kA/cm^2	0.3	正交幅度调制（QAM）－直流偏置光正交频分复用（DCO-OFDM）＋双波长多路复用调制（WDM）	3.35@蓝 138 A/cm^2，紫 2.8 kA/cm^2	[92]
c 面	2020	463	75	单颗	1 030@582.54 A/cm^2	0.9	自由空间 1＋水下 2	非归零开关键控（NRZ-OOK）	2@582.54 A/cm^2	[77]
c 面	2021	蓝色	50	单颗	1 600@2.55 kA/cm^2	0.68@1 kA/cm^2	无	无	无	[75]
c 面	2021	480	75	单颗	1 300@528.5 A/cm^2	1.12	3	非归零开关键控（NRZ-OOK）	2@409.93 A/cm^2、528.54 A/cm^2	[76]
c 面	2021	480	75	单颗	1 300@528.5 A/cm^2	1.12	3	正交相移键控-正交频分复用（QPSK-OFDM）	4@178.82 A/cm^2	[76]
c 面	2021	512	50	单颗	1 300@509 A/cm^2	N/A	无	无	无	[79]
c 面	2021	420	10	单独寻址 16×16	～3 700@～10 kA/cm^2	N/A	N/A	非归零开关键控（NRZ-OOK）	10@3 V	[93]
c 面	2022	475	60	单颗	1 530@5 996 A/cm^2	1.5	1	正交频分复用（OFDM）	5.27@4 938 A/cm^2	[62]
$(11\bar{2}2)$面	2016	450	50	单颗	1 030@204 A/cm^2	0.81@1 020 A/cm^2	BtB	非归零开关键控（NRZ-OOK）	2.4@510 A/cm^2	[52-54]
m 面	2018	454	80	单颗	1 500@1 kA/cm^2	1.2@1 kA/cm^2	无	无	无	[50]
$(11\bar{2}2)$面	2018	449	30	单颗	800@385 A/cm^2	N/A	无	无	无	[17]
$(11\bar{2}2)$面	2018	449	50	单颗	668@319 A/cm^2	N/A	BtB	非归零开关键控（NRZ-OOK）	1.5@319 A/cm^2	[17]
$(11\bar{2}2)$面	2018	449	50	单颗	668@319 A/cm^2	N/A	BtB	正交频分复用（OFDM）	1.8@319 A/cm^2	[17]
c 面和 m 面侧壁	2019	蓝色	60	单颗	1 200@1 kA/cm^2	N/A	无	无	无	[80]
$(20\bar{2}1)$面	2020	540	50	单颗	756@2.0 kA/cm^2	N/A	BtB（POF）	非归零开关键控（NRZ-OOK）	1.5@2.0 kA/cm^2	[51]
$(20\bar{2}1)$面	2020	445＋565	20	单颗	660@2 kA/cm^2	N/A	无	无	无	[56]

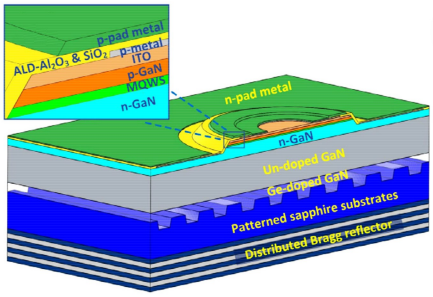
1.4.1 micro-LED 并联阵列

并联阵列相比于同等有效面积的传统大像素具有更均匀的电流分布，缓解了电流拥挤效应，同时也具有更好的散热性能和更高的光提取效率，但并联结构相对于单个像素会带来更大的电容，在阵列内单像素尺寸较大或阵列规模较大时，在 RC 时间常数上会有恶化。中科院半导体所 Zhu 等制作了散热良好的倒装并联 micro-LED 阵列，增大了器件的电流密度耐受能力，调制带宽和光功率都比相同有效面积的单台面 LED 提高了 2 倍，但像素数量多的阵列只实现了数十 MHz 的调制带宽，远低于单像素 227 MHz 的调制带宽，注意到阵列中单颗像素直径为 90 μm，较大的单像素尺寸组成的并联阵列易受到 RC 调制带宽的限制[20]。

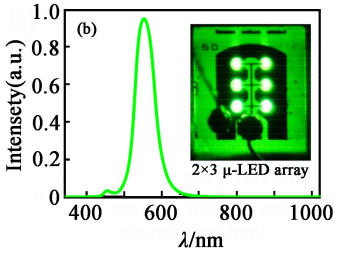
台湾大学的 Lan 等制作了不同像素数量的并联阵列，单颗像素直径为 14 μm，最大注入电流密度

为 12.98 kA/cm^2，其中 2×5 的阵列在保持单颗 615 MHz 高调制带宽的同时，光功率增加 10 倍，为 6.47 mW，非归零开关键控（NRZ-OOK）数据传输速率达到 1 Gb/s。可见如此小尺寸的像素组成 10 像素并联阵列，具有更好的热性能。同样是因为阵列内像素尺寸很小，由并联结构引入的电容增大不会限制整体器件的调制带宽[86]。

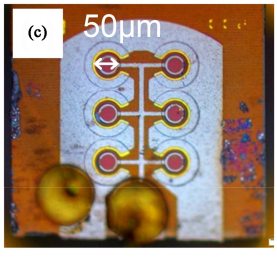
不同于以上 c 面蓝宝石衬底上生长制作的并联阵列，台湾交通大学的 Chang 等制作了（20$\bar{2}$1）半极性 550 nm 绿光 micro-LED 2×3 并联阵列（图 11），单个像素直径为 50 μm，在较低的电流密度下达到较高的调制带宽。调制带宽在 100 mA 的注入电流下达 1.102 GHz，经过 0.25 m 空间传输，误码率为 2.474×10^{-3} 的情况下正交幅度调制-正交频分复用（QAM-OFDM）数据速率达到 4.343 Gb/s[89]。他们将 2×2 的阵列进行 TO 封装，实现了非归零开关键控（NRZ-OOK）1.5 Gb/s 和比特加载-离散多音频（BL-DMT）5.02 Gb/s 的数据速率[90]。



（a）　结构示意图



（b）　光谱

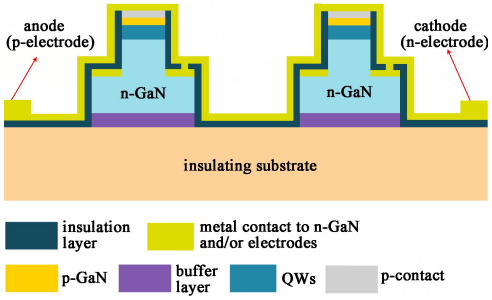


（c）　2×3 并联阵列照片[89]

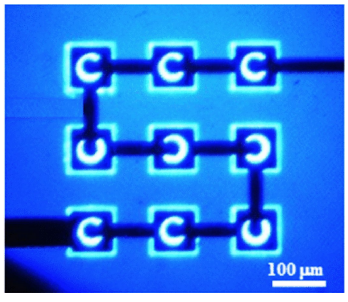
图 11　（20$\bar{2}$1）半极性 550 nm 绿光 micro-LED 2×3 并联阵列

1.4.2　micro-LED 串联阵列

串联阵列的形成需要像素间实现电隔离，通常采用深刻蚀，将像素间 n-GaN 完全去除的方式。这样使整体器件电容减小，更有利于高速调制。在不牺牲调制带宽的情况下大大增加光功率，有利于在同样的调制带宽下获得更高的数据速率。通常串联阵列具有更高的工作电压，但对驱动电流的要求较低。Dawson 等在 2019 年报道了 3×3 串联偏置下高速工作的直径为 40 μm、间距为 160 μm、峰值波长为 450 nm 的 micro-LED 阵列（如图 12），在注入电流密度为 3.2 kA/cm^2 时实现了光功率 18.0 mW 和－3 dB 调制带宽 285 MHz。分别采用非归零开关键控（NRZ-OOK）、4 脉冲幅度调制（4-PAM）和正交频分复用（OFDM）调制格式，自由空间无差错数据传输速率分别为 1.95，2.37 和 4.81 Gb/s[85]。2020 年，他们通过改变元件直径到 20 μm 和中心到中心的间距到 80 μm，以提高光收集效率，实现了像素直径为 20 μm 的 3×3 串联阵列，在 11.15 kA/cm^2 注入电流密度时，光功率超过 10 mW，－3 dB 调制带宽达到 980 MHz，正交频分复用（OFDM）调制。在前向纠错误码率为 3.8×10^{-3} 时实现了 5 m 自由空间距离 10.11 Gb/s 和 20 m 距离 1.61 Gb/s 的空间数据传输速率[83]，而水下 1.5，3 和 4.5 m 距离则分别实现正交频分复用（OFDM）4.92，3.22 和 3.4 Gb/s 的无线数据传输速率[87]。



（a）　串联结构示意图



（b）　直流工作时串联阵列的光学图像[85]

图 12　3×3 串联偏置下高速工作 micro-LED 阵列

华南师范大学的 Huang 等制作了像素直径分别为 60，80，100 和 120 μm，像素排布分别为 1×1，2×2，3×3 和 4×4 的 16 种串联阵列，采用铜衬底散热，探究扩散电容、注入电流密度与－3 dB 调制带宽之间的关系。结果表明，串联数量越多，扩散电容越小，调制带宽线性增大，阵列整体调制带宽大于单个像素的带宽。尺寸越小的器件扩散电容越小，

响应频率与扩散电容成负关联的函数关系[94]。后续他们进一步扩大阵列规模到 6×6，缩减单像素直径至 30 μm，保持注入电流不变。随阵列规模扩大，器件电容逐渐降低、电阻逐渐增加、调制带宽保持增加的趋势，在 60 mA 注入电流下实现了 401 MHz 的调制带宽和 356.7 mW 的光功率[88]。当器件规模扩大到 5×5 和 6×6 时，由于电阻过大，调制带宽的增加已不显著，这证明通过增加串联像素个数来提高调制带宽是有阈值的。同时，应当注意的是，6×6 的串联阵列在 60 mA 电流注入时，电压已高达 114 V。

华南理工大学 Huang 等制作了 4/10 个蓝色 micro-LED 串联或并联阵列的芯片，从照明和通信两个角度出发，研究了不同阵列的电、光、通信特性。结果表明，随着像素数量的增加，由于相邻像素的光吸收和热效应，单个像素的光功率和外量子效率降低，但在相同电流密度下，串联芯片的性能优于并联芯片。在通信性能方面，并联阵列相比于单个像素的电容更大，从而降低调制带宽，同时，像素间存在信号不同步的现象，导致误码率升高，最终影响数据速率。串联阵列具有更小的电容，并且随着像素数量的增加，同电流密度下调制带宽也增大，误码率降低，数据速率增大[95]。

1.4.3 micro-LED 单独寻址阵列

单独寻址的多信道阵列，每个像素独立调制，阵列内像素协同工作，利用类似于移动通信网络中的 MIMO 技术，提升通信数据容量，实现高速并行数据通信。这样的阵列通常以低密度形式排列，并与多芯光纤或成像光纤对齐，每个像素的信号通过同一根光纤收集、传输，在接收端，信号分解，接收阵列中的接收器识别特定像素的信号，实现多路复用的解调。

2010 年 Dawson 等制作的 16×16 像素阵列，实现了非归零开关键控(NRZ-OOK)1 Gb/s 的数据传输速率，接收光功率为 1 mW[32]。2012 年他们将峰值波长为 450 nm 的 8×8 的 micro-LED 阵列与 CMOS 驱动器集成，实现了 185 MHz 的光调制带宽和非归零开关键控(NRZ-OOK)512 Mbit/s 的无差错数据传输[19,33-34]。2013 年进一步并行使用多个 CMOS，每个 CMOS 独立调制一个像素，使用非归零开关键控(NRZ-OOK)调制方案同时调制四个像素，每个像素比特率为 375 Mb/s，阵列实现了自由空间 1.5 Gb/s 无差错的总数据传输速率[91]。2016 年他们报道的如图 13 所示的圆盘型阵列，在自由空间中分别使用非归零开关键控(NRZ-OOK)、脉冲幅度调制(PAM)和直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)实现了 1.7，3.4 和 5 Gb/s 的传输速率[35]。2017 年他们将共阳极、n 电极单独寻址的 micro-LED 阵列与 NMOS 集成，利用 NMOS 比 PMOS 更快的载流子迁移速率，实现非归零开关键控(NRZ-OOK)数百 Mb/s 的速度传输数据[36]。同年，他们进行了 MIMO 的系统测试(图 14 所示)，制作了像素直径为 39 μm 的 6×6 可单独寻址阵列，其中像素间距为 69 μm 的 2×2 阵列为一簇，一种 9 个这样的簇构成 9 个信道，以 750 μm 的间隔 3×3 方形排列，1 m距离实现了大于 1 Gb/s的数据速率，

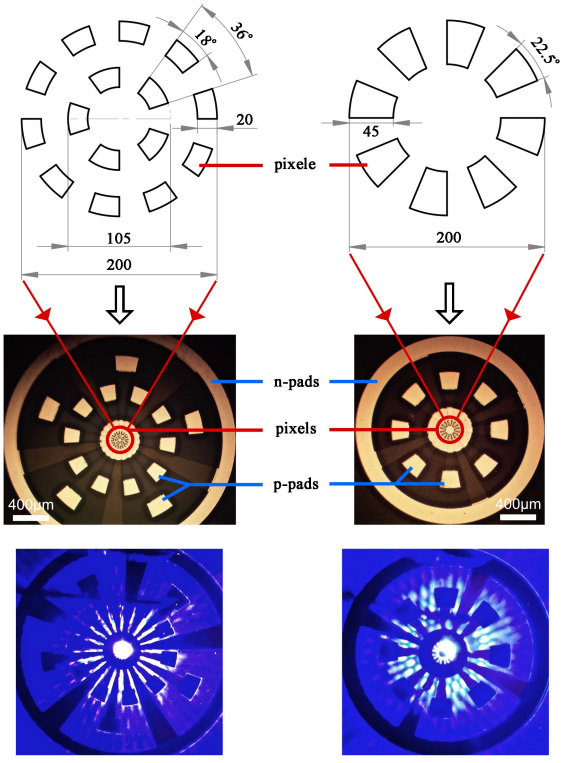
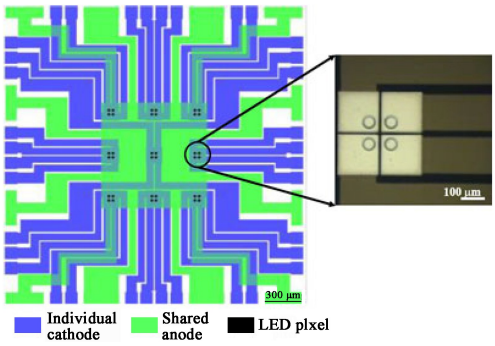
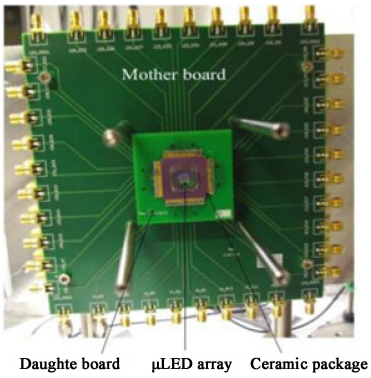


图 13 两种圆盘型单独寻址阵列[35]



(a) 单独寻址的 micro-LED 阵列示意图，其中包括 2×2 簇



(b) 用于 MIMO 测试的带有子板和主板的 micro-LED 阵列[96]

图 14 micro-LED 阵列和 MIMO 集成系统

0.5 m 的链路距离更是实现了 7.48 Gb/s 的数据速率[96]。为了与驱动控制器实现更好的集成，他们将生长在硅(111)取向衬底上，单像素为 100 μm×100 μm 的 450 nm 蓝色 8×8 micro-LED 阵列转印到了 CMOS 上，转印过程没有用到粘附层，且在约 100 ℃相对低温下进行[97]。

美国的 AvicenaTech 公司报道了峰值波长为 430 nm、像素直径为 2 μm 的 micro-LED，构成 10×10 并联阵列，在 10 μA/像素的电流注入下，整体达到 1.25 Gb/s 的数据速率。8 像素组成单独寻址阵列，单像素速率为 1.25 Gb/s，阵列总速度 10 Gb/s[98]。后续他们制作了峰值波长为 420 nm，像素直径为 10 μm 的 16×16 micro-LED 单独寻址阵列，每像素在 3 V 偏置电压和 0.8 V 调制电压下工作，数据速率为 10 Gb/s，使用包含 5 000 个直径为 4 μm、芯直径为 0.5 mm 的成像光纤传输该阵列(只传输约 230 个像素)超过 1 m 距离，预计可实现总速率大于 2 Tb/s[93]。他们最新报道了像素直径为 4 μm 的 micro-LED 组成的 16×16 和 8 像素单独寻址阵列，通过直径为 1 mm 的 7 500 芯塑料成像光纤耦合传输，预计可实现高密度(2 Tb/mm^2)低比特能量(<2 pJ/bit)数据传输[99]。他们报道的结果均采用非归零开关键控(NRZ-OOK)调制方式。

单独寻址阵列中由于各个像素相对独立工作，像素间的电、光串扰会对整体系统性能产生负面影响[91]。通过测量特定位点像素开关前后的光功率，对像素间串扰进行了量化分析，探究了串扰可忽略的像素间距。利用集成的微透镜对光束轮廓进行整形可以减轻像素间光串扰的影响。电串扰被认为是主要由 CMOS 驱动电路引起的。

1.4.4 其他 micro-LED 阵列

利用多色 micro-LED 阵列可以实现波分复用的通信方案。

2012 年德国的 Christoph 等采用 RGB-LED，应用基于离散多音(DMT)的正交幅度调制(QAM)将每种颜色对应到单独的通道，白光照明的同时实现 806 Mb/s 的通信速率[100]。

Carreira 等通过转印将蓝色 micro-LED (1.04 mW，134 MHz)与绿色(0.34 mW，144 MHz)、紫色(0.85 mW，427 MHz) micro-LED 基板集成，制备了蓝绿色和蓝紫色的双色 micro-LED 阵列(图 15)。通过双波长多路复用调制，两种双色器件分别达到了 1.79 和 3.35 Gb/s 的无差错数据速率[92]。

Dawson 等通过转印将 micro-LED 阵列与单光子雪崩二极管(SPAD)直接集成在 CMOS 上，单芯片实现信息收发功能[101]，可用于小型卫星之间的高灵敏通信[102-103]。复旦大学的 Lin 等基于绿光 micro-LED 阵列实现了水下双工光无线通信，光源在 3 kA/cm^2 注入电流密度下水下 2.3 m 距离的调制带宽为 251.3 MHz，采用非归零开关键控(NRZ-OOK)调制，3.3×10^{-3} 误码率下的数据速率为 660 Mb/s，系统中 micro-LED 探测器在 0 和−5 V 下分别可以实现 11.27 和 13.98 MHz 的调制带宽，最大数据速率为 52.5 和 60 Mb/s[104]。Zhou 等研究了自由空间下绿光双工 20 μm 方形 micro-LED，作为发射机，其最大调制带宽为 518 MHz，最大数据传输速率为 1.16 Gb/s；作为接收机，调制带宽为 12 MHz，数据速率为 60 Mb/s[105]。

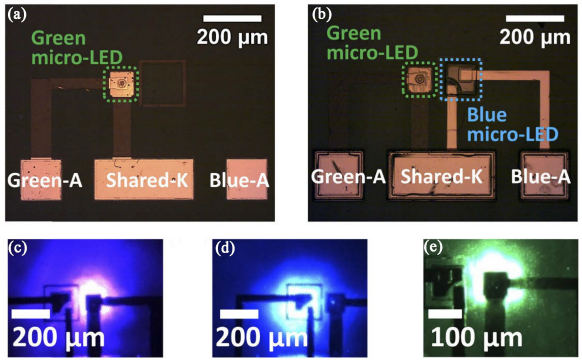


图 15 蓝绿 micro-LED 阵列。(a)转印前和(b)转印后的光学平面图。A 和 K 分别是阳极和公共阴极触头焊盘；以不同电流密度分别驱动(c)紫色、(d)蓝色和(e)绿色 micro-LED 的平视光学显微照片[92]

对 micro-LED 阵列进行柔性集成可以扩展可见光通信光源的应用场景，复旦大学的 Tian 等将

LED外延层通过金属键合和激光剥离技术从外延蓝宝石衬底转移到柔性AuSn衬底，实现了约40 MHz的调制带宽和120 Mb/s的数据传输速度[106]。

利用micro-LED显示阵列实现通信的有多阶灰度[107]、多阶光强[108-109]等可见光通信发射方案。

1.5 高速性能优化

1.5.1 散热

高速光源通常在大注入电流下工作，而电光转换效率有固有的限制，并且大注入电流下转换效率通常偏低[29-30]，大部分电能转换成热量，高温又会使辐射效率进一步下降，并且可能造成器件永久性损伤，器件老化效应严重。因此散热对于通信光源十分关键。

华南理工的Huang等从电流扩散层的角度，研究更适合高速工作的micro-LED的电流扩散材料。在照明应用中广泛采用的氧化铟锡(ITO)电流扩散层使得器件具有更高的光输出功率和外量子效率，但Ni/Au电流扩散层产生的热量更少，同时有利于器件内部的热量更快消散，避免器件温度过高，在维持器件在高注入电流下稳定工作至关重要，因此Ni/Au电流扩散层更适用于高带宽通信系统[110]。同时，他们也研究了工作电流密度与器件老化的关系，他们的研究表明，在饱和电流密度下工作，器件的直流特性，如光功率，易永久性退化，但调制带宽不受影响。因此他们建议高速micro-LED器件工作在饱和电流密度以下，以获得较高的电光转换效率和足够长的器件寿命[111]。

1.5.2 调制

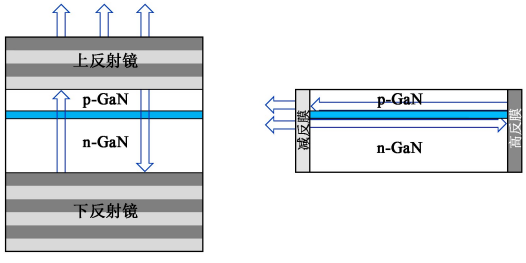
Sheffield大学的Cai等使用微孔模板选择性外延生长，避免了micro-LED制作过程中侧壁损伤造成的漏电流和非辐射复合增强问题，实现了更高的器件质量，同时，为解决正向偏置下小信号调制过于灵敏的问题，他们将micro-LED与HEMT集成，通过控制栅极电压进行小信号调制，提升调制的稳定性，像素直径为20 μm、峰值波长为480 nm的micro-LED在13.3 kA/cm^{2}的注入电流密度下实现1.2 GHz的调制带宽[112]。

复旦大学的Tian等研究了大信号调制特性，他们的实验表明大信号调制会导致信号上升下降时间增加，从而导致调制带宽降低，其中主要的物理过程是载流子复合和大电压工作时载流子扫出效应。在高速通信时，通信速率和误码率对调制深度不敏感[113]。

InGaN基micro-LED用作蓝绿光通信光源已经取得了巨大的进展。从已有的报道来看，优化外延结构或减弱极化效应的单颗芯片能实现最大的调制带宽，但由于其光功率较低，几乎无法实际用于数据通信。采用阵列布置的芯片可实现较大的光功率，实现信噪比高、通信距离远的数据传输，但阵列整体调制带宽相对受限。预计通过进一步优化外延结构和阵列芯片布置，实现兼顾高带宽和高功率的高速蓝绿光光速光源，将进一步提升数据传输速率。

2 腔增强光源

对LED调制带宽的进一步提升要求加快有源区中的辐射复合。自发辐射的概率与光子态密度成正比，构成光学谐振腔(图16)，利用Purcell光腔效应[114]可以加快辐射复合速率。



(a) 面发射 (b) 边发射

图16 对LED构建光学谐振腔的面发射和边发射结构

自发辐射因子β取决于腔的Purcell因子F_p[115-116]：

$$\beta=\frac{F_p}{1+F_p}$$
$$F_p \propto \frac{1}{[\ln(R_1R_2)^{1/2}+L_c\alpha_i]} \tag{2}$$

式中，R代表反射镜的反射率，L_c代表腔长，α_i代表腔内吸收系数。从上式中可以看出，通过增加反射镜的反射率，减小腔长，可以增大F_p，进而增大自发辐射因子。

腔模式与有源区的耦合关系也决定了辐射复合腔增强效应的强弱，由光限制因子Γ表示。$\Gamma=\frac{L_c\int_{d_{AL}}|E(z)|^2dz}{d_{AL}\int_{L_c}|E(z)|^2dz}$，$L_c$代表腔长，$d_{AL}$代表有源层厚度。光限制因子越高，辐射复合腔增强概率越大，载流子消耗越快。

腔增强光源从出光方向上可以分为：面发射的

腔增强光源(谐振腔发光二极管 RC-LED、垂直腔面发射激光器 VCSEL)和边发射的腔增强光源(超辐射二极管 SLD、边发射激光器 EEL)；从增强效果上又可以分为两类：放大的自发辐射光源(RC-LED、SLD)和受激辐射光源(VCSEL、EEL)。

腔增强光源用于通信的优点主要有以下几个方面：(1)具有更高的调制带宽。从理论上来说，载流子寿命自发辐射(ns 量级)大于放大的自发辐射大于受激辐射(ps 量级光子寿命限制)，载流子寿命越小，调制带宽越高；(2)利于远距离的数据传输。谐振腔对光出射的方向性有很大改善，相比于作为朗伯光源的 LED，谐振腔的引入使光发散角度大大缩小，能量传输的方向更集中，有利于提高点对点通信中接收机获得的能量比例和 POF 通信中光纤的耦合效率；(3)同时谐振腔增强效应加快载流子消耗，可以实现更大的注入、更高的光功率，进而提高系统信噪比。

谐振腔增强器件中的激光器更是因其窄线宽、高相干性等优势，广泛用于主干通信网络，实现大容量数据传输。但谐振腔的引入，特别是激光器，由于制造成本高昂、使用条件苛刻等因素，使用场景十分有限。

下面将介绍几类典型的腔增强光源。

2.1　面发射腔增强光源：RC-LED 与 VCSEL

在外延层的上下制作分布式布拉格反射器(DBR)可以形成光学谐振腔[117-118]，进而可以实现 RC-LED 或 VCSEL。形成 DBR 的方式有两种，一种是外延不同组分(折射率)半导体材料组成的超晶格，另一种是蒸镀介质材料叠层，常见的如 Ta_2O_5/SiO_2、TiO_2/SiO_2 等。已经成熟应用的 GaAs 基 VCSEL 是通过外延高低折射率 GaAs/AlAs 叠层形成 DBR。但 GaN 体系由于 GaN/AlN 晶格失配程度大、热膨胀系数差异大，叠层生长过程中会形成很多 V 形缺陷[119]，这些缺陷使得反射率降低，反射镜性能大打折扣。因此在 GaN 基光源制作谐振腔的方式通常为两种：n 侧外延 DBR＋p 侧介质 DBR 的混合 DBR 结构[120-126]，以及更常见的 n 侧和 p 侧均为介质 DBR 的全介质 DBR 结构[74,127-148]。

在谐振腔发光二极管 RC-LED 方面，2009 年，台湾中兴大学的 Huang 等制作的波长为 507 nm、通光孔径为 40 μm 的 RCLED，两侧反射镜分别为 TiO_2/SiO_2 和 Ti(3 nm)/Al(300 nm)，芯片底部镀有散热性良好的 130 μm Cu 衬底，调制带宽最高达到 155 MHz[149]。2013 年，台湾长庚大学的 Tsai 等用 Ta_2O_5/SiO_2 DBR 和 Ag 作为反射镜，制作的 446 nm 蓝色 RCLED 最大－3 dB 带宽为 301 MHz，在 100 cm 的视距范围非归零开关键控(NRZ-OOK)达到 100 Mb/s 的数据速率[150-151]。2019 年，南京邮电大学的 Cai 等用 Si 上 GaN 进行 Si 衬底 CMP 减薄后，用深反应离子刻蚀进一步减薄腔体厚度，制作了 449.5 nm 发光波长的双 Ta_2O_5/SiO_2 DBR 的 RCLED。谐振腔的形成使发光强度增加了 0.6 倍，实现了非归零开关键控(NRZ-OOK) 200 Mb/s 的传输[152]。

在 RC-LED 的基础上，进一步优化光学谐振腔[115]，通过减小腔长、降低内腔端面粗糙度等方式，减少腔内吸收、进一步增大自发辐射因子和增益系数[116]，可形成垂直腔面发射激光器(VCSEL)。VCSEL 从芯片表面出光，易于二维集成，并且由于出光平面内各方向几何限制是均匀的，因此 VCSEL 的光斑呈圆形，发散小，更利于与光纤耦合。

目前为止，蓝光 VCSEL 的输出功率已经超过 20 mW[153]，绿光 VCSEL 也实现了低阈值室温下连续工作[146]，但目前还缺少用蓝绿光 VCSEL 作为通信光源的相关报道。

理论上讲，利用 Purcell 效应加快复合速率，是提升 micro-LED 带宽的一条有效途径。但相关的报道十分有限，从仅有的 RC-LED 结果来看，谐振腔的引入并没有体现明显优于 micro-LED 的通信性能。且大量关于蓝绿光 VCSEL 的报道局限于直流下的电光特性，缺乏光通信相关结果。

2.2　超辐射发光二极管

除了面发射类型的腔增强光源，更常见的是边发射的腔增强光源，如超辐射发光二极管(SLD)和边发射激光器。水平谐振腔的引入对于高速光源应用的增益与上述垂直谐振腔类似，总结起来主要有 3 方面：(1)加快有源区载流子的消耗速度，进而提高光源的调制带宽；(2) 推后饱和阈值，使器件可以在更大注入电流密度下工作，从而获得更大的光功率[154]；(3)改善光源发光的方向性，提升光通信链路的耦合效率。

SLD 使用某些抑制光反馈的结构，如吸收器[155-156]、倾斜端面[157-158]等，避免激光的产生，工作在放大自发辐射区间[155-158]。

2016 年，阿卜杜拉国王科技大学和加州大学圣巴巴拉分校的 Shen 等，使用$(20\bar{2}\bar{1})$半极性面 GaN

衬底外延制作的由 1 000 μm 增益区和 790 μm 集成吸收体组成的 447 nm 蓝色超辐射二极管 SLD(图 17)，峰值光功率最高达到 256 mW，实现了 560 MHz 的−3 dB 调制带宽[155]。随后他们用类似的器件结构(700 μm 增益区和 490 μm 无源吸收体)实现了非归零开关键控(NRZ-OOK)误码率 8.4×10^{-4} 的 1 Gb/s 的数据传输[156]。2019 年，他们将 1.2 mm 波导的一个端面形成 12°倾斜以抑制激光，制作的 c 面 442 nm 发光波长的 SLD，实现 25 mW 的峰值功率、1 GHz 的调制带宽[157-158]。非归零开关键控(NRZ-OOK)调制，1 m 空间距离，1.8×10^{-3} 误码率下数据速率为 1.2 Gb/s。通过应用 16 正交幅度调制(16-QAM)离散多音(DMT)调制实现了 3.7×10^{-3} 误码率下 3.4 Gb/s 的数据速率[159]。

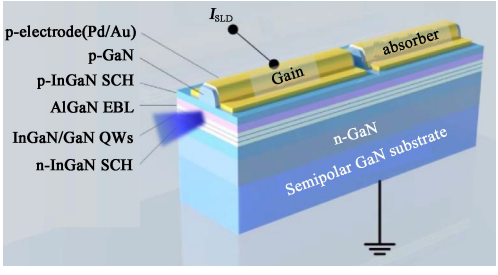


图 17 由增益部分和吸收部分组成的 SLD[155]

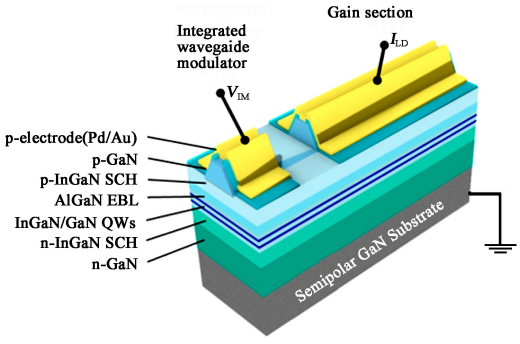
2.3 边发射激光器 EEL(LD)

上文中介绍的 VCSEL 激光器是数微米短腔激光器，而传统的数百微米长腔激光器是边缘发射激光(EEL，通常称为 LD)，由于出光面长宽比很大，光斑通常呈椭圆形，并且工作电流通常较高，输出光功率很高。

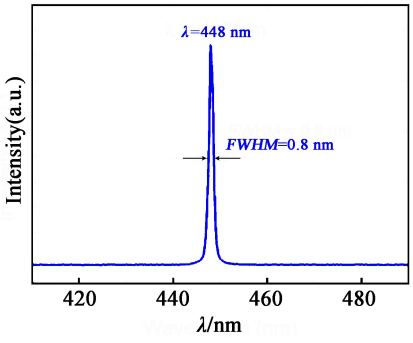
阿卜杜拉国王科技大学和加州大学圣巴巴拉分校的 Shen 等，在$(20\bar{2}1)$半极性面 GaN 衬底上制作的集成波导调制器-激光二极管(IWM-LD)如图 18 所示，发光波长为 448 nm，调制带宽为 1 GHz，实现了非归零开关键控(NRZ-OOK)调制方式 1 Gb/s 的数据速率[160]。中科院半导体所的 Xue 等研究了温度对蓝绿 LD(OSRAM PL450B、PL520)频率响应的影响，温度越低，达到同样带宽所需的注入电流密度也越小[161-162]。

其他的一些报道中主要采用商用 LD 进行通信测试，蓝光 LD 最大实现了 16 m 自由空间 18 Gb/s 的数据速率；在海水中传输，1.7 m 的距离的数据速率达 14.8 Gb/s，10.2 m 距离也达到了 10.8 Gb/s。绿光 LD 用于 POF 通信，最长 100 m 距离实现了 1.25 Gb/s 的通信速率，用于水下 34.5 m 距离的数据传输，速率达到了 2.7 Gb/s。表 3 对近年文献报道的一些蓝、绿光边发射激光器进行了整理。

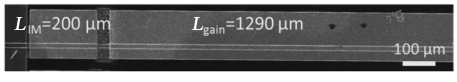
白光方面，针对 Li-Fi 应用有 2 种常见的白光通信系统。一种是采用蓝色 LD 和磷光体转换；另一种是采用 RGB 三色激光实现白光(波分复用 WDM)。RGB 白光 VLC 系统在 1 m 距离实现了 20.231 Gb/s 的通信速率。表 4 对利用边发射激光器实现白光通信的相关结果进行了总结。



(a) 结构示意图



(b) 发射光谱



(c) SEM 平面图[160]

图 18 IWM-LD 结构示意图、发光光谱和 SEM 平面图

以上综述的关于边发射蓝绿光高速光源的研究，主要是应用已有的商品化 LD，优化数据传输形式和光源后续的通信链路，或是探索白光照明和通信相结合的应用需求。商品化的蓝绿光 LD 通常是具有毫米量级腔长的大功率激光器。而从蓝绿光通信的实际应用需求来看，除白光的 Li-Fi 应用外，商品化蓝绿光光源的光功率过剩，而调制带宽相对有限。本文认为，后续边发射蓝绿光高速光源的研究方向在于，缩短腔长，适当降低最大光功率，而同时提升边发射光源的调制带宽，对于 POF 通信、UWOC 等应用更加有益。

表 3　近年文献报道的利用蓝、绿光边发射激光器进行通信的相关结果

时间	波长/nm	芯片	带宽/MHz	功率/mW	通信距离/m	调制方式	数据率/(Gb/s)	参考文献
2012	515	OSRAM 绿光 LD	N/A	0 dBm（光纤耦合）	100(SI-POF)	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.25	[163]
2012	520	OSRAM 绿光 LD	1 000（预均衡后）	21(光纤耦合)@145 mA	50(SI-POF)	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.25	[164]
2015	450	控温的 TO 封装的 OSRAM PL450B	1 500(优化扩展后)	～40	5	64 进制正交幅度调制(64-QAM)-正交频分复用(OFDM)	9	[165]
2015	450	卡西欧 XJM140 投影仪中提取	2 600	～140	0.15	非归零开关键控(NRZ-OOK)	4	[166,167]
2015	517	带有单模光纤尾纤的绿光 LD(Thorlabs LP520-SF15)	1 200	12@135 mA	水下 7	非归零开关键控(NRZ-OOK)	2.3	[168]
2016	450	TO 封装(阻抗匹配)的 OSRAM PL450B	1 300	N/A	7	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	14	[169]
2016	448	$(20\overline{2}1)$半极性 集成波导调制器-激光二极管(IWM-LD)	1 000	15.9@500 mA	N/A	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1	[160]
2016	450	带有单模光纤尾纤的蓝光 LD(ThorLabs LP450-SF15)	800（数据带宽）	15	水下 6.6（自来水）	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	3.2	[170]
2016	450	控温、准直的 TO 封装的 OSRAM PL450B	1 000	51.3@80 mA	水下 12（自来水）	非归零开关键控(NRZ-OOK)	2	[171]
2016	450	控温、准直的 TO 封装的 OSRAM PL450B	1 000	51.3@80 mA	水下 20（自来水）	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.5	[171]
2016	450	16.6 ℃恒温的 OSRAM PL450B	1 800	3.8@120 mA	自由空间	非归零开关键控(NRZ-OOK)	4.7	[172]
2016	421～425	TopGaN LD	883	N/A	水下 1.7	非归零开关键控(NRZ-OOK)	2.488	[172]
2017	450	TO 封装(阻抗匹配)的 OSRAM PLT5 450B	3 000	～43	16	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	18	[173-174]
2017	450	25 ℃控温的 TO 封装的 OSRAM PL450B	1 500	～48	水下 1.7（自来水）	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	12.4	[175]
2017	450	25 ℃控温的 TO 封装的 OSRAM PL450B	1 500	～48	水下 10.2（自来水）	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	5.2	[175]
2017	450	25 ℃控温的 TO 封装的 OSRAM PL450B	1 500	～48	水下 6.8（海水）	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	7.2	[175]
2017	520	控温的带有单模光纤尾纤的绿光 LD(Thorlabs LP520-SF15)	1 100(信号带宽,扩展后)	N/A	自由空间 5＋水下 21	32 进制正交幅度调制(32-QAM)-正交频分复用(OFDM)	5.5	[176]
2017	520	25 ℃控温的 TO 封装	1 400	19.4@90 mA	水下 34.5	非归零开关键控(NRZ-OOK)	2.7	[177]
2018	450	25 ℃控温的 TO 封装的 OSRAM PLT5 450B	3 300	44.4	水下 1.7（海水）	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	14.8	[178]
2018	450	25 ℃控温的 TO 封装的 OSRAM PLT5 450B	2 700(子载波旁瓣滤除后)	2.14（信道衰减后）	水下 10.2（海水）	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	10.8	[178]

表 4 近年文献报道的利用边发射激光器实现白光通信的相关结果

方案	时间	通信距离/m	调制方式	数据率/(Gb/s)	参考文献
RGB	2015	2.88	36 进制正交幅度调制(36-QAM)-正交频分复用(OFDM)	3.43	[179]
RGB	2015	0.2	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	4.4(红光)	[180]
蓝+荧光粉	2015	0.6	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM)	5.2	[181]
蓝+荧光粉	2015	0.05	非归零开关键控(NRZ-OOK)	2	[182]
蓝+荧光粉	2015	0.15	直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)	6.52	[183]
蓝+荧光粉	2015	0.35	直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM),空间复用	10	[183]
RGB	2017	水下 10	32 进制正交幅度调制(32-QAM)-正交频分复用(OFDM),波分复用(WDM)	9.51	[184]
RGB	2018	0.5	16 进制正交幅度调制(16-QAM)-正交频分复用(OFDM),波分复用(WDM)	11.2	[185]
半极性面 409 nm 近紫外+RGB 荧光粉	2018	0.15	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.5	[186]
RGB	2018	1	正交频分复用(OFDM)	20.231	[187]
蓝+荧光粉	2019	1	非归零开关键控(NRZ-OOK)	1.25	[188]

3 总结与展望

随着蓝绿光光源芯片日趋小型化,其高速性能的改善使其作为通信源的优势逐渐显著,大大扩展了其各类通信应用。本文综述了 micro-LED 和各类腔增强光源。在已经报道的结果中,虽然腔增强光源并没有实现高于 micro-LED 的调制带宽,但发光功率占有压倒性优势的边发射激光器,可以在有限的调制带宽下实现远高于相同带宽 micro-LED 的数据传输速率,使用商业化蓝光边发射 LD,实现了超过 18 Gb/s 的数据传输。这主要得益于正交幅度调制(QAM)之类的先进调制方式,对频谱资源进行了高效利用,而可用的线性区频谱宽度又取决于光功率大小,线性区长度远远领先的腔增强器件可以实现更高阶数的正交幅度调制(QAM)-正交频分复用(OFDM)调制,从而实现了大容量数据传输。

通过优化阵列布置、采取谐振腔增强、优化高注入电流下器件热效应等方式,可以进一步平衡与提升 micro-LED 的带宽和光功率。micro-LED 和腔增强光源等融合互补,会使高速蓝绿光光源走进人们生活的方方面面,推动通信技术的提升,为信息时代的万物互联提供有力支撑。

参考文献:

[1] Tsonev D, Videv S, Haas H. Light fidelity (Li-Fi): Towards all-optical networking[J]. Proc. SPIE, 2014, 9007: 900702.

[2] Tsiatmas A, Baggen C, Willems F, et al. An illumination perspective on visible light communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 64-71.

[3] Tsai C T, Cheng C H, Kuo H C, et al. Toward high-speed visible laser lighting based optical wireless communications [J]. Progress in Quantum Electronics, 2019, 67: 100225.1-100225.19.

[4] Ergul O, Dinc E, Akan O B. Communicate to illuminate: State-of-the-art and research challenges for visible light communications[J]. Physical Communication, 2015, 17: 72-85.

[5] Jovicic A, Li J, Richardson T. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12): 26-32.

[6] Chen H, Wu C, Li H, et al. Advances and prospects in visible light communications[J]. J. of Semiconductors, 2016, 37(1): 1-10.

[7] Li X, Bamiedakis N, Wei J, et al. μLED-based single-wavelength bi-directional POF link with 10 Gb/s aggregate data rate[J]. J. of Lightwave Technol., 2015, 33(17): 3571-3576.

[8] Al-Shamma'a A I, Shaw A, Saman S. Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2004, 52(11): 2843-2849.

[9] Uribe C, Grote W. Radio communication model for underwater WSN[C]// Proc. of the 2009 3rd Inter. Conf. on New Technologies, Mobility and Security, 2009.

[10] Lacovara P. High-bandwidth underwater communications [J]. Marine Technol. Society J., 2008, 42(1): 93-102.

[11] Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE J. of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.

[12] Solonenko M G, Mobley C D. Inherent optical properties of Jerlov water types[J]. Appl. Opt., 2015, 54(17): 5392-5401.

[13] Zeng Z, Fu S, Zhang H, et al. A survey of underwater optical wireless communications [J]. IEEE Commun. Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 204-238.

[14] Grubor J, Lee S C J, Langer K, et al. Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs [C]// Proc. of the 33rd European Conf. and Exhibition of Optical Communication, 2007.

[15] Ikeda K, Horiuchi S, Tanaka T, et al. Design parameters of frequency response of GaAs—(Ga, Al) As double heterostructure LED's for optical communications[J]. IEEE

Trans. on Electron Devices, 1977, 24(7): 1001-1005.

[16] Cai Y, Haggar J I H, Zhu C, et al. Direct epitaxial approach to achieve a monolithic on-chip integration of a HEMT and a single micro-LED with a high-modulation bandwidth [J]. ACS Appl. Electron. Mater., 2021, 3(1): 445-450.

[17] Haemmer M, Roycroft B, Akhter M, et al. Size-dependent bandwidth of semipolar ($11/overline{2} 2 $) light-emitting-diodes[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 30(5): 439-442.

[18] Zhu S, Lin S, Li J, et al. Influence of quantum confined Stark effect and carrier localization effect on modulation bandwidth for GaN-based LEDs [J]. Appl. Phys. Lett., 2017, 111(17): 171105.

[19] Mckendry J J D, Massoubre D, Zhang S, et al. Visible-light communications using a CMOS-controlled micro-light-emitting-diode array[J]. J. of Lightwave Technol., 2012, 30(1): 61-67.

[20] Zhu S C, Zhao L X, Yang C, et al. GaN-based flip-chip parallel micro LED array for visible light communication [C]// Inter. Conf. on Optoelectronics and Microelectronics Technol. and Application, 2017.

[21] Tian P, Mckendry J J D, Gong Z, et al. Size-dependent efficiency and efficiency droop of blue InGaN micro-light emitting diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 2012, 101(23): 2217.

[22] Yang W, Zhang S, Mckendry J J D, et al. Size-dependent capacitance study on InGaN-based micro-light-emitting diodes [J]. J. of Appl. Phys., 2014, 116(4): 044512.

[23] Huang S-C, Li H, Zhang Z-H, et al. Superior characteristics of microscale light emitting diodes through tightly lateral oxide-confined scheme[J]. Appl. Phys. Lett., 2017, 110(2): 021108.

[24] Konoplev S S, Bulashevich K A, Karpov S Y. From large-size to micro-LEDs: Scaling trends revealed by modeling[J]. Physica Status Solidi (A), 2018, 215(10): 1700508. 1-1700508. 6.

[25] Gong Z, Jin S, Chen Y, et al. Size-dependent light output, spectral shift, and self-heating of 400 nm InGaN light-emitting diodes[J]. J. of Appl. Phys., 2010, 107(1): 1086.

[26] Tian P, Mckendry J J D, Herrnsdorf J, et al. Temperature-dependent efficiency droop of blue InGaN micro-light emitting diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 2012, 101(23): 2217.

[27] Zheng Z W, Yu H, Ren B C, et al. Modulation characteristics of GaN-based light-emitting-diodes for visible light communication[J]. ECS J. of Solid State Science and Technol., 2017, 6(9): R135-R8.

[28] Tian P, Althumali A, Gu E, et al. Aging characteristics of blue InGaN micro-light emitting diodes at an extremely high current density of 3.5 kA·cm^{-2}[J]. Semiconductor Science and Technol., 2016, 31(4): 045005.

[29] Piprek J. Efficiency droop in nitride-based light-emitting diodes[J]. Physica Status Solidi (A), 2010, 207(10): 2217-2225.

[30] Verzellesi G, Saguatti D, Meneghini M, et al. Efficiency droop in InGaN/GaN blue light-emitting diodes: Physical mechanisms and remedies[J]. J. of Appl. Phys., 2013, 114(7): 10.1063.

[31] Lu H, Yan C, Gao W, et al. Efficiency droop effects of GaN-based light-emitting diodes on the performance of code division multiple access visible-light communication system [J]. Optical Engineering, 2016, 55(2): 027109.

[32] Mckendry J J D, Green R P, Kelly A E, et al. High-speed visible light communications using individual pixels in a micro light-emitting diode array [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2010, 22(18): 1346-1348.

[33] Kelly A E, Mckendry J J D, Zhang S, et al. High-speed GaN micro-LED arrays for data communications[C]// 14th Inter. Conf. on Trans. Opt. Netw., 2012.

[34] Watson S, Mckendry J J D, Zhang S L, et al. High speed GaN micro-light-emitting diode arrays for data communications[J]. Proc. SPIE, 2012, 8540: 85400G.

[35] Ferreira R X G, Xie E, Mckendry J J D, et al. High bandwidth GaN-based micro-LEDs for multi-Gb/s visible light communications [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(19): 2023-2026.

[36] Xie E, Stonehouse M, Ferreira R, et al. Design, fabrication, and application of GaN-based micro-LED arrays with individual addressing by N-electrodes [J]. IEEE Photonics J., 2017, 9(6): 1-11.

[37] Tian P, Liu X, Yi S, et al. High-speed underwater optical wireless communication using a blue GaN-based micro-LED [J]. Opt. Express, 2017, 25(2): 1193-1201.

[38] Liu X, Tian P, Wei Z, et al. Gbps long-distance real-time visible light communications using a high-bandwidth GaN-based micro-LED[J]. IEEE Photonics J., 2017, 9(6): 1-9.

[39] Chien-Lan L, Chong-Lung H, Yung-Fu C, et al. High-speed light-emitting diodes emitting at 500 nm with 463-MHz modulation bandwidth [J]. IEEE Electron Device Lett., 2014, 35(5): 563-565.

[40] Chen C J, Yan J H, Chen D H, et al. A 520-nm green GaN LED with high bandwidth and low current density for gigabits OFDM data communication [C]// 2018 Optical Fiber Communications Conf. and Exposition (OFC), 2018.

[41] Cao H, Lin S, Ma Z, et al. Color converted white light-emitting diodes with 637.6 MHz modulation bandwidth[J]. IEEE Electron Device Lett., 2019, 40(2): 267-270.

[42] Tian P, Mckendry J J D, Gong Z, et al. Characteristics and applications of micro-pixelated GaN-based light emitting diodes on Si substrates[J]. J. of Appl. Phys., 2014, 115(3): 013103.

[43] Tsai S C, Lu C H, Liu C P. Piezoelectric effect on

compensation of the quantum-confined Stark effect in InGaN/GaN multiple quantum wells based green light-emitting diodes[J]. Nano Energy, 2016, 28: 373-379.

[44] Yu L M, Wang L, Hao Z B, et al. High-speed micro-LEDs for visible light communication: challenges and progresses [J]. Semiconductor Science and Technol., 2022, 37(2): 023001.

[45] Romanov A E, Baker T J, Nakamura S, et al. Strain-induced polarization in wurtzite Ⅲ-nitride semipolar layers [J]. J. of Appl. Phys., 2006, 100(2): 28.

[46] Chiu C H, Lin D W, Lin C C, et al. Reduction of efficiency droop in semipolar (1/bar101) InGaN/GaN light emitting diodes grown on patterned silicon substrates [J]. Appl. Phys. Express, 2011, 4(1): 039201.

[47] Pan C C, Tanaka S, Wu F, et al. High-power, low-efficiency-droop semipolar ($20/bar{2}/bar{1}$) single-quantum-well blue light-emitting diodes [J]. Appl. Phys. Express, 2012, 5(6): 062103.

[48] Monavarian M, Rashidi A, Aragon A, et al. Explanation of low efficiency droop in semipolar (202 1) InGaN/GaN LEDs through evaluation of carrier recombination coefficients[J]. Opt. Express, 2017, 25(16): 19343-19353.

[49] Monavarian M, Rashidi A, Aragon A A, et al. Impact of crystal orientation on the modulation bandwidth of InGaN/GaN light-emitting diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 2018, 112(4): 041104.

[50] Rashidi A, Monavarian M, Aragon A, et al. Nonpolar ${m}$-plane InGaN/GaN micro-scale light-emitting diode with 1.5 GHz modulation bandwidth [J]. IEEE Electron Device Lett., 2018, 39(4): 520-523.

[51] Chen S-W H, Huang Y-M, Chang Y-H, et al. High-bandwidth green semipolar (20-21) InGaN/GaN micro light-emitting diodes for visible light communication [J]. ACS Photonics, 2020, 7(8): 2228-2235.

[52] Dinh D V, Quan Z, Roycroft B, et al. GHz bandwidth semipolar (112 2) InGaN/GaN light-emitting diodes [J]. Opt. Lett., 2016, 41(24): 5752-5755.

[53] Jeon H, Tu L W, Krames M R, et al. Development of semipolar (11-22) LEDs on GaN templates [C]// Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting Xx, SPIE Opto. Inter. Society for Optics and Photonics, 2016.

[54] Quan Z, Dinh D V, Presa S, et al. High bandwidth freestanding semipolar (11-22) InGaN/GaN light-emitting diodes[J]. IEEE Photonics J., 2016, 8(5): 1-8.

[55] Dinh D V, Akhter M, Presa S, et al. Semipolar ($11\bar{2}2$) InGaN light-emitting diodes grown on chemically-mechanically polished GaN templates [J]. Physica Status Solidi (A), 2015, 212(10): 2196-2200.

[56] Khoury M, Li H, Li P, et al. Polarized monolithic white semipolar (2021) InGaN light-emitting diodes grown on high quality (2021) GaN/sapphire templates and its application to visible light communication [J]. Nano Energy, 2020, 67: 104236.

[57] Windisch R, Knobloch A, Kuijk M, et al. Large-signal-modulation of high-efficiency light-emitting diodes for optical communication[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2000, 36(12): 1445-1453.

[58] Wun J M, Lin C W, Chen W, et al. GaN-based miniaturized Cyan light-emitting diodes on a patterned sapphire substrate with improved fiber coupling for very high-speed plastic optical fiber communication[J]. IEEE Photonics J., 2012, 4(5): 1520-1529.

[59] Shi J W, Chi K L, Wun J M, et al. Ⅲ-nitride based Cyan light-emitting diodes with GHz bandwidth for high-speed visible light communication[J]. IEEE Electron Device Lett., 2016, 37(7): 894-897.

[60] Vinogradov J, Kruglov R, Engelbrecht R, et al. GaN-based Cyan light-emitting diode with up to 1-GHz bandwidth for high-speed transmission over SI-POF [J]. IEEE Photonics J., 2017, 9(3): 1-7.

[61] Rajabi K, Wang J, Jin J, et al. Improving modulation bandwidth of *c*-plane GaN-based light-emitting diodes by an ultra-thin quantum wells design[J]. Opt. Express, 2018, 26(19): 24985-24991.

[62] Xu F, Jin Z, Tao T, et al. *C*-plane blue micro-LED with 1.53 GHz bandwidth for high-speed visible light communication[J]. IEEE Electron Device Lett., 2022, 43(6): 910-913.

[63] Yuan Z, Li Y, Lu X, et al. Investigation of modulation bandwidth of InGaN green micro-LEDs by varying quantum barrier thickness [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2022: 1-8.

[64] Lan H Y, Tseng I C, Kao H Y, et al. 752-MHz modulation bandwidth of high-speed blue micro light-emitting diodes[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2018, 54(5): 1-6.

[65] Okur S, Nami M, Rishinaramangalam A K, et al. Internal quantum efficiency and carrier dynamics in semipolar (2021) InGaN/GaN light-emitting diodes[J]. Opt. Express, 2017, 25(3): 2178-2186.

[66] Monavarian M, Rashidi A, Aragon A A, et al. Trade-off between bandwidth and efficiency in semipolar (2021) InGaN/GaN single- and multiple-quantum-well light-emitting diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 2018, 112(19): 191102.1-191102.5.

[67] Shi J W, Sheu J K, Chen C H, et al. High-speed GaN-based green light-emitting diodes with partially n-doped active layers and current-confined apertures [J]. IEEE Electron Device Lett., 2008, 29(2): 158-160.

[68] Wang L, Yang D, Hao Z B, et al. Metal-organic-vapor phase epitaxy of InGaN quantum dots and their applications in light-emitting diodes[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(6): 25-30.

[69] Yang D, Wang L, Hao Z B, et al. Dislocation analysis of InGaN/GaN quantum dots grown by metal organic chemical vapor deposition[J]. Superlattices and Microstructures, 2016, 99: 221-225.

[70] Schulz S, O'Reilly E P. Theory of reduced built-in polarization field in nitride-based quantum dots[J]. Phys. Rev. B, 2010, 82(3): 3086-3092.

[71] Zhang M, Bhattacharya P, Guo W. InGaN/GaN self-organized quantum dot green light emitting diodes with reduced efficiency droop[J]. Appl. Phys. Lett., 2010, 97(1): 141101.

[72] Lv W, Wang L, Wang L, et al. InGaN quantum dot green light-emitting diodes with negligible blue shift of electroluminescence peak wavelength[J]. Appl. Phys. Express, 2014, 7(2): 343-352.

[73] Lv W, Wang L, Wang J, et al. Green and red light-emitting diodes based on multilayer InGaN/GaN dots grown by growth interruption method[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2013, 52(8S): 279-287.

[74] Weng G, Mei Y, Liu J, et al. Low threshold continuous-wave lasing of yellow-green InGaN-QD vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Opt. Express, 2016, 24(14): 15546-15553.

[75] 王　磊. InGaN 量子点材料与新型发光二极管研究[D]. 北京：清华大学, 2021.
Wang Lei. Research on InGaN Quantum Dot Material and New Light Emitting Diode[D]. Beijing: Tsinghua University, 2021.

[76] Wang L, Wei Z X, Chen C J, et al. 1.3 GHz E-O bandwidth GaN-based micro-LED for multi-gigabit visible light communication[J]. Photonics Research, 2021, 9(5): 792-802.

[77] Wei Z, Zhang L, Wang L, et al. 2 Gbps/3 m air-underwater optical wireless communication based on a single-layer quantum dot blue micro-LED[J]. Opt. Lett., 2020, 45(9): 2616-2619.

[78] Tsatsul'Nikov A F, Kovsh A R, Zhukov A E, et al. Volmer-Weber and Stranski-Krastanov InAs-(Al, Ga)As quantum dots emitting at 1.3 μm[J]. J. of Appl. Phys., 2000, 88(11): 6272-6275.

[79] Wang L, Wang L, Chen C J, et al. Green InGaN quantum dots breaking through efficiency and bandwidth bottlenecks of micro-LEDs[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(5): 202000406.

[80] Nami M, Rashidi A, Monaavarian M, et al. Electrically injected GHz-class GaN/InGaN core-shell nanowire-based μLEDs: Carrier dynamics and nanoscale homogeneity[J]. ACS Photonics, 2019, 6(7): 1618-1625.

[81] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3-55.

[82] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical J., 1948, 27(3): 379-423.

[83] Xie E, Bian R, He X, et al. Over 10 Gbps VLC for long-distance applications using a GaN-based series-biased micro-LED array[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2020, 32(9): 499-502.

[84] Tsonev D, Chun H, Rajbhandari S, et al. A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μLED[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(7): 637-640.

[85] Xie E, He X, Islim M S, et al. High-speed visible light communication based on a Ⅲ-nitride series-biased micro-LED array[J]. J. of Lightwave Technol., 2019, 37(4): 1180-1186.

[86] Lan H Y, Tseng I C, Lin Y H, et al. High-speed integrated micro-LED array for visible light communication[J]. Opt. Lett., 2020, 45(8): 2203-2206.

[87] Arvanitakis G N, Bian R, Mckendry J J D, et al. Gb/s underwater wireless optical communications using series-connected GaN micro-LED arrays[J]. IEEE Photonics J., 2020, 12(2): 1-10.

[88] Huang Y, Guo Z, Wang X, et al. GaN-based high-response frequency and high-optical power matrix micro-LED for visible light communication[J]. IEEE Electron Device Lett., 2020, 41(10): 1536-1639.

[89] Chang Y H, Huang Y M, Gunawan W H, et al. 4.343-Gbit/s green semipolar (20-21) μ-LED for high speed visible light communication[J]. IEEE Photonics J., 2021, 13(4): 1-4.

[90] Lin G R, Kuo H C, Cheng C H, et al. Ultrafast 2×2 green micro-LED array for optical wireless communication beyond 5 Gbit/s[J]. Photonics Research, 2021, 9(10): 10.1364.

[91] Zhang S, Watson S, Mckendry J J D, et al. 1.5 Gbit/s multi-channel visible light communications using CMOS-controlled GaN-based LEDs[J]. J. of Lightwave Technol., 2013, 31(8): 1211-1216.

[92] Carreira J F C, Xie E, Bian R, et al. On-chip GaN-based dual-color micro-LED arrays and their application in visible light communication[J]. Opt. Express, 2019, 27(20): A1517-A1528.

[93] Pezeshki B, Tselikov A, Kalman R, et al. Wide and parallel LED-based optical links using multi-core fiber for chip-to-chip communications[C]// Proc. of the Optical Fiber Communication Conf. (OFC), 2021.

[94] Huang Y, Guo Z, Huang H, et al. Influence of current density and capacitance on the bandwidth of VLC LED[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2018, 30(9): 773-776.

[95] Huang H, Wu H, Huang C, et al. Cascade GaN-based blue micro-light-emitting diodes for dual function of illumination and visible light communication[J]. J. of Physics D: Appl. Phys., 2020, 53(35): 355103.

[96] Rajbhandari S, Mckendry J J D, Herrnsdorf J, et al. A

multigigabit per second integrated multiple-input multiple-output VLC demonstrator[J]. J. of Lightwave Technol., 2017, 35(20): 4358-4365.

[97] Carreira J F C, Guilhabert B J E, Mckendry J J D, et al. Integration of micro-LED array on CMOS by transfer printing [C]// IEEE Photon Conf., 2018.

[98] Pezeshki B, Kalman R, Tselikov A, et al. High Speed Light MicroLEDs for Visible Wavelength Communication [C]// Proc. of Conf. on Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XXV, 2021: 10.1117.

[99] Pezeshki B, Khoeini F, Tselikov A, et al. MicroLED array-based optical links using imaging fiber for chip-to-chip communications [C]// Proc. of the Optical Fiber Communication Conf. (OFC), 2022.

[100] Kottke C, Habel K, Grobe L, et al. Single-channel wireless transmission at 806 Mbit/s using a white-light LED and a PIN-based receiver[C]// 14th Inter. Conf. on Transparent Optical Networks, 2012.

[101] Carreira J F C, Griffiths A D, Xie E, et al. Direct integration of micro-LEDs and a SPAD detector on a silicon CMOS chip for data communications and time-of-flight ranging[J]. Opt. Express, 2020, 28(5): 6909-6917.

[102] Hassan N B, Ali M, Griffiths A D, et al. Integration of an LED/SPAD optical wireless transceiver with CubeSat on-board systems[C]// 2020 IEEE Photonics Conf. (IPC), 2020.

[103] Griffiths A D, Herrnsdorf J, Henderson R K, et al. High-sensitivity inter-satellite optical communications using chip-scale LED and single-photon detector hardware[J]. Opt. Express, 2021, 29(7): 10749-10768.

[104] Lin R, Liu X, Zhou G, et al. InGaN micro-LED array enabled advanced underwater wireless optical communication and underwater charging [J]. Adv. Optical Materials, 2021, 9(12): 2002211.

[105] Zhou G, Lin R, Qian Z, et al. GaN-based micro-LEDs and detectors defined by current spreading layer: size-dependent characteristics and their multifunctional applications[J]. J. of Physics D: Appl. Phys., 2021, 54(33): 335104.

[106] Tian P, Mckendry J J, Gu E, et al. Fabrication, characterization and applications of flexible vertical InGaN micro-light emitting diode arrays[J]. Opt. Express, 2016, 24(1): 699-707.

[107] Li X, Wu L, Liu Z, et al. Design and characterization of active matrix LED microdisplays with embedded visible light communication transmitter[J]. J. of Lightwave Technol., 2016, 34(14): 3449-3457.

[108] Jalajakumari A V N, Xie E, Mckendry J, et al. High-speed integrated digital to light converter for short range visible light communication[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2017, 29(1): 118-121.

[109] Griffiths A D, Islim M S, Herrnsdorf J, et al. CMOS-integrated GaN LED array for discrete power level stepping in visible light communications[J]. Opt. Express, 2017, 25(8): A338-A345.

[110] Huang H, Wu H, Huang C, et al. Thermal effects on the electrical and optical characteristics of micro-light-emitting diodes with different current spreading layer[J]. Physica Status Solidi (A), 2019, 216(14): 10.1002.

[111] Huang H, Huang C, Wu H, et al. Compromise between illumination performance and modulation bandwidth for micro-size white light-emitting diode by selecting injected current[J]. Appl. Phys. A, 2019, 125(8): 522.1-522.8.

[112] James Singh K, Huang Y-M, Ahmed T, et al. Micro-LED as a promising candidate for high-speed visible light communication[J]. Appl. Sciences, 2020, 10(20): 7384.

[113] Tian P, Wu Z, Liu X, et al. Large-signal modulation characteristics of a GaN-based micro-LED for Gbps visible-light communication[J]. Appl. Phys. Express, 2018, 11(4): 044101.

[114] Purcell E M, Torrey H C, Pound R V. Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid[J]. Phys. Rev., 1946, 69(1-2): 37-38.

[115] Gye Mo Y, Macdougal M H, Pudikov V, et al. Influence of mirror reflectivity on laser performance of very-low-threshold vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1995, 7(11): 1228-1230.

[116] Wu J Z, Long H, Shi X L, et al. Reduction of lasing threshold of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers by using short cavity lengths[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2018, 65(6): 2504-2508.

[117] Zhang C, Elafandy R, Han J. Distributed Bragg reflectors for GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Appl. Sciences, 2019, 9(8): 1593.

[118] 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 Technol., 2017, 33(1): 015016.

[119] Yu H C, Zheng Z W, Mei Y, et al. Progress and prospects of GaN-based VCSEL from near UV to green emission[J]. Progress in Quantum Electron., 2018, 57: 1-19.

[120] 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]. Appl. Phys. Lett., 2008, 92(14): 141102.

[121] Lu T C, Kao C C, Kuo H C, et al. CW lasing of current injection blue GaN-based vertical cavity surface emitting lasers[C]// 2008 Conf. on Lasers and Electro-Optics, 2008: 1-2.

[122] Kuramoto M, Kobayashi S, Akagi T, et al. Enhancement of slope efficiency and output power in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with a SiO_2-buried lateral index guide [J]. Appl. Phys. Lett., 2018, 112(11): 111104.

[123] Muranaga W, Akagi T, Fuwa R, et al. GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers using n-type conductive AlInN/GaN bottom distributed Bragg reflectors with graded interfaces[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2019, 58(SC): SCCC01.

[124] Takeuchi T, Kamiyama S, Iwaya M, et al. GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with AlInN/GaN distributed Bragg reflectors[J]. Rep. Prog. Phys., 2019, 82(1): 012502.

[125] 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]. Appl. Phys. Lett., 2010, 97(7): 868.

[126] 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]. Opt. Express, 2015, 23(21): 27145-27151.

[127] 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]. Appl. Phys. Express, 2008, 1(12): 121002.

[128] Chen L R, Chen B Y, Kuo S Y, et al. Anti-guiding and guiding effects in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. AIP Advances, 2020, 10(2): 025204.

[129] Onishi T, Imafuji O, Nagamatsu K, et al. Continuous wave operation of GaN vertical cavity surface emitting lasers at room temperature[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2012, 48(9): 1107-1112.

[130] 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]. Appl. Phys. Express, 2015, 8(6): 1107-1112.

[131] 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.

[132] Hamaguchi T, Nakajima H, Ito M, et al. Lateral carrier confinement of GaN-based vertical-cavity surface-emitting diodes using boron ion implantation[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2016, 55(12): 122101.

[133] Hamaguchi T, Tanaka M, Mitomo J, et al. Lateral optical confinement of GaN-based VCSEL using an atomically smooth monolithic curved mirror[J]. Sci. Rep., 2018, 8(1): 10350.

[134] 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]. Appl. Phys. Express, 2019, 12(8): 084003.

[135] 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[C]// IEEE Conf. on Lasers and Electro-Optics, 2018.

[136] Hamaguchi T, Nakajima H, Fuutagawa N. GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers incorporating dielectric distributed Bragg reflectors[J]. Appl. Sciences, 2019, 9(4): 733.

[137] 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]. Jap. J. of Appl. Phys., 2019, 58(SC): SC0806.

[138] 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]. Appl. Phys. Lett., 2015, 107(9): 75-290.

[139] Lee S, Forman C A, Kearns J, et al. Demonstration of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with buried tunnel junction contacts[J]. Opt. Express, 2019, 27(22): 31621-31628.

[140] 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 Photon. Technol. Lett., 2013, 25(20): 2014-2017.

[141] 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]. Appl. Phys. Lett., 2014, 104(25): 25116.

[142] Cai Li'e, Zhang Baoping, Zhang Jiangyong, et al. Fabrication and characteristics of GaN-based blue VCSEL[J]. Chinese J. of Luminescence, 2016, 37(4): 452-456.

[143] Mei Y, Xu R B, Weng G E, et al. Tunable InGaN quantum dot microcavity light emitters with 129 nm tuning range from yellow-green to violet[J]. Appl. Phys. Lett., 2017, 111(12): 121107.

[144] Mei Y, Weng G E, Zhang B P, et al. Quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers covering the 'green gap'[J]. Light Sci. Appl., 2017, 6(1): e16199.

[145] 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 Technol., 2017, 32(10): 105012.

[146] 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]. Gallium Nitride Materials and Devices Xiv, 2019, 10918.

[147] Xu R, Mei Y, Xu H, et al. Effects of lateral optical confinement InGaN VCSELs with double dielectric DBRs[J]. IEEE Photonics J., 2020, 12(2): 1-8.

[148] Xu H, Mei Y, Xu R B, et al. Green VCSELs based on

nitride semiconductors[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2020, 59(SO): SO0803.

[149] Huang S Y, Hang R H, Shi J W, et al. High-performance InGaN-based green resonant-cavity light-emitting diodes for plastic optical fiber applications [J]. J. of Lightwave Technol., 2009, 27(18): 4084-4094.

[150] Tsai C L, Xu Z F. Line-of-sight visible light communications with InGaN-based resonant cavity LEDs [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2013, 25(18): 1793-1796.

[151] Tsai C L, Yen C T, Huang W J, et al. InGaN-based resonant-cavity light-emitting diodes fabricated with a Ta_2O_5/SiO_2 distributed Bragg reflector and metal reflector for visible light communications [J]. J. of Display Technol., 2013, 9(5): 365-370.

[152] Cai W, Yuan J, Ni S, et al. GaN-on-Si resonant-cavity light-emitting diode incorporating top and bottom dielectric distributed Bragg reflectors [J]. Appl. Phys. Express, 2019, 12(3): 032004.

[153] Kuramoto M, Kobayashi S, Akagi T, et al. Nano-height cylindrical waveguide in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Appl. Phys. Express, 2020, 13(8): 082005.

[154] Denault K A, Cantore M, Nakamura S, et al. Efficient and stable laser-driven white lighting[J]. AIP Advances, 2013, 3(7): 072107.

[155] Shen C, Ng T K, Leonard J T, et al. High-brightness semipolar (2021) blue InGaN/GaN superluminescent diodes for droop-free solid-state lighting and visible-light communications[J]. Opt. Lett., 2016, 41(11): 2608-2611.

[156] Shen C, Ng T K, Lee C, et al. Semipolar InGaN-based superluminescent diodes for solid-state lighting and visible light communications[C]// Gallium Nitride Materials and Devices Xii, 2017: 10104.

[157] Alatawi A A, Holguin-Lerma J A, Kang C H, et al. Blue superluminescent diode on *c*-plane GaN beyond gigahertz modulation bandwidth for visible light communication[C]// 2019 Conf. on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conf. (Cleo/Europe-Eqec), 2019.

[158] Alatawi A A, Holguin-Lerma J A, Kang C H, et al. Blue superluminescent diodes with GHz bandwidth exciting perovskite nanocrystals for high CRI white lighting and high-speed VLC[C]// Conf. Laser Electr., 2019.

[159] Shen C, Holguin-Lerma J A, Alatawi A A, et al. Group-Ⅲ-nitride superluminescent diodes for solid-state lighting and high-speed visible light communications[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2019, 25(6): 1-10.

[160] Shen C, Ng T K, Leonard J T, et al. High-modulation-efficiency, integrated waveguide modulator-laser diode at 448 nm[J]. ACS Photonics, 2016, 3(2): 262-268.

[161] Xue B, Liu Z, Yang J, et al. Frequency response of directly modulated Ⅲ-nitride based blue laser diode at different temperature[C]// Proc. of Asia Commun. and Photon. Conf., 2017.

[162] Xue B, Liu Z, Yang J, et al. Characteristics of Ⅲ-nitride based laser diode employed for short range underwater wireless optical communications [J]. Optics Communications, 2018, 410: 525-530.

[163] Kruglov R, Vinogradov J, Ziemann O, et al. Eye-safe data transmission of 1.25 Gbit/s over 100-m SI-POF using green laser diode[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(3): 167-169.

[164] Atef M, Swoboda R, Zimmermann H. Real-time 1.25-Gb/s transmission over 50-m SI-POF using a green laser diode [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(15): 1331-1333.

[165] Chi Y C, Hsieh D H, Tsai C T, et al. 450-nm GaN laser diode enables high-speed visible light communication with 9-Gbps QAM-OFDM [J]. Opt. Express, 2015, 23(10): 13051-13059.

[166] Lee C, Zhang C, Cantore M, et al. 4 Gbps direct modulation of 450 nm GaN laser for high-speed visible light communication[J]. Opt. Express, 2015, 23(12): 16232-16237.

[167] Changmin L, Chong Z, Cantore M, et al. 2.6 GHz high-speed visible light communication of 450 nm GaN laser diode by direct modulation[C]// 2015 IEEE Summer Topicals Meeting Series (SUM), 2015.

[168] Oubei H M, Li C, Park K H, et al. 2.3 Gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode[J]. Opt. Express, 2015, 23(16): 20743-20748.

[169] Huang Y F, Wu T C, Chi Y C, et al. Impedance matched GaN LD package for direct OFDM communication at 14 Gbps[C]// Proc. of the 2016 21st Optoelectronics and Communications Conf., 2016.

[170] Oubei H M, DuráN J R, Janjua B, et al. Wireless optical transmission of 450 nm, 3.2 Gbit/s 16-QAM-OFDM signals over 6.6 m underwater channel[C]// Proc. of the Conf. on Lasers and Electro-Optics, 2016.

[171] Shen C, Guo Y, Oubei H M, et al. 20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate [J]. Opt. Express, 2016, 24(22): 25502-25509.

[172] Watson S, Viola S, Giuliano G, et al. High speed visible light communication using blue GaN laser diodes[C]// Adv. Free-Space Optical Communication Techniques and Applications LI, 2016.

[173] Huang Y F, Tsai C T, Kao H Y, et al. 17.6-Gbps universal filtered multi-carrier encoding of GaN blue LD for visible light communication[J]. Proc. SPIE, 2016, 9991:

99910A.

[174] Huang Y F, Chi Y C, Kao H Y, et al. Blue laser diode based free-space optical data transmission elevated to 18 Gbps over 16 m[J]. Sci. Rep., 2017, 7(1): 10478.

[175] Wu T C, Chi Y C, Wang H Y, et al. Blue laser diode enables underwater communication at 12.4 Gbps[J]. Sci. Rep., 2017, 7: 40480.

[176] Chen Y, Kong M, Ali T, et al. 26 m/5.5 Gbps air-water optical wireless communication based on an OFDM-modulated 520-nm laser diode[J]. Opt. Express, 2017, 25(13): 14760-14765.

[177] Liu X, Yi S, Zhou X, et al. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation[J]. Opt. Express, 2017, 25(22): 27937-27947.

[178] Huang Y F, Tsai C T, Chi Y C, et al. Filtered multicarrier OFDM encoding on blue laser diode for 14.8-Gbps seawater transmission[J]. J. of Lightwave Technol., 2018, 36(9): 1739-1745.

[179] Tsonev D, Videv S, Haas H. Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network[J]. Opt. Express, 2015, 23(2): 1627-1637.

[180] Janjua B, Oubei H M, Duran Retamal J R, et al. Going beyond 4 Gbps data rate by employing RGB laser diodes for visible light communication[J]. Opt. Express, 2015, 23(14): 18746-18753.

[181] Chi Y C, Hsieh D H, Lin C Y, et al. Phosphorous diffuser diverged blue laser diode for indoor lighting and communication[J]. Sci. Rep., 2015, 5: 18690.

[182] Lee C, Shen C, Oubei H M, et al. 2 Gbit/s data transmission from an unfiltered laser-based phosphor-converted white lighting communication system [J]. Opt. Express, 2015, 23(23): 29779-29787.

[183] Chun H, Rajbhandari S, Tsonev D, et al. Visible light communication using laser diode based remote phosphor technique[C]// IEEE Int. Conf. Comm., 2015: 1392-1397.

[184] Kong M, Lv W, Ali T, et al. 10-m 9.51-Gb/s RGB laser diodes-based WDM underwater wireless optical communication[J]. Opt. Express, 2017, 25(17): 20829-20834.

[185] Huang Y F, Chi Y C, Chen M K, et al. Red/green/blue LD mixed white-light communication at 6 500 K with divergent diffuser optimization[J]. Opt. Express, 2018, 26(18): 23397-23410.

[186] Lee C M, Shen C, Cozzan C, et al. Semipolar GaN-based laser diodes for Gbit/s white lighting communication: devices to systems [J]. Gallium Nitride Materials and Devices XIII, 2018, 10532.

[187] Wei L Y, Hsu C W, Chow C W, et al. 20.231 Gbit/s tricolor red/green/blue laser diode based bidirectional signal remodulation visible-light communication system [J]. Photonics Research, 2018, 6(5).

[188] Yeh C-H, Chow C-W, Wei L-Y. 1 250 Mbit/s OOK wireless white-light VLC transmission based on phosphor laser diode[J]. IEEE Photonics J., 2019, 11(3): 1-5.

作者简介：

李振浩(1997—)，男，湖北省人，博士研究生，主要研究方向为高速蓝绿光半导体电子器件技术；

汪　莱(1981—)，男，湖北省武汉市人，博士，长聘副教授，主要从事宽禁带半导体光电子材料和器件研究。