

大功率倒装结构 GaN LED p 电极研究

伊晓燕 马 龙 郭金霞 王良臣 李晋闽

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 从接触电阻、反射率、电流扩展等方面对 Ni/Au/Ag, ITO/Ag, Ag 等多种倒装结构 p 电极金属体系进行分析比较, 给出了实现倒装结构大功率 GaN LED p 电极的多种设计方案. 指出 Ni/Au 金属化体系在大功率 LED 应用中存在的热稳定性问题及 Ru, Ir 等新型金属体系实现 GaN p 电极接触的潜在优势.

关键词: 大功率; 倒装结构; LED; p 电极; 高反射; 接触电阻

EEACC: 2550F

中图分类号: TN312+.8 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0161-04

1 引言

传统 GaN 基 LED 采用正装结构, p 电极一般采用高透射率的透明电极(如 Ni/Au). 由于 p-GaN 浓度不高, 电阻率较大, 采用半透明 Ni/Au 作为电流扩展层, 只有当 Ni/Au 层的厚度超过 50nm, 才可以实现电流的完全扩展; 然而 Ni/Au 层的加厚势必造成对光的吸收. 所以对于正装结构 LED 而言, 需要在电流扩展和透射率两方面加以均衡, 必然导致器件的转换效率不高. 同时, 在正装结构 LED 中, 由于发光区与热沉之间由蓝宝石衬底隔离, 使得散热及提取效率都受到很大程度的限制. 为此以蓝宝石为衬底的 GaN 基大功率 LED 可采用倒装结构.

在倒装结构 LED 中, 光通过透明的蓝宝石衬底发出, 由于蓝宝石的折射率(1.75)与空气折射率相差较小, 不易发生全反射, 有利于提高提取效率; p 电极采用高反射厚电极, 改善了欧姆接触及电流扩展, 使得 LED 可在大电流密度下工作, 且正向电压有所降低. 同时发热区更靠近 Si submount 和热沉, 提高器件的热传导能力.

2 p 电极金属体系分析

在倒装结构 LED 中, 对 p 电极的要求由正装结构中高透射率转换为高反射率, 一般通过两种途径来实现: 高透射率的透明电极+高反射率金属(一般

取 Ag); 或者选用高反射率的金属同时作欧姆接触层和反射镜. 表 1 列出了具有代表性的几种 p 电极金属体系, 并对其接触电阻、透射率/反射率、热稳定性等特性进行了比较.

表 1 LED p 电极金属体系及特性比较

Table 1 LED p electrode

	金属体系	接触电阻 /($\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$)	透射率/反射率 /%	热稳定性
透 明 电 极	Ni/Au	4.0×10^{-6}	70	较差
	Ni/Pt	10^{-2}	45	优于 Ni/Au
	Pd/Ni	5.7×10^{-5}	70~80	优于 Pd/Au
	Ni/Au/ITO	2.0×10^{-4}	90.3	优于 Ni/Au
	Ru/Ni or Ir/Ni	4×10^{-5}	85	优于 Ni/Au
	Ni/AZO	8.46×10^{-6}	>76	
	Ni-Mg ss/Au	6.1×10^{-6}	79	
高 反 电 极	Ni-La ss/Au	7.2×10^{-5}	82.5	
	Ag	较高	96	较差
	Ni/Au/Ag or Al	$V_t=4V@350mA$	>70	较差
	ITO/Ag	较高	94	优于 Ni/Au
	RuO ₂ /SiO ₂ /Ag	可与 Ni/Au 比拟	98	优于 Ni/Au
	Pd/Ag	1×10^{-6}	60~70	较好

GaN 属于宽带隙材料, 尤其是 p 型 GaN 很难形成良好的欧姆接触. 制约 p 电极欧姆接触的因素有两个: 一是 p-GaN 掺杂浓度难以达到空穴可以隧穿肖特基势垒的水平; 二是缺少功函数比 p-GaN 功函数(7.5eV)更高的金属或金属体系. 在器件制作过程中, 首先对 p-GaN 激活, 即 750°C N₂ 氛围下快速退火使 Mg—H 键断裂, 提高 p-GaN 载流子的浓

度. 然后通过 GaN 表面处理及湿法钝化技术减小表面态的影响, 进一步降低金属-半导体接触势垒. 综合功函数、表面态及实验结果等多方面因素, 提出 Au (5.10eV), Ni (5.15eV), Pt (5.65eV), Pd (5.17eV), ITO, Ag 等金属体系, 如表 1 所示.

Ni/Au(5nm/5nm) 经空气或 O₂ 氛围退火, 在 p-GaN 表面得到良好的欧姆接触, 接触电阻可达 10⁻⁶ Ω · cm² 数量级, 主要原因有两个: 一方面金属本身电阻率低, 即富 Au 合金相的生成; 另一方面金属与半导体接触电阻低, 即 NiO 的形成^[1]. 由于 Ni 对 O 的亲合力比 Au 大, 在空气或 O₂ 氛围下合金的过程中, Ni 向外扩散与表面的 O 形成 NiO. 同时 Au 内扩散, 形成不连续的 Au 岛, 与 p-GaN 紧密接触. Sato 等人研究发现 NiO(带隙约为 4eV) 是一种 p 型半导体材料^[2], 其空穴浓度高达 1.3 × 10¹⁹ cm⁻³, 比一般的 p-GaN 材料载流子浓度要高一到两个数量级, 在 p-GaN 表面易于形成欧姆接触. NiO 作为 p-GaN 与金属之间的中间接触层, 使得 Ni/Au/p-GaN 接触变为 p-p 双异质结 Au/p-NiO/p-GaN. Au/p-NiO 与 p-NiO/p-GaN 势垒高度分别为 0.3 和 0.185eV, 易于形成良好的欧姆接触. 所以 Au/p-NiO/p-GaN 结构具有很低的接触电阻.

Koide, Maeda 等人^[3,4] 就 Ni/Au 体系的工作机理提出了另外一个观点, 他们认为 Ni/Au 体系可以形成良好的 p-GaN 欧姆接触的根本原因在于 O₂ 氛围下, Mg—H 键断裂, 使得 p-GaN 空穴浓度提高, 并非中间接触层 p-NiO 的形成.

虽然关于 Ni/Au 体系的机理还没有统一的看法, 但实验证明, 该体系与 p-GaN 接触电阻是目前所有金属体系中最低的. 另一方面经 O₂ 氛围退火后 Ni/Au 体系, 透射率较高, 对 470nm 的光透射率达 70% 左右, 是正装 LED 常用的金属体系. 自然 Ni/Au+Ag 体系在倒装结构的 LED 中得到广泛应用.

ITO/Ag 金属体系是另外一种常用的倒装结构 LED 中 p 电极体系, 其主要优点在于 ITO 透射率高. 常用的 Ni/Au 透明电极的透射率只有 70%, 而厚度在 250nm 左右的 ITO 薄膜经原位退火后, 对波长 450nm 的光线透射率可达 97.8%. 但 ITO 透射率与本身电导率相互制约, 97.8% 的高透射率是以牺牲电导率(即器件的电特性)为代价的. 从 LED I-V 特性比较得知其电阻值约为 Ni/Au 体系的三倍. 另一方面 ITO/p-GaN 界面难以实现欧姆接触,

实验表明只有当 p-GaN 载流子浓度超过 1 × 10¹⁸ cm⁻³, 有可能在 GaN 表面形成欧姆接触, 然而 p-GaN 载流子浓度很难达到 10¹⁸ cm⁻³ 数量级, 所以一般情况下, 只能在其表面形成肖特基接触. 目前也有文献报道通过优化 ITO 合金化条件, 可以在 p-GaN 表面得到较好的欧姆接触.

ITO 透射率高, 可以做得很厚而不影响光的提取, 但接触电阻较大. 综合 Ni/Au 与 ITO 两者的优点, 有研究人员设计了 Ni/Au/ITO/Ag 复合体系 p 电极. 其中 Ni/Au 实现欧姆接触, ITO 改善电流扩展.

无论采用 Ni/Au 薄电极还是 ITO, 无论其透射率有多高, 都不可避免地会造成对光的吸收. 从进一步提高出光效率的角度出发, 考虑采用 Ag(Al)/Ni/Au 合金体系, Ag 或 Al 同时用作反射镜、欧姆接触层、电流扩展层. 在可见光波长范围内 Ag 和 Al 是最好的反射镜, 对 470~520nm 波长的光, Al, Ag 的反射率分别为 84% 和 96%. 所以选择 Ag 或 Al 基金属体系是提高电极反射率的有效途径. 然而 Al 与 p-GaN 很难形成欧姆接触, Ag 可以在 p-GaN 表面形成欧姆接触, 但在稳定性及与 p-GaN 表面粘附性等方面仍然存在问题. 实验表明^[5] 在淀积 Ag 的过程中, 若温度超过 400℃, 则电阻率明显增大. 该结构的电特性、热稳定性及大电流工作可靠性有待进一步改善.

另外 Pt 对 470nm 光的反射率为 58% 左右, 而且功函数比较高, 对 Pt 基金属体系进行优化, 也有可能得到较好的高可靠性的反射电极.

3 倒装结构 LED 高反射厚电极设计

综合比较上述电极体系的优劣, 在大功率倒装结构 LED p 电极体系设计过程中, 我们采用了 Ni/Au/Ag/Ni/Au 高反射厚电极体系. 大功率 LED 工作电流较高, 电流分布是否均匀对器件性能及可靠性的影响显得尤为突出. 一般采用梳状电极结构, 改善器件的电流扩展.

在 LED 制作过程, 首先对表面进行清洗及钝化处理. 经 ICP 干法刻蚀得到 p, n 台面后, 进行 p 电极金属制备: 采用 Ni/Au(5nm/5nm) 透明电极体系, 经 500℃ 空气氛围快速退火, 形成欧姆接触层; 淀积反射层金属 Ag(200nm 左右); 加厚电极层 Ni/Au(80nm/100nm) 并合金化得到高反射的厚电极.

厚电极设计使得大功率 LED 电流扩展更为均匀,避免了正装结构中局部区域的电流密集现象. N 电极采用常规的 Ti/Al/Ti/Au 体系, Si submount 中的凸点采用选择性电镀 PbSn 合金或 AuSn 合金的方法得到. 最后采用倒装焊技术将芯片与 Si submount 键合,得到倒装结构的大功率 GaN LED.

初步设计得到的 LED I - V 特性如图 1 所示,稳定工作于 350mA 时,正向电压为 3.6~4.0V,且正向电流加至 800mA 时仍未出现电流饱和现象.

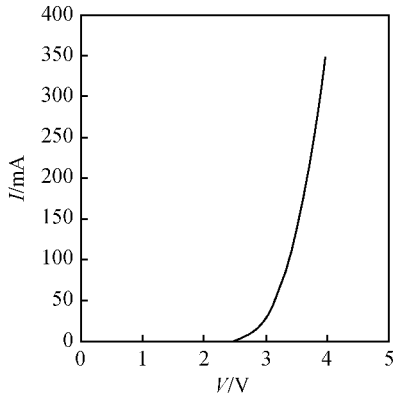


图 1 倒装结构 LED I - V 特性

Fig. 1 I - V curve of flip-chip LED

4 讨论

采用 Ni/Au/Ag 作为倒装结构 LED 的电极体系,工艺相对简单成熟.然而随着研究的深入,发现 Ni/Au 基电极存在以下三个主要缺点.

(1) 热稳定性问题

图 2 从两个方面反映了采用 Ni/Au 体系 LED 的热稳定性问题.由图 2(a)可以看出当退火时间超过一定限度(一般为 3min)^[6]以后,电极接触电阻随退火时间增加而逐渐增大.同时还可以观察到 O,Ni 原子浓度比也呈相同变化趋势.图 2(b)则给出了采用 Ni/Au 电极 LED 在不同退火条件下的寿命,可见经 O₂ 氛围退火得到的 LED 寿命比 N₂ 氛围下的 LED 寿命低两个数量级^[7].由上述两点可以看出: Ni/Au 电极经 O₂ 氛围退火后,可以得到低的欧姆接触电阻,但是器件的热稳定性却变差了.原因可能在于 O₂ 氛围下形成的 NiO 与 p-GaN 的分离、NiO 层电阻率的增大或者绝缘的无定形态 Ni-Ga-O 的增加.关于这一工作机理,还在进一步研究中.

(2) 光透射率对 Au 层的厚度敏感,影响了 LED 光提取效率

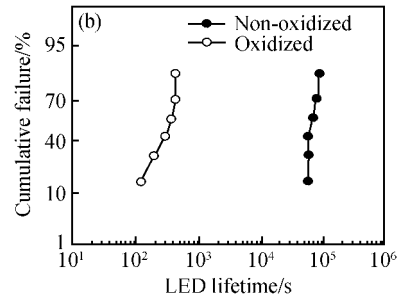
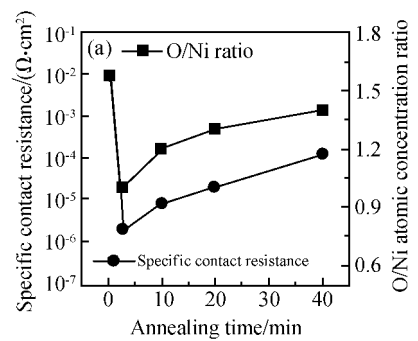


图 2 采用 Ni/Au 体系 LED p 电极热稳定性 (a) NiO/Au p 电极接触电阻随退火时间变化; (b) 经 N₂ 和 O₂ 氛围退火后 LED 寿命比较

Fig. 2 Thermal stability of Ni/Au electrode (a) Contact resistance as functions of annealing time; (b) LED lifetime for both nonoxidized and oxidized LED

Ni/Au 电极中随 Au 层厚度增加,透射率有较大幅度的衰减.该体系中 NiO 对于光线是透明的,而不连续的 Au 岛对光线的传输产生重要影响^[8].

(3) Au 的内扩散,造成正、反向特性变差

升高退火温度(>700℃),可以观测到明显的漏电流,使得 LED 反向特性变差.原因在于 Au(甚至 Ni)在高温下扩散到 LED 的有源区,尤其在 GaN 材料有位错^[9]的地方更容易产生这种内扩散,造成 LED 的反向漏电.我们的实验证明 LED 长期连续工作后,正向电压也会变差,如工作电压升高等.

鉴于 Ni/Au 体系存在以上缺点,必须寻求新的 p 电极金属体系,要求具备接触电阻小、透射率/反射率高、热稳定性好等特性或者在三者之间加以均衡,以期提高 LED 的电学及光学性能.由表 1 可以看出 Ru/Ni, Ir/Ni, Pd/Ni, Ni/Au/ITO 在三方面都比较满足要求,其中 Ru/Ni 和 Ir/Ni 体系电阻率小、对 470nm 光透射率高、热稳定性好,采用 Ru/Ni/Ag 或 Ir/Ni/Ag 体系不失为实现 GaN 基倒装结构 LED p 电极的另一种方案.但对于体系结构以及金属化条件的优化,还需要大量的实验与工作.

5 结 论

大功率倒装结构 LED p 电极要求电流扩展均匀、接触电阻小、反射率高、热稳定性好。本文通过选用高反射率金属或透明电极+高反金属复合体系两种方案来实现。设计中采用梳状电极结构,湿法钝化技术,Ni/Au/Ag/Ni/Au 金属体系,得到 LED 工作正向电压为 3.6~4.0V(电流为 350mA)。鉴于 Ni/Au 电极体系在大功率 LED 应用存在的热稳定性问题,提出了 Ru, Ir 等新型金属体系。Ru, Ir 等金属体系热稳定性好、电阻率小、透射率高、与 GaN 表面粘附性好,是实现 p-GaN 电极体系的另一种方案。

参 考 文 献

- [1] Ho J K, Jong S, Chiu C C, et al. Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(9):1275
- [2] Youn D H, Hao Maosheng, Sato H, et al. Ohmic contact to p-

- type GaN. *Jpn J Appl Phys*, 1998, 37:1768
- [3] Maeda T, Koide Y, Murakami M. Effects of NiO on electrical properties of Ni/Au-based ohmic contacts for p-type GaN. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(26):4145
- [4] Koide Y, Maeda T, Kawakami T, et al. Effects of annealing in an oxygen ambient on electrical properties of ohmic contacts to p-type GaN. *J Electron Mater*, 1999, 28:341
- [5] You K, Kanagawa Y S, Satoshi W, et al. European Patent, No. 0926744A2
- [6] Lin Y J, Li Z D, Hsu C W. Investigation of degradation for ohmic performance of oxidized Au/Ni/Mg-doped GaN. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(17):2817
- [7] Kim H, Kim D J, Park S J, et al. Effect of an oxidized Ni/Au p-contact on the performance of GaN/InGaN multiple quantum well light-emitting diodes. *J Appl Phys*, 2000, 82(17):1506
- [8] Cao X A, Stokes E B, Sandvik P, et al. Optimization of current spreading metal layer for GaN/InGaN-based light emitting diodes. *Solid-State Electron*, 2002, 46:1235
- [9] Hsu C Y, Lan W H, Wu Y C S. Effect of thermal annealing of Ni/Au ohmic contact on the leakage current of GaN based light emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(12):2447

Investigation of p-Electrode in High Power GaN-LED Application

Yi Xiaoyan, Ma Long, Guo Jinxia, Wang Liangchen, and Li Jinmin

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The performance including contact resistance, reflectivity, and current spreading of several types of ohmic contacts to p-GaN is analyzed, such as Ni/Au/Ag, ITO/Ag, Ag, etc. Based on this data all kinds of p-electrode designs used in high power flip-chip LED are achieved. The mechanism of ohmic contact for the Ni/Au/p-GaN degrades under long-time high-temperature working, so low-resistance, high-reflectivity, and thermally stable ohmic contacts on p-GaN using Ru and Ir are proposed.

Key words: high power; flip-chip; LED; p electrode; high reflectivity; contact resistance

EEACC: 2550F

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0161-04