

# 半绝缘 InP 中 $\text{Si}^+ + \text{P}^+$ 双注入的电学特性

沈鸿烈 杨根庆 周祖尧 邹世昌

(中国科学院上海冶金研究所离子束开放实验室, 上海)

1989年8月9日收到

研究了在 200°C 热靶条件下经  $\text{Si}^+$  单注入和  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入的半绝缘 InP 常规热退火和快速热退火后的电学特性。热退火后, 双注入样品中的电学性能优于单注入样品。采用快速热退火后, 双注入的效果更加显著。 $\text{Si}^+ 150\text{keV}, 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$  +  $\text{P}^+ 160\text{keV}, 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$  双注入样品经 850°C、5 秒快速热退火后, 最高载流子浓度达  $2.6 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ , 平均迁移率为  $890\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。

**主题词** 磷化铟, 双注入, 常规热退火, 快速热退火

## 一、引言

InP 材料由于在微波和光电子器件方面的运用而越来越受到人们的重视。 $\text{Si}^+$  离子由于其质量小及扩散较小等优点常被选择性注入半绝缘 InP 以形成器件的沟道区和源漏区。近年来国际上关于半绝缘 InP 中  $\text{Si}^+$  离子注入掺杂的研究有过一些报道<sup>[1-3]</sup>, 发现在室温注入时 InP 会产生较大的损伤(相对于 Si 和 GaAs 而言)且难于完全消除<sup>[2]</sup>, 热靶注入虽然产生的损伤较小, 但大剂量注入时, 热退火过程中注入杂质会产生内外扩散<sup>[1]</sup>。即使采用快速热退火技术, InP 中  $\text{Si}^+$  离子注入形成的最高电子浓度仍局限于约  $10^{19}\text{cm}^{-3}$ <sup>[3]</sup>。尽管已有关于 GaAs 中以  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入提高注入层电学性能的报道<sup>[4]</sup>, 但尚未见到在 InP 中开展这种研究。

本文报道掺 Fe 半绝缘 InP 在 200°C 下  $\text{Si}^+$  单注入及  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入的研究结果。经常规热退火和快速热退火后, 用范德堡方法测定样品中电激活率与退火温度的关系, 结合化学腐蚀剥层测量了样品中载流子浓度的纵向分布, 并分析讨论了  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入提高注入层电学性能的机制。

## 二、实验方法

实验采用 LEC 掺 Fe 半绝缘 InP 单晶片, 晶向  $\langle 100 \rangle$ , 电阻率大于  $10^7\Omega \cdot \text{cm}$ 。抛光晶片经有机溶剂超声清洗后, 用  $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} : \text{H}_3\text{PO}_4 = 9 : 1 : 1$  腐蚀去除抛光损伤层。注入时衬底加热到 200°C, 束流偏离  $\langle 100 \rangle$  晶向 7°。 $^{29}\text{Si}^+$  离子以 150keV,  $5 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$  注入后, 取出一半样品进行 160keV,  $5 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$  的  $^{31}\text{P}^+$  离子注入。样品用 PECVD 淀积

厚约  $1000\text{ \AA}$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  包封, 分别在高纯  $\text{N}_2$  中进行常规热退火和卤钨灯快速热退火。样品的注入损伤由  $2\text{MeV He}^+$  作沟道测量, 用范德堡方法结合化学腐蚀剥层测量样品的电激活率、迁移率和载流子浓度纵向分布。

### 三、实验结果与讨论

#### 1. 注入损伤的 RBS 沟道分析

图 1 是  $200^\circ\text{C}$  温度下  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入样品常规热退火前后的沟道测量谱。由图可见, 热靶注入后的沟道谱 (c) 与原始单晶沟道谱 (d) 相差不大, 而室温下以同样条件注入的样品则已产生无定形层<sup>[3]</sup>, 说明热靶注入时, 由于自退火效应, 大部分注入损伤都已消除, 这对提高载流子的迁移率是有益的。值得注意的是经  $750^\circ\text{C}, 15$  分热退火后样品的沟道谱 (b) 的退道反而明显增加(较小剂量注入样品中没有发现这种现象), 其机制尚待进一步研究。一种可能的解释是热退火过程中形成了较复杂的二次缺陷, 且它与注入剂量有关。对于这种缺陷我们正采用透射电镜作进一步研究。

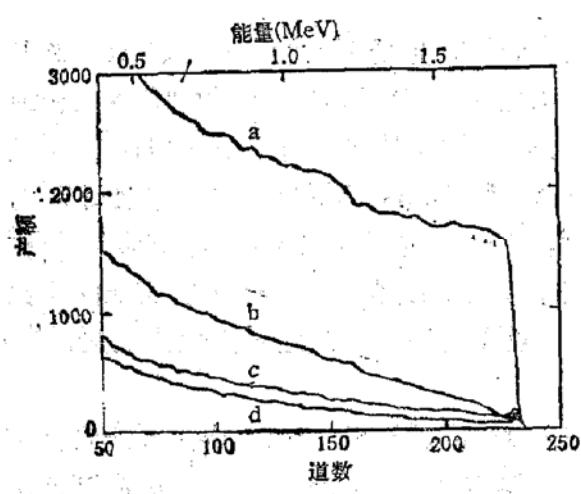


图 1  $2\text{MeV He}^+$  在  $\text{Si}^+ 150\text{keV}, 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-2} + \text{P}^+ 160\text{keV}, 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ ,  $200^\circ\text{C}$  注入的 InP 样品上测得的背散射沟道谱  
(a. 随机谱, b.  $750^\circ\text{C}, 15$  分退火后,  
c. 未退火, d. 单晶谱)

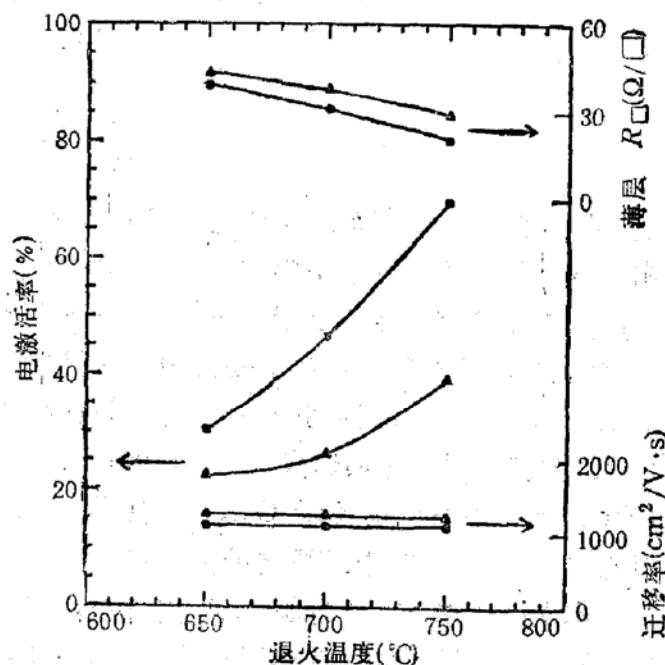


图 2 电激活率、迁移率和薄层电阻与退火温度的关系  
▲  $\text{Si}^+ 150\text{keV}, 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ , 退火 15 分  
●  $\text{Si}^+ 150\text{keV}, 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-2} + \text{P}^+ 160\text{keV}, 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ , 退火 15 分

#### 2. 电激活率与迁移率

图 2 是不同温度下经 15 分常规热退火后在  $\text{Si}^+$  单注入和  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入样品中测得的电激活率、迁移率及薄层电阻  $R_d$  与退火温度的关系。双注入样品的电激活率比单注入样品有明显增加, 且随着温度上升, 这种效应进一步加强。这主要是  $\text{P}^+$  离子注入

后,迫使更多的 Si 占据 In 的晶格位置呈施主,使载流子浓度增加。迁移率随温度上升而略有下降,这是增强的离化杂质散射所致<sup>[6]</sup>。由于薄层电阻  $R_{\square}$  与薄层载流子浓度和迁移率的乘积成反比,用  $R_{\square}$  更能表征注入层电学性能的优劣,图 2 示出的  $R_{\square}$  与退火温度的关系清楚地表明了双注入层有较好的电学性能。经 800°C 退火 15 分的 InP 样品,由于表面处 P 大量挥发而使性能变差。

### 3. 载流子浓度的纵向分布

用微分霍耳方法测得的  $\text{Si}^+$  单注入和  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入样品经 750°C 退火 15 分后的载流子浓度纵向分布如图 3 所示(图中还示出了高斯分布的理论曲线)。由图可见,双注入样品的峰值浓度为单注入样品的 1.7 倍,但这两条曲线分布都较平坦,总的电激活率也不高,这可能是长时间的热退火过程中,除了注入的 Si 有内外扩散外<sup>[3]</sup>, InP 体内的补偿杂质如 Fe、Mn 和 Zn 等在表面处堆积<sup>[7]</sup>形成受主型中心产生补偿也不可忽视。为了解决这个问题,我们采用了快速热退火技术。图 4 为经 850°C、5 秒卤钨灯快速热退火后  $\text{Si}^+$  单注入和  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入样品的载流子浓度分布。两种注入的载流子浓度都较常规热退火有明显提高,更重要的是双注入样品经快速热退火后峰值浓度为  $2.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (为单注入峰值的 2 倍),已接近理论预计数值。必须指出,在  $\text{Si}^+$  单注入情况下,即使以  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  剂量注入并用相同条件快速热退火,也无法得到这么高的载流子浓度<sup>[3]</sup>。我们认为这主要是被 Si 在 InP 中的双性行为所限制,在较高的  $\text{Si}^+$  注入剂量下, Si 除了占据 In 晶格位置呈施主外,一部分 Si 趋于占据 P 晶格位置呈受主而产生自补偿。结合  $\text{P}^+$  离子注入后,材料中注入层内 P 空位浓度相对减少, Si 被迫更多地占据 In 的晶格位置呈施主使载流子(电子)浓度得到提高。 $\text{Si}^+$  注入 GaAs 中这种类似的双性行为已有过报道<sup>[4]</sup>。为了进一步研究 Si 在 InP 中的占位情形,我们进行了低温光荧光分析。发现

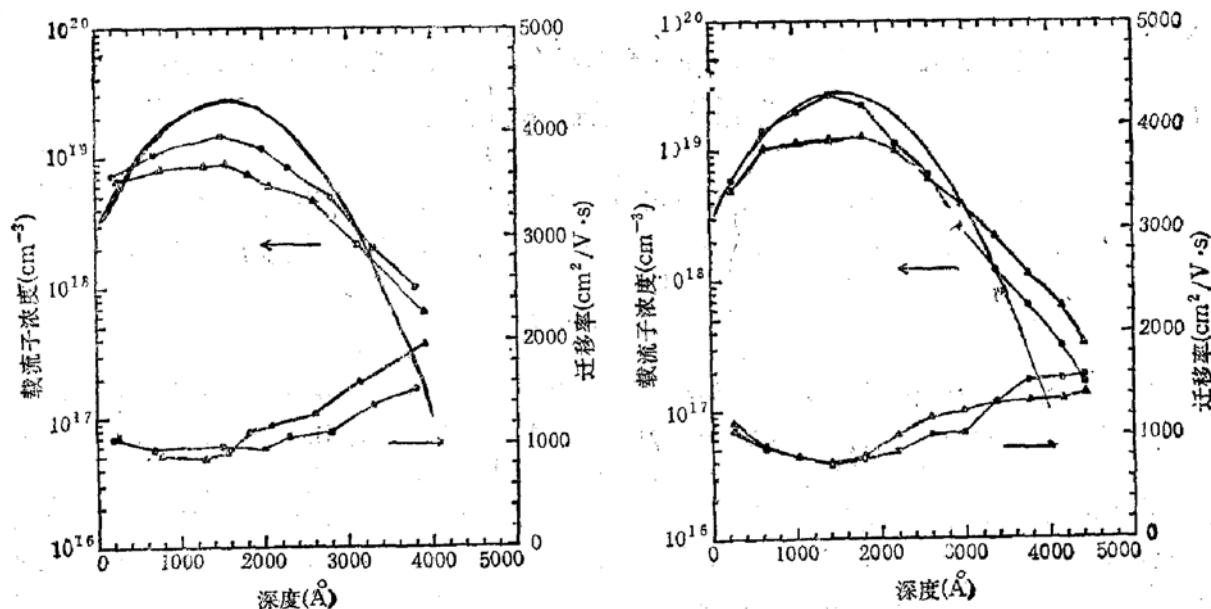


图 3 750°C、15 分常规热退火后载流子浓度纵向分布  
 ▲  $\text{Si}^+$  单注入, ●  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入,  
 — LSS 分布

图 4 850°C、5 秒快速热退火后载流子浓度纵向分布  
 ▲  $\text{Si}^+$  单注入, ●  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入,  
 — LSS 分布

$\text{Si}^+$  单注入样品中存在一个很强的受主峰，而在  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  双注入样品中该受主峰大大减弱甚至消失，详细结果将另文报道。

#### 四、小结

- 热靶注入能有效地消除注入损伤，大剂量注入时，热退火过程中可能形成复杂的二次缺陷，其具体结构类型需由透射电镜进一步分析。
- 共  $\text{P}^+$  注入能提高注入  $\text{Si}$  的电激活率，其原因是注入层中  $\text{P}$  空位浓度相对减小， $\text{Si}$  占  $\text{In}$  晶格位置几率增大。
- 采用快速热退火能有效地激活注入杂质，双注入效果更为显著，载流子浓度峰值接近理论预计值。

作者对本所徐涌泉提供半绝缘  $\text{InP}$  晶片，林梓辛进行离子注入，夏冠群、朱文玉提供霍耳测试设备及工艺条件，北京师范大学低能核物理所李小龙协助做快速热退火表示衷心感谢！

#### 参 考 文 献

- [1] J. P. Donnelly and G. A. Ferrante, *Solid-State Electronics*, 23, 1151(1980).
- [2] P. Auvray et al., *J. Appl. Phys.*, 53(9), 6202(1982).
- [3] C. W. Farley and B. G. Streetman, *J. Electrochem. Soc.*, 134(2), 498(1987).
- [4] C. W. Farley et al., *J. Electron. Mater.*, 16(1), 79(1987).
- [5] Shen Honglie et al., to be published in Proceedings of International Symposium on Application of Nuclear Techniques, Shanghai, China, 1989.
- [6] M. V. Rao et al., *J. Electron. Mater.*, 17(4), 315(1988).
- [7] M. Gauneau et al., *J. Appl. Phys.*, 57(4), 1029(1985).

### Electrical Properties of $\text{Si}^+ + \text{P}^+$ Dually Implanted Semi-Insulating $\text{InP}$

Shen Honglie, Yang Genqing, Zhou Zuyao and Zou Shichang

(Ion Beam Laboratory, Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai 200050)

#### Abstract

The electrical properties of  $\text{Si}^+$  singly and  $\text{Si}^+ + \text{P}^+$  dually implanted semi-insulating  $\text{InP}$  at 200°C after conventional furnace annealing (FA) and rapid thermal annealing (RTA) have been studied. After FA, the electrical properties of the dually implanted samples are better than that of the singly implanted samples. By using the RTA, the effect of dual implantations is more evident. The measured maximum electron concentration and average electron mobility for sample dually implanted by  $\text{Si}^+$  150 keV,  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  +  $\text{P}^+$  160 keV,  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  and annealed at 850°C for 5s are  $2.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  and  $890 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , respectively.

**Key words**  $\text{InP}$ , Dual Implantations, Conventional furnace annealing, Rapid thermal annealing