

# 新型 MSM 结构砷化镓半导体 探测器的性能\*

乐毅 李澄 陈宏芳 张永明 汪晓莲 王立刚

(中国科学技术大学近代物理系 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** 研究一种新型双金属接触 GaAs 半导体探测器的性能,测量了  $^{241}\text{Am}$  5.48MeV  $\alpha$  粒子、 $^{57}\text{Co}$  122keV 的光子和  $^{90}\text{Sr}$  2.27MeV  $\beta$  粒子的最小电离粒子谱,比较了一个  $3 \times 3\text{mm}^2$  的 GaAs 芯片在经过  $^{137}\text{Cs}$  662keV 光子约 1300rad 辐照前后的电荷收集效率和能量分辨率. 测量结果显示这种新型金属-半导体-金属 (MSM) 结构的半导体探测器不仅在室温下对各种粒子具有良好的探测能力,而且具有很好的抗辐照性能.

**关键词** MSM 结构 GaAs 半导体 粒子探测器

## 1 引言

砷化镓 (GaAs) 半导体材料的早期研究由于其缺陷多、净杂质浓度大而发展缓慢. 近年来,为了发展用于通讯卫星等空间通讯系统的高速、抗辐照能力强的集成电路,以及适应高能物理实验对快速高计数率的粒子径迹探测器的要求,人们对 GaAs 材料的生长技术进行了大量的研究,如 LEC (Liquid Encapsulated Czochralski) 法,垂直梯度凝结法,垂直区域溶化法,分子束外延法,液相外延法等. 许多研究结果表明<sup>[1-3]</sup>, LEC 方法生长的半绝缘 SI-GaAs 探测器,具有良好的粒子探测性能,已成为可在室温条件下工作的抗辐照能力强的固体径迹探测器.

与常规的 Si 半导体探测器相比 SI-GaAs 探测器具有以下优点:

(1) GaAs 的有效原子序数 (32) 比 Si (14) 要大,对光子的探测效率高. GaAs 比 Si 有更高的肖特基势垒,适合作金属半导体接触的探测器,达到死层小,收集效率高的目的,对最小电离粒子的探测效率较高;

1997-12-15 收稿

\* 国家自然科学基金资助

(2) GaAs 的禁带宽度大 ( $E_g=1.45\text{eV}$ ), 而 Si 的禁带宽度为  $1.12\text{eV}$ . 大的禁带宽度意味着 GaAs 探测器不仅可以工作在较高的温度条件下, 而且具有较高的抗辐照能力, 比 Si 探测器能承受的辐射剂量一般高两个数量级;

(3) GaAs 材料的电阻率一般可达  $10^7\text{--}10^9\Omega\cdot\text{cm}$ , 在较高的偏压下具有较小的反向漏电流, 且高的场强可以补偿 GaAs 的较小的  $\mu\tau$  值 ( $\mu$  为载流子的迁移率,  $\tau$  为载流子的俘获寿命);

(4) 在 GaAs 半导体材料中电子迁移率大约是 Si 半导体中的 6 倍, 所以输出电流脉冲上升时间快;

(5) 由于 GaAs 的高  $Z$  值和高密度 ( $5.32\text{g}/\text{cm}^3$ ), 它的辐射长度约  $2.3\text{cm}$ , 比 Si 小四倍. 此外 GaAs 价格便宜, 可集成在同一芯片上制成高分辨率的位置灵敏探测器阵列.

上述优点使 GaAs 探测器可能在新的高能对撞物理实验, X 射线天文学, 暗物质研究和医学成像方面获得广泛的应用.

## 2 砷化镓探测器的结构

由于不同的接触类型对应于不同的金属-半导体界面的性质和不同的内部电场分布, 进而有不同的灵敏层性质和电荷收集效率, 即不同的接触类型的砷化镓探测器应具有不同的粒子探测性能. 因此寻找一种合适的接触类型(或探测器结构)对粒子探测是非常关键的.

常规砷化镓探测器是在半绝缘砷化镓基片上正面蒸发金属 Al(或 Au 等), 利用金属与半导体接触具有的特性构成肖特基势垒, 另一面用 Ni/Au-Ge/Ni 的欧姆接触, 在做欧姆接触之前注入少量的 Si, 以增加导电能力.

本工作测量的探测器是由上海交通大学微电子技术研究所研制的双金属接触(MSM)的砷化镓半导体晶片. 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, 但在该面经过光刻形成面积为  $3\times 3\text{mm}^2$ ,  $1\times 1\text{mm}^2$ ,  $0.76\times 0.76\text{mm}^2$  四个区域, 其中  $1\times 1\text{mm}^2$  占两个区. 为了降低漏电流, 在器件周围加有  $0.04\text{mm}$  宽, 一定厚度的聚酰亚胺或  $\text{SiO}_2$  的钝化层. 同时, 为了提高反向击穿电压, 消去器件四周直角.

图 1 是这种双金属接触的砷化镓探测器的几何尺寸和结构示意图. 砷化镓材料的电阻率约为  $5\times 10^8\Omega\cdot\text{cm}$ , 晶相  $\langle 100 \rangle$ , 晶片厚度  $460\mu\text{m}$ . 采用上述结构, 不仅省掉在砷化镓

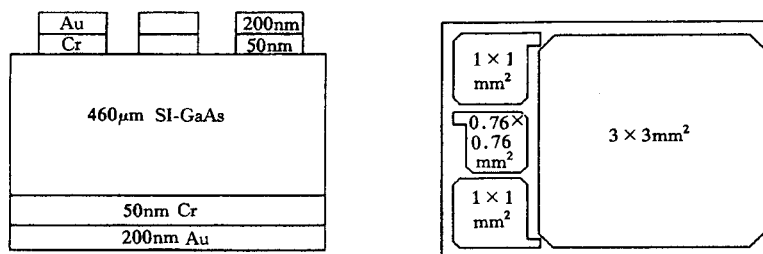


图1 探测器结构示意图

背面作欧姆接触,以及注入正离子,退火,背面蒸 Au-Ge-Ni 等工艺,成品率大大提高,而且由于 Au 与 GaAs 接触有较高的肖特基势垒和较小的反向电流,比常规肖特基-欧姆接触的砷化镓探测器有更好的性能. 当加上工作电压后,两个肖特基结总有一个导通,类似于两个背靠背的二极管,这种结构适合在不同极性的电压下工作.

实验中测量了两个样品的性能,每个样品测量了  $3 \times 3\text{mm}^2$  和  $1 \times 1\text{mm}^2$  的探测器各一个.

### 3 实验装置

测量系统如图 2 所示. 前置放大器采用 ORTEC147A 型低噪声电荷灵敏放大器,接上

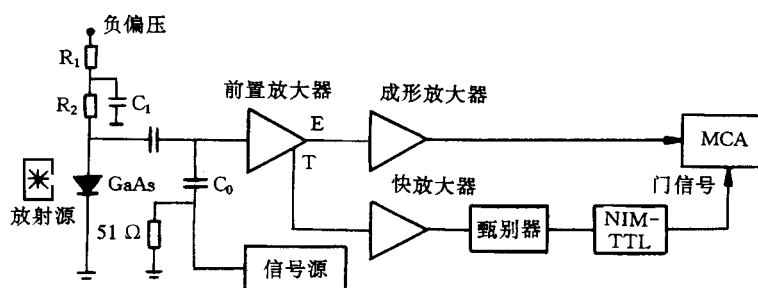


图2 实验装置图

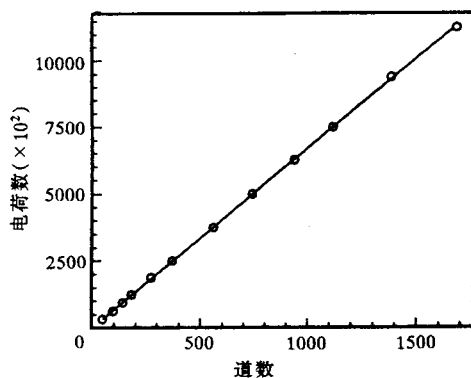


图3 测量系统的刻度曲线

GaAs 探测器后测量系统(成形放大器放大倍数 50, 成形时间  $1\mu\text{s}$ )的等效噪声电荷为 600 电子. 探测器的等效输入电容  $5\text{pF}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  构成直流偏压滤波电路. 同时为了减少测量过程中低频噪声的影响, 利用前放快输出脉冲信号经放大甄别成形后, 作为多道分析器(MCA)的外触发门信号.  $C_0$  为检验电荷, 用脉冲信号发生器(PM5786)对测量系统刻度的结果见图 3. 整个测量过程都在屏蔽室中进行.

## 4 性能测量

### 4.1 反向漏电流

使用微安表测量探测器的反向漏电流随偏压的变化曲线如图 4 所示. 实验结果表明同一样品上  $3 \times 3\text{mm}^2$  探测器反向漏电流比  $1 \times 1\text{mm}^2$  探测器大, 其原因是在偏压较低时反向漏电流主要是体电流(即灵敏区内复合和俘获中心由于本征热激发产生的载流子形成的电流)贡献大, 它与灵敏区体积成正比. 同一样品不同面积探测器的击穿电压不同, 是

由于当电压较高时,探测器反向漏电流主要由表面漏电流贡献,它与制造工艺、表面处理、环境温度和湿度有关,对探测器的击穿电压有较大的影响。

## 4.2 输出信号

利用 Tektronix TDS220 型采样示波器直接测量经电荷灵敏放大器转换后的电压信号,图 5(a)和(b)给出了 GaAs 探测器(样品  $2, 3 \times 3\text{mm}^2$ )测量  $\alpha$  源和  $\beta$  源的脉冲输出波形。结果显示探测器的电荷收集时间在几十毫微秒,其中联接探测器后电荷灵敏放大器自身的脉冲上升时间  $4\text{ns}$ 。由于 GaAs 是一种直接禁带的半导体材料,在直接导带谷中的电子迁移率( $8500\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )比 Si( $1350\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )大,虽然 GaAs 空穴迁移率( $400\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )比 Si( $500\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )要小,但是由于探测器输出信号要由电子贡献,所以输出电流脉冲上升时间快。

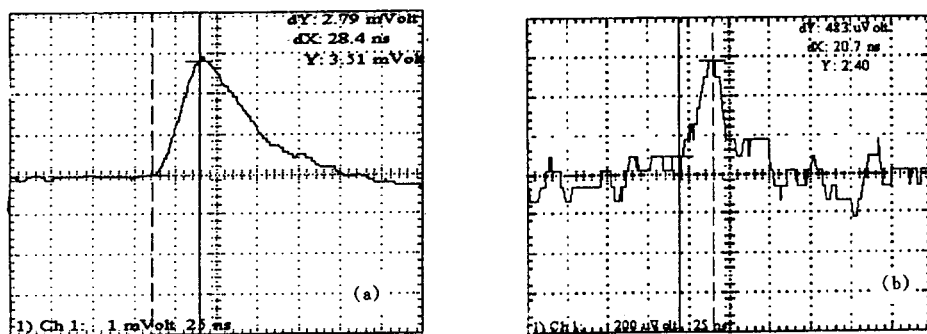


图 5 GaAs 探测器的输出脉冲波形

(a) 5.48MeV  $\alpha$  粒子; (b) 2.27MeV  $\beta$  粒子。

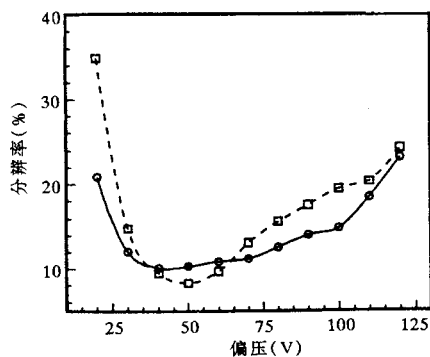


图 6 GaAs 探测器能量分辨率随偏压变化的曲线

○○○样品  $2, 1 \times 1\text{mm}^2$ , □□□样品  $2, 3 \times 3\text{mm}^2$ 。

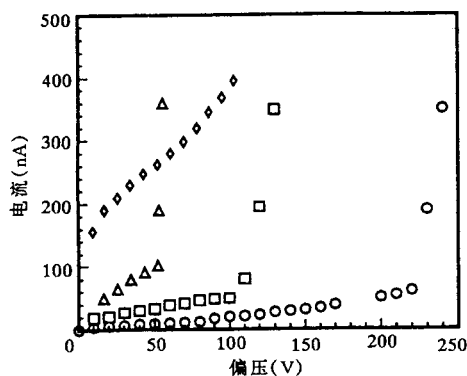


图 4 GaAs 探测器反向漏电流随偏压变化的曲线

◇◇◇样品  $1, 3 \times 3\text{mm}^2$ ; △△△样品  $1, 1 \times 1\text{mm}^2$ ;  
□□□样品  $2, 3 \times 3\text{mm}^2$ ; ○○○样品  $2, 1 \times 1\text{mm}^2$ 。

## 4.3 粒子能谱

实验用  $^{241}\text{Am}$  5.48MeV 的  $\alpha$  源测量了砷化镓探测器在不同偏压下的能谱,图 6 给出了样品 2 探测器能量分辨率随偏压的变化曲线,其中在 45V 偏压下  $3 \times 3\text{mm}^2$  探测器的能量分辨率可以达到 7%(图 7),  $1 \times 1\text{mm}^2$  探测器能量分辨率为 10%(见图 8),小于 20V 时,由于谱形不对称,偏离高斯分布较大,分辨率较差。

随着偏压增大,电荷收集效率提高,分辨率提高,但继续增加偏压,由于反向漏电流增大,分辨率反而变差。

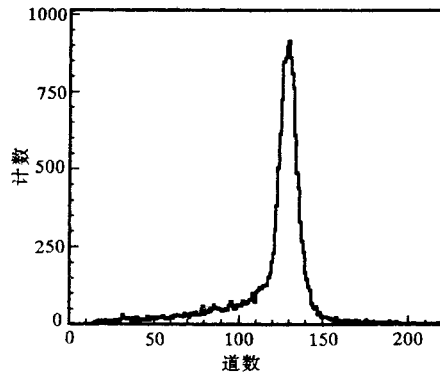


图 7 样品 2 上  $3 \times 3 \text{mm}^2$  探测器的  $\alpha$  粒子能谱  
成形放大器放大倍数 50, 成形时间  $1 \mu\text{s}$ .

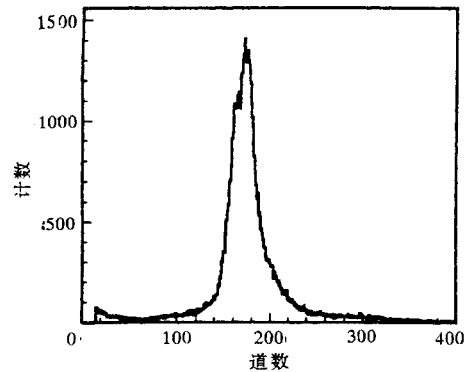


图 8 样品 2 上  $1 \times 1 \text{mm}^2$  探测器的  $\alpha$  粒子能谱  
成形放大器放大倍数 50, 成形时间  $1 \mu\text{s}$ .

造成能谱展宽的主要原因是入射  $\alpha$  粒子在灵敏层中产生电子-空穴对收集过程的涨落. 同时测量过程中, 由于  $\alpha$  粒子入射到探测器灵敏层之前穿过 2mm 的空气层和 200nm 的金层, 60nm 的铬层, 因此  $\alpha$  粒子从不同角度入射时在上述物质层中的能量损失并不相同, 这也造成相同能量的  $\alpha$  粒子在探测器灵敏层中的能量损失涨落.

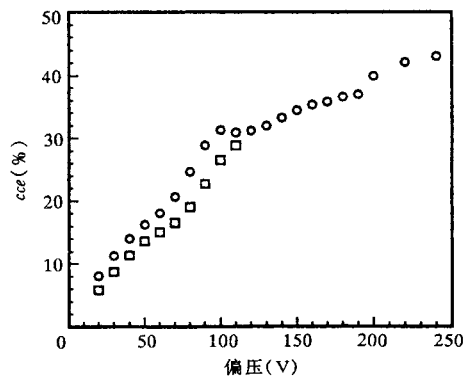


图 9 GaAs 探测器对  $\alpha$  粒子的电荷收集效率  
随偏压变化的曲线  
○○○样品 2,  $1 \times 1 \text{mm}^2$ , □□□样品 2,  $3 \times 3 \text{mm}^2$ .

对 5.48MeV  $\alpha$  粒子的电荷收集效率 (cce) 测量结果见图 9. 电荷收集效率最大可达到 45%. 由于半导体中存在着复合和俘获两种过程影响电荷的收集, 在 PN 结中, 自由载流子在灵敏区内的大量减少限制了复合过程, 所以导致 cce 减小的主要原因是俘获过程, 只有当载流子的俘获长度比探测器的灵敏区厚度大时, 才能获得有效的电荷收集. GaAs 材料中载流子寿命较短, 电子和空穴的寿命小于 20ns, 所以尽管 GaAs 的载流子迁移率较高, 但电荷损失还是比较大的. 理论上入射粒子在 GaAs 探测器内部  $\bar{x}$  处产生的  $N(\bar{x})$  个电子-空穴对在电场的作用下能被收集到的电荷为<sup>[4]</sup>

$$Q = \frac{qN}{d} \left\{ \int_{\bar{x}}^d \exp \left[ - \int_{\bar{x}}^x \frac{dx'}{\mu_e \tau_e E(x')} \right] dx + \int_0^{\bar{x}} \exp \left[ - \int_x^{\bar{x}} \frac{dx'}{\mu_h \tau_h E(x')} \right] dx \right\},$$

其中  $\mu_e$ 、 $\mu_h$  分别为电子和空穴的迁移率,  $\tau_e$ 、 $\tau_h$  分别为电子和空穴的平均寿命,  $E(x')$  为探测器内  $x'$  处的电场强度,  $d$  为探测器的厚度,  $q$  为电子电荷. 可见电荷收集效率与探测器灵敏层内的电场强度和电场分布有很大的关系, 实验结果显示  $\alpha$  粒子的电荷收集效率随偏压的增大而增大, 反映了内部电场对电荷收集效率的影响, 所测量的两个样品的最大反向偏压可达 250V, 仍未达到完全收集入射粒子产生的电子-空穴对所需的电压.

实验测量了  $^{90}\text{Sr}$  源的  $\beta$  粒子谱. 在 GaAs 探测器前后各加一个塑料闪烁探测器, 用它

们产生的信号与 GaAs 探测器信号符合作为多道分析器的触发信号, 获得了明显的最小电离粒子谱(见图 10).

实验还测量了  $^{57}\text{Co}$  122keV 的 X 射线能谱(见图 11), 其能谱的能量分辨率约为 30%.

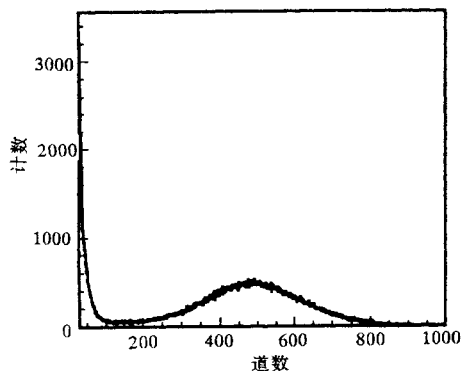


图 10  $^{90}\text{Sr}$  2.27MeV  $\beta$  粒子最小电离粒子谱  
成形放大器放大倍数 1000, 成形时间  $1\mu\text{s}$ .

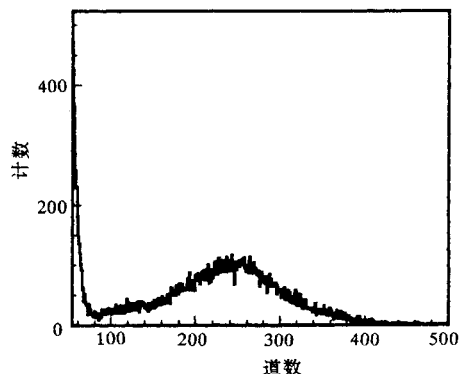


图 11  $^{57}\text{Co}$  122keV 的 X 射线能谱  
成形放大器放大倍数 500, 成形时间  $1\mu\text{s}$ .

#### 4.4 抗辐照性能测量

实验对样品 1 进行了抗辐照性能的测量. 辐照源为  $^{137}\text{Cs}$  662keV 的光子, 累积辐照剂量为 1300rad(4rad/h). 辐照后测量了该样品 ( $3 \times 3\text{mm}^2$  探测器) 的反向漏电流、 $\alpha$  粒子的能谱和能量分辨率, 并与辐照前进行比较(见图 12, 图 13, 图 14). 从图中可以看出辐照前后  $\alpha$  粒子的能谱峰位几乎没有变化, 说明在这样的累积剂量下, 辐照并没有明显改变 GaAs 探测器的电荷收集效率. 通常辐照会在半导体材料中产生一定数量的电子俘获中心, 它们会减小载流子的俘获寿命  $\tau$ , 从而影响探测器的电荷收集效率. 辐照后能谱峰位没有发生变化也说明了 1300rad 的光子辐照并不能显著增加 GaAs 探测器中的电子俘获中心.

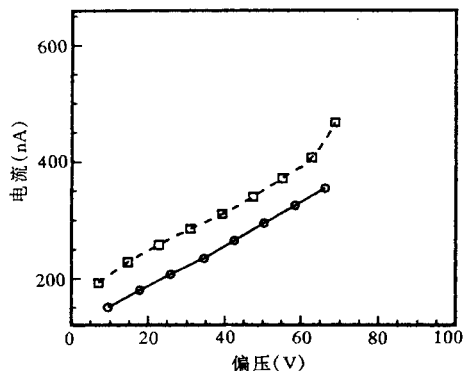


图 12 辐照前后 GaAs 探测器反向漏电流  
的比较

实线为辐照前, 虚线为辐照后的结果.

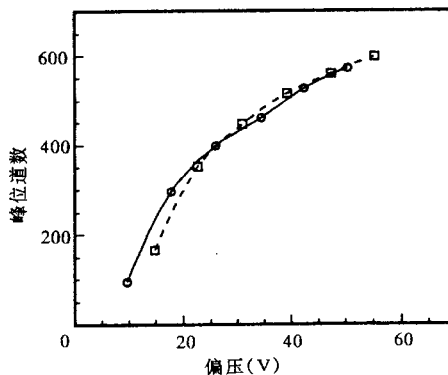


图 13 辐照前后 GaAs 探测器  $\alpha$  粒子能谱  
峰位的比较

实线为辐照前, 虚线为辐照后的结果.

上海交通大学微电子技术研究所研究人员用 1.5MeV、剂量为 1000kGy 的电子对同类

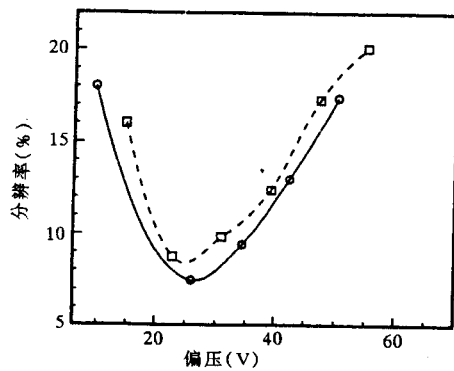


图14 辐照前后GaAs探测器 $\alpha$ 粒子能谱能量分辨率的比较

实线为辐照前,虚线为辐照后的结果.

型 GaAs 半导体样品进行辐照,结果显示辐照后探测器电性能正常<sup>[5]</sup>.

## 5 结论

这种 MSM 结构的 GaAs 探测器对  $^{241}\text{Am}$  5.48MeV  $\alpha$  粒子的能量分辨率可以达到 7%;其电荷收集效率最大可以达到 45%;在室温条件下对最小电离粒子具有较高的探测效率;对 X 射线也具有良好的能量分辨;它的快时间响应和抗辐照特性是硅微条探测器难以达到的;要增加探测器的电荷收集效率需要进一步改进制作工艺,以提高探测器的击穿电压.

初步研究表明这种新型的 GaAs 半导体探测器是一种极有希望的适用于常温的抗辐照的粒子探测器,对它的时间响应和抗辐照特性有待做进一步的研究.

## 参 考 文 献

- [ 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 ] Dubecky F, Darmo J, Hlavac S et al. Nucl. Instr. and Meth., 1996, **A377**:475—478
- [ 4 ] Chen J W, Frommichen T, Ludwig J et al. Nucl. Instr. and Meth., 1995, **A365**:273—284
- [ 5 ] Shao Chuanfen, Shi Changxin, Xu Xiuqin. Reserch & Progress of SSE (in Chinese), 1996, **16**(1):24—27  
(邵传芬, 史常忻, 徐秀琴. 固体电子学研究进展, 1996, **16**(1): 24—27)

## Properties of a New Kind of MSM Structure Gallium Arsenide Detectors \*

Le Yi Li Cheng Chen Hongfang Zhang Yongming  
Wang Xiaolian Wang Ligang

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Shao Chuanfen Shi Changxin

(Institute of Microelectronic Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

**Abstract** Properties of a new kind of double metal contact GaAs semiconductors have been investigated. We measured the spectra of 5.48MeV  $\alpha$  particles from  $^{241}\text{Am}$ , 122keV photons from  $^{57}\text{Co}$  and 2.27MeV MIPs from  $^{90}\text{Sr}$  and compared the cce and FWHM of a  $3 \times 3\text{mm}^2$  GaAs detector before and after 1300rad 662keV photons from  $^{137}\text{Cs}$ . The test results show that these new Metal-Semiconductor-Metal(MSM) structure semiconductor detectors not only have good particle detection ability at room temperature but also have excellent radiation hardness.

**Key words** MSM structure, GaAs semiconductor, particle detector