

铒离子注入 6H-SiC 的横向离散研究*

秦希峰[†] 王凤翔 梁毅 付刚 赵优美

(山东建筑大学理学院, 济南 250101)

(2009 年 12 月 24 日收到; 2010 年 1 月 5 日收到修改稿)

利用离子注入掺杂技术设计、制作半导体集成器件时, 了解离子注入半导体材料的射程分布、射程离散和横向离散规律等是很重要的. 用 400 keV 能量的铒(Er)离子分别与样品表面法线方向成 0°, 45° 和 60° 倾角注入碳化硅(6H-SiC)晶体中, 利用卢瑟福背散射技术研究了剂量为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 400 keV Er 离子注入 6H-SiC 晶体的横向离散. 测出的实验值与 TRIM'98 和 SRIM 2006 得到的理论模拟值进行了比较, 发现实验值跟 TRIM'98 和 SRIM 2006 计算的理论值都符合较好, TRIM'98 计算的理论值与试验值符合得更好一些.

关键词: 离子注入, 6H-SiC, 卢瑟福背散射技术, 横向离散

PACC: 6170T, 6170W

1. 引 言

随着功率器件、微波器件的不断发展, 传统的硅(Si)材料由于材料本身的性能缺陷, 在这一领域越来越显示出一定的局限性. 碳化硅(SiC)是自第一代元素半导体材料(Si)和第二代化合物半导体材料(GaAs, GaP, InP 等)之后发展起来的第三代宽带隙半导体材料. SiC 材料以其宽带隙、高熔点、高热导率、高临界击穿电场和高饱和漂移速度等优异的物理和电学性质, 再加上化学性质稳定、抗辐射能力强, 且耐磨损, 在光电子学、高温电子学、抗辐射电子学和高频大功率器件领域具有巨大的潜在应用价值^[1]. 近年来由于 SiC 材料在材料制备、外延生长等方面的突破性进展成为国内外半导体行业的研究热点^[2-6].

离子注入技术作为一项重要的工艺已广泛应用于半导体、金属和绝缘体各个领域及许多器件制造过程中, 尤其在半导体工艺中的应用, 使集成电路的生产进入了超大规模集成电路的新时代. 由于 Er^{3+} 离子波长为 1.54 μm 的 4f-4f 发光对于光纤通讯石英玻璃具有最小的光吸收, 对于硅基光波导的研究和光纤通讯的发展具有重要的意义. SiC:Er 是预期能在室温发出波长为 1.54 μm 光的材料之

一^[7], 对于掺铒 SiC 的 1.54 μm 发光的研究一直最受人们的重视, 国内外科研工作者在 Er 离子注入碳化硅掺杂的发光、射程分布和退火行为等研究上做了大量工作^[8-16], 取得了令人瞩目的成就. 随着集成电路芯片的集成密度越来越高, 掌握注入离子的横向离散规律变得越来越重要, 特别是当今半导体器件已发展到深亚微米、甚至到纳米尺度, 离子注入半导体材料中杂质浓度分布的横向离散对器件性能的影响非常明显, 研究注入离子的横向离散分布规律具有重要意义. 但是, 目前对离子注入固体材料的横向离散的研究还较少. 1973 年, Furukawa 等人提出了一种利用离子注入倾斜靶的投影射程离散的实验数据计算注入离子横向离散的方法^[17], 但关于实验测量注入离子横向分布的报道^[18,19] 还不多, 关于注入离子横向离散的研究, 特别是实验研究还很不充分. 据我们所知, 还没有关于低能 Er 离子注入 6H-SiC 晶体中横向离散研究的报道. 本文利用 400 keV 能量的 Er 离子以不同角度注入 6H-SiC 晶体中, 用卢瑟福背散射技术测量其深度射程离散, 进而计算 Er 离子注入 6H-SiC 晶体的横向离散, 测量的结果分别与 TRIM'98 (Transport of Ions in Matter) 和 SRIM 2006 (Stopping and Range of Ions in Matter) 理论模拟计算得到的理论值进行比较, 以期铒离子注入 SiC 晶体掺杂制作半导体集成器件提供参考依据.

* 山东建筑大学校内基金(批准号: XN070109)资助的课题.

[†] E-mail: xfqin@sdjzu.edu.cn

2. 实 验

实验注入离子的样品是 6H-SiC 晶片, 样品表面经过光学抛光. 在离子注入之前进行了清洗处理, 清除表面污染. 在室温下, 利用 400 keV 能量的 Er 离子分别与样品表面法线方向成 0° (实际上, 为了减少沟道效应的影响, 注入时使样品法线相对束流方向偏离 7° , 此角度远大于沟道临界角, 由此引起的投影射程测量的误差小于 1%, 在实验误差范围内)、 45° 和 60° 倾角注入 6H-SiC 晶体样品中. Er 离子的注入剂量为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. 离子注入是在中国科学院半导体所的 500 keV 离子注入机上进行的, 注入过程中, 束流密度小于 $1 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 避免了由于束流过大引起的过热效应.

卢瑟福背散射测量是在山东大学物理学院的 1.7 MV 串列加速器上进行的, Er 离子在 6H-SiC 晶体中的射程分布由加速器产生的 2.1 MeV $^4\text{He}^{2+}$ 离子的背散射谱测得. $^4\text{He}^{2+}$ 离子束垂直样品表面入射, 金硅面垒探测器探测散射角为 165° 的背散射离子, 利用多道分析仪采谱并将所得到的背散射谱输入计算机进行处理. 利用金膜和硅片的背散射谱中金和硅的表面探测系统进行能量定标, 系统的能量分辨率由金膜背散射谱表面高度的 12%—88% 之间给出. 分析 He 束流的强度为 10 nA 左右.

3. 实验结果和讨论

低能重离子在 6H-SiC 晶体中的分布可以利用高斯分布很好地描述. 当射程分布呈高斯分布时, 射程分布可以利用平均投影射程 R_p 和射程离散 ΔR_p 来描述. 由于低能离子在 6H-SiC 晶体中的射程较小, 在 Er 离子分布区域内, 可以利用表面能量近似法将能谱转化为深度谱, 从而求出 R_p 和 ΔR_p [20].

根据 Furukawa 等人提出的实验原理 [17], 当离子注入倾斜靶, 即离子沿与靶表面法线成 θ 角的方向注入时, 注入离子的横向离散情况可以由离子在靶中的深度分布体现出来. 以 ΔX_L 和 ΔR_p 分别表示离子在靶中的标准横向离散和标准投影射程离散. 假定离子倾斜注入时的立体分布是一个三维高斯分布, 倾斜靶中离子的深度分布也还是一个高斯分布, 其深度射程离散用 ΔD 表示, 它们遵循以下关系式 [17]:

$$(\Delta D)^2 = (\Delta R_p)^2 \cos^2 \theta + (\Delta X_L)^2 \sin^2 \theta. \quad (1)$$

离子垂直注入时的深度射程离散就是标准投影射程离散 ΔR_p , 根据这一函数关系, 利用离子垂直注入测得的投影射程离散 ΔR_p 和以倾角 θ 注入离子时测得的深度射程离散 ΔD , 就可以求出标准横向离散 ΔX_L .

图 1 表示 400 keV 的 Er 离子以 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的剂量垂直 (0°) 注入 6H-SiC 晶体的卢瑟福背散射谱, He 离子能量为 2.1 MeV, 背散射角为 165° .

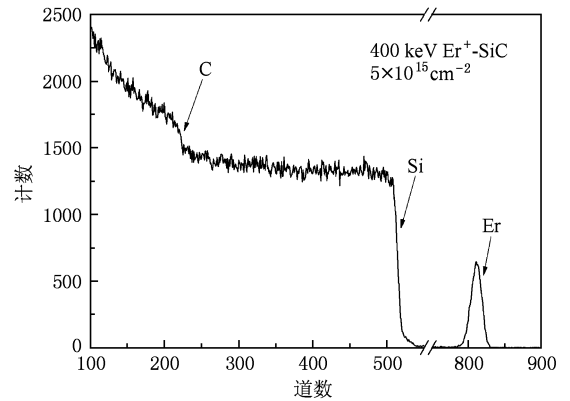


图 1 400 keV, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 Er 离子垂直注入 6H-SiC 晶体的卢瑟福背散射谱

为便于测量和计算, 图 2 给出了 400 keV 的 Er 离子以 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的剂量分别以 0° 和 45° 注入 6H-SiC 晶体中测得卢瑟福背散射谱 Er 的深度分布曲线 (以圆形和三角形符号表示), 图中实线为拟合的高斯分布曲线. 由图 2 可看出, 以 0° 和 45° 倾角注入的 Er 在 6H-SiC 晶体中的分布都呈较好的高斯分布, 可用表面能量近似法将能谱转化为深度谱计算

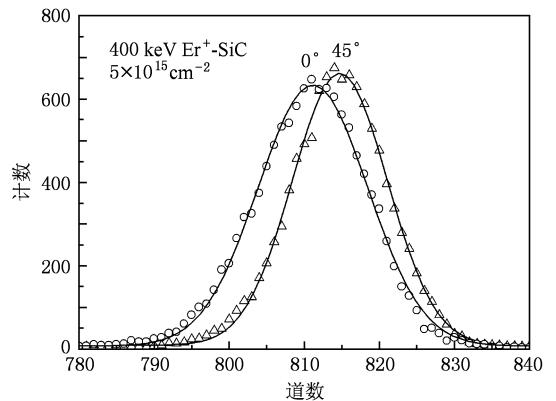


图 2 400 keV, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 Er 离子分别以 0° 和 45° 注入 6H-SiC 晶体中的卢瑟福背散射谱 Er 的深度分布曲线 (以圆形和三角形符号表示, 实线为拟合的高斯分布曲线)

其射程离散 ΔR_p 和 ΔD . 经测量, 我们利用表面能量近似法计算出了 400 keV, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ Er 离子以 0° 和 45° 注入 6H-SiC 晶体的射程离散 ΔR_p 和 ΔD_1 分别为 20.07 nm, 17.73 nm. 代入(1)式, 得到能量为 400 keV, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 Er 离子注入 6H-SiC 晶体中的横向离散为

$$\Delta X_{L1} = 15.03 \text{ nm}.$$

图 3 表示 400 keV 能量的 Er 离子分别以 0° 和 60° 注入 6H-SiC 晶体中的深度分布曲线(分别以圆形和三角形符号表示), 图中也给出了对应的高斯分布曲线. 由图 3 可看出, 以 60° 倾角注入的 Er 在 6H-SiC 晶体中的分布也呈近似高斯分布. 用表面能量近似法计算出 400 keV, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ Er 离子倾斜 60° 注入 6H-SiC 晶体的深度射程离散 ΔD_2 为 16.21 nm, 把 ΔR_p 和 ΔD_2 的值代入(1)式可得

$$\Delta X_{L2} = 14.70 \text{ nm}.$$

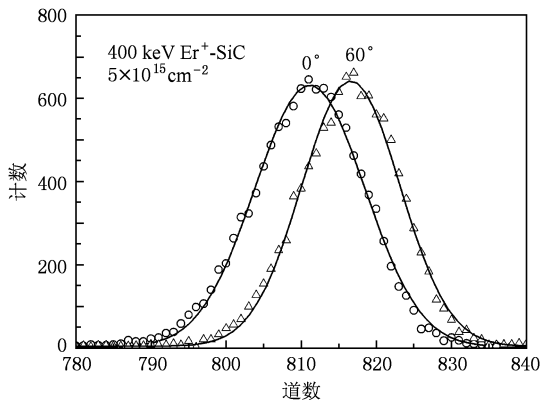


图 3 400 keV, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 Er 离子分别以 0° 和 60° 注入 6H-SiC 晶体中的卢瑟福背散射谱 Er 的深度分布曲线(以圆形和三角形符号表示, 实线为拟合的高斯分布曲线)

把以上两种情况下测得的横向离散值 ΔX_{L1} 和 ΔX_{L2} 求平均, 得到能量为 400 keV 的 Er 离子注入 6H-SiC

晶体中的横向离散实验测量值为

$$\Delta X_L = 14.87 \text{ nm}.$$

我们对 400 keV Er 离子注入 6H-SiC 晶体的横向离散分别用 TRIM'98 和 SRIM 2006 软件进行了计算机理论模拟, 计算出的横向离散理论值分别为 14.1 nm 和 12.9 nm. 把 400 keV Er 离子注入 6H-SiC 晶体的横向离散的理论模拟结果和实验结果进行比较可看出, 理论模拟值都比实验值小; TRIM'98 模拟计算值跟实验值的差别为 5.2%, 两者符合的很好; SRIM 2006 的计算模拟值跟实验值相差 13.2%, 两者符合较好; TRIM'98 计算的理论值跟试验值更接近一些.

4. 结 论

利用卢瑟福背散射技术研究了能量为 400 keV、剂量为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 Er 离子分别跟样品表面法线方向成 0° , 45° 和 60° 倾角注入 6H-SiC 晶体的深度射程离散, 根据 Furukawa 等人提出的实验原理^[17] 测量计算了 400 keV Er 离子注入 6H-SiC 晶体的标准横向离散. 测出的实验值跟 TRIM'98 和 SRIM 2006 软件得到的理论模拟值进行了比较, 发现实验值跟理论值都较好地符合, TRIM'98 计算的理论值跟试验值符合得更好一些. 研究表明沿不同倾角方向注入的 Er 离子在 6H-SiC 晶体中的分布都呈较好的高斯分布, 用表面能量近似法计算低能注入离子的投影射程离散以及用 Furukawa 等人的实验原理^[17] 计算注入离子的横向离散是合理的, 也表明 TRIM'98 和 SRIM 2006 能够较好的模拟 Er 离子注入 6H-SiC 晶体中的运动过程. 这为今后 Er 离子注入 SiC 晶体掺杂制造光电集成器件的设计提供了参考依据.

[1] Derycke V, Soukiassian P G, Amy F, Chabal Y J, D'Angelo M D, Enriquez H B, Silly M G 2003 *Nat. Mater.* **2** 253
 [2] Katsumata H, Uekusa S, Sai H 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 2383
 [3] Gao X, Sun G S, Li J M, Zhang Y X, Wang L, Zhao W S, Zeng Y P 2005 *Chin. Phys.* **14** 599
 [4] Rittenhous T L, Bohn P W, Hossain T K, Adesida I, Lindsay J, Marcus A 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 490
 [5] Lin H F, Xie E Q, Ma Z W, Zhang J, Peng A H, He D Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2780 (in Chinese) [林洪峰、谢二庆、马紫微、张 军、彭爱华、贺德衍 2004 物理学报 **53** 2780]

[6] Li B, Chen Z M, Lin T, Pu H B, Li Q M, Li J 2007 *Chin. Phys.* **16** 3470
 [7] Kozanecki A, Jeynes C, Sealy B J, Nejm A 1998 *Nucl. Instrum. Meth. B* **136-138** 1272
 [8] Yan H, Chen G H, Wong S P, Kwok R W M 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 876 (in Chinese) [严 辉、陈光华、黄世平、郭伟民 1998 物理学报 **47** 876]
 [9] Yang Y T, Han R, Wang P 2008 *Chin. Phys.* **B 17** 3459
 [10] Dontas I, Kennou S 2001 *Diam. Relat. Mater.* **10** 13
 [11] Jia R X, Zhang Y M, Zhang Y M, Guo H, Luan S Z 2008 *Acta*

- Phys. Sin.* **57** 4456 (in Chinese) [贾仁需、张义门、张玉明、郭辉、栾苏珍 2008 物理学报 **57** 4456]
- [12] Kozanecki A, Jeynes C, Barradas N P 1999 *Nucl. Instrum. Meth. B* **148** 512
- [13] Wang Y X, Wen J, Tang Y Q, Guo Z, Tang H G, Wu J X 1998 *Chin. Phys.* **7** 589
- [14] Awahara K, Uekusa S, Goto T 1999 *Nucl. Instrum. Meth. B* **148** 507
- [15] Jin H, Bu F L, Wang R, Li L H, Yang W Y, Zhang L G, An L N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2594 (in Chinese) [金华、卜凡亮、王蓉、李丽华、杨为佑、张立功、安立楠 2009 物理学报 **58** 2594]
- [16] Kozanecki A, Glukhanyuk V, Jantsch W 2003 *Mat. Sci. Eng. B* **105** 169
- [17] Furukawa S, Matsumura H 1973 *Appl. Phys. Lett.* **22** 97
- [18] Wang K M, Shi B R, Wang Z L, Zhao Q T, Liu X D, Liu J T 1991 *Chinese Phys. Lett.* **8** 244
- [19] Morvan E, Mestres, Pascual J, Flores D, Vellvehi M, Rebollo J 1999 *Mat. Sci. Eng. B* **61-62** 373
- [20] Chu W K, Mayer J W, Nicolet M A 1978 *Backscattering Spectrometry* (New York: Academic) chap 5, p137—141

Investigation of the lateral spread of Er ions implanted in 6H-SiC *

Qin Xi-Feng[†] Wang Feng-Xiang Liang Yi Fu Gang Zhao You-Mei

(College of Science, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

(Received 24 December 2009; revised manuscript received 5 January 2010)

Abstract

It is very important to consider the distribution of range, range straggling and lateral spread of ions implanted into semiconductor materials in design and fabrication of semiconductor integration devices by ion implantation. Er ions with energy of 400 keV were implanted in 6H-SiC crystal samples under the angles of 0°, 45° and 60°, respectively. The lateral spread of Er ions with dose of $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ at energy of 400 keV implanted in 6H-SiC crystal were measured by Rutherford backscattering technique. The measured lateral spread is compared with TRIM'98 and SRIM2006 codes prediction. It is seen that the experimental lateral spread well justifies the theoretical values. The value from TRIM'98 agrees somewhat better to the experimental data than the value obtained based on SRIM2006.

Keywords: ion implantation, 6H-SiC, Rutherford backscattering technique, lateral spread

PACC: 6170T, 6170W

* Project supported by the Shandong Jianzhu University Foundation, China (Grant No. XN070109).

[†] E-mail: xfqin@sdju.edu.cn