

NiIn(Ge)/n-GaAs 欧姆接触的研究*

范缙文 丁孙安 张金福 许振嘉

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文报道了一种用电子束蒸发制备铟基金属与 n 型 GaAs 单晶欧姆接触 NiIn(Ge)/n-GaAs 材料. 其接触电阻率 ρ_c 对随后的热退火温度存在着典型的 U 型依赖关系. 透射电子显微镜(TEM)及俄歇电子能谱(AES)的分析结果指出 ρ_c 值的大小很大程度取决于 GaAs 衬底与金属接触材料间 InGaAs 相的形成及其覆盖度. 文中还对金属接触材料与砷化镓相互作用的动力学进行了讨论.

PACC: 7340S, 6860, 6822

1 引言

随着高速亚微米 GaAs 器件的发展,传统的 AuGeNi/n-GaAs 欧姆接触已很难满足要求,因此,研究一种能够完全取代 AuGeNi 体系,接触电阻低、界面平整且热稳定性好的 GaAs 上的欧姆接触体系,已是当今国际上最有兴趣的课题之一. 近年来的研究表明,In 基金合金正由于具有上述的优良特性而被认为是最有前途的体系. 这是因为在该体系中,在 GaAs 与金属材料间形成了 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 相,而金属与 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的接触势垒比金属与 GaAs 间的接触势垒低^[1],因此电流基本上沿着金属/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs 的界面进行,因此降低了接触电阻率 ρ_c . 实验还发现 ρ_c 将随着 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 在 GaAs 衬底上的覆盖度的增加而降低. 理想的欧姆接触是在金属和砷化镓之间实现完全合金化,以形成一个完整的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中间层.

但是,铟基金合金系也会因为铟的存在而降低热稳定性,这是由于铟的熔点(156℃)很低,因此会造成接触形成过程中富余的铟在高于 400℃的热退火中会发生相变而使电学性能衰退. 为了增强热稳定性,在接触形成中引入金属 Ni,使其与多余的铟形成 Ni_3In 化合物,不同的 Ni/In 比率都能形成熔点高于 900℃的化合物^[2],从而增强了体系的热稳定性.

但是,由于纯铟在热蒸发中极易成团,而且熔点又过低,因此很难控制它的蒸发量. 另一方面 GaAs 衬底在热过程中也容易挥发从而与 Ni 形成合金. 所以探讨优化欧姆接触形成工艺的途径,研究它的电学性质和界面微观物理性能的关系是一个无论在实际应用研究中还

* 八五国家重点科技攻关项目

范缙文 女,1939 年生,副研究员,半导体材料物理专业,侧重半导体异质结界面的透射电子显微学研究
1993 年 11 月 29 日收到初稿,1994 年 1 月 31 日收到修改稿

是在界面物理研究中都具有重要价值的课题。

本文介绍了一种用电子束蒸发,制备镍基金属与 GaAs 间低阻欧姆接触的方法并用透射电子显微镜(TEM)、高分辨电子显微镜(HREM)及俄歇电子能谱(AES)对界面微观结构及化学组分进行了分析,还对低阻高热稳定性欧姆接触形成中金属与砷化镓相互作用的动力学过程进行了讨论。

2 实验过程

在(100)取向的半绝缘砷化镓(SI-GaAs)上,用液相外延(LPE)法生长厚度为 $1\mu\text{m}$,杂质浓度为 $3\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的 $\text{n}^+\text{-GaAs}$ 薄膜,然后低温生长 $0.1\mu\text{m}$ 的 SiO_2 层作为保护膜。用光刻、腐蚀制备传输线法(TLM)测量接触电阻所需的图形窗口,在窗口处暴露出 $\text{n}^+\text{-GaAs}$ 层。用常规方法对上述所制备的衬底进行了清洁处理,然后将它送入超高真空系统(本底真空为 $\sim 10^{-7}\text{Pa}$),利用电子束蒸发技术生长多层金属接触材料得到可供测量接触电阻的结构如图 1 所示。图 2 为 $\text{n}^+\text{-GaAs}$ 窗口处蒸发的多层金属接触材料生长图(图 1,2 见图版 I)。在衬底表面上首先蒸发 5 纳米的 Ge,用于增加表面电导,以利于金属与 GaAs 的粘接。考虑到纯铟的蒸发量不易控制的弱点,本工作中用预先熔制的 InNi 合金代替纯铟作为引入金属铟的蒸发源,生长了 $100\text{\AA}$ 的 In-Ni 混合层,最上面是一层厚度为 $200\text{\AA}$ 的金属 Ni 层。其作用有二:第一作为表面保护层,第二提供足够的 Ni 和形成 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 后剩余的 In 相互作用,生成高熔点的化合物,从而避免由于低熔点纯 In 的存在,使接触材料在高温下出现的性能退化。采用快速热退火(RTA),在氮保护气氛下对多层材料进行不同温度($500\text{--}900^\circ\text{C}$)的退火处理,退火时间均为 10 秒。最后用传输线法测量退火前及不同温度退火后多层材料的接触电阻率 ρ_c 。

用 $\Phi 610\text{M}$ 型俄歇电子能谱测量了不同温度下制得的多层材料中化学组分随溅射时间的分布。

将样品解理成小条,使每两小条的生长平面保持面对面地进行粘连,再沿样品的 $[1\bar{1}0]$ 轴向进行机械磨抛及氩离子减薄,以制得可以对多层结构进行横断面透射电子显微镜(XTEM)观察的电子透明薄膜。采用日立 H-9000 型透射电镜及日本电子 200CX 型高分辨电子显微镜对试样进行了观察。

3 实验结果和讨论

用传输线法(TLM)测量了图 1 所示的结构材料的接触电阻率 ρ_c 。结果如图 3 所示,可以看出,电阻率 ρ_c 对形成的温度 T 非常敏感, ρ_c 和 T 之间存在典型的 U 型依赖关系:当温度 T 从 500°C 升到 900°C 时, ρ_c 在 $T=700^\circ\text{C}$ 及 850°C 时存在一个极小值, $\rho_c(\text{min})=2.27\times 10^{-6}(\Omega\cdot\text{cm}^2)$ 。但当温度升高到 850°C 时, ρ_c 明显升高,其值为 $3.92\times 10^{-5}(\Omega\cdot\text{cm}^2)$ 。

为了探讨电学性能和界面微观物理性质的关系,对不同温度下形成的接触材料分别进行了 AES、TEM 及 HREM 的观测。本文侧重分析了 700°C 及 850°C 下的实验结果。

图 4(a),(b)分别为样品在退火前及 700°C 退火后的俄歇峰相对强度随溅射时间的变化

关系. 该图半定量地反映了多层结构中化学组分沿深度方向的分布曲线. 图 4(a)的结果基本上与所设计的多层膜结构一致, 即表层存在大量的 Ni, 在金属与 GaAs 衬底的界面处有 In 和 Ge 薄层. 图 4(b)表明当样品经 700℃, 10s 退火后, 化学组分的剖面分布发生了明显变化, 表现在 Ga 及 As 从内向表面扩散, Ni 从表层向内扩散, In 及 Ge 的分布趋向均匀. 虽然在获得这一分布曲线时已考虑到各元素的灵敏度因子, 但没有考虑择优溅射的影响. 根据择优溅射的原理, 一般情况下, 溅射产额与原子质量的四次方根成反比. 由于 In 原子质量比 Ni 大许多, 因此 Ni 的溅射产额要高. 根据俄歇能谱中 Ni、In 原子浓度比, 考虑到择优溅射引起的误差, 可以估计出 Ni、In 的原子浓度比在 3 到 4 之间. 所以通过上述结果可初步认为经 700℃退火后, 在接触的表层已经形成了 Ni_xIn 为主的合金层, x 值在 3 与 4 之间. 由于该体系的材料熔点均高于 900℃, 所以能够增强接触的热稳定性.

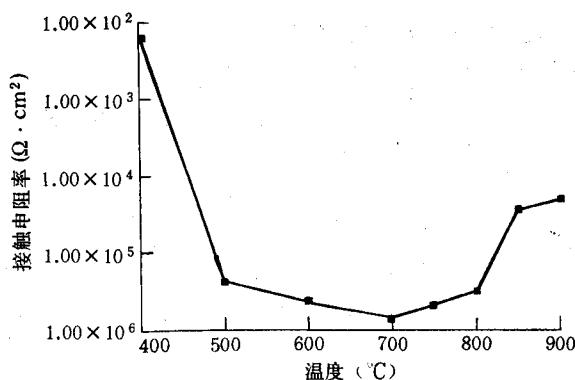


图 3 接触电阻率对退火温度的依赖关系

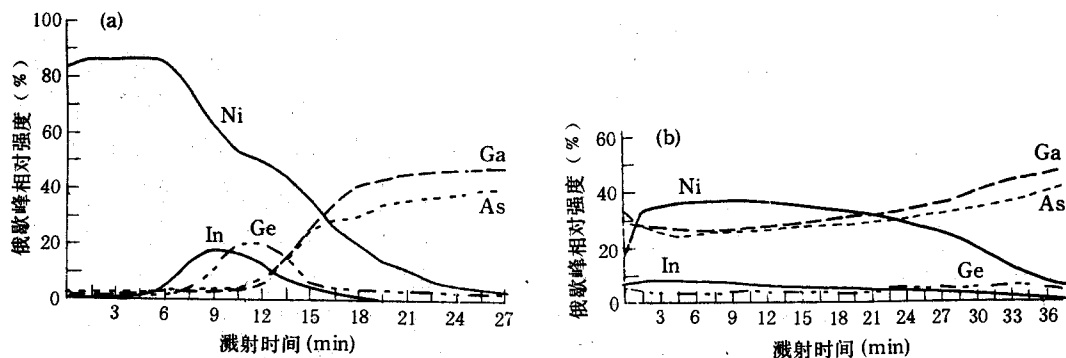


图 4 NiIn(Ga)/n-GaAs 接触材料的 AES 分析成分剖面图

(a)未退火 (b)700℃, 10s 快速退火

图 5(a)(见图版 I)为样品经 700℃, 10s 的快速退火后, 界面微观结构的横断面透射电子显微镜(XTEM)明场像, 从图中可以观察到砷化镓表面上已经形成了 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 相. 这一结论可以由左下角的沿晶体 $[1\bar{1}0]$ 轴所拍摄的选区电子衍射谱作出判断, 电子衍射谱上呈现出两套花样. 它们具有相同的闪锌矿结构特征, 但有不同的晶格常数 a 值. 对于低指数衍射花斑, 这两套晶格基本相重, 但当反射矢量 g 值增高时, 两套斑点分离开来, 这表明在 GaAs 衬底上已经外延形成了 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 第二相.

设 GaAs 基体的晶格常数为 a_m , $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 第二相的晶格常数为 a_s . 从衍射谱上分别测出从 GaAs 基体的衍射点及第二相衍射点至透射点(原点)的距离 R_m 和 R_s . 对于某一特定的 g 值, 可以得知相应 GaAs 单晶面间距 d_m . 根据透射电子显微镜中相机长度 L 、电子波长

λ 与面间距 d 及衍射谱上的 R 值关系式 $Rd = L\lambda$, 可以求出 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 所对应的面间距 d_e , 由 d_e 可以计算出晶格常数 a_e .

根据我们从衍射谱上测得的数据, 可以算出 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的晶格常数 $a_e = 5.90 \text{ \AA}$. 另一方面, 对于三元合金材料 $\text{A}_x\text{B}_{1-x}\text{C}$, 其晶格参数可根据 Vegard 定律导出, 即三元材料的参数 $T_{\text{A}_x\text{B}_{1-x}\text{C}}$ 是二元材料参数 $T_{\text{AC}}, T_{\text{BC}}$ 的线性插值: $T_{\text{A}_x\text{B}_{1-x}\text{C}} = xT_{\text{AC}} + (1-x)T_{\text{BC}} = T_{\text{BC}} + (T_{\text{AC}} - T_{\text{BC}})x$, 对于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 体系, 其晶格常数 $a_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}}$ 与 a_{GaAs} 存在下述关系:

$$a_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}} = a_{\text{GaAs}} + (a_{\text{InAs}} - a_{\text{GaAs}})x$$

$$\because a_{\text{GaAs}} = 5.6533 \text{ \AA}, a_{\text{InAs}} = 6.0584 \text{ \AA}$$

$\therefore a_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}} = 5.6533 + 0.4051x$, 所以根据测得的 a_e , 可以测定 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的 x 值约为 0.65.

由于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 外延层和基体 GaAs 之间存在晶格常数的差别, 因此在界面处产生了失配位错. 图 5(b) (见图版 II) 为图 5(a) 中方框所示部位的高分辨率电子显微像, 可以注意到界面处存在复杂的失配位错团, 在简单位错的核心处可见多余的 GaAs 原子平面. 对该样品的各部分进行全面观察的结果表明, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层的厚度通常在 6 纳米至 10 纳米之间, 但也有个别的突出部位深达 30 纳米. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 在 GaAs 表面上的覆盖率已达到 70%.

图 6 (见图版 III) 为 850°C 退火后形成的接触材料的 XTEM 亮场像. 该图表明温度的变化对界面微观结构产生了重大影响. 在 GaAs 衬底上形成了大面积的金属与砷化镓的化合物. 典型厚度约为 $2000 \text{ \AA}$, 远大于热沉积的多层金属膜的起始总厚度 ($\sim 350 \text{ \AA}$), 这表明在高温退火过程中, 金属层接触层与衬底发生了相互作用. 微区电子衍射及 HREM 像的结果显示出, 这一层中的大部分呈现六方结构. 初步分析, 它们属于具有六方结构的 Ni_xAs 及 Ni_xGa 化合物. 另一方面, 如图 6 所示, 在 GaAs 衬底附近检测出 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 第二相. 但是与 700°C 下形成的接触材料相比, 具有两点差别: ① $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 相的覆盖度小得多, 大约只有 25%; ② $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 相向 GaAs 衬底方向垂直延伸, 有的部位达 $1000 \text{ \AA}$ 以上. 上述界面微观结构特性对温度的依赖关系可以从退火过程中, 金属接触材料与 GaAs 衬底之间的相互作用来理解. 据报道^[3,4] Ni 和 GaAs 很容易发生相互作用, 在 300°C 时就能够形成 Ni_xGaAs . 在本工作的样品制备中, 热沉积过程所引起的衬底温度升高已超过 300°C , 因此估计多层膜在退火前, GaAs 表面已形成了 Ni_xGaAs 相. 另外, 由于 In 与 Ni 同时蒸发, 有一部分 Ni 与 In 形成 (In-Ni) 混合物, 它具有比纯 In 更高的熔点和较低的扩散系数, 在热沉积时也占据了一部分 GaAs 表面. 因此在退火前, GaAs 表面将由 Ni_xGaAs 和 (In-Ni) 两部分覆盖, 二者的分布处于随机混合的状态. 当温度高于 500°C 时^[3], Ni_xGaAs 将分解成 Ni_xAs 及 Ni_xGa . 在 700°C 时, 它们与周围的 In-Ni 相互作用, 形成 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 及 Ni 的化合物. 当温度高达 850°C 时, GaAs 从衬底向外表面的垂直扩散增加, 以致 Ni_xAs 及 Ni_xGa 更容易与 GaAs 相互作用, 相对而言, 与周围的 In 相互作用减弱. 同时, In 在高温下, 向 GaAs 体内的纵向扩散也增强, 形成了深入 GaAs 体内的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 相. 该体系是一个四元体系, 各元素之间的相互作用及平衡过程有待进一步结合四元体系相图及电子衍射相结构分析深入进行.

另一方面, 本工作中还研究了快速热退火时间对最低电阻率 $\rho_c(\text{min})$ 的影响. 实验发现, 当热退火时间延长, ρ_c 和 T 之间的 U 型关系中, $\rho_c(\text{min})$ 对应温度 T 降低, 但数值不变.

这表明退火时间的长短对于金属接触材料的特性没有实质性的影响. 为了改进欧姆接触材料的性能, 对铟量控制的研究及其在接触形成过程中作用的理解仍然有待深入. 因此, 不同 Ni-In 组分的接触材料的研究正在进行之中.

4 结论

用电子束蒸发法制备了铟基金属与 n 型 GaAs 单晶欧姆接触 NiIn(Ge)/n-GaAs 材料. 电学测量表明其接触电阻率与热退火温度存在着典型的 U 型关系. 700℃, 10s 的快速热退火能够获得最低的接触电阻率. TEM、HREM 和 AES 对异质结界面微观结构和化学分析的结果表明, 铟基金属与 n 型 GaAs 单晶的接触性能的优劣很大程度取决于 GaAs 与金属接触层之间 InGaAs 相的形成和覆盖度的大小.

参 考 文 献

- [1] M. Murakami, P. E. Hallali, W. H. Price, M. Norcott, N. Lustig, H. J. Kim, S. L. Wright and D. L. Tulipe, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1990, **181**, 233.
- [2] Y. Ch. Shih, M. Murakami and W. H. Price, *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**, 3539.
- [3] C. H. Jan, D. Swenson and Y. A. Chang, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1990, **181**, 259.
- [4] A. Lahav, M. Eizenberg and Y. Komem, *J. Appl. Phys.*, 1986, **60**, 991.

Ohmic Contact of NiIn(Ge)/n-GaAs

Fan Tiwen, Ding Sun'an, Zhang Jinfu and Xu Zhenjia

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

Received 29 November 1993, revised manuscript received 31 January

Abstract A material of In-based metal, which can form ohmic contact to n-GaAs, NiIn(Ge)/n-GaAs, by means of electron-beam evaporation is reported. The relation between contact resistivity ρ_c and subsequent thermal anneal temperature (T) is shown as a typical U-shape dependence. The results obtained by the analysis of cross-sectional transmission electron microscopy and Auger electron spectroscopy show that the contact resistivity, ρ_c is obviously related with the formation and the fractional coverage of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ phase at the contact metal/GaAs interfaces. The kinetics of the reaction between the metal and GaAs substrate during ohmic contact formation has also been discussed.

PACC: 7340S, 6860, 6822