

硅中低能大倾斜角砷注入的损伤行为 及其退火特性

何治平 周祖尧 徐宏来* 林成鲁*

(中国科学院上海冶金研究所离子束开放实验室 上海 200050)

(*中国科学院上海冶金研究所信息功能材料国家重点实验室 上海 200050)

摘要 超大规模集成电路与真空微电子器件的发展,要求制备超浅P-N结,低能量和大倾斜角离子注入成为一种有吸引力的新技术.本文借助于背散射沟道分析以及剥层霍尔测试,研究了能量为10keV,入射束与样品法线的夹角分别为 7° , 15° , 30° 和 60° 的 As^+ 离子注入到硅中造成的辐射损伤及其退火特性.

PACC: 6170T, 7340L

1 引言

降低注入离子的能量是获得超大规模集成电路、真空微电子器件等所需的超浅结的有效方法. A. Bousetta, S. N. Hong 等人已经用1keV以下的能量,获得结深 $<200\text{ \AA}$ 的超浅结^[1,2].为满足制造特种器件结构的要求,同时也为了利用常规的离子注入机制备超浅结,人们还采用了大倾斜角的离子注入(常规的离子注入是入射束与样品的法线成 7°).而大倾斜角注入引入许多新的物理现象,如注入有效能量的降低,有效剂量的减小,因反射而引起的剂量的损失等^[3].这些现象以及由于掩膜的厚度而引起的图形边缘的遮蔽效应(Shadowing Effect)和掺杂离子的扩展效应(Spreading Effect)是大倾斜角注入在集成电路工艺应用中有待解决的问题.限于国内现有的离子注入设备,结合低能量和大倾斜角注入的特点,是探索获得超浅结的有效途径,尤其对真空微电子器件中 N^+ -P超浅结的形成有重要价值.

2 实验方法

样品为 $\langle 100 \rangle$ 晶向,P型单晶硅,电阻率 $10-10\Omega \cdot \text{cm}$,经常规的集成电路工艺清洗后,在室温下注入As离子.注入能量为10keV,剂量为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.注入时样品法

何治平 男,1970年生,硕士,现从事微电子工艺研究

林成鲁 男,1941年生,研究员,博士生导师,现从事离子束、激光束与材料相互作用及应用基础研究
1993年10月25日收到初稿,1993年12月25日收到修改稿

线与入射束的夹角分别为 7° , 15° , 30° 和 60° . 注入靶室的真空度优于 $1.33 \times 10^{-4} \text{Pa}$, 注入束流率为 $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. 表 1 列出了不同样品的注入条件.

表 1 本文所用样品的注入条件

样品编号	角 度	注入能量(keV)	有效能量(keV)	注入剂量(cm^{-2})	有效剂量(cm^{-2})
1	7	10	9.93	5×10^{14}	4.96×10^{14}
2	15	10	9.66	5×10^{14}	4.83×10^{14}
3	30	10	8.66	5×10^{14}	4.33×10^{14}
4	60	10	5.00	5×10^{14}	2.5×10^{14}
5	7	10	9.93	5×10^{15}	4.96×10^{15}
6	15	10	9.66	5×10^{16}	4.83×10^{15}
7	30	10	8.66	5×10^{15}	4.33×10^{15}
8	60	10	5.00	5×10^{15}	2.5×10^{15}

注入剂量为 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 的样品进行了背散射沟道分析(RBS/C). 在分析之前, 用 2% 的稀 HF 溶液漂去表面氧化层. 采用 He^+ 离子掠角背散射分析, 能量为 2MeV, 散射角为 97° , 电荷积分为 $9 \mu\text{C}$.

注入剂量为 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 的样品经 1050°C , 10s 的快速热退火, 退火是在氮气氛保护下进行的, 先用 5s 的时间升温到 650°C , 在此基础上再升到目标温度并保持 10s. 退火后的样品用 Hall 剥层进行电学性能测试, 每次剥层厚度控制在 15\AA 左右.

3 实验结果

3.1 RBS/C 分析结果

图 1 所示是 $\langle 100 \rangle$ 硅中注入能量为 10keV, 剂量为 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 砷离子的样品的背散射沟道分析能谱. 在 180 道附近出现的为硅的损伤峰, 230 道附近的为砷峰. 离子注入引起的硅完整晶体的表面损伤, 使得背散射沟道分析能谱的产额大大增加. 注入时引起的表面损伤程度越厉害, 损伤层厚度越大, 则背散射能谱中 Si 损伤峰的积分值也越大. 据文献报道, As 在硅中的临界剂量为 $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ [4]. 所以在注入能量为 10keV, 剂量为 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 时, 即便是沿 $\langle 100 \rangle$ 法线方向倾斜 60° , 其有效剂量 ($2.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$) 也足以使硅表面完全无序化. 因此, 本实验过程中, 背散射所测得的硅损伤峰的大小, 基本上只与一个因素有关, 即注入层的损伤厚度. 表 2 列出了背散射沟道分析(RBS/C)测得的注入剂量为 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 样品的损伤层厚度, 同表列出了 TRIM91 的模拟结果. 模拟结果表明, 随着注入角度的增大, 注入离子的平均投影射程 R_p 以注入倾斜角的余弦值 $\cos\theta$ 为系数呈减小趋势, 而 ΔR_p 却不遵从此规律, 从 7° 到 60° 仅仅由 45\AA 减少到 37\AA . 实验测得的损伤层厚度与模拟值 R_p 之间存在较大的差异, 但与 $R_p + \Delta R_p$ 值比较接近.

背散射能谱中 As 峰的大小直接与实际注入 As^+ 离子的总量有关. 随着注入倾斜角的增大, As^+ 离子实际注入硅中的有效剂量以 $\cos\theta$ 为系数减小. 理论值与背散射分析实验值基本符合.

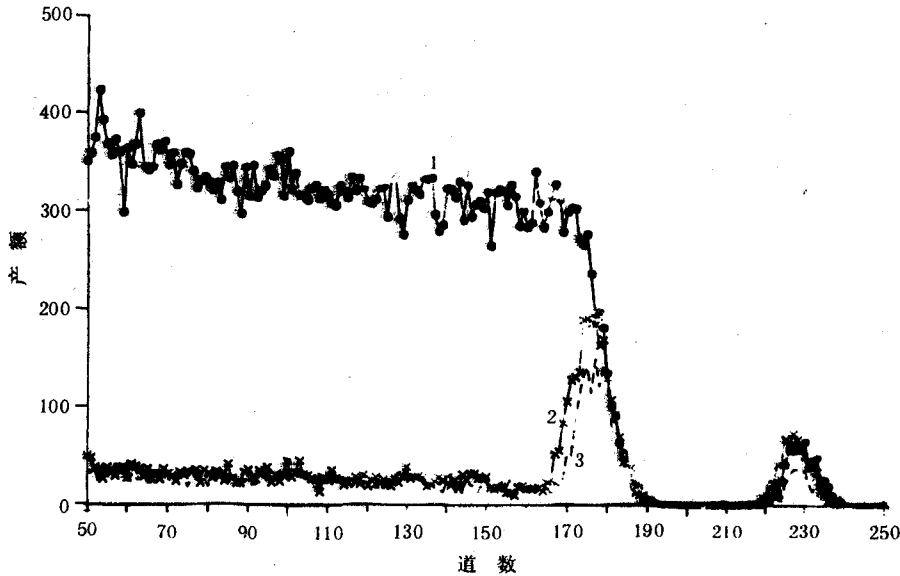


图 1 1. 随机谱 2. 偏转 7°样品的定向谱 3. 偏转 60°样品的定向谱

表 2 不同注入角样品的背散射测量结果与 TRIM91 模拟以及理论值的比较

注入角度	损伤厚度(Å)	$R_P(\text{Å})$	$\Delta R_P(\text{Å})$	$R_P + \Delta R_P(\text{Å})$	实测 As($1 \times 10^{15}/\text{cm}^{-2}$)	理论 As($1 \times 10^{15}/\text{cm}^{-2}$)
7	176	128	45	173	5.26	4.96
15	159	125	44	169	4.93	4.83
30	155	112	43	155	4.56	4.33
60	112	67	37	104	2.36	2.50

3.2 剥层霍尔测量

注入剂量为 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 的样品经 1050°C , 10s 的快速热退火之后, 为了测定其电学性能, 采用剥层霍尔实验方法. 腐蚀之前先在样品上用防腐液画一个范德堡图形, 以后边腐蚀边测定薄层的微分霍尔系数. 由于注入层较浅, 剥层腐蚀速度要求不能太快.

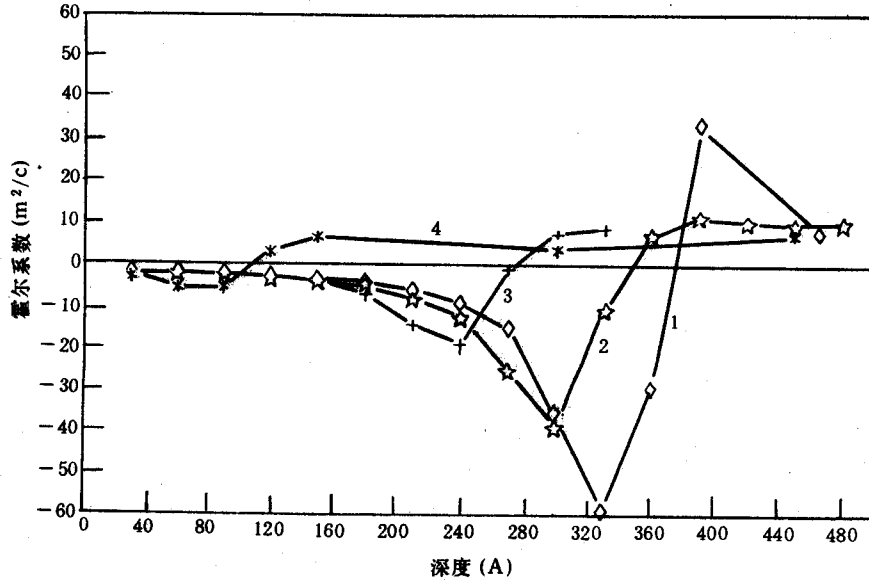
半导体的霍尔系数 RH , 当材料的导电性能由 N 型向 P 型转换时, 一般来说会从负变正. 它与半导体载流子浓度 n, p 之间存在如下关系:

$$RH_s = \left(\frac{\mu_H}{\mu}\right) \frac{p - nb^2}{(p + nb)^2 e}$$

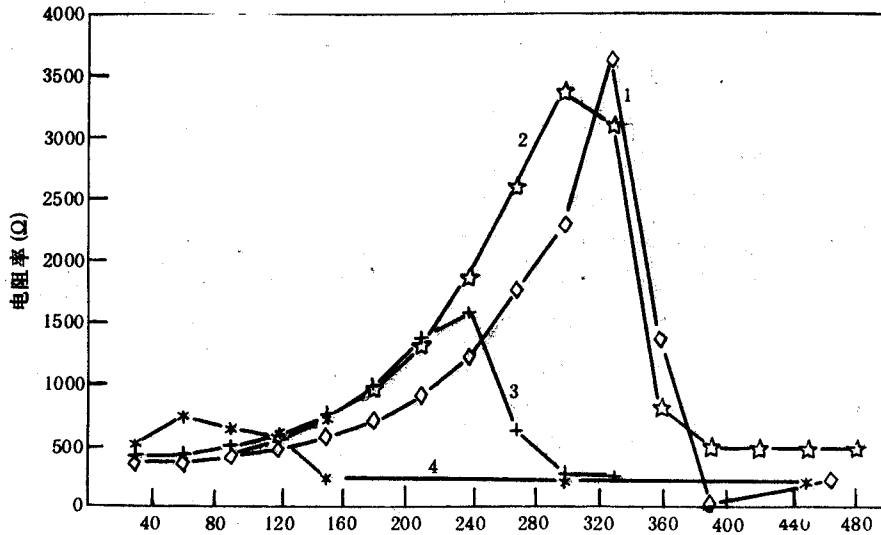
图 2、图 3 是 $\langle 100 \rangle$ 硅中注入 10keV , $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2} \text{As}^+$, 经 1050°C , 10s 快速热退火样品的霍尔系数 RH 、薄层电阻率 R_s 与深度的关系, 表 3 列出了不同角度注入样品的 RH 、突变点的深度. 对材料硅而言, $b > 1$. 因此, 实际的结点(电子浓度与空穴浓度相等, 刚好相互完全补偿的地方)深度比它还要浅.

表 3 未经退火样品的损伤层厚度与退火后样品霍尔系数突变点深度的比较

注入角度	损伤厚度(Å)	RH 突变点(Å)
7	176	375
15	159	345
30	155	270
60	112	120

图2 霍尔系数随深度的变化(10keV As⁺ 1050°C 10s)

1. 偏转 7° 2. 偏转 15° 3. 偏转 30° 4. 偏转 60°

图3 电阻率随深度的变化(10keV As⁺ 1050°C 10s)

1. 偏转 7° 2. 偏转 15° 3. 偏转 30° 4. 偏转 60°

注入角度的不同引起的材料电学性能的差异不只是表现在 RH 。突变点位置的深浅,而且随着注入角度的增大,薄层电阻率 R_s 的最大值的深度减小。引起这种变化的原因是能量相同的离子注入到硅中,倾斜角越大,其有效能量越小,从而引起平均射程的减小。

4 分析与讨论

大倾斜角离子注入与常规角度离子注入相比,出现了许多新的物理现象^[3]. 其中最主要的两个方面表现在:

4.1 剂量的相对减小

当注入束流倾斜地打在硅表面时,它的有效剂量减小了. 倾斜度越大,束流减小得越多. 假设束流的垂直横截面的剂量为 D_0 , 入射束流与靶片法线的夹角为 θ , 则其有效剂量 $D = D_0 \cdot \cos\theta$. 当 $\theta = 60^\circ$ 时, 实际注入剂量 D 只有原剂量 D_0 的一半.

4.2 有效能量的减小

当束流入射的时候, 只有垂直于靶片表面的速度才对其深度分布有贡献. 故靶片大角度倾斜的时候, 必然会引起实际入射有效能量的减小. 有效能量的减小, 正可以用来获得超浅注入层. 在相同的注入能量下, 以大角度注入可获得更浅的结. 有效能量 E 与原始能量 E_0 存在如下的关系: $E = E_0 \cos\theta$. 当 $\theta = 7^\circ$ 时, 即常规集成电路工艺中, $\cos\theta = 0.99$, 可以不考虑能量的损失. 但当 θ 增大时, E 减小得比较厉害. 为了获得更加浅的 P-N 结, 在降低能量的同时增加注入角度, 使它远远大于常规注入角 (7°), 可以起到一定的效果. 霍尔剥层测试结果表明, 离子束倾斜 30° 注入的样品, 与 7° 相比, 结深减小了将近 100 \AA . 比较霍尔剥层测试结果和背散射沟道分析结果可以发现, 损伤层的厚度退火后 P-N 结的结深相差不是很大. 这说明, 在 1050°C , 10s 的快速热退火条件下, 注入离子的热扩散是有限的. 注入离子的热扩散程度还与注入倾斜角度有关. 霍尔数突变点与背散射测得的损伤层厚度之间, 随着注入角度增大, 差值呈明显减小趋势. 对于 60° 的样品, 两者已基本没有什么差别. 这种离子沿深度方向扩散的快慢, 反映出随注入角度的增大, 注入离子沿径向的分布梯度在减小, 整条分布曲线由陡峭向平缓过渡, 这与 Robert B. Simonton 用 SIMS 测得注入离子分布曲线的情况相符合^[3]. 大倾斜角注入样品沿径向离子热扩散效应的削弱, 有助于获得更浅的 P-N 结.

如图 3 所示, 在小角度倾斜注入时 ($7^\circ, 15^\circ, 30^\circ$, 下同), 快速热退火之间表面层的电阻率基本一致均在 $300\text{--}400\Omega$ 之间. 这说明, 在注入倾斜角度不是很大 (不大于 30°) 的情况下, 注入离子对于相同的退火条件, 其电学激活率没有很大的变化. 但是, 如果注入角度增加到 60° , 材料的表面电学性能在相同的快速热退火条件下, 被激活的载流子数目有所下降, 表现在表面电阻率与小角度注入样品相比略有升高. 因此, 虽然增加注入角度可以在一定程度上有效地获得更加浅的 P-N 结, 也不是注入角度越大越好. 注入角度的增大不仅会引起众所周知的集成电路制造过程中的图形边缘效应, 还会导致 P-N 结电学性能的差异. 造成这种差异的原因可能是两方面的: 一是在注入倾斜角度大于 60° 时, 注入离子的背散射效应开始增加, 使得实际注入到样品中的离子数目减小, 表面离子沉积总量也相应减小. 由于注入角度的过大带来的离子注入总量的下降从背散射分析结果之中可以得到验证, 四个样品中只有 60° 注入的离子总量与理论值相比略偏小. 二是可能出现的激活率下降的情形.

一般情况下, 若注入剂量为 10^{14} 量级, 且注入离子全部被激活, 则其表面电阻率将会比本文测量值小得多. 在本文的快速热退火条件 (1050°C , 10s) 下, 载流子的激活率远没有达到 100% . 另外, 由于掺杂离子的剂量相当高, 半导体内的能级可能出现简并现象.

5 结论

本文通过 10keV 的 As^+ , 以不同的剂量 ($5 \times 10^{14} cm^{-2}$, $5 \times 10^{15} cm^{-2}$), 不同的注入角 (7° , 15° , 30° 和 60°), 注入到 $\langle 100 \rangle$ 硅中, 研究了损伤行为及其退火特性, 主要结论如下:

1) 增加注入离子束与样品法线的夹角, 可以有效地降低注入损伤层的厚度, 减小 P-N 结的结深;

2) 背散射沟道分析 (RBS/C) 表明, 注入损伤层的厚度在随注入倾斜角的增大而减小的过程中, 其值与 TRIM91 的模拟结果 $R_P + \Delta R_P$ 基本一致;

3) 大倾斜角离子注入引起的注入离子沿深度方向的分布梯度有所减小, 导致快速热退火过程中注入离子沿径向扩散变缓, 这有助于形成更浅的 P-N 结;

4) 大倾斜角离子注入形成的样品, 在同等的快速热退火条件下, 载流子的激活情况有所下降.

参 考 文 献

- [1] A. Bousetta, J. A. van den Berg and D. G. Armour, IEEE Electron Device Lett., 1992, 13(5):250.
- [2] S. N. Hong *et al.*, IEEE Trans. Electron Device, 1991, 38(1):28.
- [3] R. B. Simon, D. E. Kamenitsa and A. M. Ray, Nuck. Instr. & Meth. in Phys. Res., 1991, B55:188.
- [4] W. Rothmund, C. R. Fritzsche, Appl. Phys., 1976, 10:111.

Damage Behavior and Annealing Properties of Low Energy As^+ Implanted Silicon at Large Tilt Angles

He Zhiping, Zhou Zuyao, Xu Honglai* and Lin Chenglu*

(Ion beam Laboratory, Shanghai Institute of Metallurgy,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

(* State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai
Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Received 25 October 1993, revised manuscript received 25 December 1993

Abstract With the development of VLSI and vacuum microelectronics devices, ultrashallow P-N junctions are needed and large tilt angle ion implantation at low energy become a new attractive technology. In this paper, Rutherford Backscattering Spectroscopy (Channeling) and Stripping Hall Analysis are employed to study the radiation damage and annealing properties of 10keV As^+ ion implanted silicon wafers with 7° , 15° , and 60° off the $\langle 100 \rangle$ direction, respectively.

PACC: 6170T, 7340L