

具有 TiN 扩散阻挡层的 n-GaAs 欧姆接触的可靠性*

张万荣 李志国 穆甫臣 程尧海 孙英华 郭伟玲 陈建新 沈光地

(北京工业大学电子工程系, 北京 100022)

张玉清 张慕义

(信息产业部第 13 研究所, 石家庄 050051)

摘要: 提出了金属-半导体欧姆接触退化的快速评估方法——温度斜坡快速评价法, 并建立了自动评估系统, 用该方法和系统测得的欧姆接触退化激活能, 和传统方法相比, 耗时少, 所需样品少, 所得结果和传统方法一致。针对传统 AuGeNi/Au 欧姆接触系统的缺点, 提出了加 TiN 扩散阻挡层的新型欧姆接触系统。实验表明新型欧姆接触系统的可靠性远远优于传统 AuGeNi/Au 欧姆接触系统。

关键词: 欧姆接触; 可靠性; 阻挡层

EEACC: 2560S; 2550F; 2530D; 7310J; 0590; 2180

中图分类号: TN 304. 2⁺ 3 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2000)06-0608-06

Reliability of n-GaAs Ohmic Contact With TiN Diffusion Barrier*

ZHANG Wan-rong, LI Zhi-guo, MU Fu-chen, CHENG Yao-hai,
SUN Ying-hua, GUO Wei-ling, CHEN Jian-xin and SHEN Guang-di

(Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

ZHANG Yu-qing and ZHANG Mu-yi

(The 13th Institute, The Ministry of Information Industry, Shijiazhuang 050051, China)

Received 24 March 1999, revised manuscript received 18 June 1999

* 北京市科技新星计划资助项目[Project Supported by Scientific and Technologic Program for New Stars of Beijing].

张万荣 男, 1964 年出生, 博士, 副教授, 现从事异质结器件的开发和可靠性研究工作。

李志国 男, 1940 年出生, 博士生导师, 现从事微电子器件可靠性研究工作。

穆甫臣 男, 博士生, 现在北京大学微电子所从事微电子器件的可靠性研究工作。

1999-03-24 收到, 1999-06-18 定稿

Abstract: A rapid evaluation method——temperature ramp method, for GaAs MESFETs ohmic contacts is proposed, and an automatic evaluation system has been developed. By using these method and system, activation energy for ohmic contacts degradation can be obtained with less time and samples than traditional method, but the results are in agreement with those obtained by traditional methods. In accordance with the drawbacks of traditional AuGeNi/Au ohmic contacts, a new ohmic contacts system with TiN diffusion barrier layer is proposed. Experimental results show that the reliability of ohmic contacts with TiN are greatly superior to that of traditional AuGeNi/Au ohmic contacts.

Key words: ohmic contact; reliability; barrier layer

PACC: 2560S; 2550F; 2530D; 7310J; 0590; 2180

Article ID: 0253-4177(2000)06-0608-06

1 引言

GaAs MESFETs 以其优异的性能被广泛应用于微波无线电通讯、雷达、卫星、航空航天等领域。它们的可靠性直接影响着这些应用领域系统和设备的可靠性。器件和电路信号的输入输出及其各元件间的相互互联结都要依靠接欧姆结来完成。欧姆接触质量的好坏,接触电阻的大小及其可靠性,直接影响器件的功率、噪声、增益等性能和使用^[1,2]。随着器件尺寸的不断缩小,欧姆接触的面积也随之缩小,流经欧姆接触的电流密度增加,在大电流、强电场和高温下欧姆接触的可靠性变得越来越重要^[3~5]。传统 AuGeNi/Au 欧姆接触系统,由于金属化形貌不平整(表现为 Au、Ge 在合金过程中存在不同程度的缩球现象,以及金属化边缘由于受热引起的收缩)和欧姆接触特性的退化(主要由于 Au 很容易同外扩的 Ga 形成 Au-Ga 合金, GaAs 界面的非理想配比引起补偿使接触电阻增大),已逐渐不能满足 GaAs 器件和电路的性能及可靠性提出的要求。传统的器件评估的方法多用高温贮存,耗时长(有时长达几个月甚至半年),所需器件(样品)多,所得数据分散,这也越来越不能适应时代对器件可靠性评价的要求。本论文提出了一种在加电流应力下的温度斜坡快速评价法,建立了自动评估系统。该方法耗时少,所需器件(样品)少,所得结果和传统方法一致,而且也可得到小应力条件的退化激活能。针对传统 AuGeNi/Au 欧姆接触系统的缺点,在常规 Au-GeNi/Au 欧姆接触基础上,提出了加 TiN 扩散阻挡层的新型欧姆接触系统。实验表明新型欧姆接触系统的可靠性远远优于传统 AuGeNi/Au 欧姆接触系统。

2 欧姆接触快速评估方法和自动评估系统

为了快速地评价 GaAs MESFET 欧姆接触,给欧姆接触加一电流应力,同时加一随时间线性变化的温度应力(即温度斜坡)。对 MESFET 电流流经沟道时导致的温升 ΔT 通过肖特基势垒二极管的温度特性(一固定小电流下的正向压降与温度的关系)而求得。对欧姆接触样品,电流流经沟道时导致的温升 ΔT 由沟道电阻 R_{chT} 随温度 T 的变化关系得到。欧姆接触退化而导致电阻的增加 R_{em} 可表示为

$$R_{em} = R - R_0 - R_p - R_{chT} \quad (1)$$

式中 R 为实测电阻; R_0 为实验前室温下 R_{DS} 值,它们由小电流下 $V-I$ 线性关系得到(V/I); R_{chT} 为器件沟道电阻,源、漏欧姆接触金属及内外引线电阻随温度的变化(这里之所以用 R_{chT} 表示是因为温升电阻主要由沟道电阻 R_{ch} 引起); R_p 为器件内外引线,源、漏欧姆接触金属所引入的寄生电阻, R_p 所引入的误差在 0.5% 左右,可忽略不计。由此,得

$$R_{em} = R - R_0 - R_{chT} \quad (2)$$

设随时间线性增大的温度应力 T (样品的环境温度)为

$$T' = T_0 + \beta t$$

这里 T_0 为初始温度; β 为温度 T 的时间变化率; t 是时间.

考虑到电流应力引起的温升 ΔT 后, 样品的沟道实际温度为

$$T = T_0 + \beta t + \Delta T \quad (3)$$

将公式(3)对时间求微分, 可得:

$$dT = \beta dt \quad (4)$$

根据电徙动理论的阿伦尼乌斯关系:

$$\frac{1}{R_0} \times \frac{dR_{em}}{dt} = A j^n \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (5)$$

式中 k 是 Boltzman 常数. 将(4)式代入(5)式, 得:

$$\frac{1}{R_0} dR_{em} = A j^n \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \frac{dT}{\beta} \quad (6)$$

对(6)式两边积分:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_0} \int_0^{R_{em}} dR_{em} &= \frac{A j^n}{\beta} \int_0^T \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dT \\ \text{只要 } \frac{Q}{2kT} \gg 1, \text{ 就有 } \int_0^T \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dt &\approx \frac{k}{Q} \left[T^2 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) - T_0^2 \exp\left(-\frac{Q}{kT_0}\right) \right], \text{ 故} \\ \frac{R_{em}}{R_0} &\approx \frac{A K j^n}{\beta \theta} \left[T^2 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) - T_0^2 \exp\left(-\frac{Q}{kT_0}\right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

因为 T_0 较小, 所以 $T^2 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \gg T_0^2 \exp\left(-\frac{Q}{kT_0}\right)$, 因而(7)式右边的第二项可略去, 得

$$\begin{aligned} \frac{R_{em}}{R_0} &= \frac{A k j^n}{\beta Q} T^2 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \\ T^{-2} \frac{R_{em}}{R_0} &= \frac{A k j^n}{\beta Q} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

对上式两边取对数, 得:

$$\ln \left[T^{-2} \frac{R_{em}}{R_0} \right] = \ln C - \frac{Q}{kT}$$

在 $\ln \left[T^{-2} \frac{R_{em}}{R_0} \right] - \frac{1}{T}$ 的关系图中, 若直线的斜率为 S , 则欧姆接触电阻退化的激活能 Q 为

$$Q = -kS \quad (9)$$

此方法假设截面积不随时间变化, 电流密度始终为一常数, 而这种假设只在电徙动早期阶段基本成立, 因此应在 $\frac{R_{em}}{R_0}$ 小于 10% 的范围内求 Q 值. 该方法为动态测试法, 具有实验数据离散性小, 快速方便等优点. 而且还可以研究低温环境对欧姆接触的影响, 从而可以研究实际器件工作的低温过程.

为了实时准确地监控欧姆接触电阻的变化, 减少人为因素, 本实验设计并建立了全自动评估系统. 该系统用 PC-586 计算机作主控器, 以国际通用接口(GPIB) IEEE-488 总线为数据通讯基础, 编制了计算程序和程控测试仪器的程控程序, 控制 HP6625A 双路电源、HP6031A 电源, HP3457A 万用表和程控温箱, 数据经分析处理后显示在屏幕上并存成数据文件. 实验系统框图如图 1 所示. 器件夹具采用了陶瓷厚膜电路, 采用耐高温的电阻和电容, 用高温导线连接测控仪器和夹具. 用该系统, 在几十个小时内就可以测得欧姆接触退化的激活能, 得到的 AuGeNi/Au 欧姆接触退化的激活能和文献中用传统的方法得到的结果一致.

3 对 AuGeNi 金属化系统的改进——加 TiN 扩散阻挡层

根据 AuGeNi/Au 欧姆接触退化的机理, 考虑到 TiN 熔点高, 热稳定性和化学稳定性好, 有较高的热导率和电导率, 有极高的硬度、较小的晶粒间界和较低的体扩散系数等优点^[6], 设计和制作了具有

TiN扩散阻挡层的欧姆接触并对TiN的厚度进行了优化。改进的AuGeNi金属化系统结构示意图如图2所示。在AuGeNi/Au金属化系统中在Au覆层下加一层TiN,有以下作用:①扩散阻挡层,阻止Au的内扩和Ga、As的外扩;②在欧姆接触的制备过程中,能有效地阻止GaAs分解;③能有效改善其热稳定性,并延长欧姆接触的寿命。为了使TiN与上、下层金属有好的粘附性,TiN两边都要分别加一薄层Ti。Ti/TiN/Ti是用磁控溅射的方法得到的,抽真空到 1.3×10^{-5} Pa,溅射15nm的Ti,然后通入高纯He气和N₂的混合气体(N₂:He=1:5),总压强为0.013Pa时,溅射100nm的TiN,再关闭Ar和N₂气,抽真空到 10^{-5} Pa,溅射15nm的Ti,溅射时衬底不加偏压。其上面的厚金,是用电镀方法得到的,再用剥离工艺形成接触图形。

Au: 2—2μm
Ti: 15nm
TiN: 100nm
Ti: 15nm
AuGeNi: 600nm

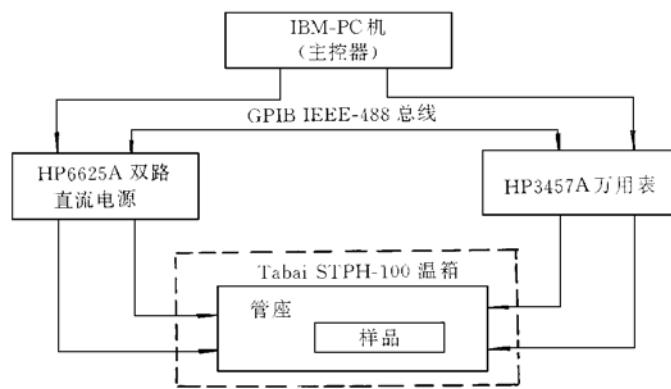
图2 改进的AuGeNi金属化系统结构示意图

FIG. 2 Structure of Improved AuGeNi Metallization System

的。同时还说明,温度斜坡法确实能够快速评价欧姆接触的可靠性水平。从实验过程看,无TiN阻挡层的样品,主要失效模式为烧毁,有TiN阻挡层的样品无一烧毁。实验后样品的显微照片如图3所示,可以看出无TiN的样品已完全烧毁(短路),有TiN的样品,不但还保持电学特性,从外观上也没有多大变化。这说明,加TiN阻挡层大大提高了样品的抗烧毁能力,大大地提高了欧姆接触的可靠性。把具有TiN扩散阻挡层的欧姆接触系统用于信息产业部13所GaAs MESFET中,也取得了较好的效果,在200℃,280—333℃加速寿命试验中,与无TiN欧姆接触器件比较,器件的源、漏欧姆接触电阻的退化(增大)大大减弱了。典型样品的实验结果如图4所示。

图1 实验系统框图

FIG. 1 Block Diagram of Experiment System



4 实验条件和实验结果

我们对大量的欧姆接触样品进行了实验,典型样品L6、L12、LN2和LN6的实验条件如表1和表2所示。从测试结果看,AuGeNi/Au金属化系统的激活能基本落在了文献报道的0.4—1.5eV范围内^[4,5,7,8]。改进样品的激活能,比没改进样品的激活能大大提高,因而大大提高了欧姆接触的可靠性水平,达到了改进的目的。

表1 有TiN阻挡层样品的应力条件

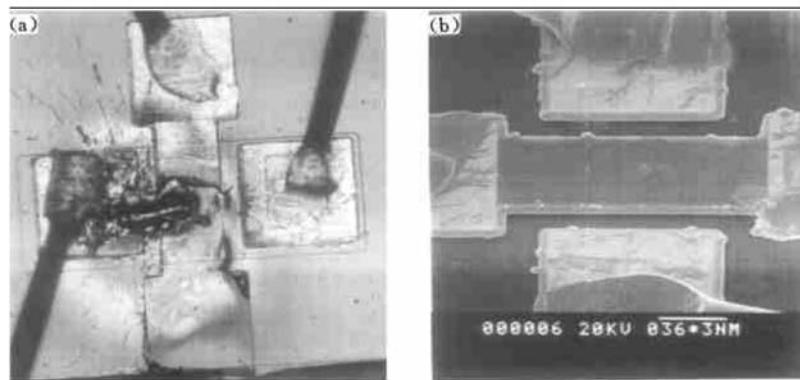
Table 1 Stressing Condition for Samples with TiN Diffusion Barrier Layer

样品 编号	饱和电压 V_{sat}/V	饱和电流 I_{sat}/mA	应力电流 I_{str}/mA	横向电流密度 $j_{\text{横}}/(10^6 A \cdot cm^{-2})$	纵向电流密度 $j_{\text{纵}}/(10^5 A \cdot cm^{-2})$	应力电流下 沟道温升/ $^{\circ}C$	温升速率 $(^{\circ}C \cdot min^{-1})$
L6	13	50	25	0.63	0.38	31	0.042
L12	12	70	30	0.75	0.45	25	

表 2 传统的 AuGeNi 欧姆接触样品的应力条件

Table 2 Stressing Condition for Traditional AuGeNi Ohmic Contact Samples

样品 编号	饱和电压 V_{sat}/V	饱和电流 I_{sat}/mA	应力电流 I_{str}/mA	横向电流密度 $j_{横}/(10^6 A \cdot cm^{-2})$	纵向电流密度 $j_{纵}/(10^5 A \cdot cm^{-2})$	应力电流下 沟道温升/ $^{\circ}C$	温升速率 $(^{\circ}C \cdot min^{-1})$
LN2	14	60	30	0.75	0.45	32	
LN6	12	80	30	0.75	0.45	27	0.25



(a) (b)

图 3 (a) 实验后, 无 TiN 阻挡层样品烧毁的 SEM 照片;

(b) 实验后, 有 TiN 阻挡层样品的 SEM 照片

FIG. 3 (a) Burn-out SEM Micrographs for Sample Without TiN

Diffusion Barrier Layers After Experiment

(b) SEM Micrographs for Sample with TiN

Diffusion Barrier Layers After Experiment

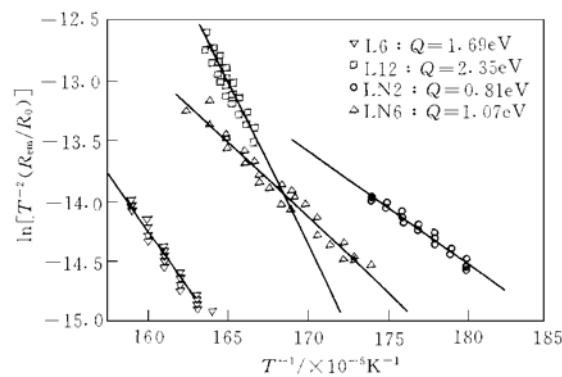


图 4 两种样品的退化激活能

FIG. 4 Degradation Activation Energy for
Two Types of Samples

5 结论

提出了GaAs MESFET欧姆接触可靠性快速评估法——温度斜坡法,并建立了自动评估系统,用该方法和系统,测得欧姆接触退化的激活能和文献报道一致,所需样品少,耗费时间短,克服了传统评估方法耗时长,所需样品多的缺点。针对AuGeNi/Au传统欧姆接触的缺点,提出了加TiN扩散阻挡层的新型欧姆接触,实验结果表明,新欧姆接触的可靠性得到大大提高。

参 考 文 献

- [1] 穆甫臣,李志国,张万荣,等,半导体学报,1999,20(3): 250—253[MU Fuchen, LI Zhiguo, ZHANG Wanrong *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(3): 250—253(in Chinese)].
- [2] 华文玉,陈存礼,半导体学报,1997,18(11): 872—876[HUA Wenyu and CHEN Cunli, Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(11): 872—876(in Chinese)].
- [3] 许振嘉,丁孙安,真空科学与技术,1994,14(2): 71[XU Zhenjia and DING Sun-an, Vacuum Science and Technology, 1994, 14(2): 71(in Chinese)].
- [4] T. C. Chen, G. B. Gao and H. Morkoc, J. Vac. Sci. Technol. B, 1992, 10(5): 2113.
- [5] 穆甫臣,李志国,郭伟玲,等,半导体技术,1998,23(5): 6[MU Fuchen, LI Zhiguo, GUO Weiling *et al.*, Semiconductor Technology, 1998, 23(5): 6(in Chinese)].
- [6] 张万荣,李志国,陈建新,等,微电子学与计算机,1998,15(5): 53[ZHANG Wanrong, LI Zhiguo, CHEN Jianxin *et al.*, Microelectronics and Computers, 1998, 15(5): 53(in Chinese)].
- [7] M. J. Howes and D. V. Morgan, Reliability and Degradation of Semiconductor Devices and Circuits, New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [8] E. Zanoni and A. Callegarri, Quality and Reliability Engineering International, 1990, 6(1): 29.