

# p-AlGa<sub>N</sub> 电子阻挡层 Al 组分对 Si 衬底绿光 LED 性能影响的研究\*

毛清华 江风益<sup>†</sup> 程海英 郑畅达

(南昌大学教育部发光材料与器件工程研究中心, 南昌 330047)

(2010 年 1 月 25 日收到; 2010 年 3 月 8 日收到修改稿)

在 Si(111) 衬底上利用 MOCVD 方法生长了具有不同 Al 组分 p-AlGa<sub>N</sub> 电子阻挡层的绿光 InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> LED 结构, 并对其光电性能进行了研究. 结果表明, 不同 Al 组分样品的量子效率随电流密度的变化规律呈现多样性. 在很低电流密度范围, LED 量子效率随 Al 组分升高而下降; 在较高电流密度范围, LED 量子效率随 Al 组分升高而升高, 即此时缓解了量子效率随电流密度增大而衰退的速率 (即 droop 效应); 但随着电流密度的进一步升高, 反而加快了量子效率衰退的速率. 这些现象解释为不同 Al 组分的 p-AlGa<sub>N</sub> 对空穴和电子注入到量子阱进行复合的机理存在差异所致.

**关键词:** 氮化镓, p-AlGa<sub>N</sub>, 绿光 LED, 量子效率

**PACC:** 7280E, 7280E, 7360L, 8250C

## 1. 引 言

近年来, GaN 基半导体材料被证实光电器件中有着巨大的应用前景<sup>[1]</sup>. 在氮化物材料中, 电子和空穴的有效质量相差很大, 使得电子极易溢出有源区, 而空穴则较难注入, 致使电子和空穴的复合过程经常发生在 p-GaN 处而非有源区<sup>[2]</sup>. AlGa<sub>N</sub> 材料由于其禁带宽度 (3.4—6.2 eV) 较 GaN 材料 (3.4 eV) 大<sup>[3]</sup>, 广泛应用于 GaN 发光二极管 (LED) 及其他器件中作为电子势垒层 (EBL)<sup>[4-9]</sup>. AlGa<sub>N</sub> EBL 的存在能够较有效的阻挡电子从有源区溢出, 从而增加有源区电子的数量, 提高阱区载流子复合效率<sup>[6]</sup>. Jang 等报道通过改变 p-AlGa<sub>N</sub> 势垒层的厚度提高了 LED 器件的抗静电性能<sup>[7]</sup>, Grzanka 等通过优化 p-AlGa<sub>N</sub> 层的掺 Mg 量提高了 LED 器件的低温电致发光性能<sup>[8]</sup>. Han 等人报道了不同 Al 组分 p-AlGa<sub>N</sub> EBL 对蓝光 LED 量子效率衰退的影响<sup>[9]</sup>. GaN 基绿光 LED 在全彩显示和固态照明等领域有着非常重要应用前景, 但由于其量子阱中 In 组分含量较高, 使其比蓝光 LED 中存在更大的应力和极化

电场, 导致绿光 LED 的发光效率偏低, 使其应用范围受到限制. 因而提高 GaN 基绿光 LED 的发光效率成为本领域的前沿课题. 据我们所知, 到目前为止, p-AlGa<sub>N</sub> EBL 对绿光 LED 的影响研究尚未见报道. 本文通过改变 p-AlGa<sub>N</sub> EBL Al 组分, 研究了其对 Si 衬底绿光 LED 光电性能的影响.

## 2. 实 验

采用 Thomas Swan 公司生产的 CCS MOCVD 系统, 在 2 英寸的 Si 衬底上生长了 GaN 基多量子阱 (MQW) 结构, 外延和器件结构已有报道<sup>[10-12]</sup>. 三甲基铝 (TMAI), 三甲基镓 (TMGa), 三甲基铟 (TMIn) 分别作为 Al 源, Ga 源和 In 源, 氨气 (NH<sub>3</sub>) 作为 N 源, SiH<sub>4</sub> 和 CP<sub>2</sub>Mg 分别作为 n 型和 p 型掺杂剂. 在 Si 衬底上, 先生长 AlN/GaN 多层结构缓冲层, 随后在其上生长 n-GaN 以及 MQW 结构. 如表 1 所示, 本文设计了四种不同的样品. 样品 A 没有生长 p-AlGa<sub>N</sub> EBL, 而是直接在 MQW 上生长了 p-GaN 层; 样品 B, C 以及 D 在 MQW 上生长了 Mg 掺杂的 p-AlGa<sub>N</sub> EBL, 其 Al 组分分别设计为 15%, 20% 以及

\* 教育部长江学者与创新团队发展计划 (批准号: IRT0730), 国家高新技术研究发展计划 (批准号: 2006AA03A128), 江西省研究生创新基金 (批准号: YC09A024) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: jiangfy@ncu.edu.cn

30%, 随后在 p-AlGaIn 层上生长了 p-GaN 层. 所有外延片制作完成后, 均采用同一芯片制造工艺制作完成: 首先在 p 面制作 Pt 欧姆接触并采用压焊方式将外延层转移至新的导电基板上, 然后利用 Si 腐蚀

液将原 Si 衬底去除直至露出 n-GaN 层, 器件结构如图 1 所示. 芯片的尺寸为  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  并采用环氧树脂 5 mm 中卡子弹头封装, 所选取样品在常温 20 mA 下测试主波长均为 520 nm. 封装后的 LED

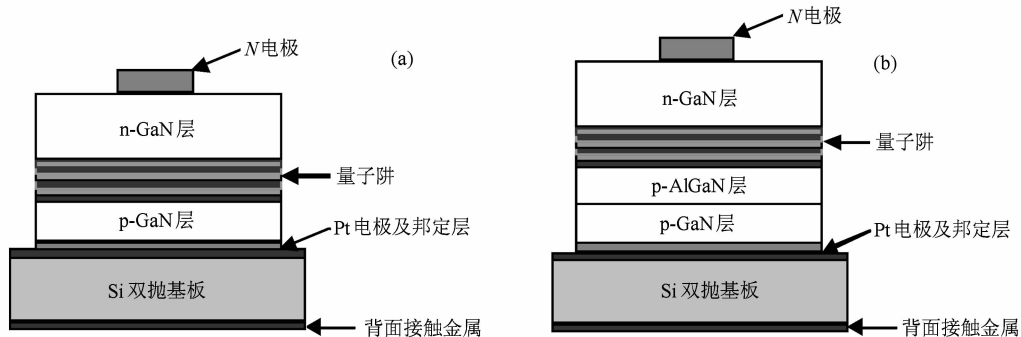


图 1 器件结构示意图 (a) 样品 A; (b) 样品 B, C, D

利用 Keithley 2635 电源和 CAS 140CT 积分球对其光电性能进行测量, 为尽量避免热效应影响, 测量时采用脉冲直流电源, 脉冲持续时间为 1 ms.

### 3. 实验结果及讨论

如图 2 所示为样品的  $I$ - $V$  特性曲线图. 从图中可以看出, 样品 A, B, C 在相同电流下工作电压相近, 而样品 D 的工作电压却有较大幅度的升高. 如表 1 所示, 在正向 20 mA 下样品 D 的工作电压约有

0.3 V 的升高. 在 Al 组分小于 20% 时引入的 p-AlGaIn EBL 并没有引起电压较大变化的原因归结为电子势垒层的厚度较薄且势垒高度较低. 而 p-AlGaIn 组分为 30% 时器件工作电压的突升可能是由两方面的原因引起的, 一方面高 Al 组分的 AlGaIn 会与相邻的 GaN 层产生较大的突变异质结效应<sup>[6]</sup>; 另外一方面, 随 p-AlGaIn 中 Al 组分的升高, 空穴的热激活能升高, 导致电子势垒层空穴的浓度减少<sup>[13]</sup>. 这两方面的原因都可能使得器件工作电阻增加而导致高的工作电压.

表 1 四组样品(无 Ag 反射镜及无表面粗化, 芯片尺寸  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ ) 光电参数

样品编号	Al 组分/%	(20 mA) 主波长/nm	(20 mA) $V_F$ /V	(100 A/cm <sup>2</sup> , 20 mA) $P_o$ /mW
A	0	520	3.25	3.01
B	15	520	3.21	3.24
C	20	520	3.27	3.43
D	30	520	3.52	3.40

如图 3 所示为样品光功率随电流密度变化特性曲线. 从图中可以看出, 引入 p-AlGaIn EBL 在 20—500 A/cm<sup>2</sup> 能够不同幅度提高 LED 的光功率. 如表 1 所示, 在 100 A/cm<sup>2</sup> (20mA) 下, 较没有电子势垒层的样品 A 相比, p-AlGaIn Al 组分为 15%, 20%, 30% 的样品 B, C, D 光功率分别提高了 8%, 14%, 13%. 光功率的提高归结为 EBL 能够较有效的阻挡电子的溢出, 使得有源区有效复合电子数增加. 但当 Al 组分由 20% 增加到 30% 时, 光功率的变化并不明显甚至有下降的趋势. 这可能是因为较高 Al 组分的 p-AlGaIn 势垒层虽然能够更有效的阻挡电子的溢出,

但同时也使得空穴注入量子阱效率降低. Grzanka 等认为, 在优化 p-AlGaIn 电子势垒层时, 除了尽量减少电子的溢出, 也应尽可能降低其对空穴的阻挡作用<sup>[8]</sup>.

通过测量不同工作电流下的光功率和主波长, 可计算得到器件的外量子效率 (EQE)<sup>[6]</sup>. 据作者所知, 在很小电流密度范围 EQE 随 p-AlGaIn Al 组分变化的特性未见报道<sup>[8,9]</sup>, 本文对此进行了细致的研究. 图 4 为本文四个样品 EQE 随电流密度变化曲线, 它们的变化趋势相同, 即开初 EQE 随电流密度增大而增大, 当到达 EQE 峰值对应的电流密度之

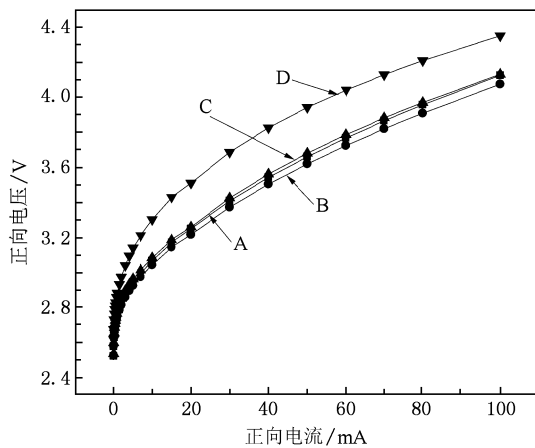


图2 样品 A, B, C 和 D 正向工作电压随电流变化特性曲线

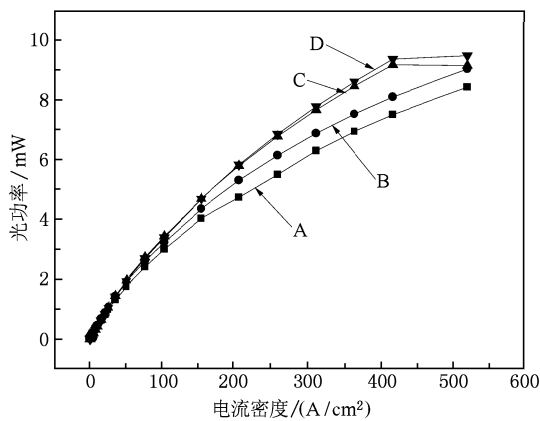
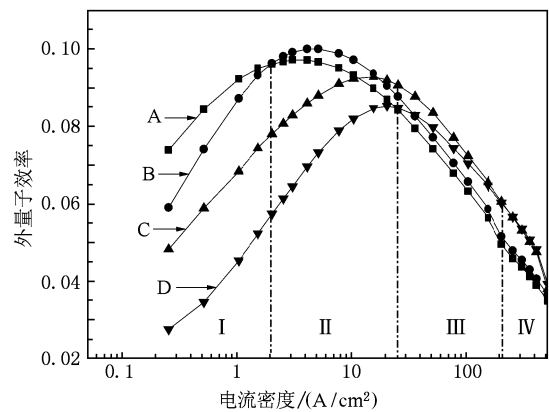


图3 样品 A, B, C 和 D 光功率随电流密度变化曲线

后,各样品 EQE 随电流密度的增大而衰退(即 Efficiency droop).但是,它们在不同电流密度范围内表现出不同的变化规律.本文按电流密度大小分四个区域进行讨论.在 I 区( $0.25\text{--}5\text{ A/cm}^2$ ),随 p-AlGaIn Al 组分的升高, EQE 逐渐减小.这个原因可以归结为在很小电流密度时电子的浓度较小,在量子阱中不易产生溢出现象,而 p-AlGaIn 对空穴的阻挡作用可能反而使得 EQE 值降低.但是在较大电流密度范围内(如图 4 III 区和 IV 区所示,  $20\text{--}500\text{ A/cm}^2$ ),随着 p-AlGaIn Al 组分的升高, EQE 逐渐增大,这一现象可归结为高 EBL 对电子阻挡效应的增大使得阱内复合载流子数量增多所致.

有关 Efficiency droop 问题, Kim 等认为和载流子的溢出有关<sup>[14]</sup>. 本文实验结果在一定程度上反映不同 Al 组分 p-AlGaIn EBL 对载流子注入的影响.其中, EQE 衰退规律, 样品 A 和 B 相似, 而样品 C 和 D 接近. 在 III 区( $20\text{--}200\text{ A/cm}^2$ ) 样品 C 和 D 的 EQE

下降速率要慢于样品 A 和 B; 而在 IV 区( $200\text{--}500\text{ A/cm}^2$ ) 样品 C 和 D 的 EQE 下降速率反而快于样品 A 和 B. 即在 III 区, p-AlGaIn EBL 对电子的阻挡作用有效缓解了 EQE 的衰退速率; 但是在 IV 区, p-AlGaIn EBL 对空穴的阻挡作用反而使得 EQE 的衰退速率加快. Heikman 等认为在 GaN 垒层, p-AlGaIn 电子势垒层和 p-GaN 层之间存在着极化电场, 导致 p-AlGaIn 和 p-GaN 界面处价带形成空穴集聚的凹口(notches), 而在 GaN 垒层与 p-AlGaIn 界面处价带形成对空穴阻挡作用的尖峰(spikes)<sup>[15]</sup>. 在电流密度较大的情况下, 该效应对空穴的阻挡作用将加大. 并且随着电流密度的增大, 能态填充效应使电子的能量升高, 电子势垒层的阻挡作用慢慢削弱. 这两方面的作用均可能导致样品 C 和 D 的 EQE 在大电流密度时衰退速率大于样品 A 和 B. Han 等人<sup>[9]</sup>报道了蓝光 LED 类似的 EQE 随电流密度的变化趋势, 当电流密度小于  $15\text{ A/cm}^2$  时, 具 p-AlGaIn 的蓝光样品 EQE 高于无 p-AlGaIn 样品; 在电流密度大于  $15\text{ A/cm}^2$ , 情况正好相反. 而本文绿光 LED 在  $20\text{--}500\text{ A/cm}^2$  很宽的电流密度范围内, 仍存在有 p-AlGaIn 的样品 EQE 均大于无 p-AlGaIn 样品的规律. 这可能是由于蓝光和绿光 LED 量子阱中 In 组分不同所致.

图4 样品 A, B, C 和 D 外量子效率随电流密度变化曲线(无 Ag 反射镜及无表面粗化, 芯片尺寸  $200\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ )

## 4. 结 论

分别制作了无 p-AlGaIn 层以及 p-AlGaIn 层 Al 组分分别为 15%, 20% 以及 30% 的 Si 衬底绿光 LED 四组样品, 通过光电性能研究, 结果表明: 与无 p-AlGaIn 层的样品相比, Al 组分为 15%, 20% 以及

30% 的样品在  $100 \text{ A/cm}^2$ , 20 mA 时光功率分别提高了 8%, 14% 以及 13%。在很低电流密度范围 ( $0.25\text{—}5 \text{ A/cm}^2$ ), LED 量子效率随 Al 组分升高而下降, 原因归结为此时量子阱内自由电子不易溢出, 而 p-AlGaIn EBL 对空穴仍有阻挡作用。在较高

电流密度范围 ( $20\text{—}200 \text{ A/cm}^2$ ), p-AlGaIn 层对电子的有效阻挡作用使得 LED 量子效率随 Al 组分升高而升高, 即此时缓解了量子效率随电流密度增大而衰退的速率。但随着电流密度的进一步升高 ( $200\text{—}500 \text{ A/cm}^2$ ), 反而增大了量子效率衰退的速率。

- 
- [1] Pimpitkar S, Speck J S, Denbaars S P, Nakamura S 2009 *Nat. Photonics* **3** 179
- [2] Domen K, Soejima R, Kuramata A, Tanahashi T 1998 *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* **3** 1
- [3] Ambacher O 1998 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31** 2653
- [4] Liu F, Wang T, Shen B, Huang S, Lin F, Ma N, Xu F J, Wang P, Yao J Q 2008 *Chin. Phys. B* **18** 1614
- [5] Feng Q, Tian Y, Bi Z W, Yue Y Z, Ni J Y, Zhang J C, Hao Y, Yang L A 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3014
- [6] Schubert E F 2003 *Light-Emitting Diodes* (Cambridge: Cambridge University Press) p75
- [7] Jang C H, Sheu J K, Tsai C M, Shei S C, Lai W C, Chang S J 2008 *IEEE Photonic Technol.* **20** 1142
- [8] Grzanka S, Franssen G, Targowski G, Krowicki K, Suski T, Czerhecki R, Perlin P, Leszczynski M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 10357
- [9] Han S, Lee D, Lee S, Cho C, Kwon M, Lee S, Noh D, Kim D, Kim Y, Park S 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 231123
- [10] Mo C L, Fang W Q, Pu Y, Liu H C, Jiang F Y 2005 *J. Cryst. Growth* **285** 312
- [11] Xiong C B, Jiang F Y, Fang W Q, Wang L, Mo C L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3176 (in Chinese) [熊传兵、江风益、方文卿、王立、莫春兰 2008 物理学报 **57** 3176]
- [12] Xiong C B, Jiang F Y, Wang L, Fang W Q, Mo C L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7861 (in Chinese) [熊传兵、江风益、王立、方文卿、莫春兰 2008 物理学报 **57** 7861]
- [13] Suzuki M, Nishio J, Ohomura M, Hongo C 1998 *J. Cryst. Growth* **189** 511
- [14] Kim M H, Schubert M F, Dai Q, Kim J K, Schubert E F, Piprek J, Park Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 183507
- [15] Heikman S, Keller S, Wu Y, Speck J S, Denbaars S P, Mishra U K 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 10114

## p-AlGa<sub>N</sub> electron blocking layer with different Al fractions on green InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> LEDs grown on Si substrates\*

Mao Qing-Hua Jiang Feng-Yi<sup>†</sup> Cheng Hai-Ying Zheng Chang-Da

(*Education Ministry Engineering Reserch Center for Luminescence Matirials and Devices, Nanchang University, Nanchang 330047, China*)

(Received 25 January 2010; revised manuscript received 8 March 2010)

### Abstract

We grow green light emitting diodes (LEDs) on Si(111) substrates with p-AlGa<sub>N</sub> electron blocking layers (EBLs) which have different Al frations. The results show that the variation of quantum efficiency with current density displays a diversity. At lower current densities, the quantum efficiency of LED increases with Al fraction decreasing, at higher current densities, however, the quantum efficiency of LED increases with Al fraction decreasing, which is attributed to the complicated mechnism when electron and hole are recombined in the quantum well.

**Keywords:** Ga<sub>N</sub>, p-AlGa<sub>N</sub>, green light emitting diodes, quantum efficiency

**PACC:** 7280E, 7280E, 7360L, 8250C

---

\* Project supported by the Changjiang Scholars and Innovative Reserch Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IrT0730), the National High Technology and Development Program of China (Grant No. 2006AA03A128).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: jiangfy@ncu.edu.cn