

文章编号: 1007- 4627(2000)03-0140-06

# 离子辐照单晶 Si 损伤效应的研究\*

刘昌龙, 朱智勇, 侯明东, 金运范, 王志光

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 回顾了低能离子注入单晶 Si 经由核弹性碰撞引起的损伤特征及其常规的研究方法, 介绍了快重离子辐照单晶 Si 经由电子能损引起的损伤特点及研究现状, 并对该领域的研究作了展望.

关键词: 离子辐照; 单晶 Si; 损伤效应; 电子能损

中图分类号: O571.33 文献标识码: A

## 1 引言

众所周知, Si 是应用技术领域最为重要的半导体材料之一, 用它构建的半导体器件已广泛地应用到了现代电子、信息乃至现代工业的各个领域. Si 的性质密切地依赖于其一杂质、缺陷和温度等多种因素, 极微量的杂质或缺陷的存在, 都会对 Si 的物理、化学性质甚至半导体器件的质量产生至关重要的影响. 采用荷能离子辐照 Si, 一方面可以通过核弹性碰撞、靶原子激发电离等物理过程产生缺陷; 另一方面, 由于能量的不断损失, 离子最终被阻止在 Si 靶的某一深度处, 成为杂质原子. 这些特点决定了离子注入技术在半导体器件工艺中的广泛应用.

早在 60 年代初, 人们就开始利用 keV 量级的低能离子注入方法, 对核弹性碰撞在 Si 中产生的缺陷及其演变过程进行了深入的研究<sup>[1,2]</sup>; 同时, 在位移级联理论的基础上建立了一套较为完整的用于核弹性碰撞引起缺陷产生的理论计算体系. 这些研究成果为低能离子注入技术在半导体材料改性及其工艺中的应用奠定了良好的物理基础. 70 年代末以后, 国际上相继建成了多台中高能重离子加速器(如 GANIL-Caen, VICKSI-Berlin 和 HIRFL-Lanzhou 等), 能量高于 1 MeV/u 的快重离子在各类固体材料中引起的效应及其微观物理机制的研究开始受到人们的关注. 快重离子在物质中主要通过电子阻止的方式(即电子能损)损失能量, 在除射程

末端以外的绝大部分辐照区域中, 电子能损与核能损的比率大于  $10^3$ . 由于通过电离激发过程沉积在单位路径上的能量很高, 因而快重离子辐照就有可能产生复杂的甚至全新的现象和效应. 目前, 已在固体材料中观测到了多种由高电子激发电离诱发的损伤效应, 如潜径迹形成<sup>[3]</sup>和各向异性的塑性形变<sup>[4]</sup>等. 半导体材料在高电子激发电离条件下的稳定性也是人们多年来研究的热点问题之一. 本文简要回顾了低能离子注入单晶 Si 损伤效应研究的方法和主要结果, 并就快重离子辐照单晶 Si 产生的效应及其研究进展作了评述.

## 2 低能离子注入单晶 Si 的损伤研究

### 2.1 缺陷的产生和演变

低能离子注入单晶 Si, 经由核弹性碰撞产生的最基本的缺陷是空位-间隙原子对, 它通过一个晶格原子被位移并进入间隙位置而形成. Si 中空位和间隙原子的迁移能很低, 间隙原子在 4 K 以下的温度就可以运动, 空位的退火温度随空位电性的不同而不同<sup>[1,2]</sup>, 一般在 70- 150 K 之间. 通常 n 型 Si 的空位具有双负电性, 而 p 型 Si 的空位则为中性.

虽然空位在室温下不稳定, 但空位可在迁移过程中与杂质原子结合, 形成室温下稳定的空位-杂质原子复合体, 如 V+P, V+O, V+As 等<sup>[1,2]</sup>. 同样间隙原子也可和杂质原子形成室温下稳定的复合体. 双空位(V+V)是 Si 中室温附近重要的缺陷,

\* 收稿日期: 2000-04-19

\* 基金项目: 中国科学院“九五”重点项目(KJ952-S1-423); 国家自然科学基金资助项目(19775058)

作者简介: 刘昌龙(1967-), 男(汉族), 江苏南京人, 博士, 从事固体材料的快重离子效应研究.

它可由两个单空位结合形成,也可在移位级联中直接产生. 由于双空位的退火温度在室温以上,约为  $550\text{ K}^{[1,5]}$ ,因而它是室温下离子辐照产生的主要缺陷之一. 空位间以及间隙原子间还会发生团聚效应,形成更大更稳定的缺陷团.

## 2.2 非晶化转变

在一定的辐照剂量和靶温度下,辐照还会导致单晶 Si 发生非晶化转变<sup>[1,2]</sup>. 研究发现,低能离子注入单晶 Si,产生的非晶化转变不仅与入射离子的质量、能量和注入剂量有关,而且还依赖于剂量率以及靶片的温度. 一般来说,离子越重、剂量率越高和靶片的温度越低,则产生非晶化转变所需要的临界剂量越低. 例如,在  $300\text{ K}$  时 B 离子和 Ar 离子辐照产生非晶化转变的临界剂量分别为  $8 \times 10^{15}$  和  $4 \times 10^{14}\text{ ions/cm}^2$ ,而在  $200\text{ K}$  时相应的值分别为  $1 \times 10^{15}$  和  $1.6 \times 10^{14}\text{ ions/cm}^2$ .

关于单晶 Si 中离子诱发的非晶化转变过程的理论模型主要有热峰模型和位移峰模型. 位移峰模型认为<sup>[6]</sup>,离子注入时,离子与靶原子间的核弹性碰撞导致了致密的原子位移级联,在局部产生了浓度很高的缺陷,从而使得晶体结构自动地瓦解而变成非晶态. 热峰模型则认为<sup>[7]</sup>,离子通过级联碰撞损失能量,在极短的时间里将大量能量沉积在围绕离子路径的狭窄区域,致使材料局部熔化,即引起了热峰,在热峰的急速消散过程中,无序运动的原子被冻结而形成了一个相对稳定的无序相. 非晶 Si 的退火与其所处的环境有关<sup>[1]</sup>,孤立非晶 Si 的退火需要在  $600\text{ }^\circ\text{C}$  以上的温度下进行,而处在单晶 Si 中的非晶区域的退火则可在较低的温度下发生.

## 2.3 主要分析测试技术

揭示离子注入单晶 Si 缺陷产生的属性及其变化规律有多种合适的分析手段,如电子顺磁共振 (EPR)、沟道卢瑟福背散射、红外光吸收、正电子寿命谱和深能级瞬态谱等测量技术. EPR 谱仪适用于研究固体中具有不成对电子的结构,应用该技术可识别离子注入单晶 Si 产生的双空位 ( $V+V$ )<sup>[5]</sup>、中性四空位 ( $\text{Si-P}_3$  心)<sup>[8]</sup> 和带负电荷的平面五空位 ( $\text{Si-P}_1$  心)<sup>[9]</sup> 等多种空位型缺陷的微观结构. 图 1 给出了由 EPR 技术测量分析得到的单晶 Si 中双空位的微观结构示意图. Si 中双空位由两个未被占据的最近邻空位 A 和 B 组成,每个空位被 3 个 Si 原子

所包裹,它们分别为原子 1-6. 同时, EPR 技术对辐照在 Si 中引起的非晶化转变也十分敏感,非晶 Si 在 EPR 谱上贡献一条对称的、洛仑兹型的共振吸收线,其共振  $g$  因子具有各向同性的特征,大小约为  $2.0058 \pm 0.0002$ .

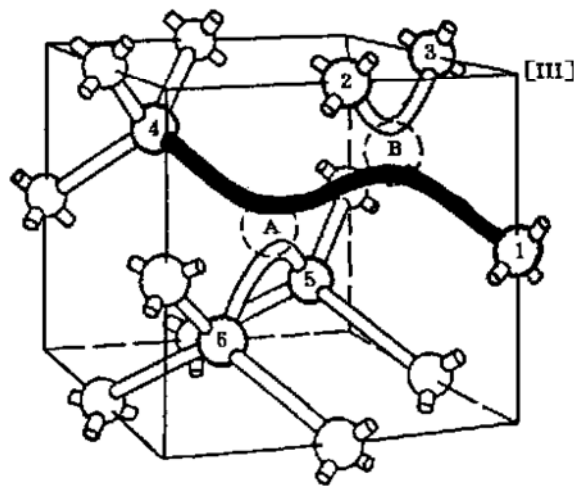


图 1 由 EPR 技术测量分析得到的双空位的晶相结构

红外光吸收技术对单晶 Si 中的双空位、空位-杂质原子复合体等缺陷十分敏感<sup>[10]</sup>. 特定的缺陷会在红外光谱中引起特征吸收带,通过对这些吸收带进行定量分析并结合电测量手段,不但可以得到各种缺陷的含量,而且还可以给出缺陷在半导体能带结构中的能级位置. 此外,红外光谱还能反映 Si 中大的空位团、间隙子团和非晶层等缺陷,这些缺陷在光谱图中会引起一个宽的吸收带,即近边吸收带. 近边吸收带的强度与这些缺陷的浓度相关,缺陷浓度越高,近边吸收带的强度越大.

正电子寿命谱测量技术对空位型缺陷特别敏感,它在金属材料的缺陷研究中已得到广泛的应用<sup>[11]</sup>. 缺陷中正电子的寿命反映了缺陷的尺寸,而由缺陷对正电子的捕获率可得知缺陷的浓度. 在半导体材料中,正电子寿命谱测量技术的应用有它特殊的一面,这主要是由于在半导体中缺陷具有电性. 负电性和中性的缺陷对正电子有捕获作用,而正电性的缺陷对正电子则有排斥作用. 因此,即使是同样的缺陷,由于电性的不同,其对正电子的特征捕获率也将会不同<sup>[12]</sup>.

沟道背散射技术适合于分析单晶 Si 中非晶层的形成和再结晶过程<sup>[13,14]</sup>. 由该技术可以较为精确地测定离子辐照单晶 Si 发生非晶化转变的临界剂量和非晶层的厚度,除此之外它还能对晶格中的杂质原子进行定位.

### 3 快重离子辐照单晶 Si 引起的效应

对于低能离子注入, 由于单个离子通过电子阻止方式沉积在靶电子系统中的能量较少, 因而此时电子能损不会在单晶 Si 中产生明显的损伤. 然而, 在快重离子辐照下, 单个离子沉积在靶电子系统中的能量非常高, 其能损大于  $10 \text{ MeV}/\mu\text{m}$ , 它可以导致沿离子路径一定区域中的靶原子发生集体电离和激发. 单晶 Si 在这种集体电离和激发下是否稳定, 是近 10 年来人们非常感兴趣的问题.

Toulemonde 和 Bogdanski 等<sup>[15-18]</sup> 采用 GeV 能量的 Ar, Ke, Xe 和 U 离子对 n 型掺杂 Si 进行了辐照, 相应的电子能损值( $dE/dX$ )。覆盖了很宽的范围, 从几  $\text{MeV}/\mu\text{m}$  到几十  $\text{MeV}/\mu\text{m}$ . 通过在线电阻测量以及深能级瞬态谱等技术对辐照损伤的测量发现, 在上述很宽的电子能损范围内, 辐照产生的缺陷和电子辐照产生的缺陷类似, 主要为简单的缺陷, 未观测到潜径迹形成和非晶化转化的迹象, 并且和电子辐照实验相比, 其缺陷的引入率几乎相同. 由于缺陷的数量完全可以由核能损过程得到解释, 他们因此认为  $28 \text{ MeV}/\mu\text{m}$  以下的电子能损对单晶 Si 中缺陷的产生没有贡献. Mangiagalli 等<sup>[19]</sup> 最近对  $5.2 \text{ GeV}$  Kr 离子、 $1.5 \text{ MeV}$  电子和  $1 \text{ MeV}$  中子辐照较纯的单晶 Si 样品产生的损伤进行了比较, 发现虽然 3 种粒子辐照产生均为相同的点缺陷, 但 Kr 离子辐照时缺陷的产生率明显高于中子和电子, 他们根据以往的工作排除了电子能损产生损伤的可能性, 而用移位级联中能量密度的不同解释了上述差异, 即当沉积在移位级联中的能量密度增加时, 晶格原子的移位能将降低. 这个观点尚有待进一步证实.

Varichenko 等<sup>[20, 21]</sup> 分别用  $13.6 \text{ MeV}$  B 离子和  $5.68 \text{ GeV}$  Xe 离子在室温下对 n 型单晶 Si 进行了注入辐照, 通过对辐照样品的扩展电阻、红外光吸收、电子自旋共振以及 X 射线衍射的测量和分析, 他们认为虽然电子能损不直接参与产生缺陷, 但它对由核能损过程产生的缺陷有调制的作用. 由于未在高剂量下观测到 Si 的非晶化转变, 他们因此认为晶格原子的集体电离会改变初始缺陷之间的相互作用, 从而使材料的非晶化过程受到抑制. 此外, 在这些实验中研究人员还注意到, 辐照产生的缺陷可以分布到远大于离子射程的区域, 并且这些缺陷的

数量随辐照剂量的增大而增加(见图 2), 类似的现象在  $335 \text{ MeV}$  Ni 离子辐照单晶 Si 的实验也曾出现过<sup>[22]</sup>. 这种超越射程的缺陷分布既不能用传统的沟道效应和缺陷扩散机制(如辐照增强扩散等)解释, 也不能由核反应产物的次级辐照说明. 这是由于,

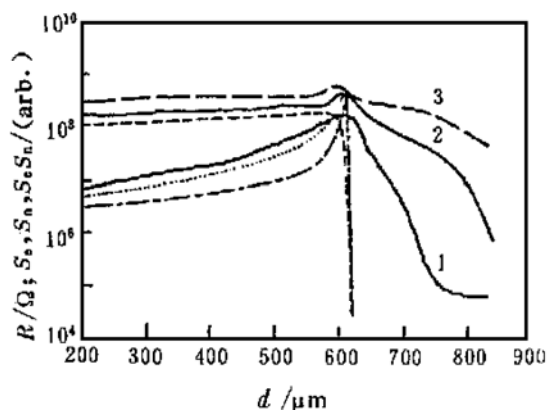


图 2  $5.68 \text{ GeV}$  Xe 离子室温辐照 Si 的电阻的深度分布随剂量的变化<sup>[21]</sup>(曲线 1, 2, 3 分别表示剂量为  $5 \times 10^{11}$ ,  $5 \times 10^{12}$  和  $5 \times 10^{13} \text{ Xe}/\text{cm}^2$ )  
- - 和 — 分别为计算得到的核能损  $S_n$  和电子能损  $S_e$ , ... 为核能损和电子能损的乘积  $S_n S_e$ .

一方面离子辐照产生的缺陷会破坏 Si 晶格的周期性, 从而阻塞离子的沟道, 使高剂量辐照时超越射程分布的缺陷数量饱和; 另一方面, 尽管快重离子辐照 Si 靶可以诱发核反应发生, 但核反应截面很低, 产生的次级核辐射的强度比离子辐照强度低 3 个数量级, 因此, 次级核辐射不可能在超越射程区域产生高密度的缺陷. 除此之外, 由离子电荷态的统计涨落也不能完全解释该现象<sup>[23]</sup>.

为了解释上述实验现象, Zaitsev 等<sup>[22]</sup> 提出了一种新的模型, 即离子径迹沟道模型. 该模型假设在快重离子辐照 Si 的过程中沿离子路径产生了缺陷的富集区域. 由于这些缺陷主要是空位型缺陷, 因此, 该区域的密度要低于原始的晶态材料的密度, 当随后的离子从这些区域中穿过时, 由于低的原子密度, 碰撞发生的几率明显减小, 从而离子可以穿行更长的距离, 并在超越射程的地方产生缺陷. 运用该模型可以对实验结果进行较好的解释. 不过, 迄今为止, 尚无快重离子在单晶 Si 中产生潜径迹的实验证据.

为了进一步研究在电子能损起主导作用的能区重离子在单晶 Si 中产生损伤的规律, 我们利用兰州重离子加速器(HIRFL)提供的  $112$  和  $750 \text{ MeV}$  的

Ar 离子分别在 50 K 和室温下对高纯单晶 Si 样品进行了注入辐照<sup>[24-27]</sup>, 辐照剂量在  $9 \times 10^{13} - 8 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 之间, 通过采用 EPR, 红外光吸收以及正电子寿命谱测量等分析手段, 并结合高温退火、化学腐蚀减薄等技术对电子能损和核能损作用区域中辐照产生的缺陷及其随剂量的变化进行了研究. 研究发现, 对于 112 MeV 的 Ar 离子低温注入辐照<sup>[24-26]</sup>的情况, 在电子能损作用区域中, 辐照在单晶 Si 中产生的缺陷主要是双空位和中性四空位等简单的空位型缺陷, 而且双空位是最主要的缺陷. 定量分析结果表明, 双空位的浓度随照射剂量的增加而增加, 并在  $4.0 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 以上的剂量趋向饱和(见图 3). 在核弹性碰撞作用区域内(指离子射程末端区域), 观察到了非晶区域和连续非晶层的形成, 并确定出晶态向非晶态转变的临界剂量在  $1.8 \times 10^{14} - 4.0 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 之间. 这个临界剂量值比低能 Ar 离子辐照实验<sup>[2]</sup>的明显要大.

对于 750 MeV 的 Ar 离子室温辐照<sup>[30,31]</sup>的情况, 在所研究的剂量范围, 观察到的缺陷主要是中性双空位和中性四空位等简单的空位型缺陷, 在最高辐照剂量下未观测到有非晶化转变的迹象, 并且

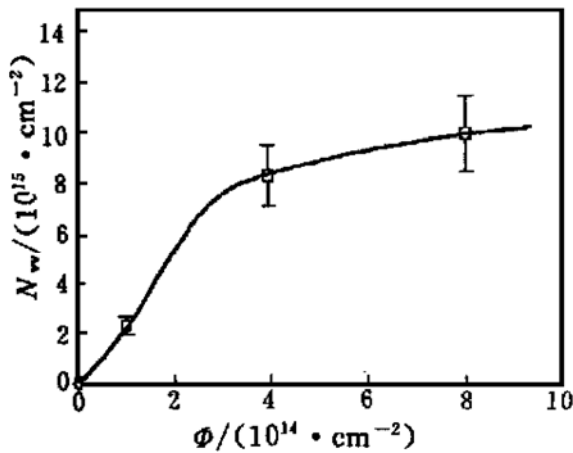


图 3 112 MeV Ar 离子辐照单晶 Si 由红外光吸收测量到的双空位浓度随剂量变化

缺陷主要分布在离子射程末端, 显然这些缺陷是由核弹性碰撞产生的. 进一步分析表明, 在电子能损作用区域中, 在较低的照射剂量下双空位的产生就已达到稳定. 这些结果表明, 在电子能损为主的作用区域中, Si 中缺陷的产生不能无限制地增加, 它会在一定的辐照剂量下趋向饱和. 也许正是由于这个原因使得在所涉及的能损范围里电子能损过程不能使 Si 非晶化. 虽然尚没有直接的证据说明强电子

激发电离对核能损产生的非晶化转变过程有抑制作用, 但 Abe 等<sup>[28]</sup>的研究结果能间接说明这种作用存在的可能性. 他们在用 Kr 和 Xe 等重离子与电子同时辐照单晶 Si 实验中发现, 重离子辐照产生的非晶化转变过程确实会因电子的辐照而受到抑制.

图 4 给出了 112 MeV Ar 离子低温辐照单晶 Si 到  $8 \times 10^{14}$  Ar/cm<sup>2</sup> 剂量时样品的等时退火 EPR 谱<sup>[28]</sup>. 从图中可以看到: (1) 退火导致了小的空位团逐渐转化为大的空位团, 如中性四空位(Si-P<sub>3</sub>心) → 平面五空位(Si-P<sub>1</sub>心) → 包含多个空位的空位

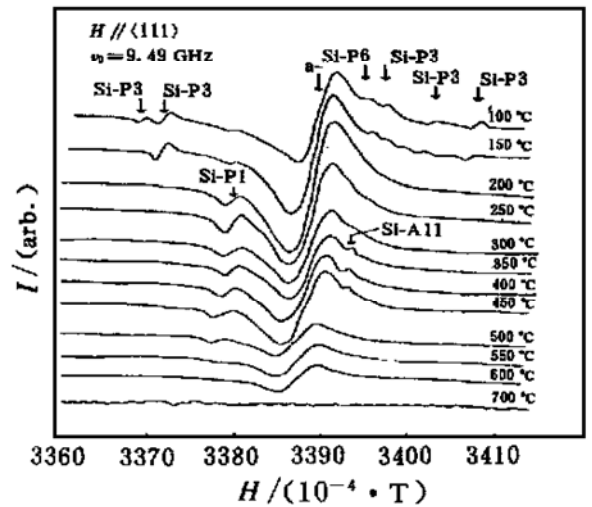


图 4 112 MeV Ar 离子辐照单晶 Si 到  $8 \times 10^{14}$  Ar/cm<sup>2</sup> 辐照量时产生的缺陷的等时退火 EPR 谱

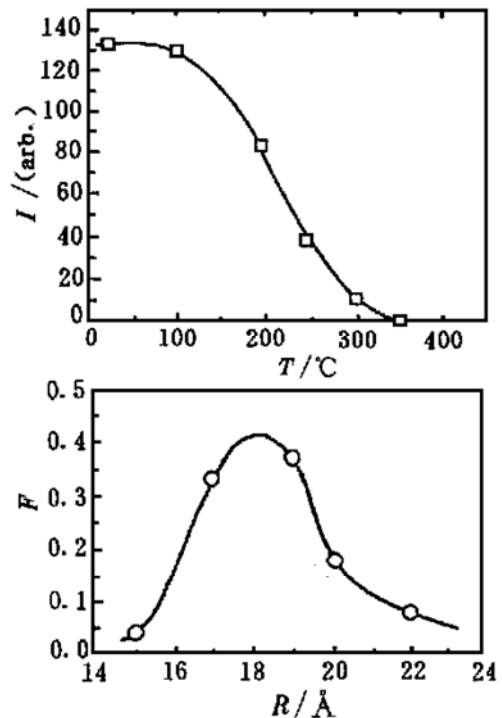


图 5 低剂量 Ar 离子辐照单晶 Si 引起的孤立非晶区域共振吸收线的强度  $I$  随退火温度  $T$  的变化(a) 和非晶区域半径  $R$  的分布(b)

团(Si-A<sub>11</sub>心); (2) 非晶层的退火通过层层晶化直至最终消失. 这与低能离子注入产生缺陷的退火和非晶层的再结晶过程基本一致<sup>[13]</sup>. 低剂量 Ar 离子辐照在 Si 中产生的是孤立的非晶区域, 根据非晶区域 EPR 共振吸收线的强度  $I$  随退火温度  $T$  的变化 (见图 5(a)) 可知<sup>[29]</sup>, 这些非晶区域的半径主要分布在 16–22 Å 之间 (见图 5(b)).

## 4 结论和展望

综上所述, 离子辐照单晶 Si 通过原子核碰撞、靶电子激发等过程可以诱发明显的损伤效应. 就低能离子辐照而言, 核弹性碰撞在单晶 Si 中不仅可以产生双空位、中性四空位以及大的空位团或间隙子团, 而且在一定条件下还会诱发非晶化转变, 并且损伤效应的产生密切依赖于离子的质量、能量和靶温度等多种因素. 对于快重离子辐照, 在高达 28 MeV/ $\mu\text{m}$  的电子能损下未见有潜径迹的形成和非晶化转变, 并且简单缺陷的产生率对电子能损值的大小不敏感. 另外, 通过对具体缺陷——双空位的定量分析发现, 电子能损作用区域中, 双空位的产

生在一定的照射剂量下会趋向饱和, 该结果对于理解为什么在直到 28 MeV/ $\mu\text{m}$  的电子能损不能在 Si 中引起非晶化效应具有一定的意义.

综观该领域的研究工作, 关于低能离子辐照 Si 经由核弹性碰撞引起的损伤及其变化规律已有了较全面的认识, 这些成果为低能离子注入在半导体材料改性和半导体器件工艺中的应用提供了数据和依据. 然而就快重离子辐照单晶 Si 引起的效应及其应用研究而言, 研究工作尚有待进一步的深入. 就在人们普遍认为电子能损不能在单晶 Si 中产生缺陷时, Dunlop 等<sup>[30]</sup> 和 Canut 等<sup>[31]</sup> 于 1998 年在高能 C<sub>60</sub>团簇辐照单晶 Si 的实验中观测到了强电子激发-电离产生的潜径迹. 在该实验中, 他们确定出电子能损在 Si 中产生潜径迹的能损阈值约为 30 MeV/ $\mu\text{m}$ , 并且发现在电镜电子的轰击下潜径迹会迅速消失, 这些新的实验现象尚有待深入的研究. 可以预料, 随着该领域研究工作的不断深入, 人们将会更多地认识和了解 Si 中电子能损过程产生的效应.

## 参 考 文 献:

- [1] James F G. Ion Implantation in Semiconductors—Part II: Damage production and annealing [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1972, 60: 1 062– 1 075.
- [2] James W C, James P K, Tan The Y. Ion-induced Defects in Semiconductors [J]. Nucl Instr & Meth, 1981, 182/183: 457– 476.
- [3] Toulemonde M, Enault N, Jin Y F *et al.* Does Continuous Trail of Damage Appear at the Electronic Stopping Power Damage Range. J Appl Phys, 1990, 68: 1 545– 1 549.
- [4] Hou M D, Klaumunzer S, Schumacher G. Dimensional Changes of Metallic Glasses during Bombardment with Swift Heavy Ions [J]. Phys Rev, 1990, 41(2): 1 144– 1 156.
- [5] Corbett J W, Watkins G D. Silicon Divacancy and Its Direct Production by Electron Irradiation [J]. Phys Rev Lett, 1961, 7 (8): 314– 316.
- [6] Brinkman J A. On the Nature of Radiation Damage in Metals [J]. J Appl Phys, 1954, 25(8): 961– 970.
- [7] Vineyard G H. Thermal Spikes and Activated Processes [J]. Radiat Effs, 1976, 29: 245– 248.
- [8] Lee Y H, Corbett J W. EPR Study of Defects in Neutron-irradiated Silicon: Quenched-in alignment under  $\langle 110 \rangle$ -uniaxial stress [J]. Phys Rev, 1974, B9(10): 4 351– 4 361.
- [9] Lee Y H, Corbett J W. EPR Studies in n-irra. Silicon: A negative charge state of a nonplanar five-vacancy cluster [J]. Phys Rev, 1973, B8(6): 2 810– 2 826.
- [10] Fan H Y, Ramdas A K. Infrared Absorption and Photoconductivity in Irradiated Silicon [J]. J Appl Phys, 1959, 30: 1 127– 1 134.
- [11] Zhu Z Y, Chen K Q, Chen J C *et al.* Positron Lifetime Study of Proton Irradiated Molybdenum [J]. Nucl Instr & Meth, 1991, B61: 72– 76.
- [12] Mascher P, Dannefaer S, Kerr D. Positron Trapping Rates and Their Temperature Dependencies in Electronic-irradiated Silicon [J]. Phys Rev, 1989, 40(17): 11 764– 11 771.
- [13] Mayer J W, Ericksson L, Picraux S T *et al.* Ion Implantation of Silicon and Germanium at Room Temperature: Analysis by means of 1.0 MeV helium ion scattering [J]. Can J Phys, 1968, 46: 663– 673.
- [14] Crowder B L. The Role of Damage in the Annealing Characteristics of Ion Implanted Si [J]. J Electrochem Soc, 1970, 117(5): 671– 674.
- [15] Krynicki J, Toulemonde M, Muller J C *et al.* Electronic

- Properties of Defects Created by 1.6 GeV Argon Ions in Silicon [J]. *Mater Sci Engin*, 1989, B2: 105– 110.
- [16] Toulemonde M, Dural J, Nouet G *et al.* High Energy Heavy Ion Irradiation of Silicon [J]. *Phys Stat Sol*, 1989, 114(a): 467– 473.
- [17] Bogdanski P, Mary P, Toulemonde M *et al.* Stability of Vacancies in Silicon Irradiated by Xenon Ions at 77 K [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1992, B62: 388– 390.
- [18] Mary P, Bogdanski P, Toulemonde M *et al.* Deep-level Transient Spectroscopy Studies of U-irradiated Silicon [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1992, B62: 391– 393.
- [19] Mangiagalli P, Levalois M, Marie P. A Comparative Study of Induced Damage after Irradiation with Swift Heavy Ions, Neutrons and Electrons in Low Doped Silicon [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1998, B146: 317– 322.
- [20] Varichenko V S, Zaitsev A M, Melnikov A A *et al.* Defect Production in Silicon Implanted with 13.6 MeV Boron Ions [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1994, B94: 259– 265.
- [21] Varichenko V S, Zaitsev A M, Kazutchits N M *et al.* Defect Production in Silicon Irradiated with 5.68 GeV Xe Ions [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1996, B107: 268– 272.
- [22] Zaitsev A M, Fedotov S A, Melnikov A A *et al.* Penetration of High Energy Ions in Semiconductors Through Tracks: Simulation with transport equations [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1993, B82: 421– 430.
- [23] Burenkov A F, Komarov F F, Fedotov S A. The Transport Equation Approach for the Simulation of Charge State Fluctuation Effects during Ion Penetration into Solids [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1992, B67: 30– 34.
- [24] Liu C L, Hou M D, Zhu Z Y *et al.* Damage Production in Silicon Irradiated with 112 MeV Ar Ions [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1998, B135: 219– 223.
- [25] 刘昌龙, 侯明东, 程松等. 高剂量 Ar 离子辐照 Si 缺陷产生及其退火行为 EPR 研究 [J]. *高能物理与核物理*, 1998, 22(7): 651– 657.
- [26] 刘昌龙, 侯明东, 程松等. 高能 Ar 离子辐照单晶 Si 引起的损伤研究 [J]. *核技术*, 1998, 21(8): 449– 454.
- [27] Zhu Z Y, Hou M D, Jin Y F *et al.* Defect Production in Silicon Irradiated with 750 MeV Ar Ions [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1998, B135: 260– 264.
- [28] Abe H, Kinoshita C, Okamoto P R, Rehn L E. Effect of Concurrent Irradiation with Electrons on Ion-induced Amorphization in Silicon [J]. *J Nucl Mater*, 1994, 212– 215: 1 081– 1 084.
- [29] 刘昌龙. 高能 Ar 离子辐照单晶 Si 和非晶态合金引起的效应研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 1999.
- [30] Dunlop A, Jaskierowicz G, Della-Negra S. Latent Track Formation in Silicon Irradiated by 30 MeV Fullerenes [J]. *Nucl Instru & Meth*, 1998, B146: 302– 308.
- [31] Canut B, Bonardi N, Ramos S M M *et al.* Latent Tracks Formation in Silicon Single Crystals Irradiated with Fullerenes in the Electronic Regime [J]. *Nucl Instr & Meth*, 1998, B146: 296– 301.

## Radiation Damage in Silicon Induced by Ion Irradiation<sup>\*</sup>

LIU Chang-long, ZHU Zhi-yong, HOU Ming-dong, JIN Yun-fan, WANG Zhi-guang  
(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** The radiation damage in silicon induced by low energy ion implantation was briefly reviewed together with a short introduction to the common techniques in the area. The damage characteristics of swift heavy ion irradiation in silicon and its investigations were introduced with emphasis on the effects induced by processes of electronic energy losses. It is shown that swift heavy ion can induce defects far beyond the projected range and up to 28 MeV/ $\mu\text{m}$  the electronic energy loss has little but not omissible effects on the defect production. The perspectives with the investigations were discussed.

**Key words:** ion irradiation; silicon; radiation damage; electronic energy loss

\* **Foundation item:** Key project of the Chinese Academy of Sciences(KJ952-S1-423) ; NSFC(19775058)