

MeV 高能 B^+ 离子注入 Si 中二次缺陷的抑制与消除*

卢武星 钱亚宏 田人和 王忠烈

北京师范大学低能核物理研究所, 北京, 100875

1989 年 3 月 7 日收到

本文研究了 MeV 高能 B^+ 离子注入 Si 中二次缺陷的退火行为。提出一种新型的双重注入退火方法, 抑制或消除了 MeV 高能 B^+ 离子注入 Si 样品中的二次缺陷。还对这种二次缺陷的被抑制与被消除的物理机制进行了讨论。

PACC: 6170T; 6180J; 6170J

一、引 言

由于 MeV 离子注入能形成 μm 数量级的深注入区和制造出新型的器件, 因而引起了广泛的研究^[1-5]。Tamura 等人^[6-8], Byrne 等人^[9], Posselt 等人^[10], 以及 Oosterhoff 等人^[11]研究了在 Si 中 B, P, As 的 MeV 高能注入后的退火和损伤恢复等问题, 得出了一些有意义的结果。其中 Tamura 等人的研究较为系统, 他们对高能的 B, P, As 离子注入 Si 中退火后二次缺陷分布的规律进行了考察。他们认为, MeV 高能离子注入所形成的二次缺陷是非常稳定的, 即使在高温下进行长时间退火也很难将它们消除^[6]。损伤的退火恢复问题是离子注入技术中具有普遍意义的问题, 特别是在高能注入领域, 迄今未能研究出消除二次缺陷的办法。因此控制二次缺陷的产生和抑制它的生长成为 MeV 高能离子注入研究中重要的研究课题。

本文系统地研究了 MeV 高能 B^+ 离子注入 Si 的退火特性和电特性, 用剖面的透射电子显微术 (XTEM) 观察了高能注 B 的 Si 样品中的二次缺陷。实验发现, 利用双重注入能够实现 MeV 高能 B^+ 离子注入 Si 中二次缺陷的抑制或消除。

二、实 验

研究使用的衬底材料是 n 型 (100) Si 单晶, 电阻率为 $3-6\Omega \cdot \text{cm}$ 。单晶片经单面抛光和严格的化学清洗。

注入时靶温度为室温, 靶室的真空度优于 10^{-5}Torr 。注入的剂量范围为 $1 \times 10^{13}-$

* 国家自然科学基金资助的课题。

$5 \times 10^{15} B^+ / cm^2$, 注入离子的能量范围为 1—3 MeV; 注入时使用的离子源是溅射离子源, 注入的高能离子是单电荷 B 离子。双重注入是在 MeV 高能 B^+ 离子注入之后, 进行二次低能 Si^+ 离子注入。

注入后样品的热退火实验是在干 N_2 气氛保护下进行的。恒温等时退火处理的温度范围为 600—900°C, 退火时间为 15 min。两步退火处理采用的条件是: 低温为 600°C, 3h 或 6h; 而高温为 900°C, 15 min。快速白光退火处理采用的是 1000°C 的高温 and 10s 的快速处理。

用自动扩展电阻探针, 测量高能注入后各种样品在不同退火条件下的扩展电阻分布及载流子的浓度分布, 并用其冷热探针逐点判定沿注入的纵向深度 Si 导电类型的变化。利用透射电子显微镜对样品退火前后进行 XTEM 和 TED 观察, 以了解深注入区的损伤和表面单晶区的微结构。

三、结果与讨论

1. 获得高浓度深注入的埋层

1) 电学特性 实验结果和测量分析表明, MeV 高能 B^+ 离子注入的 Si 样品经适当的退火处理, 能够得到良好的深注入、高杂质激活的掩埋层和表面单晶层, 如图 1 所示。(1) 注入杂质形成了高浓度的埋层区域, 杂质分布的峰值与理论值 R_p ^[12] 符合得很好。(2) 杂质分布的峰值附近呈高斯型, 而在深注入的掩埋区中已经得到令人满意的激活效果和载流子的浓度分布特性。(3) 2.0 MeV 与 3.0 MeV 注入的扩展电阻分布有所不同, 对于图 1(a), 只在 $3.4 \mu m$ 处形成一个 p-n 结, 而图 1(b) 则分别在 $1.7 \mu m$ 及 $4.6 \mu m$ 处形成两个 p-n 结, 得到 $1.7 \mu m$ 以下形成 P 型层的埋层结构。注意到 2.0 MeV, $1 \times 10^{16} B^+ / cm^2$ 注入的样品, 其表面层的扩展电阻值很高, 而且经过 1000°C 高温 15 min 退火或两步 (600°C, 3h; 1000°C, 15 min) 退火处理, 表面区附近仍然存在有约 $5000 \text{ \AA}$ 的很宽的高阻区。这种现象可能是由于在 2.0 MeV 注入的情况下, 埋层所形成的 p-n 结靠近表面, 结区附近的微量杂质起了补偿的作用。

2) 注入区的损伤微结构 用平面透射电子显微镜对 2.0 MeV 高能 B^+ 离子注入样品进行了分析, 如图 2 所示(见图版 I)。在透射电子显微镜中的电子衍射 TED 的照片中可以看到, 表面区的电子衍射花样除了有单晶的电子衍射斑点的规则排列外, 还有一个晕环。样品经过 900°C, 15 min 退火后, TED 照片仅有单晶衍射斑点, 晕环消失, 表明表面晶格已恢复, 与 Kostka 等人^[13]的结论一致。

2. 双重注入退火对表面区电特性的影响

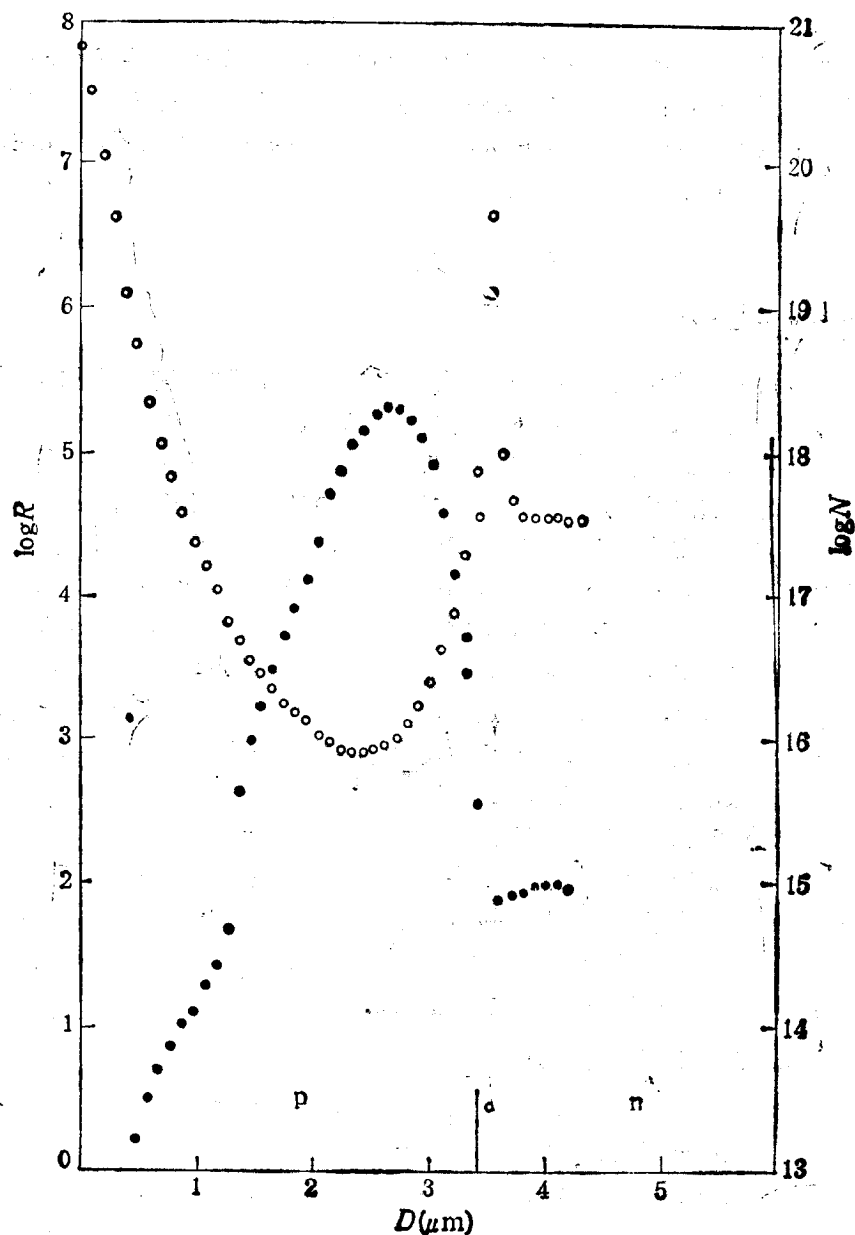
图 3 给出双重注入退火后的扩展电阻分布曲线, 由此可看到, 经双重注入退火后, 表面不再是高阻(参阅图 1(a))。用扩展电阻仪的冷热探针能判断出导电类型: 从表面到 $0.7 \mu m$ 的区域为 n 型, 而 $0.7—3.0 \mu m$ 为 P 型, $3 \mu m$ 以下为 n 型衬底。

3. 二次缺陷的抑制与消除

Tamura 等人^[10]认为, MeV 高能 B^+ , P^+ 和 As^+ 离子注入 Si 的二次缺陷本质上

是填隙的杂质原子,即使在高温下长时间的退火处理中也是很稳定的,很难退火消除。同时他们还认为,在 2.0MeV 高能 B^+ 离子注入 Si 的样品中,经退火处理后二次缺陷峰始终处在比投影射程深 $0.3\mu\text{m}$ 的位置上。

我们的研究结果则有所不同。从图 4 (a) 至 (g) (见图版 I, II) 中能够看出这样的差别: (1) 图 4 (a), (b) 分别为常规的一步、两步热退火处理后样品的 XTEM 照片,可以观察到许多典型的二次缺陷分布,如位错环、棒状缺陷、偶极子型缺陷等,这些现象与许多



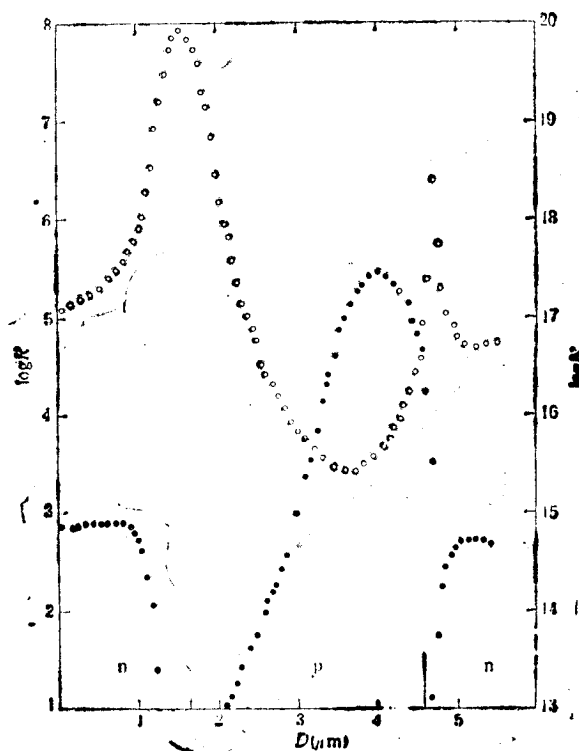
(a) 2.0MeV , $1 \times 10^{16}\text{B}^+/\text{cm}^2$ 注入

图 1 B^+ 注入 Si 900°C , 15min 退火样品的扩

研究者的观测结果相一致^[6-9]。但是还观察到, 这些二次缺陷的密度峰值位置(由电子显微镜照片测量)与平均投影射程的位置相符。(2) 研究发现, 采用合适的低能 Si^+ 离子双重注入退火可以有效地抑制与消除高能 B^+ 离子注入所引起的二次缺陷。图 4 (c), (d), (e), (f) 中给出不同剂量的 Si^+ 离子双重注入退火处理样品的 XTEM 照片。图 4 (c) 的结果表明, 低剂量的 Si 注入已能抑制二次缺陷的形成, 但还不够完善。而图 4 (f) 的大剂量处理, 虽然也能达到消除二次缺陷的目的, 但是在表面区又带来了新的二次注入的损伤, 也许这并非我们所需要的。图 4 (d) 和 (e) 的处理条件既能达到抑制与消除二次缺陷的目的, 同时也没有带来严重的新的表面损伤。这正是我们所要选择的最佳实验条件。(3) 图 4 (g) 给出的是第一次 B^+ 离子注入退火后, 样品再经第二次 Si^+ 离子注入退火处理后的 XTEM 照片。这时可从照片中清楚地看出各种典型的缺陷都仍然同时存在, 而与常规退火结果并无显著的差别, 二次缺陷未能被抑制。这个有意义的实验结果恰好从另一方面证实了双重注入退火对二次缺陷的有效抑制作用。

4. 物理机制

目前对 MeV 离子注入 Si 中二次缺陷研究仅有少数实验结果报道^[6-9], 至于二次缺陷的形成机理则远没有研究清楚。在我们的 XTEM 的观测研究中(图 4)发现, 二次缺陷主要由位错环组成, 其中还夹杂着少量的棒状缺陷和偶极子型缺陷。大多数位错环沿



(b) 3.0 MeV, $1 \times 10^{14} B^+/cm^2$ 注入

展电阻 R 与载流子浓度 N 分布 ○ 为 R ; ● 为 N

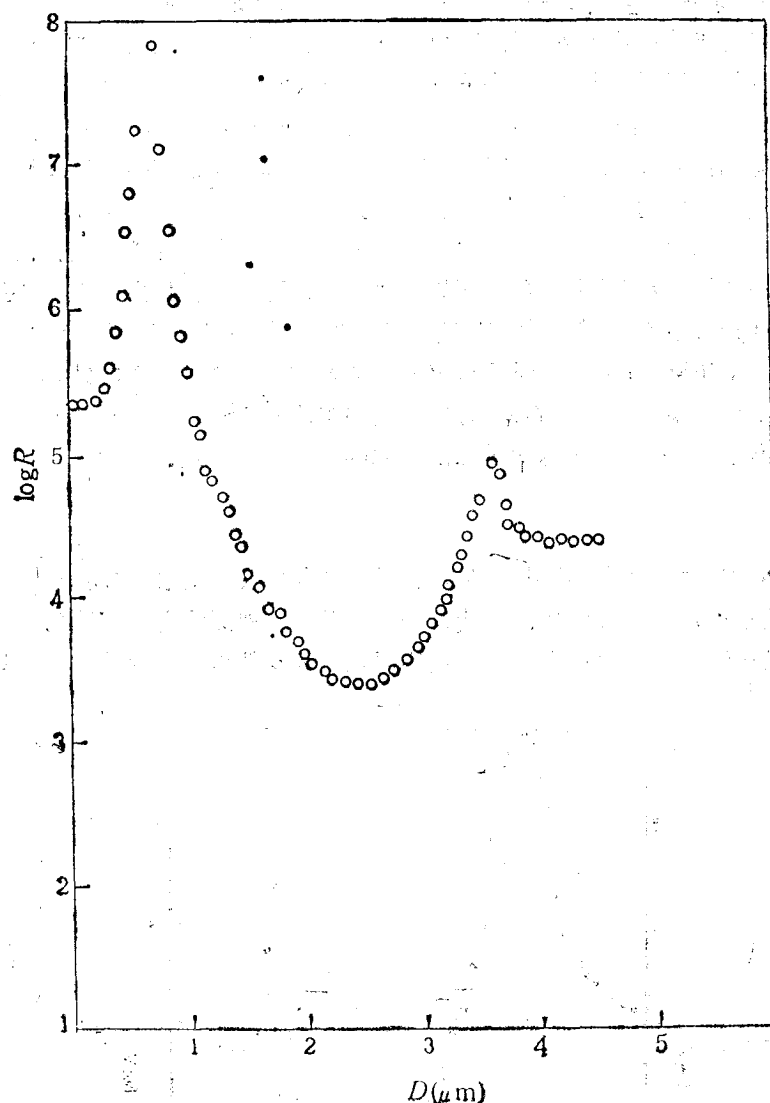


图3 双重注入退火后扩展电阻分布曲线

$\langle 110 \rangle$ 方向延伸,但也有一些 $\langle 100 \rangle$ 方向延伸.关于位错环的形成有两种机制:一是空位盘湮灭机制;一是间隙原子盘湮灭机制^[4].在空位盘和间隙原子盘的所在位置上形成层错,而在层错的四周则形成位错环.间隙原子盘可以由 Si 原子构成,也可以由杂质原子构成.但在注入剂量不是很高的情况下,形成杂质间隙原子盘的几率不会很大.

MeV 离子注入比 keV 离子注入更容易形成二次缺陷.这可能是因为 MeV 高能注入的损伤区离表面甚远,在退火过程中缺陷不容易扩散到表面上去,而在晶体内聚集起来形成空位盘和间隙原子盘,两者湮灭则形成位错环.当然,空位盘和间隙原子盘的数目不会完全相等.

双重注入的低能 keV 的 Si 原子在 MeV 高能注入损伤带和晶体表面之间有极快

的扩散速率,这是因为间隙的 Si 原子本来扩散速率就很快,而高能注入产生的缺陷又增强了它们的扩散速率,所以这些间隙的 Si 原子能够进入高能注入缺陷的峰值区,填充那里的空位,从而大大减少峰值区中空位盘形成的机率,因而也就减少了 MeV 注入损伤峰值区中的二次缺陷。

另一个问题是,二次缺陷在什么过程中产生的?图 4(g)所示的结果告诉我们,二次缺陷是在热退火过程中产生的,而不是在 B⁺ 离子注入过程中形成的(我们用的是室温靶,不存在自退火过程)。并且二次缺陷是非常稳定的,一经形成就很难退火消除。这与 Tamura 等人所观察到的结果一致^[6]。

关于物理机制的分析还只是初步的,更深入的分析,将另文发表。

四、结 论

MeV 高能 B⁺ 离子注入 Si 样品经适当退火处理后可以形成 μm 数量级的深 p-n 结和良好激活的高浓度的深埋层。高能注入和退火处理后形成的二次缺陷结构复杂。研究发现,采用双重注入退火可以抑制和消除 MeV 高能 B⁺ 离子注入 Si 的二次缺陷,并且初步讨论了它的物理机制。上述研究结果在理论上和实用上都是有重要意义的。

衷心感谢荷兰 FOM 原子分子物理研究所 F. W. Saris 教授关于高能注入方面的有益讨论。感谢本校加速器实验室全体同志在高能注入上的热心帮助,有色金属研究总院电子显微镜实验室在进行 XTEM 和 TED 分析方面所给予的帮助。

- [1] J. F. Ziegler, *Nucl. Instr. and Meth.*, **B6**(1985), 270.
- [2] D. C. Ingram, *Nucl. Instr. and Meth.*, **B12**(1985), 161.
- [3] D. Pramanik and A. N. Saxena, *Nucl. Instr. and Meth.*, **B10/11**(1985), 493.
- [4] D. Pramanik and M. I. Current, *Solid State Tech.*, **27**(5)(May 1984), 211.
- [5] M. I. Current, R. A. Martin, K. Doganis and R. H. Bruce, *Semiconductor International*, (June 1985), p. 106.
- [6] M. Tamura, N. Natsuaki, Y. Wada and E. Mitani, *J. Appl. Phys.*, **59**(May, 1986), 3417.
- [7] M. Tamura, N. Natsuaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **25**(1986), L474.
- [8] M. Tamura, N. Natsuaki, Y. Wada and E. Mitani, *Nucl. Instr. and Meth.*, **B21**(1987), 438.
- [9] P. F. Byrne, N. W. Cheung, S. Tam, C. Hu, Y. C. Shih, J. Washburn and M. Strathman, *Mat. Res. Soc. Proc.*, **27**(1984), 253.
- [10] M. Posselt and W. Skorupa, *Nucl. Instr. and Meth.*, **B21**(1987), 8.
- [11] S. Oosterhoff and J. Middelhoeck, *Solid-State Electronics*, **28**(5)(1985), 427.
- [12] B. Smith, *Ion Implantation Range Data for Silicon and Germanium Device Technologies*, Learned Information, Oxford, (1977).
- [13] A. Kostka and S. Kalbitcer, *Rad. Eff.*, **19**(1973), 77.
- [14] J. Friedel, *Dislocations*, Pergamon Press, (1984), Chapter 4.

SUPPRESSION AND ELIMINATION OF SECONDARY DEFECTS IN SILICON IMPLANTED WITH MeV ENERGETIC B⁺ IONS

LU WU-XING QIAN YA-HONG TIAN REN-HE

WANG ZHONG-LIE

Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing, 100875

(Received 7 March 1989)

ABSTRACT

Thermal annealing behavior of secondary defects in silicon implanted with MeV energetic boron ions has been studied. We suggest a new type of enhanced annealing effect of double implantation, which can be used effectively to suppress or eliminate the secondary defects in such implanted silicon samples. The physical mechanism of the suppression and elimination processes is discussed.

PACC: 6170T; 6180J; 6170J