

doi:10.3788/gzxb20134207.0757

GaN 垒层厚度渐变的双蓝光波长发光二极管

李正凯, 严启荣, 罗长得, 肖汉章, 章勇

(华南师范大学 光电子材料与技术研究所, 广州 510631)

摘 要:针对单蓝光波长芯片与 $Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$ 黄光荧光粉封装白光发光二极管存在显色性不足的问题, 提出了采用双蓝光波长芯片激发 $Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$ 黄光荧光粉实现高显色性白光发射法, 并分析了其可行性. 利用金属有机化学气相沉积系统在(0001)蓝宝石衬底上顺序生长两个 $In_{0.18}Ga_{0.82}N/GaN$ 量子阱和两个 $In_{0.12}Ga_{0.88}N/GaN$ 量子阱的双蓝光波长发光二极管, 并对不同 GaN 垒层厚度的双蓝光波长发光二极管的光电性能进行分析, 结果表明沿 n-GaN 到 p-GaN 方向减小 GaN 垒层厚度能实现双蓝光发射, 并有较好的发光效率. 交流阻抗谱结果显示相关双蓝光波长发光二极管可以用一个电阻 R_p 与电容 C_p 并联后与一个 R_s 串联电路来模拟, GaN 垒层变化能调节并联电阻和电容, 对串联电阻没有影响. 此外, 基于垒层减小的双蓝光波长芯片激发 $Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$ 荧光粉实现了高显色指数的白光发射.

关键词: GaN; 垒层厚度; InGaN/GaN 量子阱; 双蓝光波长

中图分类号: O242.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)07-0757-6

Dual-blue Wavelength Light-emitting Diodes Based on Varied GaN Barrier Thickness

LI Zheng-kai, YAN Qi-rong, LUO Chang-de, XIAO Han-zhang, ZHANG Yong

(Institute of Optoelectronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: Due to low color rendering index of white light-emitting diodes based on packing of single-blue wavelength chip and $Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$ yellow phosphors, using dual-blue wavelength chip, $Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$ yellow phosphor is proposed to realize high color rendering index white emission, and feasibility of the method is analyzed. Dual-blue wavelength light-emitting diodes based on two pairs of $In_{0.18}Ga_{0.82}N/GaN$ quantum-well and two pairs of $In_{0.12}Ga_{0.88}N/GaN$ quantum-well structure were grown sequentially on the same sapphire substrate by metal-organic chemical vapor deposition. Optoelectronic properties of dual-wavelength light-emitting diodes with different GaN barrier thicknesses were also studied. The experimental results indicate that efficient dual-blue-wavelength emission and higher luminescent efficiency are realized from light-emitting diodes by reducing GaN barrier thickness from n-GaN to p-GaN. The a. c. impedance spectroscopy can be explained in terms of the equivalent series circuit model of a set of parallel resistor-capacitor R_pC_p and a resistor R_s for the dual-blue wavelength light-emitting diodes. Varied GaN barrier thickness can tune parallel resistor and capacitor while it has no effect on series resistor. In addition, $Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$ phosphor-converted white light emission with high color rendering index is achieved by use of dual-blue emitting active regions from reducing barrier thickness.

Key words: GaN; Barrier thickness; InGaN/GaN quantum well; Dual-blue wavelength

基金项目: 国家自然科学基金(No. U1174001)、广东省自然科学基金(No. S2011010003400)、广东省科技攻关项目(No. 2012B010200032)和 华南师范大学学生课外科研重点课题项目(No. 12GDKC05)资助

第一作者: 李正凯(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电子材料与器件物理. Email: happyzlzk3862@163.com

导师(通讯作者): 章勇(1971-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为 GaN 基光电材料与器件及有机光电材料与发光器件. Email: zycq@sclu.edu.cn

收稿日期: 2013-02-19; 录用日期: 2013-04-28

0 引言

近年来, GaN 基白光发光二极管 (Light-Emitting Diode, LED) 因其使用寿命长、高效节能、绿色环保等优点被誉为继白炽灯、荧光灯、气体放电之后的第四代照明光源, 被广泛应用于液晶显示器 (Liquid Crystal Display, LCD)、手机、数码相机等领域^[1-2]. 目前实现氮化物白光 LED 广泛采用的方案有两种: 1) 以 InGaN 基蓝光或紫光 LED 为基础光源, 通过荧光粉实现荧光下转换^[3-5]; 2) 多芯片混色的白光 LED. 由于后者发光全部来自发光二极管, 因此, 制作成本较高, 另外由于三种颜色发光二极管之间老化特性的差异, 常导致发光过程中变色. 目前广泛采用 InGaN 基蓝光或紫光 LED 加荧光粉的方法, 但是, 无机荧光粉一般面临着光致转换效率低及色散指数 (Color-Rendering Index, CRI) 低等缺点^[6-8]. 此外, 无荧光粉的单芯片白光 LED 也已有报道^[9-13], 主要是在同一个蓝宝石衬底上依次生长两种或三种 InGaN/GaN 多量子阱结构的 LED, 调节 In 组分来实现从蓝光到红光的发射从而合成白光, 然而, InGaN/GaN 基 LED 的红光部分发光效率较低, 导致相关白光 LED 发光效率远低于蓝光加荧光粉的白光 LED 的效率. 最近, Mirhosseini 等人通过模拟结果显示利用双蓝光波长 LED 涂覆 $Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$ (YAG : Ce) 荧光粉能够在保持高的发光效率的同时得到高显色指数的白光 LED^[14]. 本文采用混合多量子阱结构实现单芯片双蓝光波长发射, 提高蓝光发射光谱的半高宽, 并基于这种宽光谱的蓝光芯片激发 YAG : Ce 荧光粉实现了高显色性的白光 LED^[15], 然而相关白光 LED 的发光效率较低.

近期, 有许多研究发现通过调整活性层 GaN 垒层或 InGaN 阱层的厚度来调节空穴的注入活性层的能力, 并显著改善 GaN 基 LED 蓝光的性能^[16-18]. 本文采用金属有机化学气相淀积 (Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 系统在 (0001) 蓝宝石衬底上顺序生长两个 $In_{0.18}Ga_{0.82}N/GaN$ 量子阱和两个 $In_{0.12}Ga_{0.88}N/GaN$ 量子阱的双蓝光波长 LED, 并对不同 GaN 垒层厚度的双蓝光波长 LED 的光电性能进行分析, 结果发现 GaN 垒层的厚度能调节双蓝光波长 LED 的发射光谱和发光效率, 并用交流阻抗谱技术来分析相关电路模型, 此外, 还对垒层减小的双蓝光波长芯片与 YAG : Ce 荧光粉封装的白光 LED 的性能进行了研究.

1 实验

利用 Thomas Swan 公司生产的 MOCVD 系统在 (0001) 蓝宝石衬底上外延生长了两种不同的 InGaN/GaN 多量子阱 (Multi-Quantum Well, MQW) 双波长 LED 结构, 样品结构如图 1. 三甲基镓、三甲基铟、三甲基铝和氨气分别作 Ga、In、Al 和 N 源并由氢气作载气. 样品 A 和样品 B 除了各垒层厚度不一样外, 其它各层的参数都一样, 都是采用常规的两步法生长, 在蓝宝石衬底上依次生长 GaN 缓冲层、 $2 \mu m$ 的 μ -GaN、 $2 \mu m$ n-GaN 层 (掺杂浓度为 $4 \times 10^{18} cm^{-3}$)、混合多量子阱的活性层依次为 2 个周期的 $In_{0.18}Ga_{0.82}N/GaN$ 量子阱和两个周期的 $In_{0.12}Ga_{0.88}N/GaN$ 量子阱、20 nm 的 p-AlGaIn 电子阻挡层 (掺杂浓度 $7 \times 10^{17} cm^{-3}$) 和 200 nm 厚的 p-GaN 层 (掺杂浓度 $7 \times 10^{17} cm^{-3}$). 样品 A 和样品 B 的所有阱层厚度都是 3 nm, 样品 A 的 GaN 垒层厚度从 n-GaN 到 p-GaN 侧各个垒层厚度依次是: 18、16、10、9、7 nm 等, 简称“垒层减小”LED, 而样品 B 相应各 GaN 垒层的厚度依次是: 7、9、10、16、18 nm 等, 简称“垒层增加”LED (见图 1). 硅烷和二茂镁分别作为 n 和 p 型掺杂剂. 生长过程结束后, 采用掩膜、光刻、腐蚀、电子束蒸发和 ICP 干法刻蚀技术等标准芯片制作工艺将两个样品制成 $350 \times 350 \mu m^2$ 的 LED 芯片. LED 器件的光电特性是在 PMS-50 (Everfine Co.) LED 综合测试仪上测量, 交流阻抗谱用美国惠普公司的 HP4192A 阻抗分析仪测试, 所有测量均在室温下进行.

p-GaN	200nm	p-GaN	200nm
p-AlGaIn	20nm	p-AlGaIn	20nm
GaN	7nm	GaN	18nm
$In_{0.12}Ga_{0.88}N$	3nm	$In_{0.12}Ga_{0.88}N$	3nm
GaN	9nm	GaN	16nm
$In_{0.12}Ga_{0.88}N$	3nm	$In_{0.12}Ga_{0.88}N$	3nm
GaN	10nm	GaN	10nm
$In_{0.18}Ga_{0.82}N$	3nm	$In_{0.18}Ga_{0.82}N$	3nm
GaN	16nm	GaN	9nm
$In_{0.18}Ga_{0.82}N$	3nm	$In_{0.18}Ga_{0.82}N$	3nm
GaN	18nm	GaN	7nm
n-GaN	$2 \mu m$	n-GaN	$2 \mu m$
μ -GaN	$2 \mu m$	μ -GaN	$2 \mu m$
GaN buffer		GaN buffer	
Sappline		Sappline	

(a) Sample A

(b) Sample B

图 1 双蓝光波长 LED 样品 A 和 B 的结构

Fig. 1 Schematic structure of the dual-blue wavelength LEDs with sample A and B

2 结果与讨论

图 2(a) 表示 GaN 垒层减小结构的 LED 在不同注入电流情况下的 EL 光谱, 垒层减小 LED 表现出两个明显的发射峰, 分别是 440 nm 和 470 nm, 相应来自 $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}/\text{GaN}$ 蓝紫光量子阱和 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ 蓝绿光量子阱的发光. 在低电流注入时, 垒层减小 LED 的电致发光主要位于 440 nm, 而 470 nm 的发射相对较弱, 当在注入电流小于 20 mA 时, 这两个 EL 发射峰的相对强度基本上保持不变. 随着注入电流大于 20 mA 后, 470 nm 的发射峰逐渐增强, 当达到 100 mA 时, 440 nm 和 470 nm 两电致发光发射峰的相对强度基本相当. 而垒层增加 LED 在低电流情况只有表现出一个发射峰(440 nm)(见图 2(b)), 相应来自 $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}/\text{GaN}$ 蓝紫光量子阱的发光, 随电流的增大, 来自 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ 蓝绿光量子阱的发光逐渐增强, 当电流大于 100 mA 时, 仍然以 $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}/\text{GaN}$ 蓝紫光量子阱的发射为主.

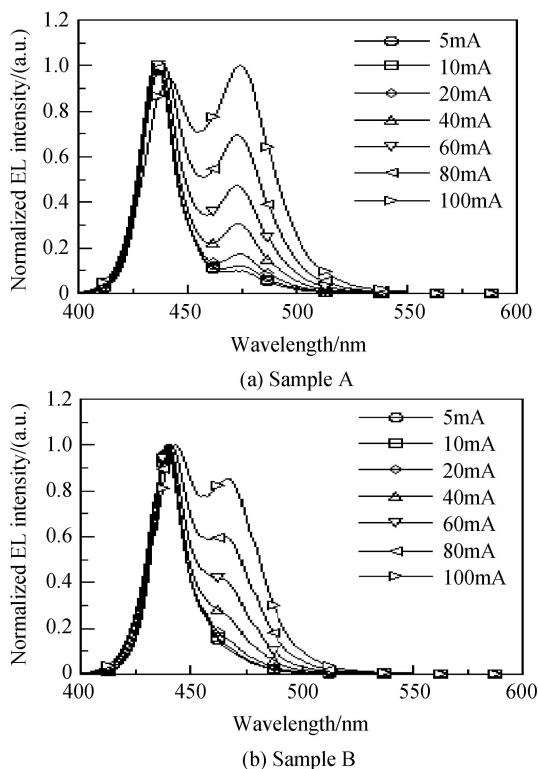


图 2 样品 A 和 B 结构 LED 在不同注入电流下的 EL 光谱
Fig. 2 EL spectra of LEDs from sample A and B at the different forward currents

图 3 表示相应样品 A 和 B 结构的 LED 输出光功率随注入电流的变化关系. 从图中可以看出, 在 20 mA 下样品 A 和样品 B 的光功率分别是 13.98 mW 和 10.97 mW. 随电流增大, 样品 A 的光功率始终大于样品 B 的光功率. 从图 2 和图 3 的结果得出改变 GaN 垒层厚度能有效调节双蓝光波长 LED 的

射光谱和发光效率, 在混合量子阱活性层 GaN 垒层总厚度一定的情况下, 从 n-GaN 到 p-GaN 方向逐渐减小 GaN 垒层厚度能增强双蓝光发射峰中靠近 n-GaN 侧 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ 蓝绿光量子阱的发射强度, 同时还能提高双蓝光波长 LED 的发光强度.

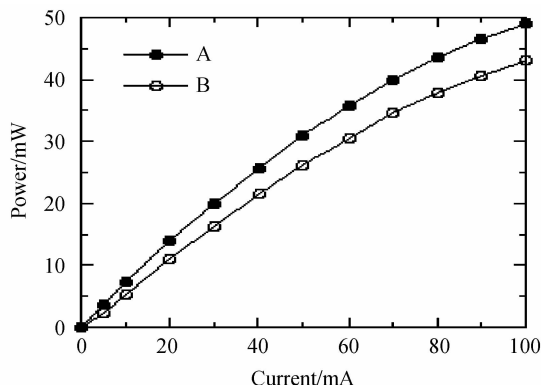


图 3 样品 A 和 B 的 LED 的光功率随注入电流的变化
Fig. 3 Light power of LEDs from sample A and B at the different forward currents

对于典型的 GaN 基 LED, 大部分电子很容易传输并聚集在靠近 p-GaN 侧的量子阱中, 而空穴相对来说比较难通过有源层, 因而通常聚集在靠近 p-GaN 侧的量子阱内, 导致电子和空穴复合发光主要发生在靠近 p-GaN 侧的几个量子阱内. 图 4 表示用 Crosslight 公司的半导体器件模拟专用软件 APSYS (Advanced Physical Models of Semiconductor Devices, APSYS) 模拟样品 A 和 B 结构 LED 在 120 mA 电流下的电子与空穴的浓度分布^[19]. 结果显示垒层减小的 LED 各量子阱中空穴浓度比垒层增加的 LED 高很多, 特别是靠近 n-GaN 侧的 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ 量子阱的空穴浓度, 数值分析结果显示通过减小靠近 p-GaN 侧的 GaN 垒层厚度能显著增强空穴的注入能力, 从而使更多的空穴传输到靠近 n-GaN 侧的量子阱中. 这与在相同驱动电流下, 垒层减小的双蓝光波长 LED 来自 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ 蓝绿光量子阱的发射比垒层增大的双蓝光波长 LED 蓝绿光发射更强相一致(见图 2). 图 5 表示样品 A 和 B 结构的 LED 在 120 mA 电流下的能带图和费米能级的分布. 由于在 GaN 垒层和 p-AlGaIn 电子阻挡层之间存在很强的极化电场, 降低了导带处最后一个垒层的势垒, 减弱了在大电流下对电子的限制作用. 数值模拟发现通过减小靠近 p-AlGaIn 层的垒层厚度能显著减小这种极化电场, 从而提高导带处最后一个 GaN 垒层的势垒高度和增大在大电流下对电子的限制能力(见图 5(a)). 从图 5(a)和(b)可以看出, 垒层减小的 LED 导带费米能级明显比垒层增加的 LED 导带费

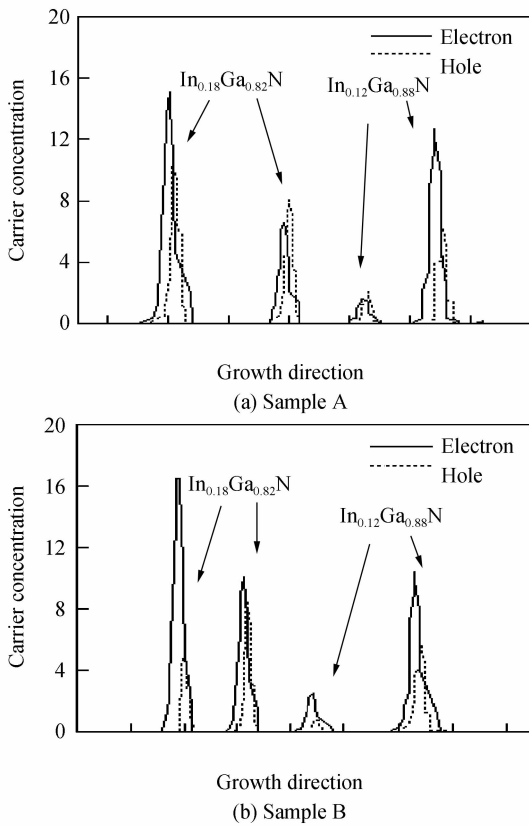


图4 样品A和B的LED在120 mA时的电子与空穴的浓度分布

Fig. 4 Electron and hole concentration of LEDs from sample A and B at 120 mA

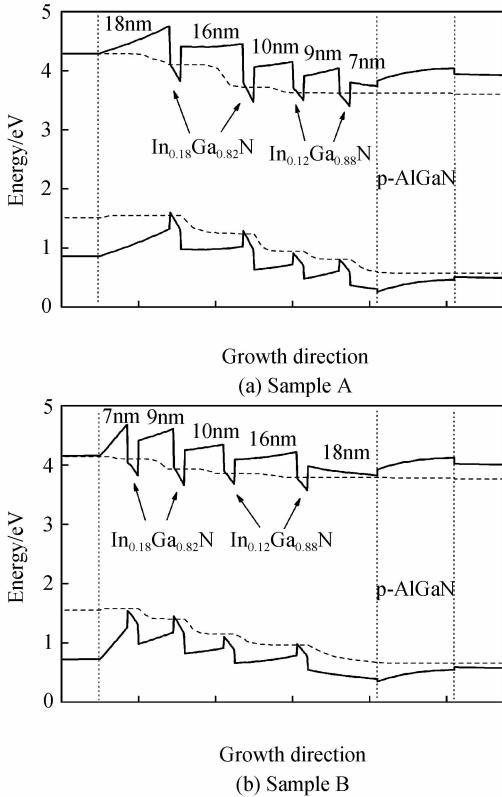


图5 样品A和B的LED在120 mA时的能带图和准费米能级分布

Fig. 5 Band diagrams and quasi-Fermi levels of LEDs from sample A and B at 120 mA

米能级更接近导带底,这说明 GaN 垒层厚度减小能从某种程度减弱了电子注入能力.另一方面,垒层厚度减小的 LED 价带费米能级明显比垒层厚度增加的 LED 价带费米能级更靠近导带底,这说明垒层厚度减小从某种程度又增强了空穴注入能力.这样垒层减小结构能有效改善电子空穴在活性层中的分布均一性,最终提高器件的发光效率.

图6表示样品A和B结构LED在2.6 V偏压和频率范围为10 Hz~10 MHz下测得交流阻抗谱的Cole-Cole图.交流阻抗的实部 $\text{Re}(Z)$ 为横轴,虚部 $-\text{Im}(Z)$ 为纵轴,图中的频率为隐含变量,在横轴从右至左表示频率由小到大(10 Hz~10 MHz)变化.由图6可知,样品A和B结构LED在2.6 V偏压下的Cole-Cole图像均为一个半圆形,且两个半圆的起点基本相同,但是样品A所代表半圆图像的半径要大于样品B所代表半圆图像的半径.由Cole-Cole曲线呈现半圆形说明样品A与样品B的LED的实际电学参数可等效为一个并联电阻 R_p 与一个结电容 C_p 并联后与一个串联电阻 R_s 串联组成,其等效电路如图6中插图所示.

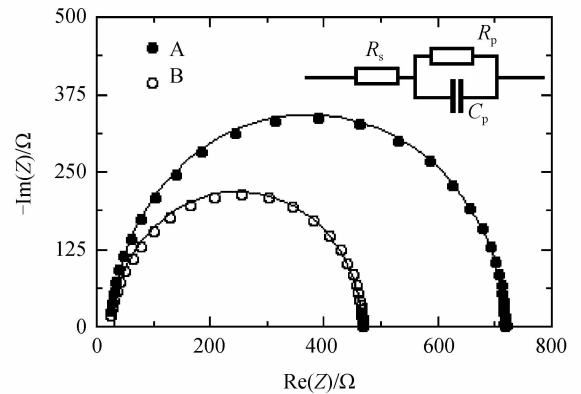


图6 样品A和B的LED在2.6V偏压下的Cole-Cole图及其等效电路

Fig. 6 The Cole-Cole of LEDs from sample A and B at 2.6 V and the equivalent circuit model

根据图6插图中等效电路,样品的复阻抗可表示为

$$Z = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C_p} = R_s + \frac{R_p - j\omega R_p^2 C_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}$$

式中实部 Z' 和虚部 Z'' 分别表示为

$$Z' = R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}$$

$$Z'' = \frac{\omega R_p^2 C_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}$$

由以上公式消去角频率 ω 后可得到关于实部和虚部的二次曲线标准方程式为

$$\left(Z' - R_s - \frac{R_p}{2}\right)^2 + Z''^2 = \left(\frac{R_p}{2}\right)^2 \quad (1)$$

可见,在 Cole-Cole 图上,出现的半圆是以 $(R_s + R_p/2, 0)$ 为圆心, $R_p/2$ 为半径的圆. 利用式(1), 可以通过拟合估算出样品 A 和样品 B 结构 LED 的相应电阻和电容. 图 6 中的实线为式(1)的拟合曲线, 结果显示式(1)很好地与交流阻抗谱的 Cole-Cole 图拟合, 对于样品 A: $R_s = 30\Omega$, $R_p = 686\Omega$, $C_p = 0.434 \text{ nF}$; 样品 B: $R_s = 30\Omega$, $R_p = 436\Omega$, $C_p = 0.548 \text{ nF}$. 阻抗分析结果显示样品 A 与 B 的串联电阻 R_s 相同, 均为 30Ω . 样品 A 和 B 结构的 LED 除了活性层各个 GaN 垒层厚度参数不一样外, 其它各个参数都一致. 串联电阻 R_s 大小一般与 LED 的欧姆接触性质有关^[20], 相同的串联电阻 R_s 与样品 A 和 B 结构 LED 的 p-GaN 和 n-GaN 具有相同的厚度、载流子浓度和电极材料及制备工艺等相符. 样品 A 的并联电阻($R_p = 686\Omega$)要大于样品 B 的并联电阻($R_p = 436\Omega$)可能与不同 GaN 垒层厚度有关. 样品 A 活性层的 GaN 垒层从 n-GaN 到 p-GaN 是逐渐减小, 而样品 B 活性层的 GaN 垒层从 n-GaN 到 p-GaN 是逐渐增加, 导致样品 B 器件的电子容易溢出, 容易产生漏电流(见图 5), 所以, 在相同驱动电压下, 样品 B 结构 LED 的并联电阻 R_p 相对就小些. 结电容 C_p 也与活性层有关, 样品 A 的结电容($C_p = 0.434 \text{ nF}$)小于样品 B 的结电容($C_p = 0.548 \text{ nF}$)可能是由于样品 A 的电子与空穴比样品 B 中的电子与空穴在活性层中分布更均匀, 电子与空穴复合机会更大, 导致样品 A 活性层中未复合的电子与空穴比样品 B 小. 因此, 在相同电压下, 样品 A 的结电容 C_p 比样品 B 的结电容 C_p 小.

图 7 是基于样品 A 双蓝光芯片用 YAG:Ce 荧光粉封装后的白光 LED 在不同注入电流下的发射光谱. 白光 LED 的发射光谱表现为三个光谱, 其中 440 nm 和 470 nm 的发光峰来自样品 A 芯片的电致发光, 570 nm 为 YAG:Ce 荧光粉吸收双蓝光产生的光致发光(PL). 当正向注入电流为 20 mA 时, 白光 LED 的色坐标 CIE1931 (Commission Internationale de L'Eclairage, CIE) 是 (0.339, 0.298), 显色指数和流明效率分别达到 83 和 40.4 lm/W. 注入电流升至 80 mA 时, 其显色指数可以达到 91. 而单蓝光芯片与 YAG:Ce 封装成白光 LED 在 20 mA 电流驱动下的显色指数只有 74.8, 流明效率为 98.2 lm/W, 相关发射光谱见图 7 中的虚线. 这说明用双蓝光发射芯片来激发 YAG:Ce 荧光粉可以实现高显色指数的白光 LED, 虽然与传统的单蓝光芯片激发 YAG:Ce 荧光粉的白光 LED 发光效率相比还有一些差距, 这需要对双蓝光波长发射的外延生长技术进行优化, 相关研

究在我们实验室正在进一步开展.

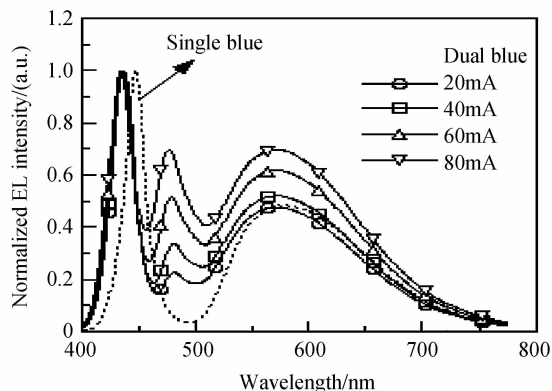


图 7 样品 A 与 YAG:Ce 荧光粉封装成白光 LED 随电流变化的发射光谱

Fig. 7 Emission spectra of the YAG:Ce-converted white LED based on sample A at the different forward currents

3 结论

利用 MOCVD 系统在蓝宝石衬底上制备出了“垒层增加”和“垒层减小”的混合结构的双蓝光波长 LED, 并对这些双蓝光波长发射 LED 的光电性能进行了分析, 结果显示减小 GaN 垒层厚度能实现双蓝光发射和较高的发光效率. 用垒层减小结构的双蓝光发射芯片来激发 YAG:Ce 荧光粉实现了高显色指数的白光 LED. 在注入电流为 20 mA 时, 白光 LED 的显色指数为 83, 当注入电流增至 80 mA 时, 显色指数达到 91, 说明这种双蓝光芯片激发 YAG:Ce 荧光粉的白光封装方案是一种有效实现高显色指数白光 LED 的新途径.

参考文献

- [1] SCHUBERT E F, KIM J K. Solid-state light sources getting smart[J]. *Science*, 2005, **308**: 1274-1278.
- [2] PIMPUTKAR S, SPECK J S, DENBAARS S P, *et al.* Prospects for LED lighting[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**: 180-182.
- [3] NAKAMURA S, FASOL G. The blue laser diode: GaN based light emitters and lasers[M]. Berlin: Springer, 1997: 216.
- [4] LIAO Jin-sheng, YOU Hang-ying, WEN He-rui, *et al.* Synthesis and luminescence properties of $\text{La}_2(\text{WO}_4)_3 : \text{Eu}^{3+}$ red phosphors as LED application[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 658-662.
廖金生, 游航英, 温和瑞, 等. LED 用 $\text{La}_2(\text{WO}_4)_3 : \text{Eu}^{3+}$ 红色荧光粉合成及光谱性能[J]. *光子学报*, 2011, **40**(5): 658-662.
- [5] WANG Zhi-jun, LI Pan-lai, GUO Qing-lin, *et al.* Spectral characteristics of $\text{Ba}_2\text{B}_2\text{P}_2\text{O}_{10} : \text{Eu}^{2+}$ green phosphor for white LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1087-1090.
王志军, 李盼来, 郭庆林, 等. 白光 LED 用 $\text{Ba}_2\text{B}_2\text{P}_2\text{O}_{10} : \text{Eu}^{2+}$ 绿色荧光粉的光谱特[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1087-1090.
- [6] YAMADA M, NAITOU T, IZUMO K, *et al.* Red-enhanced white-light-emitting diode using a new red phosphor [J].

- Japanese Journal Applied Physics*, 2003, **42**(1): L20-23.
- [7] SHEU J K, CHANG S J, KUO C H, *et al.* White-light emission from near UV InGaN-GaN LED chip precoated with blue/green/red phosphors [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2003, **15**(1): 18-20.
- [8] BRINKLEY S, PFAFF N, DENAULT K A, *et al.* Robust thermal performance of $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8 : \text{Eu}^{2+}$: An efficient red emitting phosphor for light emitting diode based white lighting [J]. *Applied Physics Letter*, 2011, **99**(24): 241106-1-3.
- [9] OZDEN I, MAKARONA E, NURMIKKO A V, *et al.* A dual-wavelength indium gallium nitride quantum well light emitting diode [J]. *Applied Physics Letter*, 2001, **79**(16): 2532-2534.
- [10] CHEN C H, CHANG S J, SU Y K. InGaN/GaN multiple-quantum-well dual-wavelength near-white light emitting diodes [J]. *Physics Status Solidi (C)*, 2003, **0**(7): 2257-2260.
- [11] WANG X H, JIA H Q, GUO L W, *et al.* White light-emitting diodes based on a single InGaN emission layer [J]. *Applied Physics Letter*, 2007, **91**(16): 161912-1-3.
- [12] WANG X H, GUO L W, JIA H Q, *et al.* Control performance of a single-chip white light emitting diode by adjusting strain in InGaN underlying layer [J]. *Applied Physics Letter*, 2009, **94**(11): 111913-1-3.
- [13] HONG Y J, LEE C H, YOON A, *et al.* Visible-color-tunable light-emitting diodes [J]. *Advanced Materials*, 2011, **23**(29): 3284-3288.
- [14] MIRHOSSEINI R, SCHUBERT M F, CHHAJED S, *et al.* Improved color rendering and luminous efficacy in phosphor-converted white light-emitting diodes by use of dual-blue emitting active regions [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(13): 10806-10813.
- [15] CHEN Xian-wen, WU Qian, LI Shu-ti, *et al.* Optoelectronic properties of dual-wavelength InGaN/GaN Multi-quantum well light-emitting diodes [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 190-193.
陈献文, 吴乾, 李述体, 等. 双波长 InGaN/GaN 多量子阱发光二极管的光电特性研究 [J]. 光子学报, 2011, **40**(2): 190-193.
- [16] WANG C H, CHANG S P, CHANG W T, *et al.* Efficiency droop alleviation in InGaN/GaN light-emitting diodes by graded-thickness multiple quantum wells [J]. *Applied Physics Letter*, 2010, **97**(18): 181101-1-3.
- [17] WANG C H, CHANG S P, KU P H, *et al.* Hole transport improvement in InGaN/GaN light-emitting diodes by graded-composition multiple quantum barriers [J]. *Applied Physics Letter*, 2011, **99**(17): 171106-1-3.
- [18] TASI M C, YEN S H, LU Y C, *et al.* Numerical study of blue InGaN light-emitting diodes with varied barrier thicknesses [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2011, **23**(2): 76-78.
- [19] Crosslight Software Inc 2012 <http://www.crosslight.com/products/apsys.shtml>.
- [20] DÖNMEZ A, BAYHAN H, Conduction mechanism of an infrared emitting diode; Impedance spectroscopy and current-voltage analysis [J]. *Semiconductors*, 2012, **46**(2): 251-256.