

SiC 晶体缺陷的阴极荧光无损表征研究

苗瑞霞, 张玉明, 汤晓燕, 张义门

西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 陕西 西安 710071

摘要 由于在研究 SiC 晶体缺陷对器件性能的影响的过程中, 表征材料缺陷的常用的方法是破坏性的, 因此寻找一种无损的测试方法对缺陷进行有效的表征显得尤为重要。基于阴极荧光(CL)的工作原理对 4H2SiC 同质外延材料的晶体缺陷进行了无损测试研究。结果发现利用阴极荧光可以观测到晶体内部的堆垛层错、刃位错和螺位错以及基面位错, 其阴极荧光图中的形貌分别为直角三角形、点状和短棒状。因此该方法成为 SiC 晶体缺陷的无损表征时的一种有效的测试方法。如果利用该方法对材料的衬底和外延层缺陷分别进行观测就能建立起衬底和外延层缺陷之间的某种联系, 另外对器件工作前后的缺陷进行表征, 建立器件工作前后缺陷之间的联系, 就可以进一步地研究材料缺陷对器件性能影响的问题。

关键词 阴极荧光; 4H2SiC; 无损表征; 位错及堆垛层错

中图分类号: O474 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)03-0702-04

引言

宽禁带半导体材料具有优越的电学和热力学特性, 如高的临界击穿电场、高饱和电子漂移速度, 以及高的热导率^[1,2]。相比 Si 材料, 常见晶型 4H2SiC 材料的击穿电场是它的 10 倍, 饱和电子漂移速度是其 2 倍, 热导率将近 3 倍。这些特性使得宽禁带半导体材料 4H2SiC 成为高温高频大功率电子器件的理想材料^[1]。然而体生长的 4H2SiC 材料存在着很多缺陷, 这些缺陷在外延生长中有的转化为堆垛层错, 有的延伸到外延层, 严重影响器件的性能。最近的研究结果表明: 基面位错在外延生长时其中一部分延伸到外延层, 还有一部分进一步扩展形成堆垛层错, 形成的堆垛层错将俘获载流子并显著地增加器件的电阻, 导致器件正向电压漂移^[3,5]。为了进一步深入研究晶体缺陷对器件性能的影响, 材料的缺陷表征与分析则成为开展该项研究工作的基础。

常规研究缺陷的方法有 KOH 刻蚀, 刻蚀后通过扫描电子显微镜(SEM)对缺陷形貌以及缺陷密度进行测试分析, 该方法由于腐蚀性对材料是破坏性的, 因此局限性大。透射电子显微镜(TEM)也是一种高分辨的观测缺陷的方法, 但是由于 TEM 要求样品厚度在纳米级, 而 SiC 高硬度的特性, 也使该方法在研究 SiC 材料的缺陷时受到一定的限制, 同时该方法也是破坏性的^[6]。光学测试和电学测试无疑是良好的无损测试手段, 如光致发光和阴极荧光。但对于光致发光的

测试方法来说由于受到紫外激光器波长的限制而不能实现有效的本征激发, 因此利用光致发光研究这类宽禁带半导体材料的发光特性是很困难的, 对缺陷的形貌观察则更困难^[7]。

阴极荧光是利用电子束激发半导体样品, 将价带电子激发到导带, 之后由于导带能量高不稳定, 被激发电子又重新跳回价带, 并释放出能量的特征荧光, 相比于光致发光而言, 阴极荧光的方法可测量更宽范围的波段, 对某些宽带半导体材料来说可得到有效的激发。同时利用阴极荧光中的单色光成像可以观测晶体内部信息。因此本文试图利用阴极荧光这一特点对宽禁带半导体 SiC 进行无损测试, 观测晶体中的缺陷分布以及形貌, 为后续的研究确定一种有效的无损测试的方法。

1 实验

本文利用的阴极荧光谱仪是作为附件安装在扫描电镜上的, CL 荧光探头伸入扫描电镜样品室中接受样品产生的荧光信号。其阴极荧光设备为英国 Gatan 公司生产的, 型号为 Monoc3⁺。测试时选取 2[#] 光孔, CL 标准距离为 121.7 mm, 测试温度 300 K。本实验选取的样品为采用 CVD 法外延生长的 n 型 4H2SiC 同质外延片, 其衬底为 Si 面偏离(0001)面 8 的 2 英寸 n 型 4H2SiC 单晶, 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 外延生长温度为 1560 e, 压力 96 mbar, SiH₄: 20 mL # min⁻¹, C₃H₈: 10 mL # min⁻¹, H₂: 90 L # min⁻¹, 外延层厚

度 512 Lm 。

2 结果与分析

图 1 为 n 型 4H2SiC 同质外延片的 CL 谱, 图中显示了两个明显的光峰, 其波长分别为 388 nm 和 468 nm 。结合 CL 成像图可以解读 CL 谱中揭示的材料缺陷信息, 为了研究材料中的缺陷情况, 我们对材料进行 CL 成像分析。图 2 中 (a) 和 (b) 分别为同一区域 388 nm 和 468 nm 波段的单色 CL 图。

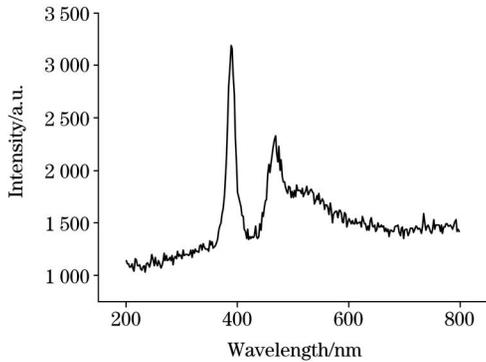


Fig 1 CL spectrum of 4H2SiC homoepitaxial layer

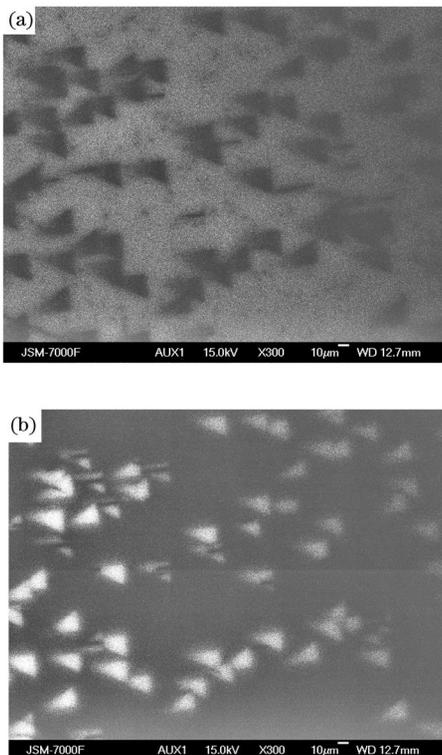


Fig 2 CL mapping of 4H2SiC homoepitaxial layer
(a): 388 nm ; (b): 468 nm

根据 E 与 K 的关系可以计算出波长 388 nm 对应的 E 是 3.2 eV , 恰好在 4H2SiC 的禁带宽度附近, 这表明发光区域为 4H2SiC 基体材料, 如图 2(a) 所示。从图 2(a) 中可以看到黑的点状、线条状和三角形状图案, 而其他区域为亮色区

域, 这是由于基体材料的发光是电子从导带回到价带的过程中释放能量产生光信号, 当材料中出现缺陷时, 会在能带中引入缺陷能级^[8], 由于电子从缺陷能级回到价带时与从导带回到价带时的能量差不同, 发出的光信号也就不同, 因此会出现衬度, 这样就会显现出缺陷的形貌。

由于该材料为单晶, 所以可以推断黑的点状、线条状和三角形状则是晶格畸变区, 也就是缺陷存在的区域。图 2(a) 和 (b) 中看到的直角三角形是相互对应的, 图(b) 其中发光的三角形说明该缺陷的发光波段在 468 nm , 仔细观察我们发现白色直角三角形内部左侧较右侧衬度要弱一些。说明直角三角形较小的锐角一端是延伸到晶体内部的, 而短直角边则延伸到晶体表面。据报道: 在 4H2SiC 外延材料中直角三角形是在外延生长中由基面位错 (BPD) 转化形成的堆垛层错, 基面位错在衬底表面的位错露头成为该层错形成的核位^[9]。因此我们可以推测出我们所观测到的直角三角形为原位生成的堆垛层错, 其成核位在衬底的位错露头处, 层错是沿着基面扩展的, 这一点还可以根据堆垛层错的几何形貌计算出的外延层厚度得以验证, 几何关系如图 3 所示, 计算的外延层厚度为 5107 Lm , 非常接近用红外线测外延层厚度的方法测得的结果 512 Lm 。

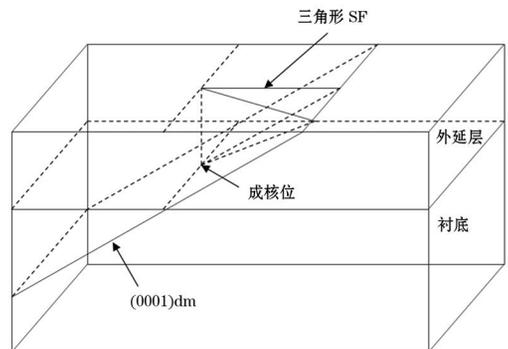


Fig 3 The schematica of stacking faults in CL image

从 CL 图中我们可以清楚地看到堆垛层错的分布, 经观察样品中堆垛层错的分布是均匀分布的, 该图取的是其中一个很小的区域。根据堆垛层错的数目可以计算这种缺陷的密度。本样品中直角三角形堆垛层错的密度为 $5.7 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 。这样的堆垛层错其他研究者也观测到^[9,11]。

图 2(a) 中的黑点是垂直于基面的螺型位错和刃型位错, 徐军等利用 CL 在氮化镓中也观测到这样的缺陷^[12]。黑色短棒状缺陷其方向和偏切方向 $[11\bar{2}0]$ 平行, 同样还可以看到短棒的左侧较右侧衬度要弱一些。这说明该缺陷也是从衬底沿基面延伸到外延层, 该缺陷为基面位错。该位错的形成是由于 4H2SiC 晶体为密排六方结构, 在偏 (0001) 面 b 方向生长时由于 (0001) 面是最密排原子面, $[11\bar{2}0]$ 晶向为最密排方向, 原子位移所需的能量最低, 因此位错最容易在基面产生, 并且绝大多数方向为 $[11\bar{2}0]$ 晶向。根据位错理论可知: 位错线封闭时必定在晶体中形成一个封闭的曲线, 不封闭时不能终止在晶粒或晶体内部, 只会终止在晶体的界面或表面^[13]。因此从衬底延伸穿透到外延层表面的位错会在生长

面处有位错露头。由于受电子束激发深度以及材料对光吸收的影响,位错在表面处和基体之间的衬度值最大,而随着位错线向晶体内部延伸的深度的增加,位错与基体的衬度值逐渐减小,直至没有衬度。基面位错在 CL 影像图中会呈现短棒状,且短棒在位错露头出衬度值最大,而沿着基面向体内延伸时衬度逐渐减弱。其长度和上述的堆垛层错的一个直角边长度相当,基面位错在 CL 图中的长度同样可以参考堆垛层错成像的几何关系得以验证。点状缺陷为螺型位错、刃型位错,这是由于晶体在生长时在平行于 $[0001]$ 方向也容易产生螺型位错和刃型位错。根据位错理论可知在生长面出现位错露头,因此就成为点状。示意图见图 4。发光强度会受缺陷数量的影响^[14],当晶片质量越高,缺陷数量很少,缺陷吸收的总能量就会越少,更多的能量被基体材料吸收,所以基体材料发光更强,同时随着入射电子能量以及数量(电子束流)的增加,激发深度和激发的电子数也增加,使得发光区

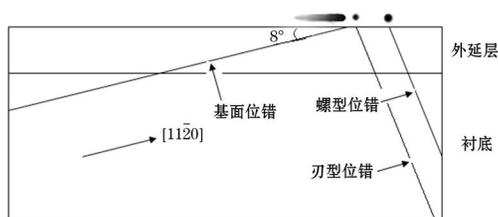


Fig 4 The schematica map explains these defects in CL image

的发光强度也随之增强,这几种因素综合作用使得缺陷形貌会呈现得更清晰,这样就可以清楚的数出位错,从而计算出位错密度。本实验根据 CL 图中的基面位错的分布情况以及数目对样品中进行多处拍照,计算出该位错的密度约为 $11.7 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 。

从以上分析可以看出,利用阴极荧光可以对 4H2SiC 晶体中的堆垛层错、基面位错和刃型位错螺型位错缺陷进行无损表征。如果利用该方法对器件工作前后的缺陷进行表征,建立器件工作前后缺陷之间的联系,从而可以进一步地研究材料缺陷对器件性能影响的问题。另外也可以通过该方法对材料的衬底和外延层缺陷分别进行观测,于是就能建立起衬底和外延层缺陷之间的某种联系,通过这种联系可以分析缺陷在外延生长中的某些转化的机理。

3 结 论

利用阴极荧光对 4H2SiC 晶体缺陷进行无损表征,结合 CL 谱和 CL 图可以表征晶体多种结构缺陷如:晶体内部的堆垛层错、尚位错和螺位错以及基面位错,并根据缺陷分布确定缺陷密度,因此在进行 SiC 晶体缺陷研究时阴极荧光分析成为缺陷研究的一种很好的分析和表征方法,也是工业在线方便快捷的一种检测工具。

参 考 文 献

- [1] Liu K X, Stahlbush R E, Lew K K, et al. J. Electron Mater, 2008, 37: 730.
- [2] Ryu SH, Kornegay K T. IEEE Trans. Electron Decices, 1998, 45: 45.
- [3] Maximenko S I, Sudarshan T S. J. Appl. Phys., 2005, 97: 074501.
- [4] Fujiwara H, Kimoto T, Tojo T, et al. Appl. Phys. Lett., 2005, 87: 051912.
- [5] Zhang Z, Moulton E, Sudarshan T S. Appl. Phys. Lett., 2006, 89: 081910.
- [6] Camassel J, Juilaguet S. J. Physics D: Applied Physics, 2007, 40(20): 6264.
- [7] XU Zhen2jia(许振嘉). Testing and Analysis on Semiconductor(半导体检测与分析). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2007. 245.
- [8] LIU En2ke, ZHU Bin2sheng, LUO Jin2sheng(刘恩科, 朱秉升, 罗晋生). Physics of Semiconductor(半导体物理学). Beijing: National Defense Industry Press(北京: 国防工业出版社), 2006. 47.
- [9] Miyanagi T, Tsuchida H, Kamata I, et al. Appl. Phys. Lett., 2006, 89: 062104.
- [10] Chen B, Chen J, Sekiguchi T, Ohyanagi T, et al. Appl. Phys. Lett., 2008, 93: 033514.
- [11] Izumi S, Tsuchida H, Kzmata I, et al. Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 202108.
- [12] XU Jun, XU Ke, CHEN Li, et al(徐 军, 徐 科, 陈 莉, 等). J. Modern Instruments(现代仪器), 2005, 11: 24.
- [13] ZHAO Jing2shi(赵敬世). Theoretical Basis of Dislocation(位错理论基础). Beijing: National Defense Industry Press(北京: 国防工业出版社), 1989. 16.
- [14] CHEN En2guang, YI L2xin, WANG Shen2wei, et al(陈恩光, 衣立新, 王申伟, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2008, 28(2): 247.

The Study of Nondestructive Defect Characterization of SiC by Cathodoluminescence

MIAO Ru₂xia, ZHANG Yu₂ming, TANG Xia₂yan, ZHANG Y₂men

Key Laboratory of Ministry for Wide Band₂Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics, Xidian Un₂iversity, Xi an 710071, China

Abstract As the general method of defect characterization is destructive, during the current research on the effect of defect on device, nondestructive defect characterization is important especially. The defects of 4H₂SiC homoepitaxial layer had been ob₂served and studied, based on the principle of cathodoluminescence(CL). The results show that the intrinsic stacking faults (SFs), threading edge dislocations(TEDs), threading screw dislocations(TSDs) and basal plane dislocations(BPDs) can be ob₂served by cathodoluminescence. The shape are rightangle triangle, dot and stick, repectively. So this method is available for nondestructive defect characterization. The correlation between 4H₂SiC substrate defects and epilayer defects will be established if we characterize the defects of 4H₂SiC wafers with and without an epilayer. In addition, if we characterize the defects of device before and after operation, the correlat ion between SiC defects of the devices before and after operation will be established, too.

Keywords Cathodoluminescence(CL); 4H₂SiC; Nondestructive defect characterization; Dislocations and stacking faults

(Received Mar. 28, 2009; accepted Jun. 28, 2009)