

低接触电阻率 Ni/Ag/Ti/Au 反射镜电极的研究

魏政鸿 云峰 丁文 黄亚平 王宏 李强 张烨 郭茂峰 刘硕 吴红斌

Reflective Ni/Ag/Ti/Au electrode with low specific contact resistivity

Wei Zheng-Hong Yun Feng Ding Wen Huang Ya-Ping Wang Hong Li Qiang Zhang Ye Guo Mao-Feng Liu Shuo Wu Hong-Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 127304 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.127304

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.127304>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平面环形谐振腔微光学陀螺结构设计与优化

Design and optimization of integrated micro optical gyroscope based on a planar ring resonator

物理学报.2015, 64(10): 107802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.107802>

激光二极管抽运氦气冷却钕玻璃叠片激光放大器热致波前畸变和应力双折射的数值模拟和实验研究

Theoretical and experimental investigations on wavefront distortion and thermal-stress induced birefringence in a laser diode pumped helium gas-cooled multislabs Nd:glass laser amplifier

物理学报.2015, 64(8): 087801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.087801>

锥形光纤激发盘腔光学模式互易性研究

Optical model reciprocity of disk resonator excited by tapered fiber

物理学报.2014, 63(22): 227802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.227802>

Ni/Ag/Ti/Au 与 p-GaN 的欧姆接触性能及光反射率

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

物理学报.2014, 63(12): 127302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.127302>

金属/多孔硅/单晶硅 (M/PS/Si) 微结构的电学特性

Electrical properties of the metal/porous silicon/Si(M/PS/Si) microstructure

物理学报.2011, 60(5): 057303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.057303>

低接触电阻率Ni/Ag/Ti/Au反射镜电极的研究*

魏政鸿¹⁾²⁾ 云峰^{1)2)3)†} 丁文¹⁾²⁾ 黄亚平²⁾ 王宏²⁾ 李强¹⁾²⁾ 张烨²⁾
郭茂峰²⁾ 刘硕³⁾ 吴红斌³⁾

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)

(2014年12月19日收到; 2015年1月18日收到修改稿)

研究了Ag的厚度、退火时间、沉积温度对于Ni/Ag/Ti/Au电极的反射率及与p-GaN欧姆接触性能的影响. 利用分光光度计测量反射率, 采用圆形传输线模型计算比接触电阻率. 结果表明: 随着Ag厚度的增加, Ni/Ag/Ti/Au电极的反射率逐渐增大; 在氧气氛围中, 随着退火时间从1 min增至10 min, 300 °C退火时, 比接触电阻率持续下降, 而对于400—600 °C退火, 比接触电阻率先减小后增大; 在300和400 °C氧气中进行1—10 min的退火后, Ni/Ag/Ti/Au的反射率变化较小, 退火温度高于400 °C时, 随着退火时间的增加, 反射率急剧下降; 在400 °C氧气中3 min退火后, 比接触电阻率可以达到 $3.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 此外, 适当提高沉积温度可以增加Ni/Ag/Ti/Au的反射率并降低比接触电阻率, 沉积温度为120 °C条件下的Ni/Ag/Ti/Au电极在450 nm处反射率达到90.1%, 比接触电阻率为 $6.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 综合考虑电学和光学性能, 在沉积温度为120 °C下蒸镀Ni/Ag/Ti/Au (1/200/100/100 nm)并在400 °C氧气中进行3 min退火可以得到较优化的电极. 利用此电极制作的垂直结构发光二极管在350 mA电流下的工作电压为2.95 V, 输出光功率为387.1 mW, 电光转换效率达到37.5%.

关键词: p-GaN, 欧姆接触, 反射率

PACS: 73.40.Ns, 78.20.-e, 67.25.bh, 68.35.Ja

DOI: 10.7498/aps.64.127304

1 引言

作为宽禁带半导体材料, GaN具有热导率大、电子饱和漂移速度快、击穿场强高以及耐腐蚀性好、禁带宽度可在0.7—6.2 eV之间连续调节等特点, 因而在发光二极管(light emitting diode, LED)和激光二极管等光电子器件中有广泛应用^[1,2]. GaN基LED作为新一代的环保固态照明光源, 在近些年来取得了很大的发展, 已广泛应用于照明、液晶屏幕背光源、信号显示等领域^[3,4]. 传统的水平结构LED存在电流拥堵、工作电压高、散热困难等问题, 垂直结构LED可以很好地解决这些问题^[5-8], 而良好的欧姆接触对于工作在大电流条件

下的垂直结构LED至关重要. 与n-GaN上的欧姆接触相比, 在p-GaN上制作良好的欧姆接触更加困难^[9]. 因为对于p-GaN难以获得高的空穴浓度, 且p-GaN的功函数为7.5 eV, 而功函数高于7.5 eV的金属或金属体系极为有限^[10]. 此外, 对于垂直结构LED, p型电极还需要具有较高的光学反射率. 因此, 具有较低的比接触电阻率和高反射率的p型电极是垂直结构LED研究中的一个重要问题.

近些年来, 研究人员采用不同的接触金属材料、表面预处理、退火等方法尝试在p-GaN上制作良好的欧姆接触. 由于Ni可以与p-GaN形成良好的欧姆接触, Ag在可见光范围有很高的反射率, 所以基于Ni/Ag金属体系的p型电极在垂

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2014AA032608)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fyun2010@mail.xjtu.edu.cn

直结构LED中被普遍采用. Jeon等^[11]提出用纳米点结构的Ag反射镜来提高其反射率. 黄亚平等^[12]研究了Ni的厚度、退火温度和退火气氛对于Ni/Ag/Ti/Au电极与p-GaN的欧姆接触性能和光反射率的影响. 作为反射镜层的Ag, 其成膜质量和厚度都将影响光反射率. 在退火过程中, 除了退火温度和退火气氛, 退火时间对欧姆接触性能和反射率也有一定的影响. 本文通过圆形传输线模型(circular transmission line model, CTLM)测量电极与p-GaN的比接触电阻率, 利用分光光度计进行反射率测量, 研究了Ag的厚度、退火时间、沉积温度对于Ni/Ag/Ti/Au电极电学和光学性能的影响.

2 实验

本文使用的GaN样品是用金属有机化学气相沉积法制备的具有多量子阱结构的LED外延片. 首先在双面抛光的c面蓝宝石上生长25 nm的GaN缓冲层和2 μm非故意掺杂的GaN, 在其上生长2 μm的n-GaN, 之后生长5对InGaN(5 nm)/GaN(12 nm)量子阱, 再生长20 nm的AlGaN电子阻挡层, 最后生长300 nm的p-GaN. 其中p-GaN的空穴浓度为 $5.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 本文使用的CTLM电极结构示意图如图1所示, 其中7个圆环电极的内圆半径 r_0 均为100 μm, 外圆半径 r_n 依次增大, 分别为115, 120, 125, 135, 145, 165, 185 μm. 每个圆环电极的内外圆间的电阻 R_t 为

$$R_t = \frac{R_{sh}}{2\pi} \left[\ln \frac{r_n}{r_0} + L_t \left(\frac{1}{r_n} + \frac{1}{r_0} \right) \right],$$

其中, R_{sh} 为p-GaN的方块电阻, L_t 为传输线长度. 绘出测量得到的 R_t 和 $\ln(r_n/r_0)$ 的散点图, 用最小二乘法进行线性拟合, 由拟合直线的斜率和 $\ln(r_n/r_0) = 0$ 处的截距分别计算出 R_{sh} 和 L_t , 由下式得到比接触电阻率 ρ_c :

$$\rho_c = L_t^2 R_{sh}.$$

为了测量电极的反射率, 在双面抛光的蓝宝石上制作Ni/Ag/Ti/Au电极, 利用日立U3900分光光度计从蓝宝石面照射测量反射率. 具体实验过程如下.

第一步, 将GaN外延片和双面抛光的蓝宝石依次放入丙酮、乙醇中超声清洗5 min去除表面的残留有机物, 之后再放入浓 H_2SO_4 : H_2O_2 (3 : 1)的混合溶液中清洗5 min去除p-GaN表面的氧化层. 通过光刻在p-GaN表面制

作CTLM的光刻胶掩膜图形, 然后用真空电子束蒸发设备在蓝宝石和具有CTLM掩膜图形的p-GaN上制作Ni/Ag/Ti/Au (1/25/100/100 nm), Ni/Ag/Ti/Au (1/50/100/100 nm), Ni/Ag/Ti/Au (1/100/100/100 nm), Ni/Ag/Ti/Au (1/200/100/100 nm), Ni/Ag/Ti/Au (1/400/100/100 nm)五种不同Ag厚度的电极, 之后将GaN样品置于丙酮、乙醇中分别超声清洗5 min进行剥离, 在其表面形成用于CTLM测试的圆环形电极. 根据比接触电阻率和反射率的测量结果, 选取较优化的一组作为后续实验的电极结构.

第二步, 将上述得到的较优化的电极在300, 400, 500, 600 °C的氧气氛围中退火, 在每个温度下分别进行1—10 min不同时间的退火, 测量电极在不同退火温度下比接触电阻率和反射率受退火时间的影响.

第三步, 再准备一组p-GaN和双面抛光的蓝宝石样品, 经过与第一步实验相同的溶液预清洗后, 在沉积温度为室温(25 °C), 80, 100, 120, 140 °C的条件下分别在p-GaN和蓝宝石上制作上述得到的较优化的电极, 通过测量比接触电阻率和反射率来研究沉积温度对电极的电学和光学性能的影响.

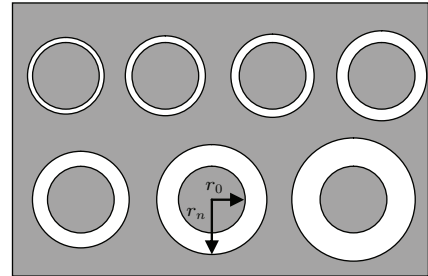


图1 CTLM测试电极的结构示意图

Fig. 1. Electrode pattern of CTLM.

3 实验结果与分析

3.1 最优Ag厚度的确定

不同Ag厚度的Ni/Ag/Ti/Au电极的反射率如图2所示. 从图2可以看出, 随着Ag厚度的增加, 电极的反射率逐渐增大. 当Ag的厚度在200 nm以内时, 增加Ag的厚度可以显著增加Ni/Ag/Ti/Au电极的反射率, Ag厚度为25, 50, 100, 200 nm时, 电极在450 nm处的反射率分别为68.5%, 82.1%, 85.8%, 86.6%; 当Ag厚度超过200 nm时, 反射率

随Ag厚度增加而呈饱和趋势, Ag厚度继续增至400 nm时, 反射率变化不大.

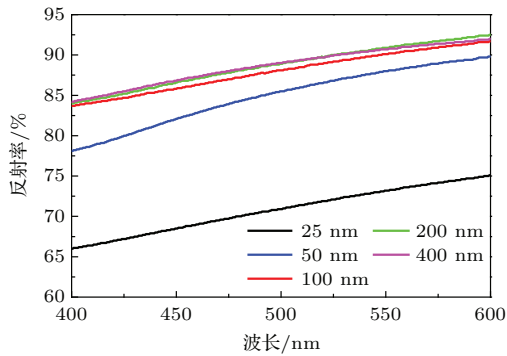


图2 (网刊彩色) 不同Ag厚度的Ni (1 nm)/Ag/Ti (100 nm)/Au (100 nm) 电极的反射率
Fig. 2. (color online) Reflectivity of Ni (1 nm)/Ag/Ti (100 nm)/Au (100 nm) contacts with different Ag thicknesses.

利用CTLM计算5个样品的比接触电阻率在 2.0×10^{-2} — $2.3 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 范围内, 数值差别较小. 这是因为与p-GaN直接接触的金属的种类对于比接触电阻率有很大影响, 而在这5个实验样品中, 与p-GaN接触的第一层金属均为1 nm的Ni, 所以第二层金属Ag的厚度对比接触电阻率的影响很小.

从以上实验结果可知: 为增加Ni/Ag/Ti/Au电极的反射率, 需要适当增加Ag的厚度, 且Ag的厚度对于比接触电阻率的影响较小. 但超过200 nm后继续增加Ag厚度对提高反射率无明显作用, 因此, 我们将Ag的厚度设定为200 nm, 电极结构为Ni/Ag/Ti/Au (1/200/100/100 nm), 后续实验均基于此电极结构进行.

3.2 不同退火条件对比接触电阻率和反射率的影响

300—600 °C氧气氛围下不同时间退火后, 外径为120 μm 的测试电极的*I-V*曲线如图3所示, 比接触电阻率计算结果如图4所示. 退火前, Ni/Ag/Ti/Au与p-GaN呈现非欧姆接触, 比接触电阻率为 $2.3 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

对于300 °C的退火条件, 1和3 min的退火后, 电学性能改善很小, 依然呈现非欧姆接触, 比接触电阻率仅有轻微的减小. 经过5和10 min的退火后, 电极的*I-V*曲线斜率明显增大, 比接触电阻率也显著减小, 表现出较好的欧姆接触特性, 10 min退火后比接触电阻率为 $7.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

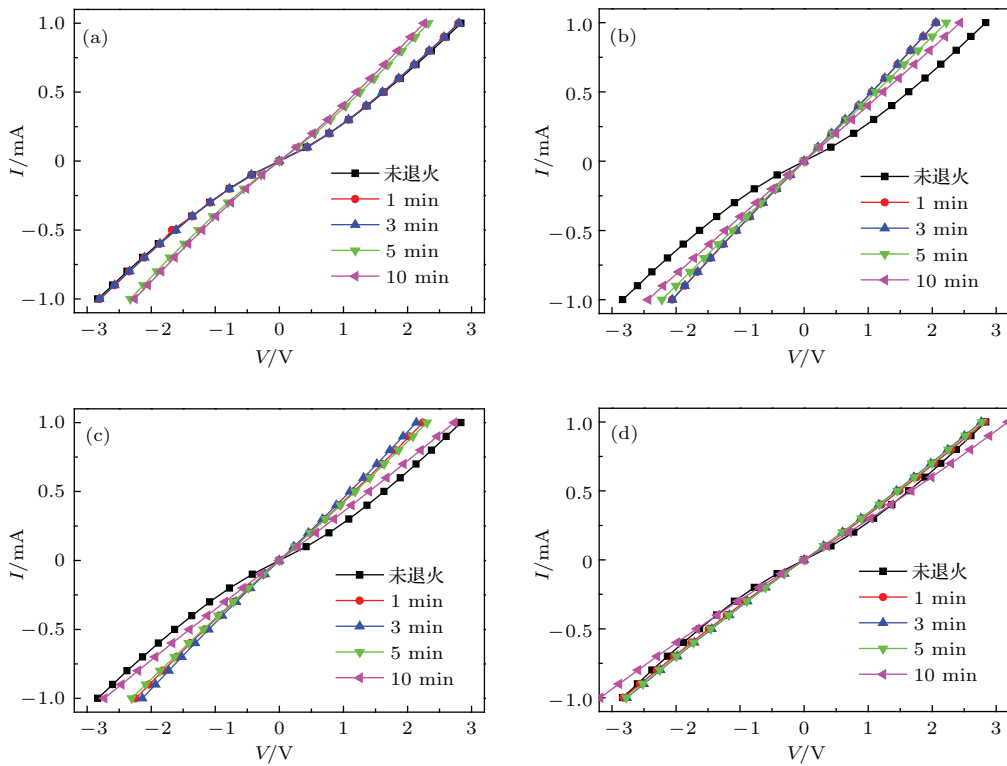


图3 (网刊彩色) Ni/Ag/Ti/Au 电极 ($r_n = 120 \mu\text{m}$) 在300—600 °C氧气氛围中不同时间退火前后的*I-V*曲线 (a) 300 °C; (b) 400 °C; (c) 500 °C; (d) 600 °C
Fig. 3. (color online) *I-V* characteristics of Ni/Ag/Ti/Au ($r_n = 120 \mu\text{m}$) contacts before and after annealing at 300—600 °C in oxygen atmosphere for different durations: (a) 300 °C; (b) 400 °C; (c) 500 °C; (d) 600 °C.

在 400 °C 氧气氛围下退火后, 随着退火时间增加, Ni/Ag/Ti/Au 电极的 I - V 曲线斜率先增大后减小, 比接触电阻率先减小后增大. 退火后都形成了很好的欧姆接触. 400 °C 下 1 min 的退火使比接触电阻率从 $2.3 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 降至 $5.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 3 min 退火后, 比接触电阻率降至所有样品的最低值 $3.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 继续延长退火时间则会增大比接触电阻率. 10 min 退火后比接触电阻率增大为 $1.3 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 但依然低于退火前的值. 由此可知, 400 °C 退火可以明显改善欧姆接触性能, 较为合适的退火时间为 3 min.

在 500 °C 退火后, 随着退火时间的增加, 电极 I - V 曲线的斜率先增大后减小, 比接触电阻率先减小后增大. 与未退火的样品相比, 500 °C 退火条件下, 1—5 min 的退火可以使比接触电阻率降低, 3 min 的退火后, 比接触电阻率降至 $7.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 当退火时间超过 3 min 时, 随着退火时间的增加, 比接触电阻率开始增大, 10 min 的退火对改善欧姆接触性能无明显作用.

最后, 在 600 °C 氧气氛围中进行退火实验. 与未退火的样品相比, 600 °C 的退火对欧姆接触性能的改善很小. 600 °C 下 1—5 min 的退火可以使比

接触电阻率轻微降低, 3 min 退火后的样品的比接触电阻率最低, 为 $1.4 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 10 min 退火后, 比接触电阻率增大至 $2.7 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 表现出非欧姆接触特性. 由此可以看出, 600 °C 氧气氛围中退火对欧姆接触性能改善很小.

300—600 °C 氧气氛围中不同时间退火后的反射率如图 5 所示. 退火前, 电极在 450 nm 处的反射率为 86.6%. 由测试结果可知, 300 和 400 °C 氧气

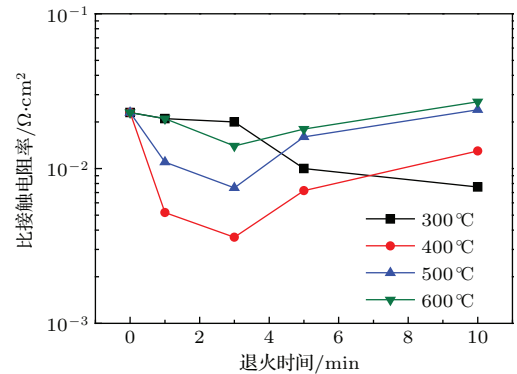


图 4 (网刊彩色) Ni/Ag/Ti/Au 电极在 300—600 °C 氧气氛围中不同时间退火后的比接触电阻率

Fig. 4. (color online) Specific contact resistivities of Ni/Ag/Ti/Au contacts after annealing at 300—600 °C in oxygen atmosphere for different durations.

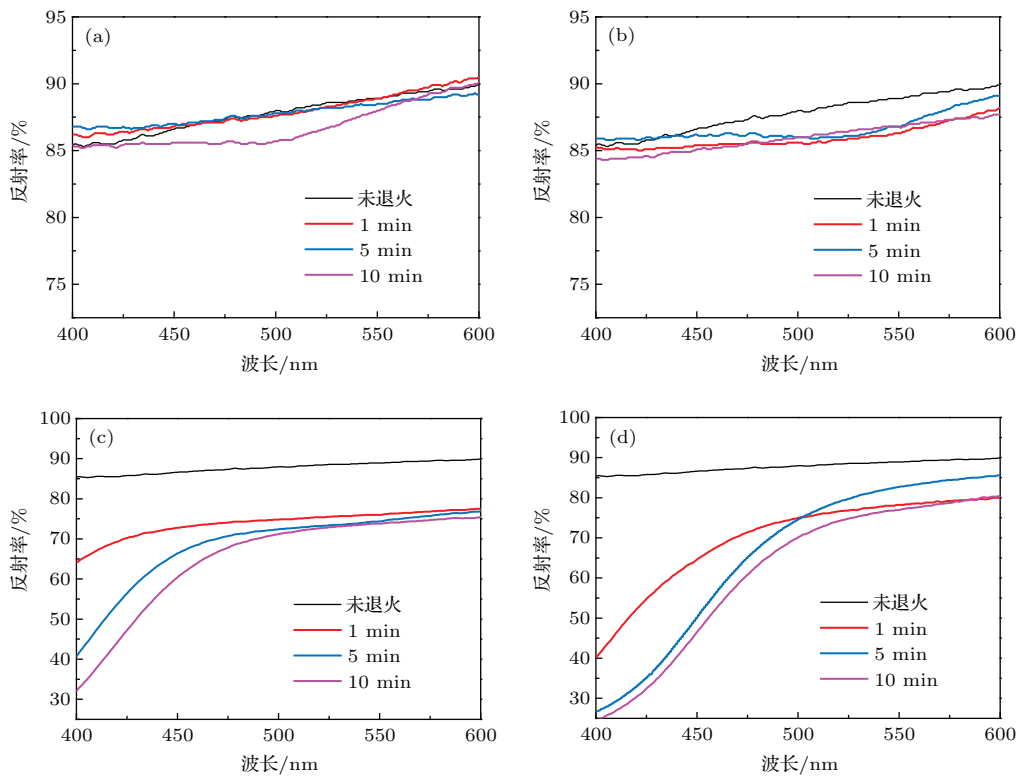


图 5 (网刊彩色) Ni/Ag/Ti/Au 电极在 300—600 °C 氧气氛围中不同时间退火前后的反射率 (a) 300 °C; (b) 400 °C; (c) 500 °C; (d) 600 °C

Fig. 5. (color online) Reflectivity of Ni/Ag/Ti/Au contacts before and after annealing at 300—600 °C in oxygen atmosphere for different durations: (a) 300 °C; (b) 400 °C; (c) 500 °C; (d) 600 °C.

氛围的退火对于Ni/Ag/Ti/Au电极的反射率的影响较小. 经过1—10 min时间不等的退火后, 300 °C退火条件下, Ni/Ag/Ti/Au电极在450 nm处的反射率在85.6%—87.0%之间, 400 °C条件下, 电极在450 nm处的反射率降至85.1%—86.2%之间. 500 °C的退火使电极的反射率明显降低, 且随着退火时间的延长, 反射率持续下降. 经过1 min退火后, 450 nm处的反射率就降至72.8%, 10 min的退火使450 nm处的反射率降到了60.4%. 而600 °C氧气退火使电极的反射率更加严重下降, 随着退火时间的增加, 反射率急剧下降. 1 min退火后, 450 nm处的反射率已经由退火前的86.6%降到64.6%, 10 min退火后, 450 nm处的反射率降至46.5%. 由此可知, 500和600 °C氧气氛围退火会使Ni/Ag/Ti/Au电极的光学性能严重退化.

综合以上分析, 400 °C氧气氛围3 min的退火是较好的退火条件, 可以获得 $3.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的比接触电阻率和450 nm处约86%的反射率. 其原因可以解释为: Ni在退火过程中与氧气反应生成NiO, NiO属于p型半导体, 降低了p-GaN与金属电极之间的势垒高度^[13], 同时, p-GaN中Mg-H络合物的H会与氧气反应生成水, 使Mg解吸附, 增大空穴浓度^[14], 这两方面都将有利于降低比接触电阻率, 适当时间的退火会使以上反应充分进行. 但是在高温长时间退火的条件下, Ni会与p-GaN反应生成 Ni_3Ga_4 , 不利于形成良好的欧姆接触^[15]. 高温、长时间退火使Ti无法有效阻挡Au向Ag的扩散^[16], 并会促进接触界面形成Ag-Ga固溶体^[17], 这将使反射率降低.

3.3 沉积温度对Ni/Ag/Ti/Au电极性能的影响

在进行电极蒸镀过程中, 对GaN外延片进行加热, 通过控制金属沉积在p-GaN表面时GaN的温度来研究沉积温度对Ni/Ag/Ti/Au电极性能的影响. 通过对不同沉积温度下的Ni/Ag/Ti/Au电极的*I-V*曲线和比接触电阻率(图6)进行比较分析可知, 室温下电极呈现出非欧姆接触特性, 比接触电阻率为 $3.4 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 提高沉积温度后, 欧姆接触性能得到一定的改善. 当沉积温度从室温升至120 °C时, *I-V*曲线的斜率明显增大, 电极由非欧姆接触变为较好的欧姆接触, 在不经退火的情况下, Ni/Ag/Ti/Au与p-GaN的比接触电阻率降至 $6.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 当沉积温度由120 °C升至

140 °C时, *I-V*曲线斜率变化不大, 比接触电阻率升高至 $7.7 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

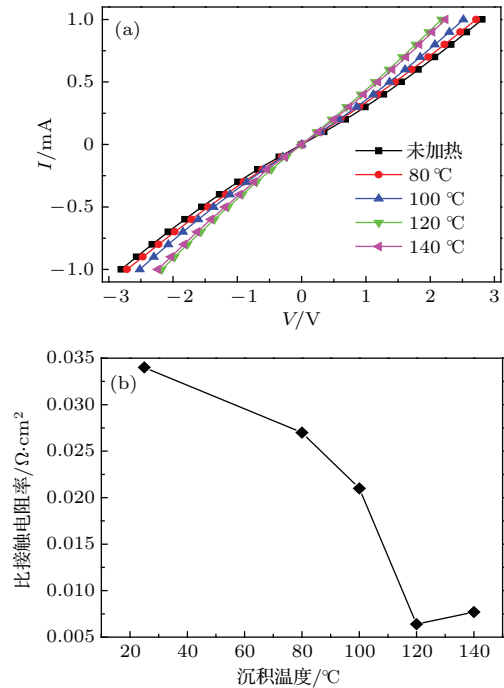


图6 (网刊彩色) 不同沉积温度下Ni/Ag/Ti/Au电极的测试结果 (a) *I-V*曲线; (b) 比接触电阻率

Fig. 6. (color online) Test results of Ni/Ag/Ti/Au contacts at different deposition temperatures: (a) *I-V* characteristics; (b) specific contact resistivities.

不同沉积温度下的Ni/Ag/Ti/Au电极的反射率如图7所示. 当沉积温度从室温升高至80 °C时, 450 nm处的反射率变化较小, 仅从86.6%增大至87.3%. 而当沉积温度继续升高到100和120 °C时, 光学性能有了较明显的改善, 反射率分别增至89.1%和90.1%. 但是, 当沉积温度继续升高至140 °C, 反射率呈现下降的趋势. 由此可知, 对改善电极的光学性能而言, 120 °C是较适宜的沉积温度.

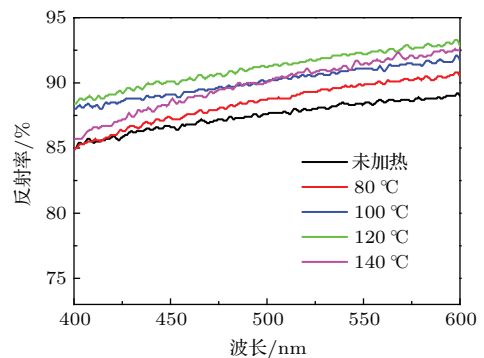


图7 (网刊彩色) 不同沉积温度下Ni/Ag/Ti/Au电极的反射率

Fig. 7. (color online) Reflectivity of Ni/Ag/Ti/Au contacts at different deposition temperatures.

通过以上实验结果可知:适当提高蒸镀电极时的沉积温度可以降低电极与p-GaN的比接触电阻率并提高反射率.这是由于提高沉积温度会促进Ga原子向电极的扩散,在p-GaN表面附近形成Ga空位,Ga空位属于受主类型缺陷,增大了p-GaN表面的空穴浓度,有利于降低比接触电阻率^[18].在Ag原子蒸镀到Ni/p-GaN表面的过程中,适当提高沉积温度可以促进Ag原子在基片表面的横向迁移^[19],有利于Ag沿着较为稳定的(111)方向生长^[20],改善了Ag的成膜质量,提高了反射率^[21].然而,过高的沉积温度会使Ni/Ag薄膜在沉积的同时经历类似于退火的过程,使Ni,Ag的晶粒尺寸增大,表面变得粗糙.这将降低反射率,并减小电极与p-GaN的接触面积,从而降低电学性能^[22,23].

根据以上实验结果及分析,以较优的电极结构和相应最佳工艺条件制作了完整的垂直结构LED器件,并与未经优化的LED进行比较.

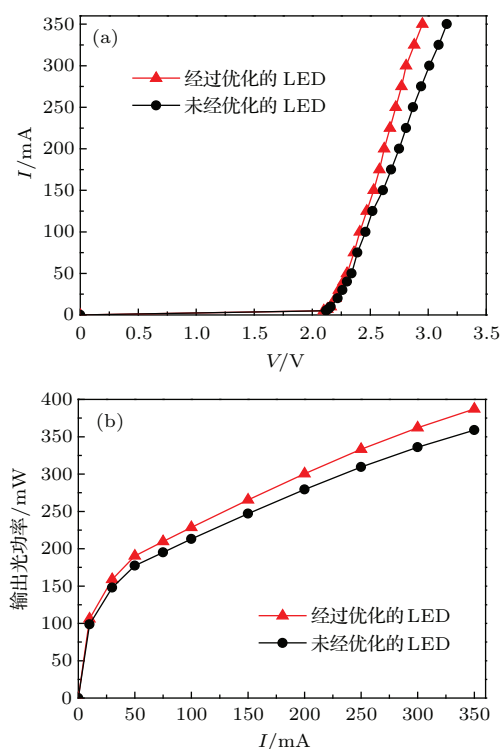


图8 (网刊彩色) 优化前后LED的测试结果 (a) $I-V$ 曲线; (b) 输出光功率与电流的关系

Fig. 8. (color online) Test results of LEDs before and after optimization: (a) $I-V$ characteristics; (b) light output power as a function of current.

外延生长GaN后,在沉积温度为120 °C条件下蒸镀Ni/Ag/Ti/Au (1/200/100/100 nm) 电极,然后在400 °C氧气氛围中退火3 min,之后进行键合、激光剥离、u-GaN刻蚀、表面粗化、蒸镀n电

极等步骤,完成垂直结构LED的制作.未经优化的LED在蒸镀Ni/Ag/Ti/Au电极时沉积温度为室温,且在蒸镀电极后未退火,其余工艺步骤与上述优化的LED相同.完成LED制作后进行电学和光学性能测试.将反向漏电流大于1 μA (反向电压为5 V时)的LED芯片剔除,对每个晶圆上其余约700个芯片的测试结果进行分析,其典型的 $I-V$ 曲线和输出光功率-电流曲线如图8所示.

从测试结果可以看出,优化后的LED具有较低的工作电压和较高的输出光功率.经过优化,在350 mA注入电流下,LED工作电压的均值由3.16 V降至2.95 V,输出光功率的均值由358.8 mW升高到387.1 mW.优化后LED的电光转换效率达到37.5%.

4 结 论

为了得到GaN基垂直结构LED的低接触电阻率和高反射率的p型电极,本文研究了Ag厚度、退火时间、沉积温度对Ni/Ag/Ti/Au电极的电学和光学性能的影响.研究表明,增加Ag的厚度可以提高Ni/Ag/Ti/Au电极的反射率,400 °C、氧气氛围中3 min的退火条件下得到最低的比接触电阻率为 $3.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot cm^2$,过高温、过长时间的退火会使电极的反射率明显降低,并且不利于降低比接触电阻率.适当提高电极的沉积温度可以增大其反射率,并有利于形成更好的欧姆接触.采用优化的结果,在沉积温度为120 °C条件下蒸镀Ni/Ag/Ti/Au (1/200/100/100 nm),然后在400 °C氧气氛围中退火3 min制作了p型电极,利用此电极制作的垂直结构LED,在350 mA注入电流下,工作电压为2.95 V,输出光功率为387.1 mW,电光转换效率达到37.5%.

参考文献

- [1] Greco G, Prystawko P, Leszczynski M, Nigro R L, Raineri V, Roccaforte F 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 123703
- [2] Lin D W, Lee C Y, Liu C Y, Han H V, Lan Y P, Lin C C, Chi G C, Kuo H C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 233104
- [3] Xiong J Y, Zhao F, Fan G H, Xu Y Q, Liu X P, Song J J, Ding B B, Zhang T, Zheng S W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 118504
- [4] Yang B, Guo Z Y, Xie N, Zhang P J, Li J, Li F Z, Lin H, Zheng H, Cai J X 2014 *Chin. Phys. B* **23** 048502

- [5] Kim H, Kim K K, Choi K K, Kim H, Song J O, Cho J, Baik K H, Sone C, Park Y, Seong T Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 023510
- [6] Jeon J W, Seong T Y, Kim H, Kim K K 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 042102
- [7] Feng F F, Liu J L, Qiu C, Wang G X, Jiang F Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5706 (in Chinese) [封飞飞, 刘军林, 邱冲, 王光绪, 江风益 2010 物理学报 **59** 5706]
- [8] Liu J L, Feng F F, Zhou Y H, Zhang J L, Jiang F Y 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 111112
- [9] Magdenko L, Patriarche G, Troadec D, Mauguin O, Morvan E, di Forte-Poisson M A, Pantzas K, Ougazzaden A, Martinez A, Ramdane A 2012 *J. Vac. Sci. Technol. B* **30** 022205
- [10] Guo D B, Liang M, Fan M N, Shi H W, Liu Z Q, Wang G H, Wang L C 2007 *Chin. J. Semiconductors* **28** 1811 (in Chinese) [郭德博, 梁萌, 范曼宁, 师宏伟, 刘志强, 王国宏, 王良臣 2007 半导体学报 **28** 1811]
- [11] Jeon J W, Yum W S, Oh S, Kim K K, Seong T Y 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 021115
- [12] Huang Y P, Yun F, Ding W, Wang Y, Wang H, Zhao Y K, Zhang Y, Guo M F, Hou X, Liu S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 127302 (in Chinese) [黄亚平, 云峰, 丁文, 王越, 王宏, 赵宇坤, 张焯, 郭茂峰, 侯洵, 刘硕 2014 物理学报 **63** 127302]
- [13] Julita S K, Szymon G, Elzbieta L S, Ryszard P, Grzegorz N, Michal L, Piotr P, Ewa T, Jan K, Stanislaw K 2010 *Solid State Electron.* **54** 701
- [14] Qiao D, Yu L S, Lau S S, Lin J Y, Jiang H X, Haynes T E 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 4196
- [15] Chary I, Chandolu A, Borisov B, Kuryatkov V, Nikishin S, Holtz M 2009 *J. Electron. Mater.* **38** 545
- [16] Jiang F, Cai L E, Zhang J Y, Zhang B P 2010 *Physica E* **42** 2420
- [17] Jang H W, Lee J L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5920
- [18] Tian T, Wang L C, Guo E Q, Liu Z Q, Zhan T, Guo J X, Yi X Y, Li J, Wang G H 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 115102
- [19] Mashaieky J, Shafeizadeh Z, Nahidi H 2012 *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **60** 20301
- [20] Song Y H, Son J H, Yu H K, Lee J H, Jung G H, Lee J Y, Lee J L 2011 *Cryst. Growth Des.* **11** 2559
- [21] Kim S, Jang J H, Lee J S 2007 *J. Electrochem. Soc.* **154** 973
- [22] Son J H, Yu H K, Song Y H, Kim B J, Lee J L 2011 *Cryst. Growth Des.* **11** 4943
- [23] Chou C H, Lin C L, Chuang Y C, Bor H Y, Liu C Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 022103

Reflective Ni/Ag/Ti/Au electrode with low specific contact resistivity*

Wei Zheng-Hong¹⁾²⁾ Yun Feng^{1)2)3)†} Ding Wen¹⁾²⁾ Huang Ya-Ping²⁾ Wang Hong²⁾
Li Qiang¹⁾²⁾ Zhang Ye²⁾ Guo Mao-Feng²⁾ Liu Shuo³⁾ Wu Hong-Bin³⁾

1) (Key Laboratory of Physical Electronics and Devices of Ministry of Education, Shaanxi Provincial Key Laboratory of Photonics and Information Technology, 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 19 December 2014; revised manuscript received 18 January 2015)

Abstract

The specific contact resistivity and reflectivity of Ni/Ag/Ti/Au contact with p-GaN are studied. It is found that the thickness of Ag, anneal time and deposition temperature have a great effect on the performance of Ni/Ag/Ti/Au electrode. Its optical reflectivity is measured by reflectivity spectrophotometer, and its specific contact resistivity is calculated by circular transmission line model. It is observed that the contact reflectivity values of Ni (1 nm)/Ag/Ti (100 nm)/Au (100 nm), when the thickness values of Ag are 25 nm and 50 nm, are low: their values are 68.5% and 82.1% at 450 nm, respectively, and they start to increase with increasing the Ag thickness, then reach their saturated values when Ag thickness is beyond 200 nm. When the anneal time changes from 1 min to 10 min in oxygen atmosphere, the specific contact resistivity decreases at 300 °C, decreases further and then increases at 400–600 °C. After annealing at temperatures at 300 °C and 400 °C in oxygen atmosphere, the contact reflectivity value of Ni/Ag/Ti/Au remains almost unchanged, even when anneal time increases from 1 min to 10 min. However, The contact reflectivity of Ni/Ag/Ti/Au decreases significantly after annealing at a temperature higher than 400 °C and it becomes smaller with longer annealing time. After 400 °C annealing in oxygen atmosphere for 3 min, the specific contact resistivity reaches $3.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Additionally, the deposition temperature of Ni/Ag is investigated. It is noticed that the specific contact resistivity decreases and the reflectivity increases with increasing the deposition temperature from room temperature to 120 °C. The reflectivity rises to 90.1% at 450 nm and the specific contact resistivity reaches $6.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ for the Ni/Ag/Ti/Au electrode at a deposition temperature of 120 °C. However, the effects of improving the electrical and optical characteristics weaken when deposition temperature changes from 120 °C to 140 °C. With a overall consideration, Ni (1 nm)/Ag (200 nm)/Ti (100 nm)/Au (100 nm) is made at a deposition temperature of 120 °C, and then anneals at 400 °C for 3 min in oxygen atmosphere to achieve the optimized electrode. The vertical light emitting diode with this Ni/Ag/Ti/Au electrode is fabricated. Its working voltage is 2.95 V and the light output power is 387.1 mW at 350 mA. The electro-optical conversion efficiency reaches 37.5%.

Keywords: p-GaN, ohmic contact, reflectivity

PACS: 73.40.Ns, 78.20.-e, 67.25.bh, 68.35.Ja

DOI: 10.7498/aps.64.127304

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2014AA032608).

† Corresponding author. E-mail: fyun2010@mail.xjtu.edu.cn