

等离子体表面处理对硅衬底 GaN 基蓝光发光二极管内置 n 型欧姆接触的影响

封波 邓彪 刘乐功 李增成 冯美鑫 赵汉民 孙钱

Effect of plasma surface treatment on embedded n-contact for GaN-based blue light-emitting diodes grown on Si substrate

Feng Bo Deng Biao Liu Le-Gong Li Zeng-Cheng Feng Mei-Xin Zhao Han-Min Sun Qian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 047801 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.047801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.047801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I4>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

p 型层结构与掺杂对 GaInN 发光二极管正向电压温度特性的影响

Influences of p-type layer structure and doping profile on the temperature dependence of the forward voltage characteristic of GaInN light-emitting diode

物理学报.2015, 64(10): 107801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.107801>

刻蚀 AlN 缓冲层对硅衬底 N 极性 n-GaN 表面粗化的影响

Influence of etching AlN buffer layer on the surface roughening of N-polar n-GaN grown on Si substrate

物理学报.2016, 65(8): 088501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.088501>

TiO<sub>2</sub> 微粒对远程荧光粉膜及白光发光二极管器件光色性能的影响

Investigation of photo-chromic properties of remote phosphor film and white light emitting diode mixed with TiO<sub>2</sub> particles

物理学报.2016, 65(5): 058501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.058501>

利用单层密排的纳米球提高发光二极管的出光效率

Light-extraction enhancement of GaN-based LEDs by closely-packed nanospheres monolayer

物理学报.2015, 64(14): 148502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.148502>

利用温变电容特性测量发光二极管结温的研究

Junction temperature measurement of light-emitting diodes using temperature-dependent capacitance

物理学报.2015, 64(11): 118501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.118501>

# 等离子体表面处理对硅衬底 GaN 基蓝光发光二极管内置 n 型欧姆接触的影响\*

封波<sup>1)2)</sup> 邓彪<sup>2)</sup> 刘乐功<sup>2)</sup> 李增成<sup>2)</sup> 冯美鑫<sup>3)</sup> 赵汉民<sup>2)</sup> 孙钱<sup>2)3)†</sup>

1)(南昌大学, 国家硅基 LED 工程技术研究中心, 南昌 330047)

2)(晶能光电(江西)有限公司, 南昌 330029)

3)(中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 中科院纳米器件与应用重点实验室, 苏州 215123)

(2016年10月13日收到; 2016年11月21日收到修改稿)

硅衬底 GaN 基发光二极管(LED)的内置 n 型欧姆接触在晶圆键合时的高温过程中常常退化, 严重影响 LED 的工作电压等器件性能. 本文深入研究了内置 n 电极蒸镀前对 n-GaN 表面的等离子体处理工艺对硅衬底 GaN 基发光二极管 n 型欧姆接触特性的影响. 实验结果表明, 1.1 mm × 1.1 mm 的 LED 芯片在 350 mA 电流下, n-GaN 表面未做等离子体处理时, n 电极为高反射率 Cr/Al 的芯片正向电压为 3.43 V, 比 n 电极为 Cr 的芯片正向电压高 0.28 V. n-GaN 表面经 O<sub>2</sub> 等离子体表面处理, Cr/Al 和 Cr 电极芯片的正向电压均有所降低, 但 Cr/Al 电极芯片的正向电压仍比 Cr 电极芯片高 0.14 V. n-GaN 表面经 Ar 等离子体处理后, Cr/Al 电极芯片正向电压降至 Cr 电极芯片的正向电压, 均为 2.92 V. 利用 X 射线光电子能谱对 Ar 等离子体处理前后的 n-GaN 表面进行分析发现, Ar 等离子体处理增加了 n-GaN 表面的 N 空位(施主)浓度, 更多的 N 空位可以提高 n 型欧姆接触的热稳定性, 缓解晶圆键合的高温过程对 n 型欧姆接触特性的破坏. 同时还发现, 经过 Ar 等离子体处理并用 HCl 清洗后, n-GaN 表面的 O 原子含量略有增加, 但其存在形式由以介电材料 GaO<sub>x</sub> 为主转变为导电材料 GaO<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub> 和介电材料 GaO<sub>x</sub> 含量相当的状态, 这会使得接触电阻进一步降低. 上述两方面的变化均有利于降低 LED 芯片的正向电压.

**关键词:** 氮化镓, 发光二极管, 等离子体表面处理, n 型欧姆接触

**PACS:** 78.66.Fd, 85.60.Jb, 52.77.Bn, 73.40.Cg

**DOI:** 10.7498/aps.66.047801

## 1 引言

GaN 基发光二极管(light-emitting diode, LED)已经广泛应用于通用照明、全彩显示、汽车头灯和消费电子等领域<sup>[1,2]</sup>. 通过晶圆键合和衬底剥离技术制备的垂直结构 LED, 其 p 电极采用整面高反射率的 Ag 基金属焊接在高电导、高热导的基板上, n 电极为格栅状导线置于 n-GaN 表面, 具

有电流扩散好、取光效率高、衬底散热快等优点, 被视为大功率 LED 的最佳选择之一<sup>[3-5]</sup>. 然而, 这种垂直结构的设计仍然存在一些缺点, 如 n 电极会吸收有源区发出的一部分光<sup>[6,7]</sup>, n 电极牺牲的发光面积与 n 面电流扩展之间的矛盾等, 尤其在大电流注入下影响着 LED 的外量子效率. 为了解决上述问题, 研究人员研发了 n 电极内置的 LED 结构<sup>[8-10]</sup>, 采用一层绝缘材料把 p, n 电极隔离开, n 电极采用通孔的方式从 p 面连接到 n-GaN. 这种新

\* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2015AA03A102)、国家重点研发计划(批准号: 2016YFB0400104)、国家自然科学基金(批准号: 61534007, 61404156, 61522407, 61604168)、中国科学院前沿科学重点研究项目(批准号: QYZDB-SSW-JSC014)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20160401)、中国博士后基金(批准号: 2016M591944)、发光学及应用国家重点实验室开放课题(批准号: SKLA-2016-01)、集成光电子学国家重点联合实验室开放课题(批准号: IOSKL2016KF04, IOSKL2016KF07)和中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所自有资金(批准号: Y5AAQ51001)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [qsun2011@sinano.ac.cn](mailto:qsun2011@sinano.ac.cn)

型设计不仅消除了 GaN 表面格栅状的 n 电极对光的遮挡吸收效应, 而且通过均匀分布在芯片之中的内置 n 电极(直接连接在导电基板上)显著改善了电流扩展. 文献 [9] 中格栅状 n 电极 LED 在电流密度为  $14 \text{ A/cm}^2$  时, 发光明显不均匀, 反映出靠近焊盘区域电流密度大于焊盘对面区域, 影响了发光效率. 而 n 电极内置的 LED, 即使在电流密度为  $14 \text{ A/cm}^2$  时芯片发光仍然均匀.

上述两种结构的 LED 在器件工艺上有着较大的差别. 格栅状的 n 电极在晶圆键合及衬底去除之后才制备, 而内置的 n 电极在晶圆键合前就制备完成, 也就是说制备好的 n 型接触需要经历晶圆键合时的高温过程, 容易导致 LED 的 n 型欧姆接触产生退化, 正向工作电压升高. Greco 等 [11] 把 n 电极和 n-GaN 接触的相关文献进行了总结: 当 n-GaN 的掺杂达到一定浓度时, n 型接触由于隧穿效应, 在未退火时即呈现欧姆特性, 但是在经历  $200\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$  的中间温度退火后 n 型金半接触可能会变为整流特性. 因此为了获得稳定的欧姆接触, 一般会对 n 型金半接触进行至少  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  以上的高温退火. 然而高温过程会使 p 面的 Ag 基反射镜产生金属“球聚”, 严重影响 p 电极的反射率和接触特性 [12,13]. 因此, 对于具有内置 n 电极的 LED 而言, n 型金半接触必须要经历键合过程(键合温度刚好在前文提及的欧姆接触容易退化的  $200\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$  中间温度范围), 而且要在不能高温退火的条件下获得良好的欧姆接触特性, 这是一项既具有挑战但又十分重要的工作. 本文通过等离子体表面处理的方法解决了具有内置 n 电极的 LED 的 n 型欧姆接触问题, 获得了良好的 n-GaN 欧姆接触电极制备工艺, 大幅降低了 LED 的正向电压. 同时采用 X 射线光电子能谱 (XPS) 等手段分析了其中的物理机理.

## 2 实验

采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 系统在 Si(111) 衬底上生长 LED 外延片 [14,15]. 该外延结构包括约  $1 \text{ }\mu\text{m}$  厚的 AlN/AlGaIn 缓冲层 [16],  $1 \text{ }\mu\text{m}$  厚的不掺杂 u-GaN 层,  $3 \text{ }\mu\text{m}$  厚的 n-GaN 层(掺 Si 浓度为  $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ),  $0.1 \text{ }\mu\text{m}$  厚的 In-GaN/GaN 多量子阱层和  $0.2 \text{ }\mu\text{m}$  厚的 p-GaN 层. 生长完成后, 将外延片置于气氛为  $\text{N}_2 : \text{O}_2 = 4 : 1$ 、温度为  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  的炉管中退火  $15 \text{ min}$ , 用于激活 p-GaN 中的 Mg 受主. LED 芯片的制备过程如下: 1) 用硫酸和双氧水的混合溶液清洗掉外延片表面

的污染物, 用稀氢氟酸溶液去除 p-GaN 表面的氧化物; 2) 用电子束蒸镀的方法在外延片表面蒸镀 Ag 基反射镜, 并用快速热处理系统 (RTA) 对 Ag 基反射镜做合金处理, 使之与 p-GaN 形成良好的欧姆接触; 3) 采用光刻和腐蚀工艺使反射镜图形化; 4) 用光刻和感应耦合等离子体刻蚀 (ICP) 技术, 对反射镜图形内的外延表面进行刻蚀, 直至 n-GaN 露出; 5) 用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 在外延片表面沉积一层  $800 \text{ nm}$  厚的  $\text{SiO}_2$  绝缘层, 用于隔离 p 面和 n 面的金属, 并采用光刻和腐蚀的方法去除掉 n-GaN 表面的  $\text{SiO}_2$  层; 6) 用电子束蒸镀和剥离 (lift-off) 的方法在 n-GaN 表面形成 n 型接触. 为了改善金属和 n-GaN 表面的接触特性, 在蒸镀 n 电极之前, 利用反应离子刻蚀 (RIE) 系统对 n-GaN 表面分别进行了  $\text{O}_2$  和 Ar 等离子体处理 (RIE 的射频功率为  $80 \text{ W}$ , 处理时间为  $5 \text{ min}$ ), 等离子体处理之后, 用  $\text{HCl} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1$  的溶液清洗 n-GaN 的表面, 再用去离子水清洗并甩干; 等离子体处理的流程如图 1 所示. 为了排除外延工艺对实验结果的影响, 本文选取同一外延生长炉次的 6 片外延片进行实验, 分别标记为 A, B, C, D, E 和 F, 其中, A, B, C 的 n 电极为  $\text{Cr}(30 \text{ nm})/\text{Pt}(50 \text{ nm})/\text{Au}(50 \text{ nm})$ , D, E, F 的 n 电极为  $\text{Cr}(1.1 \text{ nm})/\text{Al}(150 \text{ nm})/\text{Cr}(30 \text{ nm})/\text{Pt}(50 \text{ nm})/\text{Au}(50 \text{ nm})$ , 其中, 样品 A 和样品 D 没有进行等离子体表面处理, 样品 B 和样品 E 用  $\text{O}_2$  等离子体表面处理, 样品 C 和样品 F 用 Ar 等离子体表面处理; 7) n 电极制备完成后, 在外延片表面蒸镀包含有 Ti, Pt, Ni, Sn, Au 的键合金属层, 利用晶圆键合技术, 将外延片和蒸镀有同样键合金属层的 Si(100) 基板压合在一起; 8) 把用于外延生长的 Si(111) 衬底在氢氟酸、硝酸和冰乙酸的混合液中去除, 实现 GaN 薄膜的转移, 得到氮极性面朝上的 GaN; 9) 用 ICP 技术对 AlN 表面进行刻蚀处理, 使缓冲层 AlN/AlGaIn 完全去除, 露出 n-GaN. 然后, 在 KOH 溶液中对整个外延片表面做粗化处理, 结合光刻和腐蚀技术把部分 n-GaN 去除, 露出部分 Ag 基反射镜金属和  $\text{SiO}_2$  绝缘层, 实现了芯片之间的隔离; 10) 采用光刻和电子束蒸镀技术, 于露出的 Ag 基反射镜金属上制备出用于焊线的焊盘.

本文中 LED 芯片的尺寸为  $1.1 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$ , 其截面示意图见图 2(c). 从每种样品中选取 20 个以上峰值波长为  $456 \text{ nm}$  的 LED 芯片, 利用积分球系统测试室温下 LED 芯片的光电参数. 采用 XPS 分析 n-GaN 表面的化学结合特性.

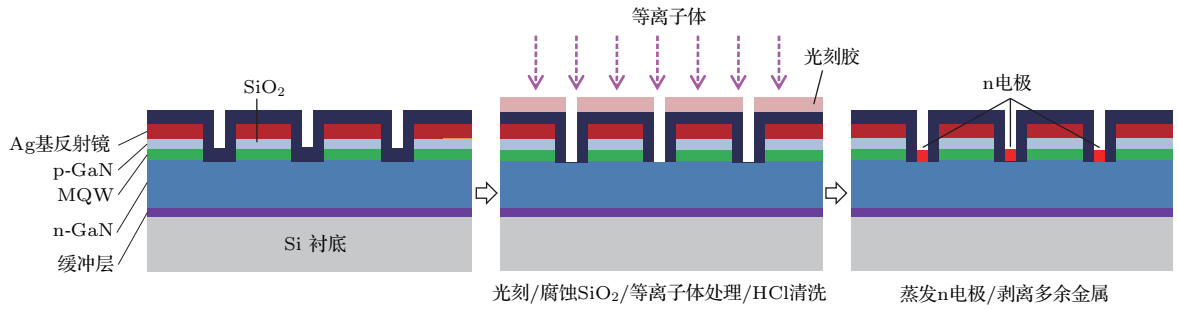


图1 (网刊彩色) 等离子体处理的流程示意图

Fig. 1. (color online) Schematic of Ar plasma treatment process.

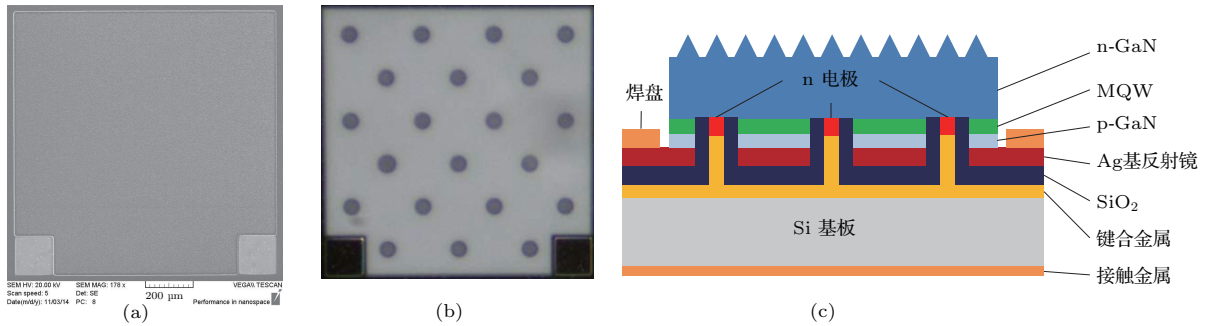


图2 (网刊彩色) LED 芯片的 (a) SEM 图, (b) 光学显微镜图, (c) 截面示意图

Fig. 2. (color online) (a) A SEM image, (b) an optical microscope image, (c) a schematic cross-sectional view of LED chip.

### 3 结果与讨论

图2(a)和图2(b)分别为LED芯片在扫描电子显微镜(SEM)和光学显微镜中的图片,两者看起来有一些不同,在光学显微镜中可以看到黑色圆圈在SEM中却看不到.这是因为这些黑色的圆圈是由通孔的方式在LED芯片内部制备的n型接触所形成,然而n-GaN虽为光学透明,但是在SEM中却无法看到n-GaN的内部结构,故仅能看到其表面形貌.

图3所示为不同样品对应的LED芯片在350 mA电流下的正向电压的箱型图.对于n电极为Cr/Pt/Au(Cr电极芯片)和Cr/Al/Cr/Pt/Au(Cr/Al电极芯片)的LED芯片,在n电极蒸镀前未做等离子体处理,Cr/Al电极芯片(样品A)的正向电压为3.43 V,比Cr电极芯片(样品D)的3.15 V高了0.28 V.这是由于Cr和n-GaN具有良好的欧姆接触<sup>[11]</sup>,而样品D的Cr厚度仅为1.1 nm,在下文的讨论中可知Cr并未能完全覆盖其接触的n-GaN表面,即和n-GaN接触的界面为Cr和Al的混合接触.Al对n-GaN表面状态更敏感,和未做

等离子体表面处理的n-GaN的欧姆接触并不稳定,在晶圆键合过程中的高温作用下,其欧姆接触特性发生退化<sup>[17]</sup>.样品B和样品E在n电极蒸镀前经O<sub>2</sub>等离子体处理后,两组样品的电压都得到大幅度降低,说明O<sub>2</sub>等离子体处理有效地改善了n电极和n-GaN的欧姆接触特性.其中Cr电极芯片

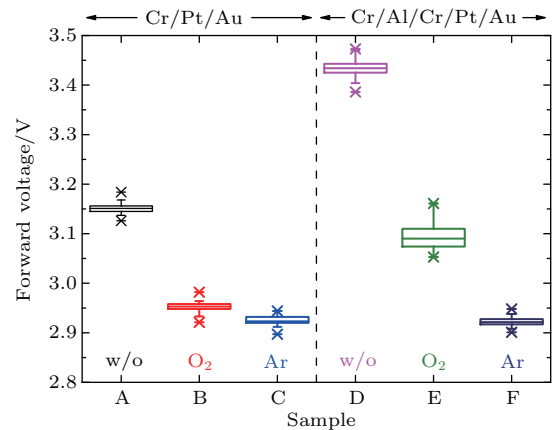


图3 (网刊彩色) 不同样品在350 mA电流下的正向电压的箱型图

Fig. 3. (color online) Box chart of forward voltage for different types of LED samples at 350 mA.



(样品B)的正向电压降低了0.2 V,达到2.95 V, Cr/Al电极芯片(样品E)的正向电压降低了0.34 V,达到3.09 V. 尽管如此,样品B仍然比样品E的电压高了0.14 V. 样品C和样品F在n电极蒸镀前经过Ar等离子体处理后,样品C的正向电压进一步降低至2.92 V,而样品F的正向电压降低的幅度更大,降至样品C一样. 这表明与O<sub>2</sub>等离子体处理相比,Ar等离子体处理使得n-GaN表面的工艺窗口更大,金半接触特性已经和n电极的种类无关.

为了深入理解等离子体处理是如何改善电极和n-GaN的金半接触特性,本文选取对金半接触特性改善更明显的Ar等离子体处理的样品进行研究,用XPS分析了样品Ar等离子体处理前后的n-GaN表面的化学结合特性. 同时,对样品经过Ar等离子体处理但是未做HCl清洗的中间状态也一并进行分析. 用于XPS表面扫描的X射线源为Al的K $\alpha$  X射线. 测试时,每个样品的C 1s的主峰位的结合能均定为284.5 eV. 图4所示为样品n-GaN表面在不同处理条件下Ga 3d的化学结合态,利用高斯洛伦兹拟合,把Ga 3d光电子谱分成Ga-N和Ga-O两个峰. 从图中可以看出样品经过Ar处理(未做HCl清洗)后,Ga 3d谱明显变宽,Ga-N峰变弱,Ga-O峰变强,说明n-GaN表面的O含量明显增加. 但经过HCl清洗后,Ga 3d谱的形状基本恢复到了处理前的状态,说明HCl清洗有效地去除了样品n-GaN表面的O含量.

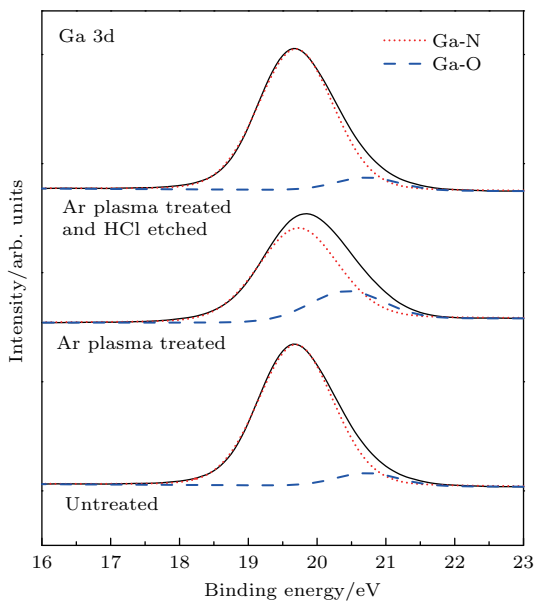


图4 (网刊彩色) 不同处理工艺下的Ga 3d XPS谱  
Fig. 4. (color online) XPS spectra of Ga 3d for different surface treatment.

用同样的方法对样品n-GaN表面O 1s光电子谱进行分析,O 1s的光电子谱如图5所示,n-GaN表面O 1s光电子谱的变化规律和对Ga 3d光电子谱的分析结果一致. 未做Ar处理时,样品表面的O含量主要是以O—Ga键的形式存在,O—N键含量很少. 经过Ar处理后,样品n-GaN表面O含量急剧升高,O—Ga键和O—N键的含量都升高了. 经过HCl清洗之后,n-GaN表面总体的O含量降低了,但是O—N键却相对更多地得到了保留.O—Ga键主要存在于介电材料GaO<sub>x</sub>中,而O—N键则存在于导电材料GaO<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>中[18].

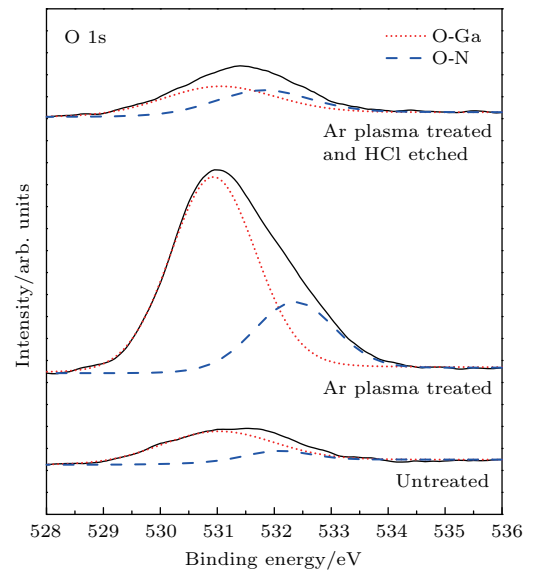


图5 (网刊彩色) 不同处理工艺下的O 1s XPS谱  
Fig. 5. (color online) XPS spectra of O 1s for different surface treatment.

为方便定量讨论,我们把Ar等离子体处理前后样品n-GaN表面的元素组分的百分比列在表1中. 一方面,样品在晶圆键合的过程中,相当于经历了280 °C的合金处理. 合金时,镓空位(V<sub>Ga</sub>),O—Ga中的O原子以及N空位(V<sub>N</sub>)会发生如下反应[19]: V<sub>N</sub> + O → O<sub>N</sub>, V<sub>Ga</sub> + O<sub>N</sub> → V<sub>Ga</sub> - O<sub>N</sub>, V<sub>Ga</sub>-O<sub>N</sub>是一种受主,不利于n型接触. 从表1可以看出,Ar等离子体处理前、后样品n-GaN表面的Ga原子浓度几乎保持不变,N原子的浓度却由30.1%降低至25.7%,这意味着样品n-GaN表面的V<sub>N</sub>显著增加了,因此,在经历合金过程对V<sub>N</sub>的消耗之后,样品C和F的n-GaN表面的V<sub>N</sub>剩余得更多,V<sub>N</sub>是一种施主[20,21],有利于n型欧姆接触,这是样品C和F电压降低的一个原因. 另一方面,经过Ar处理和HCl清洗后,样品n-GaN表面总体的O含量升高了,由等离子体处理前的11.9%

升高至处理后的16.6%。不过,通过表1可以发现,O—Ga中的O含量几乎没有变化(仅降低了0.4%),但是O—N中的O含量却由1.8%显著增加至6.9%。Ar处理没有改变n-GaN表面介电材料GaO<sub>x</sub>的含量,却大幅增加了表面导电材料GaO<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>的含量。导电材料GaO<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>有效地改善了n电极和n-GaN的欧姆接触特性,这是样品C和F正向电压降低的另一个重要原因。

表1 Ar等离子体处理前后n-GaN表面原子浓度  
Table 1. Surface atomic concentration of n-GaN before and after Ar plasma treatment.

处理工艺	Ga原子 浓度/%	N原子 浓度/%	O原子浓度/%	
			O—Ga	O—N
未处理	58.0	30.1	10.1	1.8
Ar等离子体 处理+HCl清洗	57.7	25.7	9.7	6.9

图6所示为不同样品在350 mA电流下的光输出功率的箱型图。对于在n电极蒸镀前未做等离子体表面处理的样品A和样品D,其光输出功率均比同组的经过等离子体表面处理的样品要高约3%,这可能是由于它们的正向电压远高于同组样品导致。更高的正向电压是由更大的n型欧姆接触电阻所引起,更大的欧姆接触电阻阻碍了电流往纵向流动,这将迫使电流更多地往横向扩展,故正向电压偏高会导致亮度偏高。尽管如此,它们正向电压至少升高了7.9%,故电光转换效率还是低于同组的样品。

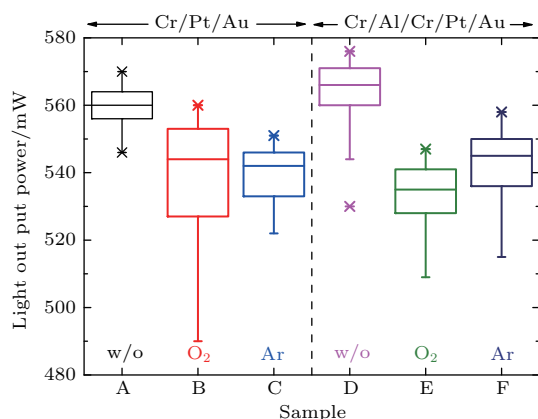


图6 (网刊彩色) 不同样品在350 mA电流下的光输出功率箱型图

Fig. 6. (color online) Box chart of light output power for different types of LED samples at 350 mA.

对于波长为456 nm的入射光,Cr/Al/Cr/Pt/Au的反射率达到了83.0%,远高于Cr/Pt/Au的

34.9%,如图7所示(作为对比,同时测了Al的反射率为91.1%,说明1.1 nm的Cr并没有完全覆盖住n-GaN的表面,这也是样品A和D电压不同的原因)。但是样品F的亮度和样品C基本相等,n电极具有更高的反射率却没有使光功率有明显提升,这和Jeong等[22]报导的结果不一致,其原因可能是因为内置n接触区域对应的仅为n-GaN,n-GaN本身不发光,加上芯片表面粗化的设计,量子阱发出的光很容易出射到GaN外面,因全反射打到n电极表面的光子不多,所以高反射率的n电极并没有带来亮度的提升。

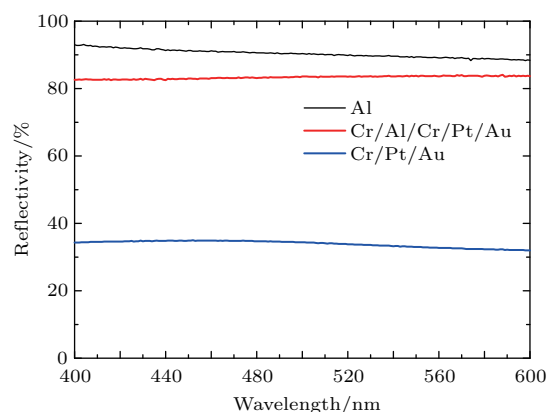


图7 (网刊彩色) Cr/Pt/Au, Cr/Al/Cr/Pt/Au和Al三种金属电极的反射率随入射波长的变化

Fig. 7. (color online) Reflectivity of Cr/Pt/Au, Cr/Al/Cr/Pt/Au and Al as a function of incident light wavelength.

## 4 结论

本文深入研究了等离子体表面处理对n电极内置的硅衬底GaN基LED的n型欧姆接触的影响及其相关物理机理。通过在n电极蒸镀前对n-GaN表面进行等离子体处理,得到了正向电压更低的芯片,说明等离子体表面处理有效地改善了n型欧姆接触特性,并且抑制了晶圆键合时高温过程对n型欧姆接触的破坏。利用XPS对其中的物理机理进行了分析。实验结果表明,1.1 mm × 1.1 mm的芯片在350 mA电流下,n-GaN未做等离子体表面处理时,n电极为高反射率Cr/Al和Cr的芯片正向电压分别为3.43 V和3.15 V。这是由于Al前面的Cr没有完全覆盖住n-GaN的表面,而Al比Cr对n-GaN表面状态更敏感。经等离子体处理后,两种n电极的芯片正向电压均大幅降低。O<sub>2</sub>等离子体处理后,Cr/Al电极芯片的正向电压为3.09 V,仍高于Cr电极芯片的2.95 V。而Ar等离子体处理后,

Cr/Al 电极芯片的正向电压和 Cr 电极芯片一样, 都为 2.92 V, 这说明 Ar 等离子体处理后的 n-GaN 表面的工艺窗口更大, 使得 n 型接触特性和 n 电极的种类无关. 利用 XPS 对 Ar 等离子体处理前后 n-GaN 表面进行化学结合特性分析, 发现 Ar 等离子体处理降低了 n-GaN 表面 N 原子浓度, 增加了 O 原子浓度, 这两者对芯片电压的降低均有帮助. N 原子浓度降低意味着  $V_N$  的增加, 这有利于 n 型接触的热稳定性, 可以缓解晶圆键合的高温过程对接触特性的破坏. 虽然 O 原子浓度增加了, 但增加的 O 氧原子浓度全部存在于有利于接触特性的导电材料  $\text{GaO}_x\text{N}_{1-x}$  中, 而不利于接触特性的介电材料  $\text{GaO}_x$  的含量没有改变.

### 参考文献

- [1] Nakamura S, Senoh M, Mukai T 1993 *Jpn. J. Appl. Phys.* **32** L8
- [2] Narukawa Y, Ichikawa M, Sanga D, Sano M, Mukai T 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 354002
- [3] Haerle V, Hahn B, Kaiser S, Weimar A, Bader S, Eberhard F, Plössl A, Eisert D 2004 *Phys. Status Solidi(a)* **201** 2736
- [4] Fujii T, Gao Y, Sharma R, Hu E L, Denbaars S P, Nakamura S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 855
- [5] Chu C F, Cheng C C, Liu W H, Chu J Y, Fan F H, Cheng H C, Doan T, Tran C A 2010 *P. IEEE* **98** 1197
- [6] Jeong H H, Sang Y L, Jeong Y K, Choi K K, Song J O, Lee Y H, Seong T Y 2010 *Electrochem. Solid-State Lett.* **13** H237
- [7] Lee S Y, Choi K K, Jeong H H, Kim E J, Son H K, Son S J, Song J O, Seong T Y 2011 *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** 2005
- [8] Laubsch A, Sabathil M, Baur J, Peter M, Hahn B 2010 *IEEE Trans. Electron Dev.* **57** 79
- [9] Hahn B, Galler B, Engl K 2014 *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** 100208
- [10] Han J, Le D, Jin B, Jeong H, Song J O, Seong T Y 2015 *Mat. Sci. Semicon. Pro.* **31** 153
- [11] Greco G, Iucolano F, Roccaforte F 2016 *Appl. Surf. Sci.* **383** 324
- [12] Song J O, Kwak J S, Park Y J, Seong T Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 062104
- [13] Son J H, Song Y H, Yu H K, Lee J L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **35** 062108
- [14] Leung B, Han J, Sun Q 2014 *Phys. Status Solidi (c)* **11** 437
- [15] Sun Q, Yan W, Feng M X, Li Z C, Feng B, Zhao H M, Yang H 2016 *J. Semicond.* **32** 044006
- [16] Sun Y, Zhou K, Sun Q, Liu J P, Feng M X, Li Z C, Zhou Y, Zhang L Q, Li D Y, Zhang S M, Ikeda M, Liu S, Yang H 2016 *Nature Photon.* **158** 1
- [17] Luther B P, Mohny S E, Jackson T N, Khan M A, Chen Q, Yang J W 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 57
- [18] Kim H, Park N M, Jang J S, Park S J, Hwang H 2001 *Electrochem. Solid-State Lett.* **4** G104
- [19] Kim H, Ryou J H, Dupuis R D, Lee S N, Park Y, Jeon J W, Seong T Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 192106
- [20] Liu J, Feng F, Zhou Y, Zhang J, Jiang F 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 111112
- [21] Kim S J, Nam T Y, Kim T G 2011 *IEEE Electr. Device L.* **32** 149
- [22] Jeong T, Kim S W, Lee S H, Ju J W, Lee S J, Baek J H, Lee J K 2011 *J. Electrochem. Soc.* **158** H908

# Effect of plasma surface treatment on embedded n-contact for GaN-based blue light-emitting diodes grown on Si substrate\*

Feng Bo<sup>1)2)</sup> Deng Biao<sup>2)</sup> Liu Le-Gong<sup>2)</sup> Li Zeng-Cheng<sup>2)</sup> Feng Mei-Xin<sup>2)</sup>  
Zhao Han-Min<sup>2)</sup> Sun Qian<sup>2)3)†</sup>

1) (National Institute of LED on Silicon Substrate, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

2) (Lattice Power (Jiangxi) Corporation, Nanchang 330029, China)

3) (Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China)

( Received 13 October 2016; revised manuscript received 21 November 2016 )

## Abstract

Unlike the finger-like n-contact that is prepared after the wafer bonding and the N-polar GaN surface roughening for GaN-based vertical structure light-emitting diodes (LEDs) grown on Si substrates, the embedded via-like n-contact is formed prior to the wafer bonding. The high temperature process of the wafer bonding often causes the electrical characteristics of the via-like embedded n-contact to degrade. In this paper, we study in detail the effect of plasma treatment of the n-GaN surface on the forward voltage of GaN-based LED grown on Si substrate. It is shown that with no plasma treatment on the n-GaN surface, the forward voltage (at 350 mA) of the 1.1 mm × 1.1 mm chip with a highly reflective electrode of Cr (1.1 nm)/Al is 3.43 V, which is 0.28 V higher than that of the chip with a pure Cr-based electrode. The LED forward voltages for both kinds of n-contacts can be reduced by an O<sub>2</sub> plasma treatment on the n-GaN surface. But the LED forward voltage with a Cr/Al-based electrode is still 0.14 V higher than that of the chips with a pure Cr-based electrode. However, after an Ar plasma treatment on the n-GaN surface, the LED forward voltage with a Cr/Al-based electrode is reduced to 2.92 V, which is equal to that of the chip with a pure Cr-based electrode. The process window of the n-GaN surface after the Ar plasma treatment is broader. X-ray photoelectron spectroscopy is used to help elucidate the mechanism. It is found that Ar plasma treatment can increase the concentration of N-vacancies ( $V_N$ ) at the n-GaN surface.  $V_N$  acts as donors, and higher  $V_N$  helps improve the thermal stability of n-contact because it alleviates the degradation of the n-contact characteristics caused by the high temperature wafer bonding process. It is also found that the O content increases slightly after the Ar plasma treatment and HCl cleaning. The O atoms are mainly present in the dielectric GaO<sub>x</sub> film before the Ar plasma treatment and the HCl cleaning, and they exist almost equivalently in the conductive GaO<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub> film and the dielectric GaO<sub>x</sub> film after Ar treatment and HCl cleaning. The conductive GaO<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub> film and the  $V_N$  donors formed during the plasma treatment can reduce the contact resistance and the LED forward voltage.

**Keywords:** GaN, light-emitting diode, plasma surface treatment, n-contact

**PACS:** 78.66.Fd, 85.60.Jb, 52.77.Bn, 73.40.Cg

**DOI:** 10.7498/aps.66.047801

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA03A102), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFB0400104), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61534007, 61404156, 61522407, 61604168), the Key Frontier Scientific Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. QYZDB-SSW-JSC014), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20160401), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2016M591944), the Open Fund of the State Key Laboratory of Luminescence and Applications, China (Grant No. SKLA-2016-01), the Open Fund of the State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics (Grant Nos. IOSKL2016KF04, IOSKL2016KF07), and the Seed Fund from SINANO, Chinese Academy of Sciences (Grant No. Y5AAQ51001).

† Corresponding author. E-mail: [qsun2011@sinano.ac.cn](mailto:qsun2011@sinano.ac.cn)