

磷化铟基高电子迁移率晶体管欧姆接触工艺*

刘 亮† 尹军舰 李 潇 张海英 李海鸥 和致经 刘训春

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 针对磷化铟 (InP) 基高电子迁移率晶体管 (HEMT), 进行了 Ni/Ge/Au 和 Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au 两种金属结构快速退火 (10~40s) 和长时间合金 (10min) 的实验. 通过研究比较, 得到了更适用于 InP 基 HEMT 器件制作的合金方法. 利用 Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au 结构, 在 270°C 下合金 10min 形成了典型值 $0.068\Omega \cdot \text{mm}$ 的接触电阻.

关键词: 磷化铟; 高电子迁移率晶体管; 欧姆接触; 合金; 传输线模型

EEACC: 2520; 2550

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)11-1970-04

1 引言

随着电子信息技术的飞速发展, 半导体器件的工作频率不断提高. 磷化铟 (InP) 基高电子迁移率晶体管 (HEMT) 具有极高的截止频率和极低的噪声系数, 被认为是毫米波段最有竞争力的三端器件之一. 器件获得高速、低噪声性能的关键因素包括: 高质量的外延材料、短的栅长、低的寄生效应. 其中源电阻 R_s 严重影响器件特性, 降低 R_s 可以提高器件的工作频率, 减小器件的噪声.

通过合金能使金属与半导体材料之间形成良好的欧姆接触从而减小 R_s . 目前国内外很多文献中报道的 InP 基 HEMT 多采用 Au, Ge, Ni 金属体系制作源漏欧姆接触. 合金方面较高温度的快速退火及低温长时间合金等方法均有报道^[1~4].

本文通过实验分析比较了 InP 基 HEMT 外延材料上两种不同金属结构低温长时间合金和快速退火对合金效果的影响. 结果表明, 采用 Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au 六层金属结构通过低温长时间合金能够形成良好的欧姆接触. 在 270°C 下合金 10min, 得到了 $0.068\Omega \cdot \text{mm}$ 的接触电阻.

2 实验

实验采用的外延材料结构如表 1 所示. 欧姆接触制备程序如下: 首先, 采用湿法腐蚀形成隔离台面; 然后光刻, 蒸发金属; 接着, 常规剥离形成金属图

形; 最后, 样品在合金炉内高纯氮气保护下, 通过一定温度和时间退火形成欧姆接触.

表 1 实验采用的 InP 基 HEMT 外延层材料结构 1

Table 1 Epitaxial layer structure 1 of the InP based HEMT used in the experiment

外延层结构 1		
Layer	掺杂浓度	
n-InGaAs	$5.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	帽层
i-InAlAs		势垒层
Delta doping	$5.0 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$	Delta 掺杂层
i-InAlAs		隔离层
i-InGaAs		沟道层
i-InP		沟道层
n-InP	$2.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	沟道层
i-InAlAs		缓冲层
SI InP substrate		

表 2 实验采用的两种金属结构

Table 2 Two metal structures used in the experiment

金属结构 1		金属结构 2	
Au	150nm	Au	220nm
Ge	40nm	Ni	3nm
Ni	15nm	Ge	8nm
n-InGaAs 帽层		Au	66nm
		Ge	4nm
		Ni	4nm
		n-InGaAs 帽层	

* 国家重点基础研究发展规划资助项目 (批准号: G2002CB311901)

† 通信作者. Email: liuliang@ime.ac.cn

2006-05-12 收到, 2006-06-22 定稿

用于制作欧姆接触的金属采用如表 2 所示的两种结构. 结构 1 包含三层金属, 自下而上依次为 Ni (15nm), Ge (40nm), Au (150nm). 因为 AuGe 与 InGaAs 的浸润性很差, Ni 起湿润作用, 防止“缩球”发生, 同时还能促进 Au 与 InGaAs 的反应, 提高 Ge 的内扩散能力, 起着整个相变反应催化剂的作用^[5]. Ge 在一定温度下通过扩散进入 InGaAs 并占据 Ga 空位, 成为施主杂质, 从而在合金层下形成一层高掺杂的 n⁺ 层^[6], 这是形成欧姆接触的关键. Au 会促使 InGaAs 的分解以及 Ga 的外扩散, 形成 Ga 空位; 同时 Au 还能提高合金后的薄层电导率, 改善合金形貌.

结构 2 包含六层金属, 自下而上依次是 Ni (4nm), Ge (4nm), Au (66nm), Ge (8nm), Ni (3nm), Au (220nm). 前三层金属 Ni, Ge, Au 的用途与结构 1 中的三层金属类似. 第四层金属 Ge 的作用主要是使 NiGeAu 系统保持一定的化学计量比. 第五层金属 Ni 在前面几层金属与第六层的 Au 之间形成一层阻挡层防止过多的 As 扩散进入顶层的 Au^[7]. 第六层金属 Au 用于提高合金后薄层电导率, 改善表面合金形貌.

与 GaAs 基 HEMT 不同, 在没有覆盖层保护下的 InP 在 350℃ 以上会发生热分解, 且在高温下外延层及二维电子气会发生退化^[2], 严重影响器件的直流和高频特性, 因此对于 InP 基 HEMT 需要在较低温度下进行合金. 实验中温度选定在 260~320℃ 之间.

为了比较快速退火与低温长时间合金的效果, 在表 1 所示的外延材料上分别蒸发两种结构的金属. 分别在 290, 300, 310 和 320℃ 下进行快速合金, 合金时间 30s, 优化出合金温度后再对合金时间进行优化, 得到快速退火合金时的最小接触电阻; 在 260, 280 和 300℃ 进行长时间合金, 合金时间 10min, 得到长时间合金的最小接触电阻. 最后, 在另一种 InP 基 HEMT 外延材料上进行低温长时间合金的实验.

实验中使用 HP4155A 半导体参数分析仪进行测试, 然后采用传输线模型法 (TLM) 计算接触电阻. TLM 的测试图形如图 1 所示.

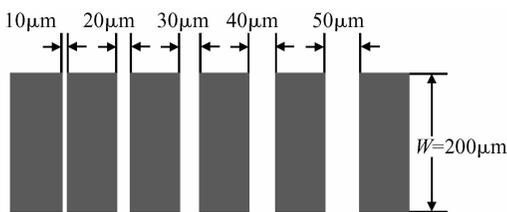


图 1 欧姆接触测试图形
Fig. 1 Ohmic contact measuring pattern

分别在不同间距 l_n (10, 20, 30, 40 和 50 μm) 的长方形接触金属块间测量 I - V 特性, 求得电阻 R_T .

$$R_T = \frac{R_{SH} l}{W} + 2 \frac{R_{SK} L_T}{W} + 2R_{prob}^{[5,8]}$$

其中 $L_T = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{SK}}}$, 称为传输长度; R_{SH} 为半导体材料的方块电阻; R_{SK} 为接触金属块下薄层材料的方块电阻; ρ_c 为金属-半导体接触的比接触电阻率; R_{prob} 为探针电阻; W 为接触金属块的宽度, 近似认为合金化后 $R_{SK} = R_{SH}$. 以 R_T 作为间距 l 的函数作图 (如图 2 所示), 其图形近似为一条直线. 用最小二乘法拟合直线, 若直线斜率为 K , 截距为 b , 忽略探针电阻的情况下, 接触电阻 $R_c = \frac{1}{2} bW$.

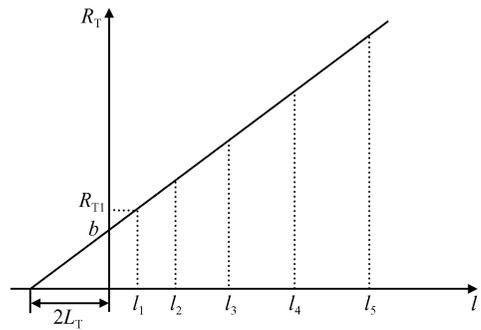


图 2 测量电阻 R_T 与金属块间距 l 的关系曲线
Fig. 2 Measuring resistance R_T versus the metal pad space l

3 结果与分析

图 3 为样品蒸发两种结构的金属后在不同温度下合金 30s 所得的接触电阻. 由图可见, 蒸发三层金属的样品在 300℃ 下接触电阻最低, 蒸发六层金属的样品在 310℃ 下接触电阻最低, 随着温度升高接触电阻都成上升趋势, 由此优化出最佳合金温度. 在优化的合金温度下以不同时间快速退火得到的接触电阻如图 4 所示. 由图可见, 蒸发三层金属的样品合金 20s 得到的最低接触电阻为 0.718 $\Omega \cdot \text{mm}$; 蒸发六层金属的样品合金 10s 得到的最低接触电阻为 0.847 $\Omega \cdot \text{mm}$. 图 5 为蒸发两种结构金属的样品在不同温度下长时间合金 10min, 所得的接触电阻. 由图可见, 两种样品均在 280℃ 下获得最低的接触电阻, 温度升高或降低接触电阻都呈上升趋势.

表 3 归纳了优化的合金条件及相应条件下的接触电阻. 可以看出, 无论采用哪种结构的金属, 低温长时间合金所获得的接触电阻都明显小于快速合金得到的接触电阻. 这是因为合金温度相对较低, 快速退火时合金不充分, 导致接触电阻较大. 另外, 采用六层金属长时间合金得到的最小接触电阻 (0.236 Ω

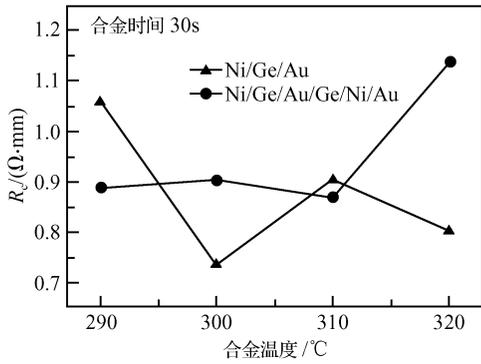


图3 外延层材料结构1蒸发两种结构金属,在不同温度下合金30s所得的接触电阻

Fig.3 Comparison of the contact resistances after evaporating the two different structures of metals on the epitaxial layer structure 1 and alloying 30s at different temperatures

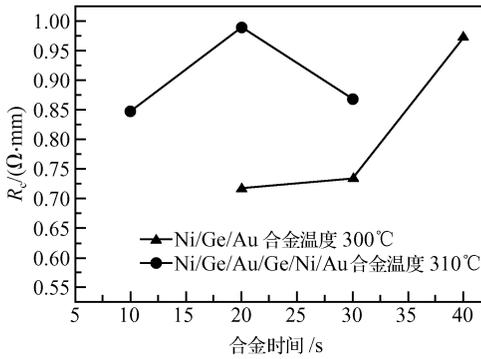


图4 外延层材料结构1,蒸发三层金属,在300°C下以不同时间快速退火合金所得的接触电阻;蒸发六层金属,在310°C下以不同时间快速退火合金所得的接触电阻

Fig.4 Contact resistances using RTA with different alloying times; three metal layers and six metal layers were evaporated on the epitaxial layer structure 1 respectively; the corresponding alloying temperatures were 300°C and 310°C, respectively

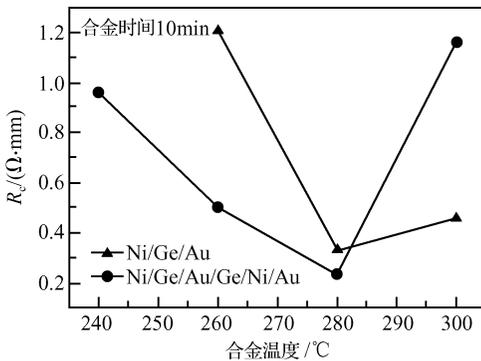


图5 外延层材料1,分别蒸发两种结构的金属,在不同温度下长时间合金10min所得的接触电阻

Fig.5 Comparison of the contact resistances after evaporating the two different structures of metals on the epitaxial layer structure 1 and alloying 10min at different temperatures

· mm)要比三层金属长时间合金得到的最小接触电阻(0.330Ω·mm)小28%。这是因为六层金属结构中第五层金属Ni在前面几层金属与第六层的Au之间形成了一层阻挡层,阻止过多的As扩散进入顶层的Au而形成高阻层,因而得到了更低的接触电阻。由此认为,采用六层金属结构(Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au),通过低温长时间合金对InP基HEMT能够形成更好的欧姆接触。

表3 两种金属结构优化的合金条件及相应条件下的接触电阻

Table 3 Optimized alloying conditions of the two metal structures and the corresponding contact resistances

结构	优化合金条件	接触电阻/(Ω·mm)
Ni/Ge/Au	300°C, 20s	0.718
	280°C, 10min	0.330
Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au	310°C, 10s	0.847
	280°C, 10min	0.236

为验证这个结论,在另一种InP基HEMT外延材料(如表4所示)上蒸发Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au,进行长时间合金实验。优化合金条件后,在270°C下合金10min,得到了0.068Ω·mm的接触电阻,相应的比接触电阻率为 $4.625 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$,金属表面形貌光滑、平整。图6为该样品的I-V测试曲线,从图中可以看出I-V特性已经呈线性,形成了良好的欧姆接触。

表4 实验采用的InP基HEMT外延层材料结构2

Table 4 Epitaxial layer structure 2 of the InP based HEMT used in the experiment

外延层结构2		
Layer	掺杂浓度	
n-InGaAs	$1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	帽层
i-InP		腐蚀截止层
i-InAlAs		势垒层
delta doping	$5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$	Delta 掺杂层
i-InAlAs		隔离层
i-AlAs		隔离层
i-InGaAs		沟道层
i-InAs		沟道层
i-InGaAs		沟道层
i-InAlAs		缓冲层
SI InP substrate		

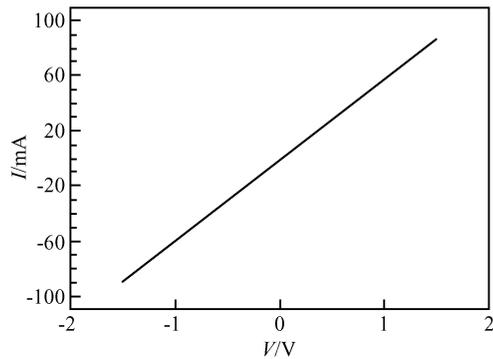


图 6 外延层材料 2, 蒸发六层金属, 在 270°C 下合金 10min 后的 I - V 特性曲线

Fig. 6 I - V characteristics after alloying 10min at 270°C (epitaxial layer structure 2 evaporated six metal layers)

4 结论

由于 InP 基 HEMT 在制备过程中不能承受过高的合金温度, 本文进行了较低温度下的快速合金与长时间合金实验, 比较了 Ni/Ge/Au 及 Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au 两种金属结构对合金的影响. 结果表明采用 Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au 六层金属通过低温长时间合金能够得到更低的接触电阻, 在 270°C 下合金 10min 得到了 $0.068\Omega \cdot \text{mm}$ 的接触电阻, 金属表面形貌光滑、平整, 为进一步制备高性能的 InP 基 HEMT 器件打下了坚实的基础.

参考文献

- [1] Ao Jinping, Zeng Qingming, Zhao Yonglin, et al. InP-based enhancement-mode pseudomorphic HEMT with strained $\text{In}_{0.45}\text{Al}_{0.55}\text{As}$ barrier and $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ channel layers. IEEE Electron Device Lett, 2000, 21(5): 200
- [2] Yamashita Y, Endoh A, Shinohara K, et al. Ultra-short 25-nm-gate lattice-matched InAlAs/InGaAs HEMTs within the range of 400GHz cutoff frequency. IEEE Electron Device Lett, 2001, 22(8): 367
- [3] Klepser B U H, Bergamaschi C, Patrick W, et al. Comparison and optimisation of different ohmic contact metallisations for InP-HEMT structures with doped and undoped cap-layers. Sixth International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings, 1994, 27~31: 174
- [4] Chen Liqiang, Zhang Haiying, Yin Junjian. Lattice-matched InP-based HEMTs with f_T of 120GHz. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(3): 472
- [5] Wu Dingfen, Yan Benda. Theory, test and process of metal-semiconductor interface ohmic contact. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1989 (in Chinese) [吴鼎芬, 颜本达. 金属-半导体界面欧姆接触的原理、测试与工艺. 上海: 上海交通大学出版社, 1989]
- [6] Li Xiaobai. GaAs microwave power FET and its integrated circuits. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese) [李效白. 砷化镓微波功率场效应晶体管及其集成电路. 北京: 科学出版社, 1998]
- [7] Heedt C, Gottwald P, Buchali F, et al. On the optimization and reliability of ohmic and Schottky contacts to InAlAs-InGaAs HFET. Fourth International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 1992, 21~24: 238
- [8] Nissim Y I, Gibbons J F, Gold R B. Nonalloyed ohmic contacts to n-GaAs by CW laser-assisted Diffusion from a $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2$ source. IEEE Trans Electron Devices, 1981, 28(5): 607

Ohmic Contact for InP-Based HEMTs*

Liu Liang[†], Yin Junjian, Li Xiao, Zhang Haiying, Li Haiou, He Zhijing, and Liu Xunchun

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: An ohmic contact experiment is conducted for InP-based high electron mobility transistors (HEMTs) with two different metal structures of Ni/Ge/Au and Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au. Comparison is made between rapid thermal annealing (10~40s) and alloying over a long time (10min). Optimized alloying conditions for the InP-based HEMT are obtained. Using the Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au structure, a typical contact resistance of $0.068\Omega \cdot \text{mm}$ is achieved by alloying at 270°C for 10min.

Key words: InP; HEMT; ohmic contact; alloy; TLM

EEACC: 2520; 2550

Article ID: 0253-4177(2006)11-1970-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G2002CB311901)

[†] Corresponding author. Email: liuliang@ime.ac.cn

Received 12 May 2006, revised manuscript received 22 June 2006