

InGaN/GaN 超晶格垒层用于 InGaN 发光二极管 发光增强研究

杨国锋 朱华新 郭颖 李果华* 高淑梅

江南大学理学院, 江苏 无锡 214122

摘要 设计了 InGaN/GaN 超晶格垒层替代 p-GaN 和 n-GaN 附近传统 GaN 垒层的 InGaN/GaN 多量子阱(MQW)发光二极管(LEDs)结构。通过数值方法模拟出两种 LED 结构的光功率-电压(L-V)曲线、电致发光(EL)谱、能带图、电子浓度分布和辐射复合速率。结果表明 InGaN/GaN 超晶格替代 n-GaN 附近 GaN 垒层的 LED 结构比替代 p-GaN 附近 GaN 垒层的 LED 显示出更高的发光强度。这种发光增强的原因是 InGaN/GaN 超晶格替代 n-GaN 附近 GaN 垒层可以提高电子注入效率和辐射复合速率。

关键词 InGaN/GaN; 发光二极管; 超晶格垒层; 数值模拟

中图分类号 TN304.23 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.032301

Research on Efficiency Improvement of InGaN Light-Emitting Diodes with InGaN/GaN Superlattice Barrier

Yang Guofeng Zhu Huaxin Guo Ying Li Guohua Gao Shumei

School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract InGaN/GaN superlattice (SL) barrier near p-GaN and n-GaN are designed to replace the conventional GaN barrier of InGaN/GaN multiple quantum well (MQW) light-emitting diodes (LEDs). The light-voltage performance curves, electroluminescence (EL) characteristics, energy band diagrams, electron concentration and radiative recombination rate of LEDs with SL barrier near p-GaN and n-GaN have been studied numerically. The results indicate that the InGaN/GaN LED with SL barrier near n-GaN improves light output performance more than that near p-GaN. The improved performance is due to the enhanced injection efficiency of electrons and radiative recombination rate.

Key words InGaN/GaN; light-emitting diodes; superlattice barrier; numerical simulation

OCIS codes 230.0250; 230.3670; 230.5590

1 引言

高效率发光的 InGaN/GaN 多量子阱发光二极管为固态照明的发展带来了历史性的突破^[1-4]。但是,由于 InGaN/GaN 多量子阱中极化场的存在,LED 的发光效率不能实现进一步的提高。现在可以普遍观察到 InGaN/GaN LED 中随着注入电流的增大,LED 的内量子效率会达到一个峰值,进一步增大电流,LED 的内量子效率会快速下降,这种现象被称为效率下降^[5]。为了克服这一难点,许多方法被用来进一步提高 LED 的发光效率^[6-8]。InGaN 和 AlGaIn 垒层可以用于减小有源层的晶格适配从而抑制电子的溢出^[9]; GaN 垒层中进行 p 型和 n 型掺杂可以降低开启电压,形成比较低的寄生串联电阻^[10-11]; p 型 InGaIn 空穴储集层被插入在 MQW 有源层和 AlGaIn 电子阻挡层之间用来提高空穴注入效率,同时保持电子注入效率水平^[12]。近年来,研究者发现 Mg 掺杂的 AlGaIn/GaN 和 InGaIn/GaN 超晶格结构可以提高 InGaIn LED 的发光效率^[13-16]。此外,有结论认为 GaN-InGaIn-GaN 垒层可以调节 InGaIn LED 的能带结构从而增强有源层的电子和空穴注入效率^[17]。

收稿日期: 2013-10-22; 收到修改稿日期: 2013-12-16; 网络出版日期: 2014-03-01

基金项目: 江苏省自然科学基金(11074280, BK2011436)

作者简介: 杨国锋(1985—),男,讲师,主要从事 III-V 族宽禁带半导体光电材料和器件等方面的研究。

E-mail: gfyang@jiangnan.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: guohuali@jiangnan.edu.cn

文中设计了InGaN/GaN超晶格的结构来代替LED中邻近p-GaN和n-GaN的GaN垒层。下文中所有InGaN/GaN超晶格邻近p-GaN的LED简称为SLBP LED, InGaN/GaN超晶格邻近n-GaN的LED简称为SLBN LED。利用Silvaco Atlas软件对这两种LED结构进行模拟,表明SLBN LED表现出比SLBP LED更加优异的光电性能。

2 器件结构设计

InGaN/GaN多量子阱LED的结构设计示意图如图1所示:蓝宝石衬底生长40 nm的低温GaN缓冲层,紧接着生长2 μm 的Si掺杂n型GaN外延层,掺杂粒子数浓度(下同)为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。LED有源层包含5个周期 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}(3\text{nm})/\text{GaN}(15 \text{ nm})$ 多量子阱层,如图1中箭头所标示,利用InGaN/GaN超晶格代替邻近n-GaN的垒层的结构为SLBN LED,而利用InGaN/GaN超晶格代替邻近p-GaN的垒层的结构为SLBP LED。超晶格结构为7个周期的 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}/\text{GaN}$ 薄层。最后在有源层上生长50 nm的p型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 电子阻挡层和100 nm厚的p型GaN覆盖层,p型层的掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

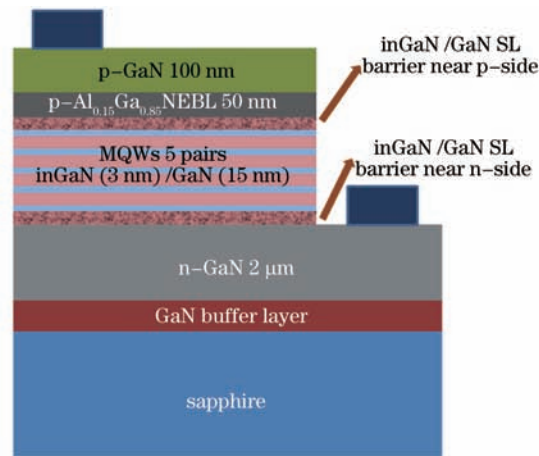


图1 InGaN/GaN超晶格替代p-GaN和n-GaN附近GaN垒层的LED结构示意图

Fig.1 Schematic structure of LEDs with the GaN barrier near p-GaN and n-GaN replaced by InGaN/GaN SLB

LED的物理特性和光电特性均采用Silvaco Atlas软件进行模拟,模拟中所应用的能带偏移比 $\Delta E_c/\Delta E_v = 0.7/0.3$,其他的一些模拟参数采用文献[17]中实验过程中测量获得的参数。

3 结果与讨论

图2(a)是传统LED、SLBP LED和SLBN LED的光功率-电压(L-V)曲线,从图中可以看到,SLBP LED相比于传统的LED在相同的电压注入下发光强度并没有发生显著的改变,而SLBN LED的发光功率相比传统LED和SLBP LED得到了明显增强。然后对比SLBP LED和SLBN LED在相同电流注入下(20 mA)的电致发光(EL)谱,如图2(b)所示,可以发现,SLBN LED的发光强度比SLBP LED提高了约1.85倍。结果证明InGaN/GaN超晶格结构邻近n-GaN有益于InGaN LED发光功率的提高。

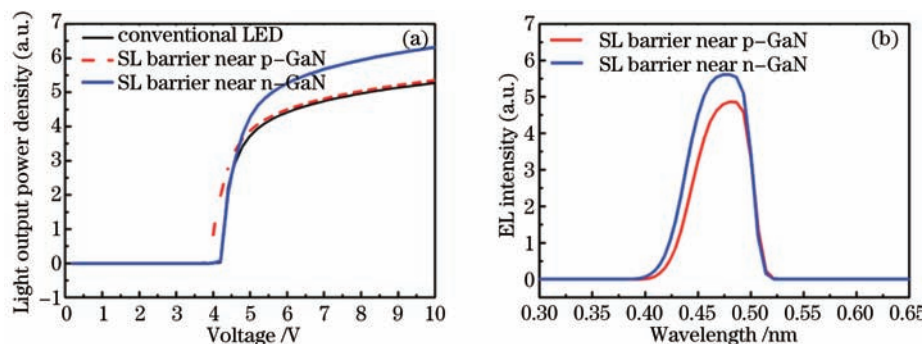


图2 (a) 传统LED、SLBP LED和SLBN LED的L-V曲线;(b) 20 mA电流注入下SLBP和SLBN LED的EL谱

Fig. 2 (a) Plots of the L-V curves for LEDs with the conventional barrier, SLBP and SLBN; (b) EL spectra for SLBP and SLBN LEDs at 20 mA

为了研究 SLBN LED 相比于 SLBP LED 发光增强的原因,模拟出这两种 LED 结构在 20 mA 电流注入下的能带图,如图 3 所示。从图中可以看到,SLBP LED 在有源层和电子阻挡层之间的空穴势垒的要高于 SLBN LED,这就不利于空穴向有源层的传输。另一方面,SLBN LED 中靠近 n-GaN 一侧的电子势垒低于 SLBP LED,从而有利于电子向有源层注入。这种能带的调节可以增强载流子的注入效率从而提高有源层的复合概率。

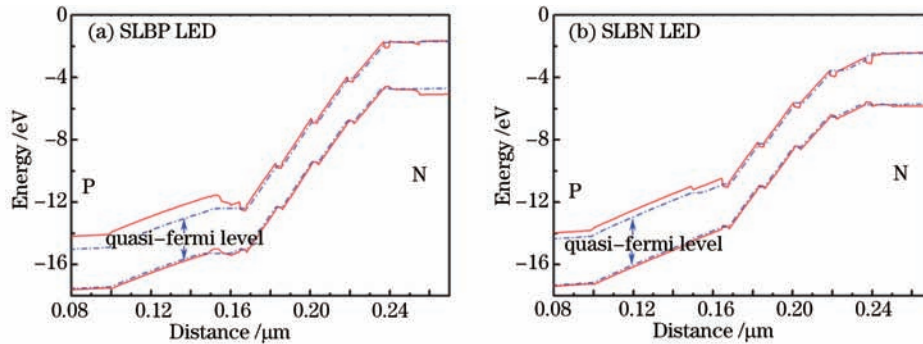


图 3 20 mA 注入电流下 SLBP 和 SLBN 发光二极管的能带图

Fig.3 Energy band diagrams of SLBP and SLBN LEDs at 20 mA

进一步模拟出多量子阱有源层区域的电子浓度分布,如图 4 所示,可以发现 SLBN LED 每一个量子阱中的电子浓度都高于 SLBP LED,并且 SLBP LED 中在 n-GaN 和有源层之间形成了电子的累积。这主要是由于 SLBP LED 中比较高的电子势垒阻碍了电子向有源层的注入,从而形成了电子在有源区域外的累积。这同时也是 SLBP LED 的发光强度低于 SLBN LED 的原因。

图 5 模拟的是 20 mA 电流注入下两种 LED 有源层的辐射复合速率分布图,从图中可以看到 SLBN LED 中靠近 n-GaN 一侧的量子阱中的辐射复合速率显著高于 SLBP LED,这是由于 SLBN LED 靠近 n-GaN 一侧电子浓度的显著增加,增大了 n-GaN 一侧量子阱中辐射复合概率。同时,n-GaN 和有源层界面处电子势垒的降低提高了电子的注入效率从而增强了这一侧量子阱中的复合速率,因而最靠近 n-GaN 的量子阱层中辐射复合速率出现了显著增强。这一结果与图 3(b)中的能带图得到了很好的吻合。这也是 SLBN LED 相比于 SLBP LED 发光增强的另一原因。

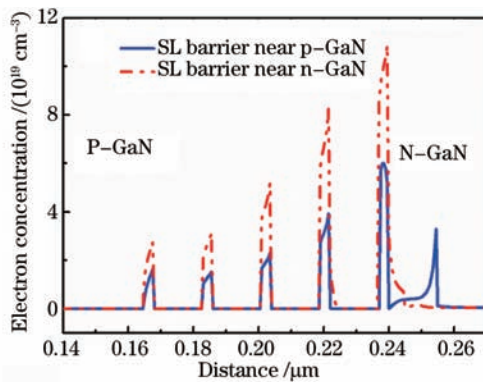


图 4 20 mA 注入电流下 SLBP 和 SLBN 发光二极管的电子浓度分布

Fig.4 Distribution of electron concentration of SLBP and SLBN LEDs at 20 mA

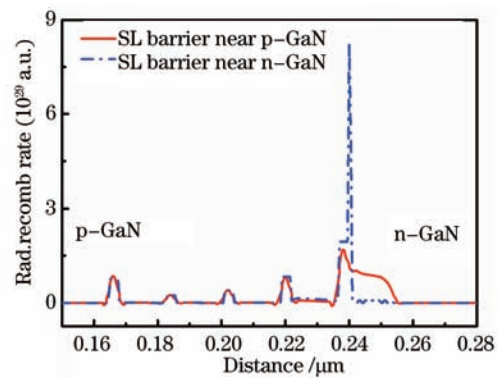


图 5 20 mA 注入电流下 SLBP 和 SLBN 发光二极管的辐射复合速率分布

Fig.5 Radiative recombination rates of SLBP and SLBN LEDs at 20 mA

4 结 论

研究了 InGaN/GaN 超晶格垒层替代 p-GaN 和 n-GaN 附近传统 GaN 垒层的发光二极管(LEDs)结构。利用 Silvaco Atlas 软件模拟出两种 LED 的 L-V 特性、EL 特性、能带图、电子浓度分布和辐射复合速率。通过对比发现 InGaN/GaN 超晶格替代 n-GaN 附近 GaN 垒层的 LED 结构比替代 p-GaN 附近 GaN 垒层的 LED

显示出更高的发光强度。这种发光增强的原因是能带的调控使得电子和空穴势垒的改变,从而两种LED结构表现出不同的电子注入效率和辐射复合速率。

参考文献

- 1 S Pimputkar, J S Speck, S P DenBaars, *et al.*. Prospects for LED lighting[J]. Nat Photon, 2009, 3(4): 180-182.
- 2 N Horiuchi. Light-emitting diodes: natural white light[J]. Nat Photon, 2010, 4(11): 738.
- 3 Liang Liang, Niu Pingjuan, Yu Liyuan. Influence of electron beam irradiation on GaN-based blue LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(10): 102301.
梁亮, 牛萍娟, 于莉媛. 电子束辐照对GaN基蓝光LED性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(10): 102301.
- 4 Chen Yingliang, Lu Yijun, Gao Yulin, *et al.*. Photoelectric properties of alternating-current light-emitting diodes[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3586-3591.
陈莹亮, 吕毅军, 高玉琳, 等. 交流发光二极管光电特性的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3586-3591.
- 5 Y K Kuo, J Y Chang, M C Tsai, *et al.*. Advantages of blue InGaN multiple-quantum well light-emitting diodes with InGaN barriers[J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(1): 011116.
- 6 Chen Jian, Wang Qingkang, Li Haihua. Effect of random perturbation of structural parameters on the light extraction efficiency of light emitting diodes with photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 233-236.
陈健, 王庆康, 李海华. 光子晶体结构参数的随机扰动对光子晶体LED出光效率的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 233-236.
- 7 Liu Junlin, Qiu Chong, Jiang Fengyi. Research of passivation and anti reflecting layer on GaN based blue LED on silicon substrate[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2978-2982.
刘军林, 邱冲, 江风益. Si衬底GaN基蓝光LED钝化增透膜研究[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2978-2982.
- 8 Jin Ji, Yu Guiying, Lin Min. Research of high light collection efficiency of LED parabolic reflector based on non-imaging optics[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 680-684.
金骥, 余贵英, 林敏. 基于非成像光学的LED高收光率的抛物反射器研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 680-684.
- 9 Y K Fu, R H Jiang, Y H Lu, *et al.*. The effect of trimethylgallium flows in the AlInGaN barrier on optoelectronic characteristics of near ultraviolet light-emitting diodes grown by atmospheric pressure metalorganic vapor phase epitaxy [J]. Appl Phys Lett, 2011, 98(12): 121115.
- 10 Y J Liu, C C Huang, T Y Chen, *et al.*. Improved performance of an InGaN-based light-emitting diode with a p-GaN/n-GaN barrier junction[J]. IEEE J Quantum Electron, 2011, 47(6): 755-761.
- 11 M C Tsai, S H Yen, Y K Kuo. Carrier transportation and internal quantum efficiency of blue InGaN light-emitting diodes with p-doped barriers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(6): 374-376.
- 12 T P Lu, S T Li, C Liu, *et al.*. Advantages of GaN based light-emitting diodes with a p-InGaN hole reservoir layer[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(14): 141106.
- 13 P Kozodoy, M Hansen, S P DenBaars, *et al.*. Enhanced Mg doping efficiency in $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ superlattices[J]. Appl Phys Lett, 1999, 74(24): 3681-3683.
- 14 I D Goepfert, E F Schubert, A Osinsky, *et al.*. Experimental and theoretical study of acceptor activation and transport properties in p-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ superlattices[J]. J Appl Phys, 2000, 88(4): 2030-2038.
- 15 P Kozodoy, Y P Smorchkova, M Hansen, *et al.*. Polarization-enhanced Mg doping of AlGaIn/GaN superlattices[J]. Appl Phys Lett, 1999, 75(16): 2444-2446.
- 16 Y Y Zhang, Y A Yin. Performance enhancement of blue light-emitting diodes with a special designed AlGaIn/GaN superlattice electron-blocking layer[J]. Appl Phys Lett, 2011, 99(22): 221103.
- 17 Y K Kuo, T H Wang, J Y Chang, *et al.*. Advantages of InGaN light-emitting diodes with GaN-InGaN-GaN barriers[J]. Appl Phys Lett, 2011, 99(9): 091107.