

# 多能 MeV 硼离子注入单晶硅形成 特殊形状载流子分布\*

康一秀 赵渭江 王宇钢 张利春\*\* 虞福春

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

(\*\*北京大学微电子学研究所 北京 100871)

**摘要** 以在 N 型单晶硅表面  $1.3\mu\text{m}$  内实现理想平台状 P 型载流子分布为例,我们实验研究了多能离子注入形成特殊形状载流子分布的 Pearson 函数拟合叠加的计算机设计方法.首先,用扩展电阻法(SRP)测量高温快速热退火(RTA)后的载流子分布,对 0.5—2.4MeV 能量范围内单能硼离子注入单晶硅的研究表明,Pearson 函数分布比半高斯函数分布更好地符合实验所测的载流子分布.给出了投影射程  $R_p$ 、射程歧离  $\sigma$ 、偏斜度  $\gamma$  和峭度  $\beta$  对能量的依赖关系.还由双能离子注入研究了注入顺序对分布的峰位和峰高的影响及两个单能分布线性叠加的条件.文中给出的按器件要求设计平台分布的离子束参数,与实验结果符合很好.

**PACC:** 6170T, 6180J

## 1 引言

MeV 能量的离子注入深度可达微米量级,在半导体工艺、金属材料及绝缘体材料改性中有着重要应用<sup>[1,2]</sup>. B 掺杂 Si 材料具有典型意义,而且随着 VLSI 发展,对 B 注入 Si 形成载流子的分布形状等的研究越来越受到人们的重视<sup>[3-8]</sup>. 文献[9]与[10]以高斯分布和半高斯分布为基础,针对实现平台型分布提出了利用平均投影射程  $R_p$  (即入射能量  $E$ ) 与射程歧离  $\sigma$  的关系进行多能离子注入剖面叠加方法. 显然,直接从单能离子分布线性叠加考虑,利用微机进行多能离子注入预设计模拟,如果能达到足够精度,比多次实验摸索离子注入条件要节省许多时间与经费,是一种理想方法. 但其可行性与实用性决定于三个条件,一是在精确测量单能离子注入载流子分布基础上能选择合适的函数表达或拟合其分布,二是这函数或其参数跟能量有简明关系,三是线性叠加条件需实验证实. 本实验以实现器件要求在 N 型单晶硅表面  $1.3\mu\text{m}$  内形成载流子浓度  $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  平台为例,利用参数可调的半高斯分布和 Pearson I, IV, VI 分布的计算程序<sup>[11]</sup>,拟合 0.5—2.4MeV 中若干个能量的硼离子注入单晶硅后经 RTA 退火的载流子分布,选择适当参数并研究其分布参数跟注入离子能量关

\* 高校博士点基金资助项目

康一秀 女,1971 年生,硕士生,从事离子束应用的研究

赵渭江 男,1938 年生,教授,从事加速器物理与应用的研究

王宇钢 男,1963 年生,讲师,从事离子束应用的研究

1994 年 3 月 26 日收到初稿,1994 年 7 月 1 日收到修改稿

系. 并且以双能离子注入为例实验探讨多种能量注入顺序对叠加分布的影响. 最后进行实例设计模拟, 与实验测量的载流子分布比较.

## 2 实验

本实验的离子注入是在北京大学技术物理系的 5SDH-2 型  $2 \times 1.7$  MeV 串列静电加速器高能离子注入系统上完成的. 采用静电扫描和中性束过滤保证注入时的均匀性. 注入离子为  $^{11}\text{B}^+$  或  $^{11}\text{B}^{2+}$ , 剂量  $10^{13}/\text{cm}^2$  左右, 能量 0.5—2.4 MeV. 注入样品是 N 型  $\langle 111 \rangle$  单晶硅, 衬底浓度为  $1 \times 10^{14}/\text{cm}^3$  左右. 样品表面在注入前经过常规化学清洗. 考虑到所用加速器的最低能量为 0.5 MeV, 一般在硅样品表面生长 9000—9500 Å 的  $\text{SiO}_2$ . 为避免注入沟道效应, 实验中采用偏  $7^\circ$  注入. 离子注入实验是在室温条件下进行的, 靶室真空度优于  $1.33 \times 10^{-3}$  Pa.

为了激活杂质, 注入样品在北京大学微电子所的 KST-1A (光源为卤灯) 装置上进行了 1070°C、20s 左右的高温快速热退火 (RTA). 退火后的载流子分布是在中科院半导体所用 ASR-100/2 型 SRP (扩展电阻探针) 测量的, 该仪器深度分辨能力为 100 Å, 测量浓度误差为 15%, 测量深度误差在 5% 以内.

## 3 结果及分析讨论

### 3.1 单能 B 离子注入 Si 中的载流子分布

单能离子注入七个样品, 能量分别为 0.531、0.731、0.931、1.131、1.331、1.531 和 1.631 MeV, 剂量均为  $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ . 其中四个注入样品的载流子分布的测量结果示于图 1.

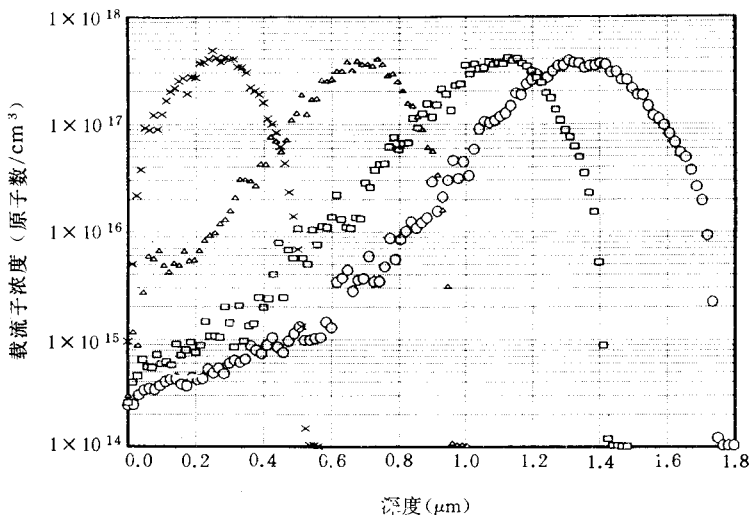


图 1 1070°C、20s RTA 退火后用 SRP 方法测量的实验注入载流子分布, 其中 ×、△、□ 和 ○ 分别代表注入能量为 0.531 MeV、0.931 MeV、1.331 MeV 和 1.631 MeV 的结果

由图中我们可以看到, 注入 B 的载流子分布明显不对称, 不属高斯分布. 对实验结果用计算机程序<sup>[11]</sup>进行了半高斯分布和 Pearson 分布的拟合 (参见图 2). 比较发现, Pearson 分布可

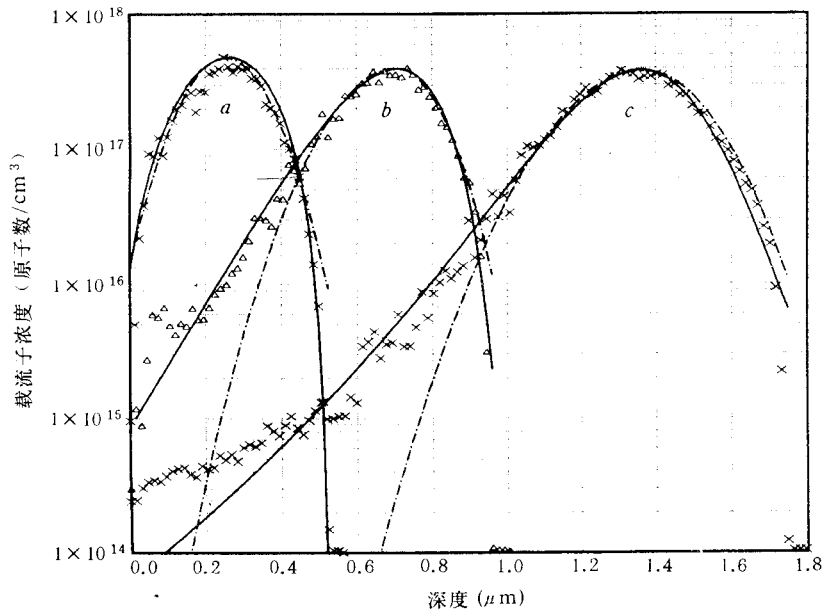


图2 实验载流子分布及 Pearson 函数及半高斯函数对实验载流子分布的拟合结果,其中(a)(b)(c)三组注入能量分别为 0.531MeV、0.931MeV 和 1.631MeV,×、△和×分别为各能量的实验数据点,各组中—为 Pearson 函数拟合结果,---为半高斯函数拟合结果

以更好地拟合实验载流子分布,在三个数量级范围内都可与实验结果符合较好;而半高斯分布虽在峰位局部也可符合较好,但在载流子分布的拖尾部分相差较大,且随能量增大变得更差.

高能离子进入靶物质后,大部分离子与靶原子发生小角度散射碰撞,停留在靶中形成注入离子的分布峰,少数离子与靶原子发生大角度散射,形成分布的前拖尾,使注入杂质在靶物质中呈不对称分布<sup>[12]</sup>. 这样一种分布形状是无法用一个对称型的高斯分布来拟合的,本实验结果表明,用 Pearson 函数拟合更接近实验分布.

### 3.2 单能 B 离子注入 Si 的实验分布与 TRIM-90 模拟计算的比较

TRIM-90 模拟计算结果与我们的实验结果比较(假设快速退火后的载流子分布与注入离子分布一致),实验所测载流子分布的峰位都比 TRIM-90 模拟计算结果的峰位略靠近表面一侧,相差在 7% 以内. 平均投影射程  $R_p$  也呈现相似结果,实验测得的  $R_p$  比 TRIM-90 计算的  $R_p$  一般都小,相差在 10% 以内. 另外,TRIM-90 计算的分布的射程歧离  $\sigma$  比实验测量的都偏小,相差在 25% 以内. 偏斜度  $\gamma$  和峭度  $\beta$  的差别更大. 就分布类型分析,在我们实验能量范围内,0.531MeV 注入能量的实验分布符合 Pearson I 分布,0.731、0.931MeV 符合 Pearson VI,其它高于 1MeV 能量的符合 Pearson IV 分布,而 TRIM-90 计算的结果都符合 Pearson I 分布. 这可能与沟道效应及退火效应有关. 由以上比较可知,TRIM-90 模拟计算的结果和我们实验所测的载流子分布还存在一定的差别,完全用 TRIM-90 模拟计算的结果进行高能离子注入分布设计将受其精度限制.

### 3.3 分布参数与能量的关系

为了适应制作器件的需要,求得实验能区任意能量下的载流子分布,我们对实验结果的各次矩对能量关系作了多项式拟合.由拟合结果可以看出,平均投影射程  $R_p$  和注入能量  $E$  有很好的线性关系(图 3):

$$R_p(\mu\text{m}) = 0.935E(\text{MeV}) + 0.714 \tag{1}$$

相关系数为 0.99,射程歧离  $\sigma$  与能量也有较好的线性关系(图 4):

$$\sigma(\mu\text{m}) = 0.060E(\text{MeV}) + 0.067 \tag{2}$$

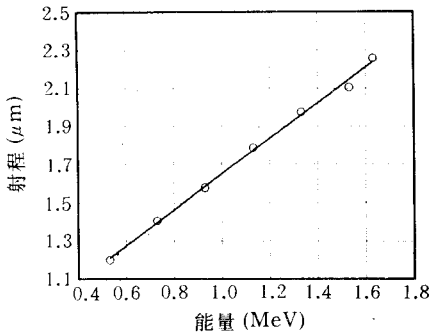


图 3 平均投影射程  $R_p$  与注入能量  $E$  的关系,  $\circ$  为实验数据点, — 为直线拟合结果

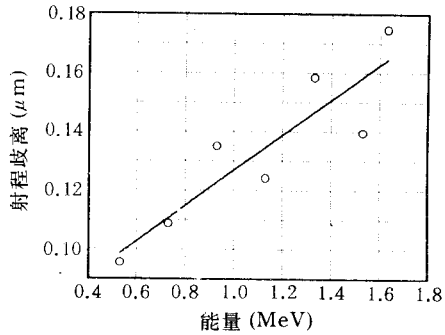


图 4 射程歧离  $\sigma$  与注入能量  $E$  的关系,  $\circ$  为实验数据点, — 为直线拟合结果

相关系数为 0.90.偏斜度  $\gamma$  和峭度  $\beta$ ( $\gamma, \beta$  为无量纲的数)与能量的关系比较接近二项式(图 5,6):

$$\gamma = 2.56 - 6.49E(\text{MeV}) + 2.65[E(\text{MeV})]^2 \tag{3}$$

$$\beta = -7.55 + 22.88E(\text{MeV}) - 8.69[E(\text{MeV})]^2 \tag{4}$$

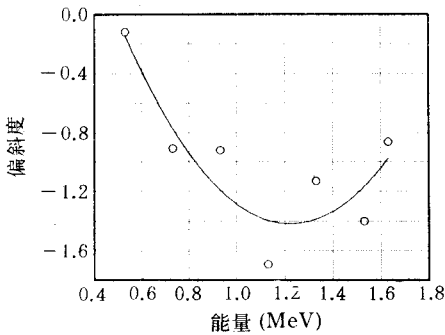


图 5 偏斜度  $\gamma$  与注入能量  $E$  的关系,  $\circ$  为实验数据点, — 为拟合结果

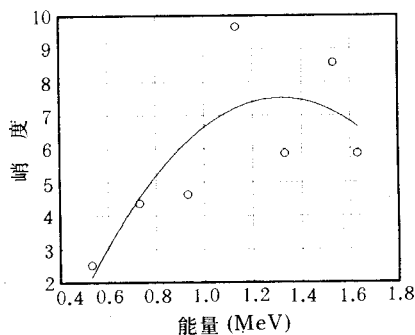


图 6 峭度  $\beta$  与注入能量  $E$  的关系,  $\circ$  为实验数据点, — 为拟合结果

相关系数分别为 0.57 和 0.65.  $\gamma, \beta$  值在构成 Pearson 分布时主要影响拖尾部分,这部分和峰值相差两三个数量级.

### 3.4 两种能量 B 离子注入(双能离子注入)

为了探索多种能量 B 离子注入 Si 时的剖面叠加行为,我们以双重能量注入为例考察了双能中较高能量离子和较低能量离子的注入顺序不同对剖面叠加行为的影响,选择 0.5MeV 和 1.0MeV、1.0MeV 和 2.4MeV 及 1.0MeV 和 1.4MeV 剂量均为  $1.0 \times 10^{13}/\text{cm}^2$  的三组能量,进行了单能离子注入及正序双能离子注入(先注高能离子后注低能离子)和反序双能离子注入(先注低能离子后注高能离子)的比较。

实验结果表明,在正反两种注入顺序下,正序双能离子注入中的两个单能峰的峰位比反序双能离子注入中的两个单能峰的峰位更接近单能离子注入的峰位。正序注入与反序注入相比,正序注入中两个单能峰的分布也更接近单能离子注入的分布,其总体结果可近似认为是两个单能峰的线性叠加,而不用考虑两次注入之间的相互影响。由此可见,先注高能后注低能更有利于利用单能离子注入的分布规律进行剖面叠加形成所需分布,或者说可以使用简单的线性叠加方法处理。

### 3.5 多能离子注入形成平台状载流子分布

以上的实验研究表明,在我们的注入条件下,Pearson 函数可以很好地拟合单能离子注入的载流子分布,并且在正序注入的情况下,多种能量离子注入可以看作单能离子注入的线性叠加,为此用有限个不同能量注入可能形成某些特定形状的载流子分布。如果采用 k 种能量注入,其中第 n 个能量注入的载流子浓度分布  $C_n(x)$ ,可由前述单能离子注入的 Pearson 函数拟合结果得到,总的载流子浓度分布  $C(x)$  可表示为:

$$C(x) = \sum_n C_n(x) \quad (n = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (5)$$

如果首先选择适当的注入能量,然后调整剂量就能达到所需形状的载流子分布。

以某器件设计为例,需要在 9000 Å 左右 SiO<sub>2</sub> 下面的 Si 中 0.2—1.3 μm 范围内得到  $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  的 B 的载流子平台状分布,平整度要求 20%。我们应用单能离子注入实验结果的 Pearson 分布规律(公式(1)、(2)、(3)和(4))进行预设计。首先,用能量和射程关系(1)计算注入所需的最高和最低注入能量,即 1.581MeV 和 0.531MeV,并由此从(2)、(3)、(4)式得到这两个能量注入的 Pearson 分布曲线,然后为了得到平整度在 20% 以内的平台分布,中间又适当地加入了三个能量并调整所需能量及剂量,最后得到的五个注入能量为 0.531、0.781、1.031、1.281 和 1.581MeV,五个能量的注入剂量分别为 0.35、0.25、0.23、0.22、0.24  $\times 10^{13}/\text{cm}^2$ 。注入顺序采用正序注入(即先注高能离子后注低能离子)。

按以上预设计条件进行离子注入实验和 RTA 退火,图 7 给出了计算结果和 SRP 所测载流子分布曲线。实验所得平台的平整度达到了设计要求。所测载流子分布形状与计算结果很接近,只是浓度绝对值整个地略低于预计浓度。计算实验载流子分布曲线下面积发现,它比我们实际注入剂量小,这可能是退火过程中还没有完全激活注入杂质,从而导致测量浓度偏低。

## 4 结论

对单能 MeV B 离子注入 Si 的实验及模拟计算研究表明:在我们的实验条件下,注入载流子分布符合 Pearson 分布,且随着注入能量的增大,载流子分布由 Pearson I 或 M 向 Pear-

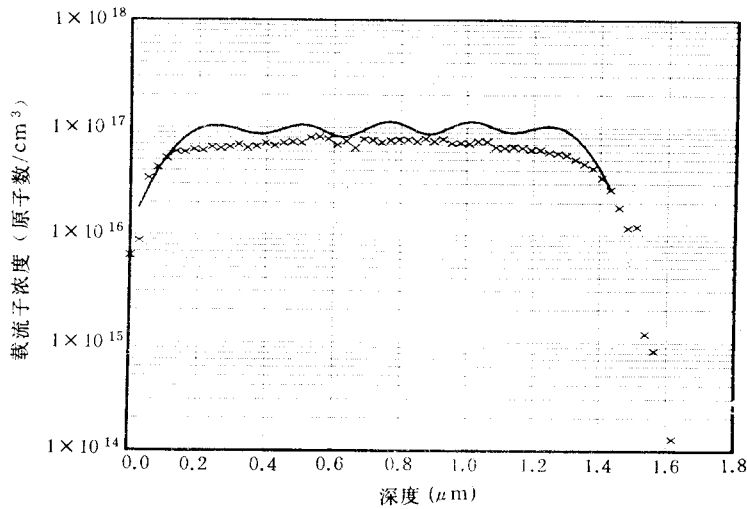


图7 多能注入预计计算载流子分布及1070℃、20sRTA退火后用SRP方法测量的实际注入载流子分布,×为实验数据点,一为预计计算结果

son IV 过渡;半高斯分布对实验结果在峰位附近也可拟合较好,但对拖尾拟合不好.用 Pearson 函数拟合时,载流子分布曲线的平均投影射程  $R_p$ 、射程歧离  $\sigma$ 、偏斜度  $\gamma$  和峭度  $\beta$  与能量的依赖关系,可作多项式拟合:其中  $R_p$  和  $\sigma$  与能量呈线性关系, $\gamma$  和  $\beta$  对能量可作二项式拟合. TRIM-90 模拟计算的  $R_p$  比本实验结果偏大,而  $\sigma$  比本实验结果偏小,其中  $R_p$  相差在 10% 以内, $\sigma$  相差在 25% 以内; $\gamma$ 、 $\beta$  差别更大,并且 TRIM-90 计算的分布类型均为 Pearson I 分布.因此在我们所用的实验条件下,应用 TRIM-90 计算分布还不能达到预期的精度.

双能离子注入实验表明,在正序注入的情况下,先后两次注入间的相互影响较小,用两个单能离子注入的载流子分布的线性叠加可以较好地描述相应的双能离子注入的载流子分布.

多能离子注入实验表明,在正序注入情况下,运用单能离子注入规律(即单能离子注入实验中得到的分布各次矩  $R_p$ 、 $\sigma$ 、 $\gamma$  及  $\beta$  与注入能量的拟合关系),由 Pearson 分布按单能离子注入线性叠加进行多能离子注入设计,可以得到和实验结果相符的特殊形状载流子分布,满足器件设计要求.

**致谢** 本实验得到了北京大学微电子所何美华同志的帮助;在离子注入实验过程中,承北京大学核物理与核技术实验室沈定予、王雪梅、李硕中等同志的大力协助;高铁塔、林英钊同学曾参加过本课题的前期工作.作者在此向他们表示衷心感谢.

## 参 考 文 献

- [1] D. C. Ingram, Nucl. Instr. and Meth., 1985, **B12**: 161-169.
- [2] J. F. Ziegler, Nucl. Instr. and Meth., 1985, **B6**: 270-282.
- [3] David C. Ingram, John A. Baker and David A. Walsh, Nucl. Instr. and Meth., 1985, **B7**: 361-365.
- [4] David C. Ingram, John A. Baker and David A. Walsh, Nucl. Instr. and Meth., 1987, **B21**: 460-465.
- [5] H. Wong, E. Deng, N. W. Cheung *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., 1987, **B21**: 447-451.

- [6] S. Oosterhoff, Nucl. Instr. and Meth., 1988, **B30**: 1—12.
- [7] A. Laferla, E. Rimini, G. Ciavola and G. Ferla, Nucl. Instr. and Meth., 1989, **B37/38**: 951—954.
- [8] D. Thevenin, J. J. Grob, R. Stuck and P. Siffert, Nucl. Instr. and Meth., 1992, **B62**: 346—349.
- [9] D. Pramanik and M. Current, Solid State Technol., 1984, **V27**(5): 211.
- [10] Wu Yuguang, Zhang Huixing, Zhang Xioji *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., 1989, **B39**: 428—432.
- [11] 虞福春, 参数可调的 Pearson I, IV, VI 分布的计算程序(北京大学技术物理系内部资料), 1986.
- [12] J. P. Biersack, Nucl. Instr. and Meth., 1989, **B35**: 205—214.

## Formation of Special Shaped Carrier Distribution by MeV Multi-Energy Boron Ion Implantation into Crystal Silicon

Kang Yixiu, Zhao Weijiang, Wang Yugang, Zhang Lichun\* and F. C. Yu

(*Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871*)

(\* *Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871*)

Received 26 March 1994, revised manuscript received 1 July 1994

**Abstract** For the propose of design device, a method of formation of special shaped carrier distribution by MeV multi-energy boron ion implantation into crystal silicon was studied. After 0.5—2.4 MeV B ion implantation into crystal Si and after 1070°C、20s RTA treatments, the carrier concentration profiles from SRP measurements were obtained. As the starting point, single-energy ion implantation and double-energy ion implantation was studied. Pearson and half-Gauss functions were used to fit the carrier concentration profiles of single-energy ion implantation, and the fitting of Pearson function is better than that of the half-Gauss function. The dependence of projected range  $R_p$ , range straggling  $\sigma$ , skewness  $\gamma$  and kurtosis  $\beta$  of the measured data on incident energy  $E$  were given by polynomials. From the experiments of double-energy ion implantation, the effect of the different implantation sequence was investigated. At last, by using linear superposition of single-energy ion implantation, an uniform carrier profile was got by multi-energy ion implantation.

**PACC:** 6170T, 6180J