

Si, GaAs 和 LiNbO₃ 单晶的堵塞效应*

陈 昌 魏成连 董玉兰 刘世杰

夏广昌 范景云 王启良 高之纬

(中国科学院高能物理研究所)

提 要

我们利用背散射方法得到 Si, GaAs 和 LiNbO₃ 单晶堵塞图, 以及 GaAs 单晶 {110}, {100} 和 {112} 面堵塞半角 $\psi_{1/2}$ 值. 并得到因离子注入受损伤 Si 片 {110} 面堵塞坑深度随注入剂量增加而变浅的结果. 作为对实验装置和方法的检验, 我们也得到了 Si 单晶堵塞图和测量了 Si 单晶 {110}, {111} 和 {100} 晶面堵塞半角 $\psi_{1/2}$ 值.

一、引 言

当一束准直的具有一定能量的带电粒子束入射到单晶靶上时, 这些粒子将受到晶体格点上原子核的库仑散射. 如果入射离子束平行于晶体的晶面或晶轴(或在临界角 ψ_c 范围之内)入射时, 将观察到从晶体中出射的离子束优先地集中到相应于晶体的晶面延伸方向和晶轴方向上. 这就是所谓单晶的沟道效应, 见图 1(a).

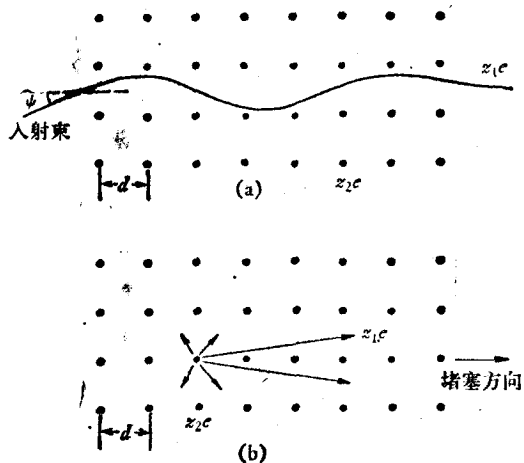


图1 单晶沟道效应(a)和堵塞效应(b)示意图
 d ——晶格常数; z_1e ——入射离子电荷数;
 z_2e ——晶格原子序数

如果在晶格位置上发射离子时, 见图 1(b), 则这些离子在晶面的延伸方向或晶轴的方向上, 将遭受到晶面上或晶轴上邻近的原子核的库仑散射, 从而使其轨迹偏离这个方向. 因此, 在这些方向上我们将观察到这类离子数目的极小值. 这就是所谓单晶的堵塞效应.

卢瑟福背散射的出射离子可以看成是从晶体原子核出发的离子. 如果在靶晶体周围, 放置核乳胶、荧光屏或固体径迹探测器等, 就能观察到出射离子在空

间分布的各向异性. 这种分布图称为单晶堵塞图. 晶轴方向延长与探测器平面的交点即为轴堵塞点; 晶面的延伸与探测器平面的交线即为面堵塞线.

* 1978年5月29日收到.

对能量为 E , 电荷数为 z_1 的粒子, 入射到原子序数为 z_2 的单晶上, 晶面堵塞的临界半角为^[1]

$$\phi_{1/2} = \alpha \left[\frac{2\pi z_1 z_2 e^2 N d_p a}{E} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

其中 N 为晶体中单位体积原子数; d_p 为晶面间距; a 为托马斯-费密屏蔽半径; α 为系数。

对于平面堵塞的最小产额 (minimum yield), 连续模型预言为

$$\chi_{\min}^p = 2\rho_c/d_p \approx 2a/d_p, \quad (2)$$

其中 ρ_c 为临界接近距离。

单晶堵塞效应在核寿命测量、杂质原子的定位及晶体损伤研究中都得到应用。单晶堵塞图可用来确定晶体定向、鉴定晶体结构和观察晶体结构的微小变形等等^[1]。

Si 单晶的沟道和堵塞效应已有广泛研究。我们利用 $\langle 111 \rangle$ 定向的 Si 单晶, 作出了它的质子堵塞图和 α 堵塞图。并测量了 $\{110\}$ 、 $\{111\}$ 和 $\{100\}$ 面堵塞半角 $\phi_{1/2}$ 值, 得到预期的结果。可以作为对我们实验装置和方法的检验。

我们也用 α 粒子和质子作出了 GaAs $\langle 001 \rangle$ 定向的单晶堵塞图。测量了 $\{110\}$ 、 $\{100\}$ 和 $\{112\}$ 面堵塞半角 $\phi_{1/2}$ 值。

LiNbO₃ 单晶曾有人利用 X 射线衍射技术研究了它的结构^[2]。我们现在用质子得出了 LiNbO₃ $\langle 001 \rangle$ 定向的单晶堵塞图。

我们对注入 40 keV ³²P⁺ 离子不同剂量而受损伤的 Si 片作了 $\langle 111 \rangle$ 定向的质子堵塞图。得到了 $\{110\}$ 面堵塞坑深度随注入剂量的增加而变浅的结果。

二、实验装置和方法

实验装置示意图见图 2。质子束和 α 粒子束由静电加速器加速^[3]。加速的离子束经过 90° 偏转的磁分析器和准直系统进入靶室。靶晶体固定在靶室中心的靶杆上。靶杆可以上下移动(图 2 中为垂直纸面方向)以及以靶杆为轴作 ϑ 角转动。固体径迹探测器固定在 L 形铜支架上。铜支架一边有一钽片, 钽片厚 0.15mm, 上开一小孔, 直径 $\phi = 0.5$ mm 和 1.0mm 两种。小孔用来限制束点大小。经 $\phi = 0.5$ mm 小孔限制后, 流强为 10nA 左右。

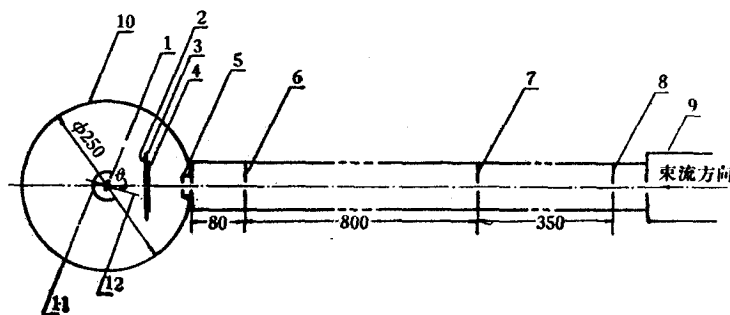


图 2 实验装置示意图

1 为靶晶体; 2 为固体径迹探测器; 3 为 L 形铜支架; 4 为开有 $\phi = 0.5$ mm 小孔的钽片; 5 为反散射孔, $\phi = 6$ mm; 6, 7 为准直孔, $\phi = 2-5$ mm 可调; 8 为磁分析器出口窄缝, 缝宽可调; 9 为磁分析器磁极; 10 为靶室; 11 为液氮冷阱传冷铜圆柱(存液氮容器图中未画出); 12 为靶晶体晶面法线方向

固体径迹探测器面积为 $100 \times 35 \text{ mm}^2$ 。主要成分为硝酸纤维。当它经受质子或 α 粒子轰击后,在 6 克分子浓度的 NaOH 溶液中蚀刻。溶液保持 $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温。经过一定时间后,在质子和 α 粒子打过的地方就留下蚀刻坑^[4]。

靶室真空度为 10^{-6} 托。靶晶体周围加有液氮冷阱。插图中如未加注明,均指加有液氮冷阱。

靶晶体表面先用金刚砂和抛光粉作机械抛光,然后用化学方法作表面腐蚀处理。

面堵塞线密度变化是用显微密度计测量的。

三、实验结果和讨论

1. Si 单晶 $\langle 111 \rangle$ 定向的质子和 α 堵塞图及 $\{110\}$, $\{111\}$ 和 $\{100\}$ 面堵塞半角 $\phi_{1/2}$ 值

图 3 和 5 分别为 Si 单晶 $\langle 111 \rangle$ 定向的质子和 α 堵塞图的照片。图 4 是用显微密度计测量的 Si 单晶 α 堵塞图上 $\{110\}$, $\{111\}$, $\{100\}$ 面堵塞线的密度变化曲线和 Si 单晶质子堵塞图上 $\{110\}$ 面堵塞线的密度变化曲线。堵塞线密度变化曲线横坐标为测量点间距,纵坐标为相对密度 S 。 S 的定义为

$$S = -\log(I_t/I_0), \quad (3)$$

其中 I_0 为显微密度计入射光强度; I_t 为透射光强度。

由堵塞线密度变化曲线计算面堵塞临界半角 $\phi_{1/2}$ 在我们实验装置的几何条件下的计算式为

$$2\phi_{1/2} = \frac{W_{1/2}}{[L^2 + l^2]^{1/2}} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}, \quad (4)$$

其中 $W_{1/2}$ 为面堵塞曲线坑深一半处的全宽度; L 为探测器上束流通过的中心与晶体上束流入射点间距离; l 为探测器上束流通过的中心至显微密度计在堵塞图上测量点的距离。所得结果列于表 1 中。表中同时列出计算的 $\phi_{1/2}$ 值^[1]。

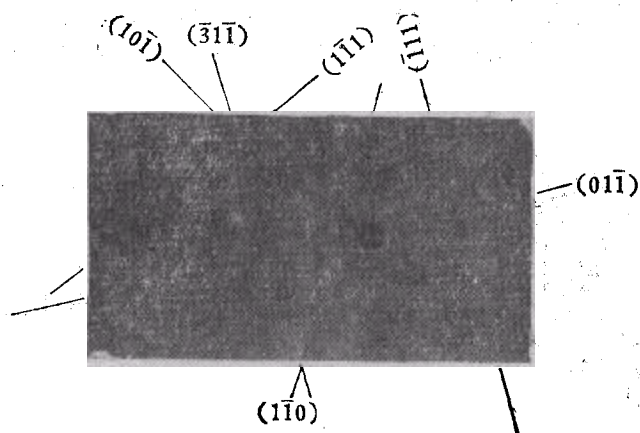


图 3. Si 单晶 $\langle 111 \rangle$ 定向质子堵塞图
入射质子束能量 $E_p = 400 \text{ keV}$, 束点直径 $\phi = 0.5 \text{ mm}$, 靶晶体与探测器距离 $L = 34.5 \text{ mm}$, 束流方向与晶面法线方向夹角 $\vartheta \sim 10^\circ$

2. GaAs 单晶<001>定向 α 堵塞图

图 6 为 GaAs 单晶<001>定向 α 堵塞图。(我们用质子也得到类似图 6 的图。)文献[4]中报道过 GaAs 单晶<111>定向堵塞图。图 7 为 GaAs α 堵塞图上 {110}, {100} 及 {112} 面

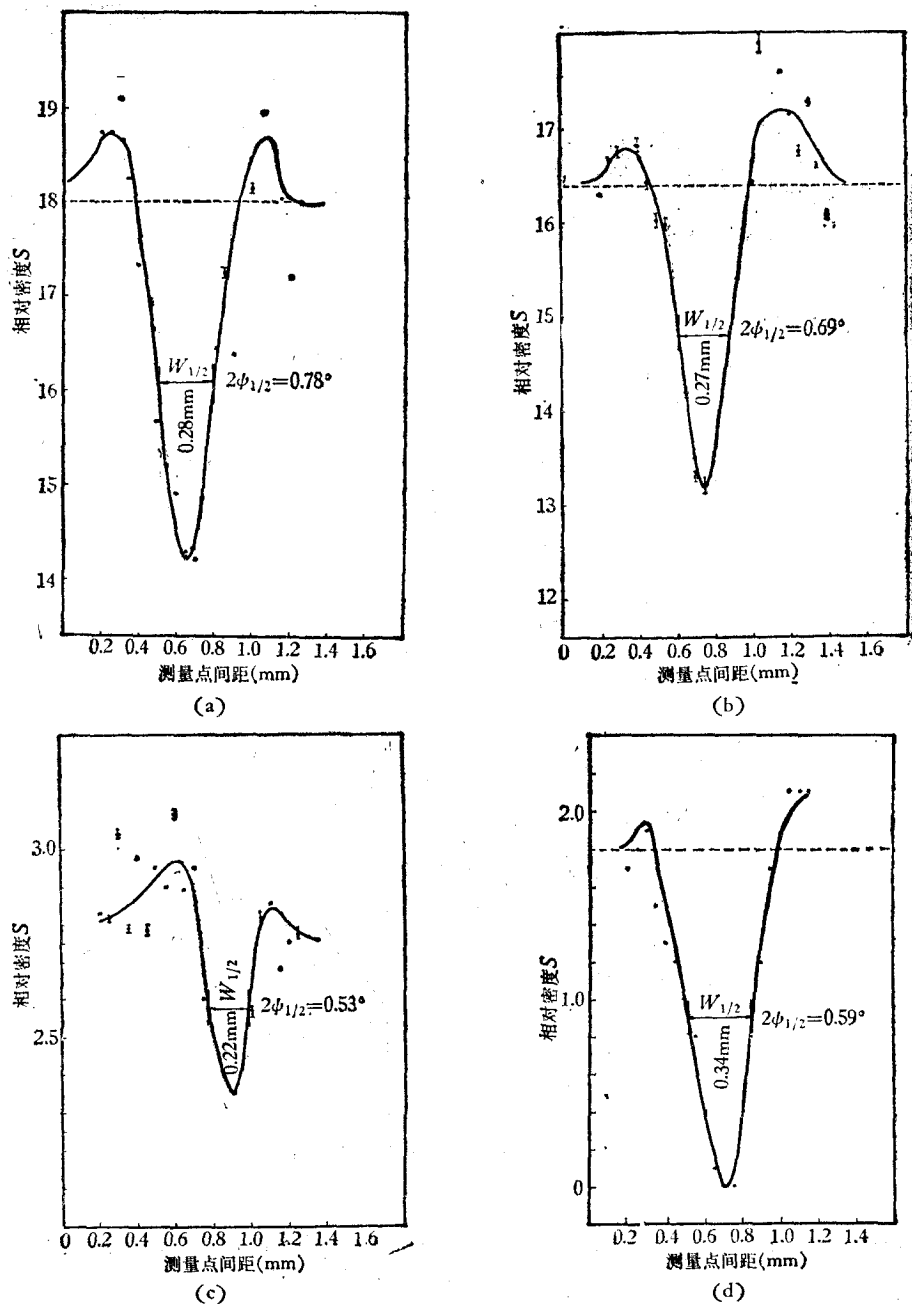


图 4 Si 单晶一些晶面堵塞线密度变化曲线

(a), (b), (c) 分别为 Si 单晶<111>定向 α 堵塞图 {110}, {111} 和 {100} 面堵塞线密度变化曲线; $E_a = 530 \text{ keV}$; $L = 20 \text{ mm}$; $\phi = 0.5 \text{ mm}$, 加液氮冷阱; (d) 为 Si 单晶<111>定向质子堵塞图 {110} 面堵塞线密度变化曲线. $E_p = 350 \text{ keV}$; $L = 33 \text{ mm}$; $\phi = 1 \text{ mm}$, 室温

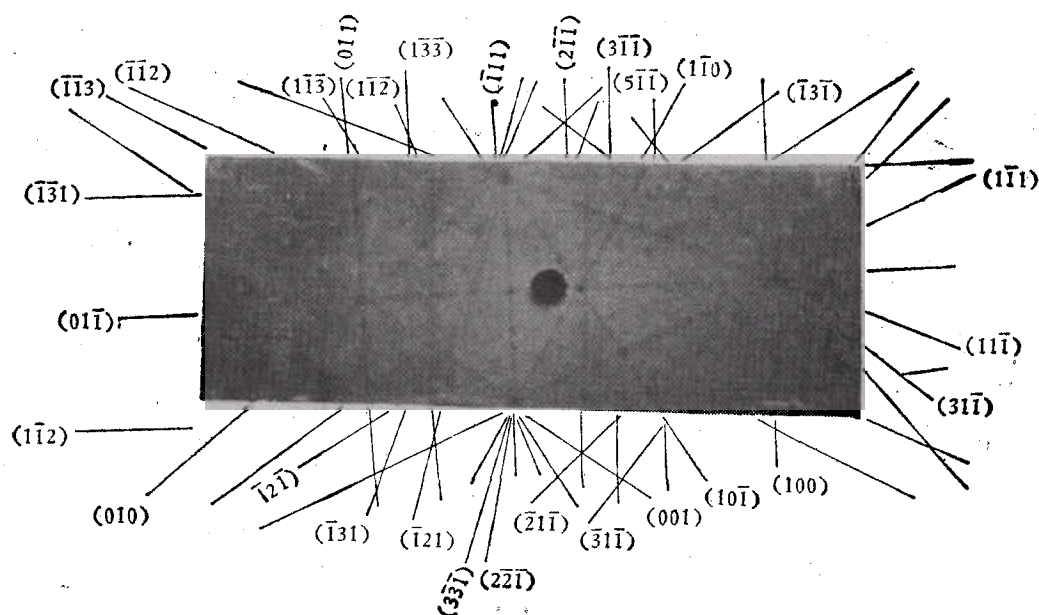


图5 Si单晶 $\langle 111 \rangle$ 定向 α 堵塞图
 $E_x = 530\text{keV}$; $\phi = 0.5\text{mm}$; $L = 20\text{mm}$; $\vartheta \sim 15^\circ$

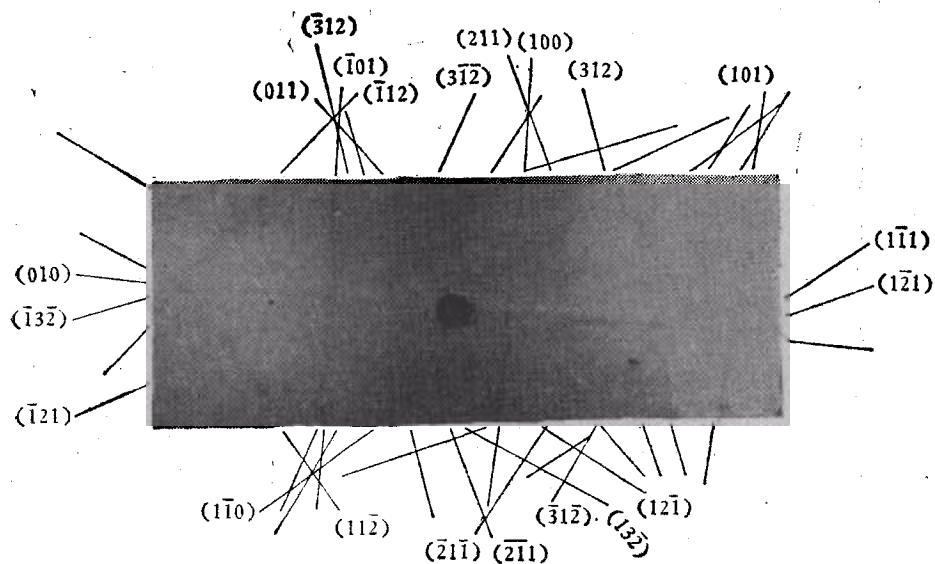


图6 GaAs单晶 $\langle 001 \rangle$ 定向 α 堵塞图
 $E_a = 530\text{keV}$; $\phi = 0.5\text{mm}$; $L = 32\text{mm}$

堵塞线密度变化曲线。由曲线图,利用(4)式得到相应各晶面的 $\phi_{1/2}$ 值,列于表1。文献[6]给出了 $E_\alpha = 0.50\text{MeV}$ 的 $\{110\}$ 面堵塞半角 $\phi_{1/2}$ 值。

3. LiNbO_3 单晶 $\langle 001 \rangle$ 定向质子堵塞图

图 8 为 LiNbO_3 单晶 $\langle 001 \rangle$ 定向的质子堵塞图. 图中心的十二叉交点是 $\langle 001 \rangle$ 轴堵塞

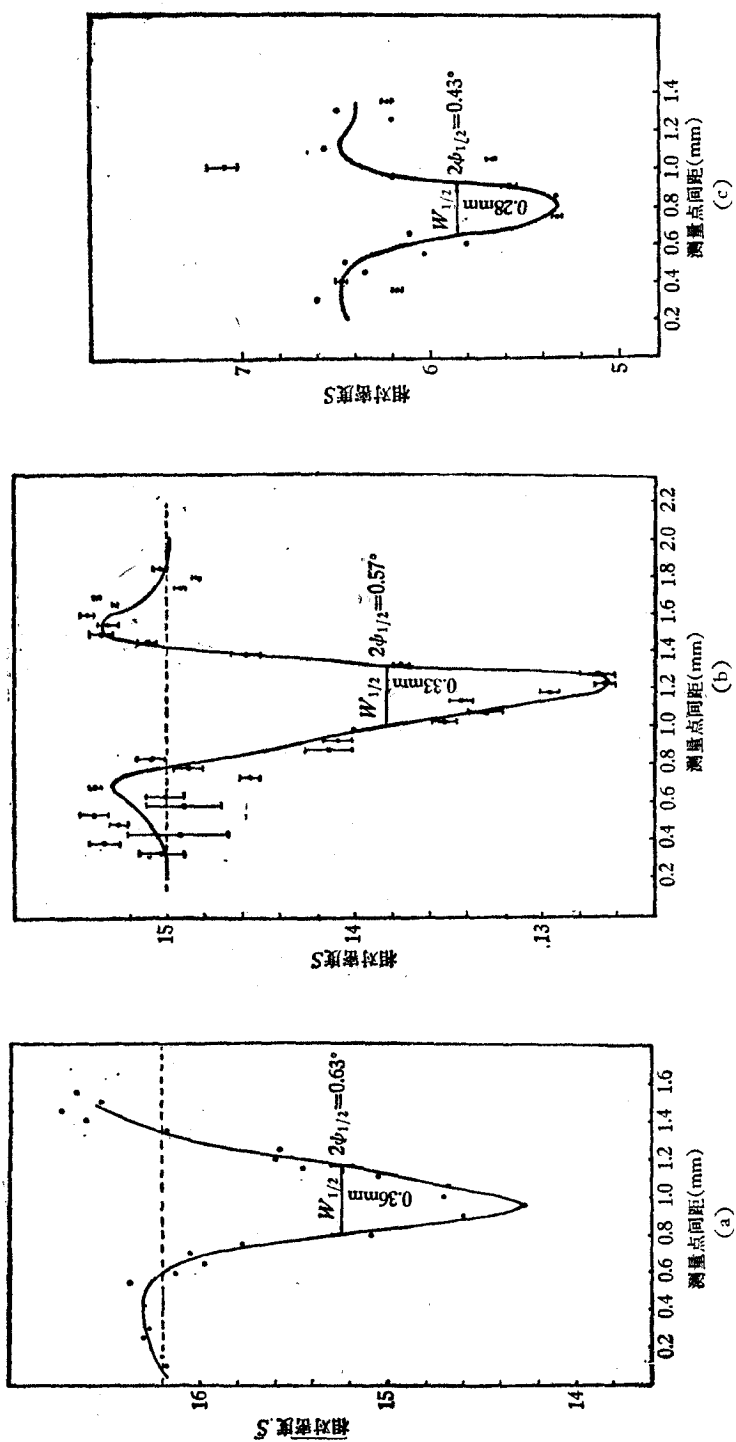


图 7 GaAs 单晶 $\langle 001 \rangle$ 定向 α 堵塞图上 (a) $\{110\}$ 面, (b) $\{100\}$ 面, (c) $\{112\}$ 面堵塞线密度变化曲线 $E_g = 530 \text{ keV}$; $L = 32 \text{ mm}$; $\phi = 0.5 \text{ mm}$

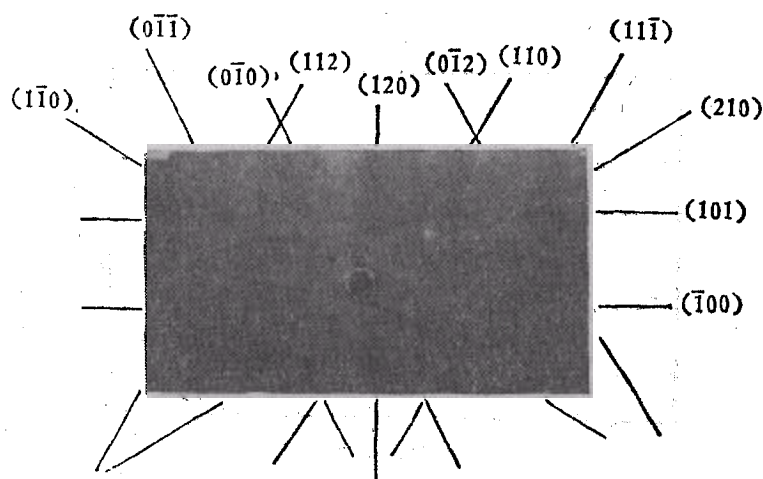


图 8 LiNbO_3 单晶 $\langle 001 \rangle$ 定向质子堵塞图
 $E_p = 400\text{keV}$; $L = 29\text{mm}$; $\phi = 0.5\text{mm}$

点. 因固体径迹探测器面积所限, 没有得到晶胞结构的全貌, 但由所得的图, 结合 X 射线衍射结果, 可以推知 LiNbO_3 具有六角形结构. 我们的密勒指数是按照六角形结构算出的.

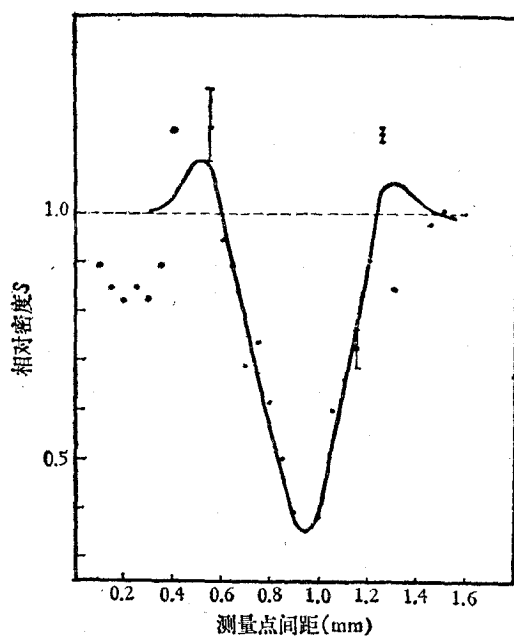
4. Si 单晶 $\langle 111 \rangle$ 定向质子堵塞图 $\{110\}$ 面堵塞坑深度随注入 40keV 的 $^{32}\text{P}^+$ 离子剂量的变化

图 9 分别为无损伤(未注入)的 Si 片、注入剂量为 1×10^{13} , 1×10^{14} 和 1×10^{15} 离子/ cm^2 的 Si 片 $\{110\}$ 面堵塞线密度变化曲线. 我们对图 9 (a), (b)和(c)的曲线, 估计了 $\phi_{1/2}$ 值, 所

表 1 Si, GaAs 单晶的一些晶面的面堵塞半角 $\phi_{1/2}$ 值

粒子	能量 (keV)	靶晶体	晶格常数 $d(\text{\AA})$	晶面	晶面间距	$2\phi_{1/2}$ (度)	计算值 $2\phi_{1/2}$ (度)
$p(z_1 = 1)$	350	Si ($z_2 = 14$)	5.431	$\{110\}$	$\frac{1}{2\sqrt{2}}d$	0.59	0.56
$\alpha(z_1 = 2)$	530	Si	5.431	$\{110\}$	$\frac{1}{2\sqrt{2}}d$	0.78	0.67
α	530	Si	5.431	$\{111\}$	$\frac{d}{4\sqrt{3}}, \frac{\sqrt{3}}{4}d$	0.69	0.57
α	530	Si	5.431	$\{100\}$	$\frac{1}{4}d$	0.53	0.49
α	530	GaAs	5.654	$\{110\}$	$\frac{1}{2\sqrt{2}}d$	0.63 0.66*	
α	530	GaAs	5.654	$\{100\}$	$\frac{1}{4}d$	0.57	
α	530	GaAs	5.654	$\{112\}$	$\frac{\sqrt{6}}{12}d$	0.43	

* 此值为文献[6]的 $E_\alpha = 0.50\text{MeV}$ 的测量值



(a) 未注入的

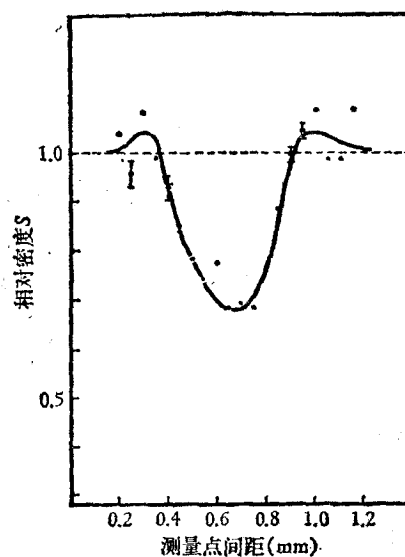
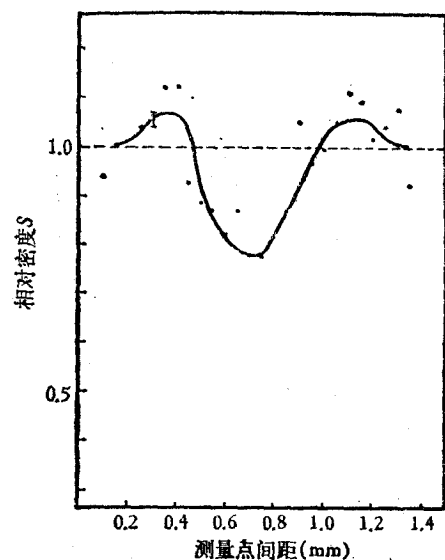
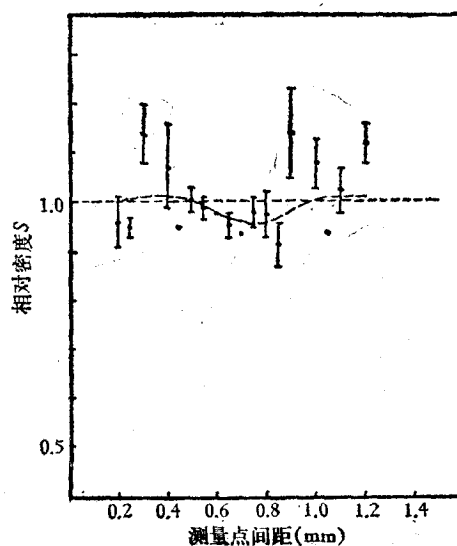
(b) 注入 40keV ³²P⁺ 1×10¹³ 离子/cm²(c) 注入 1×10¹⁴ 离子/cm²(d) 注入 1×10¹⁵ 离子/cm²

图 9 Si 单晶<111>定向质子堵塞图{110}面堵塞坑曲线

表 2 注入 40keV 的 ³²P⁺ 离子的 Si 单晶堵塞图{110}面堵塞坑深度变化

样品(注入剂量, 离子/cm ²)	堵塞坑深度 [$\Delta S = S(1) - S(x_{\min})$]
未注入	0.65
1×10 ¹³	0.30
1×10 ¹⁴	0.23
1×10 ¹⁵	0.04

得 $\phi_{1/2}$ 与预期值相近,表明我们所取的堵塞坑深度值是合理的. 坑深度取 $\Delta S = S(1) - S(\chi_{\min})$. $S(1)$ 为归一化产额处所相应的密度值, $S(\chi_{\min})$ 为最小产额处所相应的密度值. 所得结果列于表 2.

为了对这四个 Si 片堵塞图作比较,我们使它们经受相同剂量质子照射;探测器与靶晶体的几何条件保持不变;在同一蚀刻溶液内蚀刻相同时间;测量点取在离开束流通过孔相近距离处.

由(2)式可知, $\chi_{\min} \sim 1/d_p$. 我们知道,离子轰击 Si, Ge 及 GaAs 这类半导体材料,在很高剂量下,离子注入引起的辐射损伤,是在晶体表面之下形成一层无序的区域. 在这种区域内,晶格原子从它的平衡晶格位置发生位移^[5]. 这些位移原子有的进入沟道中,很自然地会使沟道效应消退,因此同时也会使堵塞现象减弱. $\chi_{\min}$ 就会有所变化. 我们实验

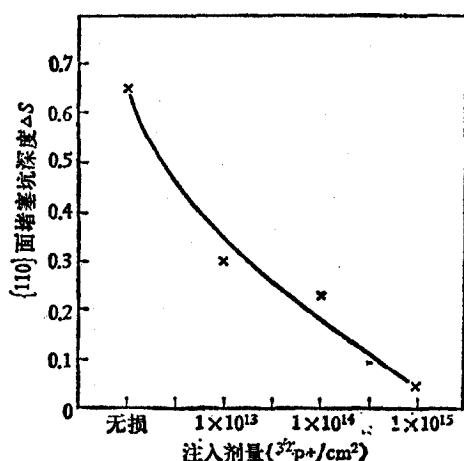


图 10 Si 单晶<111>定向质子堵塞图{110}面堵塞坑深度随离子注入剂量 ($^{32}\text{P}^+$, 40keV) 变化曲线

的结果是,随着 $^{32}\text{P}^+$ (40keV) 离子注入剂量的增加,其堵塞坑深度逐渐变浅. 深度随注入剂量变化的曲线见图 10. 由曲线和堵塞图直观可知,对于以 40keV $^{32}\text{P}^+$ 离子注入 Si 片,当剂量 $> 10^{15}$ 离子/ cm^2 时,晶体成为非晶态. 在堵塞图上,当注入剂量为 1×10^{15} 离子/ cm^2 时,堵塞线已十分模糊,测量结果已不再有明显的堵塞坑,见图 9(d).

综上所述,我们用简单的方法和装置(譬如不用严格准直束流、不用多维转动靶室和过多的电子学仪器等)有效地获得了几种单晶的堵塞图. 由此我们测量了 Si 单晶的 {110}, {111}, {100} 晶面以及 GaAs 单晶 {110}, {100} 和 {112} 晶面的堵塞半角 $\phi_{1/2}$ 的值. 并且观察到了离子注入受损伤的 Si 片

质子堵塞图上 {110} 面堵塞坑深度随注入剂量增加而变浅的结果. 这一结果可以作为观察离子注入引起辐射损伤的一种方法.

叶铭汉同志对本工作进行了指导,实验中得到物理研究所、半导体研究所、化工冶金研究所以及高能物理研究所固体径迹探测器研究小组的帮助,并提供了样品. 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- [1] D. S. Gemmell, *Rev. Mod. Phys.*, **46** (1974), 129; J. Lindhard, *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.*, **34**(4) (1965).
- [2] S. C. Abraham *et al.*, *J. Phys. Chem. Solid*, **27** (1966), 997.
- [3] 叶铭汉等, *物理学报*, **19**(1963), 60.
- [4] D. A. Marsden *et al.*, *Nucl. Instr. Method*, **70** (1969), 291.
- [5] R. S. Nelson, "Channeling", Edited by D. V. Morgan, John Wiley & Sons (1973), Cha IX, p. 259.
- [6] S. T. Pieraux *et al.*, *Phys. Rev.*, **180** (1969), 873.

THE BLOCKING EFFECT OF Si, GaAs AND LiNbO₃ SINGLE CRYSTALS

CHEN CHANG WEI CHENG-LIAN DONG YU-LAIN

LIU SHI-JIE XIA GUANG-CHANG FAN JING-YUN

WANG QI-LIANG GAO ZHI-WEI

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

By making use of the back scattering method Si, GaAs and LiNbO₃ Single Crystal blocking patterns were obtained and GaAs single crystal {110}, {100} and {112} plane blocking halfangle $\psi_{1/2}$ values were estimated. We have found that the depth of the {110} plane blocking dip of Si slice damaged due to ion implanting becomes shallow when implantation dose increases. In order to check the experimental apparatus and the method, we have also obtained Si single crystal blocking pattern and measured the values of Si single crystal {110}, {111} and {100} crystal plane blocking halfangles $\psi_{1/2}$.