

# Ni/Ag/Ti/Au与p-GaN的欧姆接触 性能及光反射率\*

黄亚平<sup>1)2)</sup> 云峰<sup>1)2)3)†</sup> 丁文<sup>1)2)</sup> 王越<sup>2)</sup> 王宏<sup>2)</sup> 赵宇坤<sup>2)</sup>  
张焱<sup>2)</sup> 郭茂峰<sup>2)</sup> 侯洵<sup>1)2)</sup> 刘硕<sup>3)</sup>

1)(西安交通大学, 电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

2)(西安交通大学固态照明工程研究中心, 西安 710049)

3)(陕西新光源科技有限责任公司, 西安 710077)

(2013年12月24日收到; 2014年3月3日收到修改稿)

研究了不同Ni厚度的Ni/Ag/Ti/Au电极在不同退火温度和退火气氛下与p-GaN之间的欧姆接触性能以及电极的光反射率的变化. 采用矩形传输线模型对各电极的比接触电阻率进行测算, 利用分光光度计对电极在不同波长下的反射率进行测量. 结果表明, Ni金属层的厚度越小, 电极的光反射率越高, 而Ni层厚度对比接触电阻率的影响较小; 当退火温度高于400 °C后, 电极的光反射率降低, 在氧气氛围中退火后光反射率比在氮气中退火后下降更加明显. 但在氧气氛围中退火有利于减小比接触电阻率. 综合考虑接触电阻和光反射率, 电极Ni(1 nm)/Ag/Ti/Au在400 °C氧气中快速退火后得到了较好的结果, 其比接触电阻率为 $5.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 在450 nm处反射率为85%. 利用此电极制作了垂直结构发光二极管(LED)器件, LED在350 mA注入电流下, 工作电压为3.2 V, 发光功率为270 mW, 电光转换效率达到24%.

**关键词:** p-GaN, 欧姆接触, 反射率, 快速退火

**PACS:** 73.40.Ns, 68.35.Ja, 78.20.-e, 61.82.Bg

**DOI:** 10.7498/aps.63.127302

## 1 引言

GaN等III族氮化物半导体具有高电子迁移率、高击穿电压、发光效率高、禁带宽度可在0.7—6.2 eV之间连续调节的特点使得其在电子器件和光电子器件中有着广泛应用. GaN基发光二极管(light emitting diode, LED)具有高效、节能、环保的优点, 使其在固态照明领域很受关注<sup>[1-4]</sup>. 相比于传统水平结构LED, 垂直结构LED在电流扩展、热管理、光提取方面具有更大优势<sup>[5-7]</sup>, 有利于在大功率、高亮度LED中的应用. 垂直结构LED的一个关键难点就是p型欧姆接触, 一方面由于Mg的激活能较高, 很难获得高空穴浓度的p-GaN,

另一方面垂直结构LED p-GaN电极既作为欧姆接触电极又作为光学反射镜, 对电极的材料体系提出了更高的要求. 如何获得高反射率、低接触电阻率的p-GaN电极成为垂直结构LED研究的重要方向.

近年来, 国内外许多研究组针对金属材料的选择、p-GaN表面处理、退火条件等对p-GaN的欧姆接触进行了研究. 对于GaN基电子器件或者水平结构LED器件, 欧姆接触选用较多的金属结构是Ni/Au<sup>[8,9]</sup>. 由于Ag在可见光波段具有很高的反射率, 有利于制作高反射率电极, 但由于其黏附性较差, 金属功函数较低, 不利于形成欧姆接触, 利用Ni/Ag/Ti/Au, Ni/Ag/Pt等多金属组合电极则可以同时获得低接触电阻率和高反射率<sup>[11,12]</sup>.

\* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2012AA041004, 2011AA03A111)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: [fyun2010@mail.xjtu.edu.cn](mailto:fyun2010@mail.xjtu.edu.cn)

Kim等<sup>[13]</sup>提出了将Ni制作成纳米点的Ni/Ag/Pt电极来减小接触电阻率. 在Ni/Ag系电极中, Ni的厚度极大地影响着电极的接触性能和反射特性. 此外, 退火条件也将对电极的接触电阻率和反射率产生影响. 本文采用矩形传输线模型(transmission line model, TLM)对来测量电极的比接触电阻率<sup>[14]</sup>. 通过改变Ni的厚度、退火气氛、退火温度来研究Ni/Ag/Ti/Au电极的电学和光学性能.

## 2 实 验

实验对电极的比接触电阻率和反射率进行测量. 实验样品为具有量子阱结构的完整LED外延片和双面抛光的蓝宝石衬底. LED外延结构如图1(a)所示, 在c面蓝宝石衬底上采用金属有机化学气相沉积方法分别生长了25 nm的GaN缓冲层, 然后生长了2 μm的非故意掺杂GaN; 再继续生长了2 μm的n-GaN; 之后生长了5对InGaN/GaN量子阱, 其中InGaN的厚度为5 nm, GaN厚度为12 nm; 之后再生长了20 nm的AlGaIn电子阻挡层; 最后生长了300 nm的p-GaN, Mg受主激活后p-GaN的空穴浓度约为 $5.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . TLM比接触电阻率测试电极如图1(b)所示, 每个长条电极长度W为300 μm, 宽度h为80 μm, 相邻长条电极的间距d分别为5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 90和110 μm.

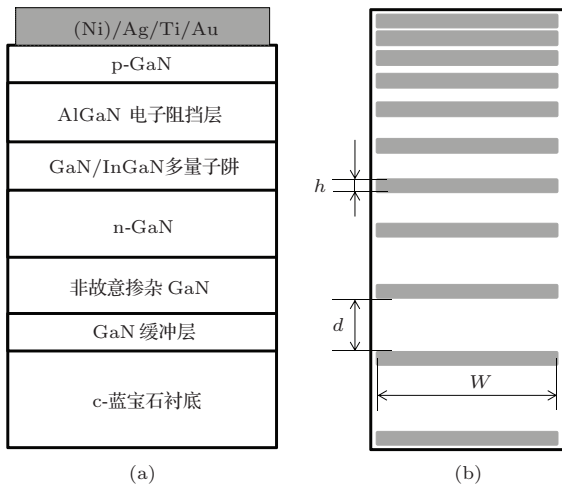


图1 (a) LED外延结构示意图; (b) TLM测试电极示意图

由于GaIn与蓝宝石存在折射率差异, 当测量电极的反射率时, 测试光线从蓝宝石侧入射, GaIn缓冲层与蓝宝石界面、p-GaN与电极界面都存在光

的反射, 这两束反射光会在特定波段产生干涉现象, 影响电极反射率的测定. 为了避免干涉的影响, 实验中在p-GaN制作电极的同时也在双面抛光的蓝宝石上制作相同的金属电极. p-GaN上电极用于测量比接触电阻率, 蓝宝石上的电极用于测量光反射率<sup>[13]</sup>. 本次实验利用日立U3900分光光度计以85°从蓝宝石入射, 对电极的反射率进行测量.

实验具体过程如下: 首先, 将LED外延芯片和双面抛光蓝宝石在浓硫酸双氧水混合液(3 : 1)、丙酮、乙醇、去离子水中分别清洗5 min, 用氮气吹干; 在p-GaN上制作TLM光刻掩膜图形; 采用电子束蒸发方法分别制作Ag(100 nm)/Ti(100 nm)/Au(100 nm), Ni(1 nm)/Ag(100 nm)/Ti(100 nm)/Au(100 nm), Ni(5 nm)/Ag(100 nm)/Ti(100 nm)/Au(100 nm)和Ni(10 nm)/Ag(100 nm)/Ti(100 nm)/Au(100 nm)这4种电极结构; 再剥离掉光刻胶掩膜, 得到TLM测试图案; 将这4种电极分别在200, 300, 400, 500和600 °C的氧气和氮气氛围中快速退火1 min, 测量不同电极结构在不同退火温度和退火气氛中的比接触电阻率和反射率.

## 3 结果与讨论

对于Ag/Ti/Au电极, 在不同退火温度、退火气氛中快速退火1 min后的反射率和间距 $d = 5 \mu\text{m}$ 测试电极的*I-V*曲线如图2所示. 当电极在氮气氛围中的退火温度小于400 °C时, 反射率几乎不变, 在380—600 nm范围内的反射率都在90%以上; 同时, *I-V*特性在此温度段随着温度的升高线性度更好, 斜率增加; 当退火温度高于500 °C后, 反射率急剧下降, 600 °C退火后在450 nm处的反射率降为75%, 同时*I-V*曲线斜率大幅降低. 电极在氧气氛围中退火后, 反射率随着温度的升高退化得更加明显, 600 °C退火后在450 nm处的反射率仅为55%; 而*I-V*特性曲线随着退火温度的升高斜率增大, 线性度变好, 展现出更好的欧姆接触特性.

TLM方法需要*I-V*曲线为直线来计算相邻长条电极之间的电阻, 对于*I-V*曲线不是直线的情况, 本文在计算接触电阻时采用线性拟合的方法将非线性*I-V*曲线拟合为直线来计算电阻, 可以估算出非线性*I-V*曲线的接触电阻, 同时又不影响线性*I-V*曲线接触电阻的计算.

图3为利用TLM方法计算的Ag/Ti/Au在不同退火条件下的比接触电阻率. 未退火电极的比接触电阻率为 $4 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 在氧气中退火后, 接触电阻率随温度升高而降低; 在600 °C退火后, 比接触电阻率仅为 $1.7 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ; 在小于400 °C的氮气氛围中退火后, 比接触电阻率缓慢下降; 但当退火温度超过500 °C后, 接触电阻急剧上升.

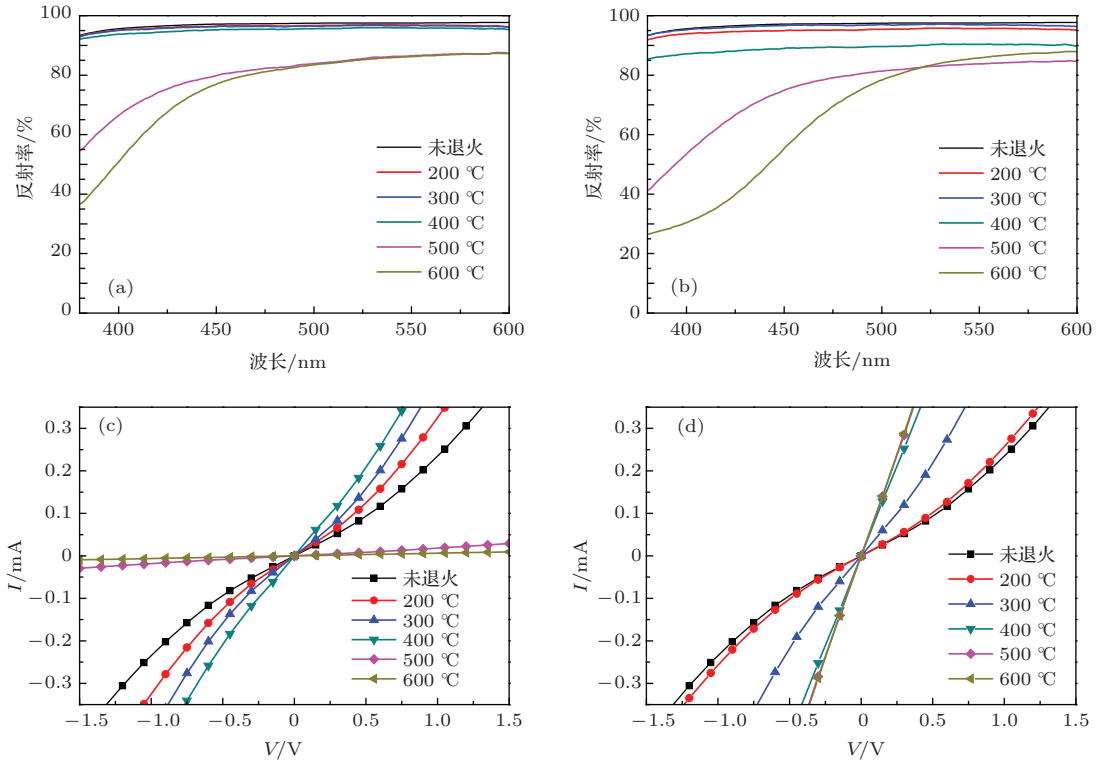


图2 (网刊彩色) Ag/Ti/Au电极在氮气和氧气氛围退火前后的反射率及I-V曲线 (a) 氮气, 反射率; (b) 氧气, 反射率; (c) 氮气, I-V曲线,  $d = 5 \mu\text{m}$ ; (d) 氧气, I-V曲线,  $d = 5 \mu\text{m}$

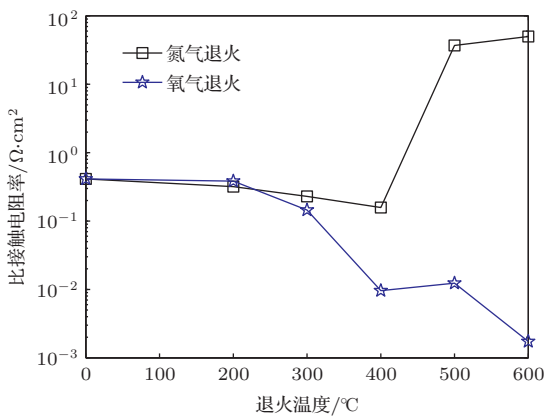


图3 Ag/Ti/Au电极在不同退火气氛、退火温度下快速退火后的比接触电阻率

后反射率在450 nm处上升到88%; 而当退火温度超过500 °C后, 反射率退化较为明显, 特别是在氧气氛围中退火后, 反射率下降较为迅速. 在600 °C

对于Ni(1 nm)/Ag/Ti/Au电极, 在不同退火温度、退火气氛中快速退火1 min后的反射率和间距 $d = 5 \mu\text{m}$ 测试电极的I-V曲线如图4所示. 加了金属Ni后, 电极的反射率相比于Ag/Ti/Au电极有所下降, 未退火时在450 nm处的反射率为85%; 在不超过400 °C的氮气和氧气中快速退火后, 电极反射率稳定在80%以上, 特别是在300 °C氮气中退火

氧气中快速退火后, 450 nm处反射率降为47%.

Ni(1 nm)/Ag/Ti/Au电极在不同退火条件退火后的比接触电阻率TLM测量结果如图5所示. 结合图4(c), (d)可以分析出电极在不同退火条件下的电学性能的变化情况. 退火前, 电极的接触电阻率为 $3.3 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , I-V曲线的线性度也较好, 展现出了较好的欧姆接触特性; 在氮气氛围中退火后, 随着退火温度的升高, I-V曲线斜率急剧降低, 线性度下降, 接触电阻率也随着温度的上升而大幅增加, 可见在氮气氛围中退火不利于改善Ni(1 nm)/Ag/Ti/Au电极的接触性能; 而在氧气氛围中退火后, I-V曲线的线性度较好, 斜率随着退火温度的增加先增大后减小; 在400 °C氧气中退火后得到最小接触电阻率为 $5.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

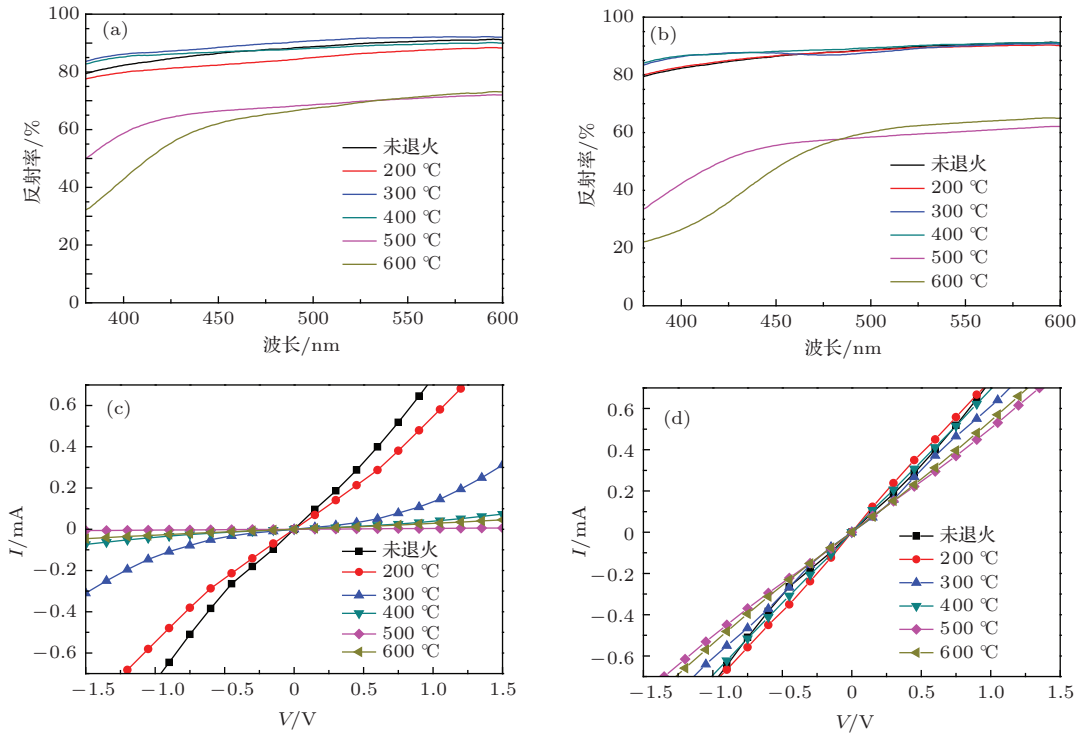


图4 (网刊彩色) Ni(1 nm)/Ag/Ti/Au 电极在氮气和氧气氛围退火前后的反射率及  $I$ - $V$  曲线 (a) 氮气, 反射率; (b) 氧气, 反射率; (c) 氮气,  $I$ - $V$  曲线,  $d = 5 \mu\text{m}$ ; (d) 氧气,  $I$ - $V$  曲线,  $d = 5 \mu\text{m}$

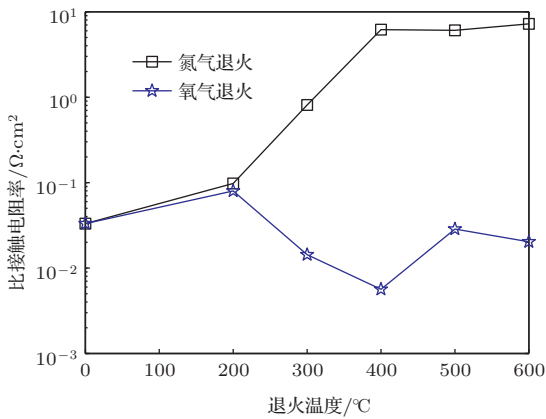


图5 Ni(1 nm)/Ag/Ti/Au 电极在不同退火气氛、退火温度下快速退火后的比接触电阻率

对于 Ni(5 nm)/Ag/Ti/Au 电极, 退火后的反射率和  $I$ - $V$  曲线如图 6 所示. 随着 Ni 金属层的厚度增大, 电极的反射率降低, 退火前在 450 nm 处的反射率为 55%; 退火后, 电极的反射率随着退火温度的上升先增大后减小; 在 400 °C 氮气中快速退火后电极在 450 nm 处的反射率上升到 70%, 但当温度继续上升后, 反射率急剧下降, 600 °C 氮气中退火后在 450 nm 处的反射率仅为 43%; 在 500 °C 氧气中快速退火后反射率达到最大, 在 450 nm 处为 72%, 当退火温度继续升高后, 反射率也急剧下降.

图 7 为 Ni(5 nm)/Ag/Ti/Au 电极在不同退火

条件下的比接触电阻率变化情况. 结合图 6 (c) 和 (d), 退火前  $I$ - $V$  曲线线性度较好, 比接触电阻率为  $2.5 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 在氮气氛围中快速退火后, 随着退火温度升高,  $I$ - $V$  曲线线性度降低, 斜率减小, 特别是当退火温度超过 500 °C 后, 当测试电压小于 1.5 V 时, 电极之间几乎无电流通过; 在氧气中退火后情况恰好相反,  $I$ - $V$  曲线始终展现出较好的线性特性, 斜率随退火温度增加先增大后减小; 比接触电阻率远远小于在氮气中退火后的情况; 在 400 °C 氧气中退火得到最低比接触电阻率为  $7.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

最后, 对 Ni(10 nm)/Ag/Ti/Au 电极的反射率和  $I$ - $V$  特性进行测量, 结果如图 8 所示. 由于 Ni 的厚度增加, 反射率进一步降低, 退火前电极的反射率在 450 nm 处为 45%; 快速退火后能够一定程度的提高反射率, 在 500 °C 氮气中退火后反射率最高也仅仅为 55%. 从  $I$ - $V$  曲线可以看出, 电极在退火前  $I$ - $V$  曲线的线性度较差, 在氮气中退火后,  $I$ - $V$  曲线斜率减小, 展现出较强的整流接触特性; 在氧气氛围中退火后, 当退火温度大于等于 400 °C 后,  $I$ - $V$  曲线的线性度很好, 斜率相比于未退火情况增大. 图 9 为利用 TLM 方法得到的接触电阻率, 退火前的比接触电阻率为  $4.3 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,



在氮气中退火后, 接触电阻率增大, 而在氧气中退火后, 当退火温度较低时 (200 °C, 300 °C), 接触电阻率变化情况与在氮气氛围中相似; 当退火

温度较高时 (400 °C, 500 °C, 600 °C) 接触电阻率显著下降, 其中在 400 °C 退火后接触电阻率为  $5.5 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

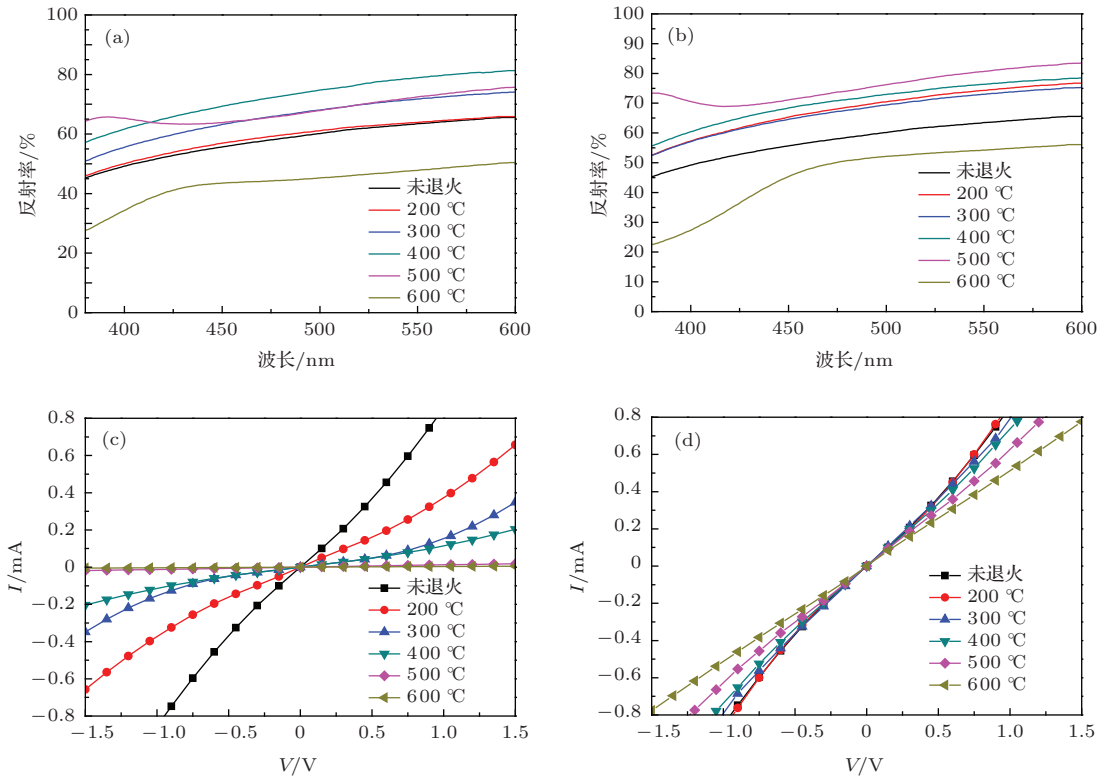


图6 (网刊彩色) Ni(5 nm)/Ag/Ti/Au 电极在氮气和氧气氛围退火前后的反射率及  $I$ - $V$  曲线 (a) 氮气, 反射率; (b) 氧气, 反射率; (c) 氮气,  $I$ - $V$  曲线,  $d = 5 \mu\text{m}$ ; (d) 氧气,  $I$ - $V$  曲线,  $d = 5 \mu\text{m}$

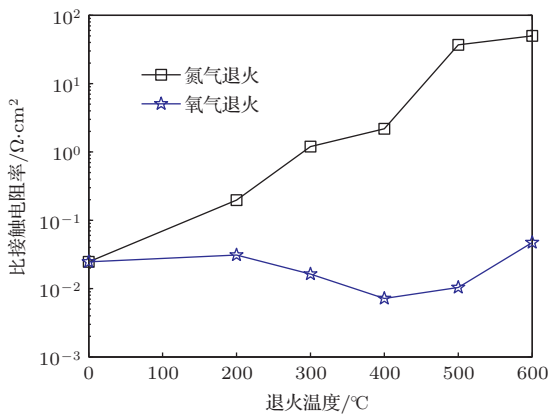


图7 Ni(5 nm)/Ag/Ti/Au 电极在不同退火气氛、退火温度下快速退火后的比接触电阻率

上述实验结果表明: Ni/Ag/Ti/Au 电极体系中, Ni 的厚度对电极的反射率有极大的影响. 随着 Ni 的厚度从 0 增加 1, 5 和 10 nm, 退火前电极的反射率在 450 nm 处从 95% 分别下降为 86%, 55% 和 45%; 退火前电极的比接触电阻率分别为  $4 \times 10^{-1}$ ,  $3.3 \times 10^{-2}$ ,  $2.5 \times 10^{-2}$  和  $4.3 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 从增加电极的反射率角度来看, 需要尽可能降低 Ni 的

厚度; 从降低比接触电阻率的角度来看, 由于 Ni 的金属功函数较高, Ni 与 p-GaN 界面的电子势垒较低, 有利于电子穿过金属-半导体界面<sup>[14]</sup>. 从 TLM 测试结果来看, 当 Ni 的厚度在 1—5 nm 时最有利于减小接触电阻. 此外, 退火气氛和退火温度对电极的比接触电阻率有较大的影响. 对于 Ag/Ti/Au 电极, 在 200—400 °C 氮气中退火后, 能够改善电极的欧姆接触性能, 降低比接触电阻率. 对于 Ni/Ag/Ti/Au 电极, 在氮气氛围中退火后, 不利于欧姆接触,  $I$ - $V$  曲线随着退火温度上升斜率变小, 并逐渐展现出整流接触特性, 电极接触电阻随着退火温度上升而增大. 我们在研究中发现, 在氧气氛围中退火对于获得低接触电阻率电极是至关重要的, Ag/Ti/Au 电极在 600 °C 氧气中快速退火 1 min 后比接触电阻率降为  $1.7 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , Ni(1 nm)/Ag/Ti/Au 电极在 400 °C 氧气中快速退火后比接触电阻率降为  $5.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 这是由于在氧气中退火会促使 Ga 原子从 GaN 向外扩散<sup>[15,16]</sup>, 在 GaN 中产生 Ga 空位, Ga 空位为受主缺

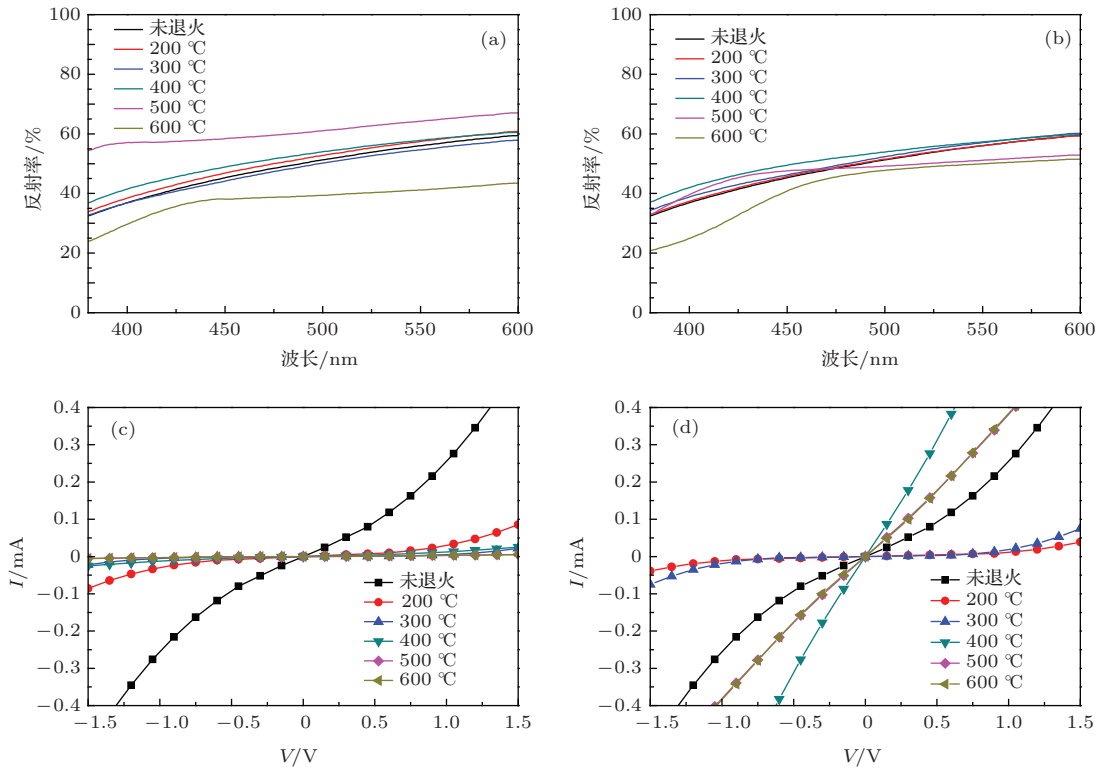


图8 (网刊彩色) Ni(10 nm)/Ag/Ti/Au 电极在氮气和氧气氛围退火前后的反射率及  $I$ - $V$  曲线 (a) 氮气, 反射率; (b) 氧气, 反射率; (c) 氮气,  $I$ - $V$  曲线,  $d = 5 \mu\text{m}$ ; (d) 氧气,  $I$ - $V$  曲线,  $d = 5 \mu\text{m}$

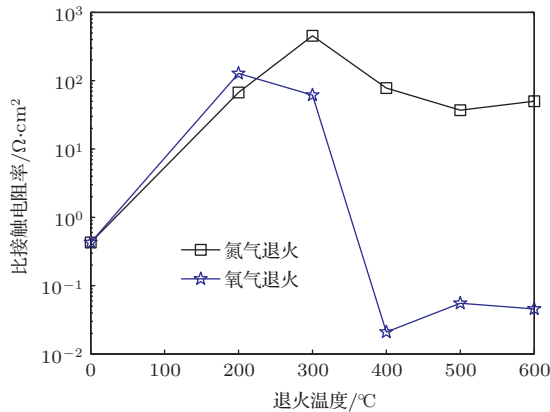


图9 Ni(10 nm)/Ag/Ti/Au 电极在不同退火气氛、退火温度快速退火后的比接触电阻率

陷, 增大了表面空穴浓度, 有利于欧姆接触. 从热力学观点来看, 在氧气氛围中退火后, 在金属-半导体界面会产生 NiO 和 Ag-Ga 固溶体<sup>[11]</sup>. NiO 的产生后会从界面处向外扩散, 会带走 p-GaN 表面的污染物, 有利于降低金属-半导体间的势垒高度<sup>[17]</sup>. Ag-Ga 固溶体会减小 Ag 的反射率, 这也是在氧气中退火后反射率相比于氮气中退火后退化更加明显的一个原因.

最后, 根据研究结果优化电极金属结构和退火条件, 综合考虑比接触电阻率和反射率, 当 Ni 的厚度为 1 nm 时, Ni/Ag/Ti/Au 电极在 400 °C 氧气氛

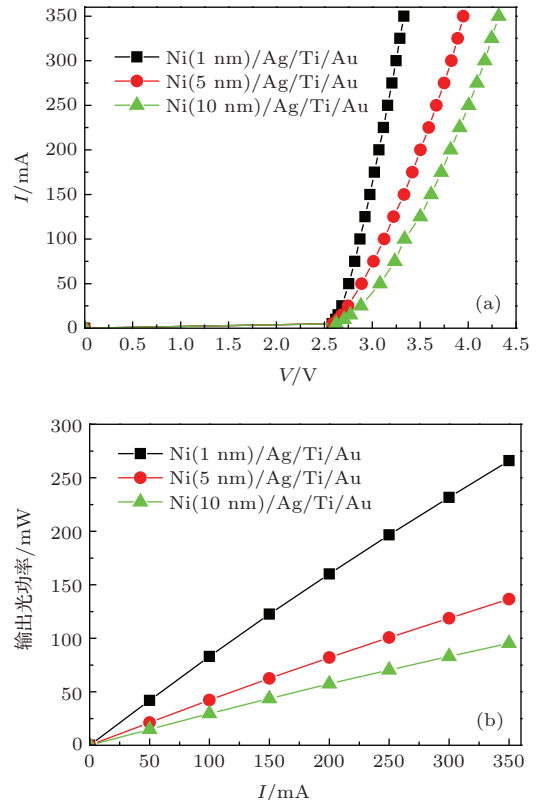


图10 不同 p-GaN 电极垂直结构 LED 芯片测试结果 (a) LED 的  $I$ - $V$  特性曲线; (b) LED 的输出光功率与注入电流关系

围中快速退火 1 min, 得到较低接触电阻率为

$5.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$  和在 450 nm 处得到较高的反射率为 85%.

结合上述优化电极的结果, 在 p-GaN 上分别制作了 Ag/Ti/Au, Ni(1 nm)/Ag/Ti/Au, Ni(5 nm)/Ag/Ti/Au 和 Ni(10 nm)/Ag/Ti/Au 四种电极结构, 在 400 °C 空气中进行金属键合, 并通过衬底转移、激光剥离、表面粗化等技术制作了垂直结构 LED 芯片并进行了电学和光学性能测试. 结果如图 10 所示, 但由于 Ag/Ti/Au 与 p-GaN 的黏附性较差, 在衬底转移以后很难形成完整且性能稳定的 LED 芯片, 只针对后 3 种电极进行测试和分析. 从图 10 可以看出, Ni(1 nm)/Ag/Ti/Au 电极的 LED 芯片具有较低的工作电压和较高的输出光功率. 在 350 mA 注入电流下, 正向偏压为 3.2 V, 输出光功率为 270 mW, 电光转换效率达到 24%. 随着 Ni 厚度的增加, LED 芯片的工作电压增大, 输出光功率发生显著降低.

## 4 结 论

1) 对于垂直结构 LED, Ni/Ag/Ti/Au 电极体系可以获得较高的光学反射率和较低的比接触电阻率.

2) 退火温度对反射率有很大的影响, 当退火温度超过 500 °C 后, 电极的反射率急剧下降.

3) Ni 的厚度对反射率有极大的影响, 在接触电阻率较低的前提下, Ni 层越薄越好.

4) 在氮气氛围中退火后不利于形成良好的欧姆接触, 而在氧气中退火后有利于欧姆接触同时能获得更低比接触电阻率.

5) 氧气氛围中退火形成 NiO 和 Ag-Ga 固溶体对于增大界面处空穴浓度, 降低比接触电阻率是非常有益的, 但是 Ag-Ga 固溶体又会降低电极的反射率, 使得氧气氛围中退火后反射率退化较明显.

6) 采用优化后 Ni(1 nm)/Ag/Ti/Au 电极在

400 °C 氧气中热退火后能够获得比接触电阻率为  $5.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$  和在 450 nm 处反射率为 85%.

## 参考文献

- [1] Ponce F A, Bour D P 1997 *Nature* **386** 351
- [2] Yang L, Ma X H, Feng Q, Hao Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 7
- [3] Ding Z B, Yao S D, Wang K, Cheng K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2977 (in Chinese)[丁志博, 姚淑德, 王坤, 程凯 2006 物理学报 **55** 2977]
- [4] Xue Z Q, Huang S R, Zhang B P, Chen C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1268 (in Chinese)[薛正群, 黄生荣, 张保平, 陈朝 2010 物理学报 **59** 1268]
- [5] Park J, Shin M, Lee C C 2004 *Opt. Lett.* **29** 2656
- [6] Kim H, Choi K K, Kim K K, Cho J, Lee S N, Park Y, Kwak J S, Seong T Y 2008 *Opt. Lett.* **33** 1273
- [7] Zheng C, Zhang S M, Wang H, Liu J P, Wang H B, Li Z C, Feng M X, Zhao D G, Liu Z S, Jiang D S, Yang H 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 017301
- [8] Maeda T, Koide Y, Murakami M 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 4145
- [9] Li X J, Zhao D G, He X G, Wu L L, Li L, Yang J, Le L C, Chen P, Liu Z S, Jiang D S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 206801 (in Chinese)[李晓静, 赵德刚, 何晓光, 吴亮亮, 李亮, 杨静, 乐伶俐, 陈平, 刘宗顺, 江德生 2013 物理学报 **62** 206801]
- [10] Chang L B, Shire C C, Jeng M J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 163515
- [11] Jang H W, Lee J L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5920
- [12] Song J O, Kwak J S, Park Y, Seong T Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 062104
- [13] Kim K S, Suh M G, Cho S N 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 061113
- [14] Wu D F, Yan B D 1989 *Principle, Measurement and Processing of Ohmic Contacts on Metal-Semiconductor Interface* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press) p8 (in Chinese) [吴鼎芬, 颜本达 1989 金属-半导体界面欧姆接触的原理、测试与工艺 (上海: 上海交通大学出版社) 第 8 页]
- [15] Jang H W, Kim S Y, Lee J L 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 1748
- [16] Lin Y J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 2760
- [17] Greco G, Prystawko P, Leszczyński M, Nigro R L, Raineri V, Roccaforte F 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 123703

# The reflectivity and ohmic contact resistivity of Ni/Ag/Ti/Au in contact with p-GaN\*

Huang Ya-Ping<sup>1)2)</sup> Yun Feng<sup>1)2)3)†</sup> Ding Wen<sup>1)2)</sup> Wang Yue<sup>2)</sup> Wang Hong<sup>2)</sup>  
Zhao Yu-Kun<sup>2)</sup> Zhang Ye<sup>2)</sup> Guo Mao-Feng<sup>2)</sup> Hou Xun<sup>1)2)</sup> Liu Shuo<sup>3)</sup>

1) (Shaanxi Provincial Key Laboratory of Photonics and Information Technology, Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Solid State Lighting Engineering Research Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (Shaanxi Supernova Lighting Technology Co. Ltd, Xi'an 710077, China)

( Received 24 December 2013; revised manuscript received 3 March 2014 )

## Abstract

The ohmic reflectivity of Ni/Ag/Ti/Au in contact with p-GaN is studied. It is found that under different thickness values of Ni, different annealing temperatures and different annealing atmospheres, the performances of Ni/Ag/Ti/Au electrode are greatly changed. The contact resistivity is measured using the transmission line model. The reflectivity of the electrode is investigated by using a spectrophotometer. The results reveal that the thinner the Ni metal layer, the higher its reflectivity is, in addition, the thickness value of Ni metal has a little influence on contact resistivity. There appears an abrupt decrease in reflectivity of electrode after annealing at a temperature higher than 400 °C. It is noticed that the reflectivity decreases more sharply after annealing in oxygen atmosphere than in nitrogen atmosphere. However, annealing in oxygen atmosphere is more helpful to reduce the contact resistivity. The comprehensive evaluations of the contact resistivity and reflectivity indicate that the better performances of Ni (1 nm)/Ag/Ti/Au electrode after rapid annealing in oxygen atmosphere at 400 °C are achieved: its contact resistance reaches  $5.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$  and reflectivity rises up to 85% at 450 nm. Light emitting diode (LED) of vertical structure is fabricated with an optimal electrode. The LED under an injection current of 350 mA can achieve the following working parameters: the working voltage is 3.2 V, the optical output power is 270 mW, and the electro-optical conversion efficiency is 24%.

**Keywords:** p-GaN, ohmic contact, reflectivity, rapidly thermal annealing

**PACS:** 73.40.Ns, 68.35.Ja, 78.20.-e, 61.82.Bg

**DOI:** 10.7498/aps.63.127302

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2012AA041004, 2011AA03A111).

† Corresponding author. E-mail: [fyun2010@mail.xjtu.edu.cn](mailto:fyun2010@mail.xjtu.edu.cn)