

文章编号: 1672-8785(2020)05-13-06

GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的 低电阻欧姆接触工艺研究

谭 振 李春领 孙海燕 张 敏 王成刚

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 介绍了 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器(Quantum Well Infrared Photo-detector, QWIP)的低电阻欧姆接触研究情况。结合热处理工艺, 通过测试 I-V 特性对 Ni/AuGe/Au 金属体系的不同搭配进行了实验, 确定了适合 n^+ GaAs/AlGaAs 的电极体系, 并对沉积金属后的热处理条件进行了初步研究。在 400 °C、氮气氛围、60 s 的条件下, 采用传输线模型计算后, 在 n^+ GaAs ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 上取得了比接触电阻为 $3.07 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的实验结果。

关键词: GaAs/AlGaAs; 量子阱红外探测器; 热处理; 欧姆接触

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.05.002

Study on Low Resistance Ohmic Contact Technology of GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared Detectors

TAN Zhen, LI Chun-ling, SUN Hai-yan, ZHANG Min, WANG Cheng-gang

(North China Research Institute of Optical Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The investigation of low resistance ohmic contact on GaAs/AlGaAs quantum well infrared detector is introduced. Combined with the heat treatment process, through testing the I-V characteristics, experiments are conducted on different combinations of Ni/AuGe/Au metal systems to determine the electrode system suitable for n^+ GaAs/AlGaAs. The heat treatment conditions after metal deposition are preliminary studied. Under the annealing conditions of 400 °C, nitrogen atmosphere and 60 s, the transmission line model is used to obtain the specific ohmic contact resistance of $3.07 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ on n^+ GaAs ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Key words: GaAs/AlGaAs; QWIP; thermal treatment; ohmic contact

0 引言

QWIP 基于成熟的 GaAs/AlGaAs 材料体系制备, 具有材料生长与制备工艺成熟、易于大面阵集成、稳定性好、器件均匀性高, 可操

作像元数多、产量高、成本低等显著优点。同时, QWIP 属于多数载流子器件, 无需像少数载流子器件一样进行严苛的表面钝化以降低暗电流水平; 没有低频噪声, 输出图像非常稳

收稿日期: 2020-03-10

作者简介: 谭振(1984-), 男, 山东蒙阴人, 高级工程师, 主要从事窄禁带红外探测器的设计与制备研究。E-mail: tanzhen8402@126.com

定,从而简化了系统设计;基于能带工程设计,能够实现窄带和宽带响应,且光谱范围可达到 $4\sim 20\ \mu\text{m}$;由于 III-V 族化合物结构稳定,器件的热稳定性高;GaAs 材料的禁带宽度大,器件的抗辐射能力强。基于以上这些优点,QWIP 得到了广泛的研究,并取得了丰硕的成果。

接触电极制备是 QWIP 制备过程中的重要工艺之一。根据莫特-肖特基理论,为了在 n 型半导体材料上获得欧姆接触,金属的功函数要小于半导体的功函数。但经研究发现,金半接触时形成势垒的高度与选择何种金属无关。这种现象是由金半接触后的表面态引起的。

n 型 GaAs 具有受主表面态。在此种情况下,若要获得欧姆接触,GaAs 表面态应该都被填满或耗尽。通常有两种方法来实现这种表面态的改变,即半导体重掺杂或者向半导体层进行金属扩散。由于掺杂浓度在材料生长过程中受到限制,金属的选择以及影响扩散的热处理工艺在欧姆接触形成过程中起到重要作用。本文通过调节不同的金属层厚度和退火条件,对金属与半导体接触形成重掺杂的方法进行了研究。

1 实验

使用的电极制备设备为离子束溅射沉积 (Ion Beam Deposition, IBD) 系统。IBD 是金属电极的常用制备方法。在高真空环境中,被聚焦的离子束入射到金属靶材上,使金属原子或原子团溅射出来并沉积到衬底上,从而形成金属膜层。利用这种沉积方式可以较容易地实现高纯度金属电极制备。通过调节溅射工艺参数,可获得高致密度、高粘附力的金属电极。通过在同一溅射设备腔室内配置不同的靶材,还可实现多种不同金属电极的沉积。图 1 为 IBD 工艺的示意图。

使用的样品是 n 型掺杂 GaAs 材料,其掺杂浓度约为 $1\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$,与量子阱材料中重掺杂 n^+ 接触层的掺杂浓度相当。采用的电极金属体系为 Ni/AuGe/Ni/Au。固定 AuGe 和 Au

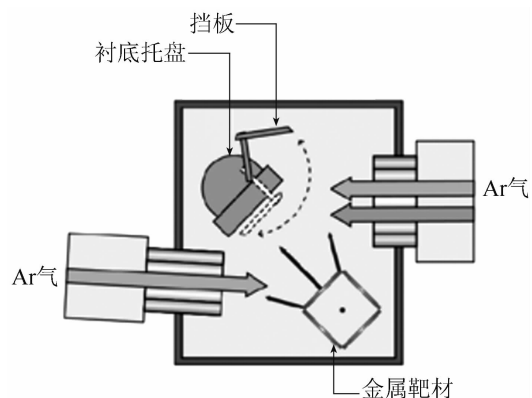


图 1 IBD 工艺的示意图

金属层的厚度,改变 Ni 层的厚度以及退火条件,然后通过 I-V 测试和显微镜观察等手段对实验结果进行分析。

2 结果与讨论

2.1 热处理工艺对接触电极的性能影响

图 2 为采用 Ni/AuGe/Ni/Au ($100\ \text{\AA}/1000\ \text{\AA}/300\ \text{\AA}/3000\ \text{\AA}$) 电极体系的样品在 $360\ ^\circ\text{C}$ 退火前后的 I-V 曲线图。

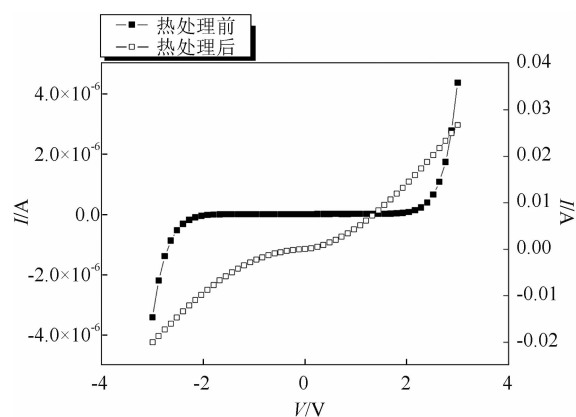


图 2 热处理对样品 I-V 性能的影响

通过对比热处理前后的 I-V 特性可以直观地发现,热处理前样品的 I-V 曲线表现出明显的 pn 结特性,热处理后 I-V 曲线呈现出一定的线性。在偏置电压范围内,电流显著增大,说明接触电阻明显减小。这对于欧姆接触性能有极大的提升。理论及实验研究认为,AuGe 熔化时,Ge 向 GaAs 扩散,形成了重掺杂层,减小了接触电阻。在此过程中,Ni 起催化作用,加快 Ge 向 GaAs 扩散^[1];但是 Ni 层的厚度需通过实验确定最优值。

2.2 不同 Ni 层厚度对 I-V 特性的影响

首先设计了第一层金属 Ni 的厚度对欧姆接触的影响实验(电极体系见表 1)。

表 1 第一层 Ni 金属的厚度(单位: Å)

Ni	AuGe	Ni	Au
50			
200	1000	350	3000
500			
0			

电极生长完成后, 对 I-V 特性进行了测试(结果见图 3)。各种 Ni 层厚度的电极均表现出了 I-V 线性度差的情况, 而且在较大的偏置电压范围内, 接触电阻非常高。这可能是由于金属 Ni 与半导体 GaAs 接触后, 形成了肖特基结。这种结具有类似 pn 结的特性, 不利于电极接触, 因此需通过退火热处理改善其特性。

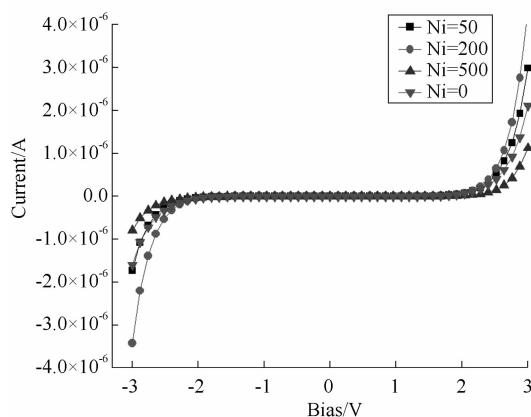


图 3 第一层 Ni 金属厚度对 I-V 的影响

为了进一步验证不同 Ni 层厚度的金属电极在退火后的 I-V 特性, 在氮气氛围下对各实验片进行退火处理(360 °C、60 s)。退火后的 I-V 测试结果如图 4 所示。

由图 4 可见, Ni 层越厚, I-V 特性越差。这是由于过厚的 Ni 层起到了阻挡作用, 导致退火过程中 AuGe 不易向 GaAs 扩散, 无法形成重掺杂层。

当 Ni 层较薄时, 不仅不会阻挡 AuGe 穿过, 而且还能催化 AuGe 与 GaAs 反应, 形成重掺杂, 使 I-V 曲线更容易达到线性。经实验发现, 当 Ni 层的厚度小于 50 Å 时, 对 I-V 曲

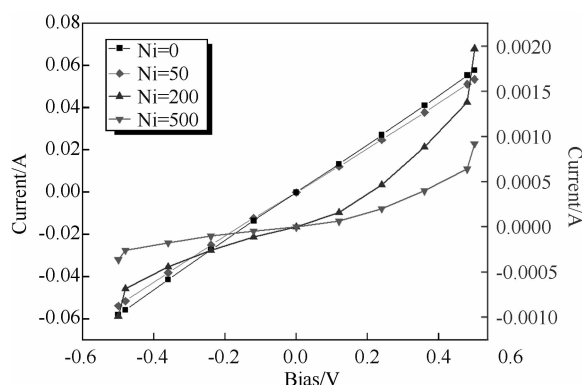


图 4 第一层 Ni 金属体系经热处理后的 I-V 特性线的改善效果已经不明显。因此, Ni 层的初始厚度选为 50 Å 时有利于减小接触电阻。

固定第一层 Ni 层的厚度为 50 Å, 改变第二层 Ni 层的厚度, 然后对比其对接触电极的影响(实验条件见表 2)。

表 2 第二层 Ni 金属的厚度(单位: Å)

Ni	AuGe	Ni	Au
		150	
最佳条件	1000	250	3000
		350	

所有实验片均在氮气氛围下进行退火处理(360 °C、60 s)。退火前后的 I-V 曲线如图 5 和图 6 所示。

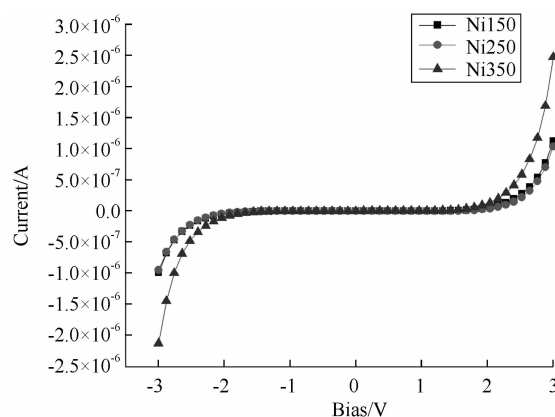


图 5 第二层 Ni 金属厚度对 I-V 曲线的影响

从图 5 中可以看出, I-V 曲线依然呈现出 pn 结特性, 再次验证了图 2 中的实验结果。这与电极未进行退火直接相关。

由图 6 可知, 随着 Ni 层的厚度由 150 Å 增加到 250 Å, 最后增加到 350 Å, I-V 曲线

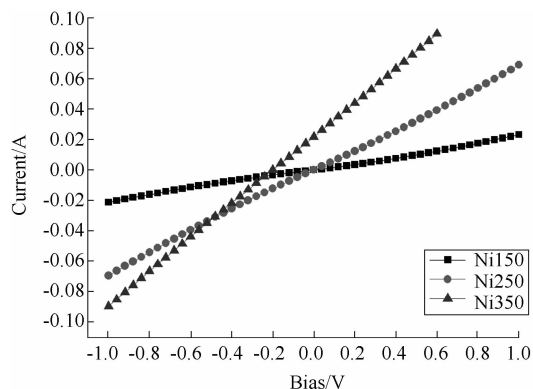


图6 第二层 Ni 金属体系经热处理后的 I-V 曲线对比

的线性度逐渐趋好。实验分析认为,第二层 Ni 层主要起到了催化 AuGe 反应的作用。Ni 层越厚,对 AuGe 的催化效果越好,最终对 GaAs 的掺杂效果就越好。因此当接触电阻较小、Ni 层厚度达到 350 Å 时, I-V 曲线的线性度最好,达到了良好的电极接触效果。所以将第二层 Ni 层的厚度设计为 350 Å。

2.3 不同退火条件对 I-V 特性的影响

在上述热处理过程中发现,从电极表面状态观察时,第二层 Ni 层厚度为 350 Å 的实验片的电极表面上开始出现细微爆点。为了进一步研究退火工艺对电极表面状态的影响,采用 Ni/AuGe/Ni/Au (50 Å/1000 Å/350 Å/3000 Å) 电极体系开展了不同条件下的退火工艺实验。根据文献报道^[2,4], GaAs 材料上的接触电极的退火温度一般为 360 °C 和 420 °C 左右。本文对这两种退火温度下的升温 and 降温过程进行了实验。根据退火炉的性能,将升温设为两档,分别为 5 °C/s 和 1 °C/s; 将降温也设为两档,分别为 0.5 °C/s 和 Max cool (通气阀门全开的降温模式)。实验条件见表 3。

实验中固定氮气热处理氛围。热处理时,将保温过程设为 60 s,着重从升降温过程进行对比(升温 and 降温过程见表 3)。

图 7 和图 8 所示分别为 5 个实验片的 I-V 曲线及表面形貌。从图 7 中可以看出,单独比较退火温度时,所有 360 °C 退火下实验片的 I-V 特性都比 420 °C 退火下的差。这说明仅从 I-

表 3 热处理工艺参数

	升温过程	降温过程
A (热处理到 420 °C)	5 °C/s	Max cool
B (热处理到 360 °C)	1 °C/s	Max cool
C (热处理到 360 °C)	5 °C/s	Max cool
D (热处理到 360 °C)	5 °C/s	0.5 °C/s
E (热处理到 360 °C)	1 °C/s	0.5 °C/s

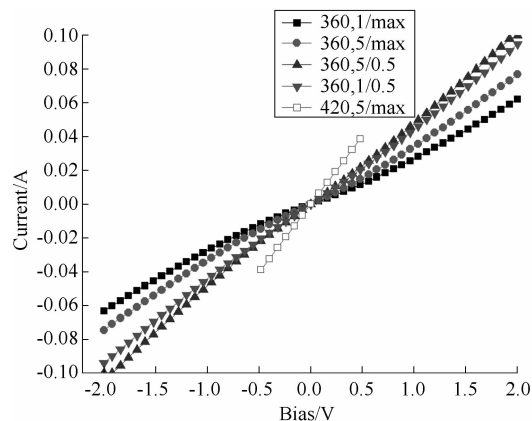


图7 采用不同热处理工艺参数的实验片的 I-V 曲线对比

V 特性上讲,提高退火温度是有利的。通过对比所有 360 °C 退火下的实验片可以发现,升温越快,降温越慢,此时越有利于减小接触电阻,即热处理周期(包括升降温过程)越长,电极的退火效果越好。

从实际工艺上考虑,电极的表面状态也是个除接触电阻之外的重要参数。良好的表面状态有利于器件后续的电极互连,也有利于保证器件的可靠性。因此,对上述 5 种退火工艺处理后的电极表面进行了显微镜观察和比较(结果见图 8)。

从图 7 中可看出,不同退火条件下实验片的 I-V 特性表现如下:实验片 A 优于实验片 D 和实验片 E,实验片 B 和实验片 C 最差。从图 8 中可看出,退火条件会导致电极表面上出现爆点;实验片 B 和实验片 C 优于实验片 A 和实验片 D,实验片 E 最差。因此,综合 I-V 特性和表面形貌可知,实验片 D 的实验条件是最佳的退火条件。

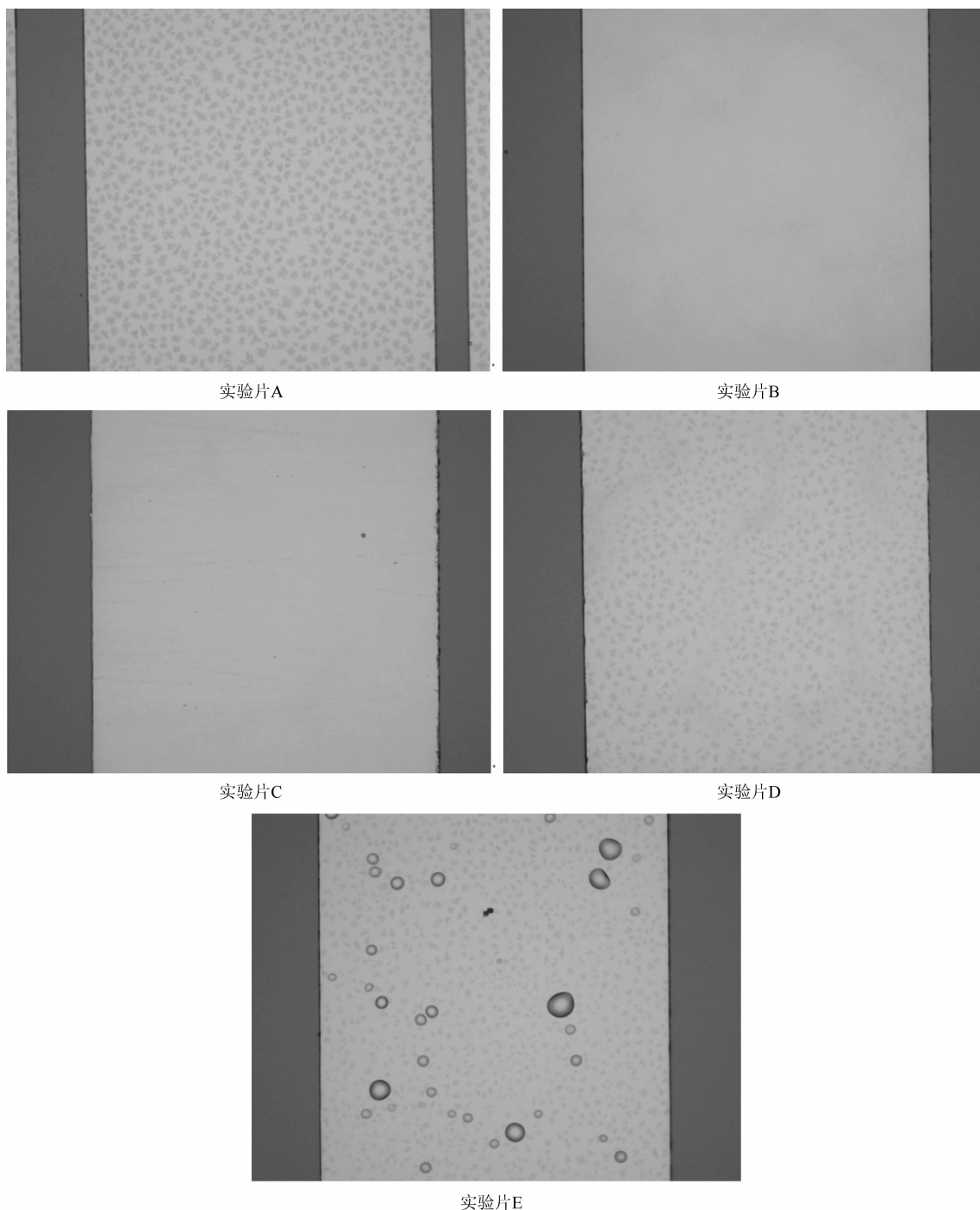


图 8 采用不同热处理工艺参数的实验片的表面形貌对比

3 结论

通过改变 Ni/AuGe/Ni/Au 体系中 Ni 层的厚度以及退火条件, 研究了两者对 n 型 GaAs 材料接触电极的影响。研究表明, 初始层与第二层 Ni 层的厚度分别为 50 \AA 和 350 \AA 、金属电极在 $360 \text{ }^\circ\text{C}$ 下退火且快速升温搭配慢速

降温时, 可获得较好的 I-V 特性, 而且电极表面形貌能够满足器件制备的需求。

基于上述条件, 采用线性传输线测试方法^[3,5], 最终在 $n^+ \text{ GaAs}$ ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 上获得的比接触电阻为 $3.07 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。实际工艺中, 影响欧姆接触的因素除 Ni 层的厚度和退

火条件之外, 还有电极体系(如 Ge/Au/Ni/Ti/Au 与 Pd/Ge/Au 体系)、制备工艺(如热蒸发沉积与溅射沉积制备工艺)以及电极制备前预处理工艺(如湿法腐蚀与干法刻蚀)的选择。此外, 热处理工艺同样存在电极制备原位退火与制备后退火等许多值得研究的工艺参数。对此, 我们将另行开展实验研究。

参考文献

- [1] Karbownik P. Low Resistance Ohmic Contact to n^+ GaAs for Application in GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers [J]. *Optica Applicata*, 2009, **39**(4): 655–661.
- [2] Abhilash T S, Kumar C R, Rajaram G. Influence of Nickel Layer Thickness on the Magnetic Properties and Contact Resistance of AuGe/Ni/Au Ohmic Contacts to GaAs/AlGaAs Heterostructures [J]. *Physics D: Applied Physics*, 2009, **42**(12): 125104.
- [3] Miah M I. Low-temperature Annealed Ohmic Contacts to Si-doped GaAs and Contact Formation Mechanisms [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, **113**(2): 967–970.
- [4] Erofeev E, Kagadei V. Formation of Ge/Cu Ohmic Contacts to n-GaAs with Atomic Hydrogen Pre-annealing Step [C]. *SPIE*, 2010, **7521**: 75210K.
- [5] 宋淑芳. 低掺杂浓度 n 型 GaAs 欧姆接触的研究 [J]. *激光与红外*, 2013, **43**(11): 1252–1255.