

4H-SiC 中基面位错发光特性研究*

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, 西安 710071)

(2010年5月27日收到; 2010年6月18日收到修改稿)

本文利用阴极荧光 (CL) 和选择性刻蚀的方法对 4H-SiC 同质外延材料中基面位错的发光特性进行了研究. 结果表明螺型基面位错 (B_{TSD}) 和混合型基面位错 (B_{MD}) 分别具有绿光和蓝绿光特性, 其发光峰分别在 530 nm 附近和 480 nm 附近. 从测试结果中还发现 B_{MD} 的发光位较 B_{TSD} 有所蓝移, 分析认为 B_{TSD} 位错芯附近原子沿伯格矢量方向只受到拉应力, 致使禁带宽度变窄, 而 B_{MD} 同时具有螺型位错的分量和刃型位错的分量, 正是刃型位错中部分原子受到压应力的作用, 导致禁带宽度增宽, 从而使得 B_{MD} 的发光波长比 B_{TSD} 短.

关键词: 4H-SiC, 基面位错, 发光特性, 禁带宽度

PACS: 78.60.Hk, 61.72.Lk, 81.10.Gh

1. 引言

SiC 具有带隙宽、热导率高、电子饱和漂移速率大、化学稳定性好等优点, 因而被用于制作高温、高频、抗辐射、大功率和高密度集成电子器件. 然而由于晶体生长或掺杂工艺, 在衬底和外延层中通常出现大量的缺陷, 这些缺陷对器件的光电特性有着严重的影响. 当器件工作于双极导通模式时, 基面位错 (BPD) 为堆垛层错 (SF) 的生长提供了成核位, BPD 转变为 SF. 在阻挡层中进一步扩展的 SF 将俘获载流子并显著的增加器件的电阻, 导致器件正向电压漂移^[1-3]. 为了研究这些缺陷对材料的光电特性的影响, 研究人员对这些缺陷的特性展开了研究. Ottaviani 等人利用阴极荧光 (CL) 和 X 射线形貌术研究发现 BPD 具有绿带发光的特性, 其发光波段位于 688 nm 附近 ($\Delta E = 1.8 \text{ eV}$)^[4,5]. 然而 Kamata 等人利用光致发光 (PL) 在约 420 nm 附近波段观测到 BPD^[6]. 因此 BPD 究竟有着什么样的发光特性成为一个值得研究的问题.

CL 是利用入射高能电子束 (1—20 keV) 的方法对半导体进行激发、产生电子空穴对并引起发光的^[7]. 相比 PL 而言, 由于电子的能量大于光子的能量, 所以利用 CL 技术更有利于研究宽带隙材料. X

射线形貌术尽管可以观测位错分布, 然而由于 X 射线通常使用透射模式, 缺陷的分布很多是交叠在一起, 对缺陷的分析带来一定困难. 利用选择性刻蚀可以清晰地揭示位错形貌, 因此本文利用阴极荧光 (CL) 和选择性刻蚀的方法对商用的偏 8° 4H-SiC 同质外延材料中 BPD 的发光情况进行了研究. 研究发现螺型基面位错 (B_{TSD}) 和混合型基面位错 (B_{MD}) 分别具有绿光和蓝绿光特性.

2. 样品及实验条件

本文利用的阴极荧光分析系统是由热场场发射扫描电镜和高性能阴极荧光谱仪组成. 阴极荧光谱仪作为附件安装在扫描电镜上, 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. 扫描电镜成像选用背散射电子成像 (BES).

本实验选取的样品为采用 CVD 法外延生长的 n 型 4H-SiC 同质外延片, 其衬底为 Si 面沿 $[11\bar{2}0]$ 方向偏离 (0001) 面 8° 的 2 英寸 n 型 4H-SiC 单晶, 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 外延生长温度为 1550°C , 压力 $9.6 \times 10^3 \text{ Pa}$, SiH_4 : 20 ml/min , C_3H_8 : 10 ml/min , H_2 : 90 l/min . 选择性刻蚀选用 KOH 在 470°C 刻蚀 30 min.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60876061), 陕西 13115 创新工程 (批准号: 2008ZDKG-30), 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: JY10000925009) 和国防基金 (批准号: 9140A08050508) 资助的课题.

[†] E-mail: miao950830@163.com

实验中所使用的阴极荧光设备为英国 gatan 公司生产的型号为 Monocl3⁺, 测试时选取 2[#] 光孔, CL 标准距离为 12.7 mm, 测试温度 300 K, 扫描电子显微镜为日本 JEOL 公司生产的 JSM-7000F, 电压范围 1—30 kV.

3. 实验结果与分析

根据位错的基本理论可知: 位错线和伯格斯矢量平行时该位错为螺型位错 (TSD); 位错线与伯格斯矢量垂直时为刃型位错 (TED); 而位错线和伯格斯矢量夹角既不平行也不垂直时为混合位错 (MD). 在沿 $[11\bar{2}0]$ 偏切 8° 的 4H-SiC 同质外延材料中, 常见到的 BPD 类型是 B_{TSD} 和 B_{MD} , 两种位错类型的确定参见文献 [8], 其腐蚀形貌见图 1.

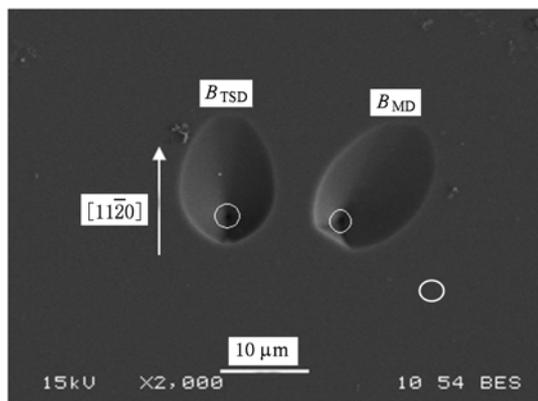


图 1 基面位错刻蚀形貌

为了研究这两种位错的发光情况, 我们分别选取两个位错的露头处进行测试. 图 2(a) 和 (b) 是利用 CL 分别对 B_{TSD} 和 B_{MD} 进行点扫描的 CL 谱图. 从图 2(a) 和 (b) 中可以看到两种位错分别出现两个发光峰, 第一个峰的峰位两者基本相同, 其发光位在 385nm 附近. 根据能量与波长的关系有

$$E = hc/\lambda, \quad (1)$$

其中 h 为普朗克常量, λ 为光的波长, c 为真空中光速. 于是我们可得到 385 nm 相应的光子的能量为 3.22 eV, 该值与 4H-SiC 禁带宽度 (3.26 eV) 十分接近, 我们可以认为该峰为 4H-SiC 的带边发光. 对于第二个峰, 两个位错的测试结果有所不同, B_{TSD} 的发光峰位位于 530 nm (2.34 eV) 附近而 B_{MD} 的发光峰位位于 480 nm (2.58 eV) 附近. 为了进一步确定两种位错的发光位, 我们选取晶格完整区域进行了 CL

的点扫描, 其结果如图 3 所示.

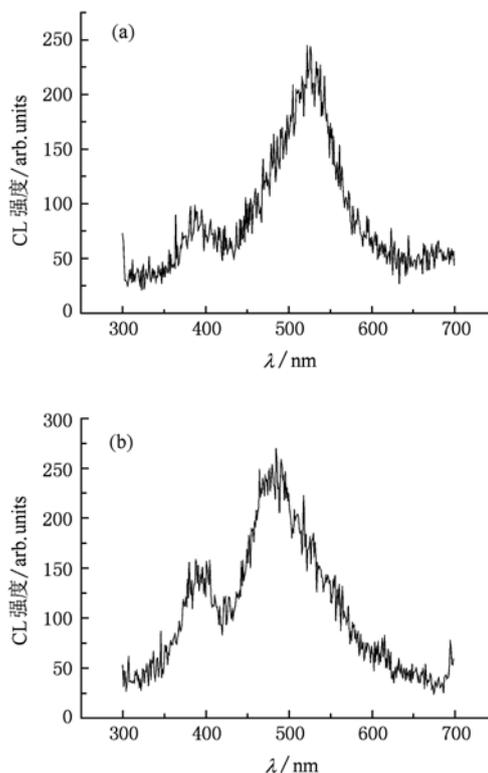


图 2 两种 BPD 的 CL 发光谱 (a) B_{TSD} 的发光谱; (b) B_{MD} 的发光谱

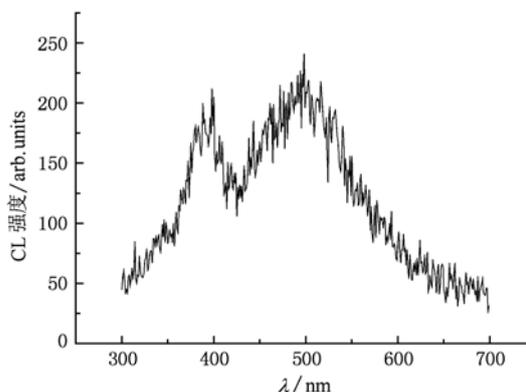


图 3 完整晶格区域 CL 发光谱

通过比较发现: 完整晶格区域的带边发光强度比两种位错的带边发光强度高, 而第二个发光峰的强度比两种位错的第二个峰的强度略有减弱, 并且 530 nm 和 480 nm 两个峰位消失. 这是因为在没有位错的地方晶体是完整晶格区域, 因此相比有位错的地方, 其带边发光就会增强, 而根据我们前面初步确定的两种位错的发光位 530 nm 和 480 nm 在没

有位错的区域其发光峰消失,因此我们可以进一步确定 530 nm 的发光峰是 B_{TSD} 的发光位,480 nm 的发光峰是 B_{MD} 的发光峰位. 分别具有绿光和蓝绿光特性.

从图 2 中我们可以看到两个位错的第二个峰都有展宽和不对称的分布特点. 分析认为:尽管 CL 测试选取了位错露头进行点扫描,然而由于位错芯附近晶格畸变区域只有几个原子的范围,因此 CL 扫描所选取的点除了包含位错芯以外还包含了周边一定范围的晶格完整区域,而晶格完整区域第二个峰的形成与晶体中的各种点缺陷和掺杂有关^[9,10]. 位错的发光峰和完整晶格发光峰的相互影响最终造成了位错的第二峰的不对称与展宽现象.

从图 2 中我们还不难看出, B_{MD} 引起的缺陷的发光峰位较 B_{TSD} 有所蓝移. 分析认为, B_{TSD} 是螺型位错,而螺型位错的特点就是位错芯附近原子沿着原子滑移方向受到拉应力,晶格是拉伸状态,而这种状态会使禁带宽度变窄^[11],而 B_{MD} 由于除了具有螺型位错的分量外还具有部分刃型位错的分量,刃型

位错中部分原子受到压应力的作用,导致禁带宽度增宽^[11],受激电子跃迁到该缺陷能级所释放的能量就要比在 B_{TSD} 引入的缺陷能级上的能量大,因此 B_{MD} 的发光波长比 B_{TSD} 的短.

4. 结 论

利用阴极荧光 (CL) 和选择性刻蚀的方法对偏 $8^\circ 4\text{H-SiC}$ 同质外延材料中基面位错的发光情况进行了研究. 结果表明 B_{TSD} 和 B_{MD} 分别具有绿光和蓝绿光特性,其发光峰分别在 530 nm 附近和 480 nm 附近. B_{MD} 的发光位较 B_{TSD} 有所蓝移. 分析认为 B_{TSD} 位错芯附近原子受到拉应力,使禁带宽度变窄,而 B_{MD} 由于除了具有螺型位错的分量外还具有部分刃型位错的分量,刃型位错中晶格有一部分是受压状态,致使禁带宽度变宽,当受激电子跃迁到 B_{MD} 缺陷能级时,释放的能量就要比在 B_{TSD} 的缺陷能级上能量大,因此 B_{MD} 的发光波长比 B_{TSD} 的短.

- [1] Maxinenko S I, Sudarshan T S 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 074501
- [2] Ha S, Skowronski M, Lendenmann H 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 393
- [3] Sumakeris J J, Das M, McD. Hobgood H, Müller S G, Paisley M J, Ha S, Skowronski M, Palmour J W, Carter C H Jr. 2004 *Mater. Sci. Forum* **1113** 457
- [4] Ottaviani L, Idrissi H, Hidalgo P, Lancin M, Pichaud B 2005 *Phys. Stat. Sol. (c)* **6** 1792
- [5] Ottaviani L, Hidalgo P, Idrissi H, Lancin M, Martinuzzi S, Pichaud B 2004 *J. Phys. : Condens Matter* **16** s107
- [6] Kamata I, Tsuchida H, Miyagi T, Nakamura T 2006 *Mater. Sci. Forum* **527-529** 415
- [7] Xu Z J 2007 *Testing and Analysis on Semiconductor* (Science Press) P. 245 (in Chinese) [许振嘉 2007 半导体检测与分析 (科学出版社) 第 245 页]
- [8] Miao R X, Zhang Y M, Zhang Y M, Tang X Y, Gai Q F 2010 *Chin. Phys. B* **19** 076106 (in press)
- [9] Kakanakova-Georgieva A, Yakimova R, Henry A 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 2890
- [10] Ja R X, Zhang Y M, Zhang Y M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4456 (in Chinese) [贾仁需、张义门、张玉明 2008 物理学报 **57** 4456]
- [11] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 2006 *Physics of Semiconductor* (National Defense Industry Press) p. 47 (in Chinese) [刘恩科、朱秉升、罗晋生 2006 半导体物理学 (国防工业出版社) 第 47 页]

Investigation of luminescence properties of basal plane dislocations in 4H-SiC^{*}

Miao Rui-Xia[†] Zhang Yu-Ming Tang Xiao-Yan Zhang Yi-Men

(School of Microelectronics, Xidian University, Key Laboratory for Wide

Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Xi'an 710071, China)

(Received 27 May 2010; revised manuscript received 18 June 2010)

Abstract

Luminescence properties of basal plane dislocations in 4H-SiC are studied by means of cathodoluminescence (CL) and defect selective etching. It is found that basal plane screw dislocations (B_{TSD}) and basal plane mixed dislocations (B_{MD}) have green and blue-green luminescence properties, respectively. The spectrum peaks near 530 nm and 480 nm correspond to B_{TSD} and B_{MD} , respectively. It is found from measurement that the luminescence peak from B_{MD} is blue-shifted. The atoms of B_{TSD} near the dislocation core are affected by tensile stress along the Burger's vector direction, leading to its band gap narrowed. In addition, the Burger's vector of B_{MD} has both screw and edge components. It is the edge component that is responsible for the band gap broadening. In other words, the wavelength from B_{MD} is shorter than that from B_{TSD} .

Keywords: 4H-SiC, basal plane dislocation, luminescence properties, band gap

PACS: 78.60.Hk, 61.72.Lk, 81.10.Gh

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60876061), 13115 Innovation Engineering of Shaanxi (Grant No. 2008ZDKG-30), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. JY10000925009), and the Defence Fund (Grant No. 9140A08050508).

[†] E-mail: miao950830@163.com