

# 符合法弹性前冲测量重掺锑硅中氧含量\*

徐岳生 刘彩池 李养贤 朱则韶 王红梅 韦伦存

(河北工业大学材料研究中心 天津 300130)

(北京大学 北京 100871)

**摘要** 本文以能量为 27MeV 的<sup>12</sup>C 做为入射粒子束,采用符合法弹性前冲(CERDA)定量测量了重掺锑硅中氧含量,证实重掺锑硅中氧含量较普通直拉硅要低约 40%,且随着锑含量增加,氧含量下降.对 CERDA 法测量原理及影响测量精度的因素进行了分析与讨论.

**PACC:** 4630R, 3440, 6170T, 6170R

## 1 前言

不断发展的 VLSI-CMOS 工艺广泛采用 N/N<sup>+</sup> 及 P/P<sup>+</sup> 外延材料,与内吸杂(IG)工艺结合以制备无闩锁(Latch-up)的 VLSI 电路产品<sup>[1]</sup>.为此,人们普遍关注重掺硅片的 IG 效应.研究表明,重掺硅中氧结合和氧沉淀行为依赖于掺杂剂的类型和浓度<sup>[2-4]</sup>.精确测量重掺硅中氧含量是研究其中氧结合机制和氧沉淀动力学的前提.

由于重掺硅中强烈的自由载流子吸收,难以用标准的红外法测量氧含量.国外报道采用二次离子质谱分析(SIMS)<sup>[5]</sup>、带电离子活化分析(CPAA)<sup>[6]</sup>进行检测.

CERDA 法由于可定量测量薄样品中的轻元素的含量及深度分布<sup>[7]</sup>,并随着对材料中氢的高灵敏度测量而逐渐成熟.采用符合法,材料中靶原子的浓度可用散射粒子的能谱计算得出.本文应用 CERDA 方法,以 27MeV 的<sup>12</sup>C 做为入射粒子,在计算出实验条件下的卢瑟福散射截面和有效电荷后,从散射粒子的能谱得到重掺锑硅样品中氧含量的定量结果.

## 2 实验过程

### 2.1 样品及制备

样品均为直拉硅(CZSi),N<111>,掺磷与重掺锑,直径  $\Phi 55 \sim 75$ mm,参数如表 1 所示.

\* 国家自然科学基金资助项目,北京大学重离子物理开放实验室资助项目

徐岳生 男,1935 年生,教授,从事半导体材料教学与科研工作  
刘彩池 女,1964 年生,副教授,从事半导体材料教学与科研工作  
李养贤 男,1959 年生,副教授,从事半导体材料教学与科研工作  
1994 年 4 月 20 日收到初稿,1994 年 12 月 24 日收到修改稿

表 1 样品参数

编 号	型 号	掺 杂 剂	晶 向	直 径 (mm)	电 阻 率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
A	n	轻 掺 磷	$\langle 111 \rangle$	75mm	13.1
B	n	重 掺 锑	$\langle 111 \rangle$	75mm	$1.12 \times 10^2$
C	n	重 掺 锑	$\langle 111 \rangle$	55mm	$3.30 \times 10^3$

样品经切、磨、抛加工至  $340\mu\text{m}$  并减薄至  $5\mu\text{m}$ , 为减少薄样品表面氧化层影响, 有的样品做了去除氧化层处理. 样品用导电胶粘在内径为  $\Phi 8$  的垫片上待测. 用  $\alpha$ -200 STEPPER 型台阶仪测量样品厚度, 不均匀尺度  $\leq 0.14\mu\text{m}$ .

## 2.2 实验条件

CERDA 测量在  $2 \times 6\text{MeV}$  串列静电加速器上进行, 测量系统如图 1(a) 所示. 以能量为  $27.4\text{MeV}$  的  $\text{C}^{5+}$  做为入射离子束.  $^{12}\text{C}$  与  $^{16}\text{O}$  的弹性碰撞, 如图 1(b) 所示.

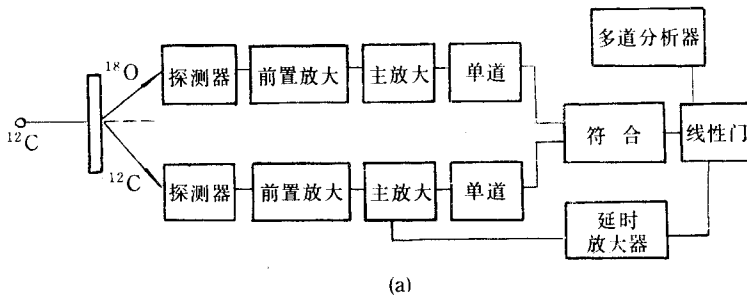
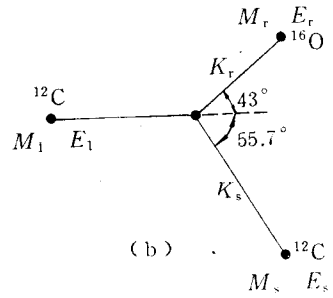


图 1(a) CERDA 测量系统简图

图 1(b)  $^{12}\text{C}$  与  $^{16}\text{O}$  弹性前冲散射简图

当一个碰撞事件发生时, 入射粒子  $^{12}\text{C}$  与重掺锑硅中  $^{16}\text{O}$  发生弹性前冲散射. 前冲粒子与散射粒子分别沿前冲角  $\varphi(43^\circ)$  与散射角  $\theta(55.7^\circ)$  飞出样品表面, 并被相应的金硅面垒探测器收集, 产生脉冲信号. 如果前冲粒子与散射粒子是由同一碰撞事件产生, 则会从单道输出完全相同的波形, 并同时进入符合电路而符合, 并输出一个方波. 来自延时电路的脉冲信号若满足符合条件则被允许进入多道分析器.

实验中,  $^{12}\text{C}$  电路延时放大器延时为  $0.92\mu\text{s}$ , 符合时间为  $0.7\mu\text{s}$  或  $0.2\mu\text{s}$ .

根据探测器的能量标定和计算的出射粒子的能量范围, 选择合适的单道道宽. 这样, 只有能量在此范围内且满足符合条件的粒子才能通过线性门而进入多道分析器, 即将其认为是样品中发生的一个  $^{12}\text{C}$  与  $^{16}\text{O}$  弹性碰撞的测量值. 通过这样的符合测量, 可大大降低本底, 从而提高分析的灵敏度.

## 3 实验结果

(1) 图 2(a)、图 2(b) 和图 2(c) 分别为 CERDA 测量轻掺磷硅和重掺锑硅中氧含量时, 测得散射粒子  $^{12}\text{C}$  的能谱图.

从图 2(a) 中可清晰地看到 A 样品前后表面氧化层对能谱的贡献. 而体内的氧含量是分布均匀的.

图 2(b) 和图 2(c) 中样品前、后表面的氧化层分别被去除干净, 故对能谱没有影响.

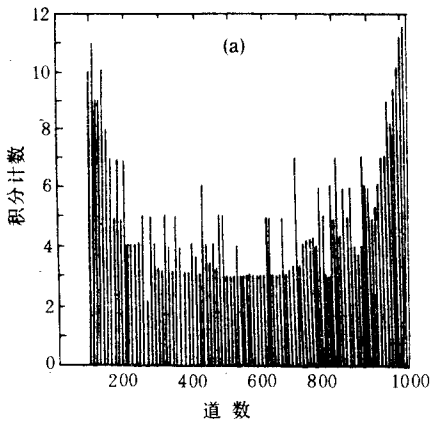


图 2(a) CERDA 测量轻掺磷样品的能谱图  
(样品 A, 第一次)

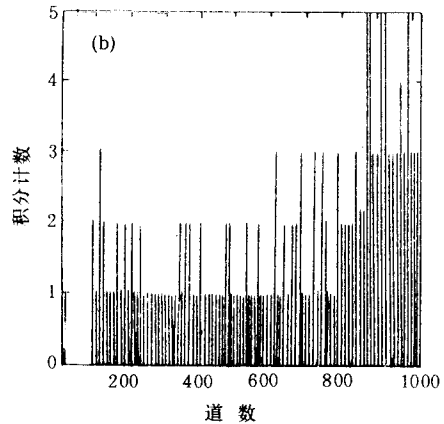


图 2(b) CERDA 测量重掺磷样品的能谱图  
(样品 C, 第一次)

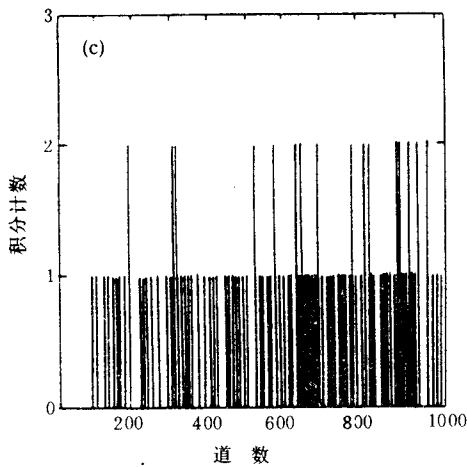


图 2(c) CERDA 测量重掺磷样品的能谱图  
(样品 B, 第一次)

(2) 表 2 为 CERDA 测量中的实验数据.

考虑到样品表面氧化层及能量歧离造成前、后沿能量宽化的影响, 实验中取 500—800 道的区间积分计数作为产额, 其对应样品厚度为  $2.5\mu\text{m}$ . 探测器的立体角为  $0.87 \times 10^{-3}\text{sr}$ .

B 样品共进行了四次测量, 主要是确定入射粒子束流和符合时间对测量结果的影响. 如果入射粒子束流太强, 符合时间较长就会产生假符合, 导致测量结果与实际氧含量的偏离, 检测灵敏度下降. B 样品四次测量的入射粒子束流是依次降低的, 但测量结果却略有上升, 样品 A 也有类似的趋势. 而且各样品第一次测量符合时间为  $0.7\mu\text{s}$ , 其余测量, 在入射粒子束流依次减少的同时, 符合时间降至  $0.2\mu\text{s}$ . 如果

存在假符合, 在上述变化条件下, 测量结果应该下降. 实际情况略有上升, 说明假符合存在的可能性很小.

表 2 CERDA 测量重掺铋硅中氧的实验数据

样 品	测 量	积分计数(500—800 道)	电荷( $\times 10^{-9}$ 库仑)
A	第 1 次	253	9615618
	第 2 次	186	6828939
B	第 1 次	44	2761619
	第 2 次	25	1659683
	第 3 次	24	1462564
	第 4 次	12	745296
C	第 1 次	65	6418975

## (3) 样品氧含量计算结果

计算出与体内氧原子发生弹性散射的碳“浓度”,即为重掺锑硅中氧含量.

计算重掺硅中氧含量的公式为:

$$N = \frac{A}{\sigma \Omega Q t}$$

式中,  $\Omega$ ——探测器所张的立体角(sr)

$N$ ——样品中靶原子的原子浓度(at/cm<sup>3</sup>)  
(硅中氧原子浓度)

$t$ ——样品厚度(cm)

$Q$ ——打到样品上的入射粒子总数  
(<sup>12</sup>C 入射粒子总数)

$A$ ——探测器记录到的粒子数(即产额)

$\sigma$ ——卢瑟福散射截面(实验条件下为  $\sigma = 9.505 \times 10^{-26} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ )

因此可以用表 2 中的数据求得各样品中的氧含量,计算结果见表 3 所示.

表 3 CERDA 测重掺锑硅中氧结果

样 品 氧含量 ( $\times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ )	A		B				C
	第 1 次	第 2 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 1 次
测量值	9.38	9.71	5.68	5.37	5.85	5.74	3.61
平均值	9.54		5.66				
误 差	<2%		<5.2%				

从表 3 可以看出,重掺锑样品 B 氧含量要较轻掺磷硅样品 A 低约 40%,这与国内外研究者的结论是一致的.样品 C 掺锑浓度更高(电阻率为  $3.3 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ),其中氧含量为  $3.61 \times 10^{17} \text{at} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,与国内研究者用 SIMS 测试结果接近.也证实了随着硅中掺锑浓度增加,氧含量下降.

## 4 讨论

### (1) 影响测量精度因素

系统能散度、散射角宽度和样品表面氧化层都影响测量精度.本实验取 500—800 道能量区间进行积分计数,从而降低了上述因素对测量结果的影响.

测量散射粒子产额的误差与入射粒子流的平方成正比,因为入射粒子流增大,碰撞事件大量发生,易产生假符合,但束流过小,碰撞事件太少,计数中偶然事件带来的误差也会增大.应选择适当的入射粒子流.

符合时间过长,会将其他碰撞事件计入,也造成假符合.符合时间过短,会将同一碰撞事件的真实脉冲信号错过,同样引入误差.本实验在测量 A、B 样品时,符合时间第一次为  $0.7 \mu\text{s}$ ,其余为  $0.2 \mu\text{s}$ .如果存在假符合,则散射粒子产额会因此下降.实际测量结果略有上升,因而是可信的.

考虑入射离子能量变化对散射截面及有效电荷的影响,文中选择计数区入射粒子的平

均能量 25MeV 进行计算. 由于入射粒子与样品中氧原子碰撞是随机的, 因而在计数统计中表现出一定的涨落, 会给测量带来一定误差.

(2)重掺锑硅中氧含量的降低, 大多数学者都归因于  $Sb_2O_3$  在熔体自由表面挥发或因为重掺锑硅凝固点下降, 导致坩埚溶解速率下降所致. 还有认为是由于 Sb 的加入, 导致熔体/坩埚界面生成  $SiO_2$  自由能降低, 挥发加快等的影响. 这些观点大都在重掺生长的外因上找原因.

本测量结果表明, 重掺硅中氧强烈地随锑含量上升而下降. 这启发我们应该从氧在重掺硅中的结合机制, 即固溶度的变化方面来进行解释.

## 5 结论

CERDA 是直接测定重掺锑三中氧含量的可靠方法, 它无本底影响, 测试灵敏度高, 结果准确, 且测试重掺硅电阻率范围很广, 因此, 它可以作为标定辐照后 FTIR、测氧结果的可靠方法.

## 参 考 文 献

- [1] E. Shimura, W. Dyson, J. W. Moody *et al.*, in: VLSI Science and Technology/1985, edited by M. W. Bullis and S. Broydo (The Electrochem. Soc., Pennington, NJ, 1985) p. 57.
- [2] A. S. Oates and W. Lin, *J. Cryst. Growth*, 1988, **89**:117.
- [3] H. Walizke, H. -J. Rath, J. Ruff *et al.*, in: Proc. 5th. Intern. Symp. on Silicon Materials Science and Technology, Semiconductor Silicon 1986, Electrochem. Soc., Proc., Vol. 86-4, Eds. H. R. Huff, T. Abe and B. Kobesen (Electrochem. Soc., Pennington, NJ, 1988) p. 86.
- [4] T. Nozaki, Y. Itoh, Y. Masui *et al.*, Proc. 31st. Appl. Phys. Conf. Proc., Kawasaki, Japan, 1984, p. 609.
- [5] M. Goldstein, P. K. Chu, and Roger J. Blalier, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1993, **B(11)**:92.
- [6] C. W. Pearce, R. J. Jaccodine, A. J. Filo *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**(9):897.
- [7] 韦伦存, 钟运成, 韩建伟等, 第五届全国电子束离子束光子束学术年会论文集, 1989, 69.
- [8] W. K. Chu, J. W. Mayer and M. A. Nicolet, *Backscattering Spectrometry*, Academic Press, New York, 1978.
- [9] *Principles and Applications of High Energy Ion Microbeams*, edited by F. Watt and G. W. Crime, Adam Hilge Bristol, UK, 1987, p. 57.
- [10] J. F. Ziegler, *The Stopping and Ranges of Ions in Matter*, Pergamon Press, New York, 1978.

## Determination of Oxygen Concentration of Heavily Sb-doped Silicon by Coincident Elastic Recoil Detection Analysis (CERDA)

Xu Yuesheng, Liu Caichi, Li Yangxian, Zhu Zeshao and Wang Hongmei

*(Hebei University of Technology, Tianjing 300130)*

Wei Luncun

*(Peking University, Beijing 100871)*

Received 20 April 1994, revised manuscript received 24 December 1994

**Abstract** Using 27MeV  $^{12}\text{C}$  as primary particles, Coincident Elastic Recoil Detection Analysis (CERDA) was applied successfully to determine the oxygen concentration of heavily Sb-doped silicon quantitatively. It was confirmed that the oxygen content of heavily Sb-doped silicon was about 40 percent lower than those lightly doped silicon, and the oxygen content decreased with the increase of Sb content. The principle of CERDA and the factors effected the measurement precision are discussed.

**PACC:** 4630R, 3440, 6170T, 6170R