光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.004

基于蓝绿光Micro-LED的可见光通信芯片调制带宽研究

王　轩[1]，陶　涛[1*]，刘　斌[1*]，许非凡[1]，梁师豪[1]，苗　涛[1]，
刘晓燕[2,3]，智　婷[2,3]，谢自力[1]，张　荣[1,4]，郑有炓[1]

（1. 南京大学 电子科学与工程学院，南京 210046；2. 南京邮电大学 电子与光学工程学院，南京 210023；
3. 南京邮电大学 微电子学院，南京 210023；4. 厦门大学，福建 厦门 361005）

摘　要： 基于氮化镓微米LED(Micro-LED)的可见光通信(Visible Light Communication，VLC)技术成为近年来的研究热点。通过深紫外光刻技术制备了小尺寸的氮化镓基蓝/绿光Micro-LED芯片，深入研究了40～10 μm不同尺寸Micro-LED器件的性能，以及其作为VLC光源的调制带宽能力。研究发现，随着LED器件尺寸的缩小，其调制带宽显著增加。通过在电极间加入电磁屏障以及对LED器件侧壁进行钝化修复，直径为10 μm的绿光Micro-LED亮度可达1×10^8 cd/m^2，直径为20 μm的蓝光Micro-LED的调制带宽可达372.6 MHz。研究结果表明，基于氮化镓的Micro-LED芯片在调制带宽上仍有较大的提升空间，经过进一步的研究，有望推动高速可见光通信的系统应用。

关键词： 可见光通信(VLC)；Micro-LED；调制带宽；氮化镓

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2021)04－0469－05

Study on Modulation Bandwidth of Blue-green Micro-LEDs for Visible Light Communication

WANG Xuan[1]，TAO Tao[1]，LIU Bin[1]，XU Feifan[1]，LIANG Shihao[1]，MIAO Tao[1]，
LIU Xiaoyan[2]，ZHI Ting[2]，XIE Zili[1]，ZHANG Rong[1,3]，ZHENG Youdou[1]

（1. School of Electronic Science and Engineering，Nanjing University，Nanjing 210046，GHN；2. College of Electronics and Optical Engineering；3. College of Microelectronics，Nanjing University of Posts and Telecommunications，Nanjing 210023，CHN；3. Xiamen University，Xiamen 361005，CHN）

Abstract： Using GaN-based micron-sized LEDs (Micro-LEDs) as the light source for visible light communication (VLC) systems has become a hot research topic in recent years. In this paper，Micro-LED devices with different sizes from 40～10 μm have been designed and fabricated by deep UV lithography. The optoelectronic characteristics of GaN-based Micro-LEDs as well as modulation bandwidth performance were systematically investigated. It is found that the modulation bandwidth can be significantly increased by decreasing the device size. By optimizing sidewall passivation and electromagnetic shielding，high brightness as much as 1×10^8 cd/m^2 has been acquired by the green Micro-LED chip with 10 μm in diameter. Furthermore，the modulation bandwidth of a single blue Micro-LED of 20 μm can reach 372.6 MHz. The results show that higher modulation bandwidth can be expected for the GaN-based Micro-LED chip，and it is expected to promote the application of high-speed visible light communication system in the near future.

Key words： visible light communication (VLC)；Micro-LED；modulation bandwidth；GaN

收稿日期：2021－04－21.

基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFB0404101)；国家自然科学基金项目(61974062，62074077，62004104)；江苏省自然科学基金项目(BK20180747)；江苏省基础研究计划项目(BK20202005)；固态照明与节能电子学协同创新中心项目；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(021014380168).

*通信作者：陶　涛，刘　斌

0 引言

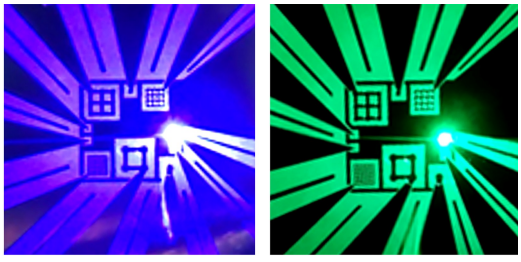
近年来,随着信息技术的飞速发展,人们对高速无线通信服务的需求不断增长,传统射频通信面临诸多挑战,尤其是目前的通信频段已经饱和,导致信息传输速率无法进一步提高[1-2],而可见光波段尚属于未开发状态,通信频段资源十分丰富[3]。此外,现有的无线射频通信仍然存在一些安全问题,例如在飞机上使用射频通信会对导航系统造成干扰,威胁飞行安全[4];大功率的电磁辐射会对人体健康产生影响;并且射频通信很容易穿透墙壁,容易引发信息安全问题[5]。近年来,可见光通信(VLC)技术作为超越传统射频通信的一项新技术路径,其广阔的发展前景和技术优势得到了学术界和产业界的广泛关注[6]。可见光通信是利用高调制带宽的 LED 芯片,在兼顾可见光照明的同时,通过人眼无法感知的高频光信号来实现快速的数据传输[7];得益于光波的传输特性,这种技术具有安全性高、保密性强、数据传输速率快、抗电磁干扰能力强以及频谱资源不受限等显著优势[8],非常适用于室内短距离通信定位、室内互联网通信等方面,具有巨大的市场前景[9]。此外,基于氮化物 LED 光源的固态照明(SSL)产业也能够为 VLC 技术的发展和产业化提供支持[10]。

氮化镓基微米 LED(Micro-LED)作为 SSL 系统中的光源,可以实现照明和通信功能的片上集成。从原理上来说,LED 的调制带宽取决于器件的 *RC* 时间常数和载流子辐射复合寿命[11],而商用大尺寸 LED 的 *RC* 时间常数较大,载流子复合寿命较长,因此光调制带宽较小,目前只能达到 10 ~ 20 MHz[12],无法满足未来高速数据通信的迫切需要。而 LED 器件的 *RC* 时间常数与寄生电容(耗尽电容和扩散电容)密切相关,通过减小器件的物理尺寸可以有效降低电容效应,从而减小 LED 器件的 *RC* 时间常数,达到提高 LED 调制带宽的目的。除此之外,LED 注入电流密度的增加可以增加有源区内的载流子密度,从而加快载流子复合速率,进一步提高调制带宽[13]。然而常规尺寸的 LED 器件面积大,在相同注入电流的条件下可承受的最大电流密度较小,无法实现高带宽的需求。因此,Micro-LED 得益于其具有尺寸小[14]、量子效率高[15]、散热能力强[16]以及电流饱和密度高[17]等优势,十分适合做 VLC 系统的光发射器。有文献报道,尺寸小于 100 μm 的氮化镓基 Micro-LED 的调制带宽可达上百兆,已被应用于 VLC 系统中[14]。本文基于高效率氮化镓基蓝/绿光 LED 芯片,利用深紫外光刻技术制备了多种尺寸的 Micro-LED 器件,系统研究了氮化镓基蓝/绿光 Micro-LED 的光电性能,具体包括电流-电压(*I-V*)特性、电致发光特性、亮度和光电调制带宽等关键性能。此外,本文还深入分析了尺寸以及注入电流密度对调制带宽的影响,经过工艺优化实现了调制带宽最高可达 372.6 MHz 的 Micro-LED 器件,为拓展氮化镓基 Micro-LED 在高速可见光通信系统中的应用奠定了基础。

1 氮化镓基 Micro-LED 的器件制备

本研究的氮化镓基 Micro-LED 外延片基于常规图形化蓝宝石衬底,采用金属有机物气相外延(MOCVD)法制备而成,外延片自下至上的结构为:430 μm 的图形化蓝宝石衬底,2.9 μm 的非掺杂 GaN 缓冲层,2.0 μm 的 n 型 GaN 层,11 个周期的 InGaN/GaN(4 nm/8.5 nm)多量子阱层(MQW),20 nm 的 AlGaN 电子阻挡层,100 nm 的 p 型 GaN 层,100 nm 的透明导电层(ITO)。Micro-LED 芯片的制备流程为:首先采用等离子体增强化学沉积法(PECVD,Oxford Plasmalab 80 Plus)在 p 型 GaN 表面沉积 SiO_2 薄膜绝缘层(200 nm);通过深紫外光刻法将像元图形转移到 SiO_2 层表面的光刻胶上;再采用反应离子刻蚀(RIE,RIE-10NR)以及等离子体刻蚀(ICP,Oxford Plasmalab System 100 ICP)法将像元图形转移到 n 型 GaN 层(刻蚀深度 800 nm),形成 Micro-LED 器件的阵列台面;利用深紫外光刻将 n 型电极图案从光刻胶层转移到 n 型 GaN 层表面;采用物理气相沉积(PVD,Kurt J. Lesker PVD75)法沉积金属作为 n 电极(Ti:30 nm/Al:150 nm/Ni:50 nm/Au:150 nm)。此时所有像素单元共用 n 型 GaN 层;然后利用 PECVD 沉积 SiO_2 作为侧壁钝化层,修复刻蚀损伤;通过光刻和 RIE 在每个 Micro-LED 台面 p 型 GaN 表面开孔;利用 PVD 沉积金属(Ti:20 nm/Au:100 nm)作为 p 电极和 n 电极的引线。特别要指出的是,引线中间的隔离槽设计是为了降低各发光单元之间的光学与电磁干扰。图 1 所示为所制备的绿光和蓝光波段的 Micro-LED 可见光通信芯片在 700 A/cm^2 工作状态下的显微照片。芯片包含八种不同物理尺寸结构:直径 5 μm 的 Micro-LED,直径 10 μm 的 Micro-LED,直径 20 μm 的 Micro-LED,直径 40 μm 的

Micro-LED；6×6 个 5 μm 阵列并联的 Micro-LED，4×4 个 10 μm 阵列并联的 Micro-LED，3×3 个 20 μm 阵列并联的 Micro-LED 和 2×2 个 40 μm 阵列并联的 Micro-LED。本研究所设计的器件尺寸，旨在研究不同尺寸的 Micro-LED 的光电性能和调制带宽特性的差异。经过工艺优化，直径 10，20 和 40 μm 的单颗 Micro-LED 芯片适合进行性能测试分析。利用探针台直接对 Micro-LED 的像素点进行点亮，测试了电流-电压（*I*-*V*）特性以及电致发光（EL）特性；并通过积分球法测试对比了不同尺寸的 Micro-LED 器件在不同注入电流密度下的光亮度特性；此外，还测试了 Micro-LED 的调制带宽性能，具体测试方法见本文第 2 节。



（a）　绿光　　（b）　蓝光

图 1　绿光与蓝光 Micro-LED 像素点亮图

2　氮化镓基 Micro-LED 的光电特性

在室温条件下，20 μm 蓝光 Micro-LED 像素单元的电致发光（EL）光谱如图 2 所示，随着注入电流密度的增大，EL 光谱中发光峰显示出蓝移的特性（发光峰位从 539 nm 蓝移至 515 nm）。LED 光谱的蓝移跟热量积累引起的带隙收缩以及量子限制斯塔克效应（QCSE）之间的复杂竞争有关[18]。此外，图 3 展示了三种不同尺寸的绿光 Micro-LED 器件在室温下的电流密度-电压（*J*-*V*）特性以及对应电流密度下的光亮度特性，从结果中可以看出尺寸越

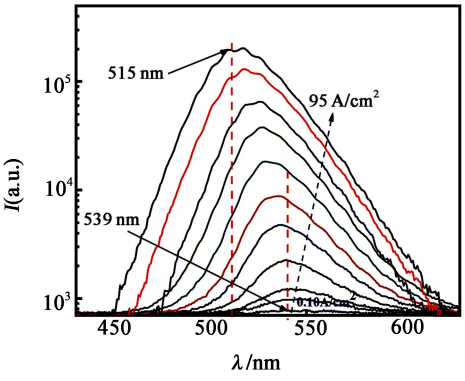


图 2　直径 20 μm 蓝光 Micro-LED 像素点 EL 特性曲线

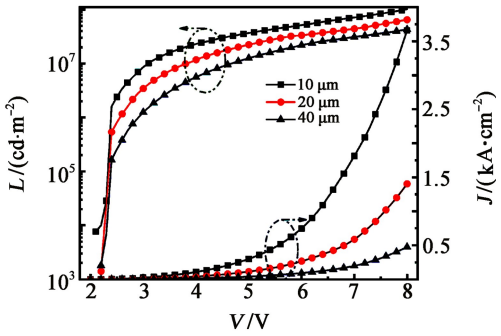


图 3　三种尺寸绿光 Micro-LED 像素点的亮度特性曲线以及电流密度-电压特性曲线

小的 Micro-LED，所能承受的电流密度越大。从图 3 还可以看出单一尺寸的 Micro-LED 在开启后，随着所加电压的增大，器件亮度迅速升高，最终很快达到高亮状态并趋于饱和。本研究中，直径 10 μm 的绿光 Micro-LED 在 3.7 kA/cm² 的电流密度下，亮度（*L*）可达 1×10^8 cd/m²。因此，可以认为 Micro-LED 的物理尺寸越小，越能在更低电流密度下获得对应单位面积上足够的亮度，从而更有利于满足可见光通信系统对光源的需求。

3　氮化镓基 Micro-LED 的调制带宽

频率响应是 LED 作为可见光通信系统光源非常重要的参数之一，根据频率响应曲线可以得到 LED 的调制带宽。LED 光源的调制带宽从根本上决定了通信系统的信道容量和传输速率，一般来说，调制带宽的定义是输出的交流光功率下降到低频参考值的一半时（−3 dB）的频率，因此又称−3 dB 带宽（$f_{-3\,\mathrm{dB}}$），其受到 LED 的 *RC* 时间常数和载流子辐射复合寿命的影响，满足如下公式[19]：

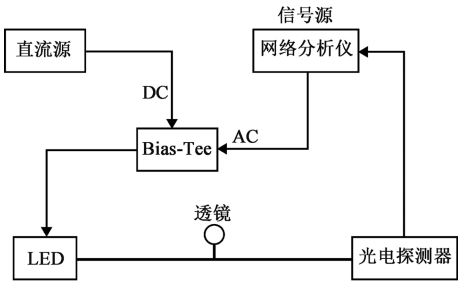
$$f_{-3\,\mathrm{dB}}=\frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau}=\frac{\sqrt{3}}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{\mathrm{R}}}+\frac{1}{\tau_{\mathrm{NR}}}+\frac{1}{\tau_{\mathrm{RC}}}\right)\tag{1}$$

其中，τ_{R} 是辐射复合寿命，τ_{NR} 是非辐射复合寿命，τ_{RC} 是 *RC* 时间常数。*RC* 时间常数与寄生电容（耗尽电容和扩散电容）密切相关，减小器件的物理尺寸可以有效降低电容效应，从而减小 LED 器件的 *RC* 时间常数，达到提高 LED 调制带宽的目的。此外，对于尺寸小于 100 μm 的 Micro-LED，辐射复合寿命 τ_{R} 也是限制调制带宽的主要因素之一[18]，它主要取决于载流子密度 *N*，满足 $\tau_{\mathrm{R}}=1/(B\cdot N)$，其中，*B* 是辐射复合系数；电流密度 *J* 的增加会导致 *N* 的增加，调制带宽还可以写成[19]：

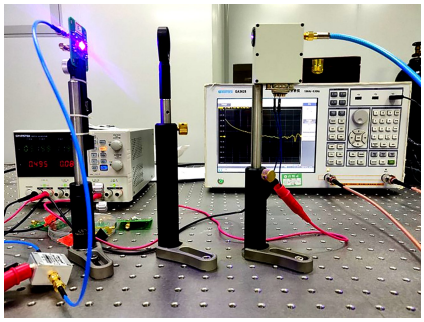
$$f_{-3\,\mathrm{dB}}=\frac{\sqrt{3}}{2\pi}\sqrt{\frac{BJ}{qt}} \tag{2}$$

其中，q 是基本电荷，t 是有源区厚度。小尺寸的 Micro-LED 能够在更小的电流下实现更高的注入电流密度，从而提高量子阱有源区内的载流子浓度，加快载流子辐射复合。此外，Micro-LED 器件尺寸的减小也会导致几何电容的减小，从而减小 RC 时间常数。结合公式可以看出，RC 时间常数的减小和载流子辐射复合寿命的降低都可以提高器件的调制带宽，对应的便是减小器件的物理尺寸和增加注入的电流密度。因此，选用能在大电流密度下工作的小尺寸 Micro-LED 是作为可见光通信系统光源的主要趋势。

本文通过自主搭建的可见光通信测试平台对 Micro-LED 器件的调制带宽性能进行了测试，图 4 为 Micro-LED 调制带宽的测试系统的示意图与实物图。测试中，将制备好的 Micro-LED 芯片各尺寸像素单元利用铝线引出焊接到 PCB 板上，再利用直流电源对 Micro-LED 加载电偏置，通过网络分析仪对 Micro-LED 进行交流信号调制，两者通过三端偏置器耦合共同施加给被测 Micro-LED 器件，Micro-LED 发出的光经过凸透镜聚焦后传输给光电探测器，探测器将接收到的光信号转化为电信号传回网络分析仪的输入端口，网络分析仪所测得的 S_{21} 参数是功率随频率变化的函数[17]，也即频率响应曲线，



(a) 示意图

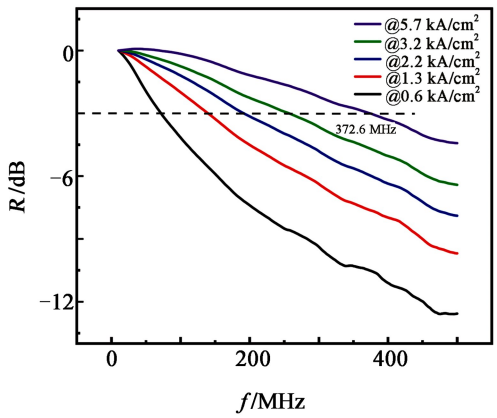


(b) 实物图

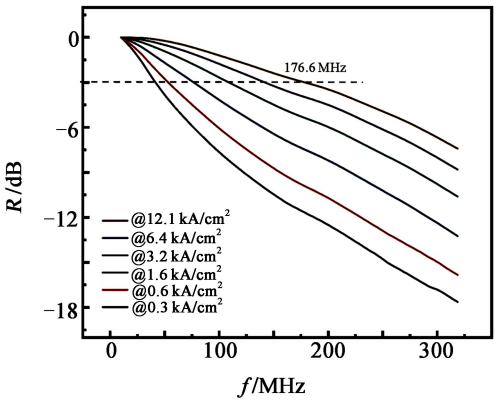
图 4 可见光通信测试平台示意图与实物图

根据频率响应曲线便可以得到器件的调制带宽。带宽是 LED 的固有属性，不会随传输距离的改变而改变，本文着重探究的是器件的调制带宽特性，因此并未对传输距离做出调整。

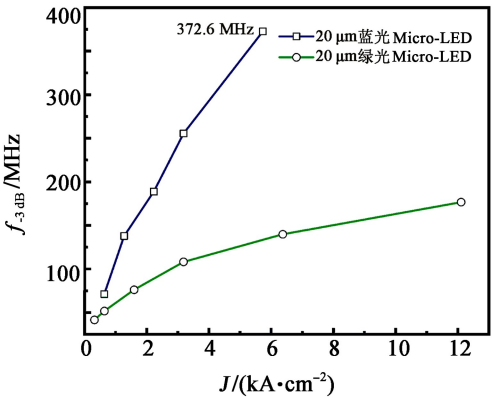
图 5(a)和(b)分别展示了蓝光和绿光 20 μm 的 Micro-LED 像素点在不同的注入电流密度下的频率响应特性。图中黑色虚线代表－3 dB 调制带宽，可以看出，蓝光单颗 20 μm Micro-LED 在注入电流密度为 5.7 kA/cm^2 时，调制带宽可达 372.6 MHz，绿光单颗 20 μm Micro-LED 在注入电流密度为 12.1 kA/cm^2 时，调制带宽可达 176.6 MHz。如图 5(c)所示，调制带宽随着注入电流密度的增加而增大，这与前文分析的结果一致，也与研究报道的调制带宽随注入电流密度的变化趋势一致[20]。图 5(d)展示了绿光 Micro-LED 像素点的尺寸大小对调制带宽的影响，从图中可以看出，尺寸越小，对应的调制带宽越大，这是因为较小尺寸的 Micro-LED 具有可以在较高电流密度下工作的特性，与其他文献结果报道结果一致[21]。



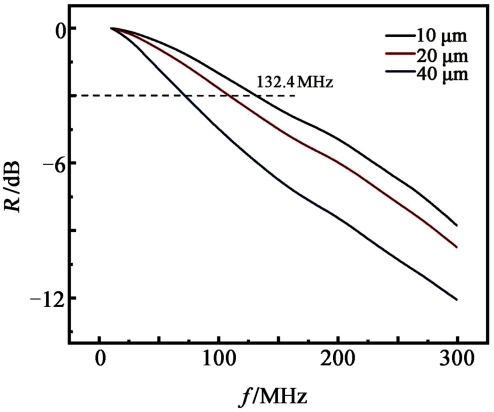
(a) 蓝光单颗 20 μm Micro-LED 像素点在不同注入电流下的频率响应曲线



(b) 绿光单颗 20 μm Micro-LED 像素点在不同注入电流下的频率响应曲线



(c)　蓝光和绿光单颗 20 μm Micro-LED 像素点的调制带宽随注入电流变化曲线



(d)　不同尺寸绿光单颗 Micro-LED 像素点在 10 mA 注入电流下的频率响应曲线

图 5　Micro-LED 频响特性曲线

4　总结

本文设计并制备了多种规格的小尺寸氮化镓基 Micro-LED 器件，通过工艺优化实现了直径 10 μm 的高效率蓝/绿光 Micro-LED 器件，系统分析了 Micro-LED 器件尺寸与其光电特性以及调制带宽能力的密切关系。其中 10 μm 尺寸的绿光 Micro-LED 在 3.7 kA/cm^2 的电流密度下亮度可达 1×10^8 cd/m^2。研究表明，Micro-LED 器件的调制带宽随着器件尺寸的减小而增大，且随着电流密度的增大而增大。其中，20 μm 蓝光 Micro-LED 在注入电流密度为 5.7 kA/cm^2 时，调制带宽可达 372.6 MHz，展现出 Micro-LED 器件在可见光通信领域的巨大潜力，为进一步研究基于 Micro-LED 的高速可见光通信以及并行数据传输奠定了基础。

参考文献：

[1] Khan L U. Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges [J]. Digital Communications and Networks, 2017, 3(2): 78-88.

[2] Hussain B, Li X, Che F, et al. Visible light communication system design and link budget analysis[J]. J. of Lightwave Technol., 2015, 33(24): 5201-5209.

[3] Cisco V. Cisco visual networking index: Forecast and trends, 2017-2022[J]. White Paper, 2018.

[4] Ismail S N, Salih M H. A review of visible light communication (VLC) technology [C]// 2nd International Confer. on Materials Engineering and Science, 2020, 020289.

[5] Kadirvelu S B V. Design and implementation of visible light communication system in indoor environment[J]. ARPN J. of Engineering and Appl. Sciences, 2015, 10: 2882-2886.

[6] Pathak P H, Feng X, Hu P, et al. Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 17(4): 2047-2077.

[7] Karunatilaka D, Zafar F, Kalavally V, et al. LED based indoor visible light communications: State of the art[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 17(3): 1649-1678.

[8] Burchardt H, Serafimovski N, Tsonev D, et al. VLC: Beyond point-to-point communication [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 98-105.

[9] Manikandan M, Nirmal D, Ajayan J, et al. A review of blue light emitting diodes for future solid state lighting and visible light communication applications [J]. Superlattices and Microstructures, 2019, 136: 106294.

[10] Chow C W, Yeh C H, Liu Y F, et al. Improved modulation speed of LED visible light communication system integrated to main electricity network[J]. Electron. Lett., 2011, 47(15): 867-U1954.

[11] 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.

[12] Grubor J, Lee S C J, Langer K D, et al. Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs [C]// 33th European Confer. and Exhibition of Optical Communication, 2007: 1-2.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Choi H W, Jeon C W, Dawson M D, et al. Mechanism of enhanced light output efficiency in InGaN-based microlight emitting diodes[J]. J. of Appl. Phys., 2003, 93(10): 5978-5982.

（下转第 487 页）

297-303.

[2] 王夏宵，冯志芳，于　佳，等. 光源功率对光纤电流互感器的性能影响研究[J]. 半导体光电，2016，37(3)：445-454.
Wang Xiaxiao，Feng Zhifang，Yu Jia，et al. Influence of SLD's power on performance of fiber optical current transformer[J]. Semiconductor Optoelectronics，2016，37(3)：445-454.

[3] Huang D，Swanson E A，Lin C P，et al. Optical coherence tomography[J]. Science，1991，254(5035)：1178-1181.

[4] 黄英俊，贺慧勇，李章承，等. 超辐射发光二极管光源组件内部电场耦合分析[J]. 半导体光电，2019，40(4)：484-488，493.
Huang Yingjun，He Huiyong，Li Zhangcheng，et al. Analysis of electric field coupling in SLD light source module[J]. Semiconductor Optoelectronics，2019，40(4)：484-488，493.

[5] Zhou Shuai，Tang Zurong，Liu Shangjun，et al. Superluminescent diode at 0.8 μm with a GaAsP/AlGaAs tensile-strained quantum well[J]. Physica Status Solidi (a)，2018，215：1800176.

[6] 刘　科，宋爱民，田　坤，等. 一种大功率低偏振度量子阱超辐射发光二极管[J]. 半导体光电，2013，34(6)：949-953.
Liu Ke，Song Aimin，Tian Kun，et al. Quantum well superluminescent diodes with high power and low polarization degree[J]. Semiconductor Optoelectronics，2013，34(6)：949-953.

[7] Batovrin V K，Garmash I A，Gelikonov V M，et al. Superluminescent diodes based on single-quantum-well (GaAl)As heterostructures[J]. Quantum Electron.，1996，26：109.

[8] Li Z Q，Li Z M S. Comprehensive modeling of superluminescent light-emitting diodes[J]. IEEE J. of Quantum Electron.，2010，46：454.

[9] Chong T C，Fonstad C G. Theoretical gain of strained layer semiconductor lasers in the large strain regime[J]. IEEE J. of Quantum Electron.，1989，25(2)：171.

[10] Lee J，Tanaka T，Sasaki S，et al. Novel design procedure of broad-band multilayer antireflection coatings for optical and optoelectronic devices[J]. J. of Lightwave Technol.，1998，16(5)：884-891.

[11] 缪毅强，毛书正，罗琦琨. 宽带增透膜反射光谱的理论与实测偏差的修正[J]. 红外与毫米波学报，2001，20(6)：429-432.
Miao Yiqiang，Mao Shuzheng，Luo Qikun. Correction of deviation between theory and experiment for reflection spectrum of broad-band anti-reflection coating[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves，2001，20(6)：429-432.

[12] Zhang Z Y，Luxmoore I J，Jiang Q，et al. Broadband quantum dot superluminescent LED with angled facet formed by focused ion beam etching[J]. Electron. Lett.，2007，43(10)：587-588.

[13] Ghazal O M S，Childs D T，Stevens B J，et al. GaAs-based superluminescent diodes with window-like facet structure for low spectral modulation at high output powers[J]. Semiconductor Science and Technol.，2016，31(4)：045003.

作者简介：

周　帅(1987－)，男，河北石家庄人，高级工程师，主要从事半导体光源的研究工作。

(上接第 473 页)

[16] Zhang S. High performance Ⅲ-nitride light-emitting diodes for visible light communications and micro-displays[D]. Glasgow：University of Srathclyde，2015.

[17] Tian P F. Novel micro-pixelated Ⅲ-nitrid light emitting diodes：fabrication，efficiency studies and applications[D]. Glasgow：University of Srathclyde，2014.

[18] 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)：013103.

[19] Haemmer M，Roycroft B，Akhter M，et al. Size-dependent bandwidth of semipolar (11(2)over-bar2) light-emitting-diodes[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2018，30(5)：439-442.

[20] 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.

[21] Liu Y，Zhang K，Hyun B-R，et al. High-brightness InGaN/GaN Micro-LEDs with secondary peak effect for displays[J]. IEEE Electron Device Lett.，2020，41(9)：1380-1383.

作者简介：

王　轩(1996－)，男，陕西宝鸡人，硕士研究生，研究方向为基于 Micro-LED 的可见光通信芯片；

陶　涛(1987－)，男，博士，副教授，研究方向为宽带隙半导体材料及异质结构、Ⅲ族氮化物半导体光电子器件、半导体固态照明技术，以及等离激元纳米激光；

刘　斌(1980－)，男，博士，教授，博导，研究方向为宽带隙半导体材料及异质结构、Ⅲ族氮化物半导体光电子器件，以及半导体固态照明与 Micro-LED 显示技术。