光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.007

1 310 nm 大功率高偏振度量子阱超辐射发光二极管

周　帅[1*]，许　璠[2]，田　坤[1]，张　靖[1]，庞福滨[3]，刘尚军[1]，任　涛[1]，廖　柯[1]

（1. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；2. 国网江苏省电力有限公司，南京 210024；
3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211103）

摘　要： 设计并制备了一种斜条脊波导结构压应变高偏振度多量子阱超辐射发光二极管。设计的脊波导出光面 TiO_2/SiO_2 四层宽带增透膜的 TE 模式反射率约为 10^{-6}，分析了脊波导角度偏差和膜层厚度偏差对增透膜反射率的影响。实验结果表明，在 250 mA 直流电流驱动下，所设计的超辐射发光二极管芯片单管输出功率可达 22.7 mW，出射光谱 FWHM 约为 37.3 nm，光谱纹波系数低于 0.15 dB，TE 模式输出光强占主导，偏振度约为 19.2 dB。

关键词： 压应变多量子阱；超辐射发光二极管；增透膜；偏振度

中图分类号： O484.5　**文章编号：** 1001－5868(2021)04－0483－05

1 310 nm Quantum-well Superluminescent Diode with High Power and High Degree of Polarization

ZHOU Shuai[1], XU Jin[2], TIAN Kun[1], ZHANG Jing[1], PANG Fubin[3], LIU Shangjun[1], REN Tao[1], LIAO Ke[1]

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 210024, CHN;
3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 211103, CHN)

Abstract: Ridge-waveguide superluminescent diodes (SLD) with compressive strain multi-quantum-well were designed and fabricated. The TE mode reflectivity of the TiO_2/SiO_2 four-layer broadband antireflection film is about 10^{-6}, and the effects of the deviation of the angle of the ridged waveguide and the thickness of the film on the reflectivity of the antireflection film are analyzed. The experimental results show that the single-tube output power of the designed SLD chip can reach 22.7 mW, the output spectrum FWHM is about 37.3 nm, the spectral ripple coefficient is less than 0.15 dB, and the TE mode output intensity is dominant with a polarization degree of about 19.2 dB under 250 mA DC current.

Key words: compressive strain multi-quantum-well; superluminescent diodes; antireflection coating; polarization degree

0　引言

超辐射发光二极管(SLD)是一种自发辐射单程放大的光电器件，具有输出功率大、光谱宽度宽、相干长度短等优点，广泛应用于光纤陀螺(FOG)、光纤电流互感器(FOCT)、低相干光时域反射仪(Low-coherence OTDR)、光纤传感(FOS)、光纤相干层析技术(OCT)等领域[1-4]。本文在充分考虑影响 SLD 偏振敏感性因素的基础上，设计了一种 InGaAlAs/InP 应变多量子阱结构 SLD，采用 MOCVD 外延技术进行了芯片材料生长。测试结果表明，在 250 mA 驱动电流下，器件单管输出功率可达 22.7 mW，光纤耦合输出功率为 11.8 mW，偏振度约为 19.2 dB。

收稿日期：2021－01－25.
基金项目：国家电网有限公司科技项目(5700-202018483A-0-0-00).
*通信作者：周　帅

1　偏振敏感性

光在 SLD 芯片有源区内是以电磁波的形式传

播的，包括电场分量垂直于有源层生长方向的 TE 模和电场方向平行于有源层生长方向的 TM 模。SLD 的偏振度可表示为

$$p=\frac{P_{\mathrm{TE}}-P_{\mathrm{TM}}}{P_{\mathrm{TE}}+P_{\mathrm{TM}}}\times 100\% \tag{1}$$

式中，P_{TE} 和 P_{TM} 分别为 TE 模和 TM 模的光强。当仅存在 TE 模或 TM 模一种光强时，光源的偏振度为 100%，即线偏振光。因此，通过提高其中一种模式的光强，降低另外一种模式的光强，可以获得高偏振性能。

SLD 的输出光功率可表示为[5]

$$P_{\mathrm{out}}=\int\frac{(\Gamma/c)R_{\mathrm{sp}}}{\Gamma G-\alpha}\{\exp[(\Gamma G-\alpha)L]-1\}\mathrm{d}E \tag{2}$$

式中，Γ 为光限制因子，G 为材料增益，α 为材料损耗系数，L 为有源区腔长，R_{sp} 为自发辐射速率。由式(2)可知，TE 和 TM 输出光功率与模式净增益 g 有关，$g=\Gamma G-\alpha$。通常情况下，SLD 有源层的条宽远大于其厚度，使得有源层对 TE 模式的限制因子大于 TM 模的限制因子[6]，即 $\Gamma_{\mathrm{TE}}>\Gamma_{\mathrm{TM}}$，而 TE 和 TM 模式的损耗系数 α 差异不大[7]。材料增益 G 可表示为[8]

$$G=C_0\sum_{i,j}\int\mathrm{d}k\ \frac{k\mid M_{i,j}\mid^2\gamma/(2\pi)}{(f_i^{\mathrm{c}}-f_i^{\mathrm{v}}-E)+(\gamma/2)^2}[f_i^{\mathrm{c}}-f_i^{\mathrm{v}}]$$

$$C_0=\frac{2e^2h}{n_{\mathrm{r}}\varepsilon_0 cm^2L_zE} \tag{3}$$

式中，e 为电子电荷，n_{r} 代表有源区的有效折射率，ε_0 为真空介电常数，m 为自由电子质量，L_z 为量子阱厚度，γ 为展宽因子，i 和 j 分别代表电子和空穴子带，f_i 为导带或价带的费米能级分布函数。

对于 TE 偏振模式，导带能级到重空穴带、导带能级到轻空穴带的跃迁矩阵元分别表示为[9]

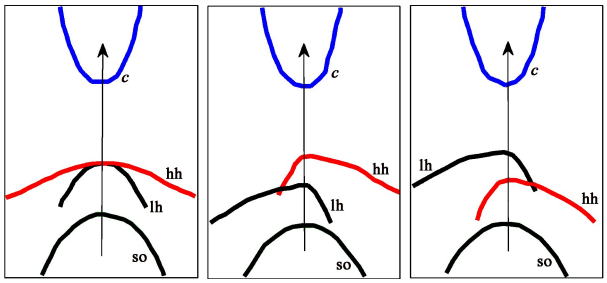
$$\begin{cases}\mid M_{i,\mathrm{hh}j}\mid^2=M_0^2/2\\ \mid M_{i,\mathrm{lh}j}\mid^2=M_0^2/6\end{cases} \tag{4}$$

对于 TM 偏振模式，导带能级到重空穴带、导带能级到轻空穴带的跃迁矩阵元分别表示为[9]

$$\begin{cases}\mid M_{i,\mathrm{hh}j}\mid^2=0\\ \mid M_{i,\mathrm{lh}j}\mid^2=2M_0^2/3\end{cases} \tag{5}$$

式中，M_0 为偶极矩阵元。由两式可知：导带到重空穴带的跃迁仅对 TE 模式有贡献，导带到轻空穴带的跃迁对 TM 模式的贡献是对 TE 模式的 4 倍。

应变量子阱的能带结构较无应变量子阱会发生改变，如图 1 所示，压应变量子阱价带的子带顶是重空穴带，注入空穴大部分占据 E_{hh1} 能级，而对于 E_{c1} 至 E_{hh1} 的光跃迁总是有利于 TE 模式；而张应变量子阱价带的子带顶是轻空穴带，注入空穴大部分占据 E_{lh1} 能级，而对于 E_{c1} 至 E_{lh1} 的光跃迁总是有利于 TM 模式。本文采用提高 TE 模式输出的压应变 InGaAlAs/InP 多量子阱结构制备了高偏振度 SLD。



(a) 无应变 (b) 压应变 (c) 张应变

图 1 不同应变状态下应变量子阱在动量空间的能带结构

2 宽带增透膜理论设计

为了有效地抑制 FP 腔中的光反馈，降低 SLD 的纹波系数，要求腔面反射率达到 10^{-4} 或更低[10]。对于一些简单的应用，单层或双层增透膜即可满足需求，但单层增透膜能优化的材料参数和膜层厚度有限，实时监控较为困难，很难获得优于 10^{-4} 的反射率；双层增透膜虽然能够获得较低的反射率，但反射谱为“V”型曲线，低反射谱宽度较窄[11]。为满足在较宽波长范围内实现低反射率的需求，本文设计了反射率约为 10^{-6} 的四层宽带增透膜，同时分析了波导角度偏差和膜层厚度偏差对增透膜反射率的影响。仿真结果表明，为保障镀膜效果，应设计尽可能低的反射率膜系结构，以提高镀膜工艺容差。

由于大部分镀膜材料的消光系数在可见光和近红外波段几乎为零，膜层介质对光的吸收可以忽略，同时假设基底材料的吸收系数为零且无色散，入射光为平行光。N 层镀膜结构示意图如图2所示，光

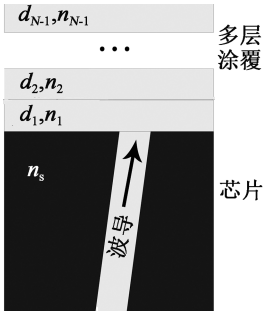


图 2 多层膜结构示意图

由基底材料波导经多层增透膜向空气中出射，波导入射角度为 θ_s。此时，膜系可表示为$(n_s,\theta_s)/(d_1,n_1,\theta_1)/(d_2,n_2,\theta_2)/\cdots/(d_{N-1},n_{N-1},\theta_{N-1})/(d_N,n_N,\theta_N)/(n_0,\theta_0)$，其中，$d_r$，$n_r$ 和 θ_r 分别是第 r 层的物理厚度、折射率和折射角，r 取值范围为 s，1～N，0，其中 n_s 为基底材料折射率，n_0 和 θ_0 分别为空气折射率和出射角度。

多层薄膜可以用一层虚拟的等效界面替代，该等效界面的导纳表示为

$$Y=C/B \tag{6}$$

其中，B 和 C 由特征矩阵给出：

$$\begin{bmatrix}B\\C\end{bmatrix}=\left(\prod_{r=1}^{N}\begin{bmatrix}\cos\delta_r & (\mathrm{i}\sin\delta_r)/\eta_r\\ \mathrm{i}\eta_r\sin\delta_r & \cos\delta_r\end{bmatrix}\right)\begin{bmatrix}1\\\eta_0\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中，$\delta_r=2\pi n_r d_r\cos\theta_r/\lambda$。对 TE 偏振波，$\eta_r=n_r\cos\theta_r$，对 TM 偏振波，$\eta_r=n_r/\cos\theta_r$。那么，反射率可表示为

$$R=\left(\frac{\eta_s B-C}{\eta_s B+C}\right)\left(\frac{\eta_s B-C}{\eta_s B+C}\right)^{*} \tag{8}$$

本文芯片有源区采用 InGaAlAs 压应变多量子阱结构，以保证材料的模式净增益 g_{TE} 远大于 g_{TM}。基底有效折射率为 3.28，波导入射角为 10°，膜层材料 SiO_2 折射率为 1.45，TiO_2 折射率为 2.1。此时仅需考虑增透膜对 TE 模式光功率的反射，设计的四层增透膜结构为 208 nm(SiO_2)/210 nm(TiO_2)/338 nm(SiO_2)/132 nm(TiO_2)，反射率随波长的变化如图 3 所示，在 1 283～1 338 nm 波长范围内对 TE 模式的反射率均小于 10^{-5}，在 1 297～1 329 nm 波长范围内可实现 10^{-6} 的反射率。

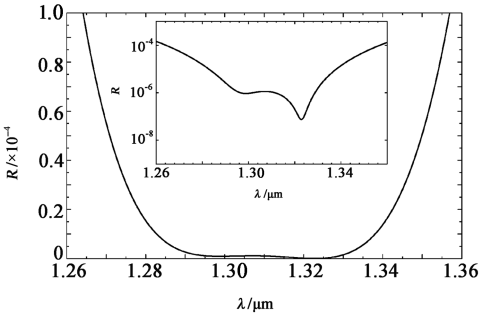


图 3　TE 模式反射率随波长变化情况

如图 4 所示，当入射角存在±1°偏差时，即入射角从 9°变化到 11°的情况下，TE 偏振模式的最低反射率提高至 10^{-4} 量级，较小的角度偏差就可能引起较大的反射率差异，如图 5 所示。膜层厚度作为镀膜工艺中最重要的变量之一，在增透膜设计过程中，必须考虑厚度误差对反射率的影响，图 6 给出了膜层厚度误差为±1%时对反射率的影响，TE 偏振模式的最低反射率提高至接近 10^{-3} 量级。本文通过在谐振腔面蒸镀宽带增透膜，结合斜条波导[12]和无源吸收区[13]结构，充分抑制 FP 腔中的光反馈，降低了 SLD 的纹波系数。

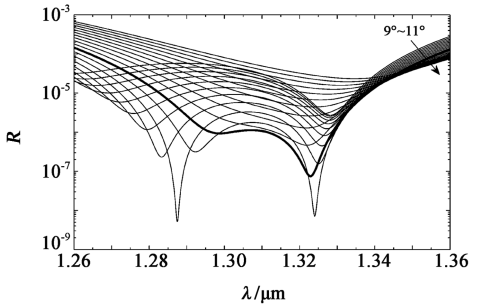


图 4　角度偏差对 TE 模式反射率的影响

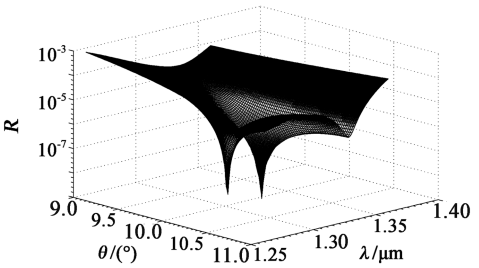


图 5　角度偏差对 TE 模式反射率的影响

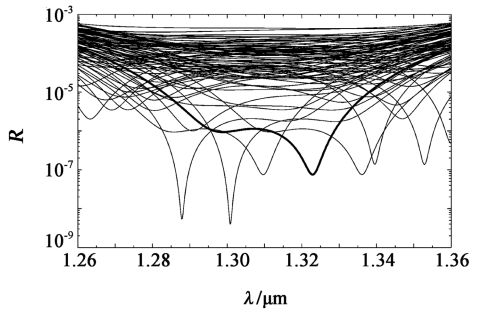


图 6　厚度偏差对 TE 模式反射率的影响

3　芯片制备

本文设计了基于 InGaAlAs/InP 材料的 1 310 nm 量子阱斜条脊波导结构超辐射发光二极管，如图 7 所示，器件采用压应变多量子阱结构提高 TE 模式输出强度，以提升 SLD 偏振度；量子阱有源层两边由 Al 组分渐变的 InGaAlAs 材料构成分别限制折射率渐变波导结构(GRIN-SCH)，SLD 芯片外延结构如表 1 所示。

采用 MOCVD 外延技术生长芯片材料，沿燕尾槽方向光刻湿法腐蚀斜条脊波导，波导倾斜角为 10°，采用自对准工艺制作电极窗口，磁控溅射 Ti/Pt/Au p 面金属电极，n 面减薄后，制作 Ti/Pt/Au n

面金属电极；晶圆解理成 Bar 条，芯片有源区长度 L_1 为 700 μm，吸收区长度 L_2 为 500 μm；Bar 条两端镀制四层增透膜后，解理成单管，将 SLD 单管通过压焊机焊接在热沉上后进行测试。

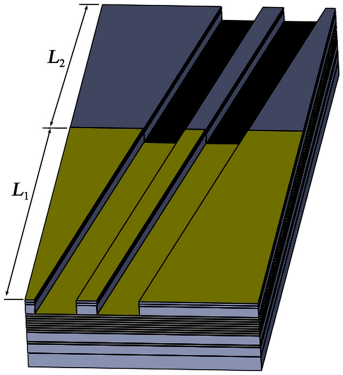


图 7 SLD 芯片结构示意图

表 1 SLD 芯片外延结构

外延层	外延材料	厚度/μm	掺杂浓度/cm^{-3}
接触层	p^+-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	0.2	1×10^{19}
平滑层	p-$In_{0.71}Ga_{0.62}As_{0.62}P$(1.3Q)	0.05	3×10^{18}
包层	p-InP	1.5	1×10^{18}
腐蚀终止层	p-$In_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.33}P$(1.1Q)	0.02	1×10^{18}
包层	p-InP	0.1	1×10^{18}
上限制层	$In_{0.52}Al_{0.48}As$	0.05	/
上波导层	$In_xGa_yAl_{1-x-y}As$ x：0.53～0.52，y：0.203～0	0.1	/
压应变多量子有源层	$In_xGa_yAl_{1-x-y}As$		/
下波导层	$In_xGa_yAl_{1-x-y}As$ x：0.52～0.53，y：0～0.203	0.1	/
下限制层	n-$In_{0.52}Al_{0.48}As$	0.1	5×10^{17}
缓冲层	n-InP	0.5	1×10^{18}
衬底	n^+-InP	/	3×10^{18}

4 测试结果

图 8 所示为芯片单管镀增透膜前后功率-电流-电压曲线，由图可知，SLD 单管功率-电流特性介于发光二极管和激光二极管特性之间，无明显的阈值拐点。镀增透膜前，在 250 mA 注入电流下，单管输出功率约为 17.3 mW，正向工作电压为 1.8 V；镀增透膜后，单管输出功率可达 22.7 mW；采用旋转偏振片的测试方法分别测试单管在 TE 和 TM 两个方向的光强输出，如图 9，TE 模式功率 P_{TE} 相对强度为 13.3，TM 模式功率 P_{TM} 相对强度为 0.4，TE 模式输出光强占主导。单管经保偏光纤耦合后，尾纤输出功率为 11.8 mW，耦合效率约为 52%。图 10 是 SLD 的出射光谱图，在 250 mA 注入电流下，SLD 的中心波长为 1 310.3 nm，半高全宽(FWHM)约为 37.3 nm，光谱纹波系数小于 0.15 dB，表明器件激射现象被有效地抑制。对 SLD 的尾纤输出偏振特性进行测试，偏振度可达 19.2 dB。

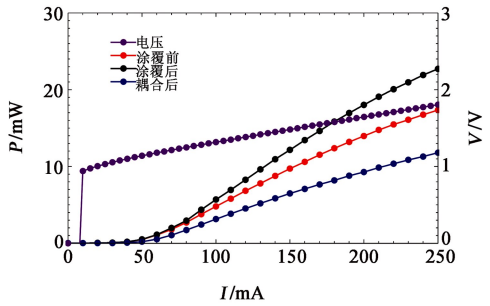


图 8 SLD 单管功率-电流-电压测试曲线

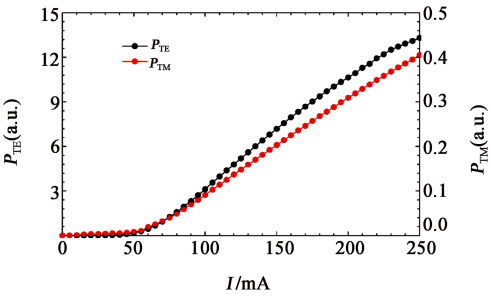


图 9 SLD 单管 TE 和 TM 模式相对强度对比曲线

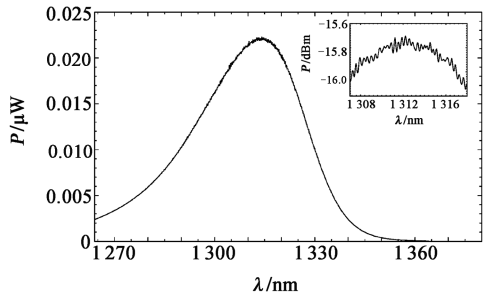


图 10 SLD 单管出射光谱图

5 结论

本文分析了压应变和张应变对有源层 TE 模式和 TM 模式输出特性的影响，提出了制备高偏振度 SLD 芯片的方法。充分考虑了波导角度偏差和镀膜厚度偏差对增透膜反射率的影响，设计了反射率约为 10^{-6} 的四层 SiO_2/TiO_2 增透膜。制备了斜条脊波导压应变多量子阱 SLD 芯片，测试结果表明，本文所设计的 SLD 芯片功率可达 22.7 mW，TE 模式占主导，光纤耦合偏振度约为 19.2 dB，具有良好的偏振输出特性。

参考文献：

[1] 王佐才，吕雪芹，金 鹏，等. 超辐射发光二极管的应用[J]. 红外技术，2010，32(5)：297-303.
Wang Zuocai，Lv Xueqin，Jin Peng，et al. Applications of superluminescent diodes[J]. Infrared Technol.，2010，32(5)：

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。