

低位错密度 8 英寸导电型碳化硅单晶衬底制备

熊希希¹, 杨祥龙¹, 陈秀芳¹, 李晓蒙¹, 谢雪健¹, 胡国杰¹,
彭燕¹, 于国建², 胡小波¹, 王焱浩², 徐现刚¹

(1. 山东大学 晶体材料国家重点实验室, 新一代半导体材料研究院, 济南 250100; 2. 广州南砂晶圆半导体技术有限公司, 广州 511458)

摘要: 碳化硅具有优异的物理化学性能, 在电动汽车、轨道交通、高压输变电、光伏、5G 通信等领域具有广泛应用前景。8 英寸(1 英寸=2.54 cm)SiC 衬底在降低器件单位成本、增加产能供应方面具有巨大的潜力, 成为行业重要的技术发展方向。近期山东大学与广州南砂晶圆半导体技术有限公司在 8 英寸 SiC 衬底位错缺陷控制方面取得了重大突破, 使用物理气相传输法(Physical vapor transport, PVT)制备了低位错密度 8 英寸导电型 4H-SiC 单晶衬底, 其中螺位错(Threading screw dislocation, TSD)密度为 0.55 cm^{-2} , 基平面位错(Basal plane dislocation, BPD)密度为 202 cm^{-2} 。

关键词: 4H-SiC; 8 英寸; 低位错密度; 单晶衬底

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

Fabrication of 8-inch N-type 4H-SiC Single Crystal Substrate with Low Dislocation Density

XIONG Xixi¹, YANG Xianglong¹, CHEN Xiufang¹, LI Xiaomeng¹, XIE Xuejian¹, HU Guojie¹,
PENG Yan¹, YU Guojian², HU Xiaobo¹, WANG Yaohao², XU Xiangang¹

(1. Institute of Novel Semiconductors, State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China;
2. Guangzhou Summit Crystal Semiconductor Co., Ltd., Guangzhou 511458, China)

Abstract: Silicon carbide (SiC) has wide application in electric vehicles, rail transit, high voltage power transmission and transformation, photovoltaic, and 5G communication owing to its excellent physical and chemical properties. 8-inch SiC substrate has great potential in reducing unit cost of devices and increasing capacity supply, and has become an important technology development direction of the industry. Recently, Shandong University and Guangzhou Summit Crystal Semiconductor Co., Ltd. have made a major breakthrough in the control of dislocation defects in 8-inch SiC substrates. The 8-inch n-type 4H-SiC single crystal substrate with low dislocation density has been fabricated by physical vapor transport (PVT) method, of which the threading screw dislocation (TSD) density is 0.55 cm^{-2} , and the basal plane dislocation (BPD) density is 202 cm^{-2} .

Key words: 4H-SiC; 8-inch; low dislocation density; single crystal substrate

碳化硅(SiC)作为第三代半导体材料, 具有高学稳定性等优良特性, 在电动汽车、轨道交通、高压输
击穿场强、高饱和电子漂移速率、高热导率、强化变、光伏、5G 通信等领域具有重大应用价值^[1-4]。

收稿日期: 2023-07-18; 收到修改稿日期: 2023-08-04; 网络出版日期: 2023-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(52022052, 62004118); 山东省重点研发计划(2022ZLGX02)

National Natural Science Foundation of China (52022052, 62004118); Shandong Province Key R&D Program (2022ZLGX02)

作者简介: 熊希希(1994-), 男, 博士研究生. E-mail: xiongxixi@summitcrystal.com

XIONG Xixi (1994-), male, PhD candidate. E-mail: xiongxixi@summitcrystal.com

通信作者: 杨祥龙, 副教授. E-mail: yangxl2016@sdu.edu.cn; 陈秀芳, 教授. E-mail: cxf@sdu.edu.cn

YANG Xianglong, associate professor. E-mail: yangxl2016@sdu.edu.cn; CHEN Xiufang, professor. E-mail: cxf@sdu.edu.cn

在新能源产业强劲需求下,全球 SiC 产业步入高速增长期,加大了对 SiC 衬底产能的需求。目前商用 SiC 衬底尺寸仍以 6 英寸为主^[5-7],扩大 SiC 衬底尺寸是增加产能供给、降低成本的重要途径之一。

近年来 SiC 衬底生产商加速推进 8 英寸衬底的研究和量产进度,以抢占 8 英寸先机。2015 年,行业龙头美国 Wolfspeed 展示了 8 英寸 SiC 样品,2022 年 4 月,Wolfspeed 启动了全球首家 8 英寸 SiC 晶圆厂。虽然起步时间相对较晚,但国内 8 英寸 SiC 衬底研究近年来取得了显著进展。2022 年多家单位宣布开发成功 8 英寸导电型 4H-SiC 产品,包括山东大学、广州南砂晶圆、中国科学院物理研究所、山东天岳先进、山西烁科晶体、北京天科合达等单位^[8-9]。8 英寸与 6 英寸 SiC 晶圆的制造工艺有很大差别,当尺寸扩展到 8 英寸,热应力增大,缺陷控制更加困难,尤其是位错缺陷的控制。目前商用 6 英寸导电型 4H-SiC 衬底的 TSD 密度控制在 200 cm^{-2} 以下,优品的 TSD/BPD 密度小于 50 cm^{-2} ,BPD 密度在 800 cm^{-2} 以下,优品的 TSD/BPD 密度小于 500 cm^{-2} ^[10]。8 英寸 SiC 衬底要实现量产,提升市场份额,需要进一步降低位错缺陷密度,达到 6 英寸 SiC 衬底的位错缺陷水平,尤其是对器件性能影响较大的 TSD 和 BPD。

2022 年,山东大学与南砂晶圆成功制备了低微管密度高结晶质量的 8 英寸导电型 4H-SiC 单晶衬底^[8],近期在 8 英寸 SiC 衬底位错缺陷控制方面又取得了重大突破,制备了近“零 TSD”和低 BPD 密度的 8 英寸导电型 4H-SiC 单晶衬底。图 1(a)为制备的 8 英寸导电型 4H-SiC 单晶衬底,使用熔融 KOH 对衬底进行选择性蚀刻,统计 BPD 和 TSD 对应的特征腐蚀坑数量,计算 BPD 和 TSD 密度。图 1(b)为衬底的 BPD 密度分布图,平均 BPD 密度为 202 cm^{-2} 。图 2(a)给出了 TSD 密度分布图,平均 TSD 密度 $<1\text{ cm}^{-2}$ 。图 2(b)为不同尺寸 TSD 腐蚀坑对应的数量,其中 TSD 数量总计 42 个,测试点数 1564 个,每个点对应面积 0.0489 cm^2 ,因此 TSD 密度= $42/(1564\times 0.0489\text{ cm}^2)=0.55\text{ cm}^{-2}$ 。8 英寸 SiC

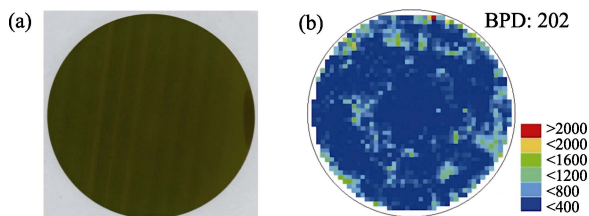


图 1 8 英寸导电型 4H-SiC 单晶衬底以及对应的 BPD 密度分布
Fig. 1 8-inch conductive 4H-SiC single crystal substrate and corresponding BPD density distribution

(a) 8-inch conductive 4H-SiC single crystal substrate; (b) BPD density mapping

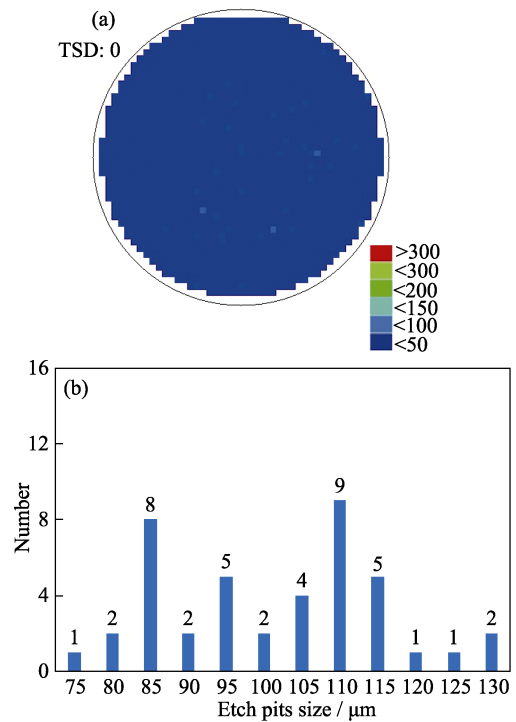


图 2 TSD 密度为 0.55 cm^{-2} 的分布图和 TSD 特征腐蚀坑统计分布

Fig. 2 Distribution of TSD density with 0.55 cm^{-2} and statistical distribution of TSD characteristic etch pits

(a) TSD density mapping; (b) The number of TSDs characteristic etch pits with different sizes

单晶衬底位错缺陷的有效控制,有助于加快国产 8 英寸导电型 4H-SiC 衬底的产业化进程,提升市场竞争力。

参考文献:

- [1] SIERGIEJ R R, CLARKE R C, SRIRAM S, *et al.* Advances in SiC materials and devices: an industrial point of view. *Materials Science and Engineering: B*, 1999, **61**: 9.
- [2] CASADY J B, JOHNSON R W. Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: a review. *Solid State Electron*, 1996, **39**(10): 1409.
- [3] CHENG L, PALMOUR J W, AGARWAL A K, *et al.* Strategic overview of high-voltage SiC power device development aiming at global energy savings. *Materials Science Forum*, 2014, **778**: 1089.
- [4] MORVAN E, KERLAIN A, DUA C, *et al.* Influence of material properties on wide-bandgap microwave power device characteristics. *Materials Science Forum*, 2003, **433**: 731.
- [5] MAKAROV Y N, LITVIN D, VASILIEV A, *et al.* Sublimation growth of 4 and 6 inch 4H-SiC low defect bulk crystals in Ta (TaC) crucibles. *Materials Science Forum*, 2016, **858**: 101.
- [6] CHOI J W, KIM J G, JANG B K, *et al.* Modified hot-zone design for large diameter 4H-SiC single crystal growth. *Materials Science Forum*, 2019, **963**: 18.
- [7] PENG Y, CHEN X F, PENG J, *et al.* Study on the growth of high quality semi-insulating $\phi 150\text{ mm}$ 4H-SiC single crystal. *Journal of Synthetic Crystals*, 2016, **45**(5): 1145.
- [8] YANG X L, CHEN X F, XIE X J, *et al.* Growth of 8 inch conductivity type 4H-SiC single crystals. *Journal of Synthetic Crystals*, 2022, **51**(9): 1745.
- [9] LOU Y F, GONG T C, ZHANG W, *et al.* Fabrication and characterizations of 8-inch n type 4H-SiC single crystal substrate. *Journal of Synthetic Crystals*, 2022, **51**(12): 2131.
- [10] YANG G, LIU X S, LI J J, *et al.* Dislocations in 4H silicon carbide single crystals. *Journal of Synthetic Crystals*, 2022, **51**(9): 1673.