

文章编号:1001-5078(2007)12-1283-04

退火对高 Al 组分 AlGaIn P-I-N 二极管光电性能的影响

赵鸿燕, 司俊杰, 鲁正雄, 成彩晶, 丁嘉欣, 张亮, 陈慧娟
(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要:研究了不同条件下的退火对高 Al 组分 AlGaIn P-I-N 二极管性能的影响。研究结果表明,合适的退火条件既能使 AlGaIn 与电极之间形成良好的欧姆接触,同时又能显著降低 AlGaIn P-I-N 二极管的反向漏电流,反偏压 5V 时,暗电流密度由 $2.0 \times 10^{-1} \text{ A/cm}^2$ 降为 $5.7 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$,串阻由 $18.01 \text{ k}\Omega$ 减小到 $1.071 \text{ k}\Omega$,从而优化了 AlGaIn P-I-N 二极管的 I - V 特性。分析认为这与退火改善接触电极特性,同时消除器件制备工艺中引入的损伤、降低缺陷态密度有关。

关键词:AlGaIn P-I-N 二极管;退火;欧姆接触;工艺损伤

中图分类号:TN23 **文献标识码:**A

The Influence of Annealing Process on the Performance of AlGaIn P-I-N Photodiodes with High Al Fraction

ZHAO Hong-yan, SI Jun-jie, LU Zheng-xiong, CHENG Cai-jing,
DING Jia-xin, ZHANG Liang, CHEN Hui-juan
(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Effect of the different annealing conditions on the I - V characteristics of AlGaIn with high Al fraction P-I-N photodiodes has been investigated. The result shows, by using an optimised annealing process, not only a good ohmic contact between AlGaIn and metal electrode has been obtained, but also the reverse current of the AlGaIn P-I-N diode was reduced apparently. At -5V bias, the dark current density and series resistance of diode decreased from $2.0 \times 10^{-1} \text{ A/cm}^2$ to $5.7 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ and from $18.01 \text{ k}\Omega$ to $1.071 \text{ k}\Omega$ individually. I - V characteristic of AlGaIn P-I-N device shows improved. It is believed the improvement relates with optimizing of contact properties, elimination of damage induced by device technics and reduction of defect density during annealing process.

Key words: AlGaIn P-I-N photodiodes; annealing; ohmic contact; damage

1 引言

AlGaIn 材料随着 Al 组分的调整可以制备工作在 200 ~ 365nm 波段 (Al 组分越高波段越短) 的紫外探测器,它们在航空航天、环境监测、军事和公共安全报警等领域有广泛的应用前景,特别是在 250 ~ 280nm 的太阳盲紫外波段,因此需要制备高 Al 组分 (>40%) 的 AlGaIn 紫外探测器。为了获得高速响应的光电探测器,常采用 P-I-N 结构^[1]。即在 PN 结中间夹一层具有一定厚度的、本征的、高阻率的 I 层,大部分入射光都在此层吸收,AlGaIn P-I-N 结构

的探测器截止波长取决于 I 层 AlGaIn 的禁带宽度。为了与 Si 读出电路相连,形成大面阵用于成像,AlGaIn P-I-N 器件经常设计为背照射^[1]。但是 AlGaIn 材料尤其是高 Al 组分 AlGaIn 材料,外延层和衬底间因存在晶格失配和热失配,导致出现裂纹,外延层位错密度大, N 型、P 型掺杂困难,以及 P 型欧姆接触难做^[2],器件制备工艺引入缺陷^[3]等问题,使得

作者简介:赵鸿燕(1973 -),女,中国空空导弹研究院工程师,研究方向为半导体光电探测器。E-mail:zhgd01@tom.com
收稿日期:2007-06-19;**修订日期:**2007-06-25

高 Al 组分 AlGaIn P-I-N 器件性能下降,这些问题目前还没有得到很好的解决。

许多研究表明,高 Al 组分 AlGaIn P-I-N 器件性能受到材料质量、器件结构、器件工艺等因素影响。有人对高 Al 含量 AlGaIn 多层外延材料的应变与位错密度研究表明,在高 Al 含量 AlGaIn 材料中应变的缓和是通过大量形成位错而实现的,因此 Al 含量的增加会导致材料内部位错密度的急剧增加^[4]。而 P-I-N 结构中各层的厚度设计、P-I-N 结深、N 型、P 型掺杂都是影响器件性能的重要因素^[1]。有研究表明,在相同工艺条件下,位错密度高的 GaN 材料制备的 P-N 结二极管漏电流大,主要由与位错相关的缺陷能级所致;几乎无位错的 GaN 材料制备的 P-N 结二极管漏电流,主要由带隙间的深缺陷能级所致(从不同温度下的 $I-V$ 曲线显示,在低偏压下电流对温度有强的依赖性,这证实了从一种深缺陷能级到导带的热电子发射机制占主导)^[5]。还有人通过高 Al 组分 AlGaIn 的 ICP 干法刻蚀前后材料方块电阻的增加分析认为干法刻蚀引入了深能级,这些深能级不仅会使材料方块电阻增加,还会增强载流子的复合,使 P-I-N 结的反向漏电流增大,降低器件性能^[6]。有研究证实,一定条件下的退火可以消除干法刻蚀引入的损伤^[3]。而且,适当的退火有利于降低 AlGaIn P-I-N 二极管的欧姆接触电阻率和提高接触可靠性^[2],从而提高器件性能。

本文通过对不同退火条件下高 Al 组分 AlGaIn P-I-N 二极管光电性能的分析来研究退火对高 Al 组分 AlGaIn P-I-N 二极管性能的影响。

2 实验

实验所用的 AlGaIn 材料由北京大学和厦门大学共同提供,样品是背照射式的结构,采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)的方法生长,三甲基镓、三甲基铝、氨气分别是镓、铝、氮的生长源,衬底为 2" (0001) 方向的蓝宝石 ($\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$)。为减小外延层和衬底间的晶格失配,在生长 P-I-N 结构 AlGaIn 外延材料前,先在蓝宝石衬底上生长 320nm 左右的 AlN 缓冲层,然后通过调节生长条件和掺杂浓度,在缓冲层上依次生长 P-I-N 结构外延材料的 N 层、I 层和 P 层,最上面有一层 P 型 GaN,样品厚度分别为 0.3 μm , 0.2 μm , 0.05 μm , 0.2 μm , N 层 Al 组分为 0.5, I 层和 P 层均为 0.4。器件结构如图 1 所示。

器件制备过程为:(1)清洗:首先用有机溶剂(丙酮、甲醇)清洗材料表面,然后用水浸泡,除去表面氧化层。(2)台面制作:以 PECVD 生长的 SiO_2

作为掩膜,用标准光刻工艺在外延片上形成图形,然后通过 ICP 干法刻蚀来获得 AlGaIn P-I-N 器件台面。ICP 刻蚀机为德国 SENTECH 公司生产的 SI 500E 型刻蚀机,实验中以 Cl_2 、Ar 气为刻蚀气体。(3)钝化:采用日本日电公司生产的 PED-301 型 PECVD 生长 SiO_2 膜来进行表面钝化,实验中以 SiH_4 、 N_2O 为反应气体。(4)电极制备:通过 DENTON VACUUM 公司生产的 DISCOVERY 550 型溅射台制备金属-半导体欧姆接触电极,N 型电极 Ti/Al/Ti/Pt, P 型电极 Pt。电极图形采用剥离的方法来形成。(5)退火:先制备 N 型电极,对 N 型电极先退火。然后制备 P 型电极,对 P 型电极退火。

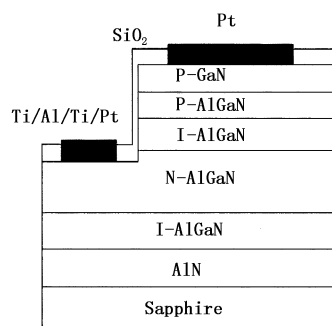


图1 AlGaIn P-I-N 器件结构

对单独的 N 型欧姆接触电极和 P 型欧姆接触电极分别在常温下测试退火前后 $I-V$ 特性,计算不同退火条件下的接触电阻率。对不同退火条件下的器件在常温下进行 $I-V$ 特性测试,并计算器件的串阻。所用测试设备由 Suss 半导体 DC 和 CV 测试分析探针台及 KEITHLEY 4200 半导体特性分析仪和 LCR 表 Agilent 4284A 组成。

3 器件性能与分析

接触性能分析:对实验中用的 AlGaIn 材料通过 ICP 干法刻蚀出 N 型层,溅射 N 型欧姆接触电极 Ti/Al/Ti/Pt, 分别在未退火以及 430 $^{\circ}\text{C}$, 540 $^{\circ}\text{C}$, 630 $^{\circ}\text{C}$, 730 $^{\circ}\text{C}$, 820 $^{\circ}\text{C}$, 910 $^{\circ}\text{C}$ 退火后,常温下测 $I-V$ 特性,如图 2 所示。结果显示:630 $^{\circ}\text{C}$ 退火形成的电极与 N 型衬底的欧姆特性最好。这与一些报道中 Ti/Al/Ni/Au 与 N 型 GaN 在 900 $^{\circ}\text{C}$ 退火形成最低接触电阻的情况^[8] 不太相同。可能因为 630 $^{\circ}\text{C}$ 氮气下退火使 Al 扩散进 Ti 形成合金,由于其功函数低,与 N 型 AlGaIn 形成了低电阻接触,在其上, Ti, Pt 形成的化合物阻止了接触层的氧化。

在 P 型 GaN 上溅射欧姆接触电极 Pt,形成同心圆图形,分别在 540 $^{\circ}\text{C}$, 630 $^{\circ}\text{C}$, 730 $^{\circ}\text{C}$, 820 $^{\circ}\text{C}$ 下退火,通过同心圆模型计算欧姆接触电阻率 $\rho_c = \frac{(WR_c)^2}{R_s}$,

其中, WR_c 为 Pt/P-GaN 接触电阻, W 为两个金属环之间的平均宽度; R_s 为 P-GaN 材料体电阻, 欧姆接触电阻率随退火温度的变化曲线如图 3 所示。结果显示: P 型欧姆接触电阻率在 630℃ 下退火时最低, 这时欧姆接触特性最好。

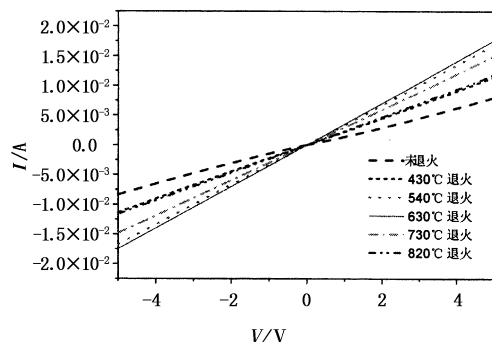


图 2 不同退火条件下的 N 型电极间 I - V 曲线

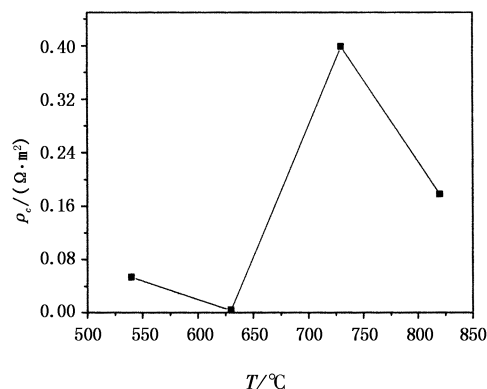


图 3 P 型欧姆接触电阻率随退火温度的变化曲线

不同退火条件下的 AlGaIn P-I-N 器件 I - V 曲线如图 4 所示。根据 I - V 曲线可以计算出器件的串阻

$$R_s, R_s = \frac{\partial V}{\partial I} \times I = \frac{nkT}{q} + R_s \times I^{[7]}.$$

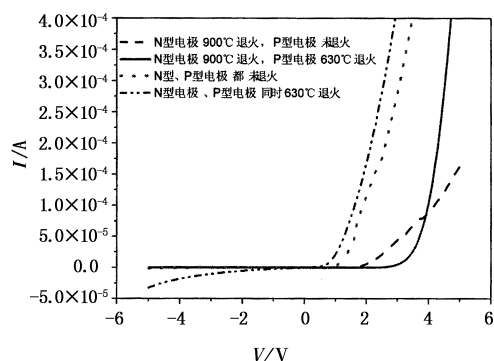


图 4 不同退火条件下的 AlGaIn P-I-N 器件 I - V 曲线

(1) 在 N 型电极、P 型电极都不退火时, 反偏压 5V 时暗电流密度为 $8.1 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$, 串阻 $R_s = 1793 \Omega$ 。

(2) 在 N 型电极 900℃ 氮气下退火, P 型电极不退火时, 反偏压 5V 时暗电流密度为 $8.1 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$,

串阻 $R_s = 18010 \Omega$ 。

(3) 在 N 型电极、P 型电极同时 630℃ 氮气下退火时, 反偏压 5V 时暗电流密度为 $2.0 \times 10^{-1} \text{ A/cm}^2$, 串阻 $R_s = 1172 \Omega$ 。

(4) 在 N 型电极 900℃ 氮气下退火, P 型电极 630℃ 氮气下退火时, 反偏压 5V 时暗电流密度为 $5.7 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, 串阻 $R_s = 1071 \Omega$ 。

通过比较, 可以发现在条件(4)下器件的 I - V 特性更好。说明此退火条件较为合适, 它有效减小了反向漏电流, 实现了良好的欧姆接触, 提高了器件性能。

由图 2、图 3 可知, 所采用的 N 型电极、P 型电极在氮气下 630℃ 退火都可以得到好的欧姆接触特性。但是由图 4 可知, N 型电极、P 型电极同时 630℃ 氮气下退火时器件 I - V 特性并不是最好的, 而 N 型电极 900℃ 氮气下退火, P 型电极 630℃ 氮气下退火时器件 I - V 特性最好。究其原因, 首先从图 2 可知, 在 900℃ 条件下 Ti/Al/Ti/Pt 与 N 型 AlGaIn 也可以形成较低的接触电阻, 同时 900℃ 的退火, 有可能消除了 ICP 干法刻蚀在 N 型 AlGaIn 上引入的损伤, 降低了缺陷态密度。有研究表明, 氮气下超过 600℃ 的退火可以消除 ICP 在 N 型 GaN 上引入的损伤, 减小反向漏电流, 从而优化该二极管的 I - V 特性^[3]。所以, N 型电极 900℃ 氮气下退火, P 型电极 630℃ 氮气下退火既形成了 N 型、P 型电极良好的欧姆接触特性, 又消除了 ICP 干法刻蚀可能在 N 型 AlGaIn 上引入的损伤, 降低了缺陷态密度, 最终优化了器件的 I - V 特性。

可以认为, 对于高 Al 组分 AlGaIn P-I-N 二极管, 通过退火过程以下方面得到了改善: ①高 Al 含量 AlGaIn 外延材料中层与层界面处的大量位错, 导致的相关缺陷能级; ②器件制备工艺中引入的深缺陷能级; ③需要采取适当的工艺措施来减少工艺损伤; ④欧姆接触电极的制作和退火条件需要最终优化。这些改善优化了二极管的 I - V 特性。下一步的工作, 将进行 ICP 刻蚀 AlGaIn 引入的深缺陷能级及通过退火对刻蚀损伤消除的研究。

4 结 论

本实验通过对不同退火条件下高 Al 组分 AlGaIn P-I-N 二极管光电性能以及 AlGaIn 与电极之间欧姆接触特性的分析, 研究了退火对高 Al 组分 AlGaIn P-I-N 二极管性能的影响。实验表明, 合适的退火条件既能使 AlGaIn 与电极之间形成良好的欧姆接触, 同时又能消除器件制备工艺中引入的损伤,

降低缺陷态密度,从而优化器件的 I - V 特性。实验中,反偏压 5V 时,AlGaIn P-I-N 二极管暗电流密度由 $2.0 \times 10^{-1} \text{ A/cm}^2$ 降为 $5.7 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$,串阻由 $18.010 \text{ k}\Omega$ 减小到 $1.071 \text{ k}\Omega$ 。

参考文献:

- [1] 张春福,郝跃,周小伟,等. AlGaIn PIN 紫外探测器的结构及性能分析[J]. 电子器件,2005,28(2):421-427.
- [2] 胡正飞,沈晓明,周盛容,等. AlGaIn 材料金属接触的性能和界面结构研究[J]. 激光与红外,2005,35(11):867-872.
- [3] Kuo-Chin Huang, Wen-How Lan, Kai Feng Huang. Inductively coupled plasma reactive ion etching-induced GaIn defect studied by Schottky current transports analysis[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(1):

82-85.

- [4] 游达,王庆学,汤英文,等. 高 Al 含量 AlGaIn 多层外延材料的应变与位错密度研究[J]. 激光与红外,2005,35(11):880-882.
- [5] P Kozodoy, J P Ibbetson, H Marchand, et al. Electrical characterization of GaIn p-n junctions with and without threading dislocations[J]. Applied physics letters, 1998, 73(7):975-977.
- [6] 亢勇,李雪,何政,等. 高 Al 组分 AlGaIn 的 ICP 干法刻蚀[J]. 激光与红外,2005,35(11):885-887.
- [7] 周劲,郝一龙,武国英. AlGaIn PIN 结构紫外探测器研制和建模分析[J]. 微纳电子技术,2003,7/8:422-425.
- [8] 陈志忠,秦志新,胡晓东,等. Ti/Al/Ni/Au 与 N 型 GaIn 的欧姆接触研究[J]. 高技术通讯,2004,2:36-39.

(上接第 1282 页)

片工艺的工作效率提高了 32.8%。对于 12 支来说提高 36.4%,而对于 15 支来说提高 37.6%。单从工艺时间的损耗来看,共片工艺中整合的读出电路个数越多,生产效率越高。

但增大电路尺寸的同时也意味着与互连工艺相关的、加热制具、清洗所用容器、划片机、倒装互连设备等都要进行相应的工艺调整,随着电路的尺寸进一步加大就需要购置适应该尺寸的更大型化的工艺设备,这需要充足的资金和时间来实现。对于线列 TDI LWIR 来说,由于外形尺寸较小,这就意味着即使是 2in(1in=2.54cm)硅片也能够整合几十个读出电路。

从对小规模共片工艺研究的一段时间来看,各个工艺步骤的改良都可以比较顺利地完,且难度不大,可以很快地从实验阶段过渡到正式生产阶段。现阶段的研究方向是充分挖掘现有工艺设备的生产能力,找到一个最合理的共片电路数量,在保证质量的同时最大程度地提高生产效率。

2.4 未来发展

基于未来更大规模量产化的考虑,仅从倒装互连及其相关工艺来看,我们需要更具集成化的共片工艺来完成目标产量。而小规模量产化的成功经验也为长远的目标打下了良好的基础。现使用的新型倒装互连设备最大可承载 8in 的硅片(如图 6 所示),该硅片可整合 300 多个线列 TDI 读出电路。同时该设备还兼具回流功能,从而进一步的提高了生产效率。

当然也正如前面所提到,随着电路尺寸的加大,

势必会有诸多的工艺改进以及各种方面的难题需要克服,这需要在今后进行更大尺寸共片工艺的实验中继续总结,逐步完善。

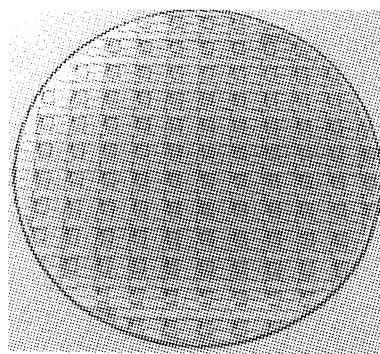


图6 直径为 8in 的读出电路芯片

3 结 语

本文详细地论述了长波线列 TDI 红外探测器倒装互连工艺的技术改进及量产化进展,指出了今后一段时间对于长波线列 TDI 红外探测器在互连方面的发展趋势。现已实现并完善了对于小规模量产化各个方面的工艺改革,并为此后更大规模的量产化提出了比较现实的构想。

参考文献:

- [1] Flachsbarth B. Precision self-alignment techniques for optoelectronic integration[D]. Ph D dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, 1999.
- [2] 关荣峰,赵军良. 倒装芯片互连技术在光电子器件封装中的应用[J]. 河南理工大学学报,2005,24(1):50-53.
- [3] 孙娟,李建林. 混成焦平面器件倒装互连设备对准精度分析[J]. 红外技术,1997,19(5):30-32.