

# 中子辐照 GaAs 的 X 射线漫散射研究

刘 键<sup>1,2</sup> 王佩璇<sup>1</sup>

(1. 北京大学 2. 中国科学院高能物理研究所)

**摘 要** 用 X 射线漫散射研究了中子辐照 GaAs 中的缺陷. 结果表明: 中子辐照产生点缺陷团. 辐照剂量为  $10^{19}\text{m}^{-2}$  和  $10^{21}\text{m}^{-2}$  时, 缺陷团的平均半径分别为 387nm 和 455nm. 这可能是高剂量辐照下损伤区域交叠的结果. 平均半径随退火温度的升高而减小是间隙原子与空位复合造成的.

**关键词** 中子辐照 GaAs X 射线漫散射

**分类号** O571

## STUDY OF NEUTRON IRRADIATED Si-GaAs BY X RAY DIFFUSE SCATTERING

LIU Jian<sup>1,2\*</sup> WANG Peixuan<sup>1</sup>

(1. *University of Science and Technology Beijing*

2. *Institute of High-Energy Physics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100039*)

**ABSTRACT** The defects of Si-GaAs induced by neutron irradiation has been studied by X ray diffuse scattering. It is concluded that neutron-irradiation produces the clusters of point defects in Si-GaAs. The mean radius of the microdefect is related to the neutron fluence, and the damaged region of higher neutron fluence is overlapping. The recombination of interstitial and vacancy in the process of annealing decreases the mean radius of cluster of point defects.

**KEY WORDS** neutron-irradiation, GaAs, X ray diffuse scattering

GaAs 广泛用于军事和空间通讯, 容易受到粒子辐照产生缺陷, 导致器件参数降低而失效. 因此, 研究 GaAs 的中子辐照效应, 对于研制 GaAs 的抗辐照器件有指导意义.

研究中子辐照 GaAs 的方法有深能级瞬态谱 (DLTS)<sup>[1]</sup>, 低温光荧光 (PL)<sup>[2~4]</sup>, 正电子湮没技术 (PAT)<sup>[5~7]</sup>. 研究的侧重点各有不同. X 射线漫散射常用于近完整晶体低缺陷浓度的研究. 尽管不能直接给出缺陷图像, 但它具有非破坏性, 能够测量较大的晶格区域等优点.

**实 验** 样品是采用液态密封直拉法生长的半绝缘 GaAs. 电阻率为  $0.1\sim 0.2\text{G}\Omega\cdot\text{cm}$ , 电子迁移率为  $0.6\text{m}^2(\text{Vs})^{-1}$ , 位错密度低于  $5\times 10^4\text{cm}^{-3}$ .

中子辐照在中国原子能科学研究院 101 反应堆上进行. 辐照剂量为  $10^{19}\sim 10^{21}\text{m}^{-2}$ , 其中能量大于  $0.1\text{MeV}$  的中子剂量为  $10^{18}\text{m}^{-2}\sim 10^{20}\text{m}^{-2}$ . 辐照后用卤钨灯快速退火, 退火温度为  $0\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ .

1997 年 6 月 2 日收到初稿; 1998 年 7 月 2 日收到修改稿.

本文联系人: 刘 键, 博士, 北京市 100039, 中国科学院高能物理研究所核分析室

\* To whom correspondence should be addressed

X 射线漫散射实验在 SLX-1AL 双晶衍射仪上进行. 采用 004 对称反射, 衍射角  $\theta_B = 33.023^\circ$ .

**理论基础** 当晶体中存在缺陷时, 由于缺陷周围的动力学衍射效应被破坏, 造成 X 射线衍射峰的两侧和尾部的衍射强度改变, 衍射峰不对称. 由此可导出缺陷的某些性质<sup>[8~10]</sup>: 根据  $2d\sin\theta = n\lambda$ , 当  $\theta > \theta_B$  ( $\theta_B$  是 Bragg 角) 时, 衍射强度增大, 说明缺陷使晶格参数变小; 如果  $\theta < \theta_B$  的衍射强度增大, 则缺陷使晶格参数变大.

通过分析对应一定  $\Delta\theta$  的漫散射强度  $I_S = I_i - I_o$ , 近似地有:  $I_S = 0.5[I(\Delta\theta) + I(-\Delta\theta)]$ . 从  $I_S$  与  $\Delta\theta$  的关系曲线可以得到缺陷的类型 (如点缺陷团、位错环等) 和其平均尺寸  $r$ . 已经证明<sup>[11,12]</sup>:  $\ln(I_S)$  与  $\ln(\Delta\theta)$  的关系是线性的. 其斜率对点缺陷团是 -2; 而对位错环是 -3. 并有如下关系:

	$q < r^{-1}$	$q > r^{-1}$
点缺陷团	$I_S \sim A \ln[e^{0.5}(qr)^{-1}]$	$I_S \sim B(qr)^{-2}$
位错环	$I_S \sim C \ln[e^{0.5}(qr)^{-2}]$	$I_S \sim Dq^{-3}$

当  $q < r^{-1}$  时  $I_S$  与  $\ln(\Delta\theta)$  的关系是线性的. 这一线性部分和横轴的截距  $q_0$  与缺陷的平均半径有关. 其中,  $q = H\Delta\theta \cos\theta_B$  ( $H$  为衍射矢量的绝对值).

**结果及讨论** 由图 1 可见:  $\theta < \theta_B$  的衍射强度比辐照前增大, 说明辐照产生的缺陷使晶格参数变大. 由图 2 可以得到与平均缺陷半径有关的截距  $\Delta\theta$ , 据此可计算缺陷的平均半径  $r$ . 退火后的  $r$  值列于图 3. 图 4 是  $\ln I_S$  与  $\ln(\Delta\theta)$  的实验曲线. 计算其斜率等于 -2, 其结果见图 5. 根据以上理论分析, 说明辐照后的微缺陷是点缺陷团.

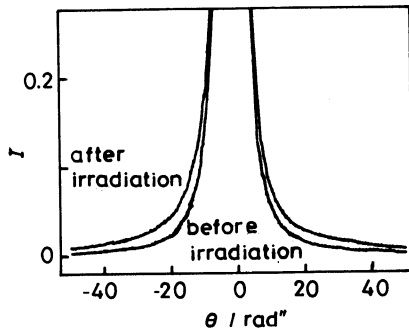


图 1 辐照前后的 X 射线衍射曲线

Fig.1 Rocking curve before and after irradiation

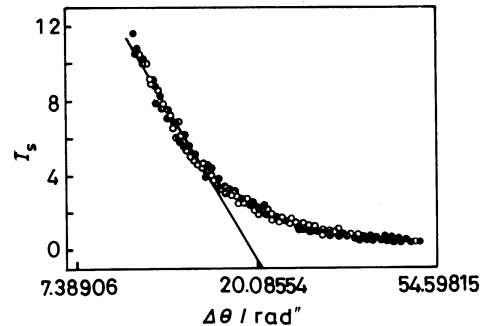


图 2 漫散射强度  $I_s$  与相对布拉格衍射角偏离  $\Delta\theta$  的关系

Fig.2 X ray diffuse scattering intensity  $I_s$  vs dispersion of Bragg angle  $\Delta\theta$

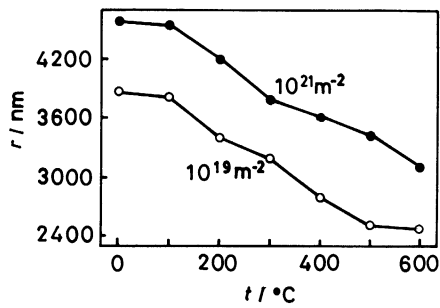


图 3 点缺陷团平均半径  $r$  与退火温度  $t$  的实验曲线

Fig.3 Average radius  $r$  of defect cluster vs annealing temperature  $t$

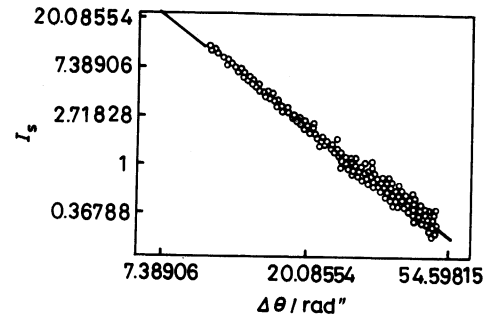


图 4 漫散射强度  $I_s$  与相对布拉格衍射的角度偏离  $\Delta\theta$  的双对数关系

Fig.4 Logarithmic plot of X ray diffuse scattering intensity  $I_s$  vs dispersion of Bragg diffraction angle  $\Delta\theta$

根据图 1, 辐照产生的缺陷使晶格参数增大, 首先是因为 X 射线漫散射角  $\theta$  非常接近布拉格衍射角的区域, 即晶格参数非常接近正常晶格的晶格弱畸变区; 其次因为, 在中子辐照造成的损伤区中, 中心是中子初级碰撞造成的无序区 (空位型), 其边缘是从无序区碰撞出来的, 由间隙原子构成的强畸变区. 随着远离中心区域, 间隙原子浓度逐渐降低, 晶格畸变减弱形成很大的弱畸变区 (图 6). 显然, X 射线漫散射主要反映弱畸变区. 可见: 在弱畸变区, 晶格参数变大, 是间隙原子造成的结果. 这与目前普遍的观点<sup>[13,14]</sup>一致.

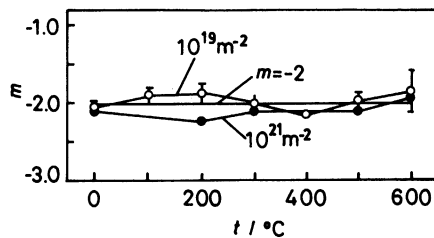


图 5 漫散射双对数曲线的斜率  $m$  随退火温度  $t$  的变化

Fig.5 Slope of logarithmic plot of diffuse scattering  $m$  vs annealing temperature  $t$

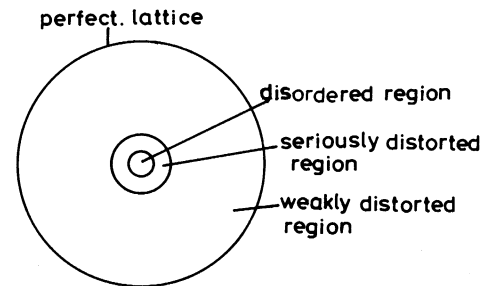


图 6 晶格损伤区域分布示意图

Fig.6 Sketch map of damaged area of lattice

图 3 还表明: 辐照后点缺陷团的平均半径  $r$  较大. 对于  $10^{21} \text{ m}^{-2}$  和  $10^{19} \text{ m}^{-2}$ ,  $r$  分别为 455nm 和 387nm. 与文献<sup>[15]</sup>报道的损伤平均半径 200~250nm 的结果相近. 因为随着与损伤中心的距离增大, 损伤程度减小, 晶格畸变减弱. 而刻蚀法测量区域的损伤程度比 X 射线漫散射探测区域的损伤要大, 所以刻蚀法得到的平均损伤半径较小.

实验结果(图3)还表明:不同辐照剂量造成的平均损伤半径不同.高剂量( $10^{21}\text{m}^{-2}$ )下平均损伤半径较低剂量( $10^{19}\text{m}^{-2}$ )大.这是因为较大辐照剂量造成损伤加剧,相邻的两个损伤区局部交叠,使平均损伤半径 $r$ 增大. $r$ 随退火温度的升高而减小.根据沟道背散射实验结果<sup>[16]</sup>,可认为是由于退火,间隙原子与空位复合<sup>[17,18]</sup>降低了晶格畸变程度的同时也减小了弱畸变区域造成的.且退火温度愈高,间隙与空位的复合愈加显著,平均损伤半径愈小.但由于退火时间较短,退火温度虽高,仍有一定浓度的间隙原子存在,平均损伤半径仍然较大.此外,除了间隙原子对晶格参数影响较大外,反位缺陷对晶格参数的影响也较大,只不过反位缺陷的浓度很小,这里可以不考虑.

### 结 论

中子辐照引入点缺陷团.间隙原子使得晶格参数增大.高剂量辐照产生的点缺陷团平均半径较大.退火温度升高点缺陷团平均半径减小.

### 参 考 文 献

- 1 F.D.Auret, Appl.Phys A., **56**, 547(1993)
- 2 K.Kuriyama, J.Appl.Phys., **70**(12), 7315(1991)
- 3 J.Garrido, J.Appl.Phys., **57**(6), 2186(1985)
- 4 S.M.Khanna., IEEE.Trans.on.Nucl.Sci., **38**(6), 1145(1991)
- 5 吴凤美, 沈德勤, 腾敏康, 陈 岭, 唐 杰, 张德宏. 半导体学报, **10**(1), 18(1989)
- 6 陈志权, 胡新文, 马 莉, 第六届全国正电子湮没会议文集(安徽, 合肥, 1996) p.145
- 7 李安利, 罗 起, 范志国, 第六届全国正电子湮没会议文集(安徽, 合肥, 1996) p.138
- 8 B.C.Larson, W.Young, Jr.Z.Natur Forsch, **28A**, 626(1973)
- 9 P.H.dederichs, Phys.Rev.B, **4**, 1041(1971)
- 10 T.Kitana, T.Ishikawa, J.Matsui, Phil.Mag., **A63**, 95(1991)
- 11 A.N.Morozov, V.T.Bublik, J.Crystal Growth, **97**, 475(1989)
- 12 L.A.Charniy, A.N.Morozov, V.T.Bubliketal., J.Crystal Growth, **118**, 163(1992)
- 13 K.M.Yu, M.Kaminska, Z.Liliental-Weber, J.Appl.Phys., **72**(2), 850(1992)
- 14 陈诺夫, 何宏家, 王玉田, 林兰英, 中国科学, (A), **26**(12), 1117(1996)
- 15 M.Bertolotti, *Radiation Effect in Semiconductor*, Ed.Frederick, L. Vook, **3~5**, 311(1967)
- 16 刘 键, 王佩璇, 半导体学报(1998, 待发表)
- 17 D.Pons, A.Mircea, J.Bourgoin, J.Appl.Phys., **51**(8), 1980
- 18 D.Stievenard, X.Boddaert, J.Bourgoin, Phys.Rev.B, **34**(6), 4048(1986)