



4H-SiC 外延层中 BPD 向 TED 转化的深度及分布特征

王逸民^{1,2}, 宋华平^{2*}, 胡正发^{1,3*}, 张伟¹, 杨军伟², 孙帅^{1,2}

(1. 广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州 510006; 2. 松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808; 3. 汕头广工大协同创新研究院, 广东 汕头 515041)

摘要: 采用熔融 KOH 腐蚀法和化学机械抛光技术对低掺杂 4H-SiC 外延层进行处理, 通过共聚焦激光显微镜和偏光显微镜对基晶面位错(BPD)转化为贯穿型刃位错(TED)的过程进行光学表征, 对比 BPD 与 TED 的腐蚀坑坑壁斜率变化找到转化点, 测量了 15 个 BPD-TED 转化点的转化深度, 发现 93% 的转化发生在 1 μm 以内的缓冲层中, 仅 7% 发生在 1 μm 以上的漂移层中, 并且平均转化深度为 0.59 μm , 表明 BPD-TED 的转化主要发生在衬底/外延层的交界处, 在外延生长初期就已完成转化。BPD-TED 的转化研究, 对于理解和优化 SiC 晶体外延生长具有重要意义。

关键词: SiC; 基晶面位错; 贯穿型刃位错; KOH 腐蚀; 化学机械抛光

中图分类号: TM23

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2023)02-0342-04

引文格式: 王逸民, 宋华平, 胡正发, 等. 4H-SiC 外延层中 BPD 向 TED 转化的深度及分布特征[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(2):342-345.

WANG Yimin, SONG Huaping, HU Zhengfa, et al. Depth and Distribution Characteristics of BPD to TED Conversion in 4H-SiC Epitaxial Layers[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(2):342-345.

碳化硅(4H-SiC)作为第三代宽禁带半导体材料, 其具有高击穿电场、高热导率、高电子饱和漂移速率等优点, 因此被广泛应用于大功率、高电压、高温和高频等领域中^[1-2]。尽管, SiC 衬底和外延生长工艺制备技术已获得了很大的进展, 但缺陷密度高仍是难以短时间内解决的问题^[3]。商业化的 4H 型 SiC 衬底中仍具有高的位错密度, 如基晶面位错(BPD)为 500—1 000 cm^{-2} 、贯穿型螺位错(TSD)为 300—500 cm^{-2} 、贯穿型刃位错(TED)为 2 000—5 000 cm^{-2} 。在 SiC 外延生长过程中有 95% 以上的 BPD 会转化为 TED^[4], 其中 TED 对于器件的危害较小, 常被视为良性位错。而 BPD 常被作为少数载流子注入和复合时的单个 Shockley 型堆垛层错(SSF)的成核和扩展位点, 扩展所形成的堆垛层错将导致载流子寿命的显著降低和漏电流的严重增

加^[5]。因此, 研究外延层中 BPD-TED 的转化对于 SiC 器件的发展具有重要意义^[6], 尤其是研究转化点所处的深度可为 BPD-TED 转化提供更多的细节和参考价值。

Song^[7]通过反应离子刻蚀(RIE)的方法刻蚀外延层, 测得外延层 0.5 μm 处的 BPD 数与外延层薄膜中的基本一致, 推测外延层中 BPD-TED 的转化主要发生在衬底/外延层交界处, 但是对于外延层中 BPD-TED 转化点的具体深度没有深入探究。N. A. MAHADIK 等^[8]提出, 外延层中 BPD-TED 的转化既可发生在缓冲层中, 也可发生在漂移层中, 同时也提到了 SiC 样品中载流子的浓度不会对 BPD-TED 的转化产生影响, 但是对缓冲层和漂移层中的转化率未做深入探讨。V. D. Heydemann 等^[9]通过在传统的 SiO_2 抛光液中添加氧化剂的方法, 增加了

收稿日期: 2023-02-27

基金项目: 广东省自然科学基金-面上项目(2022A1515012628); 广东省科技创新战略专项项目(STKJ202209063)

作者简介: 王逸民, 硕士研究生, 从事第三代半导体材料 SiC 外延生长及物性研究, E-mail: 695816162@qq.com。

通信作者: 胡正发, 博士, 教授, 从事光电材料和器件、柔性电子和柔性传感器件的研究, E-mail: zhfhhu@gdut.edu.cn;

宋华平, 博士, 特聘高工, 从事第三代半导体材料 SiC 外延生长及物性研究, E-mail: songhp211@163.com。

化学机械抛光(CMP)的抛光速率。杨龙等^[10]对 SiC 外延片进行长时间的腐蚀后发现,当从 BPD 转化而来的 TED 被腐蚀至衬底/外延层交界处时,BPD 导致的椭圆形腐蚀坑将在 TED 腐蚀坑底部出现,从而可以辨别 BPD 转化而来的 TED。

本文采用一种腐蚀-抛光-再腐蚀的方法,探究 BPD-TED 的转化深度,以及其分布特征。

1 实验部分

1.1 试样

实验试样为东莞中科汇珠半导体有限公司生产的膜厚为 5 μm 、直径为 10 cm(4 寸晶圆)的 SiC 外延片,其中:外延层厚度为 5 μm ,其中包括厚 1 μm 的缓冲层,掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;4 μm 的漂移层,掺杂浓度为 $2.14 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,衬底方向为 11-20。将所获外延片切割为 10 mm $\times$ 10 mm,以便于实验。

1.2 仪器

化学机械抛光(CMP)设备为沈阳科晶自动化设备有限公司生产的自动精密研磨机,CMP 抛光用 SiO_2 碱性抛光液。氢氧化钾腐蚀实验使用 KSL-1200X 型箱式电炉,本实验中使用的偏光显微镜型号为 Leica DM8000M、激光显微镜型号为 VK-1000X。

1.3 方法

将 3 片样品放入 520 $^{\circ}\text{C}$ 的熔融 KOH 中腐蚀 10 min,待样品冷却后进行清洗,然后利用偏光显微镜的反射模式观察位错腐蚀坑信息。在完成上述样品表面基本情况观测后,采用 CMP 工艺减薄外延层,其中研磨机转速为 $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、压强为 47 kPa、抛光时间为 20 h,抛光液的滴加速率为 $0.5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,而对应 CMP 工艺的减薄速率为 $0.1 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ 、减薄厚度约为 2 μm 。外延层经 KOH 腐蚀后会形成一定厚度的氧化物层,从而影响第二次腐蚀的效果,通过减薄外延层可以去除氧化物层,使得第二次腐蚀更加容易进行,同时也可以更好地观察衬底下方的缺陷转化情况。抛光后进行第 2 次腐蚀时腐蚀条件保持不变,第 2 次腐蚀后观察到部分 TED 的底部出现了 BPD,即由衬底 BPD 转化而来的 TED^[10],使用激光显微镜对其进行表征,并通过对比 BPD、TED 及底部带 BPD 的 TED3 类缺陷形貌,得出共计 15 个点的具体转化深度信息。

2 结果与讨论

图 1 为样品中同一区域经历腐蚀、CMP 和再次腐蚀后 TED 腐蚀坑形貌的演化过程。从图 1 可见,经第 2 次腐蚀后,TED 底部出现了 BPD。

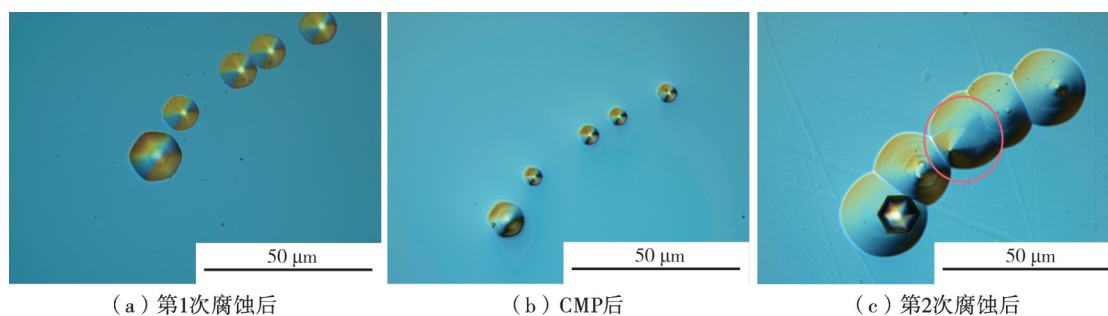


图 1 缺陷追踪光学显微镜图

Figure 1 Optical microscope images of defect tracing

对底部带有 BPD 的 TED 及单一 TED、BPD 进行激光显微镜表征,结果如图 2 所示。图 2(a)是由衬底 TED 继承而来 TED 的形貌、图 2(b)是由衬底 BPD 继承而来 BPD 的形貌、图 2(c)是由衬底 BPD 转化而来的 TED 形貌。从图 2 可见:TED 腐蚀坑呈现出 V 字对称形,而 BPD 腐蚀坑的两端位于同一水平线上;TED 腐蚀坑右壁上出现了明显的斜率变化,因此推测坑壁上斜率变化的点就是 BPD 与 TED 的转化点。

以坑壁上斜率变化的点作为 BPD-TED 转化的

深度测量点,共测量计算 15 个带有 BPD 的 TED 腐蚀坑底部的分界点深度,其计算公式为 $H = H_E - H_C - H_S$,其中 H_E 为外延层厚度、 H_C 为 CMP 减薄厚度、 H_S 代表分界点距离样品表面的距离。将计算结果绘制为柱状图,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出:在 15 个腐蚀坑样本中,有 14 个样本的深度位于 1 μm 以内的缓冲层中,只有 1 个样本位于 1 μm 以上的漂移层中,由此可知缓冲层中的转化点占比达到了 93%,转化率如此高的原因主要是 BPD-TED 的转化深度较浅且大部分发生于外

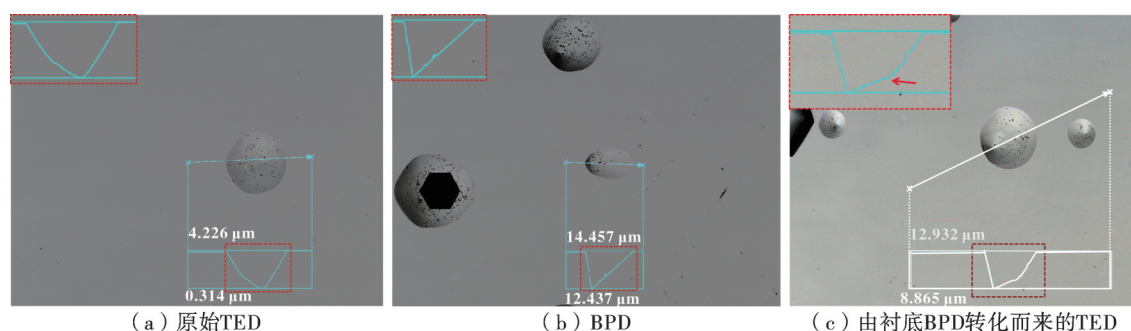


图2 腐蚀坑的激光显微镜图

Figure 2 Three types of etch pits were observed under laser microscope

延生长初期;此外,平均转化深度约为 $0.59 \mu\text{m}$ 。

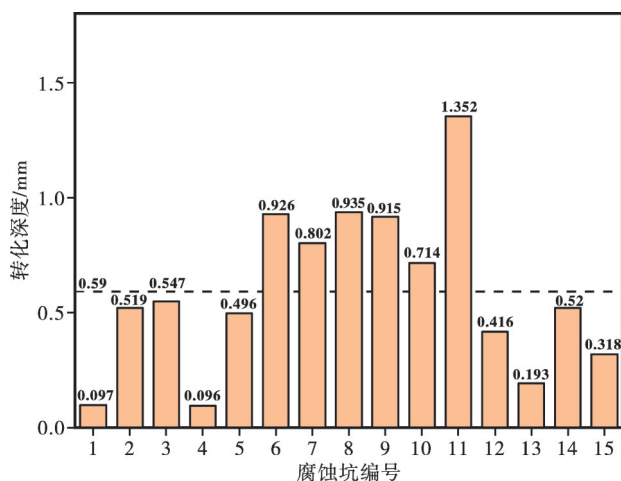


图3 BPD-TED转化深度柱状图(其中虚线代表转化深度的平均值)

Figure 3 Bar graph of BPD-TED conversion depth (dashed line represents the average conversion depth)

图4为外延层中BPD向TED转化的横截面示意图。从图4可见:BPD-TED的转化存在两种情

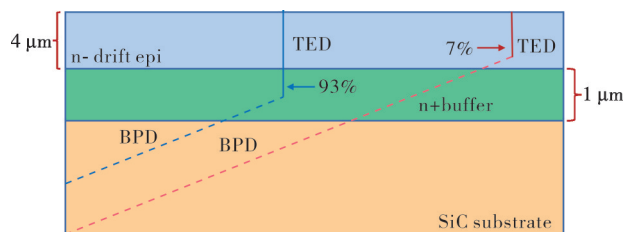


图4 BPD-TED转化示意图

Figure 4 Schematic diagram of BPD-TED conversion

况,既发生掺杂浓度较高的 $1 \mu\text{m}$ 以内的缓冲层,也发生在掺杂浓度较低的 $1 \mu\text{m}$ 以上漂移层;发生在缓冲层中占比为 93%,而发生在漂移层的占比仅为

7%,这是由于在 4H-SiC 的外延生长过程中,BPD-TED 转化主要发生在衬底/外延层交界处的缓冲层中,同时也存在部分 BPD-TED 的转化发生在漂移层中。这一结果也与 N. A. Mahadik 等^[8]的研究结果相符。

3 结论

采用 KOH 腐蚀和化学机械抛光方法,结合光学表征,探究了外延层中 BPD 向 TED 转化的深度及其分布情况。结果表明,外延层中 BPD-TED 转化同时发生在缓冲层和漂移层中,且大部分转化发生在 $1 \mu\text{m}$ 以内的缓冲层中。该发现对于进一步研究 SiC 器件中的缺陷行为及优化 SiC 材料质量,具有重要的意义。

参考文献:

- [1] VIA F L, CAMARDA M, MAGNA A L. Mechanisms of growth and defect properties of epitaxial SiC [J]. Applied Physics Reviews, 2014, 1(3): 5880-5885.
- [2] KIMOTO T, YONEZAWA Y. Current status and perspectives of ultrahigh-voltage SiC power devices [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, 78:43-56.
- [3] 汤正午,王春明,宇岩,等.广东省新材料领域发展布局现状及对策研究[J].材料研究与应用,2022,16(5):752-765.
- [4] HA S, CHUNG H J, NUHFER N T, et al. Dislocation conversion in 4H silicon carbide epitaxy [J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 244(1): 257-266.
- [5] LENDENMANN H, BERGMAN P, DAHLQUIST F, et al. Degradation in SiC bipolar devices: Sources and consequences of electrically active dislocations in SiC [J]. Materials Ence Forum, 2003, 433-436: 901-906.
- [6] 黎小辉,万霞,甘春雷.汽车制动材料研究现状与发展趋势[J].材料研究与应用,2020,14(3):240-245.

- [7] SONG H Z, SUDARSHAN T S. Investigation of basal plane dislocation reduction/elimination by molten KOH-NaOH eutectic etching method [J]. Materials Science Forum, 2012, 717-720: 125 - 128.
- [8] MAHADIK N A, STAHLBUSH R E, ANCONA M G, et al. Observation of stacking faults from basal plane dislocations in highly doped 4H-SiC epilayers [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(4): 283.
- [9] HEYDEMANN V D, EVERSON W J. Chemical mechanical polishing of on-axis semi-insulating SiC substrates [J]. Materials Science Forum, 2004, 457-460: 805 - 808.
- [10] 杨龙, 赵丽霞, 吴会旺. 4H-SiC 同质外延基面位错的转化 [J]. 微纳电子技术, 2020(3): 5.

Depth and Distribution Characteristics of BPD to TED Conversion in 4H-SiC Epitaxial Layers

WANG Yimin^{1,2}, SONG Huaping^{2*}, HU Zhengfa^{1,3*}, ZHANG Wei¹, YANG Junwei², SUN Shuai^{1,2}

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangzhou University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China; 3. Synergy Innovation Institute of GDUT, Shantou 515041, China)

Abstract: Low-doped 4H-SiC epitaxial layers were treated using molten KOH etching and chemical mechanical polishing techniques. The conversion process of basal plane dislocations (BPDs) into threading edge dislocations (TEDs) was optically characterized by confocal laser microscopy and polarizing microscopy. By comparing the slope variations of BPDs and TEDs etch pits, the conversion points were identified and the conversion depths of 15 BPD-TED conversion points were measured. The results show that 93% of conversion occurs in the buffer layer within 1 μm , and only 7% occurs in the drift layer above 1 μm , with an average conversion depth of 0.59 μm . These findings indicate that the conversion of BPDs to TEDs mainly occurs at the interface between the substrate and the epitaxial layer and is completed at the beginning of the epitaxial growth. This study is of great significance for understanding and optimizing SiC crystal epitaxial growth.

Keywords: SiC; basal plane dislocation; threading edge dislocation; KOH etching; chemical mechanical polishing

(学术编辑: 褚欣)