- 3 Cawley R, Mauldin R D. Multifractal decompositions of Moran Fractals. *Adv in Math*, 1992, 92: 196~ 236
- 4 Bandt C. Deterministic fractals and fractal measures. *Rendit Istit Mat Vniv Trieste*, 1993, 23(1): 1~ 40
- 5 Cajar H. Billingsley dimension in probability space. *Lect Notes in Math*, 1981, Vol 892

(1998-03-02 收稿, 1998-06-11 收修改稿)

Au_Pt_Ni/ p_InP 新的低欧姆接触电极

李秉臣 彭 晔 李建中

(中国科学院半导体研究所国家光电子工艺中心, 北京 100083)

摘要 用磁控溅射法淀积的非合金膜系 Au_Pt_Ni/p_InP ($1\sim 2\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$), 在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 30 s 的退火条件下, 实现了比接触电阻低达 $3\times 10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ 的欧姆接触. 对不同温度 ($300\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) 退火的 Au_Pt_Ni/p_InP 欧姆接触所做的 AES 深度剖面分析揭示了 Pt 膜层阻挡 Au 的内扩散和 InP 外扩散的作用.

关键词 磁控溅射 快速热退火 比接触电阻 AES 深度剖面分析

在 InP 化合物半导体器件制备过程中, p 型欧姆接触要比 n 型难做得多. 其原因一部分是由材料本身特性决定的, 空穴的有效质量要比电子的有效质量大得多, 势垒高度也比 n 型材料高 ($n\text{-InP}$ 的势垒高度 Φ_{bn} 为 0.4 eV, 而 $p\text{-InP}$ 的 Φ_{bp} 为 0.97 eV). 另一部分原因是制备欧姆接触工艺本身的问题. 现在比较常见的 Au_Zn, Au_Be 合金膜系^[1,3,4], Zn 不仅与 GaAs, InP 粘附性差, 而且由于 Zn 具有较高的蒸气压, 在 Au_Zn 蒸发过程中很难控制 Zn 的比例. Be 的蒸气压与 Au 差不多, 是很好的掺杂剂, 但它的缺点是具有毒性, 对人体有害. 另外 Au 是快扩散杂质, 合金退火时, Au 很容易扩散到 P-N 结内, 使结特性变坏.

Ti_Pt_Au 非合金膜系能较好地解决上述问题^[5], 但是它必须要求 p 型材料表面浓度大于 10^{19} cm^{-3} 时, 才具有低的比接触电阻 ($6\times 10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$). 这一要求, 对 $p\text{-InP}$ 来说, 掺杂后的表面浓度很难达到 10^{19} cm^{-3} . 因此, 在一般情况下, Au_Pt_Ti/p_InP (表面浓度为 $5\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 时) 在比接触电阻只能是 $10^{-4}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ 数量级.

本文所论述的是采用 Au_Pt_Ni/p_InP 非合金膜系. 在 $p\text{-InP}$ (掺 Zn, 掺杂浓度为 $1\sim 2\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$) 基片上, 进行了比接触电阻的试验研究, 并在实际的激光器制备中进行了 Au_Pt_Ni/p⁺InGaAsP/n_InP 的应用研究.

1 实验

实验研究所用的设备是美国 INNOTECH 公司生产的 VS_24C 多靶磁控溅射系统. Ni 靶、Au 靶的纯度为 99.999%, Pt 靶纯度为 99.99%.

首先对 $p\text{-InP}$ (掺 Zn, $1\sim 2\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$) 基片进行清洗, 然后制备 TLM 法 (传输线法) 测试图形. 接着用 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:5$ 溶液漂洗 30 s, 去除 Na^+ , K^+ 等金属离子的污染, 并用去离子水冲洗, 干 N_2 吹干.

为了做比较实验, 在镀膜前分别用两种方法去除自然氧化层, 一种方法用 Ar^+ 轰击清洗^[2]

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1998-43-20-2167>

(100 W, 30 s), 另一种方法用 $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ 干法清洗(100 W, 30 s), 然后立即放入真空室内抽真空. 使本底真空度降低到 $1.33 \sim 2.66 \times 10^{-5}$ Pa, 冲入 99.999% 高纯 Ar 气, 在工作压力为 2.66 Pa 的条件下, 分别溅射 Ni 膜(50 nm)、Pt 膜(100 nm)、Au 膜(100 nm). 取出样品并剥离出 TLM 法所需的图形. 然后用 706 厂生产的白光快速热退火设备进行快速退火试验, 其温度分别为 300, 350, 400, 450, 500 $^{\circ}\text{C}$, 退火时间为 30 s. 接着用三探针传输线法测量其比接触电阻. 找出最佳的退火条件, 最后用 AES 深度剖面分析法观察不同退火条件下, Au_Pt_Ni 各膜层组分和 In, P 组分在 p-InP 界面的分布变化.

2 结果与讨论

2.1 比接触电阻 ρ_c

对欧姆接触质量的评价, 一般用比接触电阻 ρ_c 来表征. 三探针传输线法是测量 ρ_c 的常用方法. 我们使用的是 TLM 一型全自动电阻测量仪, 其测量结果如图 1 所示.

从图 1 中, 可以看到, 在退火温度为 300 $^{\circ}\text{C}$, 时间为 30 s 时, ρ_c 为 10^{-4} 或 $3 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 但在退火温度为 400 $^{\circ}\text{C}$, 时间为 30 s 时, 比接触电阻降低到 $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 此后随着退火温度的提高, 比接触电阻反而增大, 在退火温度 450 $^{\circ}\text{C}$, 时间为 30 s 时, ρ_c 仍在 10^{-6} 数量级范围内(9×10^{-6} 或 $6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$). 但在退火温度为 500 $^{\circ}\text{C}$, 时间为 30 s 时, ρ_c 升为 $1 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 左右.

对这一实验结果, 归纳为以下 3 个值得注意的方面:

(1) 对 p-InP 表面的严格清洗, 确保 InP 表面无自然氧化层. 这可以用 AES 深度剖面分析法来检测. 采用两种方法来保证 InP 表面的清洁度.

() 用 Ar^+ 轰击(100 W, 30 s)清洗. () 用 $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ 干法清洗(100 W, 30 s). 实验结果由图 1 表明. 用 $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ 清洗, 其效果更好一些.

(2) Ni 膜不含氧是很重要的一个环节. 为了

实现 Ni 膜层内不含氧, 采用的方法是一方面把本底真空度尽量地提高, 其系统真空度降低到 $1.33 \sim 2.66 \times 10^{-5}$ Pa. 另一方面, 为使 Ar 气的纯度尽量提高, 本实验使用的是 99.999% 纯度的 Ar. 在这基础上还要进行 Ni 的予溅射. 这也可以用来提高真空室背景 Ar 的纯度, 因为溅射出来的 Ni 分子或原子团可以与真空室内的残余气体如 O_2 , H_2O 等反应形成 Ni_xO_y 淀积在挡板上. 用 Si 表面溅射淀积 Ni 来做实验, 根据 Ni/Si 界面的 AES 深度剖面分析 Ni 膜组分是否含氧来确定予溅射时间.

在予溅射功率 240 W, 时间为 30 min 时, Ni/Si 的 AES 深度剖面分析图表明在金属 Ni 层中, 仍有少量 O_2 存在. 在相同的溅射功率条件下, 把予溅射时间增加到 45 min, 所进行的 Ni/Si 的 AES 深度剖面分析表明, 在金属 Ni 层中已几乎没有 O_2 , 其结果如图 2 所示.

图 1 Au_Pt_Ni/P_InP 的比接触电阻与退火温度的关系

1——用 Ar^+ 轰击清洗(100 W, 30 s), 2——用 $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ 干法清洗(100 W, 30 s)

(3) 快速热退火. 合金退火对于形成欧姆接触来讲是相当重要的步骤, 在热退火过程中, 升温 and 降温的速度以快为好. 加热快的优点是在加热过程中, 如果温度即使是超过合金熔点, 由于来不及熔化和聚球, 也容易获得好的表面形貌, 使器件的可靠性得到了改善和提高. 快速降温比快速升温更重要. 如将合金面倒置在 Cu 热沉上快速降温, 可使欧姆接触改善 2~7 倍. 我们选择的合金退火温度为 300~500 °C 温度范围内, 每隔 50 °C 做一次试验, 退火时间为 30 s.

2.2 不同退火温度下 Au_Pt_Ni/p_InP 的 AES 深度剖面分析

退火温度为 300 °C 时间为 30 s 条件下的 AES 深度剖面分析图表明, 在 Au_Pt_Ni/p_InP 界面处, Ni 已经扩散到 InP 表面内, Pt 有效地阻挡了 Au 向 InP 的内扩散和 In 的外扩散. 与 TLM 法测量的比接触电阻相对照. 此时的 ρ_c 为 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 数量级.

从温度为 350 °C 时间为 30 s 的退火条件下的 AES 深度剖面分析图中可以看到, Ni 在 InP 表层内的含量增加, Pt 层有效地阻挡了 In 的外扩散和 Au 的内扩散, 此时的比接触电阻 ρ_c 为 10^{-5} 数量级.

在温度为 400 °C 时间为 30 s 的退火条件下, Au_Pt_Ni/p_InP 界面处各组分的分布变化情况如图 3 所示. Ni 进一步向 InP 体内推移, Ni 在 InP 表面的含量也随之增加. Pt 层仍有效地阻挡 Au 的内扩散和 In 的外扩散. 此时的比接触电阻为 $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

在温度为 450 °C 时间为 30 s 的退火条件下, AES 深度剖面分析图表明, Au 在 Ni 层和 InP 表面内含量略有增加, In 的外扩散也渐渐地表现出来, 可能是由于易老化的 Au_xIn_y 低熔点金属化合物的少许形成^[6], 比接触电阻也略有增加, 其阻值为 $6 \sim 9 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

从温度为 500 °C 时间为 30 s 的退火条件下的 AES 深度剖面分析图中可以看到, Ni 膜层基本扩散到 InP 体内, Pt 不能完全有效地阻挡 Au 的内扩散和 In 的外扩散. Au_xIn_y 低熔点金属化合物也随之增加, 所以比接触电阻又进一步增加为 $1 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 左右.

2.3 Au_Pt_Ni/p⁺InGaAsP/n_InP 结构所进行的欧姆接触试验

这种结构一般为 1.3~1.5 μm 长波长激光器的结构. 在淀积 Ni_Pt_Au 之前, 先用 HCl:H₂O=1:5 溶液漂洗基片 30 s, 然后用大量去离子水冲洗, 干 N₂ 吹干. 同时还与干法 CH₄+

图2 240 W 予溅射 40 min 后的 Ni/Si AES 深度剖面分析图

图3 在温度 400 °C 时间 30 s 的退火条件下 Au_Pt_Ni/p_InP AES 深度剖面分析图

H₂ 处理的样片做了比较. 将两种样片一起溅射淀积 Ni(50 nm), Pt(100 nm), Au(100 nm). 膜层在 400 °C 温度下退火 30 s, 测量的串联电阻都为 1 Ω 左右.

另外, 在相同的 p⁺ InGaAsP/n-InP 基片与 Au₂Zn₂Au p 型电极做比较, Au₂Zn₂Au 电极的串联电阻 R_s 为 1.5 Ω 左右, NiPtAu 电极的串联电阻为 0.75 Ω 左右, 串联电阻几乎小近一倍.

3 结论

根据以上实验结果, 可以得出以下结论:

(1) 采用磁控溅射法淀积的 AuPtNi/p-InP(掺 Zn, $1\sim 2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$) 在退火温度 400 °C, 时间 30 s 的条件下, 实现了低阻欧姆接触, 其比接触电阻为 $3\times 10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}^2$.

(2) 不同的退火温度(300~500 °C) 的 AES 深度剖面分析表明, Pt 层阻挡 Au 的内扩散和 In 外扩散的作用, 但比接触电阻降低到 $3\times 10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 的机理尚不十分清楚.

利用 AuPtNi/p⁺ InGaAsP/n-InP 在长波长(1.3~1.5 μm) 激光器制备上进行了应用研究, 取得了满意的结果.

致谢 在实验研究过程中, 得到了余觉研究员、崔玉德高级工程师、王维明高级工程师、范东华高级工程师的大力帮助, 在此深表感谢.

参 考 文 献

- 1 Wang L C, Park M H, Deng F, et al. Ge/Pd(Zn) ohmic contact scheme on p-InP based on the solid phase regrowth principle. Appl Phys Lett, 1995, 66(24): 3310~3312
- 2 Ren F. Low resistance ohmic contacts on nitrogen ion bombarded InP. Appl Phys Lett, 1994, 65(17): 2165~2167
- 3 Kaiz A, Thomas P M, Chu S N G, et al. Pt/Ti ohmic contact to p⁺ InGaAs P (1.3 μm) formed by rapid thermal processing. J Appl Phys, 1990, 67(2): 884~889
- 4 Lin X W, Liliental-Weber Z, Washburn J. Structural characterization of encapsulated Au/Zn/Au ohmic contacts to p-type GaAs. J Vac Sci Technol, 1993, B11(1): 44~50
- 5 Hidenori Shimawaki, Naoki Furuhashi, Kazuhiko Honjo. Ohmic contacts to p-GaAs with p⁺/p regrown structures formed by metalorganic molecular beam epitaxy. J Appl Phys, 1991, 69(11): 7939~7941
- 6 Barnard W O, Malherbe J B, Aurret F D, et al. An Auger electron spectroscopy study of annealed gold contacts to InP. Thin Solid Films, 1992, 215: 42~49

(1998-03-16 收稿)

低于 20 nm 的 S[⊖] S[⊖] 光谱研究

杨治虎 马新文 王友德 刘惠萍 苏 宏 于得洋

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要 在兰州重离子加速器上采用束箔光谱技术测量了 S[⊖] S[⊖] 激发光谱, 经分析研究, 辨认出 30 多条光谱线. 这些谱线与理论及现有的一些实验结果相符合.

关键词 高电离态离子光谱 束箔方法

加速器上的硫元素光谱学的实验研究工作多数在低于 S[⊖] 电离级, 高于 S[⊖] 电离级的光谱

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1998-43-20-2167>