

引用格式: 冯文洁, 蔡亚辉, 付祥和, 等. 硅和碳化硅 MOSFET 中 PN 结 SEM 图像掺杂衬度分析 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(3): 347-352.
FENG W J, CAI Y H, FU X H, et al. Analysis of doping contrast in PN junction SEM images of Si and SiC MOSFET[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(3): 347-352.

硅和碳化硅 MOSFET 中 PN 结 SEM 图像 掺杂衬度分析



冯文洁¹, 蔡亚辉², 付祥和¹, 黄丹阳¹, 王 丹¹, 贺永宁^{1*}

(1. 西安交通大学 微电子学院, 西安 710049; 2. 国防科技大学 电子科学学院, 长沙 410073)

摘要: PN 结是半导体器件结构的基础, 对 PN 结掺杂剂分布的量测直接关系到器件的性能和可靠性。对于掺杂剂分析, 二次电子图像展示了巨大的潜力。基于扫描电子显微镜对硅基 MOSFET 和碳化硅 MOSFET 的 PN 结进行量测, 发现硅和碳化硅两种材料的掺杂衬度存在明显差异。为探究该差异产生机理, 利用样品电流法测量相关材料的二次电子发射系数。分析测试结果发现, 掺杂半导体衬度产生与表面态有关, 对二次电子图像在半导体量测中的应用具有指导意义。

关键词: 掺杂半导体衬度; 扫描电子显微镜; 二次电子; 表面态

中图分类号: TN307; O475

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2024064

Analysis of doping contrast in PN junction SEM images of Si and SiC MOSFET

FENG Wenjie¹, CAI Yahui², FU Xianghe¹, HUANG Danyang¹, WANG Dan¹, and HE Yongning^{1*}

(1. School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: PN junction is the foundation of semiconductor device structure. And the measurement of doping distribution in PN junction directly relates to the performance and reliability of devices. For doping analysis, secondary electron image shows great potential. Based on scanning electron microscopy, the PN junction doping profiles of silicon-based MOSFET and silicon carbide MOSFET were measured, revealing significant differences in doping profiles between silicon and silicon carbide materials. To elucidate the underlying mechanisms of the observed differences, the secondary electron emission coefficients of the pertinent materials were determined by the sample current method. The analysis of the obtained results indicates that the variations in the secondary electron emission are associated with surface states, which holds significant implications for the application of secondary electron imaging in semiconductor measurements.

Key words: doped semiconductor contrast; scanning electron microscopy; secondary electrons; surface states

PN 结是半导体器件的基础结构, 贯穿于电子器件的整个制造过程, 从晶圆到器件的转变离不开 PN 结的形成。实现 PN 结的精确量测能够为提升半导体器件性能和可靠性提供依据。

目前, 半导体产业正按照摩尔定律快速发展, 随着半导体器件集成度的增加和复杂度的提高, PN 结量测技术需求越来越高。美国半导体工业协会提出下一代掺杂剖析成像技术的发展方向: 1) 当杂质浓度在 $10^{16} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 范围内时, 灵敏度足够高; 2) 当空间尺度小于 10 nm 时, 量测精度大于 10%; 3) 能进行二维剖析^[1]。由于二次电子图像拥

有高分辨率、高灵敏度的特点, 所以扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 量测有望成为下一代掺杂剖析成像的主要技术。

1957 年, 文献 [2] 利用 SEM 观察 PN 结, 并在二次电子图像中发现结的位置有明显的明暗变化。1967 年, 文献 [3] 发现 P 型区较 N 型区显亮色。自此, 利用 SEM 成像技术进行掺杂剖析越来越多, 但 SEM 图像中掺杂半导体衬度的产生机制仍存在较大争议。文献 [4-7] 认为空间电荷区的内建电场延伸到样品表面上方, 对从 N 型区出射的二次电子起减速作用、对 P 型区出射的二次电子起加速作用, 从而

收稿日期: 2024-03-23

作者简介: 冯文洁, 博士生, 主要从事半导体量测方面的研究。

*通信作者 E-mail: yongning@xjtu.edu.cn

探测器接收到的二次电子数目存在差异，产生了掺杂衬度。但是在单独测量 N 型半导体和 P 型半导体的二次电子发射系数 (secondary electron yield, SEY) 时，二者之间仍存在差异，该理论不能充分解释。部分研究者认为掺杂衬度产生与半导体表面变化有关。文献 [8-10] 提出在样品制备过程中表面吸附污染物形成了碳氢化合物薄膜，该薄膜与 N 型区形成肖特基接触，与 P 型区形成欧姆接触，所以二次电子从 N 型区和 P 型区发射需要的能量产生差异，于是产生掺杂衬度。文献 [11-12] 认为存在表面态导致能带发生弯曲，P 型区价带能级大于 N 型区价带能级，从而产生掺杂衬度。但是，对于 P 型区价带能级大于 N 型区价带能级这一说法缺乏依据。

目前，功率半导体器件因其在高效能量转换的关键作用成为研究热点，因此本文以功率半导体器件为例，基于硅和碳化硅的 MOSFET 中 PN 结二次电子图像，结合 SEY 宽能谱测试分析，补充阐释了 SEM 图像中掺杂半导体衬度的产生机制。

1 SEM 量测分析

1.1 SEM 实验过程

PN 结量测是功率器件性能提升和可靠性评估的有效方法。文献 [13] 研究表明，SiC MOSFET 的体二极管的退化与 P 体区掺杂有关，量测其中的 P 掺杂深度可以帮助评估 MOSFET 体二极管的可靠性。文献 [14] 表示 P 体区掺杂分布会影响 MOSFET 栅氧层界面态电荷，通过对器件量测了解掺杂的分布情况，可以针对性地优化设计，改善器件开关特性等。

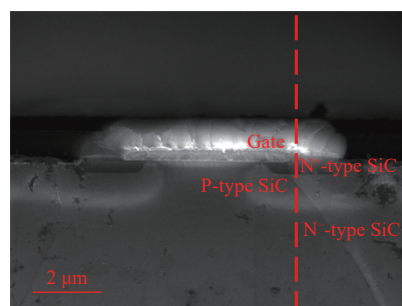
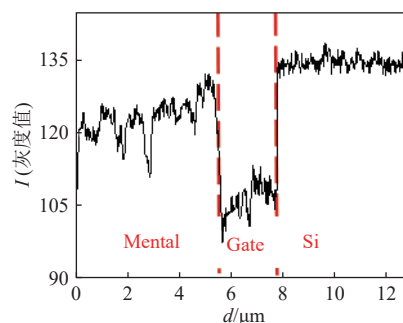
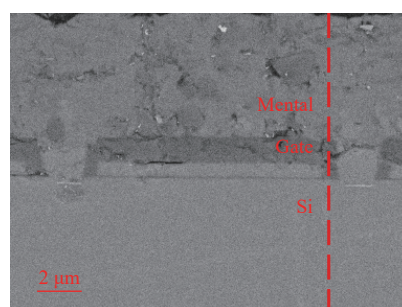
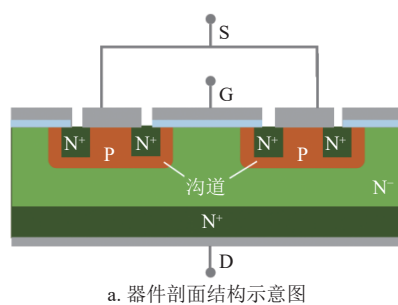
本实验选用 Infineon 公司商用 MOSFET 器件 IPA95R450P7 和 AIMW120R080M1。IPA95R450P7 是硅基功率器件，AIMW120R080M1 是碳化硅功率器件。为了对器件剖面进行观察，本文利用金相切片方法对两种器件制样，并基于场发射扫描电子显微镜 (FESEM, Zeiss Gemini 500) 进行半导体样品的量测。

1.2 剖面结构量测和发现

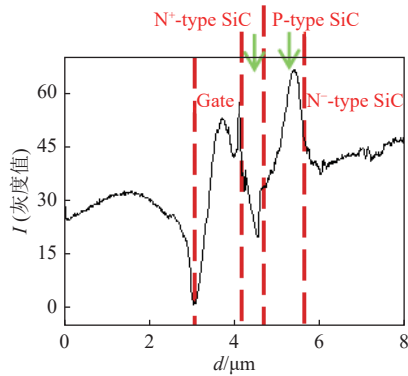
硅基 IPA95R450P7 和碳化硅 AIMW120R080M1 均为平面栅 MOSFET，其剖面结构设计如图 1a 所示。图 1b 是 IPA95R450P7 器件的 SEM 图像，其中加速电压为 5 kV。在图中，栅极区域较硅和金属区域显暗色，而不同掺杂类型的硅之间没有明显的明暗差异。沿图中直线提取灰度值如图 1c，金属区域灰度平均值为 117.4，栅极区域灰度平均值为 103.6，硅的灰度值没有因掺杂类型发生明显变化，在 132~135 之间波动，不能用 SEM 图像直接

区分不同掺杂类型的硅。

图 1d 是 AIMW120R080M1 器件的 SEM 图像，其中加速电压为 5 kV。在图中，栅极和不同掺杂类型的碳化硅之间出现明显的明暗差异。沿图中直线提取灰度值如图 1e，N⁺型碳化硅灰度平均值为 30.3，P 型碳化硅灰度平均值为 52.6，N 型碳化硅灰度平均值为 39.1，3 个区域的灰度值有明显差别，可以用 SEM 图像直接区分不同掺杂类型的碳化硅。参考器件的剖面结构设计图，可以对不同掺杂的区域进行划分，并提取器件参数，得到 N⁺阱深度为 0.38 μm ，P 阱深度为 1.16 μm 。



d. AIMW120R080M1 的 SEM 图像



e. 沿图 d 中直线提取的灰度值曲线

图1 剖面结构测量结果

综上所述, 硅 MOSFET 中 PN 结在 SEM 图像中没有明显的明暗变化, 而碳化硅 MOSFET 中 PN 结在 SEM 图像中显现出明暗变化, 且 P 型区显亮色, N 型区显暗色。为了更直接地对比量测结果, 可测量相关材料的 SEY。

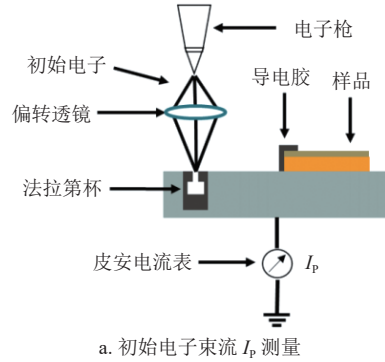
2 功能层材料的 SEY 发射特性分析

2.1 SEY 测量方法

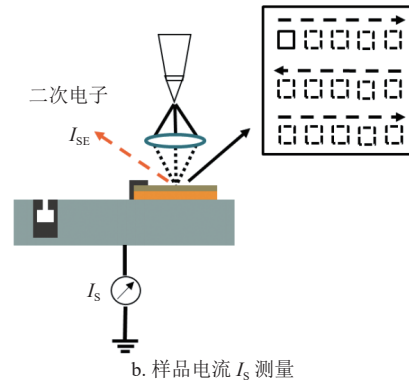
在 SEY 测量中, 本文采用收集法^[15-16]测试导电性差的样品, 用样品电流法^[17]测试导电性好的样品。样品电流法测量 SEY 在场发射扫描电子显微镜 (FESEM, Zeiss Gemini 500) 中进行, 该腔体的真空度要优于 2×10^{-6} Torr, 出射电子能量范围为 20~30 000 eV, 电子束流范围为 50~2 000 pA, 具体测量原理如图 2 所示。测试过程中, 放大倍数为 500 倍, 此时视场测量的面积为 $220 \times 150 \mu\text{m}^2$, 扫描周期设定为 330 ms。测试主要过程: 首先将电子枪移动到法拉第筒正上方并调节焦距, 使电子束聚焦于测量平面; 在 0.05~10 keV 范围内改变电子束能量, 并调节焦距保证电子束聚焦于法拉第杯开口位置, 利用 FESEM 自带的皮安表测量不同电子束能量对应的入射电子束电流 I_p ; 然后将电子枪移动到样品正上方, 在 0.05~10 keV 范围内改变电子束能量, 并调节焦距保证电子束聚焦于样品表面, 测量不同电子束能量下的样品电流 I_s 。那么, 可根据式 (1) 计算材料的 SEY:

$$\sigma = 1 - \frac{I_s}{I_p} \quad (1)$$

基于 SEM 的样品电流法不仅能及时观测测量区域的微观形貌, 同时充分利用了电子束流的高稳定性和电子能量的宽范围可调的特性, 能在宽能量范围内较为稳定地测得材料的二次电子发射特性。



a. 初始电子束流 I_p 测量



b. 样品电流 I_s 测量

图2 样品电流法测 SEY 原理图^[17]

2.2 SEY 测试结果分析

对 SEM 量测过程中涉及的部分材料进行 SEY 测量。图 3 是不同掺杂类型的硅和碳化硅的 SEY 测试结果。N 型硅的 SEY 最大值为 $\sigma_{\text{max}}=2.12$, P 型硅的 SEY 最大值为 $\sigma_{\text{max}}=2.35$, 并且在出射电子能量满足 $0.05 \text{ keV} < E_p < 10 \text{ keV}$ 时, P 型硅的 SEY 大于 N 型硅的 SEY。N 型碳化硅的 SEY 最大值为 $\sigma_{\text{max}}=2.20$, P 型碳化硅的 SEY 最大值为 $\sigma_{\text{max}}=2.59$, 且在测量范围内, P 型碳化硅的 SEY 大于 N 型碳化硅的 SEY。

当材料的 SEY 较大时, 材料表面的次级电子发射效率较高, 在 SEM 图像中将体现为该区域显亮色。根据掺杂半导体硅和碳化硅材料 SEY 曲线变化, 当初始电子能量在 0.05~10 keV 范围内, P 型掺杂区 SEY 大于 N 型掺杂区 SEY, 则 P 型掺杂区显亮色, N 型掺杂区显暗色。在 SEM 量测剖面结构过程中, 设定的入射电子束能量 $E_p=5 \text{ keV}$, 所以碳化硅的 SEM 图像中, P 型碳化硅显亮色, N 型碳化硅显暗色。

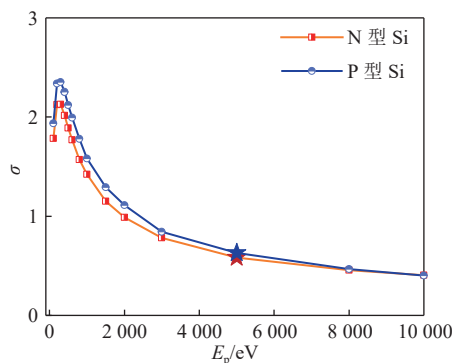
为了更好地体现 SEM 图像中的明暗差异, N 型掺杂区和 P 型掺杂区之间的衬度可由该区域的 SEY 的比率表示:

$$C_{\text{pn}} = \left| \frac{\sigma_n}{\sigma_p} - 1 \right| \quad (2)$$

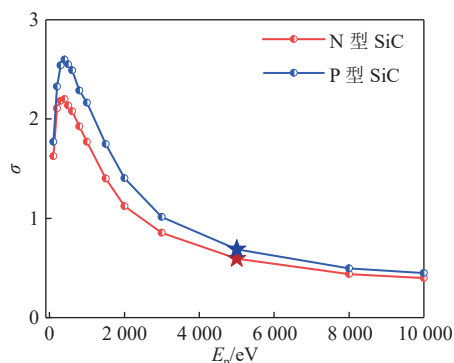
式中, C_{pn} 表示 N 型掺杂区和 P 型掺杂区之间的衬

度; σ_n 表示 N 型掺杂区的 SEY; σ_p 表示 P 型掺杂区的 SEY。

对不同掺杂类型的硅和碳化硅的 SEY 测试结果进行处理, 图 4 展示了掺杂衬度 C_{pn} 随初始电子能量 E_p 的变化情况。根据图 4 可知, 硅和碳化硅的 C_{pn} 随 E_p 的增大整体呈先增大后减小的趋势。硅的掺杂衬度的峰值 $C_{pnmax}=0.13$, 达到该峰值对应的初始电子能量 $E_{pmax}=0.8$ keV; 碳化硅的掺杂衬度的峰值 $C_{pnmax}=0.25$, 达到该峰值对应的初始电子能量 $E_{pmax}=2$ keV。当 E_p 在 300 eV~10 keV 之间变化时, 硅的 C_{pn} 几乎全部小于 0.13, 而碳化硅的 C_{pn} 几乎全部大于 0.13。也就是说, 硅的 C_{pn} 小于碳化硅的 C_{pn} , 在 SEM 图像中 N 型碳化硅和 P 型碳化硅之间比 N 型硅和 P 型硅之间掺杂衬度更大。



a. 不同掺杂类型的硅的 SEY 曲线



b. 不同掺杂类型的碳化硅的 SEY 曲线

图 3 SEY 测试结果

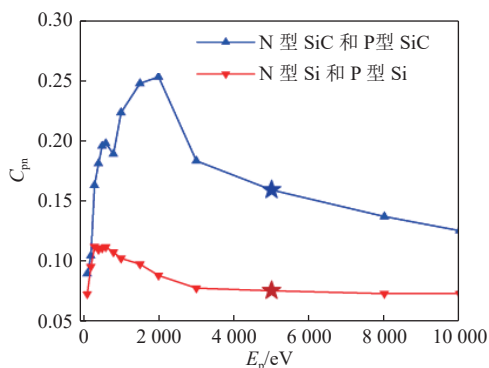


图 4 不同掺杂类型的硅和碳化硅的 C_{pn}

在 SEM 量测剖面结构过程中, 设定的初始电子能量为 5 keV, 硅的掺杂衬度 $C_{pn}=0.08$, 碳化硅的掺杂衬度 $C_{pn}=0.16$, 所以 SEM 图像中 N 型碳化硅和 P 型碳化硅之间明暗差异明显, N 型硅和 P 型硅之间没有明显差异, 能利用 SEM 进行碳化硅 PN 结的量测而不能进行硅基 PN 结的量测。

3 掺杂衬度产生原理

从二次电子发射角度对不同半导体材料掺杂后 SEY 的变化进行解释。当入射电子与原子相互作用激发出部分电子, 也就是内二次电子。内二次电子只有运动到样品表面并克服表面势垒, 它们才能以二次电子的形式逸出固体表面, 然后被探测器捕获。考虑到样品的功函数 ϕ 和费米能级 E_F , 激发电子的能量 E' 只有满足 $E' > \phi + E_F$, 该电子才能克服表面势垒, 以二次电子的形式发射出来。

本文 SEM 量测中, 主要涉及 Si、SiC、Al 和 SiO_2 这 4 种材料, 此外 GaN、GaAs、Au、Cu 和 Al_2O_3 均为常见材料, 对这些半导体、金属和氧化物进行了 SEY 测试, 结果如图 5 所示。其中, 用红色图标表示半导体材料, 用蓝色图标表示金属材料, 用绿色图标表示氧化物材料, 用★表示量测中涉及的材料。可以发现, 氧化物材料的 SEY 明显大于金属材料 and 半导体材料的 SEY。

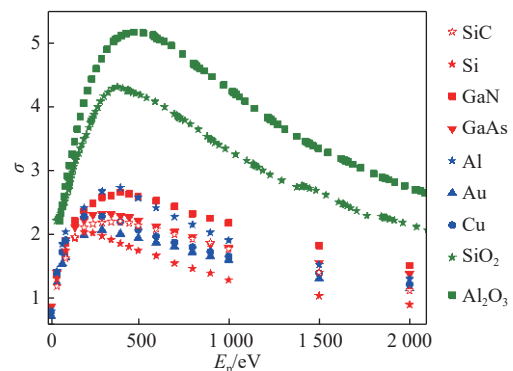


图 5 不同材料 SEY 曲线

在金属材料中, 入射电子与导带自由电子、声子相互作用, 导致能量损失, 产生的二次电子在逸出时与导带电子也会进行多次碰撞, 抑制了二次电子发射。氧化物材料导带中的电子很少, 减少了二次电子与导带电子的碰撞概率, 增大了二次电子逸出几率^[18-20]。相比之下, 半导体材料禁带宽度窄, 电子容易从价带跃迁到导带, 所以电子平均自由程比氧化物材料小, 导致 SEY 要小于氧化物。根据上述分析, 氧化物中低导带电子密度和长平均自由程是其 SEY 高于金属和半导体的主要原因。

SEM 图像中掺杂衬度产生同样与材料表面性

质有关^[9,21]。通常情况下, 半导体材料的表面因为存在缺陷或杂质而失去原有的周期性结构, 从而产生表面态。表面态吸引内部载流子, 在材料表面引起电偶极矩的形成, 有时甚至会导致净电荷的累积。该现象使表面费米能级向禁带中心位置偏移, 能带发生弯曲, 如图 6 所示。

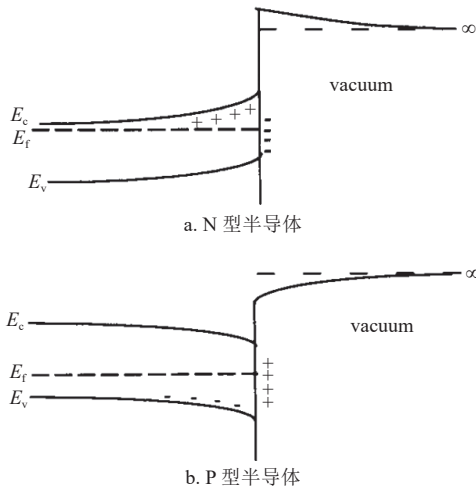


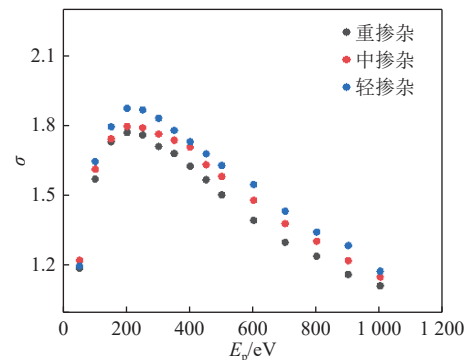
图 6 半导体表面能带弯曲示意图^[7]

在 N 型半导体表面, 内部费米能级比表面费米能级高, 能带向上弯曲, 在样品表面形成一个由体内指向表面的内建电场。在内建电场的作用下, 部分能量较低的内二次电子不能从材料表面射出, 探测器接收到的二次电子数目减少。同样的道理, P 型半导体表面, 能带向下弯曲, 在样品表面形成一个由表面指向体内的内建电场。可以使部分能量较低的内二次电子加速, 离开样品表面, 探测器接收到的二次电子数目增多。综上所述, N 型半导体抑制二次电子从样品表面出射, P 型半导体促进二次电子从样品表面出射, 导致 P 型半导体比 N 型半导体 SEY 更大, 二者在 SEM 图像中存在明暗差异。

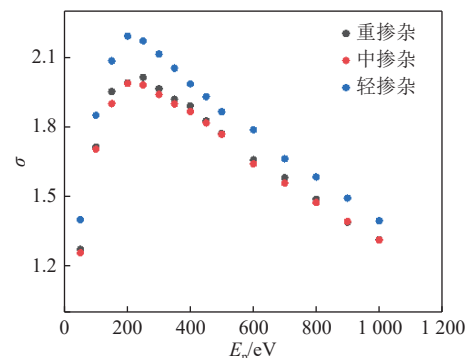
N 型和 P 型两种掺杂类型的材料 SEY 的大小与表面内建电场的大小有关。一方面, 碳原子比硅原子的原子半径小, 那么碳化硅材料表面悬挂键密度比硅材料表面的悬挂键密度更大。在文献 [22-23] 中, 测得碳化硅表面态密度 $10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$, 大于硅单晶表面态密度 $10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。由于悬挂键的存在, 材料表面可与体内交换电子和空穴, 使半导体表面呈耗尽状态。另一方面, 硅是一种简单的共价晶体, 表面的原子排列比较规则。而碳化硅是化合物材料, 包含了多种原子和化学键, 晶体结构比硅的晶体结构更加复杂, 在碳化硅表面较容易形成表面原子排列的不规则性和表面缺陷。所以, 硅和碳化硅两种材料对比, 碳化硅材料产生的表面态密度更大, 表面内建电场也更大, 所以碳化硅 PN 结衬

度比硅基 PN 结衬度大, 能利用 SEM 进行碳化硅 PN 结的量测而不能进行硅基 PN 结的量测。

为探究掺杂浓度和 SEY 的关系, 测试了 N 型和 P 型不同掺杂浓度的硅的 SEY 曲线, 如图 7 所示。图 7a 中, 对于 N 型掺杂, 随着掺杂浓度的增加, SEY 呈减小趋势; 图 7b 中, 对 P 型掺杂, 掺杂浓度增加, SEY 减小, 但在重掺杂和中掺杂中基本相同。随着掺杂浓度的增加, 内二次电子的有效逃逸深度减小^[24]。有效逃逸深度是影响 SEY 的一个关键参数, 有效逃逸深度越小, 二次电子逃逸到真空中的可能性降低。另外, 掺杂浓度增加导致导带自由电子增多, 增加了电子-电子散射作用, 减小了平均自由程, 抑制了二次电子的逸出^[19-20, 25]。也就是说掺杂浓度增大对 SEY 有抑制作用。



a. 不同掺杂浓度的 N 型硅的 SEY 曲线



b. 不同掺杂浓度的 P 型硅的 SEY 曲线

图 7 不同掺杂浓度硅的 SEY 曲线

4 结束语

本文基于硅基 MOSFET 和碳化硅 MOSFET 中 PN 结的二次电子图像, 实验测量并结合理论分析, 探讨了二次电子图像中掺杂半导体衬度的产生机制, 得出以下结论。

1) 利用 SEM 进行了硅基 MOSFET 和碳化硅 MOSFET 器件的量测, 在 SEM 图像中直观体现出硅和碳化硅的 PN 结衬度差异: N 型硅和 P 型硅之间没有明显的图像对比度而 N 型碳化硅和 P 型碳化硅有明显的明暗对比, 且 P 型区显亮色、N 型区显暗色。

2) 基于 SEM 用样品电流法测量了不同掺杂类型的硅和碳化硅的 SEY, 比较分析测试结果得出: P 型区的 SEY 比 N 型区大; 硅的掺杂衬度小于碳化硅的掺杂衬度。所以利用 SEM 可以实现碳化硅 PN 结的量测, 而不能进行硅基 PN 结的量测。

3) 碳化硅和硅的衬度差异和材料表面性质密切相关。由于表面态的存在, 能带发生弯曲, 产生表面内建电场, 所以 P 型半导体的 SEY 大于 N 型半导体; 由于碳化硅材料产生的表面态密度更大, 表面内建电场更强, 所以碳化硅 PN 结衬度相对较大, 能利用 SEM 进行碳化硅 PN 结的量测而不能进行硅基 PN 结的量测。

参考文献

- [1] KIL Y H, JEONG M I, SHIM K H, et al. Two-dimensional dopant profiling in P+/N junctions using scanning electron microscope coupled with selective electrochemical etching[J]. *Electronic Materials Letters*, 2010, 6(2): 55-58.
- [2] OATLEY C W, EVEKHART T E. LIII. The examination of P-N junctions with the scanning electron microscope[J]. *Journal of Electronics and Control*, 1957, 2(6): 568-570.
- [3] CHANG T H P, NIXON W C. Electron beam induced potential contrast on unbiased planar transistors[J]. *Solid-State Electronics*, 1967, 10(7): 701-704.
- [4] SCHÖNJAHN C, HUMPHREYS C J, GLICK M. Energy-filtered imaging in a field-emission scanning electron microscope for dopant mapping in semiconductors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(12): 7667-7671.
- [5] SEALY C P, CASTELL M R, WILSHAW P R. Mechanism for secondary electron dopant contrast in the SEM[J]. *Journal of Electron Microscopy*, 2000, 49(2): 311-321.
- [6] ELLIOTT S L, BROOM R F, HUMPHREYS C J. Dopant profiling with the scanning electron microscope—A study of Si[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(11): 9116-9122.
- [7] CHEE A K W. Unravelling new principles of site-selective doping contrast in the dual-beam focused ion beam/scanning electron microscope[J]. *Ultramicroscopy*, 2020, 213: 112947.
- [8] HASHIMOTO Y, TAKEUCHI S, SUNAOSHI T, et al. Voltage contrast imaging with energy filtered signal in a field-emission scanning electron microscope[J]. *Ultramicroscopy*, 2020, 209: 112889.
- [9] EL-GOMATI M M, ZAGGOUT F, JAYACODY H, et al. Why is it possible to detect doped regions of semiconductors in low voltage SEM: A review and update[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2005, 37(11): 901-911.
- [10] EL-GOMATI M M, WELLS T C R, MULLEROVA I, et al. Why is it that differently doped regions in semiconductors are visible in low voltage SEM?[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2004, 51(2): 288-292.
- [11] PEROVIC D D, CASTELL M R, HOWIE A, et al. Field-emission SEM imaging of compositional and doping layer semiconductor superlattices[J]. *Ultramicroscopy*, 1995, 58(1): 104-113.
- [12] 孙霞, 丁泽军, 吴自勤. 掺杂半导体扫描电镜二次电子像[J]. *物理*, 2004, 33(10): 765-770.
SUN X, DING Z J, WU Z Q. Secondary electron imaging of semiconductor dopants with the scanning electron microscope[J]. *Physics*, 2004, 33(10): 765-770.
- [13] QIAN J S, SHI L M, JIN M, et al. An investigation of body diode reliability in commercial 1.2 kV SiC power MOSFETs with planar and trench structures[J]. *Micromachines*, 2024, 15(2): 177.
- [14] STRENGER C, UHNEVIONAK V, BURENKOV A, et al. Influence of ion implantation in SiC on the channel mobility in lateral N-channel MOSFETs[J]. *ECS Transactions*, 2013, 58(4): 71-80.
- [15] 吴群. 二次电子发射系数测量装置研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
WU Q. Research on measuring device of secondary electron emission coefficient[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [16] 李红林. 二次电子发射系数测控系统软硬件设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
LI H L. Software and hardware design of secondary electron emission coefficient measurement and control system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [17] 蔡亚辉, 王丹, 贺永宁. 基于扫描电子显微镜的二次电子发射系数测量[J]. *真空科学与技术学报*, 2022, 42(9): 654-657.
CAI Y H, WANG D, HE Y N. Measurement method of secondary electron yield based on scanning electron microscope[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2022, 42(9): 654-657.
- [18] 周帆, 王蕊, 梁轩铭, 等. MgO 薄膜次级电子发射材料研究现状与展望[J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46(10): 1128-1138.
ZHOU F, WANG R, LIANG X M, et al. Research status and prospect of MgO thin films as secondary electron emission materials[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2020, 46(10): 1128-1138.
- [19] BRUINING H. Physics and applications of secondary electron emission[M]. London: Pergamon Press Ltd., 1962: 78-96.
- [20] SHIH A, YATER J, HOR C, et al. Secondary electron emission studies[J]. *Applied Surface Science*, 1997, 111: 251-258.
- [21] 张凯, 班春光, 张子帆, 等. 基于扫描电子显微镜的半导体掺杂剂含量剖面分析研究进展[J]. *电子显微学报*, 2022, 41(2): 205-218.
ZHANG K, BAN C G, ZHANG Z F, et al. Review of dopant profiling based on scanning electron microscopy[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2022, 41(2): 205-218.
- [22] 颜永美. P 型 Si 单晶表面态真空效应的光伏测定[J]. *固体电子学研究与进展*, 1992, 12(1): 30-33.
YAN Y M. Study of effect of vacuum on surface states of P type silicon by photovoltaic method[J]. *Research & Progress of Solid State Electronics*, 1992, 12(1): 30-33.
- [23] 朱靖, 黄玲琴, 夏马力, 等. 宽带隙半导体 SiC 表面态研究[J]. *固体电子学研究与进展*, 2020, 40(6): 401-405.
ZHU J, HUANG L Q, XIA M L, et al. Study on surface state of wide band-gap semiconductor of SiC[J]. *Research & Progress of SSE*, 2020, 40(6): 401-405.
- [24] ZHAO Y N, MENG X Z, PENG S T, et al. Physical mechanism of secondary-electron emission in Si wafers[J]. *Chinese Physics B*, 2024, 33(4): 047901.
- [25] VOLOTSENKO I, MOLOTSKII M, BARKAY Z, et al. Secondary electron doping contrast: Theory based on scanning electron microscope and Kelvin probe force microscopy measurements[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(1): 014510.