

MSM 结构 GaAs 探测器的抗辐照性能*

李澄 陈宏芳 吴冲 张永明 许咨宗 乐毅

(中国科技大学近代物理系 合肥 230027)

邵传芬 史常忻

(上海交通大学微电子技术研究所 上海 200030)

摘要 研究一种双金属接触的 GaAs 半导体探测器在 14MeV 中子辐照下的性能. 测量了探测器经过 10^{12} n/cm² 中子辐照剂量后的反向漏电流、电荷收集效率和最小电离粒子能谱, 并且与 ⁶⁰Co 1.25MeV 光子辐照的测量结果相比较. 对中子辐照引起探测器时间性能变化和辐照损伤机制进行了探讨. 并根据实验结果提出了这种双金属接触 GaAs 探测器灵敏层分布的一种假设, 理论计算和实验数据相符合.

关键词 GaAs 半导体 粒子探测器 辐照损伤

1 引言

为了适应高能物理实验的要求, 研制高速、抗辐照能力强的粒子径迹探测器, 近年来, 人们对 GaAs 半导体材料的生长技术和粒子探测性能做了多方面的研究. 与 Si 半导体材料相比 GaAs 半导体材料在物理性质上有许多优点(见表 1), 特别是它的禁带宽度较大, 使得 GaAs 探测器不仅可以工作在室温度条件下, 而且具有较高的抗辐照能力. 许多研究实验结果显示^[1-3], 用 LEC(Liquid Encapsulated Czochralski)方法生长的 SI(半绝缘)——GaAs 材料, 不仅具有良好的粒子探测性能, 而且对 γ 射线有较好的抗辐照损伤能力; 对强子辐照的敏感程度从弱到强依次是中子, 质子和 π 介子; 比 Si 探测器能承受的辐射剂量一般高两个数量级. 砷化镓探测器这一重要特性, 使 GaAs 半导体材料不仅在新的高能对撞物理实验, 而且在航天科技, 核放射性废料检测等方面有着重要的应用前景.

实验中测量了一种双金属接触(Metal-Semiconductor-Metal)的砷化镓半导体晶片(上海交通大学微电子技术研究所研制). 这种材料是在双面抛光的半绝缘砷化镓芯片上一面形成 Cr-Au/GaAs 肖特基势垒, 另一面也蒸发 Cr-Au 层, 晶片厚度 460 μ m, 晶相 $\langle 100 \rangle$. 采用这种晶片结构, 可以省掉在砷化镓背面作欧姆接触, 以及注入正离子, 退火, 背面蒸

1999-02-24 收稿, 1999-04-19 收修改稿

* 国家自然科学基金资助

Au-Ge-Ni 等工艺,有利于制成微条阵列探测器。

表1 GaAs 和 Si 材料的一些物理参数比较(室温 300K)

	GaAs	Si
原子量	144.63	28.09
平均原子序数	32	14
密度(g/cm ³)	5.323	2.328
禁带宽度 E _g (eV)	1.424	1.12
电阻率(Ω·cm)	10 ⁷ —10 ⁹	10 ³ —10 ⁴
电子迁移率(cm ² /V·s)	8500	1350
晶格常数(nm)	0.56533	0.543095
熔点(℃)	1238	1415

表2 给出了实验测量的3个 MSM SI-GaAs 样品的一些基本参数. 有关这种 MSM 结构的砷化镓材料的详细结构和粒子探测性能我们已在本刊发表相关的文章^[4], 本文主要介绍对它的抗辐照性能的进一步测量结果.

表2 实验测量的 GaAs 样品参数

	几何尺寸	电阻率(Ω·cm)	本征厚度	Schottky 类型
样品 1	3×3mm ²	23.24×10 ⁸		双金属接触
样品 2	3×3mm ²	15.23×10 ⁸	460±10μm	Cr(50nm)
样品 3	3×3mm ²	11.86×10 ⁸		Au(200nm)

2 辐照损伤效应

粒子穿过物质损失能量主要通过两种途径:1)与原子中电子相互作用;2)与介质中的核子相互作用,后一种称为非电离能损(NonIonzing Energy Loss,简称 NIEL). 高能粒子由于有很大的速度,其非电离能损与它的电离能损相比小的多. 但是,在通常情况下电离效应造成的半导体材料在结构方面的损伤是可以恢复的,而部分的非电离能损由于原子被彻底摧毁或被完全打出晶格而造成不可恢复. 因此,对于半导体探测器其 NIEL 过程造成辐照损伤比起电离过程对粒子探测性能的影响更加明显.

NIEL 的计算是比较复杂的,其能损可以由下面的公式表示

$$\frac{dE}{dx} = \sum_{Z,A} \int E_r \frac{N}{A'} \frac{d\sigma}{dE_r} L(E_r) dE_r, \quad ,$$

式中 N 为阿佛伽德罗常数, A' 为介质的原子量, $d\sigma/dE_r$ 表示产生能量为 E_r 、原子量(序数) $A(Z)$ 的反冲核的微分截面. 函数 $L(E_r)$ 表示 NIEL 与能量 E_r 的关系. 一般通过实验可以获得不同能量的中子和质子在砷化镓探测器中的 NIEL 数据.

高能粒子对大多数半导体材料的辐照效应可以用相对简单的语言来描述:

1) 粒子通常通过产生空隙原子和空位的方法将能量传递给晶格,并迫使受主原子或施主原子离开它们的位置造成某些缺陷. 对于砷化镓来说这个能量至少为 12eV;

2) 对于半导体来说,大部分原初缺陷是可以自恢复的. 但也有一部分缺陷被杂质原子俘获形成一种复合体而剩下来,或者是由于与化合物半导体中的两种子晶格相互作用而保存下来;

3) 如果最初的缺陷不能完全自恢复的,材料中就会留下损伤的证据. 当剩下的损伤中心是电活性的(例如在禁带中形成了一些能级),就可以在晶片被辐照后观察到辐照的痕迹.

由于砷化镓半导体存在两种子晶格,所以高能粒子和砷化镓晶格的相互作用和 Si 相比要复杂的多. 这两种子晶格受到损伤的几率是一样的,大量的填隙 Ga 原子和 As 原子由此产生,在室温下这两种原子是可以移动的,而在砷化镓中二级缺陷可以由初级缺陷即一种子晶格的填隙原子和另一个子晶格的空位相互作用而产生,换句话说就是产生深能级俘获中心. 例如对载流子俘获起很大作用的 EL2 中心,不过这种 EL2 缺陷和在砷化镓生长过程中产生的 EL2 缺陷性质上还有一些不同,通常它们对 400—500K 温度下的退火不敏感. 辐照引起的这些缺陷将对砷化镓探测器性能造成一定的影响.

3 γ 辐照实验

实验首先测量了 γ 射线辐照对这种砷化镓探测器性能的影响. 使用平均能量为

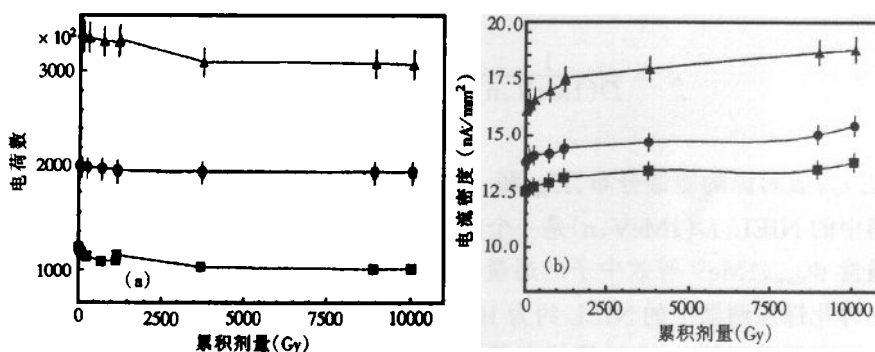


图 1(a)反向漏电流随辐照剂量的变化曲线;(b)信号幅度随辐照剂量的变化曲线
 $\blacksquare U = 40V, \bullet U = 80V, \blacktriangle U = 120V (T = 25^\circ C)$.

1.25MeV 的 ^{60}Co 源(2.2Ci)照射砷化镓探测器(样品 1). 按照事先对辐照剂量场的标定结果,将样品放在距离源 10cm 处,以 100rad/h 的剂量率累积照射 255Gy, 然后移动样品接近源的中心位置,用 1850rad/h 的剂量率累积照射 10^4 Gy, 即 1Mrad. 照射过程中共分 10 次进行.

图 1 (a), (b) 分别是 3 个不同的电压下,探测器测量的 ^{241}Am (5.48MeV) α 粒子的信号幅度和反向漏电流随辐照累积剂量的变化. 从图中可以看出在接近 3500Gy 时输出信号幅度(已经折算成电荷数)的减小已经达到饱和,并且反向漏电流随累积剂量的变化很小.

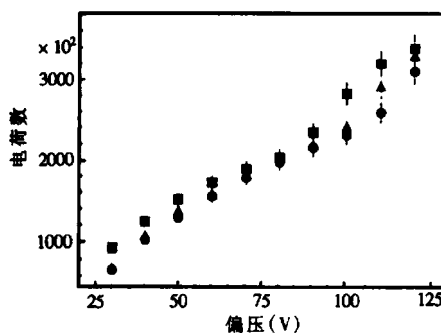


图 2 辐照前后及退火后输出幅度随偏压的变化曲线
 \blacksquare 辐照前, \bullet 辐照后, \blacktriangle 退火后.

图2是辐照前后以及退火后探测器输出幅度随偏压的变化曲线.可以看出当反向偏压大于100V, γ 射线辐照和退火对探测器的信号输出幅度的影响较明显.辐照后将探测器保存在室温下一周,没有发现任何恢复的现象.然后在250℃退火24小时.退火后对信号输出幅度即电荷收集效率有明显的改善,反向漏电流恢复到辐照前的水平.

4 中子辐照实验

使用的中子源是利用高压倍加器产生的14MeV的快中子,其反应为: $T(d, n)^4\text{He}$.选择14MeV的中子是由于在这一能区的中子对砷化镓有最大的NIEL^[5].根据核反应运动学的计算,将样品放在距氘靶一固定方位,并与电流表连接.同时在靶的真空管附近安装了金硅面垒半导体探测器,用于测量伴随 α 粒子以监测中子通量.实验分3次进行照射,累积辐照通量分别为 $1.68 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$, $3.62 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$, $6.54 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$.

为了便于比较,通常把探测器受到的辐照通量转换为1MeV的单能中子的等效辐照通量,并定义探测器的强度因子 κ 为

$$\kappa = \frac{1}{D(1\text{MeV}, n)} \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \varphi(E) D(E) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \varphi(E) dE},$$

其中 $\varphi(E)$ 为放射源的能谱分布, E_{\min} 和 E_{\max} 是放射源两端的截止能量, $D(E)$ 就是沉积在探测器中的NIEL, $D(1\text{MeV}, n)$ 是一个归一化因子,大小等于3.1keV/cm.这样对于测量到的通量 Φ_{meas} , 1MeV等效中子的通量为 $\Phi = \kappa \Phi_{\text{meas}}$.依据NIEL实验数据^[5], 14MeV的中子在砷化镓探测器中的NIEL约为10keV/cm, 计算得到探测器的强度因子约为3, 所以实验中探测器受到的1MeV等效中子辐照剂量为 $5.04 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$, $1.09 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 和 $1.86 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$.

图3(a), (b)分别是样品2和样品3在辐照前后以及两次退火后的信号大小与偏压的关系曲线.图中的两条虚线是探测器经过24小时100℃的退火和24小时250℃的退火

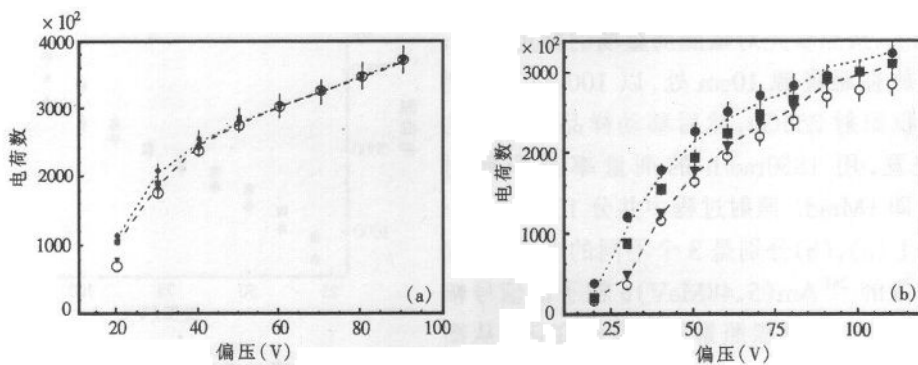


图3 样品3的中子辐照结果

● 辐照前, ■ 第1次辐照, ▼ 第2次辐照, ○ 第3次辐照.

后信号大小的恢复情况。

从图中看出样品3在经受 10^{12} n/cm²的中子辐照后,信号大小几乎没有改变,仅在偏压很低时信号有些变小,两次退火可以使探测性能完全恢复。而样品2对子辐照要敏感一些,信号大小随着辐照剂量的增加依次减小。退火对探测器的性能的改善也是明显的,100℃的退火对探测器的性能有很小的一点恢复,250℃的退火则有较大恢复。

表3是样品2辐照前后反向漏电流随辐照剂量的变化,可以看出反向漏电流随着辐照剂量的增加而增加,但两次退火之后又完全得到了恢复。

表3 辐照前后反向漏电流随辐照剂量的变化(样品2,偏压100V,23℃)

辐照前	5.04×10^{12} n/cm ²	1.09×10^{13} n/cm ²	1.96×10^{13} n/cm ²	100℃退火	250℃退火
172nA	197nA	212nA	218nA	189nA	173nA

5 辐照对探测器输出信号的影响

实验发现3个砷化镓实验样品的输出信号中存在慢上升时间信号,并且中子辐照对探测器输出信号的时间结构有一定的影响。图4给出了样品2在辐照前后的 α 粒子能谱。

图中上方是辐照之前的谱形,作图时将这个谱形向上平移了一点。从能谱中可以明显看出除全能峰外还有一个小峰。将放射源准直后对准探测器的中央,测量的能谱上小峰仍然存在,说明不是由于粒子斜入射或反散射造成。当改变放大器的成形时间,小峰随着成形时间的增加向全能峰靠近,当放大器的成形时间为 $8\mu\text{s}$ 时,两个峰合并。这说明探测器输出信号中存在部分上升时间在几个微秒量级的慢信号。用数字取样示波器直接测量探测器的输出波形,发现除了有毫微秒量级的快脉冲信号外还有很小部分上升时间在 $4\text{--}10\mu\text{s}$ 脉冲信号。通过全能峰面积和小峰面积之比,可以估计这种慢成分占有信号的10.6%。

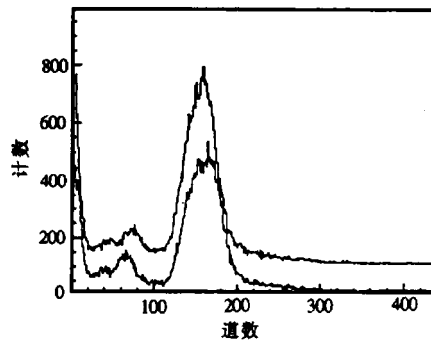


图4 辐照前后的 α 粒子能谱比较
(样品2,偏压50V)

值得注意的是辐照后的能谱的全能峰峰位变化很小的情况下,由于慢信号造成的小峰峰位向后移动了20道,这说明信号的上升时间增大了,并且小峰的峰面积略有增加,也说明探测器的输出的慢信号的比例增加。类似的情况在样品3中也观察到。

6 辐照对电荷收集效率的影响

根据信号幅度的变化可以计算得出辐照后探测器电荷收集效率(*cce*)的变化。考虑到 α 粒子在进入探测器灵敏层之前穿过2mm的空气层200nm的金层和50nm的铬层,按照低能重粒子的能损公式,计算出5.48MeV α 粒子在探测器灵敏区内实际沉积的能量约

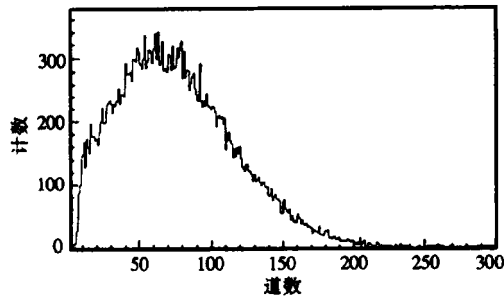


图5 ^{90}Sr 源 β 射线的最小电离粒子谱

为5.2MeV,平均可以产生 1.2×10^6 个电子空穴对. 根据实验测量的数据计算,辐照前探测器对 α 粒子的 cce 约为30%(100V偏压),光子辐照后平均减小了2.8%(样品1),中子辐照后平均减小了4.1%(样品2).

为了进一步检验砷化镓探测器的性能,实验测量了 ^{90}Sr 2.27MeV的 β 射线的最小电离粒子(MIP)的能谱. 图5是探测器偏压在50V时测量得到最小电离粒子谱.

7 有关测量结果的讨论

这种MSM结构的砷化镓半导体探测器在常温下有较好的粒子探测性能. 在经过1MeV等效中子通量 10^{13} n/cm^2 的辐照后,这种砷化镓探测器对 α 粒子的 cce 下降了4.1%,探测器的反向漏电流增加了21%,经过退火(250℃)后探测器性能基本恢复. 累积剂量1Mrad的 γ 光子辐照对探测器性能的影响较小,这是因为低能光子与核发生反应的截面很小,换句话说就是在探测器内的NIEL很小,所以造成的辐照损伤小.

实验证明探测器的输出信号中存在着慢成分使得测量的 α 粒子能谱中存在小峰. 比较全耗尽SI-GaAs探测器在较高的工作电压下不出现小峰,一种观点认为在较低的工作电压下由于探测器未完全耗尽是造成小峰原因^[6],探测器未完全耗尽部分等于并联一对电容和电阻串接在探测器灵敏层对应的电容上. 另一可能是电子的反俘获过程. 由于砷化镓中主要的俘获中心是EL2,它的能级寿命正好在 $10\mu\text{s}$ 附近,这与实验观察到的慢信号的上升时间相近. 如果确是反俘获过程的贡献,中子辐照损伤产生新的EL2缺陷将增加信号中慢成分的比例,实验结果也证明了这一点.

测量结果显示这3个样品虽然有较强的抗辐照能力,但是电荷收集效率较低,特别是对最小电离粒子的 cce . 对于砷化镓材料最小电离粒子的平均能损约为 $560\text{eV}/\mu\text{m}$,在我们所用的探测器内的最大能量沉积为258keV. 通过能谱的峰位及测量系统刻度曲线,我们估算出探测器对最小电离粒子的电荷收集效率小于5%. 同时,最小电离粒子的能谱分布较宽,因此辐照前后最小电离粒子的 cce 变化难以比较.

根据Romo理论,假设入射粒子在探测器内 X_0 处产生的电子空穴对的分布与位置无关,可以推导出电荷收集效率的公式^[7]

$$cce = \frac{1}{sd} \int_0^s \left\{ \int_{x_0}^W \exp\left(\frac{x_0 - x}{\lambda_e}\right) dx - \int_0^{x_0} \exp\left(\frac{x - x_0}{\lambda_h}\right) dx \right\} dx,$$

式中 s 表示入射粒子在探测器灵敏层内的射程, λ_e, λ_h 分别是电子和空穴在电场作用下的平均自由长度.

当整个探测器完全耗尽时,电压平均加在长度为 d 的探测器上,探测器内是匀强电场,即 $E = V/d$. 计算结果见图6中最上方的虚线,实线是只计算了电子的贡献,图中的

方点为实验点(对 α 粒子, 样品 1). 值得注意的是两条曲线很接近说明对 GaAs 探测器电子对输出信号的贡献是主要的. 对于 MSM 结构的 SI-GaAs 探测器, 由于探测器不可能完全耗尽上述理论并不符合. 如果假设探测器的耗尽层厚度 W 随工作电压是线性增加的^[8], 即 $W = W_0 + KV$, 理论计算和实验结果符合较好(见图 6 上的点划线, 计算时取 $W_0 = 30\mu\text{m}$, $K = 1.0\mu\text{m}/\text{V}$). 同时也可以看出, 在相同的工作电压下 MSM 结构比全耗尽结构 GaAs 探测器的电荷收集效率要低的多.

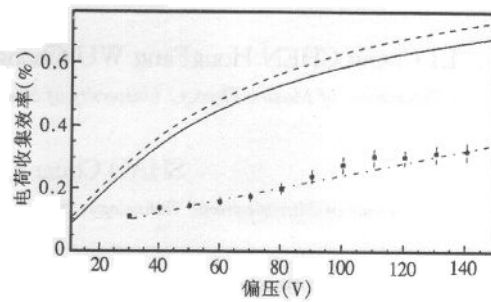


图6 理论计算的电荷收集效率与实验数据的比较

实验中探测器所接受的等效中子辐照剂量接近西欧核子中心(CERN)LHC 实验中的中子辐射背景的年辐照剂量. 测量结果表明: 这种 MSM 结构的 GaAs 半导体材料是一种有希望的适用于常温的抗辐照的粒子探测器.

参考文献(References)

- 1 ATLAS Collaboration. ATLAS Technical Proposal, 1994, CERN/LHCC:71—73
- 2 D'Auria S, Bates R, Da Via C et al. Nucl. Instr and Meth., 1997, **A386**:177—185
- 3 Rogalla M, Böttke M, Duda N et al. Nucl. Instr and Meth., 1998, **A410**:41—45
- 4 LE Yi, LI Cheng, CHEN HongFang et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, **22**(12):1092—1099
(乐毅, 李澄, 陈宏芳等. 高能物理与核物理, 1998, **22**(12):1092—1099)
- 5 Rogalla M, Eich Th et al. Nucl. Instr and Meth., 1997, **A395**:45—53
- 6 Nava F, Alietti M et al. IEEE Trans. On Nucl., Sci., 1996, **143**(3):1130—1136
- 7 Chen J W, Frommichen T, Ludwig J et al. NIM, 1995, **A365**:273—284
- 8 LE Yi. Master Thesis: Study on the Performances of MSM Structure GaAs Detectors (in University of Science and Technology of China), 1998
(乐毅. MSM 结构的砷化镓探测器的性能研究, 中国科技大学硕士论文, 1998)

Radiation Hardness Properties of MSM Structure Gallium Arsenide Detectors

LI Cheng CHEN HongFang WU Chong ZHANG YongMing XU ZiZong LE Yi
(*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

SHAO ChuanFen SHI ChangXin
(*Institute of Microelectronic Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

Abstract Radiation hardness of a particle detector, double metal contact GaAs semiconductors has been investigated in 14 MeV neutron exposure. The leak current, the charge collection efficiency and the spectrum of MIPs are measured after 10^{12} n/cm² dose. The results are compared with ⁶⁰Co 1.25MeV γ photons radiation. The mechanism of radiation damage and the effect on time performances of GaAs detectors are discussed. A hypothesis of the active layer distribution of the GaAs detectors based on experiment data is given. The computation agrees with test results.

Key words GaAs semiconductor, particle detectors, radiation damage

Received 23 February 1999, Revised 19 April 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China