

文章编号: 1000-7032(2018)10-1445-06

势垒硅掺杂对 GaN 基 LED 极化电场及其光电性能的影响

张正宜^{1*}, 王 超²

(1. 山西交通职业技术学院 信息工程系, 山西 太原 030031;
2. 兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 势垒硅掺杂对 InGaN 量子阱中的电场及 LED 器件的光电性能有着重要的影响。采用 6×6 K·P 方法计算了不同势垒硅掺杂浓度对量子阱中电场的变化, 研究表明当势垒硅掺杂浓度 $> 1e^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 阱垒界面处的电场强度会变大, 这主要是由于硅掺杂浓度过高导致量子阱中界面电荷的聚集。进一步发现随着势垒硅掺杂浓度的升高, 总非辐射复合随之增加, 其中俄歇复合增加, 而肖克莱-霍尔-里德复合随之减少, 这是由于点陷阱的增大形成了缺陷能级。电流电压曲线表明势垒硅掺杂可有效改善 GaN 基 LED 的工作电压, 这归于掺杂浓度的提高改善了载流子的传输特性。当掺杂浓度为 $1e^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 获得了较高的内量子效率, 这主要是由于适当的势垒硅掺杂降低了量子阱中界面电荷的损耗。

关键词: 势垒; 量子阱; 极化电场; 光电性能

中图分类号: TN321.8 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183910.1445

Effect of Si-doping on Barriers on Polarization Electric Field and Its Photoelectric Properties of GaN Based LED

ZHANG Zheng-yi^{1*}, WANG Chao²

(1. Information Engineering Department, Shanxi Traffic Vocational and Technical College, Taiyuan 030031, China;
2. Key Laboratory of Opto-Technology and Interlligent Control Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

* Corresponding Author, E-mail: 1445530858@qq.com

Abstract: Silicon doping in barrier has an important effect on the electric field in InGaN quantum wells and its photoelectric properties of LED devices. Electric field in multiple quantum wells with the different silicon doping concentration in barrier was calculated by 6×6 K·P method. The results show that the electric field intensity in the well/barrier interface becomes larger when the silicon doping concentration in the barrier is above $1e^{18} \text{ cm}^{-3}$, which is mainly attributed to the accumulation of the interface charge in the quantum well. It is found that the total non radiation recombination increases and Auger recombination increases as barrier doping concentration increased, while Shockley-Read-Hall recombination decreases because of the increasing dot traps result in the formation of defect energy levels. The current-voltage curves show that the barrier doping can effectively improve the work voltage of GaN based LED because doped barrier will contribute to improve the transport characteristics of carriers. When silicon doping concentration is $1e^{18} \text{ cm}^{-3}$, the high internal quantum efficiency is obtained, which is mainly attributed to the reduction of interface charge loss in the quantum well due to the appropriate potential barrier doping.

Key words: potential barrier; quantum well; polarization electric field; photoelectric properties

1 引 言

InGaN 半导体材料具有纤锌矿晶体结构和直接能隙结构,通过改变 In 原子在 InGaN 中的比例,可实现从 0.7 eV 到 6.2 eV 的能隙调控,从而可以在整个可见光范围内通过电致发光^[1-2]。InGaN LED 被广泛应用到通用照明和显示领域。对于氮化物发光二极管器件来说,InGaN 多量子阱结构是其最重要的组成部分。目前,对于 InGaN 多量子阱的材料结构设计及机理方面做了大量的研究工作,其中,包括量子阱 p 型掺杂、梯度量子阱、三角量子阱的设计等改变量子阱内的极化电场,采用 InGaN 或者 InAlGaIn 作为势垒材料来调节多量子阱中的应力^[3],对 InGaN 多量子阱垒层掺杂 Si 来改善器件的光学及电学性能^[4-6]。势垒层 n 型掺杂对于提升 MQWs 及 LED 器件的性能起着至关重要的作用。目前都通过调控垒层掺杂生长 LED 结构进行表征及光电性能讨论。但对势垒层 Si 掺杂的理论机理探讨研究报道较少。目前,李国强等通过垒层 Si 掺杂来改善 InGaN 绿光多量子阱的界面质量和电流的扩展性提高 LED 光电性能^[7];郭志友等通过垒层的 n 和 p 型掺杂提高 LED 的光输出功率^[8]。Den-Baars 等通过势垒掺 Si 来提高激光器的光增益进而研究影响 InGaN 量子阱的物理机制。

对 InGaN 多量子阱 LED 研究中发现,量子垒的 Si 掺杂增加了电子载流子浓度,有利于屏蔽极化电场的作用^[9-12]。然而,有关通过理论研究势垒层 Si 掺杂调控 InGaN 多量子阱的电场变化的报道较少,其对器件光电性能影响的物理机制还需进一步探讨。本文通过理论仿真计算研究势垒层 Si 掺杂对 InGaN 多量子阱电场的影响,从而获得调控 InGaN 多量子阱极化电场的理论基础,进而改善 InGaN 多量子阱 LED 器件的光电性能。

2 计算模型及参数

采用 $6 \times 6 \text{ K} \cdot \text{P}$ 方法计算了 InGaN 多量子阱 LED 结构,并研究了其光电性质。图 1 是 GaN 基 LED 结构示意图。N-GaN 层的厚度为 $2 \mu\text{m}$,掺杂浓度为 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ (3.2 nm)/GaN:Si (4.8 nm) 多量子阱为 11 个周期;势垒层 GaN:Si 掺杂浓度分别为:0, 1×10^{16} , 5×10^{16} , 1×10^{17} , 5×10^{17} , 1×10^{18} , 5×10^{18} , 1×10^{19} , 2×10^{19} , $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; p-Al_{0.15}Ga_{0.85}N 阻挡层

的厚度为 50 nm,掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; p-GaN 电极接触层掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。仿真计算中带阶比 $\Delta E_c/\Delta E_v = 0.7/0.3$ 为默认参数。电子和空穴的迁移率分别为 $100 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,器件的工作温度为 300 K,仿真计算中其他的半导体材料参数已被文献报道^[13-14]。

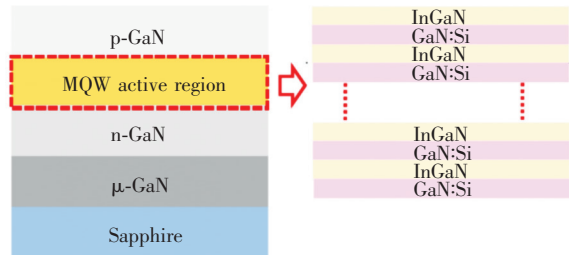


图 1 GaN 基 LED 结构示意图

Fig. 1 Schematic of GaN based LED structure

3 结果与讨论

InGaN/GaN 量子阱区的内部电场是压电极化场和自发极化场共同作用的结果。图 2 为注入电流 60 mA 时,InGaN/GaN 多量子阱区内的电场及电势分布图。随着势垒中掺杂浓度的增加,当掺杂 Si 浓度 $\leq 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,势垒的右边界的电场变化不明显;当掺杂 Si 浓度 $\geq 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,势垒的左边界的电场明显增加,如图 2(b) 所示。这主要是由于势垒层在低掺杂浓度时界面聚集的电子数量较少,电场较弱。而当掺杂浓度高时界面聚集的电子浓度增加。从图 2(b) 中可以观察到势垒的左边界的电场变化不明显,这主要是由于势阱的右边界有大量的空穴与势垒左边界的电子发生复合,导致势垒左边界聚集的电子数量减少。因此,增加势垒掺杂浓度提高了势垒与势阱界面的电场强度。势垒掺杂浓度的增加分布降低了势垒和势阱中的电场强度。

为了研究势垒不同掺杂对量子阱区非辐射复合的影响,分别讨论不同掺杂浓度势垒 LED 随注入电流变化的总的非辐射复合、肖克莱-霍尔-里德复合和俄歇复合的电流密度曲线,如图 3 所示。从图 3(a) 中可以观察到随着注入电流的增加,非辐射复合电流密度逐渐增大。这主要是由于非辐射复合主要由肖克莱-霍尔-里德复合和俄歇复合组成。掺杂浓度的增加可导致量子阱区的这两种方式复合几率增加。当注入电流为 60 mA 时,随着掺杂浓度的增加,总的非辐射复合电流密度逐

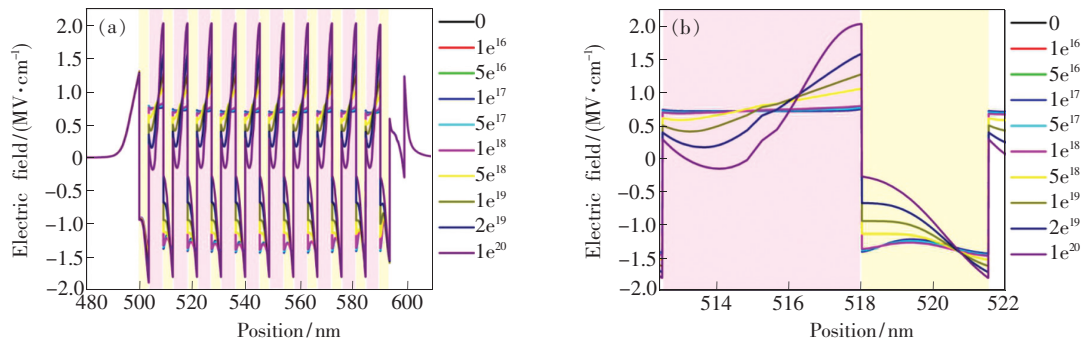


图 2 注入电流为 60 mA 时, 11 个 InGaN/GaN 多量子阱中不同硅掺杂浓度势垒的内电场分布图 (a) 及其局部放大图 (b)。

Fig. 2 Internal electric field distribution (a) of 11 InGaN/GaN multiple quantum wells and its partial enlargement (b) with different silicon doping concentration in barriers at injection current of 60 mA

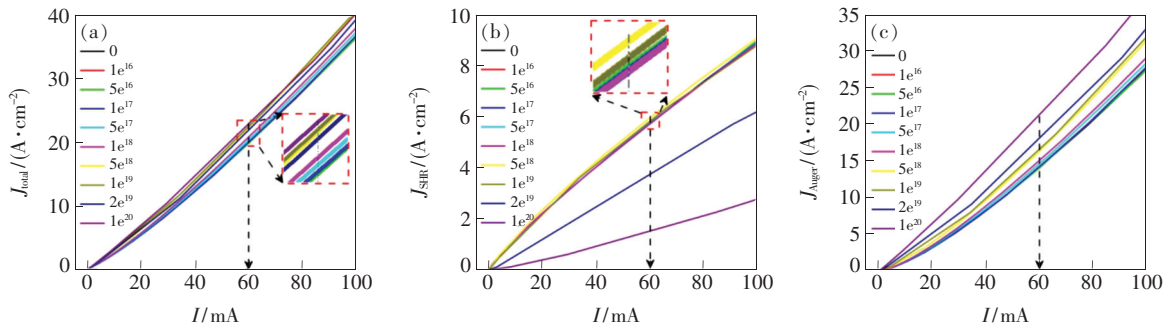


图 3 不同掺杂浓度势垒 LED 随注入电流增加的非辐射复合电流密度变化曲线, 其中包括总非辐射复合电流密度 (a)、肖克莱-霍尔-里德复合电流密度 (b) 和俄歇复合电流密度 (c)。

Fig. 3 Variation curves of non-radiative recombination current density as the injection current increases for different potential barrier LED with different doping concentration, including the total nonradiative recombination current density (a), Shockley-Hall-Read recombination current density (b) and Auger recombination current density (c).

渐增大, 但变化幅度较小。这主要是由于在该电流下肖克莱-霍尔-里德复合与俄歇复合共同作用的结果。如图 3(b) 所示, 在掺杂浓度 $< 1e^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时, 肖克莱-霍尔-里德复合的电流密度变化较小, 变化趋势是随着掺杂浓度的增加肖克莱-霍尔-里德复合的电流密度逐渐增大。然而, 当掺杂浓度 $\geq 1e^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时, SHR 复合几率降低。如图 3(c) 所示, 随着掺杂浓度的增加, Auger 复合几率逐渐增加。这主要是由于非辐射复合几率和掺杂浓度与其相关的系数有关系^[15]。

为了研究势垒 Si 掺杂对 GaN LED 的工作电压的影响, 讨论了不同掺杂浓度势垒 GaN LED 工作电压随注入电流的变化, 如图 4(a) 所示。从图 4(a) 中可以观察到当掺杂浓度 $< 5e^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 随着注入电流的增加, 工作电压变化量较大。当注入电流为 60 mA 时, 工作电压达 3.7 V 左右; 当掺杂浓度 $\geq 5e^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 随注入电流的

增加, 工作电压变化量较小。当注入电流为 60 mA 时, 工作电压约 3.1 V。势垒掺杂浓度的提高有利于 GaN 基 LED 工作电压的降低, 工作电压的升高主要是由于量子阱中的电势变化较大引起的^[7,10]。图 4(b) 是注入电流为 60 mA 时, 不同掺杂浓度势垒的量子阱的电势变化图, 从图中还可以看出随着势垒 Si 掺杂浓度的提高量子阱中的电势逐渐降低, 掺杂浓度为 $0 \sim 1e^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 后面 8 个量子阱中的电势的变化幅度不大, 基本保持一致。但掺杂浓度大于 $1e^{18}$ 小于 $5e^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 量子阱中的电势变化幅度较大, 这可能是由于此时掺杂引起的电场对量子阱中的极化电场影响较大导致^[16-17]。

从图 5(a) 中可以看出, 当 Si 掺杂浓度 $\leq 5e^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 随着势垒掺杂浓度增加, 峰值波长逐渐蓝移。这主要是由于 Si 掺杂减弱了压电极化场^[18]; 随着电流的增加, 峰值波长发生蓝移, 这主

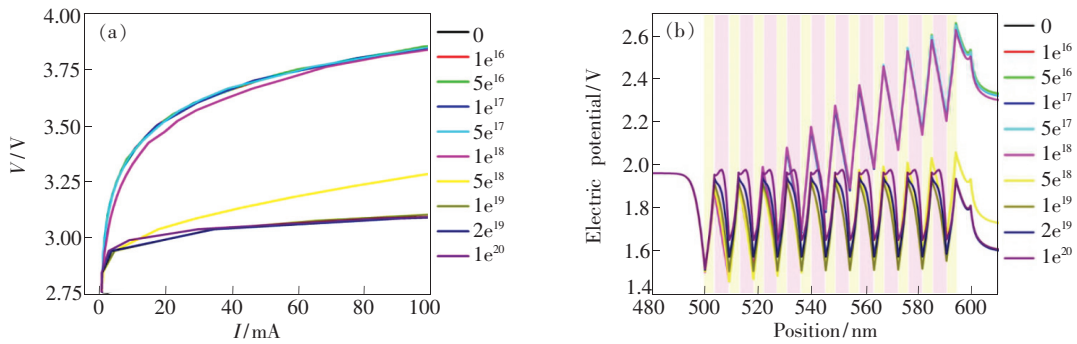


图 4 不同掺杂浓度势垒 LED 的工作电压(a) 随注入电流变化的曲线图和在注入电流为 60 mA 时的电势(b) 变化图
 Fig. 4 Voltage of LED with different doped concentration in barriers (a) versus the injection current and the varied potential (b) at injection current of 60 mA

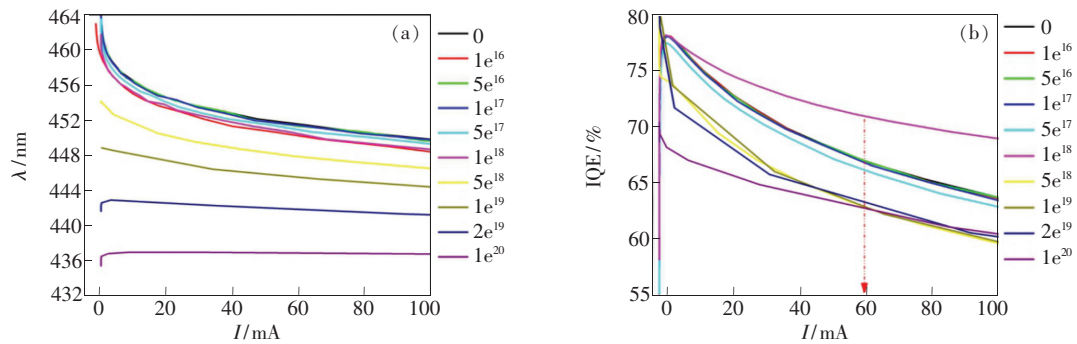


图 5 不同掺杂浓度势垒 LED 峰值波长(a) 和内量子效率(b) 随注入电流变化曲线图
 Fig. 5 Peak wavelength(a) and IQE as a function of injection current for different silicon doping barriers LED

要是由量子限制斯塔克效应引起的^[19]。当掺杂浓度 $> 5e^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,随着注入电流的增加,峰值波长基本不变。这主要可能是由于掺杂浓度的提高导致量子阱中电子准费米能级上移,空穴的准费米能级发生了较大的倾斜导致^[20]。图 5(b) 是不同掺杂浓度势垒的 LED 的内量子效率 (IQE) 随注入电流变化曲线图。随着注入电流的增加,

IQE 逐渐降低。这主要是由于电流的增加,p 型 GaN 层的电势降低,从而降低了势垒的高度,导致载流子的泄漏增加^[21]。当注入电流为 60 mA 时,掺杂浓度为 $1e^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 IQE 最高。为了解释不同掺杂势垒对 IQE 的影响,采用能带理论讨论量子阱中导带、价带、费米能级、电子和空穴的波函数的变化规律。图 6 是注入电流为 60 mA

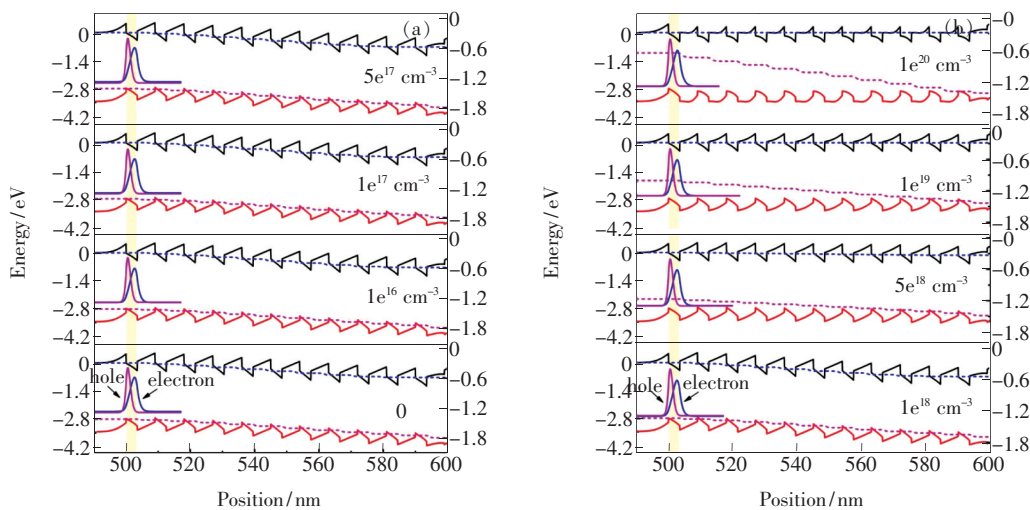


图 6 注入电流为 60 mA 时,不同掺杂浓度势垒 GaN 基 LED 多量子阱的能带图。

Fig. 6 Energy band diagram of GaN based multiple quantum wells with different silicon doping barriers at injection current of 60 mA

时,不同掺杂浓度势垒 InGaN LED 多量子阱的能带图。

从图 6 中可以发现势垒掺杂浓度从 0 增加到 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,电子和空穴的准费米能级几乎未发生变化,说明导带中的电子浓度和价带中的空穴浓度保持不变。而这时导致内量子效率下降的原因主要是由于非辐射复合。从图 5 中可以看出随着势垒掺杂浓度的提高能带结构由倾斜变得水平,电子在导带上的注入效率下降,空穴在价带上的注入效率也开始下降。并且发现势垒掺杂浓度从 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时,准空穴准费米能级左边突然上升,由此可知,空穴浓度在多量子阱中的分布变得不均匀,从右边往左边空穴浓度逐渐降低。这主要是由于空穴准费米能级上升导致的注入率下降,并加剧了电子和空穴波函数的分离^[22-23],进而证明了掺杂浓度 $> 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 量子阱内量子效率下降的原因。当掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、注入电流为 60 mA 时,GaN 基 LED 的内量

子效率最高约 72%,这主要是由于非辐射复合和能带变化共同作用的结果。

4 结 论

本文采用 $6 \times 6 \text{ K} \cdot \text{P}$ 方法从理论上研究了不同势垒硅掺杂浓度对 GaN 基 LED 量子阱中电场的影响规律,并对其光电性质进行了研究。发现当势垒硅掺杂浓度 $> 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,阱垒界面处的电场强度会变大,这主要是由于硅掺杂浓度过高导致量子阱中界面电荷的聚集。总非辐射复合和俄歇复合随着势垒掺杂浓度的增加而增加,而肖克莱-霍尔-里德复合随之减少,这是由于点陷阱的增大形成了缺陷能级导致。势垒掺杂有利于改善载流子的传输特性,从而降低 GaN 基 LED 的工作电压。适当的势垒掺杂降低了量子阱中界面电荷的损耗,当掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、注入电流为 60 mA 时,GaN 基 LED 获得了较高的内量子效率约 72%。

参 考 文 献:

- [1] YAM F K, HASSAN Z. InGaN: an overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms [J]. *Superlatt. Microst.*, 2008, 43(1):1-23.
- [2] KOBAYASHI Y, KUMAKURA K, AKASAKA T, *et al.*. Layered boron nitride as a release layer for mechanical transfer of GaN-based devices [J]. *Nature*, 2012, 484(7393):223-227.
- [3] ZHAO H, LIU G, LI X H, *et al.*. Growths of staggered InGaN quantum wells light-emitting diodes emitting at 520 – 525 nm employing graded growth-temperature profile [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(6):L74.
- [4] LEE Y J, CHEN C H, LEE C J. Reduction in the efficiency-droop effect of InGaN green light-emitting diodes using gradual quantum wells [J]. *IEEE Photonic. Tech. L.*, 2010, 22(20):1506-1508.
- [5] CHANG S J, LAI W C, SU Y K, *et al.*. InGaN-GaN multiquantum-well blue and green light-emitting diodes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2002, 8(2):278-283.
- [6] RYOU J H, LIMB J, LEE W, *et al.*. Effect of silicon doping in the quantum-well barriers on the electrical and optical properties of visible green light-emitting diodes [J]. *IEEE Photon. Tech. L.*, 2008, 20(21):1769-1771.
- [7] LIN Z, HAO R, LI G, *et al.*. Effect of Si doping in barriers of InGaN/GaN multiple quantum wells on the performance of green light-emitting diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2015, 54(2):022102.
- [8] LI J, GUO Z, LI F, *et al.*. Performance enhancement of blue light-emitting diodes by using special designed n and p-type doped barriers [J]. *Superlatt. Microst.*, 2015, 85:454-460.
- [9] TSAI T L, CHANG C S, CHEN T P, *et al.*. Effect of barrier thickness and barrier doping on the properties of InGaN/GaN multiple-quantum-well structure light emitting diode [J]. *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2010, 278(1):263-266.
- [10] WU L W, CHANG S J, WEN T C, *et al.*. Influence of Si-doping on the characteristics of InGaN-GaN multiple quantum-well blue light emitting diodes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2010, 38(5):446-450.
- [11] PARK E H, KANG D N H, FERGUSON I T, *et al.*. The effect of silicon doping in the selected barrier on the electroluminescence of InGaN/GaN multiquantum well light emitting diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(3):2103.
- [12] KWON M K, PARK I K, BAEK S H, *et al.*. Si delta doping in a GaN barrier layer of InGaN/GaN multiquantum well for an efficient ultraviolet light-emitting diode [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 97(10):48-49.

- [13] BERNARDINI F, FIORENTINI V, VANDERBILT D. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides[J]. *Phys. Rev. B*, 1997, 56(16):10024-10027.
- [14] VURGAFTMAN I, MEYER J R, RAMMOHAN L R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89(11):5815-5875.
- [15] SHEN Y C, MUELLER G O, WATANABE S, *et al.*. Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(14):2-2.
- [16] SCHUBERT M F, XU J, DAI Q, *et al.*. On resonant optical excitation and carrier escape in GaInN/GaN quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94(8):183507.
- [17] PARK E H, KANG D N H, FERGUSON I T, *et al.*. The effect of silicon doping in the selected barrier on the electroluminescence of InGaN/GaN multiquantum well light emitting diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(3):2103.
- [18] DEGUCHI T, SHIKANAI A, TORII K, *et al.*. Luminescence spectra from InGaN multiquantum wells heavily doped with Si [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72(25):3329-3331.
- [19] LEE Y J, CHEN C H, LEE C J. Reduction in the efficiency-droop effect of InGaN green light-emitting diodes using gradual quantum wells [J]. *IEEE Photon. Tech. L.*, 2010, 22(20):1506-1508.
- [20] WANG T, SAEKI H, BAI J, *et al.*. Effect of silicon doping on the optical and transport properties of InGaN/GaN multiple-quantum-well structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 76(13):1737-1739.
- [21] DALFORS J, BERGMAN J P, HOLTZ P O, *et al.*. Optical properties of doped InGaN/GaN multiquantum-well structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74(22):3299-3301.
- [22] KAWAGUCHI Y, HUANG C Y, WU Y R, *et al.*. Influence of polarity on carrier transport in semipolar (20 $\bar{2}$ 1) and (20 $\bar{2}$ 1) multiple-quantum-well light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(23):053502.
- [23] KIVISAARI P, OKSANEN J, TULKKI J. Effects of lateral current injection in GaN multi-quantum well light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2012, 111(10):2217-2225.



张正宜(1982 -),男,山西太原人,硕士,讲师,2011年于太原理工大学获得硕士学位,主要从事光电子器件的研究。

E-mail: 1445530858@qq.com