

半导体 InP 的高能重离子辐照效应研究*

胡新文 王少阶 陈志权 李世清

(武汉大学物理系 武汉 430072)

侯民东

(中国科学院兰州近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 本文利用 50 MeV 的 Ne 离子对掺 Zn 的 InP 的半导体进行了辐照, 并且 Monte Carlo 模拟及正电子湮没技术研究了辐照产生的缺陷。模拟计算结果表明, 注入的 Ne 的离子及辐照产生的缺陷均主要集中在离子射程末端, 由正电子寿命测量结果可知, 在低剂量辐照时, 产生的空位为单空位, 当辐照剂量增大时, 单空位由于相互聚合变成双空位及空位团, 随着剂量进一步增大, 还会形成无序的非晶层。

PACC: 7870B, 6170B, 7155

1 引言

半导体中的缺陷是电激活的, 由于缺陷和载流子间的相互作用, 使得缺陷的存在严重影响半导体的光学和电学性质, 特别是在化合物半导体中, 其原生缺陷浓度常超过残余杂质深度 1~2 个数量级。除材料制备与各种处理过程可以产生缺陷外, 辐照效应也可以在半导体中引入缺陷, 从而为研究半导体中的缺陷特性提供了一种有效手段。人们曾用电子、质子、中子等各种粒子对半导体进行辐照研究。如 Tornqvist 等^[1]用能量为 2.0 MeV 的电子在低温下辐照各种 InP 样品, 结果在样品中产生了负离子、In 空位和 P 空位。其中 n 型 InP 中的 In 空位在 150~200K 退火时退掉, 而 P 空位直到 300K 才退出。Yamaguchi 等^[2]也研究了 1 MeV 电子辐照 InP 太阳电池导致的缺陷在室温下退火的现象, 并认为 InP 太阳电池比 Si 或 GaAs 太阳电池有着更好的抗辐照性能。

近来, 用高能重离子辐照化合物半导体 GaAs、InP 的研究十分活跃。Carin 等^[3]发现

* 国家自然科学基金资助课题

胡新文 男, 1972 年出生, 博士, 现从事红外探测器件研究工作
1996-10-9 收到, 1996-12-23 定稿

190 MeV 的氧离子辐照 GaAs 后会导致其电阻率增加; Ridway^[4]也曾用 5 MeV 的 O⁺ 离子辐照 p 型 InP, 发现块电阻与离子辐照剂量有很大关系。然而对辐照产生的缺陷研究报道较少。

正电子谱学是一种研究半导体缺陷的有力工具^[5], 这是由于正电子对空位型缺陷特别敏感, 许多辐照产生的缺陷如空位、空位团、空位-杂质复合体等都可以捕获正电子, 因而可用正电子进行缺陷鉴别; 而且正电子谱学有很强的理论支持, 实验结果可与理论进行比较^[6]。因此是一种研究辐照产生缺陷特性的有效方法。

本文采用能量为 500 MeV 的 Ne⁸⁺ 离子辐照 p 型 InP 半导体, 用 Monte Carlo 方法对 Ne 离子在 InP 样品中的注入过程进行了模拟, 测量了经不同剂量辐照后样品的正电子寿命谱, 并讨论了辐照产生的缺陷特性。

2 实验方法

实验用样品为 p 型 InP (掺 Zn), 载流子浓度为 $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 样品尺寸为 $10 \times 10 \times 0.6 \text{ mm}^3$ 。重离子辐照实验是在兰州重离子加速器 HRFL (Heavy Ion Research Facility of Lanzhou) 的辐照终端 L2 上完成的, HRFL 采用的是 PIG 离子源, 预加速后通过剥离膜的串级加速的方法对离子进行加速。

实验所用离子为 Ne, 其电荷数为 8+, 能量为 500 MeV, 经过串级加速至样品, 离子束电流保持在约 25 nA 左右, 相应的辐照通量为 $10^{10} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 注入样品的角度控制在 5° 以内, 束斑大小近似为 12 mm, 辐照至样品时的尺寸为 8 mm, 剂量分别为 $10^{12} \text{ ions/cm}^2$ 、 $10^{13} \text{ ions/cm}^2$ 和 $10^{14} \text{ ions/cm}^2$, 相应辐照时间分别为 3 分钟、35 分钟和 4 小时, 实验在 $1.06 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 的真空中进行。辐照时样品温度维持在 100 K 左右。由于辐照时样品中有核反应产生, 因此在确认样品中的 γ 本底消失以后才在室温下进行正电子寿命测量。同时对 500 MeV 的 Ne⁸⁺ 离子在 InP 材料中的注入过程用 TRIM90 程序进行 Monte Carlo 模拟。

正电子寿命测量采用 ORTEC-583 快定时电路组成的快-快符合系统, 探头由 BaF₂ 和 XP2020Q 光电倍增管组成。源强为 $7 \times 10^5 \text{ Bq}$ ($20 \mu\text{Ci}$) 的 ²²Na 正电子源置于两片相同的厚约 0.6 mm 的半导体中间成为夹心式, 系统的时间分辨率约为 250 ps (用 ⁶⁰Co 放射源的瞬发符合峰测得), 每个谱的计数为 200 万, 时间约为 1.5 小时。

3 结果与讨论

3.1 Monte Carlo 模拟

对 500 MeV 的 Ne⁸⁺ 离子在 InP 材料中的注入过程中用 TRIM90 程序进行 Monte Carlo 模拟^[7], 图 1 示出了 500 MeV 的 Ne 离子在 InP 样品中的射程分布。由图可见, 高能 Ne 离子在 InP 样品中的注入深度约为 524 μm, Ne 离子主要停留在辐照径迹的末端附近, 而在起始和中间位置数目很少。由于其为惰性气体元素, 一般不与其它空位或缺陷结合形成缺陷复合体, 而主要以间隙原子的形式存在或处于替代位置。计算发现大约每个 500 MeV 的 Ne⁸⁺ 离子在 InP 样品中可产生 8000 多个空位, 辐照引入的空位绝大部分是由级联碰撞产生的,

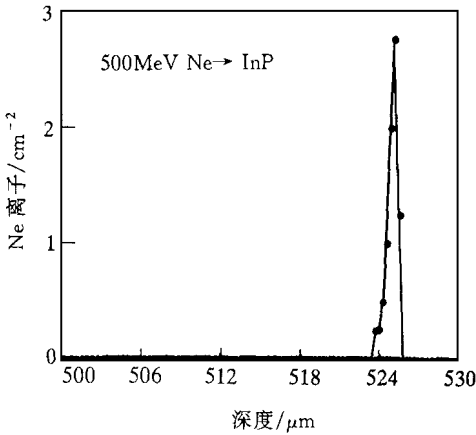


图 1 500MeV 高能Ne 离子在 p 型 InP 中射程分布的 Monte Carlo 模拟结果

而由 Ne 离子本身直接电离产生的空位数量很小, 并且空位亦主要形成在离子径迹的末端

3.2 正电子寿命测量

将测得的寿命谱用 P A T F I T 程序^[8]进行解谱, 在扣除本底并进行源修正以后进行拟合. 对未辐照以及辐照剂量为 10^{12} ions/cm² 和 10^{13} ions/cm² 的样品用二分量拟合时, 拟合优度较好 (χ^2 1.1); 但当辐照剂量为 10^{14} ions/cm² 时, 二分量拟合效果不好, 而只能用三寿命拟合. 表 1 列出了测量的正电子寿命结果. 其中 τ_2 、 τ_3 分别对应正电子的第二、第三寿命分量, 其相应强度为 I_2 、 I_3 . 平均寿命 $\tau_m = \sum_i I_i \tau_i$, 正电子在体态的湮没寿命 τ_b

$$= \lambda_b^{-1} = \left(\sum_i I_i / \tau_i \right)^{-1}$$

表 1 500MeV 的 Ne 离子辐照 InP 样品中的正电子寿命测量结果

剂量/(ions · cm ⁻²)	τ_2 /ps	I_2 /%	τ_3 /ns	I_3 /%	τ_m /ps	τ_b /ps	χ^2
0	270.0 ± 4.1	66.9 ± 6.2			242.7 ± 0.05	235.7	1.031
10^{12}	267.6 ± 4.0	70.0 ± 6.9			243.7 ± 0.05	237.2	1.072
10^{13}	285.5 ± 5.8	50.7 ± 6.6			244.3 ± 0.05	237.3	1.076
10^{14}	290.0 ± 1.5	66.7 ± 1.5	2.29 ± 0.12	0.30 ± 0.01	256.8 ± 0.05	242.3	0.995

由上表可以看出: 在未辐照的 InP 样品中, 可以分解出两个寿命分量, $\tau_1 = 186$ ps, $\tau_2 = 270$ ps. τ_1 为正电子自由湮没寿命, τ_2 为正电子缺陷态寿命. 我们最近的实验结果曾经发现^[9], 在原生 p-InP 中, 正电子可被铟空位 V_{In} 所捕获. 因此这一结果再一次证实了我们的结论.

当样品经过 10^{12} ions/cm² 的剂量辐照后, τ_2 变化不大, 仍为 270 ps 左右, 但 I_2 略有上升, 从 66.9% 增加到 70%. 由正电子的两态捕获模型知, 第二分量 τ_2 、 I_2 分别是正电子在缺陷态的寿命和强度. 其捕获率 $k = I_2(\lambda_b - \lambda_d) / I_1$, 而 $k = \mu C_d$ (这里 C_d 为缺陷浓度, μ 为比捕获率), 即与缺陷浓度成正比. 可见, 在低剂量辐照时, 样品中缺陷尺寸变化不大, 即样品中仍然只观察到单空位存在, 但缺陷浓度略有增加.

随着辐照剂量增加到 10^{13} ions/cm², 缺陷态寿命 τ_2 明显变大, 从 267 ps 增加到 285 ps. 由前述 Monte Carlo 模拟知, 平均每个 Ne⁸⁺ 离子在 p 型 InP 样品中可产生约 8000 个空位. 当辐照剂量为 10^{13} ions/cm² 时, 样品中空位总数达到 10^{17} 量级, 而且它们主要形成在离子径迹的末端仅几个 μ m 的区域内. 所以在这一区域的单空位浓度很高, 故可能相互结合, 形成双

空位, 这样就会导致缺陷处寿命 τ_2 的增大。此外, 第二分量强度 I_2 从 70.0% 降至 50.7%, 降低将近 20 个百分点, 这表明由于部分单空位复合, 使缺陷数量相应减少, 并导致强度 I_2 降低。

当辐照剂量进一步增加到 10^{14} ions/cm² 时, 我们发现了非常有意义的结果, 此时寿命谱必须用三个寿命分量拟合才有满意结果, 如果用两分量进行拟合则优度特别差。因此我们认为此时样品中确有三个寿命分量。其中第二寿命 τ_2 增加至 290 ps, 其强度 I_2 也上升了, 从 50.7% 增至 67%, 这表明双空位浓度大大增加了。此时双空位主要是来自于辐照损伤缺陷的重叠, 因为 I_2 不但没有下降, 反而上升了。但由于 τ_2 仍小于双空位之值, 故此时仍有部分单空位存在。

对于第三分量, 其寿命 $\tau_3 \sim 2.4$ ns, 强度 $I_3 \sim 0.3\%$, 这表明样品中有正电子素 (Ps) 形成, τ_3 为 o-Ps 湮没寿命, 由于 Ps 不能在完整晶格中形成, 我们认为此时辐照样品中有非晶层形成。在高能量离子辐照实验中, 若入射剂量比较小, 这些入射离子引起的空位还只是孤立的点缺陷, 很少出现损伤叠加现象。随着剂量的增加, 入射离子引起的损伤区进一步增加, 注入层的晶格畸变率增加。当剂量增大到某种程度时, 注入层完全损坏而形成无序状态的非晶层。Ps 则可在这一非晶区域生成并湮没。由 Monte Carlo 模拟结果可知, 离子辐照损伤主要集中在射程末端附近, 非晶层即发生在辐照径迹的末端附近几个 μm 的范围内, 因而导致 I_3 较小。

由于在半导体中, 正电子在单空位中的寿命仅比体寿命高出 20% 左右, 因此对寿命谱作多指数拟合一般比较困难。但是正电子平均寿命却能够很好地反映正电子寿命谱的变化, 既精确可靠又具有很好的重复性, 因此平均寿命可以更好地表征缺陷特性的变化。图 2 绘出了平均寿命 τ_m 随辐照剂量的变化, 由图可见: 在未辐照时, 样品中的平均寿命 τ_m 为 242 ps, 这与以前的结果相同。经低剂量 10^{12} ions/cm² 辐照后, τ_m 升至 243 ps, 说明有新的空位生成; 经中等剂量 10^{13} ions/cm² 辐照后, τ_m 变化不大, 为 244 ps; 当辐照剂量为 10^{14} ions/cm² 时, τ_m 升至约 257 ps, 增大了 14 ps 左右。这表明, 随着辐照剂量的增大, 所造成的损伤也增大。

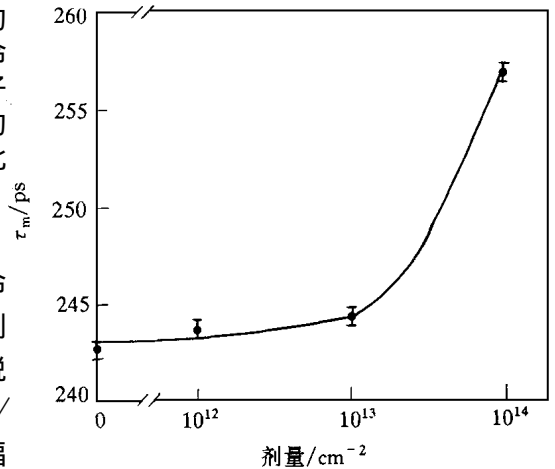


图 2 正电子平均寿命 τ_m 随辐照剂量的变化

综上所述, 本文用剂量为 $10^{12} \sim 10^{14}$ ions/cm² 的高能 Ne 离子辐照了 p 型 InP 半导体, 对 Ne 离子在 InP 样品中的注入过程进行了 Monte Carlo 模拟, 发现 Ne 离子注入后主要停留在辐照径迹的末端附近, 辐照产生的空位型缺陷也主要分布在这个区域。测量了不同剂量辐照后样品中的正电子寿命谱, 结果表明: 未辐照时, 样品中存在铟的单空位 V_{In} ; 当辐照剂量为 10^{12} ions/cm² 时, 样品中仍然只存在单空位, 但缺陷浓度略有增加; 当辐照剂量为 10^{13} ions/cm² 时, 辐照样品中开始有双空位出现; 在最高辐照剂量 10^{14} ions/cm² 时, 不仅双空位浓度大大增加了, 而且样品中还出现了强度较小的第三寿命分量, 这说明在样品中形成了正

电子素(Ps)原子,这可能是由于高剂量辐照形成的损伤过大在样品中出现了非晶层所致

致谢 感谢中国科学院兰州近代物理所重离子加速器开放实验室提供了辐照实验帮助

参 考 文 献

- [1] M. Tornqvist and C. Corbel, Mater. Sci and Engin , 1994, **B28**: 126
- [2] M. Yamaguchi *et al* , Appl Phys Lett , 1984, **45**(11): 1206
- [3] R. Carin *et al* , Nucl Instr and Meth , 1992, **B63**: 21.
- [4] M. C. Ridgway *et al* , Appl Phys Lett , 1992, **60**(24): **3010**
- [5] P. Hautajarvi, "Defects in Semiconductors: Recent Progress in Positron Experiments ", in Positrons Spectroscopy of Solids by eds by A. Duspaquier and A. P. Mills jr (Amsterdam, Oxford, Tokyo, Washington D. C. , **1995**).
- [6] M. J. Puska and R. M. Nieminen, Rev. Mod. Phys , **1994**, **66**: 841.
- [7] J. F. Ziegler *et al* , The Stopping and Range of Ions in Solids (pergamon press New York, 1995).
- [8] PATFIT package Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1989.
- [9] Z. Q. Chen, X. W. Hu and S. J. Wang, Sol Stat Commun , 1996, **97**: 951.

Radiation Effect Study of InP Materials by High Energy Heavy Ions

Hu Xinwen, Wang Shaojie, Chen Zhiquan and Li Shiqing

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

Hou M indong

(Lanzon Institute of Modern Physics, The chinese Academy of Sciences, Lanzon 730000)

Received 9 October 1996, revised manuscript received 23 December 1996

Abstract Zn doped InP semiconductors were irradiated by 500 MeV Ne ions. The radiation induced defects are studied by Monte Carlo simulation and Positron Annihilation measurement. The simulation results show that the implanted Ne ions and the vacancies produced are mainly concentrated around the end of the ion range. Positron annihilation results show that the vacancies are monovacancy type when the irradiation dose is low, but with the increasing dose, monovacancies are converted to divacancies and vacancy clusters by combination. When the irradiation dose become even higher, an amorphous layer is formed.

PACC: 7870B, 6170B, 7155