

具有 Cr 阻挡层的 GaAs 欧姆接触工艺研究

李博, 李辉, 李晓雪, 闫昊, 郝永芹*

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 研究了金属 Cr 作为扩散阻挡层的 GaAs 欧姆接触技术, 设计了 Au/Cr/AuGe/Ni 和 Ti/Cr/Au 两种欧姆接触合金系统, 并对 Cr 阻挡层厚度与退火条件进行了优化。研究表明: 两种合金系统均可在 380~480 °C 退火条件下形成欧姆接触, 且 Au/Cr/AuGe/Ni 系统在 420 °C/60 s 退火条件下的比接触电阻率为 $2.63 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 相较于在相同基底上镀制的 Au/Ni/AuGe/Ni 合金系统比接触电阻率的最低值 $1.54 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 降低了近一个数量级, 且具有更好的表面形貌; Ti/Cr/Au 系统在 440 °C/60 s 退火条件下的比接触电阻率为 $6.99 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 且在 420~460 °C 相对较宽的温度范围内均可获得低的比接触电阻率。

关键词 材料; 半导体器件; 欧姆接触; 扩散阻挡层; 合金化; 比接触电阻率

中图分类号 TN305.93

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1103001

1 引言

半导体器件的广泛应用对器件性能提出了更高要求, 而欧姆接触的好坏会直接影响器件的性能及可靠性^[1-4]。良好的欧姆接触具有比接触电阻率低、表面形貌均匀平整、表面金属材料向半导体内部扩散深度适宜等特性。低的比接触电阻率有利于降低器件的接触电阻, 从而提高电光转换效率和降低阈值电流。均匀平整的表面可以使电流均匀通过, 避免载流子局部聚集导致欧姆接触性能退化甚至失效, 从而避免器件失效^[5-6]。合适的扩散深度不仅能减小欧姆接触电阻, 还能有效抑制深度扩散导致的有源区中非辐射复合中心的形成^[7-8], 提高器件的可靠性。

目前, n-GaAs 欧姆接触中应用得最广泛的合金系统是 Au/AuGeNi, 它具有工艺成熟、形成的欧姆接触质量高等优点。但 AuGe 的共晶熔点低, 会导致 Au 和 Ge 在合金化过程中出现不同程度的缩球, 使得金属层比较粗糙, 界面不平整, 边缘收缩^[9]。为此, 科研人员提出了一些新型的欧姆接触结构, 以改善欧姆接触特性。如: 2000 年, 张万荣等^[10]提出了 Au/Ti/TiN/Ti/AuGeNi 欧姆接触合金系统, 该新

型欧姆接触合金系统的可靠性优于传统的 Au/AuGeNi 欧姆接触合金系统; 2006 年, Li 等^[11]设计了一种新型的六层金属系统 (Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au), 其比接触电阻率为 $2.1 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 而且合金后表面光滑、平整; 2008 年, Sahoo 等^[12]提出了 Cu/Cr/Ge/Pd 欧姆接触合金系统, 其比接触电阻率为 $(5.1 \pm 0.6) \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$; 2012 年, Wang 等^[13]提出了 Ni/AuGe/Ni/Au 欧姆接触合金系统, 其比接触电阻率为 $2.76 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$; 2014 年, 刘丹丹等^[14]提出了将 Pt 作为扩散阻挡层的 Au/Pt/AuGe/Ni 欧姆接触合金系统, 其比接触电阻率为 $4.25 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 且器件具有较好的热稳定性和可靠性。p-GaAs 欧姆接触最常采用的合金系统为 Ti/Pt/Au。1998 年, Iwai 等^[15]首次在 p-InP 衬底上使用 AlInAs 氧化层制备了 GaInAsP 应变量子阱激光器, 实现了阈值电流为 6.8 mA、斜率效率为 0.55 W/A 的单侧模工作。2007 年, 杨立杰等^[16]对比了 Ti/Pt/Au 系统和 Cr/Pt/Au 系统作为欧姆接触金属的性能, 结果表明, Ti/Pt/Au 系统的欧姆接触效果更好, 比接触电阻率为 $3.08 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。2008 年, Szerling 等^[7]提出了 Pt/Ti/Pt/Au 合金系统, 并发现添加的 Pt 层很好地阻止了 Au 元素向内

收稿日期: 2021-09-16; 修回日期: 2021-10-22; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(11474038)、吉林省科技发展计划项目(20200401073GX)

通信作者: *hyq72081220@aliyun.com

扩散,平均比接触电阻率低于 $5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。2016 年,刘梦涵等^[17]对 Ti/Pt/Au 系统中 Ti 层和 Pt 层的厚度进行了优化,得到的比接触电阻率为 $6.291 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。Ti/Pt/Au 合金系统在欧姆接触制备中具有高的可靠性和稳定性,但该合金系统中的各组分全部为贵金属,在大规模制备中成本较高。

在欧姆接触合金系统中,扩散阻挡层作为外层覆盖金属与内层接触合金间沉积的隔离层,可以阻止各元素间相互扩散,极大地提高了欧姆接触的稳定性及可靠性。金属 Cr 具有熔点高、稳定性好、热导率和电导率较高、易制备等特点,而且具有较好的耐磨性和耐蚀性^[18],可以用作扩散阻挡层材料。本课题组采用金属 Cr 作为 GaAs 基 p/n 欧姆接触合金系统的扩散阻挡层,设计了 Au/Cr/AuGe/Ni 和 Ti/Cr/Au 合金系统,对 Cr 层厚度与退火条件进行优化,并对比分析了所设计系统与常规合金系统的性能。

2 实验过程

以金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)生长的 n 型 GaAs($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)和 p 型 GaAs($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)作为基底,采用磁控溅射技术在 n 型 GaAs 基底上镀制 Au/Cr/AuGe/Ni(300 nm/40~55 nm/100 nm/5 nm)合金系统,在 p 型 GaAs 基底上镀制 Ti/Cr/Au(40 nm/20~50 nm/200 nm)合金系统,如图 1 所示。圆点传输线模型就是采用负胶光刻和金属剥离技术在外延片上剥离掉 10 个电极环,其中内圆半径均为 $80 \mu\text{m}$,各外圆半径从 $90 \mu\text{m}$ 起以 $10 \mu\text{m}$ 之差梯度增加到 $180 \mu\text{m}$ 。剥离完成之后通过快速退火炉在氮气氛围下进行合金化退火,退火结束后,利用探针台和 KEITHLEY2400 数字源表对样品的电流-电压($I-V$)曲线进行测试。通过圆点传输线模型进行计算分析,可求出比接触电阻率。图 2 为圆点传输线模型结构示意图。

利用圆点传输线模型计算比接触电阻率时^[19],探针之间的总电阻可以表示为 R_{tot} ,其计算公式为

$$R_{\text{tot}} = \frac{R_s}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{r_n}{r_0}\right) + L_T \left(\frac{1}{r_n} + \frac{1}{r_0} \right) \right], \quad (1)$$

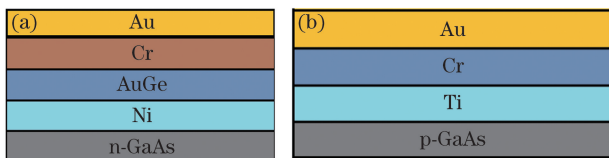


图 1 电极结构图。(a)n 型 GaAs 基底;(b)p 型 GaAs 基底
Fig. 1 Electrode structure diagram. (a) n-type GaAs substrate; (b) p-type GaAs substrate

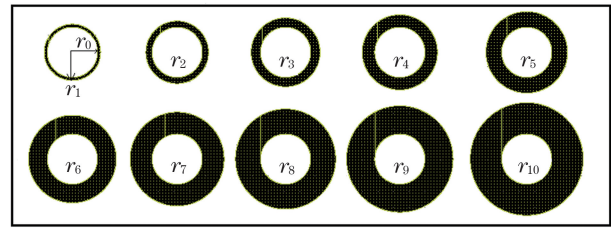


图 2 圆点传输线模型结构图(内圆半径 r_0 为 $80 \mu\text{m}$,外圆半径 $r_1 \sim r_{10}$ 依次为 $90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180 \mu\text{m}$)

Fig. 2 Structure diagram of dot transmission line model (the inner radius r_0 is $80 \mu\text{m}$, and the outer radius $r_1 \sim r_{10}$ is $90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180 \mu\text{m}$, respectively)

式中: r_0, r_n 分别代表内外圆的半径; L_T 为传输线长度; R_s 为串联电阻。 R_{tot} 在数值上等于圆环两端 $I-V$ 曲线的斜率, R_s 和 L_T 可由 $R_{\text{tot}} \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r_0}\right)$ 拟合曲线的斜率和截距得到。比接触电阻率的计算公式为

$$\rho_c = R_s \cdot L_T^2. \quad (2)$$

为了对欧姆接触系统的表面进行分析,采用扫描电镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)对表面形貌进行表征,并采用 X 射线衍射(XRD)技术对薄膜组分进行分析。

3 结果与讨论

3.1 退火条件优化

退火是改善欧姆接触的有效方法,其中,退火温度和退火时间是影响欧姆接触的关键参数。图 3 是 Au/Cr/AuGe/Ni(300 nm/45 nm/100 nm/5 nm)和 Ti/Cr/Au(40 nm/30 nm/200 nm)在不同退火条件下的比接触电阻率。总体来看,当退火温度范围为 $380 \sim 480 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,在 60 s 和 120 s 的退火时间下,两种合金系统都能形成欧姆接触,但退火 60 s 的比接触电阻率普遍较退火 120 s 的小,而且温度过高或过低均会导致比接触电阻率急剧增大。对于 Au/Cr/AuGe/Ni 合金系统, $420 \text{ }^\circ\text{C}/60 \text{ s}$ 退火条件下的比接触电阻率为 $2.63 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$,较本课题组在相同基底上镀制的 Au/Ni/AuGe/Ni 合金系统所能达到的最小比接触电阻率 $1.54 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 降低了近一个数量级。Ti/Cr/Au 合金系统在 $440 \text{ }^\circ\text{C}/60 \text{ s}$ 退火条件下的比接触电阻率为 $6.99 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$,与同基底上制作的 Ti/Pt/Au 合金系统的比接触电阻率的最低值 $1.98 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 相当,而且 Ti/Cr/Au 合金系统在 $420 \sim 460 \text{ }^\circ\text{C}$ 这一相对较宽的退火温度范围内

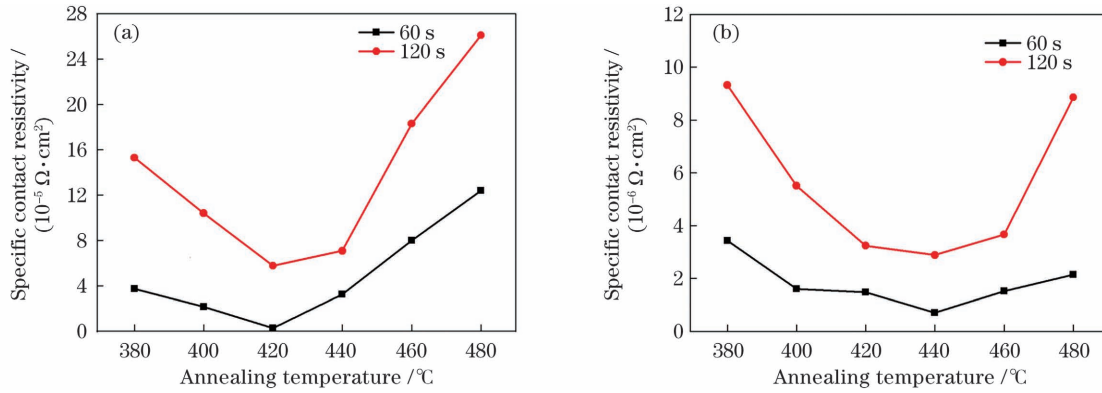


图 3 不同合金系统的比接触电阻率。(a) Au/Cr/AuGe/Ni 合金系统；(b) Ti/Cr/Au 合金系统

Fig. 3 Specific contact resistivity of different alloy systems. (a) Au/Cr/AuGe/Ni alloy system; (b) Ti/Cr/Au alloy system

均可获得低的比接触电阻率。

3.2 Cr 阻挡层厚度的优化

适当的 Cr 阻挡层厚度有利于形成低比电阻率的欧姆接触。图 4 为不同 Cr 阻挡层厚度合金系统最大圆的 I - V 曲线对比图,表 1 为具有不同 Cr 阻挡层厚度的 Au/Cr/AuGe/Ni(300 nm/ d_n /100 nm/5 nm)和

Ti/Cr/Au(40 nm/ d_p /200 nm)合金系统的比接触电阻率,退火温度均为 420 $^{\circ}\text{C}$,退火时间均为 60 s。从表 1 可以看出:对于 Au/Cr/AuGe/Ni 系统,随着 Cr 阻挡层厚度 d_n 由 40 nm 增加到 55 nm,比接触电阻率呈现出由高到低再到高的趋势,并在 $d_n=45$ nm 时取得最小的比接触电阻率;随着 Cr 阻挡层厚度 d_p 由

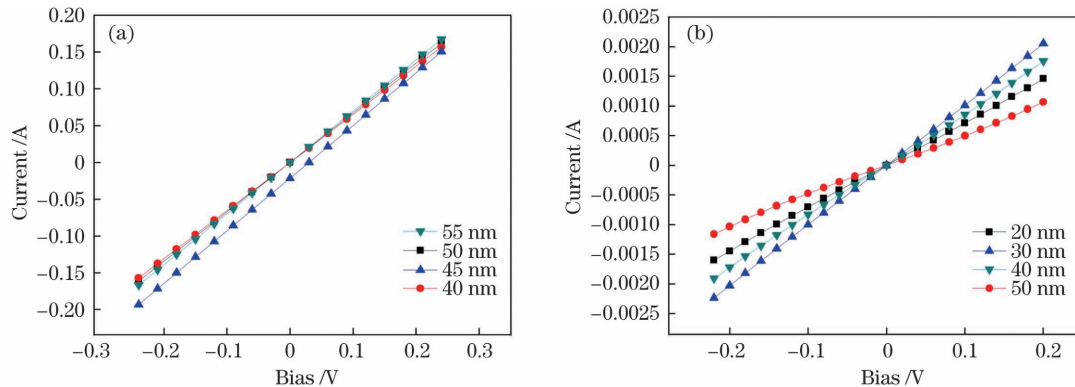


图 4 不同 Cr 阻挡层厚度合金系统的 I - V 曲线(退火温度 420 $^{\circ}\text{C}$,退火时间 60 s)。(a) Au/Cr/AuGe/Ni 合金系统；(b) Ti/Cr/Au 合金系统

Fig. 4 I - V curves of alloy systems with different Cr thicknesses (annealed at 420 $^{\circ}\text{C}$ for 60 s). (a) Au/Cr/AuGe/Ni alloy system; (b) Ti/Cr/Au alloy system

表 1 不同 Cr 阻挡层厚度合金系统的比接触电阻率(退火温度 420 $^{\circ}\text{C}$,退火时间 60 s)

Table 1 Specific contact resistivity of alloy systems with different Cr thicknesses (annealed at 420 $^{\circ}\text{C}$ for 60 s)

Alloy systems with different Cr thicknesses		Specific contact resistivity / ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Au/Cr/AuGe/Ni	$d_n = 40$ nm	5.89×10^{-5}
	$d_n = 45$ nm	2.63×10^{-6}
	$d_n = 50$ nm	7.47×10^{-5}
	$d_n = 55$ nm	8.24×10^{-5}
Ti/Cr/Au	$d_p = 20$ nm	2.06×10^{-6}
	$d_p = 30$ nm	1.48×10^{-6}
	$d_p = 40$ nm	1.82×10^{-6}
	$d_p = 50$ nm	2.26×10^{-6}

20 nm 增加到 50 nm, Ti/Cr/Au 系统呈现出同样的趋势,并在 $d_p = 30$ nm 时取得最小的比接触电阻率。这可以从 Cr 成膜过程以及膜层对导电性能的影响两方面进行定性解释。在溅射 Cr 薄膜的初始阶段,薄膜很薄,存在着很多晶粒间隙,因此薄膜的致密性、均匀性差。这种薄膜结构的不均匀性增大了电子运动的阻力,从而导致比接触电阻率较大,欧姆接触质量不高。随着溅射薄膜厚度的增加,Cr 膜中的晶粒间隙得到一定的填充,薄膜的致密性、均匀性都得到了提高;同时,随着膜厚的增加,Cr 膜起到了很好的扩散阻挡作用,这时可以获得较低的比接触电阻率。随着薄膜厚度继续增加,薄膜的电阻增加,使得比接触电阻率增大^[20]。此外可以看到:不同合金系统的最佳 Cr 阻挡层厚度略有不同;Ti 层形成欧姆接触的稳定性较好^[16],因此 Ti/Cr/Au 合金系统的比接触电阻率变化不大。

3.3 XRD 分析

为进一步探究具有 Cr 扩散阻挡层的 GaAs 基欧姆接触合金系统的合金化过程,对样品退火前后的表面进行 XRD 扫描分析,其中 n 型 GaAs 基合金系统样品为 Au/Ni/AuGe/Ni (300 nm/45 nm/100 nm/5 nm) 和 Au/Cr/AuGe/Ni (300 nm/45 nm/100 nm/5 nm), p 型 GaAs 基合金系统样品为 Ti/Pt/Au (40 nm/40 nm/200 nm) 和 Ti/Cr/Au (40 nm/30 nm/200 nm)。

薄膜之间的元素互扩散很常见,而退火会加速欧姆接触合金中各层薄膜之间的互扩散,进而导致器件性能蜕化和不稳定,因此,在两层薄膜中间引入扩散阻挡层是一种常用方法。在退火过程中,n 型 GaAs 基合金系统样品中的 GaAs 分解,Ga 向外扩

散,Au 与 Ge 向内扩散,Ge 占 Ga 的空位,形成施主,使得 GaAs 层载流子浓度增加,有利于电子隧穿,形成良好的欧姆接触。但是过量的 Au 向内扩散,就会与向外扩散的 Ga 形成 Au_xGa_y 合金,加速 Ga 向外扩散,在晶格中留下过剩的 As,同时 Au 和 Ni 作为受主杂质,补偿了部分 GaAs 层的施主杂质,从而导致比接触电阻率增大^[9,21-22]。由图 5(a) 可以看出 Au/Ni/AuGe/Ni 系统在退火后形成了较多的 Au_xGa_y 合金相,这些合金相的存在导致 Au/Ni/AuGe/Ni 系统的比接触电阻率增加。从图 5(b) 可以看出 Au/Cr/AuGe/Ni 系统退火前后表面的物相基本没有发生变化,这说明 Cr 层起到了很好的扩散阻挡作用,阻止了 Au_xGa_y 合金相的生成,同时生成的 $Cr_{11}Ge_8$ 类金属相有助于降低接触电阻^[12],提升欧姆接触的质量。对于高掺杂浓度的 p 型 GaAs 基合金体系来说,Ti 作为有反应活性的金属,在合金化时可与半导体发生融合,进入 GaAs 表面形成 TiAs 相,从而改善欧姆接触的性能和提高电极的黏附力;同时,Ga 向外扩散,而扩散阻挡层的存在使得 Ga 很难扩散到 Ti 层之外,从而使金属层处于稳定状态^[14,23-24]。由于在沉积 p 型欧姆接触合金系统时为了使金属更好地成膜,将基片温度设置为 150 °C,所以在退火前表面形成了少量合金相。由图 6 可以看出具有扩散阻挡层的 Ti/Pt/Au 系统和 Ti/Cr/Au 系统在退火前后表面的物相基本没有发生变化,这说明 p 型欧姆接触系统内的 Pt 层和 Cr 层同样起到了很好的扩散阻挡作用,有效地阻挡了 Ga 元素向外扩散和 Au 元素向内扩散,提升了欧姆接触的稳定性。

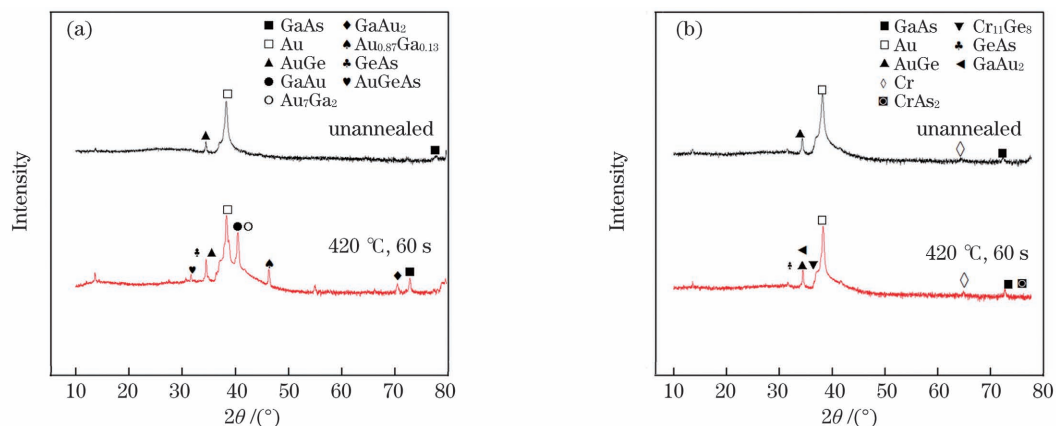


图 5 n 型 GaAs 基合金系统样品退火前后的 XRD 分析。(a) Au/Ni/AuGe/Ni 合金系统;(b) Au/Cr/AuGe/Ni 合金系统
Fig. 5 XRD analysis of n-type GaAs alloy system samples before and after annealing. (a) Au/Ni/AuGe/Ni alloy system;
(b) Au/Cr/AuGe/Ni alloy system

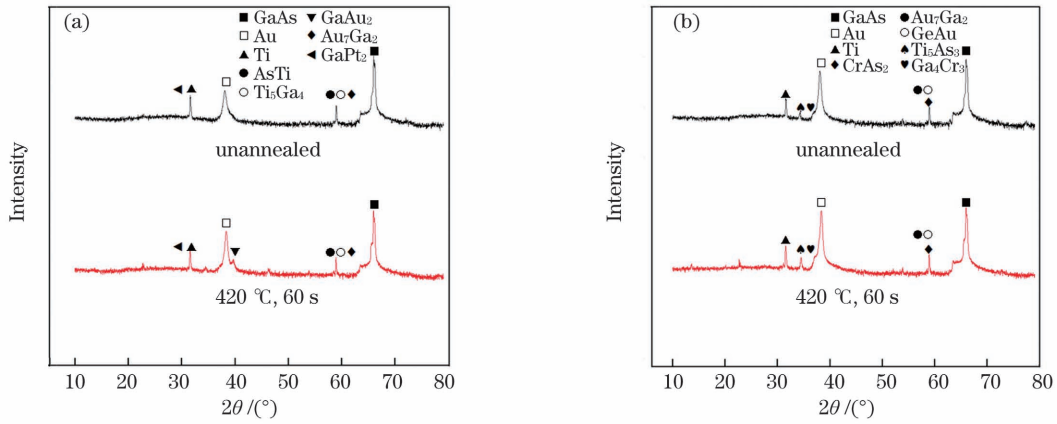


图 6 p 型 GaAs 基合金系统样品退火前后的 XRD 分析。(a) Ti/Pt/Au 合金系统；(b) Ti/Cr/Au 合金系统
 Fig. 6 XRD analysis of p-type GaAs alloy system samples before and after annealing. (a) Ti/Pt/Au alloy system;
 (b) Ti/Cr/Au alloy system

3.4 表面形貌分析

图 7、8 为几种合金系统退火前后表面的 SEM

和 AFM 形貌表征,其中本文优化的合金系统为 Au/Cr/AuGe/Ni(300 nm/45 nm/100 nm/5 nm)和

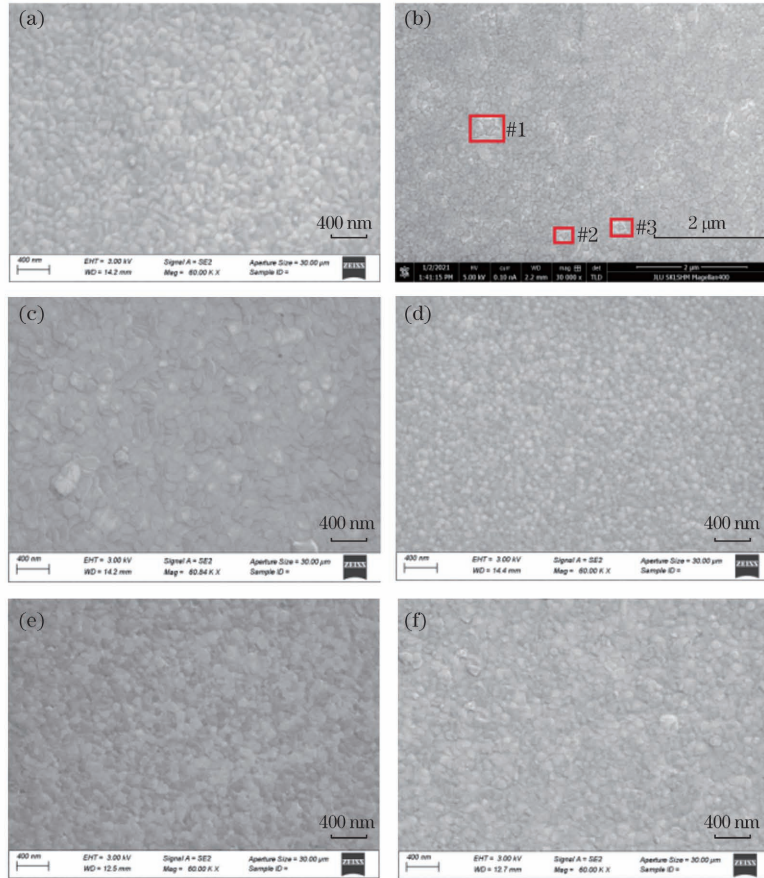


图 7 n 型和 p 型 GaAs 欧姆接触的 SEM 形貌。(a) n 型 GaAs 基合金系统样品退火前；(b) Au/Ni/AuGe/Ni 合金系统退火后；(c) Au/Cr/AuGe/Ni 合金系统退火后；(d) p 型 GaAs 基合金系统样品退火前；(e) Ti/Pt/Au 合金系统退火后；(f) Ti/Cr/Au 合金系统退火后

Fig. 7 SEM morphologies of n-type and p-type GaAs ohmic contacts. (a) n-type GaAs alloy system samples before annealing; (b) Au/Ni/AuGe/Ni alloy system after annealing; (c) Au/Cr/AuGe/Ni alloy system after annealing; (d) p-type GaAs alloy system samples before annealing; (e) Ti/Pt/Au alloy system after annealing; (f) Ti/Cr/Au alloy system after annealing

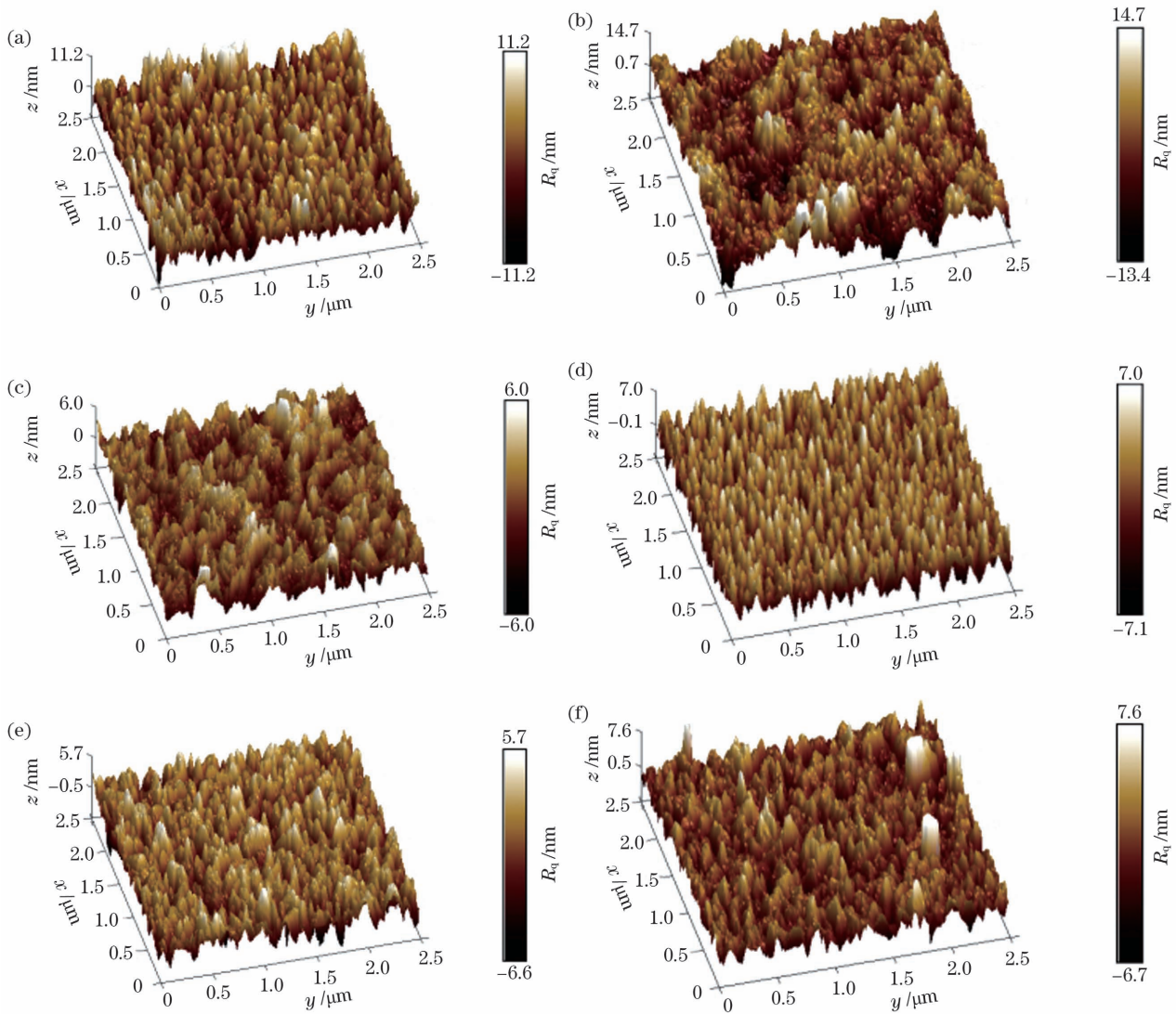


图 8 n 型和 p 型 GaAs 欧姆接触的 AFM 形貌。(a) n 型 GaAs 基合金系统样品退火前；(b) Au/Ni/AuGe/Ni 合金系统退火后；(c) Au/Cr/AuGe/Ni 合金系统退火后；(d) p 型 GaAs 基合金系统样品退火前；(e) Ti/Pt/Au 合金系统退火后；(f) Ti/Cr/Au 合金系统退火后

Fig. 8 AFM morphologies of n-type and p-type GaAs ohmic contacts. (a) n-type GaAs alloy system samples before annealing; (b) Au/Ni/AuGe/Ni alloy system after annealing; (c) Au/Cr/AuGe/Ni alloy system after annealing; (d) p-type GaAs alloy system samples before annealing; (e) Ti/Pt/Au alloy system after annealing; (f) Ti/Cr/Au alloy system after annealing

Ti/Cr/Au(40 nm/30 nm/200 nm), 典型合金系统为 Au/Ni/AuGe/Ni(300 nm/45 nm/100 nm/5 nm) 和 Ti/Pt/Au(40 nm/40 nm/200 nm), n 型欧姆接触样品的退火条件均为 420 °C/60 s, p 型欧姆接触样品的退火条件均为 440 °C/60 s。

退火前, 同型合金系统样品的表面形貌几乎无差别, 颗粒均匀, 膜层比较致密, 无裂纹、孔隙等缺陷存在。但由于薄膜厚度不同, 长时间溅射真空室内温度升高, 因此表面颗粒增大, 所以 p 型样品表面的颗粒更小、更平整。由图 7(b)、(c) 可以看出, n 型 GaAs 表面的两种合金系统在退火后表面形貌都发

生了不同程度的变化, 但是可以明显看出: Au/Ni/AuGe/Ni 合金系统退火后颗粒变大, 表面粗糙, 界面不平整, 且由于金属层发生不同程度的收缩, 出现了轻微的缩球现象, 导致金属层表面形成了孔洞, 如图 7(b) 中矩形框所示; Au/Cr/AuGe/Ni 合金系统在退火后的表面形貌同样发生了变化, 但颗粒仍然较小, 表面依然致密平整, 没有孔洞与裂痕生成, 表面形貌良好。由图 7(e)、(f) 可以看出, p 型 GaAs 表面的 Ti/Pt/Au 和 Ti/Cr/Au 合金系统在退火后表面颗粒均变大, 但表面依然致密平整, 没有孔洞与裂痕生成, 保持着良好的表面形貌。

由图 8(a)~(c)可知,n 型 GaAs 基合金系统样品退火前的均方根表面粗糙度 R_q 为 3.20 nm,Au/Ni/AuGe/Ni 合金系统退火后的均方根表面粗糙度为 3.84 nm,Au/Cr/AuGe/Ni 合金系统退火后的均方根表面粗糙度为 1.67 nm。可以看出,退火后 Au/Cr/AuGe/Ni 合金系统的表面具有更好的平整度。由图 8(d)~(f)可知,p 型 GaAs 基合金系统样品退火前的均方根表面粗糙度为 2.08 nm,退火后 Ti/Pt/Au 和 Ti/Cr/Au 合金系统的均方根表面粗糙度分别为 1.73 nm 和 1.92 nm。可以看出,除了 Au/Ni/AuGe/Ni 合金系统由于退火后产生较多孔洞而导致表面粗糙度增大之外,其余合金系统退火后的表面粗糙度均降低,这是因为在最优合金化条件下晶粒变大发生重结晶现象并且薄膜应力得到了释放^[25]。

4 结 论

针对 GaAs 欧姆接触,设计了具有 Cr 阻挡层的 Au/Cr/AuGe/Ni 和 Ti/Cr/Au 合金系统,对最优 Cr 阻挡层厚度和最优退火条件进行了探究,并将设计的合金系统与常规合金系统 Au/Ni/AuGe/Ni 和 Ti/Pt/Au 进行对比分析。通过工艺优化,在 420 °C/60 s 条件下退火后的新型合金系统 Au/Cr/AuGe/Ni 的比接触电阻率低至 $2.63 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$,与在相同基底上镀制的 Au/Ni/AuGe/Ni 合金系统的最低比接触电阻率 $1.54 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 相比降低了近一个数量级。在 440 °C/60 s 条件下退火的 p 型合金系统 Ti/Cr/Au 的比接触电阻率为 $6.99 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$,与在同基底上制作的 Ti/Pt/Au 合金系统的最低比接触电阻率 $1.98 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 相当,且在 420~460 °C 相对较宽的温度范围内均可获得较低的比接触电阻率。XRD 分析显示,Cr 阻挡层有效阻止了 Ga 元素的向上扩散和 Au_xGa_y 合金的形成,提升了欧姆接触质量。SEM 和 AFM 的表征结果显示,具有 Cr 阻挡层的 Au/Cr/AuGe/Ni 合金系统具有良好的、均匀平整的表面,大大改善了常规 Au/Ni/AuGe/Ni 合金系统表面缩球、粗糙度增大等劣化现象,同时 Ti/Cr/Au 合金系统也具有较好的表面特性,与 Ti/Pt/Au 合金系统的性能相当。

本文设计的具有 Cr 阻挡层的欧姆接触电极能够满足半导体器件的要求,可以提高半导体器件的性能和可靠性,且具有容易制备、成本低廉的特点,有利于大批量制备。

参 考 文 献

- [1] 王启明. 中国半导体激光器的历次突破与发展(邀请论文)[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2190-2197.
Wang Q M. Breakthroughs and developments of semiconductor laser in China (invited paper) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2190-2197.
- [2] 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1-19.
Wang L J, Ning Y Q, Qin L, et al. Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(1): 1-19.
- [3] 李俊承. InGaAsSb 半导体激光器欧姆接触的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 24-29.
Li J C. The studied of ohmic contact on the InGaAsSb semiconductor lasers [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 24-29.
- [4] 曹志芳. N 型 GaN 欧姆接触研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 19-23.
Cao Z F. Study on the ohmic contact of N-type GaN [D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 19-23.
- [5] 王跃, 刘国军, 李俊承, 等. GaSb 基半导体激光器功率效率研究[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0102010.
Wang Y, Liu G J, Li J C, et al. Study of the ohmic contact of GaSb-based semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1): 0102010.
- [6] 赵越. 大功率 GaAs 光导开关热设计技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2011: 86-91.
Zhao Y. Investigation of thermal design technology for high-power GaAs photoconductive semiconductor switches [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2011: 86-91.
- [7] Szerling A, Karbownik P, Łaszcz A, et al. Low-resistance p-type ohmic contacts for high-power InGaAs/GaAs-980 nm CW semiconductor lasers[J]. Vacuum, 2008, 82(10): 977-981.
- [8] 王尘, 许怡红, 李成, 等. 基于两步退火法提升 Al/n⁺Ge 欧姆接触及 Ge n⁺/p 结二极管性能[J]. 物理学报, 2019, 68(17): 178501.
Wang C, Xu Y H, Li C, et al. Improved performance of Al/n⁺Ge Ohmic contact and Ge n⁺/p diode by two-step annealing method[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(17): 178501.
- [9] 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[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989: 118-165.
Wu D F, Yan B D. The principle, test and process of ohmic contact at the metal-semiconductor interface [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1989: 118-165.

- [10] 张万荣, 李志国, 穆甫臣, 等. 具有 TiN 扩散阻挡层的 n-GaAs 欧姆接触的可靠性 [J]. 半导体学报, 2000, 21(6): 608-613.
Zhang W R, Li Z G, Mu F C, et al. Reliability of n-GaAs ohmic contact with TiN diffusion barrier [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(6): 608-613.
- [11] Li H O, Yin J J, Zhang H Y, et al. Ohmic contact to n-type GaAs by a new six-layer metal system [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2006, 29(1): 9-11, 109.
- [12] Sahoo K C, Chang C W, Wong Y Y, et al. Novel Cu/Cr/Ge/Pd ohmic contacts on highly doped n-GaAs [J]. Journal of Electronic Materials, 2008, 37(6): 901-904.
- [13] Wang Y H, Wang Y, Li L J, et al. Research on rapid thermal annealing of ohmic contact to GaAs [C] // 2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics, August 23-25, 2012, Changchun, China. New York: IEEE Press, 2012: 61-63.
- [14] 刘丹丹, 王勇, 叶镇, 等. 具有 Pt 扩散阻挡层的 n-GaAs 欧姆接触的可靠性 [J]. 半导体技术, 2014, 39(11): 846-849, 877.
Liu D D, Wang Y, Ye Z, et al. Reliability of ohmic contact to n-GaAs with Pt diffusion barrier [J]. Semiconductor Technology, 2014, 39(11): 846-849, 877.
- [15] Iwai N, Mukaiharu T, Itoh M, et al. 1.3 μm GaInAsP SL-QW Al-oxide confined inner stripe lasers on p-InP substrate with AlInAs-oxide confinement layer [J]. Electronics Letters, 1998, 34(14): 1427-1428.
- [16] 杨立杰, 李拂晓, 蒋幼泉, 等. P 型 GaAs 欧姆接触的制作 [J]. 固体电子学研究与进展, 2007, 27(3): 427-430.
Yang L J, Li F X, Jiang Y Q, et al. Formation of ohmic contacts to P-GaAs [J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2007, 27(3): 427-430.
- [17] 刘梦涵, 崔碧峰, 何新, 等. p 型 GaAs 欧姆接触性能研究 [J]. 激光与红外, 2016, 46(5): 578-582.
Liu M H, Cui B F, He X, et al. Study on the ohmic contact property of p-type GaAs [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(5): 578-582.
- [18] 杨晓妍. GaAs 外延层蒸镀 Cr 和 Au 膜制作欧姆接触工艺 [J]. 光学精密工程, 1995, 3(2): 64-66.
Yang X Y. A technique of making ohmic contact with Cr and Au plating evaporated on GaAs epilayer [J]. Optics and Precision Engineering, 1995, 3(2): 64-66.
- [19] 刘青. GaAs 半导体激光器的欧姆接触研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 33-34.
Liu Q. Investigation to ohmic contact of GaAs semiconductor lasers [D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 33-34.
- [20] 解金山, 孙序文. p-GaAs, p-InP 上用 Ti-Pt 作欧姆接触的研究 [J]. 中国激光, 1984, 11(3): 187-189.
Xie J S, Sun X W. Study of Ti-Pt ohmic contact on p-GaAs and p-InP [J]. Chinese Journal of Lasers, 1984, 11(3): 187-189.
- [21] 宋淑芳, 赵建建, 谭振, 等. 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.
Song S F, Zhao J J, Tan Z, et al. Study on ohmic contacts of low doped concentration n-GaAs [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(11): 1252-1255.
- [22] 肖和平, 朱迪. AuGe/Au 与 GaAs 退火处理特性研究 [J]. 量子电子学报, 2018, 35(6): 730-735.
Xiao H P, Zhu D. Properties of AuGe/Au on GaAs annealing treatment [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(6): 730-735.
- [23] 吴涛, 江先锋, 周旻超, 等. 退火参数对 p 型 GaAs 欧姆接触性能的影响 [J]. 电子元件与材料, 2013, 32(4): 24-27.
Wu T, Jiang X F, Zhou M C, et al. Influences of annealing parameters on the ohmic contact property of p-type GaAs [J]. Electronic Components and Materials, 2013, 32(4): 24-27.
- [24] Lin T, Xie J N, Ning S H, et al. Study on the p-type ohmic contact in GaAs-based laser diode [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2021, 124: 105622.
- [25] 贺悦. 退火温度对金属薄膜残余应力和机械性能影响的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009: 32-41.
He Y. Effect of temperature on residual stress and mechanical properties of Ti films prepared by both ion implantation and ion beam assisted deposition [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009: 32-41.

GaAs Ohmic Contact Process with Cr Barrier Layer

Li Bo, Li Hui, Li Xiaoxue, Yan Hao, Hao Yongqin*

State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, Jilin, China

Abstract

Objective With the increased use of semiconductor devices, there are high requirements for device performance, which is directly affected by ohmic contact. Low specific contact resistivity is crucial for reducing the contact resistance of a device, thus decreasing the threshold current and improving the electro-optical conversion efficiency. The most widely used alloy system for n-GaAs ohmic contacts is Au/AuGe/Ni, which has the advantages of a mature process and high ohmic contact quality. However, the low melting point of AuGe eutectic causes varying degrees of shrinkage of Au and Ge during the alloying process, which deteriorates the surface of the metal layer. The p-GaAs ohmic contact, Ti/Pt/Au alloy system, has high reliability and stability in an ohmic contact preparation but is expensive for large-scale preparations. In the ohmic contact alloy system, the diffusion barrier layer acts as an isolation layer to prevent mutual diffusion between the electrode layers, thus significantly improving the stability and reliability of the ohmic contact. Therefore, new ohmic contact structures have been proposed to improve ohmic contact characteristics. Cr has good stability, high conductivity, and resistance to wear and corrosion, which can enhance the wear resistance and film quality of the alloy. In this study, GaAs-based p/n ohmic contact alloy system, Au/Cr/AuGe/Ni, and Ti/Cr/Au alloy systems were designed using Cr as the diffusion barrier layer. The alloying conditions and thickness of the Cr layer were optimized, and their advantages in ohmic contact characteristics were analyzed and compared with conventional alloy systems.

Methods The n-type GaAs ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) and p-type GaAs ($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) samples were grown using metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). Further, Au/Cr/AuGe/Ni (300 nm/40–55 nm/100 nm/5 nm) and Ti/Cr/Au (40 nm/ 20–50 nm/200 nm) were deposited on the surface of the two sample types using magnetron sputtering technology. The 10 electrode rings of the dot transmission line model were fabricated using photolithography and lift-off techniques. The radius of each inner circle is 80 μm , whereas the radius of each outer circle with a gradient of 10 μm increases from 90 to 180 μm . The current-voltage curves were tested using a probe setup and a KEITHLEY2400 digital source meter after the samples were annealed in a nitrogen atmosphere; the specific contact resistivity can be calculated. The surface morphology of the samples was characterized using scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM), and the film components were analyzed using X-ray diffraction (XRD).

Results and Discussions The specific contact resistivities of Au/Cr/AuGe/Ni (300 nm/45 nm/100 nm/5 nm) and Ti/Cr/Au (40 nm/30 nm/200 nm) samples annealed within the temperature range of 380–480 $^{\circ}\text{C}$ and alloying time of 60 and 120 s were calculated. Figure 3 shows the results. For the Au/Cr/AuGe/Ni alloy system, the lowest specific contact resistivity under annealing condition of 420 $^{\circ}\text{C}$ for 60 s is $2.63 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$. This is nearly an order of magnitude lower than $1.54 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, which is achieved by the Au/Ni/AuGe/Ni alloy system plated on the same substrate. In contrast, the Ti/Cr/Au alloy system has a specific contact resistivity of $6.99 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ at 440 $^{\circ}\text{C}$ for 60 s, which is comparable to the lowest specific contact resistivity of $1.98 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ for the Ti/Pt/Au alloy system fabricated on the same substrate. For the different Cr thicknesses, Au/Cr/AuGe/Ni (300 nm/ d_n /100 nm/5 nm) and Ti/Cr/Au (40 nm/ d_p /200 nm) alloy system samples were alloyed at 420 $^{\circ}\text{C}$ for 60 s and the specific contact resistivity was determined (Table. 1). The Au/Cr/AuGe/Ni system has a pattern of higher to lower to higher specific contact resistivity in the 40–55 nm range, with a smaller value of 45 nm. The Ti/Cr/Au system has the same pattern in the 20–50 nm range, with a smaller value of 30 nm. To investigate the alloying process of the alloy system, an XRD scanning analysis was performed on the surface of the samples before and after annealing (Figs. 5 and 6). The surface phase of the Au/Cr/AuGe/Ni system remained unchanged after annealing, which indicated that the Cr layer was crucial in the diffusion barrier, preventing the generation of Au_xGa_y alloy. However, the generated $\text{Cr}_{11}\text{Ge}_8$ -like metal substances reduced the contact resistance and improved the ohmic contact quality. The Pt and Cr layers within the p-type ohmic contact system also performed as a good diffusion barrier, thus

enhancing the stability of the ohmic contact. Figures 7 and 8 demonstrate the SEM and AFM surface morphology of several alloy systems before and after annealing. The Au/Cr/AuGe/Ni alloy system has a flatter surface after annealing compared with the conventional Au/Ni/AuGe/Ni alloy system, whereas both Ti/Cr/Au and Ti/Pt/Au alloy systems have good surface morphology after annealing.

Conclusions An ohmic alloy system with a Cr barrier layer was optimized for GaAs ohmic contacts in this study. At 420 °C / 60 s annealing, the new alloy system, Au/Cr/AuGe/Ni, has a low specific contact resistivity of $2.63 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, whereas the p-type alloy system, Ti/Cr/Au, has a resistivity of $6.99 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ at 440 °C / 60 s annealing. Simultaneously, both structures achieved a low specific contact resistivity over a relatively wide temperature of 420–460 °C. The XRD analysis indicates that the Cr barrier layer effectively achieves a diffusion barrier and improves the ohmic contact quality. SEM and AFM characterization results indicate that the Au/Cr/AuGe/Ni alloy system with a Cr barrier layer has a uniform and flat surface, and the Ti/Cr/Au system has good surface properties. The Au/Cr/AuGe/Ni alloy system improves significantly in ohmic contact performance compared with the conventional Au/Ni/AuGe/Ni alloy system; the Ti/Cr/Au alloy system is comparable with the Ti/Pt/Au alloy system. Thus, ohmic contact electrodes with a Cr barrier layer meet the requirements of semiconductor devices and facilitate batch use.

Key words materials; semiconductor device; ohmic contact; diffusion barrier layer; alloying; specific contact resistivity