

# 双面 Schottky 势垒型 GaAs 粒子探测器特性<sup>\*</sup>

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:** 双面肖特基势垒型 GaAs 粒子探测器由半绝缘砷化镓材料制成, 器件结构为金属-半导体-金属结构, 该探测器能经受能量为 1.5MeV、剂量高达 1000kGy 的电子、500kGy 的  $\gamma$  射线、 $\beta$  粒子、X 射线等粒子的辐照测试, 辐照后器件击穿曲线坚挺, 反向漏电流最低为  $0.48\mu A$ 。器件的另一特征是其反向漏电流与 X 射线的照射量呈线性关系。该探测器在  $^{241}Am$  ( $E_{\alpha}=5.48MeV$ )  $\alpha$  粒子辐照下, 其最大的电荷收集率和能量分辨率分别为 45% 和 7%。在由  $^{90}Sr$  ( $E_{\beta}=2.27MeV$ ) 发出的  $\beta$  粒子辐照下, 探测器有最小的电离粒子谱。该探测器对光照也有明显的响应。

**关键词:** 粒子探测器; GaAs; Schottky 势垒

PACC: 7280E; 0670 EEACC: 8220B

中图分类号: O572.11 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2000)08-0792-06

## Characteristics of Double Schottky Barrier GaAs Particle Detectors<sup>\*</sup>

SHAO Chuan-fen and SHI Chang-xin

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

Received 22 May 1999, revised manuscript received 12 September 1999

**Abstract:** A comprehensive characteristic of new GaAs particle detectors is presented. Double Schottky barrier GaAs particle detectors are made of semi-insulating GaAs material, so the device is of a metal-semiconductor-metal structure. As an irradiation test, the detectors have been subjected to 1000kGy of

\* 上海市自然科学基金资助项目[Project Supported by Natural Science Foundation of Shanghai].

邵传芬 女, 1942 出生, 副教授。从事硅大规模集成电路和砷化镓器件的研究[SHAO Chuan-fen, female, was born in 1942, associate professor. She is researching Si VLSI and GaAs devices].

史常忻 男, 1938 年出生, 教授, 博士生导师。从事高速砷化镓器件研究[SHI Chang-xin, male, was born in 1938, professor, instructor of Dr. student. And now, he is reseaching high speed GaAs devices].

1999-05-22 收到, 1999-09-12 定稿

1.5 MeV electrons, 500 kGy gammas,  $\beta$  particles and X-ray. After the irradiation, the breakdown curve of the device is strong, and the minimum reverse leakage current is 0. 48  $\mu$ A. The other character of the device is that the reverse leakage current is linearly related to the irradiation intensity of X-ray. The highest CCE and FWHM of the detectors are 45% and 7% respectively at the irradiation of  $\alpha$  particles from  $^{241}\text{Am}$  ( $E_{\alpha} = 5.48\text{MeV}$ ). A minimum ionized particle spectra can be observed at 2.27 MeV  $\beta$  particles from  $^{90}\text{Sr}$ . The detectors also show evident response for the light.

**Key words:** particle detectors; GaAs; Schottky barrier

**PACC:** 7280E; 0670      **EEACC:** 8200B

**Article ID:** 0253-4177(2000)08-0792-06

## 1 引言

GaAs 粒子探测器主要用于高能物理实验和高亮度强子对撞机。人们对于 GaAs 材料生长技术进行了大量研究<sup>[1]</sup>, 它可以用各种方法生长。GaAs 材料生长方法有: 分子束外延(MBE)生长无缺陷 GaAs 材料、金属有机物化学气相沉积(MOCVD)、气相外延(VPE)生长。一种较好而又新型的生长技术是用低压气相外延(LP-VPE), 生长速率可达  $150\mu\text{m}/\text{h}$ 。研究结果表明, 用 LEC(Liquid Encapsulated Czochralski) 方法生长半绝缘 GaAs 所制成的粒子探测器, 在室温条件下抗辐照能力强、暗电流低。

半绝缘 GaAs 材料与 Si 材料相比, 从原子序数、禁带宽度、电阻率、迁移率等物理性能来看, GaAs 粒子探测器在抗辐射性、传输速度、收集效率等方面优于硅探测器。

1. 原子序数: GaAs 的有效原子序数为 32, 比 Si(14) 大, 对光子的探测效率高。
2. 禁带宽度: GaAs 的禁带宽度为 1.45eV, 比 Si (1.12eV) 大, 较高的禁带宽度所制成的探测器可以耐高温、抗辐射能力强, GaAs 粒子探测器所承受的辐射剂量比 Si 探测器高两个数量级<sup>[5]</sup>。
3. 迁移率: GaAs 的电子迁移率( $\mu_e = 8500\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 是 Si 迁移率( $1350\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的 5.5 倍, 故探测器的输出电流脉冲上升时间快, 所以 GaAs 探测器的探测速度比 Si 探测器大为提高。
4. 电阻率: 半绝缘 GaAs 材料电阻率可高达  $10^8$ — $10^9\Omega \cdot \text{cm}$ , 比 Si 探测器所用材料的电阻率高得多。高电阻率制成的探测器, 在较高反向偏压下, 其反向漏电流大为降低。
5. 肖特基势垒: GaAs 与金属接触的肖特基势垒为 0.6—0.7eV, 比 Si 肖特基势垒(0.3—0.4eV) 高, 适合作金属-半导体接触的探测器, 探测器的死层小、收集率高, 提高对最小电荷粒子的探测效率。
6. 密度及辐射长度: GaAs 的密度为  $5.32\text{g/cm}^3$ , 比 Si( $2.32\text{g/cm}^3$ ) 高, GaAs 的辐射长度 2.3cm 比 Si (9.36cm) 短 4 倍。高 Z、高密度、低辐射长度, 减少了多倍辐射, 从而降低能量损耗<sup>[2]</sup>。

GaAs 粒子探测器还可以在同一芯片上制成高分辨率的位置灵敏探测器阵列。它们在高能对撞物理、X 射线天文学、暗物质研究、正负电子对撞机等方面得到应用。

## 2 器件结构及工艺流程

双面肖特基势垒型 GaAs 粒子探测器实质为金属-半导体-金属(M-S-M) 结构, 结构新颖独特、工艺简单、使用方便。

### 2.1 器件结构

双面肖特基势垒型 GaAs 粒子探测器所用的材料为半绝缘(SI) 双面抛光 GaAs 材料, 其电阻率为  $1.4 \times 10^8\Omega \cdot \text{cm}$ , 晶向为  $\langle 100 \rangle$ , 芯片厚度为  $460\mu\text{m}$ ,  $\Phi = 50.8\text{cm}^2$ 。

器件的纵向结构是双面肖特基结构。在双面抛光的半绝缘 GaAs 衬底的上下两面先蒸发 50nm 厚的 Cr

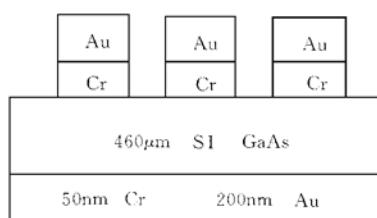


图 1 双面肖特基 GaAs 粒子探测器的剖面图

FIG. 1 Cross Section of Double Schottky Barrier GaAs Particle Detector

常规 M-S 工艺相兼容.

器件的工艺流程为: 清洗片子——双面抛光——正面淀积  $\text{SiO}_2$ ——光刻  $\text{SiO}_2$ ——正面蒸发 Cr-Au 层——反刻 Cr-Au 层——反面蒸发 Cr-Au 层. 工艺简单之处是用一次蒸发代替了做欧姆接触所需的三项工艺.

### 3 探测器特性

#### 3.1 电特性

##### 3.1.1 二极管击穿特性

在二极管两端加反向偏压, 测量其击穿电压. 表 1 为不同面积的探测器的击穿电压.

从表 1 所见, 对于同样面积的探测器, 有钝化层的探测器, 其击穿电压高于无钝化层的, 说明加钝化层还是必要的.

#### 3.2 光照特性

我们研究发现, GaAs 粒子探测器的反向漏电流受光照

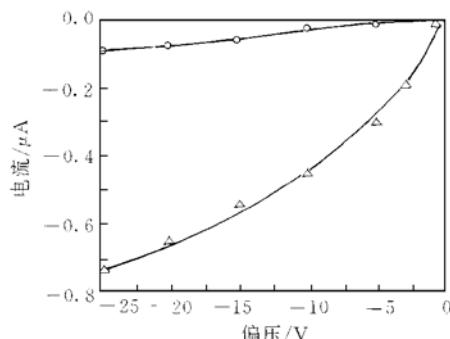


图 2 有、无光照时的  $I-V$  特性曲线  
○为无光照, △为有光照

FIG. 2  $I-V$  Characteristic of Detector with/without Light Radiation

层, 再蒸发 200nm 的 Au 层. 通过光刻形成面积为  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  和  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  的探测器. 图 1 为双面肖特基势垒型 GaAs 粒子探测器的纵向剖面. 在器件四周有  $40\mu\text{m}$  宽、一定厚度的  $\text{SiO}_2$  钝化层, 加钝化层的目的是为了提高器件的击穿电压. 为减少器件边缘的漏电, 削去器件图形四周的直角.

由于双面都蒸发 Cr-Au 层, 故器件实质为两个背靠背二极管, 无论正向工作还是反向工作, 总有一个二极管处于导通状态, 所以工作方式灵活.

#### 2.2 工艺流程

由于器件是 M-S-M 结构, 不象常规的肖特基二极管衬底要做欧姆接触. 它减少了做欧姆接触所需要的离子注入、退火、蒸  $\text{Ni}-\text{Au}-\text{Ge}-\text{Ni}$  等工艺过程, 从而达到工艺简单的目的, 而且与

表 1 不同面积的探测器的击穿电压

Table 1 Breakdown Voltage of Detectors with Different Areas

编 号	面 积	有/无钝化层	$V_R/\text{V}$
101	$1\text{mm} \times 1\text{mm}$	有	325
103	$1\text{mm} \times 1\text{mm}$	有	300
74	$3\text{mm} \times 3\text{mm}$	有	300
104	$3\text{mm} \times 3\text{mm}$	无	225

的影响. 有光照时比黑暗中的反向漏电流大<sup>[3]</sup>. 图 2 为 N0. 91 在有、无光照下的  $I-V$  特性曲线.

从图 2 中看出, 对于 No. 91 芯片, 有源面积  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ , 反向偏压从 1—30V 变化, 在无光照下, 反向漏电流在 0—0.11 $\mu\text{A}$  变化, 而在同样反向偏压下, 有光照时反向漏电流在 0.02—0.90 $\mu\text{A}$  变化. 又如 No. 94 芯片, 有源面积  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ , 在 30V 反向偏压下, 无光照时反向漏电流为 0.54 $\mu\text{A}$ , 而有光照时反向漏电流明显地上升到 5.8 $\mu\text{A}$ .

上述现象表明, 该探测器对光照有明显反应, 说明在光照后会产生光生载流子, 故反向电流增加. 探测器对光照敏感, 那么对放射粒子的照射, 同样会有反应, 下面叙述探测器在粒子辐照后的  $I-V$  特性.

#### 3.3 辐照特性

我们研制的双面肖特基势垒型 GaAs 粒子探测器, 作了电子、 $\gamma$  射线及 X 射线辐照试验. 电子辐照的能量为

1.5 MeV、剂量 1000 kGy、 $\gamma$  射线能量为 1.25 MeV、剂量分别为 300 kGy 和 500 kGy。经过上述剂量辐照后, 探测器表面金属光亮无损, 二极管性能正常。图 3 是探测器在粒子辐照前后的  $I-V$  特性曲线。曲线 1 是辐照前, 曲线 2 是 300 kGy 的  $\gamma$  射线辐照, 曲线 3 是 500 kGy 的  $\gamma$  射线辐照, 曲线 4 是 1000 kGy 的电子辐照。从图 3 看出, 面积为  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  的探测器, 在反向偏压 100V 下, 辐照前反向漏电流为  $0.32\mu\text{A}$ , 而在 300 kGy 的  $\gamma$  射线辐照下, 反向漏电流增加至  $0.42\mu\text{A}$ , 在 500 kGy 的  $\gamma$  射线辐照下其反向漏电流为  $0.48\mu\text{A}$ , 仅大  $0.06\mu\text{A}$ , 在 1000 kGy 的电子辐照下, 反向漏电流增至  $0.74\mu\text{A}$ 。说明探测器受粒子辐照后反向漏电流马上起变化。

### 3.3 低能 X 射线辐照

X 射线的能量为 60 keV, X 射线的照射量( $X$ )与管电流和照射时间有关。

照射量  $X = 2.58 \times 10^{-4} \bar{X}_m K_{tp} N_X T$ , 单位:  $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $C$  为库仑/kg 为千克。

其中  $\bar{X}_m$ : 照射量率多次测量的平均值

$K_{tp}$ : 仪器的校正因子

$t$ : 辐射室的平均温度(°C)

$N_X$ : 辐射室的大气压(kPa)

$T$ : 辐射时间(s)

探测器在低能 X 射线辐照下, 在反偏电压分别为 -50V 和 -100V 下测量了反向漏电流与照射量的关系。图 4 是面积为  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  的探测器的反向漏电流  $I-X$  的关系曲线。曲线 1 为 -100V, 曲线 2 为 -50V。

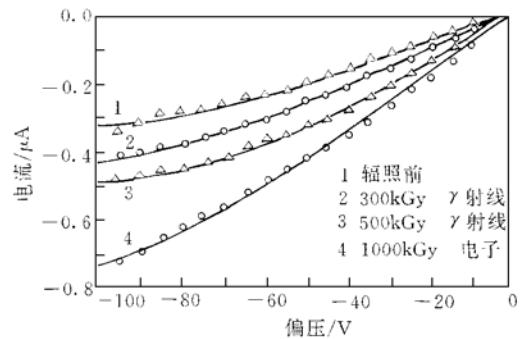
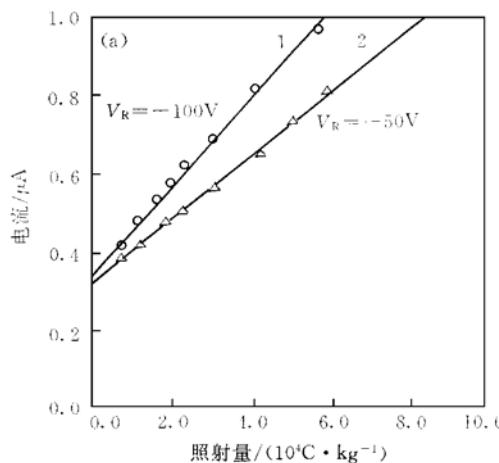
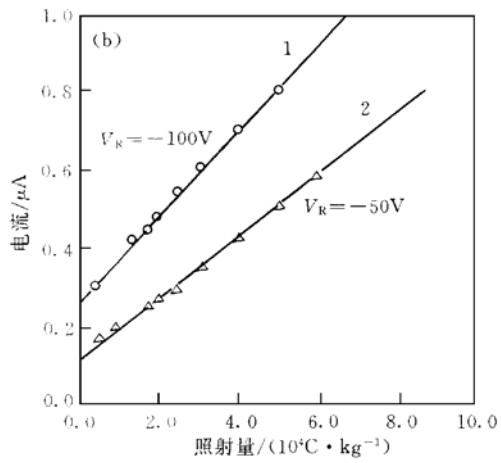


图 3 探测器在辐照前后的  $I-V$  特性曲线  
面积  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$

FIG. 3  $I-V$  Characteristic of Detector Before and After Radiation.



(a)



(b)

图 4 不同面积的探测器在不同偏压下的  $I-X$  的关系曲线 图 4(a):  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  图 4(b):  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$

FIG. 4  $I-X$  Curve of Detector with Different Areas at Different Biases (a)  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  (b)  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$

从图 4a 看出, 反向漏电流  $I$  与照射量  $X$  成线性关系。这个实验结果表明: 该探测器可作为 X 射线照射量的线性传感器。其斜率  $\frac{\Delta I}{\Delta X}$  为探测器的灵敏度。直线 1 的斜率大于直线 2 的斜率, 即反偏电压高时的灵敏度大于反偏电压低时的灵敏度。我们同样测量了面积  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  的探测器的反向漏电流  $I$  与照射量  $X$

的关系. 图 4(b) 为  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  的探测器在不同偏压下的  $I-X$  关系曲线.

从图 4(b) 看出反偏电压高的直线 1 的斜率高于反偏电压低的直线 2 的斜率.

### 3.5 能谱特性

我们还测量了该探测器在  $^{241}\text{Am}$  ( $5.48\text{MeV}$ )  $\alpha$  粒子、 $^{90}\text{Sr}$  ( $2.27\text{MeV}$ ) 的  $\beta$  粒子辐照下的能谱特性, 展示其能量分辨率(FWHM) 和电荷收集率(CCE).

#### 3.5.1 粒子能谱

在  $45\text{V}$  偏压下, 面积分别为  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  和  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  的探测器在  $^{241}\text{Am}$  ( $5.48\text{MeV}$ ) 源辐照下所测得的  $\alpha$  粒子的能谱曲线, 如图 5(a) 和图 5(b) 所示. 面积为  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  的探测器的能量分辨率为 7%, 面积为  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  的探测器能量分辨率为 10%. 据报道, 由 Au-Au 和 W-W Schottky 接触和  $\text{N}^+ - \text{N}^+$  欧姆接触的半绝缘 GaAs 粒子探测器<sup>[4]</sup>的能量分辨率为 5%.

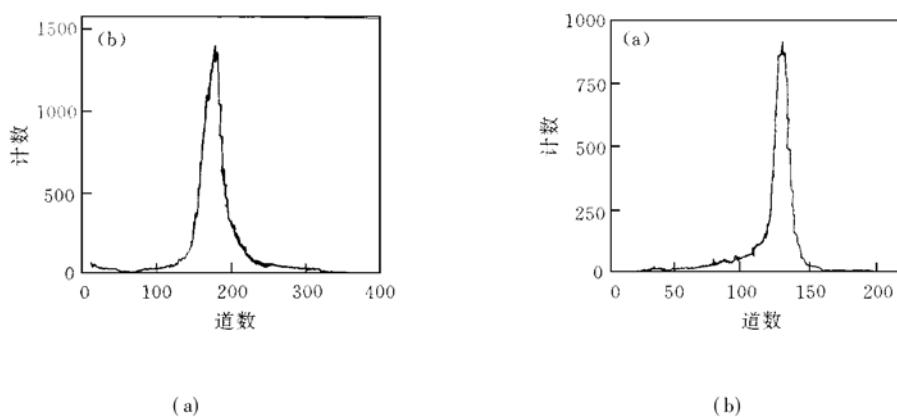


图 5 不同面积的 GaAs 粒子探测器由  $^{241}\text{Am}$  ( $5.48\text{MeV}$ ) 发出的  $\alpha$  粒子能谱  
(成形放大器放大倍数 50, 成形时间为  $1\mu\text{s}$ ) 图 5a:  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  图 5b:  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$

FIG. 5 Spectra of  $\alpha$  Particle Emitted from  $^{241}\text{Am}$  ( $5.48\text{MeV}$ )

从上述实验可知, 面积大的探测器的能量分辨率高于面积小的探测器.

我们对该探测器作了电荷收集率与反向偏压的实验. 实验结果表示: 对于能量为  $5.48\text{MeV}$  的  $\alpha$  粒子, 探测器的电荷收集率(CCE) 随反向偏压增大而增高, CCE 最大达 45%, 而反向偏压最大为  $250\text{V}$ .

#### 3.5.2 粒子谱与 $^{57}\text{Co}$ ( $E_x = 122\text{keV}$ ) 的 X 射线谱

图 6 为  $^{90}\text{Sr}$  ( $E_\beta = 2.27\text{MeV}$ ) 发射的  $\beta$  粒子辐照到探测器测得的最小电离粒子谱(MIPS). 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 探测器信号合并为多道分析器的触发信号, 获得了明显的最小电离粒子谱.

图 7 为探测器在  $^{57}\text{Co}$  ( $E_x = 122\text{keV}$ ) 发出的 X 射线能谱, 其能量分辨率约为 30%.

## 4 结论

双面 Schottky 势垒型 GaAs 粒子探测器在半绝缘 GaAs 芯片的正反两面都做了金-半接触的肖特基结, 结构新颖、工艺简单, 节省了做欧姆接触所需的三项步骤, 它与常规的 GaAs 器件工艺相兼容. 探测器的抗辐照能力强, 经过能量为  $1.5\text{MeV}$  剂量高达  $1000\text{kGy}$  的电子辐照, 在反偏电压  $100\text{V}$  下, 其反向漏电流为  $0.74\mu\text{A}$ ; 而在  $500\text{kGy}$  的  $\gamma$  射线辐照下, 反向漏电流仅为  $0.48\mu\text{A}$ . 在低能 X 射线辐照下, 反向漏电流与 X 射线的照射量呈线性关系, 可作为 X 射线的线性传感器. 探测器面积越大、反向偏压高, 其灵敏度也相对高. 探测器在  $^{241}\text{Am}$  ( $E_\alpha = 5.48\text{MeV}$ )  $\alpha$  粒子辐照下, 其最大的电荷收集率和能量分辨率分别为 45% 和 7%. 在室温条件下, 在  $^{90}\text{Sr}$  ( $E_\beta = 2.27\text{MeV}$ )  $\beta$  粒子辐照下, 对最小的电离粒子有较高的探测效率. 探测器无论在

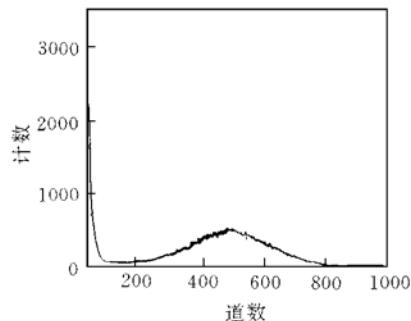


图 6  $^{90}\text{Sr}$  ( $E_\beta = 2.27\text{MeV}$ )  $\beta$  粒子  
最小电离粒子谱(成形放大器放大倍数  
1000, 成形时间  $1\mu\text{s}$ )

FIG. 6 Minimum Electrolytic Particle  
Spectrum of  $^{90}\text{Sr} \beta$  Particle

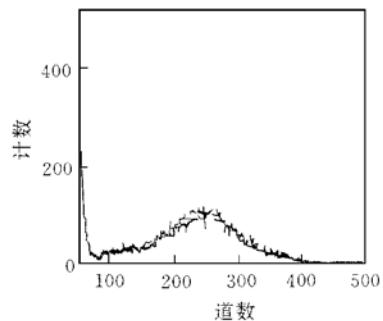


图 7  $^{57}\text{Co}$  ( $E_\gamma = 122\text{keV}$ ) 的 X 射线能谱  
(成形放大器放大倍数 500, 成形时间  $1\mu\text{s}$ )

FIG. 7 X-Ray Spectrum of  $^{57}\text{Co}$

哪种高能粒子辐照下,二极管特性均保持良好,击穿特性曲线坚挺,器件金属表面无损。经诸多实验证明,该探测器是抗辐照能力较强的探测器,可应用于高能物理实验、放射性废料的管理、工业监控和测量等多种领域。

## 参 考 文 献

- [1] S. D'Auria *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., 1997, **A386**: 177—185.
- [2] R. Bertin *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., 1990, **A294**: 211—218.
- [3] Shao Chuanfen *et al.*, Research & Progress of SSE, 1996, **16**(1): 24—27.
- [4] F. Dubecky *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., 1996, **A377**: 475—478.
- [5] W. Karpinski *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., 1992, **A323**: 635—637.