

p 型 GaN 欧姆接触的研究进展

潘群峰, 刘宝林

(厦门大学物理系, 福建 厦门 361005)

摘要: 宽带隙的 GaN 作为半导体领域研究的热点之一, 近年来发展得很快。p 型 GaN 的欧姆接触问题一直阻碍高温大功率 GaN 基器件的研制。本文讨论了金属化方案的选择、表面预处理和合金化处理等问题, 回顾了近年来 p 型 GaN 欧姆接触的研究进展。

关键词: p 型; GaN; 欧姆接触

中图分类号: TN304.2*3

文献标识码: A

文章编号: 1003-353X(2004)08-0015-04

Research and progress of ohmic contact to p-type GaN

PAN Qun-feng, LIU Bao-lin

(Dept of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The wide-bandgap GaN has been extensively investigated and developed rapidly in recent years. But difficulty in obtaining low-resistance ohmic contacts to p-type GaN blocks the development of high temperature, high power GaN-based devices. Choice of metallization scheme, surface pretreatment and alloying process are discussed. The progress of ohmic contacts to p-type GaN are reviewed.

Key words: p-type; GaN; ohmic contact

1 引言

以 GaN 为代表的 III 族氮化物因具有一系列优越的性质, 而成为近年来化合物半导体研究的热点之一。利用其禁带宽度大、电子饱和漂移速度高、导热性能良好等特点适合于制作高频、大功率电子器件; 而利用其宽的直接带隙可以制作蓝、绿光和紫外光的光电子器件。虽然 GaN 基器件在近年来取得了相当大的进展, 但是由于较难实现低阻的 p 型 GaN 欧姆接触, GaN 基高温大功率器件的研制一直受到限制。

本文回顾了近年来 p 型 GaN 欧姆接触的研究进展, 主要讨论了金属化方案的选择、表面预处理和合金化处理三个方面的问题, 最后介绍了其他一些获取低阻欧姆接触的方法。

2 p 型 GaN 欧姆接触问题

n 型 GaN 的欧姆接触相对容易制作, 用几种金属组合, 如 Ti/Al, Ti/Al/Ti/Au 等, 接触电阻率通常可以达到 $10^{-5} \sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ^[1], 而制作低阻的 p-GaN 欧姆接触比较困难。有两方面的原因阻碍低阻的 p-GaN 欧姆接触: 一方面是难于生长重掺杂的 p-GaN 材料 (p 型浓度 $> 10^{18} \text{cm}^{-3}$); 另一方面是缺乏合适的接触金属材料, p-GaN 材料的功函数很大 (7.5eV ^[2]), 而功函数最大的金属 Pt 也只有 5.65eV 。除此之外, 金属化工艺 (包括表面处理, 金属沉积和合金化处理) 的条件也会影响 p-GaN 的接触电阻。虽然采用不同的工艺条件可以获得类似欧姆性质的 I-V 特性, 但是接触电阻率通常为 $10^{-2} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。这样的阻值对于一般显示用的发光二极管 (LED) 不存在严重的问题, 但是对于高电流密度工作的激光二极管 (LD), 会

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60276029);
福建省自然科学基金项目 (A0210006)

表1 各种p型欧姆接触金属化方案及结果

金属	p-GaN 浓度 / cm ⁻³	工艺过程	接触电阻率 $r_c / \Omega \cdot \text{cm}^2$	参考文献
Ni/Au	2×10^{17}	500 空气中退火 10 min	4.0×10^{-6}	[3]
Pt/Ni/Au	3×10^{17}	300 氮气中退火 1 min	5.1×10^{-4}	[4]
ZrN/ZrB ₂	1×10^{18}	1050 氮气中退火 30 s	$(6 \sim 8) \times 10^{-5}$	[5]
Ni/ITO	2×10^{17}	王水预处理, 600 空气中退火	8.6×10^{-4}	[6]
Cr/Au	1.4×10^{20}	500 退火 1 min	3.0×10^{-4}	[7]
WSi	1.0×10^{18}	300 退火	6.8×10^{-2}	[8]
Pd/Au	$\sim 10^{17}$	王水预处理, 700 退火	1.99×10^{-4}	[9]
Pt/Ru	$(2 \sim 3) \times 10^{17}$	600 氮气中退火	2.0×10^{-6}	[10]
Pt	7×10^{17}	500 氮气中退火	$1.8 \pm 1.7 \times 10^{-5}$	[11]

引起诸如缺陷生成,退化或者互扩散等问题。实现 LD 要求接触电阻率必须低于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 目前只有少数的研究小组能做到。表 1 列出了各种金属化方案及目前较好的研究结果。

3 金属化方案的选择

高质量的欧姆接触要求具备低阻和热稳定的特点,对于发光器件还要求高的透射率,所以在选择金属化方案时必须考虑这几个问题。

通常,要获得低阻的欧姆接触,金属和半导体界面的肖特基势垒高度要小。在不考虑表面态影响的前提下,降低势垒高度的方法是:对于n型半导体,选择功函数小的金属;而对p型选择功函数大的金属。对于n型GaN欧姆接触的电学性质和金属功函数的关系存在着两种截然不同的观点: Bermudez 等人^[12]认为肖特基模型可用于n型GaN,肖特基势垒高度由金属功函数和半导体电子亲合势的差别决定;而反之,Guo 等人^[13]报道了n型GaN的肖特基势垒高度不取决于金属的功函数。对于p型GaN的欧姆接触,Mori 等人^[14]认为肖特基势垒高度和接触电阻都只是很弱地依赖于金属的功函数,测量得到的p型肖特基势垒高度主要受表面态和损伤的影响;而Ishikawa 等人^[15]提出接触电阻随金属功函数的增加指数地减小,在GaN表面,金属/p-GaN界面的肖特基势垒高度没有被锁住(Unpinned)。虽然Mori 等人 and Ishikawa 等人的解释机理不一致,但二者都认为使用功函数大的金属与p-GaN欧姆接触可以得到小的接触电阻。因此目前p型GaN欧姆接触所用的材料基本上都是功函

数大的金属。

接触的热稳定性会影响器件的性能,特别是对于大功率器件,高温下的接触质量直接影响到器件的寿命。Au基接触(Ni/Au, Pd/Au, Ni/Pt/Au等)的热稳定性通常较差,一些小组采用无Au金属化方案尝试获得热稳定和低阻的p-GaN欧姆接触。Cao 等人^[9]采用W和WSi_x方案获得热稳定的p-GaN欧姆接触,但是它会产生较大的接触电阻率(约 $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$)。Suzuki 等人^[16]采用Ta/Ti方案,经热退火后得到低阻($3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$),然而这种接触在空气中就会变质。一些小组采用Pt基的接触,结果表明Pt基接触可以同时获得热稳定性和低阻,Jang 等人^[10]采用Pt/Ru与p-GaN接触,经热退火得到低阻($2.2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$),将接触表面在600 °C下退火30 min,发现表面非常平滑并没有发生变化,表明Pt/Ru具有很优越的热稳定性,适用于大功率器件。

对于采用p型接触做透明电极的GaIn基发光器件,接触材料的透射率对于发光器件的性能(如外量子效率、光输出功率等)至关重要。传统的LED采用Ni/Au作为p型GaIn的接触材料,而几个纳米厚的Ni/Au接触是半透明的,其在可见光波段的透射率只有60%~75%。虽然可以通过减小接触层的厚度来提高透射率,但是太薄的接触层会带来热稳定性和可靠性的问题。Pt基与p型GaIn的接触具有较高的透射率,如Pt/Ru(20nm/50nm)接触在470nm的透射率为87.3%^[10],而且Pt基接触具有低阻和热稳定性,所以Pt基接触非常适合用于GaIn基发光器件。ITO(indium tin oxide)由于在可见

光波段的高透明度(约90%)和低阻($<5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)而广泛地用作透明导体。ITO用作n型GaN的接触材料可以获得透明的低阻欧姆接触,但是ITO直接用作p型GaN的接触材料却得到整流性的接触。研究者们想到用Ni/ITO与p型GaN接触^[6,17],结果获得比较理想的低阻欧姆接触(约 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$)和高透射率(约87%),因此Ni/ITO无论在光学上还是电学上都是GaN基LED可用的p型接触材料。

4 表面预处理

化合物半导体的表面具有化学活性,容易吸收氧原子,从而在表面形成一氧化层。GaN表面通常有一自然的绝缘氧化层(包含 Ga_2O_3 和C杂质),厚大约2nm。这一氧化层增加了额外的约0.2eV^[15]的势垒高度,阻碍载流子从金属到半导体的输运,从而使欧姆接触电阻率增加,因此必须在沉积金属前采用物理或化学的方法把它去除。

物理去除的方法有辉光放电和溅射等。Wenzel等人^[18]采用辉光放电的方法清洗p型GaN表面,得到整流性质的接触,原因是清洗过程产生了高密度的表面损伤。Ishikawa等人^[15]采用低离子密度的Ar和 N_2 溅射GaN表面,但是去除的效果不佳。另外退火的方法也可以部分的去除氧化层。

更常用的方法是采用化学腐蚀预处理。化学腐蚀剂一般是用HCl溶液,也有用HF, HNO_3 , NH_4OH 和 NH_4F 溶液等,处理前后接触电阻率的变化不大,效果都不明显。原因可能是:没有完全去除氧化层、腐蚀造成的表面损伤和表面被重新氧化。Cao等人^[19]将p型GaN用HCl溶液和缓冲HF溶液处理之后,又在 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液中煮沸20min,发现Pt/Au与p-GaN的接触势垒高度比只用HCl溶液处理过的要小。他们认为 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液能有效地去除表面的自然氧化层并阻止随即的重新氧化,虽然处理完在表面形成了Ga-S薄层,但其厚度比自然氧化层小得多,不会影响电流流动。Kim等人^[20]采用Pt与p-GaN接触,表面预处理分别用沸腾的王水和HCl溶液,HCl溶液处理过的接触电阻率为 $4.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$,而王水处理过的为 $1.4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$,后者较前者减小了近3个量级,说明王水有效的去除了GaN表面的氧化层,降低了肖特基势垒高度。KOH

溶液也同样具有有效去除氧化层的作用。Lee等人^[21]在沉积Pd/Au前将p-GaN外延片放在沸腾的KOH溶液中浸泡1min,发现接触电阻率从原来的 $2.9 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 减小到 $7.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

5 合金化处理

未经合金化处理的金属与GaN接触一般都表现出整流特性,所以沉积后的材料必须进行热退火处理以形成欧姆接触。金属与p型GaN的接触一般都采用快速热退火(RTA; rapid thermal annealing)进行处理。为了获得低阻的欧姆接触,必须对退火的氛围、温度和时间等条件进行优化,而优化的条件又因不同的接触金属而异。

退火的氛围有空气、 O_2 、 N_2 、Ar或组合气体(如 N_2/H_2 , N_2/O_2 等),多数实验表明在含氧的氛围中退火的效果较好,一般认为氧可以有效地吸收p型GaN表面层中残留的氢,激活Mg受主,从而提高p型载流子浓度。Mistele等人^[22]比较了Ni/Au与p型GaN接触在 O_2 , N_2 , Ar和 N_2/H_2 氛围下快速热退火,结果发现在 O_2 中退火的效果最好(550℃退火2min, $r_c < 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$)。在氧气中退火,一方面去除了p-GaN表面层内的氢,提高了p型载流子浓度;另一方面形成了具有p型性质的NiO从而降低了界面的势垒高度,而在 N_2/H_2 中退火却得到肖特基接触,原因是H钝化了Mg受主,降低了空穴浓度。

退火的氛围不但影响接触的电学性质,还会改变接触的光学性质。Horng等人^[6]在p型GaN上沉积Ni/ITO做欧姆接触,沉积后分别在真空、氮气和空气氛围中600℃热退火,比较三者发现,在空气中退火不仅获得最低的接触电阻率(约 $8.6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$),而且在470nm的透射率也是最高的(空气中88%,真空中只有74%)。

Wenzel等人^[23]研究了不同温度退火对接触电阻的影响,认为接触电阻变化的原因有:金属/p-GaN界面形成反应相,金属与p-GaN外延层之间形成更紧密的接触和p-GaN外延层分解。500℃左右退火,界面反应相的形成和紧密接触对接触电阻的减小起了主要作用;而大于700℃退火,反应相的变化和GaN外延层的分解则增大了接触电阻。

6 其他获取低阻欧姆接触的方法

Sand等人^[24]提出掺入p型的杂质到半导体的表面层可能产生低阻的接触。Mg和Zn对于GaN是最浅的两种p型杂质,将这类杂质添加到接触金属里面,采用了Au/Mg/Au或Ni/Au-Zn等金属化方案,但是没有明显的改进,只能做到约 $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。Suzuki等人^[16]提出,对氢原子有很强束缚能的金属可以制作低阻的p-GaN欧姆接触,因为金属在高温下可以从p-GaN中吸收氢原子而增加其空穴浓度。采用Ta/Ti方案获得了 $3\times 10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 的低阻,但其热稳定性太差。Kaminska等人^[5]采用Zr基金属化方案,利用ZrN/ZrB₂吸收p-GaN表面的氢原子,获得低阻 $(6\sim 8)\times 10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。另一种获取低阻欧姆接触的途径是通过半导体的能带工程。禁带宽度小的半导体可以促进载流子的热电子发射,因此,薄的重掺杂的小带隙半导体帽层被用到各种器件中。InN的带隙比GaN和AlN小,在GaN上面长一层InN或InGaN,就可以产生低阻接触。Kumakura等人^[25]在Pd/Au和p-GaN之间插入一层2nm的应变InGaN接触层,未经任何处理就得到了相当低的接触电阻率($1.1\times 10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}^2$)。

7 总结

p型GaN欧姆接触问题的研究在近几年来取得了很大的发展但还不够成熟。决定接触电阻的因素除了p-GaN本身的制备工艺之外,还和金属化方案、表面预处理和合金化处理三个方面密切相关,因此要获得低阻的p-GaN欧姆接触必须选择合适的金属,去除GaN表面氧化层和优化热退火条件。

参考文献:

- [1] LIU Q Z, LAU S S. A review of metal-GaN contact technology[J]. Solid-State Electronics, 1998, 42 (5) : 677-691.
- [2] TREXLER J T, PEARTON S J, HOLLOWAY P H, et al. Comparison of Ni/Au, Pd/Au, Cr/Au metallizations for ohmic contacts to p-GaN[A]. Mater Res Soc Symp Proc[C]. Boston, MA, USA, 1997, 1091-1096.
- [3] HO J K, JONG C S, HUANG C N, et al. Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN achieved by the oxidation of Ni/Au films[J]. Appl Phys Lett, 1999, (8) :

4491-4497.

- [4] JANG J S, CHANG I S, KIM H K. Low-resistance Pt/Ni/Au ohmic contacts to p-type GaN[J]. Appl Phys Lett, 1999, 4 (1) : 70-72.
- [5] KAMINSKA E, PIOTROWSKA A, BARCZ A. Formation of ohmic contacts to MOCVD grown p-GaN by controlled activation of Mg[J]. Material Science and Engineering B, 2001, 82(1-3) : 265-267.
- [6] HORNG R H, WUU D S, LIEN Y C, et al. Low-resistance and high-transparency Ni/indium tin oxide ohmic contacts to p-type GaN[J]. Appl Phys Lett, 2001, 79 (18) : 2925-2927.
- [7] YOO M C, LEE J W, MYOUNG J M, et al. Low resistance ohmic contact on p-type GaN grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy [A]. Mater Res Soc Symp Proc[C]. San Francisco, CA, USA, 1996, 131-136.
- [8] CAO X A, PEARTON S J, REN F, et al. Thermal stability of W and WSi_x contacts on p-GaN[J]. Appl Phys Lett, 1998, 73 (7) : 942-944.
- [9] KIM D W, BAE J C, KIM W J. The improvement of electrical properties of Pd-based contact to p-GaN by surface treatment[J]. J Electron Mater, 2001; 30 (3): 183-187.
- [10] JANG J S, PARK S J, SEONG T Y, et al. Low resistance and thermally stable Pt/Ru Ohmic contacts to p-type GaN[J]. Physica Status Solidi (A) Applied Research, 2000, 180 (1) : 103-107.
- [11] ANDREAS W, STEFAN B, GEORG B, et al. Low resistance non-transparent ohmic Pt-contacts on p-GaN [A]. Mater Res Soc Symp Proc[C]. Boston, MA, USA, 2002, 837-842.
- [12] BERMUDEZ V M, JUNG T M, DOVERSPIKE K, et al. Growth and properties of Al and AlN films on GaN (0001)-(1×1)[J]. J Appl Phys, 1996, 79 (1) : 110-119.
- [13] GUO J D, FENG M S, GUO R J, et al. Study of Schottky barriers on n-type GaN grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition[J]. Appl Phys Lett, 1995, 67 (18) : 2657-2659.
- [14] MORI T, KOZAWA T, OHWAKI T, et al. Schottky barriers and contact resistances on p-type GaN[J]. Appl Phys Lett, 1996, 69 (23) : 3537-3539.
- [15] ISHIKAWA H, KOBAYASHI S, KOIDE K, et al. Effects of surface treatments and metal work functions on

(下转第33页)

制造能力，这样强化了产业分工和专业化发展趋势，也给我们这些封装行业提供了很多的机遇。我认为，从各方面看，我们的前景是很广阔的。

采访嘉宾：

石明达 南通富士通微电子股份有限公司董事长、总经理。1968年毕业于南京大学半导体专业。中共江苏省党代会代表，江苏省九届、十届人大代表；中国半导体行业协会常务理事、封装分会副理事长、江苏省半导体行业协会副理事长；国家“863”计划集成电路项目专家，教授级高工，享受国务院特殊津贴。

在半导体行业执着耕耘三十余载，业内人士对其评价是：思路清晰，办事干练，踏实诚信，能坚持科技兴业，敢于大胆开拓。通过多年的经营，使南通富士通成为国内最优秀的集成电路封装测试企业，并跻身于世界IC产业链。基于其对半导体产业发展的卓越贡献，被推选为“2003年中国半导体企业领军人物”。多年来，还被评为“‘九五’国家重点科技攻关先进个人”、“江苏省优秀企业家”、“江苏省劳动模范”，并两度获得“南通市科技兴市功臣”称号。

附：

南通富士通微电子股份有限公司

南通富士通微电子股份有限公司是由南通华达微电子有限公司和富

士通(中国)有限公司等共同投资兴办的，中方控股的中外合资股份制企业，注册资本14585万元人民币，是目前中国国内规模最大、技术水平最高、产品品种最多，专业提供从芯片测试到封装，到成品测试一条龙服务的骨干企业。

作为国内主要的IC封测分包商，该公司拥有MCM、MCP、BCC、MEMS等高端IC封装技术，每年自主开发上百种测试软件，应用于汽车电子、电脑周边、射频器件、快闪存贮器等多类IC测试，并具备数字电视音视频处理器（数模混合信号）、CONTROLLER、MCUEEPROM等高端IC测试能力。该公司掌握的高密度IC封装技术、MCM多芯片封装技术以及镀钎、纯锡、锡铋等无铅化电镀技术等代表着国内封装技术的领先水平。该公司已承担并完成了10多项国家级、省级技术改造、科技攻关项目。

公司奉行“顾客满意第一”的方针，在国内同行业率先通过了ISO9001、QS9000及ISO14001三项体系认证，客户遍及中国国内及美国、欧洲、日本等10多个国家和地区，其中包括多家国际著名半导体公司。

公司成立六年多来，综合经济效益始终保持年均50%以上的增长速度，是日本富士通公司在中国投资经营最好的企业。公司享有“国家火炬计划重点高新技术企业”、“中华人民共和国保税工厂”、“全国外商投资双优企业”、“江苏省优秀企业”、“江苏省环境友好企业”、“南通市明星企业”等称号。

公司目标是“中国第一、世界一流”。随着崇川工厂建设步伐的不断加快，到今年年底，该公司将形成年产封装30亿块，年测试15亿块集成电路的生产规模，成为国内规模最大的IC封测基地之一。

(上接第18页)

- electrical properties at p-GaN/metal interfaces[J]. J Appl Phys, 1997, 81 (3): 1315-1322.
- [16] SUZUKI M, KAWAKAMI T, ARAI T, et al. Low-resistance Ta/Ti ohmic contacts for p-type GaN[J]. Appl Phys Lett, 1999, 74 (2): 275-277.
- [17] LIN Y C, CHANG S J, SU Y K, et al. InGaN/GaN light emitting diodes with Ni/Au, Ni/ITO and ITO p-type contacts[J]. Solid-State Electron, 2003, 47 (5): 849-853.
- [18] WENZEL R, FISCHER G G, RAINER S F. Ohmic contacts on p-GaN (Part II): Impact of semiconductor fabrication and surface treatment[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2001, 4 (4): 367-371.
- [19] CAO X A, PEARTON S J, DANG G, et al. Effects of interfacial oxides on Schottky barrier contacts to n- and p-type GaN[J]. Appl Phys Lett, 1999, 75 (26): 4130-4132.
- [20] KIM J K, JANG H W, JEON C, et al. Reduction of ohmic contact resistivity on p-type GaN [J]. Current Applied Physics, 2001, 1 (4-5): 385-388.
- [21] LEE J L, KIM J K, LEE J W, et al. Effect of surface treatment by KOH solution on ohmic contact formation of p-type GaN[J]. Solid-State Electron, 1999, 43 (2): 435-438.
- [22] MISTELE D, FEDLER F, KLAUSING H. Investigation of Ni/Au-contacts on p-GaN annealed in different atmospheres[J]. J Crystal Growth, 2001, 230 (3-4): 564-568.
- [23] WENZEL R, FISCHER G G, RAINER S F. Ohmic contacts on p-GaN (Part I): investigation of different contact metals and their thermal treatment[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2001, 4 (4): 357-365.
- [24] SANDS T, MARSHALL E D, WANG L C. Solid-phase regrowth of compound semiconductors by reaction-driven decomposition of intermediate phase[J]. J Mater Res, 1988, 4 (4): 914-921.
- [25] KUMAKURA K, MAKIMOTO T, KOBAYASHI N. Low-resistance nonalloyed ohmic contact to p-type GaN using strained InGa contact layer[J]. Appl Phys Lett, 2001, 79 (16): 2588-2590.

(收稿日期：20030930)

作者简介：

潘群峰(1980-),男,福建惠安人,硕士生,研究方向为GaN基光电子器件工艺;

刘宝林(1963-),男,江西人,教授,1984年获中山大学物理系学士学位,1987年获电子部十三所硕士学位,1993年获吉林大学电子工程系博士学位,1993年到厦门大学物理系工作,1999年10月~2001年9月到日本千叶大学VBL实验室作访问学者,主要从事MOCVD光纤通信及宽禁带材料生长和光电器件的研究。