

n 型 4H-SiC 欧姆接触特性

陈 刚

(南京电子器件研究所, 南京 210016)

摘要: 对不同工艺条件下的 NiCr/4H-SiC 欧姆接触特性进行了对比研究, 得到了良好欧姆接触的最佳工艺条件, 为 SiC MESFET 器件的实现奠定了基础. 文中介绍了欧姆接触的工艺流程, 并通过 TLM 方法测量特征接触电阻率, 测得 NiCr/4H-SiC 的最佳特征接触电阻率达到 $1.24 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 能够很好地满足 SiC MESFET 器件的需要.

关键词: SiC; 欧姆接触; 特征接触电阻率; MESFET; 退火

EEACC: 2550A; 2550F

中图分类号: TN304.2⁺4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0273-04

1 引言

低阻抗欧姆接触对高频运用是必须的. 表征接触性能的物理量用得最广泛的是接触电阻和接触电阻率. 欧姆接触的稳定性、附着性在决定大功率和高温电子器件运行的最大电流密度、温度和频率方面起着重要作用.

SiC 材料在高温、高功率、高频和抗辐射等方面有很大优势, 但是要达到 SiC 器件实用化的目的, 仍存在若干工艺难点, 其中关键工艺技术之一是如何获得良好的欧姆接触. 欧姆接触的质量直接影响 SiC 器件的效率、增益、开关速度等性能指标, 不良的欧姆接触会使器件的工作性能和稳定性受到很大限制^[1].

欧姆接触并不意味着线性的电流-电压特性, 从实用观点出发, 良好的欧姆接触是指该接触电阻不严重影响器件的特性. 实际上有许多因素, 如表面晶格缺陷、沾污、氧化形成的表面态和深能级陷阱等对接触特性的影响也很大.

实验用 TLM 方法测量特征接触电阻率, TLM 结构如图 1 所示. 实际测量电阻由两个欧姆接触电阻与接触之间的电阻串联而成, 求解特征接触电阻率的相关公式如下:

$$R_{\text{测}} = 2R_c + \frac{R'_{\text{sh}}L}{W} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{R_{\text{sh}}L_t}{W} \quad (2)$$

$$L_x = 2 \frac{R'_{\text{sh}}L_t}{R'_{\text{sh}}} \quad (3)$$

$$\rho_c = R_cWL_t \quad (4)$$

式中 $R_{\text{测}}$ 是实际测量得到的电阻; R_c 是欧姆接触电阻; R'_{sh} 是欧姆接触之间的有源层薄层电阻; L 是接触之间的距离; W 是接触面宽度; R_{sh} 是欧姆接触下边的有源层的薄层电阻; L_x 是传输长度; ρ_c 是接触电阻率. R'_{sh} 和 R_{sh} 相差很小时近似相等, 故公式 (3) 可以转化为: $L_x = 2L_t$, 可以由此求出 L_t ^[2].



图 1 测量欧姆接触的 TLM 结构版图

Fig. 1 TLM structure for measuring ohmic contact

以欧姆接触之间的间距长度作为 x 轴, 以实际测量的电阻值作为 y 轴, 测量结果作为 L 的函数将是一条直线, 见图 2. 图中给出曲线斜率 R'_{sh}/W , 与 R 轴的截距为 $2R_c$, 与 L 轴的截距为 $-L_x$, 可得 L_t , 由公式 (4) 可以算出特征接触电阻率 ρ_c .

2 实验

实验使用 4H-SiC 材料, Si 面, 外延层为 n 型, 厚度为 $0.2 \mu\text{m}$, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} / \text{cm}^3$.

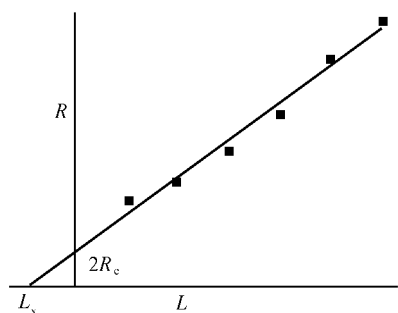


图 2 测量电阻作为间距的函数

Fig. 2 Measured resistance as a function of separation

制备欧姆接触的工艺途径是:光刻台面、反应离子刻蚀(RIE)去底膜干法腐蚀形成台面、清洗、光刻欧姆接触图形,反应离子刻蚀去底膜清洗和去氧化层、蒸发 NiCr、剥离清洗、快速退火合金、蒸发多层金属覆盖层、光刻、电镀、清洗去胶、离子铣。

欧姆接触的金属主要采用电子束蒸发,因为溅射时工作气压高,离子从不同方向轰击靶,靶上的原子和分子也从不同方向溅射到基片上,几乎在不同形貌的各个角落都有金属淀积,对金属剥离工艺不利。通常用 Ni 作为 SiC 上的欧姆接触金属^[3,4],再通过氢气还原快速退火合金形成良好的欧姆接触。我们选用 NiCr 金属与 4H-SiC 形成欧姆接触,一方面是 NiCr 金属在 4H-SiC 上形成的欧姆接触很有前途,另一方面是在高温快速退火合金过程中主要用氮气保护,没有氢气还原, Ni 金属可能氧化形成接触差的薄层,造成接触电阻大,而 NiCr 金属则不易氧化。

合金后需要在最上边覆盖一层金,而且厚度要在 $0.4\mu\text{m}$ 左右。金覆盖层的优点如下:(1) NiCr 与 SiC 合金退火后的薄层电阻大,覆盖金以后可提高薄层电导率,薄层电阻能显著下降;(2) 覆盖层可以改善表面形貌,提高光刻时的精度;(3) 避免接触电阻的退化。为了进一步减小电阻,我们采用选择电镀的方法将金层加厚到 $2\mu\text{m}$ 甚至更厚。

怎样得到最好的合金退火效果是一个关键点。合金退火的目的是为了形成接触良好、可靠性高的欧姆接触,为此除了蒸发金属的类型和厚度的选择外,就是合金退火的最佳的温度与时间。快速合金退火时间通常较短,最短 30s,最长 8min,我们也通过合金退火炉进行了慢速合金退火,以进行对比。合金退火采用加热炉法工艺,主要是其重复性好,没有局部合金温度不足的问题,而且在大圆片生产工艺中

应用广泛。

欧姆接触测量需要在合金退火并覆盖 Au 以后进行,因为合金层太硬,而且厚度薄,使得测量结果对压力和部位十分敏感,不能获得准确而重复的结果,而金层较软,能在探针尖周围形成良好的低电阻接触。其次,准确地得到接触电阻值必须严格地对测试图形进行计算,这项工作十分繁杂。

我们使用 TLM 法列形接触电阻测量图形,它的特点是不等间距和图形需要隔离。对于该模型,间距不能太小,否则边缘在光刻、合金退火等工艺过程中会产生一定的不规则边缘而引起较大误差,我们采用的光刻版的欧姆接触间隔为:6.4, 10.4, 14.4, 18.4, 22.4, $26.4\mu\text{m}$, 欧姆接触区为 $77.6\mu\text{m} \times 77.6\mu\text{m}$ 。从技术上看,引入误差最大的是探针与金属化图形的接触电阻,它与薄层接触电阻 R_c 接近,我们通过在同一个测试图形上同一个金属化层上反复进行多达 10 次的重复测试然后取其最小值来消除。另外,为了使得用以测试的图形保持良好的完整性,使图形与图形之间有很好的隔离,以保证电流只在接触之间预先准备并估量过的空间流动,在光刻版设计时,把金属化工艺需要的光刻图形内缩一定距离,以保证合金退火后的金属化工艺不再会对欧姆接触区图形产生影响。

3 结果和讨论

在 SiC 上蒸发 NiCr 后用高倍光学显微镜观察,表面十分光滑。退火后,表面变成颗粒状结构,说明 NiCr 与 SiC 发生了反应,在边界处有少许金属溢出欧姆接触图形区的现象,对此问题,我们在进行光刻版制造时已经考虑把欧姆接触区图形向内缩进 $1\mu\text{m}$,实际金属溢出远小于 $1\mu\text{m}$ 。

快速退火是在氮气保护下进行,时间为 5min,采用了两种温度条件,通过 TLM 方法得到的两个样品上的最佳特征接触电阻率与退火温度的关系如图 3 所示。可以看出温度对 NiCr/SiC 特征接触电阻率的影响很显著,因此在有条件下,可以考虑增加快速退火温度来获得更好的特征接触电阻率。

在快速退火的过程中,由于 SiC 样品是放在 100mm 废 Si 片上,所以同一样品各个位置存在热不均匀性,也有不同结果的特征接触电阻率。在 980°C 下退火 5min 后得到的样品上,我们测得了 18 组特征接触电阻率的数值,把 18 组特征接触电阻率

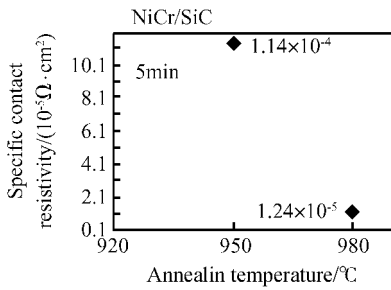


图3 特征接触电阻率与退火温度的关系

Fig. 3 Specific contact resistivity versus annealing temperature

与样品 18 个欧姆接触图形各自的位置相对应,如表 1 所示.可以看出样品各位置的特征接触电阻率有一定差异.如果增加快速退火温度到 1000°C,则各个位置的温度至少都能保证达到 980°C 以上,因此特征接触电阻率均可以达到 10⁻⁵ 量级以上,这已完全能满足当前的 SiC MESFET 器件的要求.

表 1 980°C 快速退火 5min 样品全片各位置的特征接触电阻率 Ω·cm

Table 1 Specific contact resistivity at different sample positions after 980°C and 5min annealing Ω·cm²

1.92×10^{-4}	8.40×10^{-5}	2.01×10^{-4}
8.07×10^{-5}	1.28×10^{-4}	2.30×10^{-5}
1.24×10^{-5}	1.24×10^{-4}	1.83×10^{-4}
5.00×10^{-5}	8.91×10^{-5}	1.33×10^{-4}
5.10×10^{-5}	6.52×10^{-5}	1.18×10^{-4}
9.23×10^{-5}	1.18×10^{-4}	7.12×10^{-5}

样品中最佳的特征接触电阻率的 TLM 方法测试曲线如图 4 所示.可以看出曲线中 6 个测试点的线性关系非常显著.特征接触电阻率计算结果如表 2 所示.

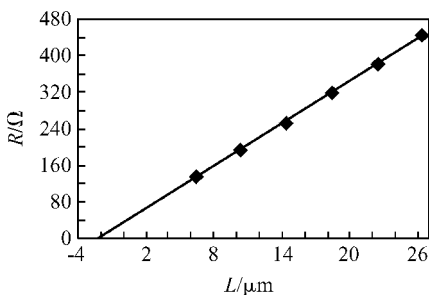


图 4 980°C 快速退火 5min 获得的最佳电阻-间距曲线

Fig. 4 Our best result of resistance versus separation curve after 980°C and 5min rapid thermal annealing

表 2 图 4 中特征接触电阻率的计算结果

Table 2 Calculated results of specific contact resistivity from Fig. 4

x 轴截距	$2L_1 = 2.0 \times 10^{-4} \text{ cm}$
y 轴截距	$2R_c = 0.32 \times 10^2 \Omega$
欧姆区方块宽度	$W = 77.6 \times 10^{-4} \text{ cm}$
特征接触电阻率	$\rho_c = R_c L_1 W$
ρ_c	$1.24 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$

在实验中,我们也采用了慢速退火的方法来对两种退火方法得到的特征接触电阻率进行比较.慢速退火条件为:先把放样品的密封腔体抽真空到 1.33Pa,充入 Ar 气,然后再次抽真空到 1.33Pa,再次充入 Ar 气保护,同时把退火炉升到 1000°C,然后把密封腔体推入退火炉中,温度下降到 650°C,经过 25min 左右再次升到 950°C,退火 5min 后,把密封腔体拉出退火炉降温.接触金属都为 NiCr,快速退火也在 950°C 下退火 5min,两种结果比较如图 5 所示.

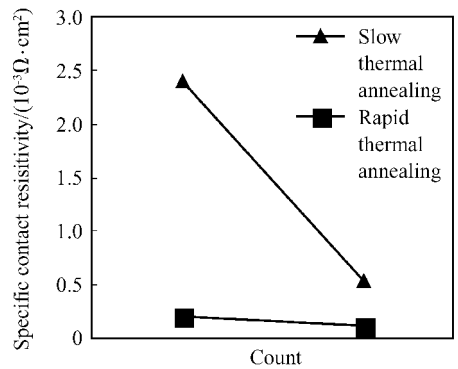


图 5 快、慢速退火的特征接触电阻率比较

Fig. 5 Comparison of specific contact resistivity between rapid and slow annealing

可以看出,快速退火样品的特征接触电阻率较好,而且各个位置的均匀性也比慢速退火好.但是慢速退火也能满足一定要求.而保护气体 Ar 气和 N₂ 均可,未发现有明显的变化.

4 结论

SiC MESFET 在功率器件方面的进展非常快,在军用和商用方面都引起了极大的关注.作为 SiC 器件的工艺问题之一,良好的 SiC 的欧姆接触对 SiC 器件的实用化非常重要.对于高功率器件,大的接触电阻必然带来因温度的升高而导致的热发射的

增加. 我们通过对合金材料 NiCr 与 n 型 4H-SiC 的欧姆接触研究, 得到了很好的结果, 特征接触电阻率最低达到了 $1.24 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 整个样品的特征接触电阻率基本保持在 10^{-5} 量级, 这个结果足已满足 SiC MESFET 在功率方面的实际应用, 为实用化的 SiC 各种新型器件的研究奠定了很好的基础.

致谢 在实验过程中得到南京电子器件研究所五中心广大同事的帮助, 特别是光刻工艺组全体成员的帮助, 在此深表谢意.

参考文献

[1] Hao Yue, Peng Jun, Yang Yintang. Silicon carbide wide

bandgap semiconductor technology. Beijing: Science Press, 2000(in Chinese)[郝跃, 彭军, 杨银堂. 碳化硅宽带隙半导体技术. 北京: 科学出版社, 2000]

[2] Li Xiaobai. GaAs microwave power field effect transistor and integrated circuit. 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]

[3] Weitzel C E, Palmour J W, Carter C H, et al. 4H-SiC MESFET with 2.8W/mm power density at 1.8GHz. IEEE Electron Device Lett, 1994, 15(10): 406

[4] Nisson P A, Saroukhan A M, Svedberg J O, et al. Characterization of SiC MESFETs on conducting substrates. Materials Science Forum, 2000, 338~342: 1255

n-Type 4H-SiC Ohmic Contact

Chen Gang

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: The difference of the characteristics of the NiCr/4H-SiC ohmic contact for different process conditions is studied. The condition for ohmic contact process is obtained, which is the base of the fabrication of the SiC MESFET devices. The process flow chart of ohmic contact is also introduced, and the specific contact resistivity is measured. The best result obtained for specific contact resistivity is $\rho_c = 1.24 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, which is good enough for SiC MESFET devices.

Key words: SiC; ohmic contact; specific contact resistivity; MESFET; annealing

EEACC: 2550A; 2550F

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0273-04