

InSb 质子轰击损伤的隔离效应*

赵文琴

(中国科学院上海技术物理研究所)

提 要

本文研究了高能质子对 InSb 轰击所引起的损伤的绝缘隔离效应，并将这一效应用于解决 InSb 红外探测器的光敏面扩大及多元列阵的串音问题。试验是在能量为 40keV—2MeV，剂量为 10^{13} — 10^{14} /厘米²范围内分别在离子注入机或静电加速器中对 InSb 进行室温下的质子注入。用双晶衍射仪、直径为 100 微米的小光点设备、串音的电学法测试及高帧速成象仪上检测了损伤隔离效应。实验结果证明了质子轰击损伤隔离是一种优良的电隔离技术，不仅可用于解决 InSb 红外探测器光敏面扩大及多元列阵探测器的电学串音问题，也是制备平面型器件的优良方法。

一、引言

随着红外仪器的发展，特别是卫星所用红外仪器对探测器的灵敏度提出越来越高的要求。因此，多元列阵探测器必然向高密度、增加元数的方向发展，以提高其灵敏度。而多元列阵探测器的串音大大降低了器件的灵敏度，从而直接影响到红外成象的质量。InSb 光伏型列阵探测器的串音现象是与器件表面状况密切相关的。H. L. Henneke^[1] 报道过不同化学处理所引起的 InSb 表面化学比偏离的现象。K. N. Maffitt 和 R. K. Mueller^[2] 指出在光照下 N 型 InSb 表面存在反型层。我们认为，由于 InSb 表面化学比偏离、表面吸附各种杂质原子或离子或因自由表面悬挂键的存在（特别是 Sb 面）等多种原因都能形成相应的表面能级，当表面能级密度足够大时形成明显的表面势垒能使表面反型。我们提出由于 N 型 InSb 表面耗尽或反型起着导电沟道的作用，或因表面清洗处理不当形成严重表面漏电是引起单元光敏面扩大和多元串音的起因。基于 InSb 材料具有大的吸收系数，因而电串比光串更为重要。而表面存在导电沟道及漏电则是引起 InSb 光伏型探测器电学串音的主要原因。

表面沟道通常可采用隔离的方法解决——即造成沟阻。常用的隔离方法有两种：第一种是在 N 型基片上靠近 PN 结边缘扩散一个 N⁺ 区（即保护环），第二种是在探测器列阵元件间隙采用介质隔离。前者工艺复杂，需要对 InSb 重新摸索形成 N⁺ 层的扩散条件，而且二次扩散往往会引起 P 型扩散区杂质的再分布，而后的困难在于需要制备低界面态密度的高质量高绝缘性能的介质。我们首次提出质子注入所引起的高阻层可以用作 InSb 列阵器件的隔离以解决电学串音问题。在 InSb 中质子轰击作为形成 PN 结的方法曾

* 1980 年 6 月 10 日收到。

被采用过^[3], 但质子损伤隔离用于 InSb 红外探测器的制备在国内外均未有过报道。我们研究了质子轰击损伤在 InSb 中的隔离效应, 并将其用于解决 InSb 多元列阵探测器的串音问题, 大大改善了红外成象质量。亦可作为其他化合物半导体(如 HgCdTe)红外探测器解决光敏面扩大问题的借鉴。

二、原 理

高能质子注入必然引起 InSb 的晶格畸变, 高剂量注入甚至可使 InSb 由单晶变为无定型。因而质子注入损伤可以用作电学隔离。为获得理想隔离首先必须计算出在一定剂量下在 InSb 中质子射程与能量的关系。

1. 质子射程

具有一定初始能量的质子束轰击靶物质必与靶物质相互作用损失其能量而中止。这里主要有两种能量损失方式:

(a) 质子与靶原子核外的电子的相互作用(即电离损失, 损失的能量主要用作核外电子的激发和电离)。

(b) 质子与靶原子核的库仑相互作用。依照 LSS 理论^[4]入射质子的能量损失与距离的关系可表示为:

$$-\frac{dE}{dX} = N[S_n(E) + S_e(E)]. \quad (1)$$

质子在靶物质中的总射程 R_p 可由下式表示:

$$R_p = \int_0^R dx = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)}. \quad (2)$$

式中 E_0 为入射质子的初始能量。

N 为单位体积中平均的靶原子数。

$S_n(E)$ 、 $S_e(E)$ 分别为核阻止本领和电子阻止本领。

对于化合物半导体, 根据布拉格定则化合物靶对质子的阻止本领应为单质中阻止本领之和, 即

$$S_{InSb} = S_{In} + S_{Sb}. \quad (3)$$

阻止截面与注入能量的关系如图 1 所示。

将(2)式通过数值积分的方法可计算出质子在锑化铟中的射程与能量的关系示于图 2。

由于质子注入在 InSb 中产生晶格损伤使 InSb 表面形成半绝缘层可能成为列阵的理想隔离。

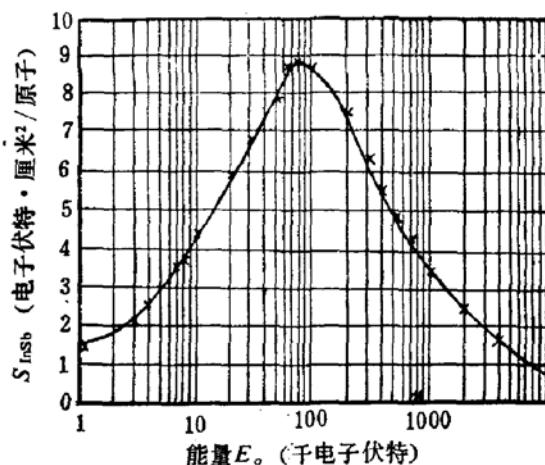


图 1 阻止截面与能量的关系

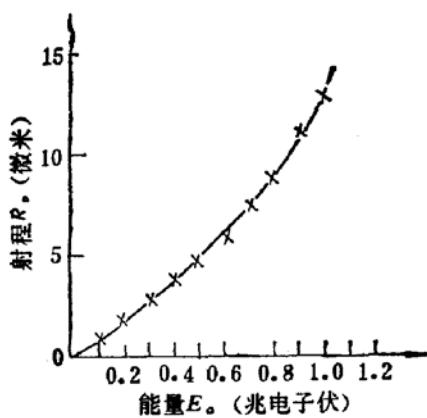


图 2 质子在 InSb 中的射程与能量的关系

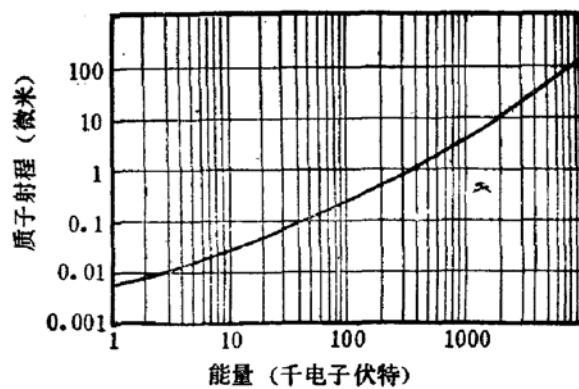


图 3 质子在金中的射程与能量的关系

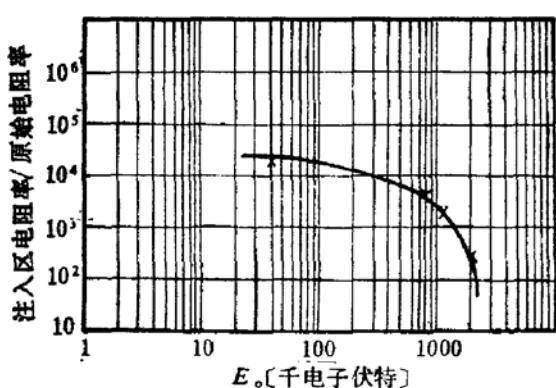
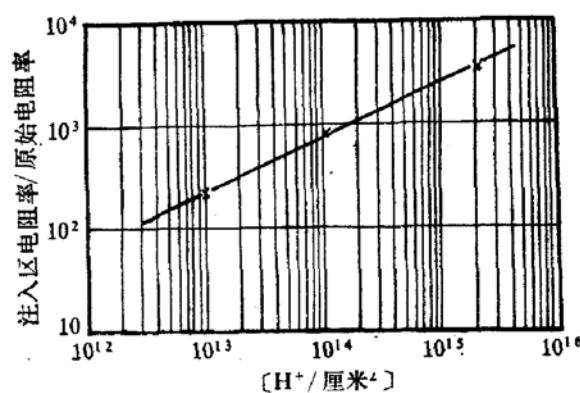
2. 掩蔽问题

质子注入时必须对元件的光敏面进行有效地掩蔽。一般认为透过掩蔽材料的质子数为入射质子的 0.1% 就基本上阻挡住入射质子。图 3 给出了质子在金中的射程与能量的关系^[5]，以供选取金掩蔽膜厚度参阅。另外，像 Sn、In、W 等均可用于掩蔽。

三、实验方法和实验结果

1. InSb 质子轰击层电阻率的变化

蒸发金电极 ($\phi 1$)，焊接金丝引线后用 PZ-8 和 FH5 型欧姆电压转换器测量了 InSb 质子轰击层的电阻率。实验结果表明：InSb 质子轰击层电阻率的变化随注入能量和剂量而异。在相同剂量下 InSb 质子轰击层的电阻率变化随能量增加而减小，如图 4 所示。这是由于高能质子在 InSb 中引起的损伤有一定的分布，低能时损伤层主要在表面，而高能时则损伤的峰值在内部。在相同能量时电阻率变化则随注入剂量的增加而增加。变化范围在 10^2 — 10^4 倍。如图 5 所示。

图 4 质子轰击层电阻率变化与能量的关系
[质子剂量 = $2 \times 10^{15} H^+/\text{厘米}^2$]图 5 质子轰击层电阻率变化与剂量的关系
[能量 $E_0 = 750$ 千电子伏特]

2. InSb 中注入层应变情况检测

采用 X 光双晶衍射仪测量了注入层晶格常数变化，对不同注入能量和剂量的质子和

氦离子注入的N型 InSb 晶片进行了检测。由于质子和离子注入必然引起晶格的畸变，因而注入层的晶格点阵常数与锑化铟基片晶格点阵常数不同，在作摆动曲线时，在基底材料衍射峰旁边出现一个注入层的衍射峰，即衍射卫星，如图 6、7、8 所示。其中图 6、7 为 InSb 质子注入层的衍射谱。图 8 是 InSb 中 He^+ 注入层的双晶衍射谱。测量衍射卫星距主衍射峰的角度漂移 $\Delta\theta$ ，可以求出点阵应变量 ϵ 。

即：

$$\epsilon = \frac{\Delta a}{a} = -\cot \theta \Delta\theta. \quad (4)$$

式中 θ ——布拉格角

$\Delta\theta$ ——偏离角

a ——基底材料点阵常数（对 InSb $a = 6.478 \text{ \AA}$ ）

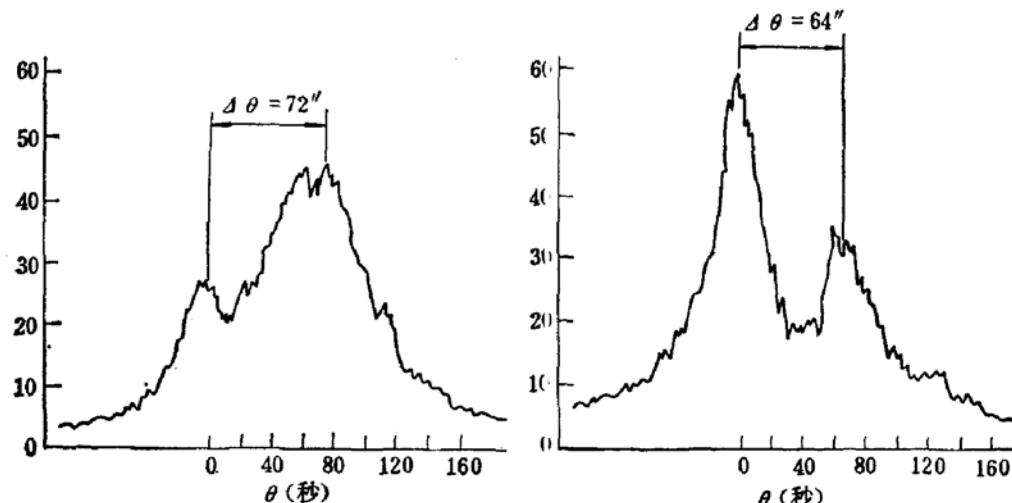


图 6 InSb 注 H^+ 的双晶衍射谱

能量 165 千电子伏
剂量 $5 \times 10^{16} \text{ H}^+/\text{厘米}^2$

图 7 InSb 注 H^+ 的双晶衍射谱

能量 55 千电子伏
剂量 $2 \times 10^{15} \text{ H}^+/\text{厘米}^2$

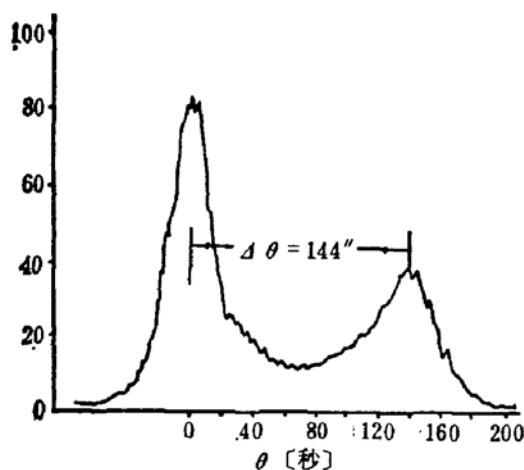


图 8 InSb 注 He^+ 的双晶衍射谱

能量 55 千电子伏
剂量 $2 \times 10^{15} \text{ He}^+/\text{厘米}^2$

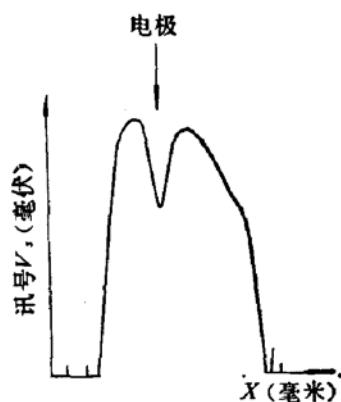


图 9 单元质子隔离器件光讯号

分布图(放大 10.4 倍)

表 1

No.	类 别	E_0 (千电子伏)	剂量(厘米 $^{-2}$)	$\Delta\theta$	δ	Δa (埃)
1	H $^+$	165	5×10^{15}	72"	0.06385	0.414
2	H $^+$	55	2×10^{15}	64"	0.05676	0.3677
3	He $^+$	55	2×10^{15}	144"	0.1277	0.8273

其测试结果示于表 1。由表 1 可以看出：质子低能 (55keV) 注入时，注入剂量为 2×10^{15} H $^+$ /厘米 2 时的应变情况与在能量为 165 keV、剂量为 5×10^{15} H $^+$ /厘米 2 注入时相接近。这是由于能量高时注入深度增加，故虽剂量增加了但应变量仅比低能时稍大。而同样能量和注入剂量时注入 He $^+$ 则比注入 H $^+$ 应变量大一倍多。

3. 从探测器光响应分布看质子的隔离效应

采用能量为 500keV—1.2MeV、剂量为 2×10^{15} — 1×10^{16} H $^+$ /厘米 2 、束流 $< 3\mu\text{A}$ 制备了 InSb 单元质子隔离红外探测器。其峰值探测率 $D_k^* = 4 \times 10^{10}$ 厘米·赫 $^{\frac{1}{2}}$ /瓦。探测器的噪声接近理论值。其量子效率达到 0.45。

在小光点设备上检测了质子隔离效应(光点直径 100 微米)。用小光点对光敏面一维扫描，用 2305 记录仪记录了探测器光敏面上光响应分布情况，示于图 9。图中给出了元件 No. 2-4 的光敏面上光响应分布情况。元件电极位于光敏面中间，计入小光点尺寸，单元质子隔离器件径向扩大为 4.5%，而光敏面扩大则为 0.2%，均在实验误差范围之内。这一结果充分证明：质子隔离可严格限定有效光敏面，隔离效果显著。

4. 串音的电学法测试检测质子隔离效应

我们利用线性电路的分析方法测试并计算了多元列阵探测器每一元的结电阻、每元与相邻元之间的漏电阻以及彼此之间的串音系数^[6]。从这一参数出发计算了串音列阵的探测率与无串音列阵的探测率的差别。对质子隔离和未经隔离的列阵特性做了测试比较。测试结果如下：

(a) 列阵元件的漏电阻

对光敏面积为 9×10^{-3} 厘米 2 ，间距为 60 微米，阻抗范围从几百欧姆到 250 千欧姆的多元列阵探测器测量了相邻光敏元之间的漏电阻。结果表明未经隔离的列阵相邻光敏元的漏电阻为几百欧姆到几千欧姆数量级，而质子隔离的列阵光敏元之间的漏电阻则不小于 10 兆欧姆。可见，隔离效果良好。

(b) 串音系数

定义为未受光照的器件的讯号与受到光照器件的讯号的百分比，它表征列阵器件串音的程度。

$$\alpha_{ij} = \frac{V_i}{V_j} \times 100\%. \quad (5)$$

其中 α_{ij} ——串音系数。

V_i ——受光照元件 i 的讯号电压。

V_i ——在 V_i 作用下第 i 个未受光照元件的两端所产生的讯号电压。用电学法测得的串音系数列于表 2。

表 2 列阵探测器的串音系数表

元件 No. 类别 \ 元件 No.	1	2	3	4	5	6	7	8
未隔离器件	100%	67.1%	48.4%	45.2%	31.2%	28%	26.2%	23%
质子隔离器件	100%	<1%	~0	~0	~0	~0	~0	~0

由表 2 可知: 第二个光敏元(相对第一个光敏元)的电学串音系数在未经隔离的列阵中高达 67.1%，而在质子隔离的列阵中则小于 1%，即在测试仪器误差范围之内。

(c) 串音列阵和无串音列阵的探测率的差别

多元列阵探测器中串音现象的存在使得在测量某一光敏元的讯号时, 相邻光敏元则同时接受红外辐射所产生的讯号在一定程度上对它有贡献。这种现象随光敏元间距的减小而加剧。因而必然导致串音列阵的黑体探测率较无串音列阵的探测率偏高的假象。有时甚至大大超过理论值。这种列阵器件用于红外成象则使图象模糊不清, 因而串音列阵的探测率看来似乎很高, 但不能代表该列阵的真实性能。测量表明: 当列阵光敏元之间距为 60 微米时未经隔离的串音列阵的探测率较质子隔离无串音列阵的探测率甚至大 4—5 倍。这证明了未经隔离的 InSb 光伏型探测器串音的严重程度。而质子隔离可消除这一假象。这说明质子隔离效果是很显著的。

5. 用高帧速成象仪检测质子注入对列阵探测器的隔离效应

在高帧速成象仪上进一步检测了 8 元列阵探测器的隔离情况。即在距成象仪 2 米处安置一可见光源, 光点经聚焦后入射到光敏面上(光点小于光敏面尺寸)测量相邻光敏元的讯号, 用 SBM-10 多路示波器观察了脉冲讯号幅度。测量结果表明: 经质子隔离的器件的串音系数为 1.7~3.76%。这一系数是计人了光串和电串两种效应。由于入射小光点质量尚不够理想, 故这一系数是偏高些, 与质子注入以前串音系数高达 67% 相比较, 可以清楚地说明电学串音比光串更为重要的假设是切合实际的。此外, 在高帧速成象仪上用 8 元列阵探测器成了象(96 线)。图 10 为未经隔离器件所成的人象。列阵器件的探测率 $D_1^* > 5 \times 10^{10}$ 厘米·赫 $^{\frac{1}{2}}$ /瓦。这说明虽然器件灵敏度相当高, 但由于列阵探测器光敏元之间的串音成象结果连面部轮廓也不清晰。图 11(a)、(b) 是经质子隔离列阵器件[其 D_1^* 较前者低一个数量级]的成象图。其中图 11(a) 为手的热象, 图 11(b) 为人的负象。成象结果表明: InSb 光伏型列阵探测器经质子隔离后红外成象分辨率大大提高, 象的清晰度得到显著改善。目前列阵光敏元数尚少(8 元), 若将元件增加到 32 元, 则本图象即可达到电视清晰度。成象结果证明: 质子隔离效果显著, 解决了 InSb 光伏型列阵探测器的串音问题。

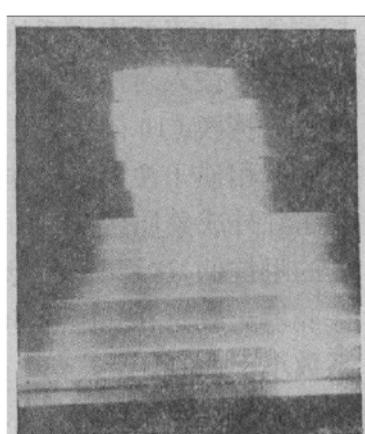
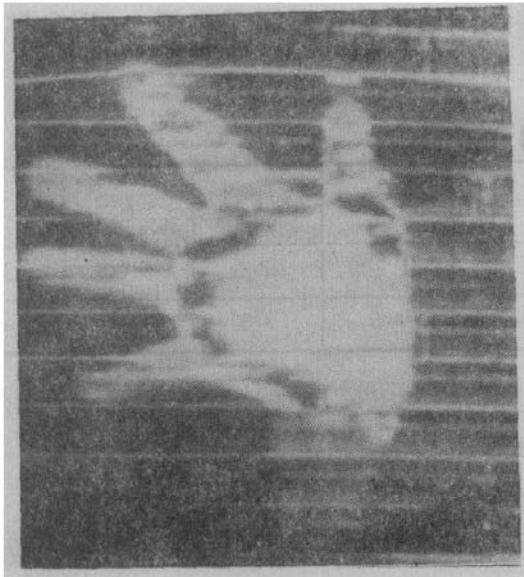


图 10 未经隔离的 8 元
列阵器件成象图



(a) 手的热象(96 线)



(b) 人的负象(96 线)

图 11

四、结果与讨论

1. 对 n 型 InSb 进行了不同能量和不同剂量的质子注入。测得的注入区电阻率变化表明：InSb 的电阻率由原始的 0.09 欧姆·厘米增加到大于 10^3 欧姆·厘米的数量级。一种可能是由于在 InSb 中质子注入在其禁带中引入深能级，其类型是属受主能级，它对 N 型 InSb 起补偿作用，从而使 N 型 InSb 的电阻率显著提高。由于 InSb 是窄禁带半导体，故受主深能级的测定更为复杂，尚待进一步研究。

2. 通过测量质子注入层 InSb 晶格常数变化、注入层电阻率的变化、串音的电学法检测、小光点检测及红外高帧速成象检测了 InSb 中质子损伤的隔离效应。实验结果证明了它是一种优良的电隔离技术。其优点是可以严格地限定探测器的有效光敏面，同时也是在化合物半导体材料上制备平面型器件的好方法。实验中用质子隔离制备了光伏型红外探测器，在表面未增透抗反射膜的情况下其量子效率达到 $\eta \approx 0.45$ ，它接近理论值。这证明质子注入对探测器的量子效率没有不良影响。同时，我们选用合适的金掩膜厚度，确保这一掩膜（10 微米）足以阻挡能量为 55keV 的质子注入。

3. 用质子注入损伤作为隔离彻底解决了 InSb 光伏型探测器列阵的串音问题，大大改善了红外成象质量。测试结果表明，未经隔离的串音列阵元件之间的表面漏电阻比探测器的阻抗低，这说明表面沟道和漏导是引起电学串音的主要原因的假设是切合实际的。当探测器光敏元的间距为 60 微米时，其电学串音系数高达 0.67，而经质子隔离后电学串音系数小于 0.01，计入光串效应后则为 0.017~0.037。这证实了关于电学串音较光串更为重要的假定也是切合实际的。

本工作是在汤定元同志亲自指导下进行的。孙秀英、沈寿珍、胡文年、黄桂娟、王新德及 132 组全体同志参加了有关实验工作。上海冶金所徐景阳、译儒环热情协助进行 X 光双晶衍射测试。复旦大学顾元壮、袁道生、上海冶金所离子注入组，上海科大朱锦良、蔡仁

康热情协助进行质子注入。本所 240 组提供红外成象图。特此致谢。

参 考 文 献

- [1] H. L. Hemmeke, *Journal of Applied Physics*, **36**, 2967(1965).
- [2] K. N. Maffitt and R. K. Mueller, *Journal of Applied Physics*, **35**, 1563(1964).
- [3] A. G. Foyt, *Applied Physics Letter*, **16**, 335—337 (1972).
- [4] J. Linhard, M. Scharff, and H. E. Schiott, *K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat.-Fys. Medd.*, **33**, No. 14(1963).
- [5] H. H. Andersen, and J. F. Ziegien, *Stopping Powers and Ranges in all Elements*, Vol. 3(1977).
- [6] 王新德,工作报告“光伏型探测器列阵串音的电学法测试”。

Isolation Effect of Damage Caused by Proton Bombardment on InSb

Zhao Wenjin

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Isolation effect in InSb due to the damage caused by high energy proton bombardment is studied and applied to the solution for extension of the responsive areas of InSb infrared detectors and the problem of the crosstalk in detector array.

Proton implantation is carried out at room temperature by an ion implantation equipment or an electrostatic accelerator with the energy range from 40keV to 2MeV, and the dose range from 10^{13} to $10^{16}/\text{cm}^2$. The damage isolation effect has been studied by use of the double crystal diffractometer, the distribution of responsivity by a small light spot with a diameter of 100 μm , the electric measurement of crosstalk, and the frame-rate scanner.

All the results of the tests mentioned above signify that the isolation of proton bombardment is a suitable method for electric isolation technique. It can be used in solving the extension of responsive areas of infrared detectors and the problem of crosstalk in detector array, this method can also be used for developing planner devices.