

组分渐变过渡层对氮化镓基发光二极管性能的影响

龙浩¹ 张智超¹ 顾锦华² 王皓宁¹ 丁楚伟³ 钟志有¹

(1 中南民族大学 电子信息工程学院, 武汉 430074; 2 中南民族大学 实验教学与实验室管理中心, 武汉 430074;

3 武汉光驰教育科技股份有限公司, 武汉 430205)

摘要 针对半导体发光二极管(LED)中普遍存在的效率衰减效应严重影响大注入电流条件下LED发光性能的问题,在传统InGaN/GaN多量子阱LED基础上,设计了组分渐变过渡层结构,引入到量子垒和电子阻挡层界面。模拟计算结果表明:当引入过渡层后,量子垒和电子阻挡层界面处的电子势阱深度和空穴势垒高度减小,有益于有源区载流子浓度的提高,有效提升了量子阱内辐射复合速率,使发光效率衰减现象得到显著改善。研究结果对大功率发光二极管的结构设计和器件研发具有启发作用。

关键词 发光二极管; 氮化镓; 多量子阱; 效率衰减

中图分类号 TN311; TN383 **文献标识码** A **文章编号** 1672-4321(2017)01-0071-05

Effect of Graded-Composition Transition Layer on the Performance of GaN-Based Light-Emitting Diodes

Long Hao¹ Zhang Zhichao¹ Gu Jinhua² Wang Haoning¹ Ding Chuwei³ Zhong Zhiyou¹

(1 College of Electronic Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China;

2 Center of Experiment Teaching, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China;

3 Wuhan Guangchi Education & Technology Co Ltd, Wuhan 430205, China)

Abstract The efficiency-droop phenomenon in semiconductor light-emitting diodes (LEDs) still hinders the further development of high-brightness LEDs for the performance suppression at a high injection current. In this work, based on the conventional InGaN/GaN multiple-quantum-well LEDs, a graded-composition transition layer was designed and inserted between the quantum barrier (QB) and the electron blocking layer (EBL). The simulation results indicated that with the insert of the transition layer, the depth of electron potential well and the height of hole potential barrier at the interface between the QB and the EBL both decreased, which was conducive to the increase of carrier concentration in the active region, and then lead to an improvement of radiative recombination rates in quantum wells. Hence, the efficiency droop was suppressed. The research is illuminating for the structure design and device development of high-power LEDs.

Keywords light-emitting diode; GaN; multiple quantum well; efficiency droop

作为第四代照明光源的发光二极管(LED)具有节能、环保、寿命长、体积小、抗震动、可控性强等众多优点,在照明、显示、医疗、农业、军事等领域具有重要应用价值^[1-5]。国内外相关基础学科理论和产业技术发展迅速,取得了许多重要的学术成果,产业链建设稳步推进^[6,7]。近年来,学者们在提高LED发光效率方面已经进行了大量工作并且取得了显著

进展。然而,LED发光效率衰减问题依然困扰着相关领域的专家^[8-14]。该现象的具体表现为:当注入电流密度从零开始增加,器件发光效率迅速达到最大值;随着注入电流密度的继续提高,发光效率急剧下降。该现象在高亮度发光二极管中尤为明显,严重影响了GaN基发光二极管在高注入条件下的器件性能,限制了其应用^[15]。目前,LED效率衰减现象

收稿日期 2016-12-16

作者简介 龙浩(1986-)男,讲师,博士,研究方向:半导体功能材料与光电子器件, E-mail: longhao@mail.scuec.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金资助项目(11504436);湖北省自然科学基金资助项目(2015CFB364);中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CZW15045, CZQ16003)

的物理机制仍存在争议^[16,17]. 在众多引起该现象的原因之中,有源区多量子阱载流子分布不均衡被认为是重要的因素之一^[18]. 由于电子和空穴在氮化物半导体材料中的迁移率存在很大差异,致使电子从多量子阱有源区溢出到 p 区相对容易,而空穴由 p 区向多量子阱区域的注入却更加困难. 这种电子溢出和空穴注入不足的现象导致了多量子阱有源区辐射复合效率低下. 为解决这一问题,许多研究小组设计并研制了具有较大带隙的电子阻挡层结构,将其引入到有源区和 p 型层之间,起到了抑制电子溢出有源区的作用,器件性能得到了显著提升. 可是,在引入电子阻挡层抑制电子溢出的同时,空穴由 p 型层向有源区的传输也遇到了一定的障碍,这在一定程度上不利于发光效率的进一步提升.

本文在传统 GaN 基发光二极管结构基础上,在多量子阱有源区和电子阻挡层之间设计了组分渐变过渡层,采用 SiLENSe 发光二极管能带工程模拟软件对器件性能进行了系统分析,从能带理论的角度研究了该过渡层结构对载流子输运和发光性能的影响机理.

1 实验部分

在 SiLENSe 模拟软件(版本号 5.11, STR Group, Inc.) 环境下进行器件设计和性能研究. 标准 GaN 基发光二极管的衬底为 c 面蓝宝石. 在衬底上沉积厚度为 $2 \mu\text{m}$ 的 n -GaN 薄膜,作为电子注入层,载流子浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 然后生长 5 个周期的 InGaN/GaN 多量子阱有源层结构. 其中,量子阱是 $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ 薄膜,厚度为 3 nm ; 量子垒是 GaN 薄膜,厚度为 12 nm . 它们均呈现非故意掺杂的弱 n 型导电,载流子浓度均为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 在多量子阱有源层之上,制备有载流子浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 p -Al_{0.16}Ga_{0.84}N 薄膜作为电子阻挡层. 然后在电子阻挡层上继续沉积载流子浓度为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 p -Ga_{0.16}N 空穴注入层. 该 GaN 基发光二极管结构命名为 LED I. 对 LED I 器件结构进行优化改进,在多量子阱有源区和 p -Al_{0.16}Ga_{0.84}N 电子阻挡层之间插入厚度为 5 nm 、载流子浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 p -Al _{x} Ga _{$1-x$} N 组分渐变过渡层. 沿着材料生长方向 x 从 0 到 0.16 线性改变. 该结构命名为 LED II, 其结构如图 1 所示. 以上器件中,材料的电子迁移率为 $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 空穴迁移率为 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. 在温度为 300 K 条件下,对 LED I 和 LED II 进行仿真计算,对其能带结

构、载流子输运特性和光电性能进行研究.

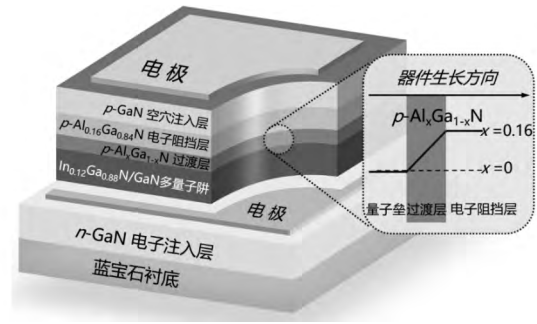


图1 LED II 器件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the device structure for LED II

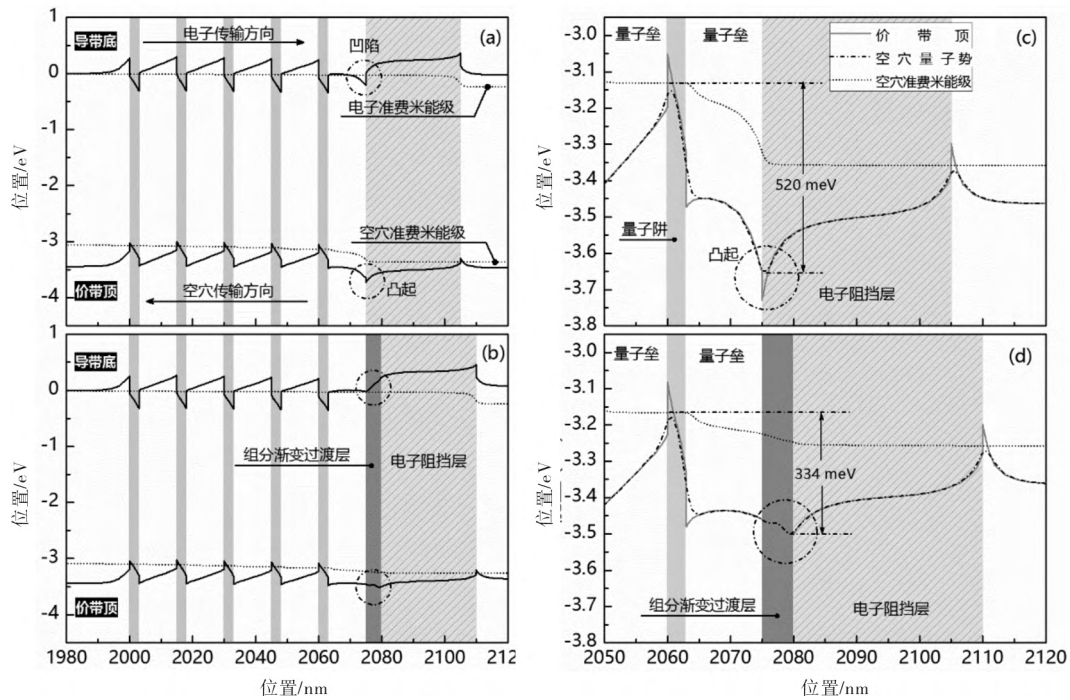
2 结果与讨论

2.1 组分渐变过渡层对器件能带结构的影响

LED I 和 LED II 在注入电流密度为 $200 \text{ A}/\text{cm}^2$ 条件下的能带结构分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示. 导带底和价带顶用实线表示,电子准费米能级和空穴准费米能级用虚线表示,均标注于图中. 由图可见,在电流密度为 $200 \text{ A}/\text{cm}^2$ 的注入条件下,发光有源区的量子阱和量子垒的能带发生了倾斜,这是极化电场所导致的. 这种能带弯曲现象会影响有源区域内电子和空穴的空间分布,进而改变辐射复合速率,最终影响器件的内量子效率. 对于 LED I,在 GaN 量子垒和 Al_{0.16}Ga_{0.84}N 电子阻挡层的界面处,价带顶和导带底分别出现了明显的凸起和凹陷,如图 2(a) 所示. 价带顶的凸起将形成空穴传输的势垒,对空穴由 p 区向发光有源区注入造成阻碍,这将严重影响发光有源区内的空穴浓度分布. 为了量化分析该附加势垒的具体情况,在能带结构拟合结果的基础上,进一步计算空穴量子势. LED I 价带顶凸起部分附近的能带结构如图 2(c) 所示. 由图可见,空穴从 p 区注入到发光有源区的有效势垒高度为 520 meV . 对于 LED II,价带顶凸起部分附近的能带结构如图 2(d) 所示. 通过组分渐变过渡层的引入,价带顶凸起的尖锐程度显著减弱. 通过计算可知,LED II 中空穴从 p 区注入到发光有源区的有效势垒高度减小到了 334 meV ,显著低于 LED I 中的空穴有效势垒高度. 另一方面,对于 LED I,在量子垒和电子阻挡层的界面处,导带底的凹陷将捕获电子,致使此处电子浓度升高. 然而,此处并非量子阱有源区,在该界面的电子聚集对器件发光性能的提升并无益处. 对比图 2(a)、(b) 可见,在引入组分渐变过渡层之后,量子垒和电子阻挡层界面处的导带底凹

陷情况显著改善,有源区溢出电子向 p 区传输过程中在该界面处的有效势阱深度大幅减小,二维电子气浓度显著降低.同时,过渡层的引入并未给电子阻

挡层对电子由有源区向 p 区溢出的阻挡能力造成影响.



(a) LED I 有源区附近; (b) LED II 有源区附近; (c) LED I 量子垒/电子阻挡层界面附近; (d) LED II 过渡层附近

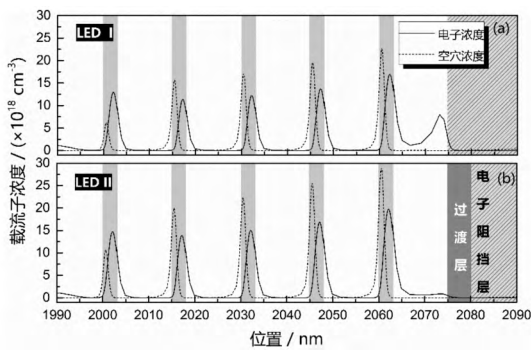
图 2 200 A/cm² 注入电流密度条件下器件能带结构图

Fig. 2 Band diagrams of LEDs at a current density of 200 A/cm²

2.2 组分渐变过渡层对器件载流子运输的影响

为详细分析引入组分渐变过渡层后空穴有效势垒高度和电子有效势阱深度的变化对器件载流子运输的影响,对电子和空穴浓度在有源区附近的空分布进行了模拟,实验结果如图 3 所示.

10^{18} cm^{-3} .量子阱中的电子浓度分布相对更加均匀,处于 $1.16 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 到 $1.69 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 范围内.值得注意的是,在量子垒与电子阻挡层的界面处,积聚了浓度为 $7.97 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的电子.该现象产生的原因是 LED I 中量子垒与电子阻挡层界面处的导带底凹陷.图 3 (b) 所示的是 LED II 有源区附近载流子浓度随位置变化的曲线图.从 p 区到 n 区方向,量子阱中的空穴浓度由 $2.89 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 依次递减到了 $1.07 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.整体均高于 LED I 量子阱中的空穴浓度.这是由于组分渐变过渡层的引入,大幅降低了量子垒和电子阻挡层界面处的空穴传输势垒,使得 p 区注入的空穴能更为容易的传输至有源区,从而引起了有源区内量子阱空穴浓度的升高.此外,LED II 量子阱中的电子浓度分布处于 $1.39 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 到 $1.97 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 范围内,亦明显高于 LED I 量子阱中的电子浓度.过渡层的引入亦使得位于量子垒和电子阻挡层界面处的电子聚集现象明显减弱.这是由于过渡层使量子垒和电子阻挡层界面处的电子势阱深度减小,抑制了此处电子浓度的升高.



(a) LED I; (b) LED II

图 3 200 A/cm² 注入电流密度条件下器件有源区附近载流子浓度分布曲线

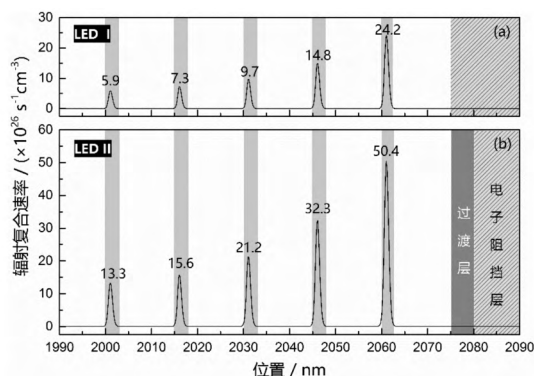
Fig. 3 Carrier concentrations near the active region of various LEDs at a current density of 200 A/cm²

图 3 (a) 所示的是 LED I 有源区附近载流子浓度随位置变化的曲线图.从 p 区到 n 区方向,量子阱中的空穴浓度由 $2.26 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 依次递减到了 $6.16 \times$

2.3 组分渐变过渡层对器件辐射复合速率的影响

依据载流子浓度的空间分布情况,对有源区内辐

射复合速率的空间分布进行了分析,结果如图4所示.图4(a)显示了LED I有源区附近辐射复合速率随位置变化的曲线图.沿着器件生长方向,量子阱内辐射复合速率由 $5.9 \times 10^{26} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ 逐渐升高到 $2.42 \times 10^{27} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$.图4(b)显示了LED II有源区附近辐射复合速率随位置变化的曲线图.沿着器件生长方向,量子阱内辐射复合速率由 $1.33 \times 10^{27} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ 逐渐升高到 $5.04 \times 10^{27} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$,整体大约为LED I量子阱内辐射复合速率的2倍.在引入过渡层后,辐射复合速率大幅提升的原因是有源区载流子浓度的显著增大和电子、空穴波函数交叠的增加.



(a) LED I; (b) LED II

图4 200 A/cm²注入电流密度条件下器件有源区附近辐射复合速率分布曲线

Fig. 4 Radiative recombination rates near the active region of various LEDs at a current density of 200 A/cm²

2.4 组分渐变过渡层对发光内量子效率的影响

基于以上载流子运输数据及结论,对LED I和LED II的内量子效率(IQE)进行计算和分析,结果如图5所示.当注入电流从0开始增加时,两种LED的内量子效率均迅速上升,并达到最大值.对于LED I,当注入电流为48.1 A/cm²时,其内量子效率达到最大值54.1%;对于LED II,当注入电流为76.5 A/cm²时,其内量子效率达到最大值54.9%,并且直到注入电流达到约150 A/cm²时其内量子效率基本维持在最大值附近.由此可见,LED I和LED II的最大内量子效率几乎一致.然而,随着注入电流的进一步增大,LED I出现了明显的发光效率衰减现象.若定义发光内量子效率衰减因子 η 满足:

$$\eta = (IQE_{\max} - IQE_{400 \text{ A/cm}^2}) / IQE_{\max}$$

其中, IQE_{\max} 为LED内量子效率的最大值, $IQE_{400 \text{ A/cm}^2}$ 为在注入电流密度为400 A/cm²时的内量子效率.则对于LED I和LED II,其发光内量子效率衰减因子分别为10.9%和1.6%.可见,过渡层的引入大幅改善了发光效率衰减的问题.结合上文中

器件载流子运输特性的分析,可以归纳出发光二极管性能提高的原因.在大注入电流密度条件下,极化电场导致能带发生严重弯曲,发光有源区量子阱和量子垒产生了严重的能带倾斜.量子垒和电子阻挡层界面处的导带底凹陷所产生的电子势阱深度大幅增加并引起溢出电子的聚集,造成界面处电子浓度显著升高;界面处价带顶凸起所产生的空穴势垒高度亦大幅增加,形成了空穴由p区向有源区注入的巨大阻碍.这两种现象均不利于有源区量子阱内载流子浓度的增加,因而进一步抑制了辐射复合速率的提高,连同俄歇复合等其他因素一起,造成了明显的发光效率衰减现象.并且,随着注入电流密度的增大,这种衰减现象表现的更加显著.在量子垒和电子阻挡层之间引入过渡层之后,由于其Al组分的含量从量子垒到电子阻挡层方向由0到16%线性渐变,有效缓解了极化现象,使得界面处导带底凹陷和价带顶凸起明显减弱,电子势阱深度和空穴势垒高度减小,大幅改善了电子聚集现象并降低了空穴传输障碍.因此,组分渐变过渡层的引入在电子和空穴传输两个方面均有利于有源区载流子浓度的提高,并有效提升其辐射复合速率,发光效率衰减得到了抑制.这种性能的提升在大注入电流密度条件下尤为显著,可以使发光器件在大注入条件下仍然保持较高性能.

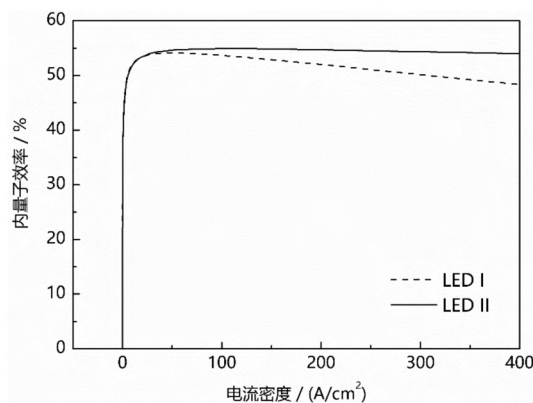


图5 发光二极管内量子效率曲线

Fig. 5 IQEs of various LEDs

3 结语

在传统InGaN/GaN多量子阱发光二极管结构基础上,设计了组分渐变过渡层结构,引入到量子垒和电子阻挡层界面.通过模拟计算分析了在引入过渡层之后载流子运输特性的改变和发光性能提升的原因.当引入组分渐变过渡层后,量子垒和电子阻挡

层界面处的电子势阱深度和空穴势垒高度减小,有益于有源区载流子浓度的增加,有效提高量子阱内辐射复合速率,使得大注入电流密度条件下器件发光效率衰减现象得到显著改善,器件发光性能得到明显提升. 研究结果对大功率发光二极管的结构设计和器件研发具有启发作用.

参 考 文 献

- [1] 宿世臣,裴磊磊,张红艳,等. 高效 InGaN/AlInGaN 发光二极管的结构设计及其理论研究[J]. 发光学报, 2016, 37(2): 208-212.
- [2] Wierer J J, Tsao J Y, Sizov D S. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting[J]. Laser Photon Rev, 2013, 7(6): 963-993.
- [3] 魏琼,陈芮,塔娜,等. 白光 LED 用荧光粉 $Sr_{1-x}Eu_xMoO_4$ 的溶胶-凝胶燃烧法制备及其热稳定性、光学性能[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2009, 28(1): 12-16.
- [4] 钟志有. 有机 LED 器件结构对其内部电场和电荷分布的影响[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2009, 28(3): 73-78.
- [5] 孙奉姿,马荻. LED 电源几种保护电路的设计[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 53-57.
- [6] 林庆祥,黄毅. P 型透明导电氧化物 $CuAlO_2$ 的研究进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2014, 40(2): 256-260.
- [7] 刘霄,曾广根,张静全,等. 反应磁控溅射制备 CdTe 太阳能电池前电极 ITO 薄膜的性质研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2014, 40(2): 265-270.
- [8] 马涛,黄毅,马健,等. 溶胶-凝胶法制备 $CuAlO_2$ 多晶的结构性能研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2012, 38(5): 819-821.
- [9] Lin R M, Yu S F, Chang S J, et al. Inserting a p-InGaN layer before the p-AlGaIn electron blocking layer suppresses efficiency droop in InGaIn-based light-emitting diodes[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(8): 243506.
- [10] Singh S, Robidas D, Rohila N, et al. Effect of electron blocking layer on efficiency droop in blue InGaIn/GaN based light-emitting diodes[J]. Optoelectron Adv Mater, 2010, 4(8): 1106-1110.
- [11] Wang C H, Chang S P, Ku P H, et al. Efficiency and droop improvement in InGaIn/GaN light-emitting diodes by selective carrier distribution manipulation[J]. Appl Phys Express, 2012, 5(4): 042101.
- [12] Xia C S, Simon Li Z M, Lu W, et al. Droop improvement in blue InGaIn/GaN multiple quantum well light-emitting diodes with indium graded last barrier[J]. Appl Phys Lett, 2011, 99(23): 233501.
- [13] Liu G Y, Zhang J, Tan C K, et al. Efficiency-droop suppression by using large-bandgap AlGaInN thin barrier layers in InGaIn quantum-well light-emitting diodes[J]. IEEE J Photon, 2013, 5(2): 2201011.
- [14] Zakheim D A, Pavluchenko A S, Bauman D A, et al. Efficiency droop suppression in InGaIn-based blue LEDs: Experiment and numerical modelling[J]. Phys Status Solidi A, 2012, 209(3): 456-460.
- [15] 丁彬彬,赵芳,宋晶晶,等. 新型电子阻挡层结构对蓝光 InGaIn 发光二极管性能的提高[J]. 发光学报, 2013, 34(3): 345-350.
- [16] Lee Y J, Chen C H, Lee C J. Reduction in the efficiency-droop effect of InGaIn green light-emitting diodes using gradual quantum wells[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(20): 1506-1508.
- [17] 颜建,钟灿涛,于彤军,等. 图形化蓝宝石衬底上 InGaIn/GaN 多量子阱发光二极管的光谱特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(1): 7-10.
- [18] Kuo Y K, Chang J Y, Tsai M C, et al. Advantages of blue InGaIn multiple-quantum well light-emitting diodes with InGaIn barriers[J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(1): 011116.