

# 基于二次溅射的 4H-SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 耐高温引线电极制备\*

路晶<sup>1)</sup> 李志强<sup>1)†</sup> 雷程<sup>1)‡</sup> 贾平岗<sup>1)</sup> 刘士琳<sup>1)</sup>  
余建刚<sup>1)</sup> 李永伟<sup>2)</sup> 梁庭<sup>1)</sup>

1) (中北大学, 宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室, 太原 030051)

2) (太原工业学院自动化系, 太原 030051)

(2025 年 6 月 20 日收到; 2025 年 8 月 8 日收到修改稿)

高温高压下硅基设备因自热效应漏电及形变, 无法长期稳定工作. 碳化硅作为第三代半导体在高温高频场景优势显著, 但其 4H-SiC 器件极限高温性能瓶颈源于欧姆电极与金属互连稳定性, 当前引线电极存在输出不稳定问题, 高温下氧气侵入易致输出失效. 研究在 SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 欧姆接触基础上, 提出分批次溅射退火工艺制备耐高温引线电极, 通过改变退火与溅射顺序, 先在 SiC 衬底溅射 Ti/TaSi<sub>2</sub> 并退火形成欧姆接触, 再沉积 Pt 保护层, 构建新型 SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 电极结构. 分批次溅射后退火形成的电极结构更致密, 600 °C 高温老化实验表明, Ti/TaSi<sub>2</sub> 形成欧姆接触后溅射 Pt 的电极电学性能更稳定, 即初始比接触电阻率为  $6.35 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 20 h 空气老化后仍保持欧姆特性; Pt 可有效抑制原子扩散和氧化反应使其电极微观形貌平整无卷曲. 分批次溅射退火工艺能显著提升 SiC 欧姆接触综合性能, 对其他金属组合欧姆接触的结构优化、稳定性提升及应用拓展具有重要指导意义, 为开发热稳定性强、适应复杂环境的欧姆接触提供思路.

**关键词:** 碳化硅, 溅射, 引线电极, 欧姆接触

**PACS:** 71.20.Nr, 73.40.-c, 81.15.Cd, 85.30.-z

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250801

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250801

## 1 引言

在航空航天、化工、核能等领域, 发动机运行时都伴随着高温、高压等恶劣的工作环境, 会使硅基设备因自热效应出现漏电和塑性形变<sup>[1]</sup>. 碳化硅 (SiC) 作为第三代半导体, 凭借其宽禁带、高热导率、高击穿电场强度和高电子饱和漂移速度等特性, 在高温、高频和高功率应用中展现出显著优势<sup>[2,3]</sup>. 事实上, 无论是金属-氧化物-半导体场效应晶体管

(MOSFET)<sup>[4,5]</sup> 和结型场效应晶体管 (JFET)<sup>[6]</sup> 等微电子器件, 还是包括压力传感器在内的机电系统 (MEMS), 对 SiC 器件的研究都与 SiC 欧姆接触电极的制备密不可分.

欧姆接触指的是金属与半导体之间形成的接触, 其电流和电压 ( $I-V$ ) 特性呈线性关系且接触电阻小. 比接触电阻率 ( $\rho_c$ ) 是衡量欧姆接触质量的重要参数<sup>[7,8]</sup>, 单位为  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 表示单位面积上的接触电阻的大小. 在高温极限工况下, 4H-SiC 器件的性能通常并非受其自身材料特性制约, 而是受制

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFB3208500)、山西省重点研发计划 (批准号: 202302030201001) 和山西省科技重大专项“揭榜挂帅”项目 (批准号: 202301030201003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lizhiqiangnuc@163.com

‡ 通信作者. E-mail: leicheng@nuc.edu.cn

于 4H-SiC 与金属互连结构的稳定性, 只有欧姆电极和金属稳定互连, 外部封装处的电路才能稳定地从器件中提取信号. 所以, 制备可靠性强的耐高温 SiC 器件存在显著难点<sup>[9,10]</sup>, 例如 N 型 SiC 欧姆接触工艺重复性差以及在高温下的电学特性不稳定等难点<sup>[11]</sup>. 欧姆接触如果不耐高温或热稳定性差, 将直接制约 SiC 材料高温特性的发挥. 例如, 在高温高压工况下运行的传感器<sup>[12]</sup>、太空卫星器件及核能装置<sup>[13]</sup>等, 当欧姆接触电极与半导体界面存在缺陷, 或出现电极间分层乃至电极剥离脱落等现象时, 将直接导致接触完整性的破坏<sup>[14]</sup>. 在空气环境下进行老化, 若欧姆接触的电流-电压线性关系被破坏, 欧姆行为退化为整流行为, 将极大地影响器件信号传输的效率和准确性, 导致器件无法正常稳定工作<sup>[15]</sup>. 研究发现<sup>[16,17]</sup>, SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 欧姆接触展现出优异的电学性能. 其中, Ti 作为与 SiC 衬底接触的金属层, TaSi<sub>2</sub> 作为具有高温稳定性的阻挡层, 最外层的 Pt 作为保护层<sup>[17]</sup>. 这种组合添加的 Ta 基金属阻挡层<sup>[18,19]</sup>和有效的 Pt 保护层, 使其具备良好的抗氧化能力和高温稳定性, 理论上有望承受高温环境.

在研究 SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 欧姆接触时发现, 电极边缘卷边严重, 这会导致其在老化实验过程中性能失效. 基于此, 本研究提出分批次溅射退火形成欧姆接触的方法: 先在 SiC 衬底上溅射 Ti/TaSi<sub>2</sub> 退火形成欧姆接触, 之后再溅射最外层金属 Pt 来保护电极. 最后, 对两种不同溅射方式的实验样品进行 600 °C 高温老化实验, 并通过俄歇电子能谱 (AES)、X 射线衍射 (XRD)、薄膜应力表征等手段, 进一步对比其欧姆接触电学性能.

## 2 比接触电阻模型

### 2.1 理论模型

比接触电阻率对半导体器件的性能具有直接影响. 较低的比接触电阻率意味着电流能够更顺畅地通过金属-半导体界面<sup>[20]</sup>, 从而减小能量损耗、降低器件的发热同时提高器件的工作速度和效率. 传输线模型 (transmission line model, TLM) 由 Berger<sup>[21]</sup> 于 1972 年提出, 是一种通过多间距电极对测量金属-半导体比接触电阻率的经典方法<sup>[22,23]</sup>.

实验时, 利用半导体分析仪的探针在两相邻的金属电极上通入恒定电流, 并测试相对应的电压,

由此可计算出总电阻  $R_T$ . 通过改变两电极之间的距离  $L_n$ <sup>[21]</sup>, 测量对应的电阻  $R_T$ , 并绘制  $R_T$ - $L_n$  图, 如图 1(c) 所示. 图中的斜率为  $R_{sh}/w$ , 纵坐标的截距为  $2R_c$ , 横坐标的截距为  $-2L_t$ <sup>[24]</sup>:

$$R_T = 2R_c + R_s, \quad (1a)$$

$$\rho_c = L_t^2 R_{sh}. \quad (1b)$$

二维电流流动指电流不仅沿垂直于界面的方向流动, 还会在界面附近的横向 (二维平面内) 扩散. 这种现象主要出现在未进行台面隔离的电极结构中, 为避免二维电流的流动 TLM 模型应进行台面隔离, 需要两次光刻外加刻蚀工艺, 其相较于其他计算模型优点是计算简单、测试准确<sup>[25]</sup>.

此外, 欧姆接触高温退火过程中, 材料内部会因温度梯度产生热膨胀不均匀的情况, 从而产生热应力<sup>[26,27]</sup>. 当材料内部的应力超过其屈服强度时, 会发生塑性变形, 这会对材料的微观结构和电学性能产生影响. 本研究利用 Stoney 方程<sup>[28]</sup>来测试 SiC 欧姆接触的薄膜残余应力. 采用光杠杆曲率放大原理来测量样品表面的曲率半径, 利用 Stoney 公式求得薄膜的残余应力.

### 2.2 SiC 引线电极制造

图 2 所示为金属/SiC 欧姆接触制备流程示意图. 首先使用标准的 RCA 工艺清洗 SiC 衬底, 将 SiC 外延片浸泡入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (3:1) 混合溶液中在 150 °C 加热 15 min, 然后用去离子水清洗, 接着浸泡入 H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 NH<sub>4</sub>OH (7:2:1) 混合溶液中在 60 °C 中并加热 5 min. 在中国广东天域半导体进行外延工艺生长, 在 N 型 SiC 衬底上同质外延 3 μm P 型 SiC 其掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 后再外延 1.5 μm N 型 SiC 其掺杂浓度为  $1.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , 如图 2(a) 所示, 外延 N 型掺杂和 P 型掺杂层形成的 PN 结, 能够利用 SiC 材料本身的宽禁带、高击穿电场等特性, 有助于在高温环境下维持稳定的电学性能. 将 AZ-6130 光刻胶以 3000 rad/min 转速旋涂在 SiC 衬底, 光刻并且图形化. 在反应离子刻蚀机 (RIE-10 NR) 中刻蚀 N 型外延层, 50 sccm 的 SF<sub>6</sub>、10 sccm 的 O<sub>2</sub> 作为碳化硅刻蚀气体. 然后进行光刻图形化, 如工艺图 2(c), 接着通过磁控溅射工艺生长欧姆接触金属, 所有溅射工艺在丹顿 EXPLORED 中进行, 工艺如图 2(d) 所示. 接着按照工艺图 2(e) 通过剥离工艺分别在丙酮、乙醇、水

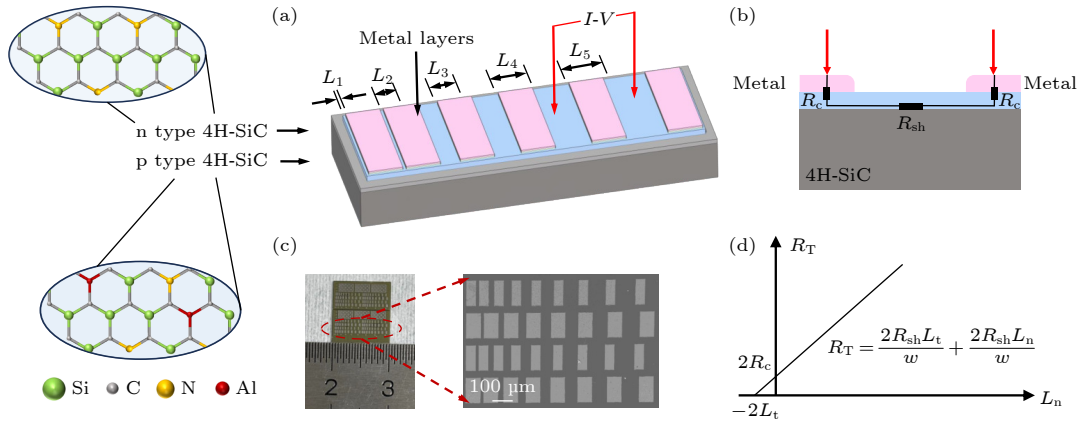


图 1 (a) 4H-SiC NPN 型 TLM 测试方法; (b) TLM 等效电极模型; (c) N 型 4H-SiC 的 TLM 样品; (d)  $R_T - L_n$  图  
 Fig. 1. (a) 4H-SiC NPN type TLM test method; (b) equivalent electrical model of the TLM method; (c) the fabricated N type 4H-SiC TLM samples; (d)  $R_T - L_n$  graph.

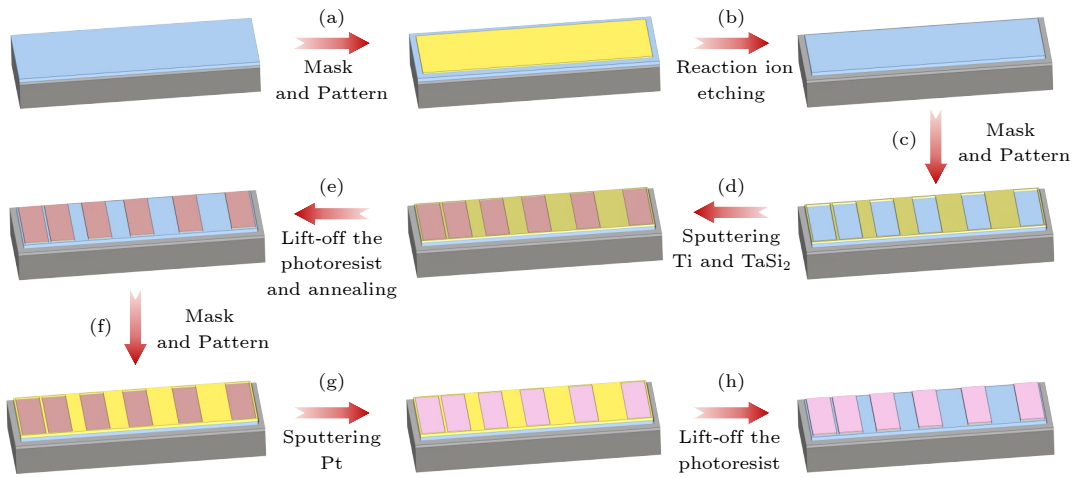


图 2 金属/SiC 欧姆接触 TLM 样品制备流程  
 Fig. 2. Fabricating processes of metal/SiC ohmic contact TLM samples.

中各超声 5 min 去除光刻胶后留下完整电极 Ti/TaSi<sub>2</sub>. 后在 RTP500 V+ 中进行快速高温退火以形成稳定的欧姆接触, 退火实验过程中, 腔内温度由室温升至 200 °C, 在 200 °C 维持 60 s, 然后以 80 °C/s 升至目标温度且维持相应的退火时间. 退火后在冷却水的作用下, 一般经过数百秒降至 100 °C, 实现快速降温. 接下来工艺图 2(f) 进行第 2 次光刻图形化, 工艺图 2(g) 溅射 Pt 电极, 最后工艺图 2(h) 剥离光刻胶. 最后在 OTF-1200 X-4-RTP 管式炉中在空气环境下进行老化实验模拟工艺环境.

本文进行两组实验, 一组是 SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt (50/150/100 nm) 在 1000 °C 真空环境退火 2 min, 记为组合 A; 另一组是 SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> (50/150 nm) 在相同条件下形成欧姆接触再溅射 100 nm Pt, 记为组合 B. 随后在空气中进行老化实验, 通过扫描

电子显微镜、FST5000 薄膜应力测量仪、X 射线衍射和俄歇电子能谱等手段, 对电极表面形貌和质量进行观察与表征.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 退火后欧姆接触的表面

不同的退火条件将形成不同情况的欧姆接触, 通过前人的研究本实验选择在 1000 °C 真空下退火 2 min 后形成欧姆接触.

通过 SEM 观察组合 A 与组合 B 的微观形貌, 发现二者差异明显. 图 3(a), (b) 是组合 A 电极在退火形成欧姆接触表面形貌, 电极边缘卷曲与 SiC 分离, 并且出现轻微破损. 通过图 3(b) 可以看出 Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 在 1000 °C 退火时反应剧烈, 表面出现 245.6—424.3 nm 凹坑. 电极表面应力分布解释了

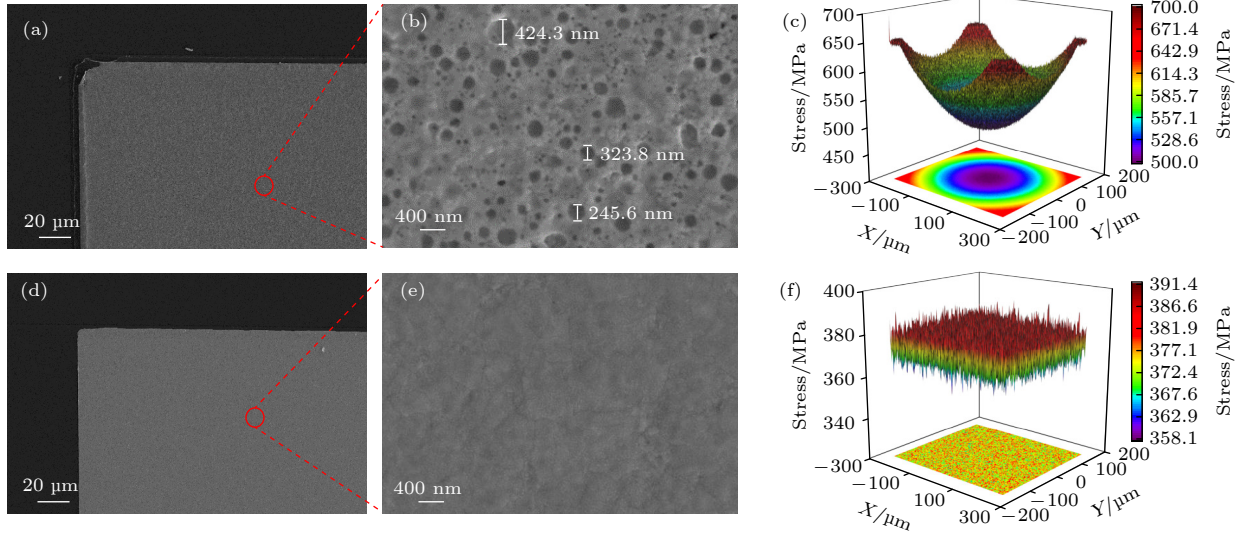


图 3 (a), (b) SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 高温退火后表面形貌; (c) SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 退火后电极应力分布; (d), (e) SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> 退火后沉积 Pt 表面形貌; (f) SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> 退火后沉积 Pt 电极应力分布

Fig. 3. (a), (b) Surface morphology of SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt after high-temperature annealing; (c) electrode stress distribution of SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt after annealing; (d), (e) surface morphology of SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> deposited Pt after annealing; (f) electrode stress distribution of SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> deposited Pt after annealing.

这一现象, 电极整体应力在 500—700 MPa 之间, 平均应力 583.22 MPa. Ti 与 SiC 界面因热膨胀差异产生拉应力, 同时 TaSi<sub>2</sub>/Pt 反应生成新相伴随体积收缩. 电极中间应力在 500—600 MPa, 而电极边缘应力在 650—700 MPa 之间. 边缘较大的应力导致金属电极卷曲. 其比接触电阻率  $\rho_c = 8.54 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 图 3(d), (e) 表明组合 B 电极在退火后金属电极之间相对致密, 表面极其光滑平整, 没有明显空洞现象. 金属颗粒 (234—334.9 nm) 之间紧密相连, 先溅射 Ti/TaSi<sub>2</sub> 并退火, 形成稳定界面后再沉积 Pt, 避免了 Pt 与 TaSi<sub>2</sub> 的高温反应, 减小因相变产生的拉应力<sup>[29]</sup>. 并且图 3(f) 显示 SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> 高温退火后再溅射 Pt 电极平均应力值为 286.81 MPa, 相对于组合 A 应力减小 50.82%, 这很好地解释了组合 B 电极表面光滑平整的现象. 其比接触电阻率  $\rho_c = 6.35 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

对于 SiC 欧姆接触来说, Ti 与 SiC 直接接触, 由于 TaSi<sub>2</sub> 高温稳定特性其作为阻挡层, Pt 作为保护层作用. 大量研究表明, 器件欧姆接触形成与否取决于接触层, 而稳定性取决于阻挡层与保护层. 碳化硅衬底上的 C 原子从表面向外扩散, 并与接触界面上的 Ti 原子结合, 形成一层薄薄的金属碳化物 TiC, 其化学性质稳定<sup>[30]</sup>. TaSi<sub>2</sub> 是过渡金属 Ta 和 Si 形成的坚硬化合物, 化学稳定, 很少与氧相互作用<sup>[31,32]</sup>, 其在退火过程中 Pt 原子扩散至

中间层 TaSi<sub>2</sub>, 与之反应形成相应化合物:



### 3.2 老化后欧姆接触性能

#### 3.2.1 老化后电学特性

高温空气老化实验是验证欧姆接触在实际工作条件下性能的重要手段. 通过高温空气中对欧姆接触进行测试, 可以评估其长期可靠性和寿命. 这对于预测器件的使用寿命和维护周期至关重要.

实验中, 外接 KEITHLEY 4200-SCS 半导体分析仪提供电源电压 ( $V$ ) 和电流 ( $I$ ), 进而得到  $I-V$  特性曲线. 将电源电压设定在  $-5$ — $5$  V 之间, 实时获取  $I-V$  信号. 为探究两组电极的高温特性, 将它们在 600 °C 下分别进行 5 h, 10 h, 15 h, 20 h 的老化实验, 值得注意的是, 所有老化实验测试都是在空气环境下进行的, 这样使得 SiC 欧姆接触更加接近实际的工业环境. 图 4(a), (b) 给出了两种实验组合的老化前后电学性能, 组合 A 在 600 °C 老化 10 h 时, 比接触电阻率急剧升高至  $7.45 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 甚至在老化 20 h 后失去欧姆特性转变为肖特基接触. 相较而言, 组合 B 在 600 °C 下进行 20 h 老化仍未失效, 在 600 °C, 15 h 与 20 h 比接触电阻率

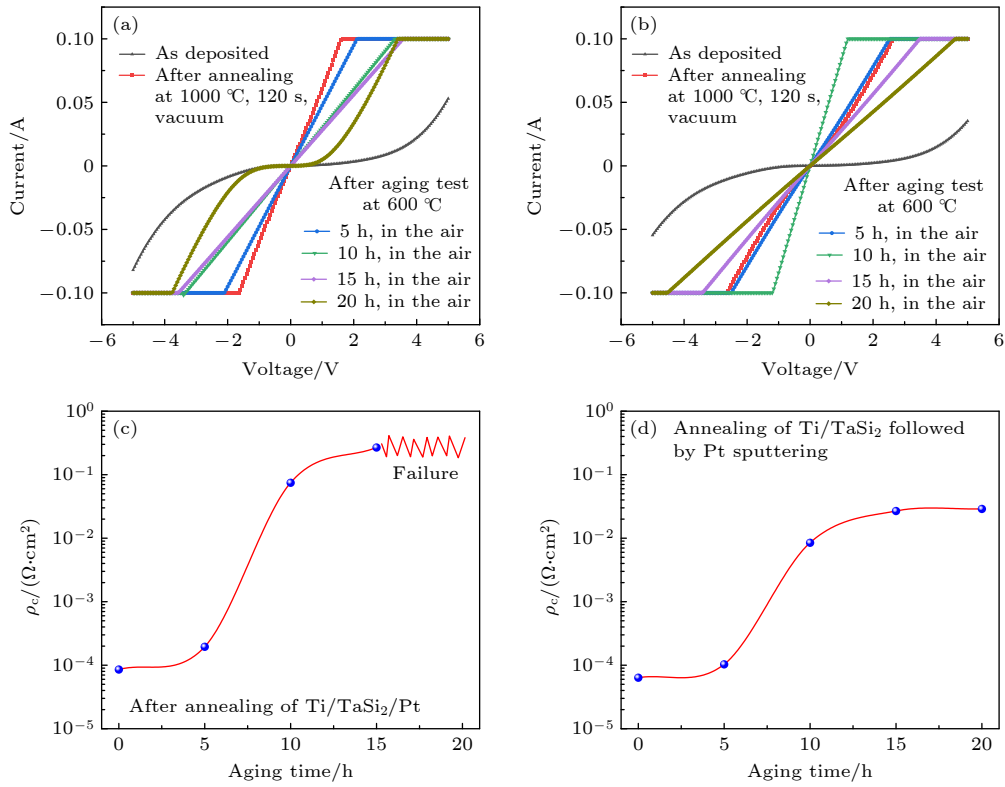


图 4  $I$ - $V$ 特性 (a) 组合 A(SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt); (b) 组合 B(SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> 形成欧姆接触后溅射 Pt). 比接触电阻率与老化时间的关系 (c) 组合 A(SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt); (d) 组合 B(SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> 形成欧姆接触后溅射 Pt)

Fig. 4.  $I$ - $V$  characteristics: (a) Combination A(SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt); (b) combination B(SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> sputtered Pt after forming an ohmic contact). Specific contact resistivity versus aging time: (c) Combination A(SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt); (d) combination B (SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> sputtered Pt after forming an ohmic contact).

接近, 初步推断该组合的金属膜层反应有相对稳定的趋势。

### 3.2.2 老化后电极表面分析

在老化过程中, 由于合金相的形成电极表面出现较大的突起以及凹陷, 这些大尺寸的缺陷将在金属薄膜之间引入内应力、裂纹以及翘起等问题. 同时氧原子会渗入至电极表面, 导致其电学性能失效。

图 5 分别为两组实验在老化 20 h 后的扫描电子显微镜图像和应力图, 分别对应不同的样品的情況. 图 5(a) 为 500× 时 SEM 图像, 展示样品宏观轮廓, 可看到样品边缘有明显的卷曲、破损等现象. 在退火后电极边缘出现轻微卷曲, 600 °C 空气老化过程中氧气从边缘翘曲进入, 导致其更加恶劣的形貌. 退火后电极表面有大量孔洞, 氧气通过孔洞进入薄膜深层与之反应降低其可靠性. 图 5(c) 为 Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 老化后的截面 SEM 图像, 断面中金属层间界限完全模糊, 呈现“渐变过渡”的混合层特征. 这是因为共溅射后退火并且在 600 °C 老化下发生剧烈互扩散, 并且断面可见微裂纹与孔洞. 从图 5(g)

可看出应力分布不均匀, 存在较大应力梯度, 应力在 -470—508 MPa 之间. 应力集中区域与图 5(a) 中边缘卷曲、图 5(b) 中孔洞结构相关, 不均匀的应力会促使材料发生变形、开裂等现象. 而图 5(d)—(f) 为 Ti/TaSi<sub>2</sub> 形成欧姆接触后溅射 Pt 电极在老化 20 h 后的形貌. 低倍 SEM 图像, 样品边缘相对平整没有明显的卷曲、破损现象, 说明该样品在老化过程中边缘所受应力相对均匀并且电极表面没有图 5(b) 明显的大量孔洞. 图 5(f) 是其截面 SEM 图像, 层间界限清晰可辨并且断面结构致密无缺陷, 各层间结合紧密. 相较于图 3(c), 应力分布相对更均匀, 应力梯度较小, 应力为 -207.9 — -220 MPa, 如图 5(h) 所示. 均匀的应力分布有助于提高材料的稳定性和可靠性, 减少因应力集中导致的失效风险。

图 6 呈现了组合 A (Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 共溅射退火) 与组合 B(分批次溅射退火) 在 600 °C 空气环境下老化不同时间的应力变化趋势. 在老化实验中, 两种金属薄膜电极均从拉应力转换为压应力。

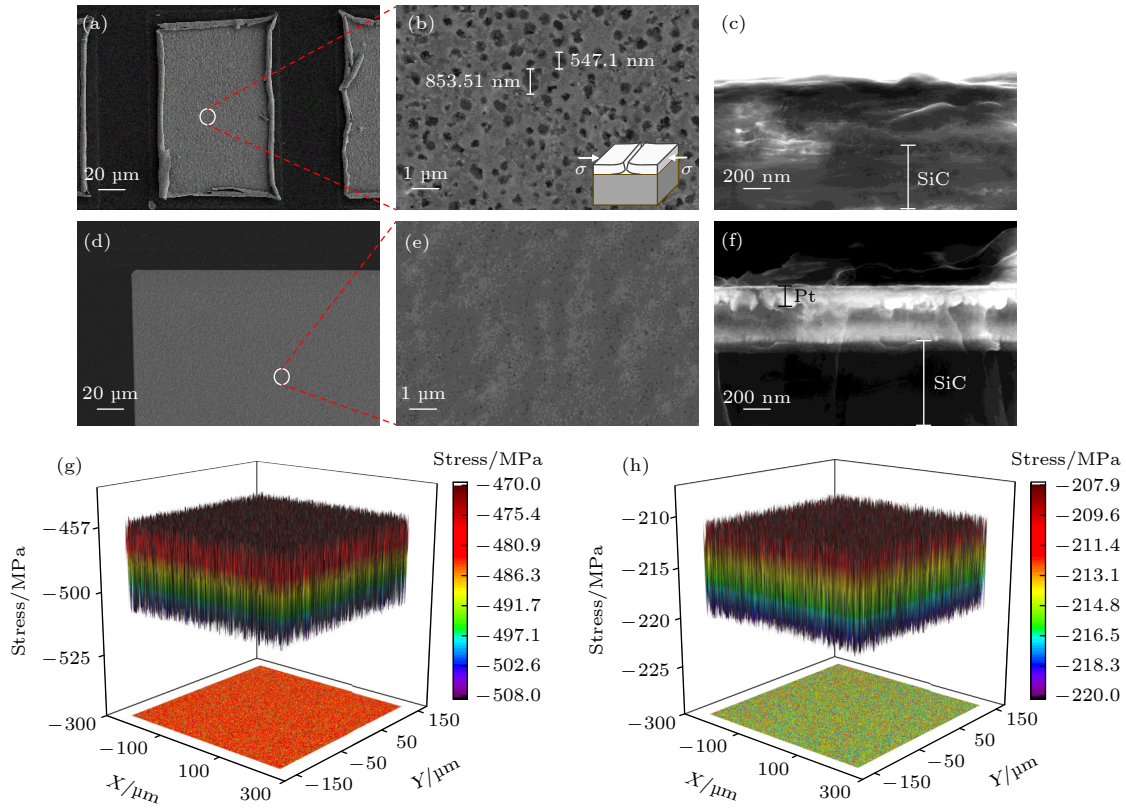


图 5 SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 600 °C 老化 20 h 后形貌 (a), (b) 表面形貌; (c) SEM 截面. SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> 退火后沉积 Pt 600 °C 老化 20 h 后形貌 (d), (e) 表面形貌; (f) SEM 截面. (g) SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 600 °C 老化 20 h 后电极应力分布; (h) SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> 退火后沉积 Pt 600 °C 老化 20 h 后电极应力分布

Fig. 5. SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt morphology after aging at 600 °C for 20 hours: (a), (b) Surface morphology; (c) SEM cross-section. SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> annealed followed by Pt deposition, morphology after 600 °C aging for 20 hours: (d), (e) Surface morphology; (f) SEM cross-section. (g) Electrode stress distribution of SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt after 600 °C aging for 20 hours. (h) SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> annealed and deposited with Pt, after aging at 600 °C for 20 hours, electrode stress distribution.

组合 A(Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 退火形成欧姆接触) 在老化 5 h 时应力值急剧下降至负值, 转变为压应力, 由 672.44 MPa 变为 -290.83 MPa. 在高温老化过

程中, 薄膜内部结构发生变化, 氧化层的形成以及金属间化合物进一步反应, 使得原子间距被压缩, 从而产生压应力. 在后续老化过程 (5—20 h) 压应力进一步增大, 表明随着老化时间延长, 上述导致压应力产生的因素持续作用, 使薄膜受到的压缩程度不断增大. 组合 B (分批次溅射退火) 在老化 5 h 时应力平均值由 302.12 MPa 变为 -10.9 MPa, 随后在后续老化过程 (5—20 h) 缓慢下降至负值且绝对值逐渐增大. 从拉应力逐渐转变为压应力且压应力逐渐增大原因为: 1) 在老化前期, 薄膜内部结构调整使得拉应力释放; 2) 随着老化进行, 金属薄膜内部发生局部氧化、原子的缓慢扩散等因素开始引发压应力, 并不断积累.

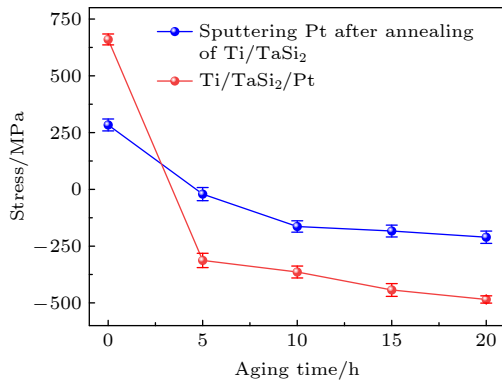


图 6 组合 A (Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 共溅射退火) 与组合 B (分批次溅射退火) 在 600 °C 空气环境下老化不同时间的应力变化趋势

Fig. 6. Stress trends of combination A (Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt co-sputter annealed) and combination B (batch sputter annealed) aged at 600 °C in air for different time periods.

不同工艺决定金属薄膜应力大小, 老化实验过程中通过氧化、原子扩散等改变应力类型与大小, 而应力变化会影响薄膜物理和电学性能, 关乎其在高温环境下的可靠性与稳定性.

### 3.2.3 界面扩散特性

在高温环境下, 金属层之间原子与 SiC 之间的扩散以及相应合金相的形成是影响欧姆接触电学性能的重要因素. 利用 AES 深度剖面可以观察层间扩散情况, 结合 XRD 可以确定界面合金相的形成与变化.

SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 老化 20 h 实验后 XRD 结果如图 7(a) 所示, 考核后的 XRD 图谱中检测到明显的金属氧化物特征峰 (如 TiO<sub>2</sub>, PtO<sub>2</sub>). 这表明在高温环境下, 氧气通过电极卷曲边缘侵入电极, 并与金属层发生氧化反应. 氧化物的形成导致界面电阻升高, 从而验证了比接触电阻率的欧姆接触特性退化. 图 7(b) 给出了 Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 欧姆接触时, 多层金属薄膜在不同状态下沿深度方向的分布曲线. 可以看出氧气通过电极边缘缺陷和 TaSi<sub>2</sub>/Pt 的互扩散通道侵入, 导致 Ti 层和界面区域的氧化. 氧元素的渗透加剧了电极的应力失配, 进一步引发电极卷曲图 7(a), (b), 同时也削弱了金属层与 SiC 的

黏附性. 图 7(c) 为 SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub> 形成欧姆接触后溅射 Pt 电极在空气中老化 20 h 后 XRD 结果, 通过 XRD 图谱中未检测到 Ti 氧化物, 表明 Ti/TaSi<sub>2</sub> 退火后再溅射 Pt 的工艺避免了高温下氧气直接侵入接触层, 分批次溅射退火工艺有效抑制了互扩散. 并且从氧化物峰的强度与分布 (如 Pt<sub>x</sub>O<sub>y</sub> 峰微弱且仅限表层), 结合 AES 氧元素深度剖面 (氧富集于 Pt 表层), 可以看出, Pt 作为保护层具有良好的抗氧化能力. AES 图像中 Pt 层与 TaSi<sub>2</sub> 层界限清晰, 互扩散现象显著减少, 界面元素分布更均匀. 氧元素分布更趋近于表层 (Pt 层), 界面区域 (如 Ti/TaSi<sub>2</sub> 与 SiC) 的氧渗透被有效抑制, 说明分批次溅射工艺通过 Pt 保护层阻挡了氧气向内部扩散. 相较于 Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 考核而言阻挡了大量氧气进入电极与之反应, 不仅改善电极表面形貌, 并且提高电极在高温环境下的稳定性和可靠性. 充分表明分批次溅射工艺通过 Pt 保护层成功阻挡了氧气向内部扩散. 与 SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 体系的考核结果相比, 显著提升了电极在高温环境下的稳定性与可

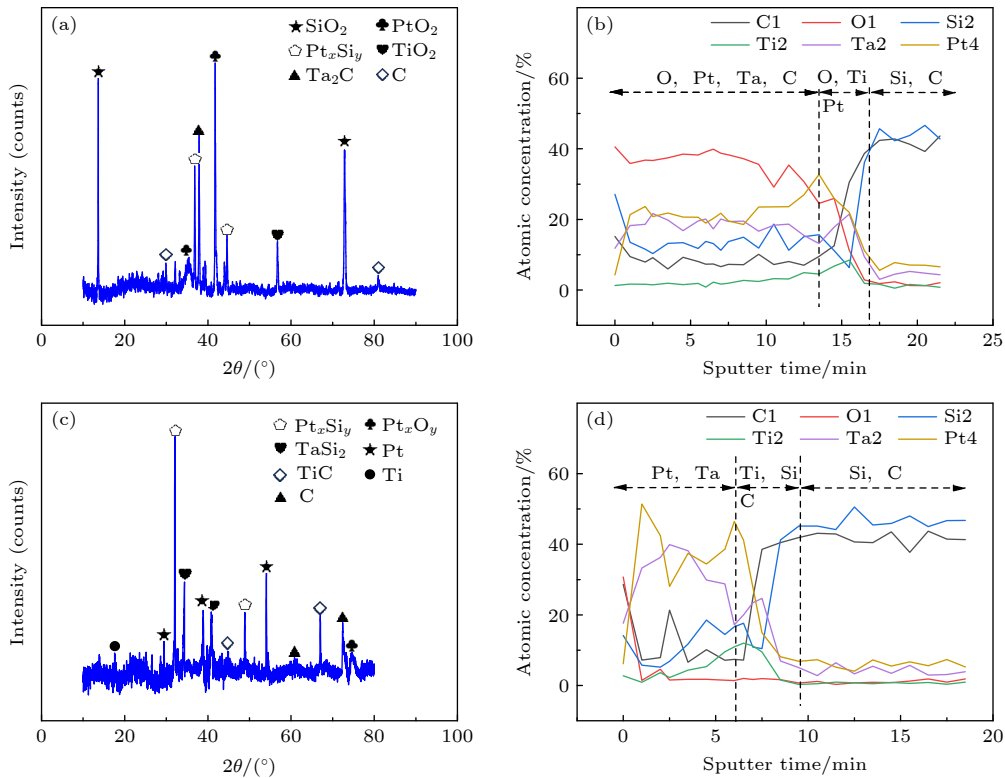


图 7 (a) Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 共溅射退火老化 20 h 后的 XRD 分析; (b) Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 共溅射退火的 AES 分析; (c) 分批次溅射退火老化 20 h 后的 XRD 分析; (d) 分批次溅射退火的 AES 分析

Fig. 7. (a) XRD analysis after aging for 20 hours of Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt co-sputtered annealing; (b) AES analysis of Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt co-sputtered annealing; (c) XRD analysis after aging for 20 hours of batch sputtered annealing; (d) AES analysis of batch sputtered annealing.

靠性, 为相关器件在高温工况下的长期稳定运行提供了有力保障.

## 4 结 论

欧姆接触作为 SiC 器件制造的关键环节, 其稳定性直接影响器件性能. 传统的 SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 欧姆接触存在电极边缘卷边问题, 导致性能失效. 本研究提出采用分批次溅射退火法制备 SiC 欧姆接触, 即 Ti/TaSi<sub>2</sub> 退火形成欧姆接触后再溅射 Pt 电极. 与传统共溅射退火工艺相比, 分批次溅射后退火形成的欧姆接触显著改善了电极微观形貌; 残余应力从 583.22 MPa 降至 286.81 MPa, 比接触电阻率从  $8.54 \times 10^{-5}$  降至  $6.35 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 600 °C 空气老化实验表明, SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt 新型电极结构在 20 h 老化后仍保持欧姆特性, 而传统共溅射退火形成的欧姆接触在 20 h 老化后转变为肖特基接触. 分批次工艺通过 Pt 保护层有效抑制了 O<sub>2</sub> 向内部扩散及金属间化合物相变 (如 Pt 与 TaSi<sub>2</sub> 的反应), 其应力分布均匀性、界面氧化程度显著降低. 本研究为高温环境下 SiC 器件欧姆接触的可靠性优化提供了新方法, 相关工艺对第三代半导体功率器件的耐高温封装具有重要参考价值.

## 参考文献

- [1] Wright N G, Horsfall A B 2007 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** 6345
- [2] Lin H F, Xie E Q, Ma Z W, Zhang J, Peng A H, He D Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2780 (in Chinese) [林洪峰, 谢二庆, 马紫微, 张军, 彭爱华, 贺德衍 2004 物理学报 **53** 2780]
- [3] Chen J J, Peng S P, Deng S L, Zhou W, Fan Z Q, Zhang X J 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 198502 (in Chinese) [陈建举, 彭淑平, 邓淑玲, 周文, 范志强, 张小姣 2025 物理学报 **74** 198502]
- [4] Anoldo L, Triolo C, Panarello S, Garesci F, Russo S, Messina A A, Calabretta M, Patanè S 2021 *IEEE Electron Dev. Lett.* **42** 1089
- [5] Ding C, Liu H, Ngo K D T, Burgos R, Lu G Q 2021 *IEEE Trans. Power Electron.* **36** 11672
- [6] Li G, Xu M S, Zou D Y, Cui Y X, Zhong Y, Cui P, Cheong K Y, Xia J B, Nie H K, Li S Q, Linewil H, Zhang B T, Xu X G, Han J S 2023 *Crystals* **13** 1106
- [7] Sze S M 2006 *Physics of Semiconductor Devices* (New York: Wiley) pp335-339
- [8] Shi M (translated by Zhao H M) 2002 *Semiconductor Device Physics and Processes* (2nd Ed.) (Suzhou: Suzhou University Press) pp226-227 (in Chinese) [施敏著 (赵鹤鸣译) 2002 半导体器件物理与工艺 (第2版) (苏州: 苏州大学出版社) 第226—227页]
- [9] Vivona M, Greco G, Lo Nigro R, Bongiorno C, Roccaforte F 2015 *Journal of Applied Physics* **118** 035705
- [10] Evans L J, Okojie R S, Lukco D 2012 *Mater. Sci. Forum* **717-720** 841
- [11] Guo T 2017 *M. S. Thesis* (Xian: Xidian University) (in Chinese) [郭涛 2017 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [12] Zhang Q W, Liu Y, Li H F, Wang J, Wang Y, Cheng F B, Han H J, Zhang P 2024 *Sensors* **24** 7731
- [13] Han L B, Liang L, Kang Y, Qiu Y F 2021 *IEEE Trans. Power Electron.* **36** 2080
- [14] He Y J, Lv H L, Tang X Y, Song Q W, Zhang Y M, Han C, Guo T, He X N, Zhang Y M, Zhang Y M 2019 *J. Alloys Compd.* **805** 999
- [15] Liu C Y, Du J F, Rong L M, Luo T C, Gao K, Yin Y G, Xu J 2020 *17th China International Forum on Solid State Lighting & 2020 International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS)* Shenzhen, China, November 23-25, 2020 pp247-250
- [16] Okojie R S, Lukco D, Chen Y L, Spry D J 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 6553
- [17] Wu C, Fang X D, Kang Q, Fang Z Y, Sun H, Zhang D, Zhao L B, Tian B, Maeda R, Jiang Z D 2023 *J. Mater. Res. Technol.* **24** 2428
- [18] Zhang M L, Ren X R, Chu H G, Lv J S, Li W, Wang W G, Yang Q Q, Feng P Z 2020 *Corros. Sci.* **177** 108982
- [19] Zhu H J, Yang T, Zhou Y, Hua S, Yang J W 2019 *De Gruyter Brill* **74** 353
- [20] Ng K K, Liu R 1990 *IEEE Trans. Electron Dev.* **37** 1535
- [21] Berger H H 1972 *J. Electrochem. Soc.* **119** 507
- [22] Wang Y Y, Zhen C M, Gong H X, Yan Z J, Wang Y F, Liu X Q, Yang Y H, He S H 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1348 (in Chinese) [王印月, 甄聪棉, 龚恒翔, 阎志军, 王亚凡, 刘雪芹, 杨映虎, 何山虎 2000 物理学报 **49** 1348]
- [23] Yu S Z, Song Y, Dong J R, Sun Y R, Zhao Y M, He Y 2016 *Chin. Phys. B* **25** 118101
- [24] Scorzoni A, Finetti M 1988 *Materials Science Reports* **3** 79
- [25] Zhou S X, Ai L K, Qi M, Xu A H, Yan J S, Li S S, Jin Z 2021 *Chin. Phys. B* **30** 027304
- [26] Qiao X X, Xia T L, Chen P 2021 *Chin. Phys. B* **30** 018104
- [27] Sha Y C, Li Z W, Jia Z C, Han B, Ni X W 2023 *Chin. Phys. B* **32** 106104
- [28] Huang S S, Zhang X 2006 *J. Micromech. Microeng.* **16** 382
- [29] Han L L, Du C H, Ma Z G, Jiang Y, Xiong K L, Wang W X, Chen H, Deng Z, Jia H Q 2021 *Chin. Phys. Lett.* **38** 068102
- [30] Santerre F, El Khakani M A, Chaker M, Dodelet J P 1999 *Appl. Surf. Sci.* **148** 24
- [31] Kwong D L 1984 *Thin Solid Films* **121** 43
- [32] Yoon D S, Lee S M, Baik H K 2000 *J. Electrochem. Soc.* **147** 3477

# Preparation of 4H-SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt high-temperature lead electrodes based on secondary sputtering\*

LU Jing<sup>1)</sup> LI Zhiqiang<sup>1)†</sup> LEI Cheng<sup>1)‡</sup> JIA Pinggang<sup>1)</sup> LIU Shilin<sup>1)</sup>  
 YU Jiangang<sup>1)</sup> LI Yongwei<sup>2)</sup> LIANG Ting<sup>1)</sup>

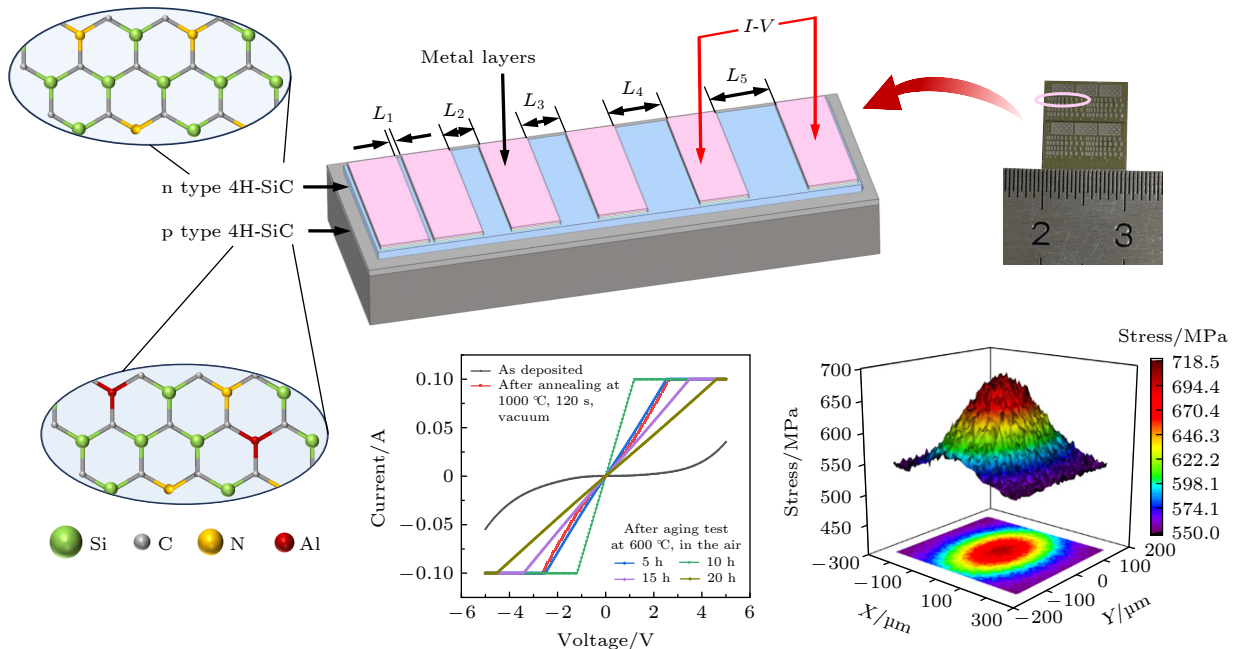
1) (State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies,  
 North University of China, Taiyuan 030051, China)

2) (Department of Automation, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030051, China)

( Received 20 June 2025; revised manuscript received 8 August 2025 )

## Abstract

Under high temperature and pressure conditions, silicon-based devices experience leakage and deformation due to the self-heating effect, making them unable to operate stably for a long time. Silicon carbide (SiC), as a representative third-generation semiconductor material, is an ideal option for high-temperature, high-frequency, and high-power electronic devices. However, the high-temperature performance limitations of 4H-SiC devices stem from the stability of ohmic contact electrodes and metal interconnections. The output of the lead electrodes is unstable at present, and oxygen intrusion at high temperatures can easily cause output failures. Previous studies indicate that the SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt multilayer structure holds significant potential for ohmic contacts. Building upon this ohmic contact foundation, this study proposes a batch sputtering-annealing process



\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFB3208500), the Key Research and Development Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202302030201001), and the Science and Technology Major Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202301030201003).

† Corresponding author. E-mail: [lizhiqiangnuc@163.com](mailto:lizhiqiangnuc@163.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [leicheng@nuc.edu.cn](mailto:leicheng@nuc.edu.cn)

to prepare high-temperature-resistant lead electrodes. This involves altering the sequence of annealing and sputtering: first sputtering Ti/TaSi<sub>2</sub> onto the SiC substrate and annealing to form the ohmic contact, followed by depositing a Pt protective layer to construct a novel SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt electrode structure. Comparative analysis of the two experimental groups is conducted using scanning electron microscope (SEM), auger electron spectroscopy (AES), X-ray diffraction (XRD), thin-film stress measurement, and semiconductor analyzers. The batch-sputtered and annealed electrode structure can enhance density and reduce residual stress, with an initial specific contact resistivity of  $6.35 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . High-temperature aging tests at 600 °C demonstrates superior electrical stability for electrodes formed by sputtering Pt onto Ti/TaSi<sub>2</sub> after ohmic contact formation. These electrodes maintain ohmic characteristics even after 20-hour air aging, whereas traditional co-sputtered ohmic contacts transition to Schottky contacts. Pt effectively suppresses atomic diffusion and oxidation reactions, resulting in a smooth electrode microstructure without curling. The batch sputtering-annealing process not only greatly enhances the overall performance of SiC ohmic contacts but also provides crucial guidance for realizing the structural design and performance improvement of ohmic contacts by using other metal combinations. This approach holds significant reference value for the high-temperature packaging of third-generation semiconductor power devices and the development of electronic systems operating in harsh environments.

**Keywords:** silicon carbide, sputtering, lead electrode, ohmic contact

**PACS:** 71.20.Nr, 73.40.-c, 81.15.Cd, 85.30.-z

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250801](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250801)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250801](https://www.cstr.net.cn/resultDetail.do?id=CSTR13961.32037.14.aps.74.20250801)

基于二次溅射的4H-SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt耐高温引线电极制备

路晶 李志强 雷程 贾平岗 刘士琳 余建刚 李永伟 梁庭

Preparation of 4H-SiC/Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt high-temperature lead electrodes based on secondary sputtering

LU Jing LI Zhiqiang LEI Cheng JIA Pinggang LIU Shilin YU Jianguang LI Yongwei LIANG Ting

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 207101 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250801

CSTR: 32037.14.aps.74.20250801

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

碳化硅中点缺陷对热传导性能影响的分子动力学研究

Molecular dynamics study of effects of point defects on thermal conductivity in cubic silicon carbide

物理学报. 2022, 71(3): 036501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211434>

重离子在碳化硅中的输运过程及能量损失

Transport process and energy loss of heavy ions in silicon carbide

物理学报. 2021, 70(16): 162401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210503>

SiC电力电子器件金属接触研究现状与进展

Research status and progress of metal contacts of SiC power devices

物理学报. 2021, 70(20): 207302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210675>

GaN/VSe<sub>2</sub>范德瓦耳斯异质结电接触特性及调控效应

Electrical contact characteristics and regulatory effects of GaN/VSe<sub>2</sub> van der Waals heterojunction

物理学报. 2023, 72(16): 167101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230191>

不同相NbS<sub>2</sub>与GeS<sub>2</sub>构成的二维金属-半导体异质结的电接触性质

Electrical contact properties of 2D metal-semiconductor heterojunctions composed of different phases of NbS<sub>2</sub> and GeS<sub>2</sub>

物理学报. 2024, 73(13): 137102 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240530>

铁电异质结T-NbTe<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>的接触性质及调控

Control of contact properties in ferroelectric heterojunction T-NbTe<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>

物理学报. 2025, 74(10): 107101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241705>