

# 用于激光聚变实验中的 GaAs 光电探测器

杨向东 李朝光 郑志坚

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都, 610003)

采用中子辐照过的 GaAs 材料做成了 GaAs 光电探测器, 它具有良好的性能, 时间响应快(约 100ps)、灵敏度高(约  $10^{-19}\text{C/keV}$ )、体积小。已被用于激光聚变实验中 X 射线角分布测量。

**关键词** 光电探测器 硬 X 射线 能量沉积 灵敏度

激光等离子体发射 X 射线是亚 ns 级的快过程, 需要用响应很快的辐射探测器。GaAs 光电探测器与其它真空式和固体探测器如 XRD 相比, 其突出的优点是: (1) 它的响应速率快, 可以做到小于 100ps; (2) 辐射可直接照射在 GaAs 晶体上, 不存在死层; (3) 这种材料可以做成任意形状的小体积探测器, 可方便地放入激光聚变实验靶室内进行 X 射线角分布测量。80 年代, 国外把 GaAs 探测器应用于惯性约束聚变实验中的软 X 射线(3keV) 的诊断以及热核实验场中子产额测量, 使用的 GaAs 为  $0.3 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ 。1990 年, 我们研制出一种大尺寸的 GaAs 晶体为  $2 \times 5 \times 5.5 \text{ mm}^3$ , 这样把 X 射线的测量扩展到高能区 ( $> 7\text{keV}$ ), 为超热电子转换的硬 X 射线的测量提供了有利的诊断工具。

## 1 GaAs 光电探测器

### 1.1 性能及工作原理

GaAs 晶体是一种化合物半导体材料, 具有稳定的化学性能, 固有电阻率高(约  $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ), 导电能力强(电子迁移率  $\mu_e = 8500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 用它做成的辐射探测器有暗电流小、灵敏度高以及使用寿命长等优点。GaAs 材料经快中子辐照处理后会晶格错位, 这种晶格缺陷在晶体内起着复合中心的作用, 复合几率增大使载流子寿命减小, 使探测器响应速率加快。图 1(a) 是 GaAs 探测器的工作原理图, 入射光子在 GaAs 材料中沉积能量, 把电子激发到导带, 在外加电场的作用下形成电流。在一级近似下可忽略空穴的导电作用, 则由电子的速率方程推出 GaAs 探测器的输出电流表示式<sup>[1]</sup>为

$$I(t) = \frac{\mu_e e E_0 V_0}{r L^2} e^{-t/\tau} \quad (1)$$

式中  $r = 4.35 \text{ eV}^{[2]}$ , 是在 GaAs 材料中入射辐射形成一个电子空穴对所需的平均能量, 是与入射光子能量无关的常数;  $L$  为探测器的间距;  $\tau$  为载流子的寿命。由式(1) 可以看出, 在外加

电压  $V_0$  一定的条件下,探测器输出电流  $I(t)$  与入射光子在 GaAs 材料中沉积(吸收)的能量  $E_0$  成正比。若对这种探测器进行绝对标定,就可以对 X 射线进行绝对测量。

将 GaAs 材料经反应堆快中子辐照处理后制作成 GaAs 光电探测器,它的结构和输出特点见图 1(b)。GaAs 材料被固定在陶瓷底衬上,用 Au 微带(50  $\Omega$ ) 连结 GaAs 材料形成两个对称的输出端,用真空蒸镀方法使 GaAs 材料与 Au 微带间的接触电阻  $< 0.5 \Omega$ , 探测器加高压 1000 V, 探测器的输出电流信号由 7104 快速示波器记录。

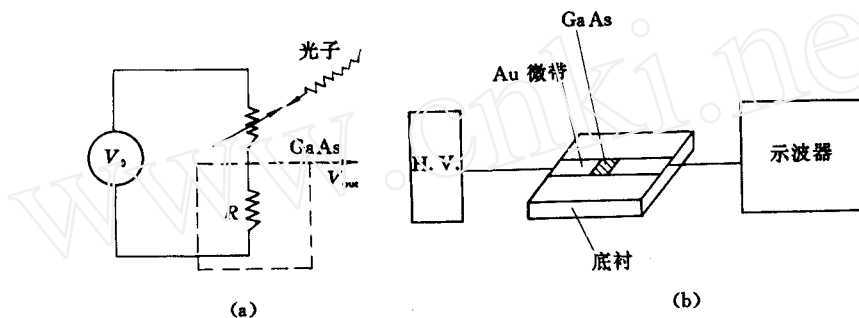


图 1 GaAs 探测器工作原理(a)和制作结构图(b)

Fig. 1 The principle (a) and configuration scheme (b) of GaAs detector

图 2 是厚度为 5.5 mm 的 GaAs 材料对各种能量的入射 X 射线的能量沉积率的理论计算曲线。由图 3 可以看出,它对 90 keV 以下的入射 X 射线是全吸收的。激光等离子体的各种非线性过程产生的超热电子在等离子体内转换的硬 X 射线主要分布在 100 keV 以下,所以,这种尺寸的 GaAs 探测器满足激光聚变实验中的硬 X 射线测量。在 GaAs 探测器入射窗前加 30  $\mu\text{mAl}$  吸收片,可消除低能 X 射线( $< 7 \text{ keV}$ )的影响。

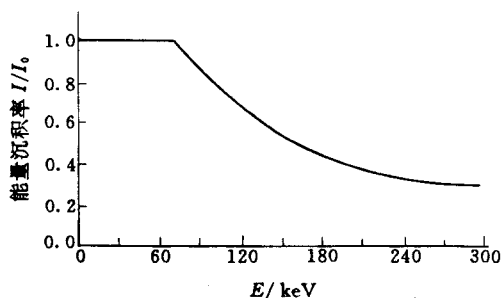


图 2 不同能量 X 射线在 5.5 mm GaAs 物质中的能量沉积率

Fig. 2 The energy deposition rate of X-ray in 5.5 mm GaAs material

## 1.2 GaAs 光电探测器的响应

1990 年在“神光-1”装置上进行的激光聚变实验中,对这种新研制的 GaAs 光电探测器的响应做了检验。结果示于图 3。图 3(a)是未经中子辐照处理的 GaAs 材料做成的探测器对激光等离子体发射的 X 射线脉冲的响应,脉冲幅度达 280 V,对 X 射线的响应约 6 ns(FWHM)。经过快中子辐照处理的 GaAs 探测器在同一次打靶实验中得到的结果(图 3(b)),对 X 射线的

响应约 1.2 ns(FWHM), 脉冲幅度下降到 100 V, 所以快中子辐照效应使 GaAs 探测器的响应加快但灵敏度下降, 这些结论与国外文献报道的情况是一致的。图 3(c) 是 GaAs 探测器对 40 ps 的锁模激光脉冲的响应, 约 500 ps(FWHM)。扣除记录系统的时间展宽, 估计经快中子辐照处理的 GaAs 探测器的时间响应约 100 ps。

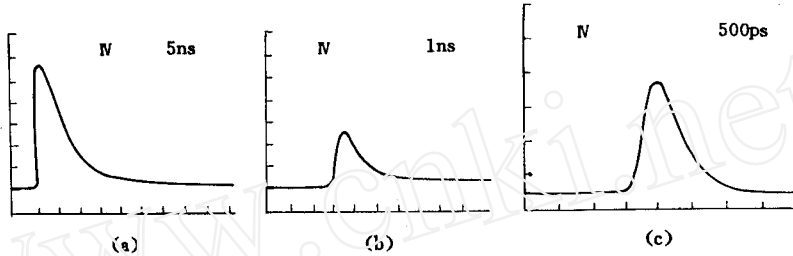


图 3 GaAs 探测器对 X 射线脉冲的响应

Fig.3 Response of GaAs detector to X-ray pulse

(a) 未经中子辐照处理; (b) 经中子辐照处理的 GaAs 探测器;  
 (c) 经中子辐照处理过的 GaAs 探测器对 40 ps 锁模激光脉冲的响应

## 2 GaAs 探测器实验标定

由于缺少理想的强单色 X 射线脉冲源, 1992 年, 在“闪光-I”5 MV 韧致辐射场中标定了 GaAs 探测器, 得到探测器的灵敏度为  $10^{-19}$  C/keV, 这与国外报道的数据和理论估算结果基本一致。

### 2.1 探测器的标定原理

按照 H. Attix 的辐射剂量学原理<sup>[3]</sup>, 放在韧致辐射场中的 GaAs 和 LiF 物质所吸收的韧致辐射能量式吸收剂量有如下的表示式

$$D_{\text{GaAs}} = A_1 \cdot E_1 \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{GaAs}} \quad (2)$$

$$D_{\text{LiF}} = A_2 \cdot E_2 \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{LiF}} \quad (3)$$

式中  $A_1 = A_2$  为单位换算常数;  $E_{1,2}$  为探测器位置上的辐射能注量 ( $\text{MeV}/\text{cm}^2$ ), 由于 GaAs 和 LiF 都是体积很小的辐射探测器, 放在辐射场中同一点, 故  $E_1 = E_2$ ;  $\left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{GaAs}}, \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{LiF}}$  分别为 GaAs 和 LiF 材料的质量能量吸收系数, 它表示辐射在物质中被吸收的几率。根据公式(2)、(3)并考虑到韧致辐射连续谱在 5.5 mm 厚的 GaAs 物质中的变化, 最后推出在 GaAs 物质中沉积的韧致辐射总能量  $E_0$  为

$$E_0 = \frac{s \rho \int_0^h dz \int_0^\infty \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{GaAs}} F(E) \exp \left[ - \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \rho z \right] dE}{\int_0^\infty \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{LiF}} F(E) dE} \cdot D_{\text{LiF}} \quad (4)$$

式中:  $F(E)$  为韧致辐射能谱; 指数项为辐射能谱随 GaAs 厚度  $z$  的变化;  $D_{\text{LiF}}$  为标准热释光剂量计的实验监测值;  $s$  为探测器灵敏表面积。

定义: GaAs 探测器的灵敏度  $R$  为探测器输出的电荷量  $Q$  与辐射在探测器中沉积的能量

$E_0$  之比值

$$R = \frac{Q}{E_0} \quad (5)$$

$Q$  由示波器输出脉冲电流信号波形处理后得到,  $E_0$  由式(4)计算得到。

## 2.2 探测器灵敏度实验标定

每个 GaAs 探测器和 LiF 热释光剂量片放在“闪光-I”韧致辐射场中。将 3 次测量结果平均, 得到每个 GaAs 探测器的平均灵敏度列于表 1。

在这个标定实验中, 同时检验了 GaAs 探测器的线性响应。通过改变探测器到靶前窗的距离来改变韧致辐射的强度, 观察探测器输出电荷量与沉积能量之间的关系, 结果表明探测器有良好的线性, 反映出探测器输出电荷量与沉积能量之间的正比关系保持在 10% 以内。

探测器灵敏度实验标定主要存在下述 3 方面误差: (1) 示波器的非线性及计算机判读波形照片的误差导致探测器输出电荷量的误差估计为 6%; (2) LiF 热释光剂量计给出的 LiF 吸收剂量的误差约 4%; (3) 能量沉积计算结果的误差为 15%。则 GaAs 探测灵敏度误差为上述 3 项误差的均方和, 约  $\pm 20\%$ 。

表 1 GaAs 探测器灵敏度

Table 1 Experimental result of the detector sensitivity

探测器编号	$\bar{R} / 10^{-19} \text{C} \cdot \text{keV}^{-1}$	一致性
1	2.5	1.40
2	2.3	0.95
3	2.3	0.95
4	2.3	0.95
5	2.2	0.91
6	2.4	1
7	2.1	0.87
8	1.7	0.71
9	2.5	1.04
10	2.3	0.95
11	2.3	0.95

## 3 GaAs 探测器的应用

在激光直接驱动内爆实验中, 基频光 ( $1.06 \mu\text{m}$ ) 与等离子体的各种非线性相互作用过程中产生的超热电子有较长的射程, 它可能引起靶预热而使内爆效率降低, 因此, 超热电子产生机制和空间分布特性的研究在惯性约束聚变 (ICF) 实验研究中占有很重要的地位。

在“闪光-I”实验中, 把 GaAs 探测器放入靶室内, 首次观察到黑洞靶中发射的超热电子所转换的硬 X 射线角分布 (图 4)。图 4 中曲线反映出的尖锐峰结构表明靶发射的超热电子在空间具有非各向同性分布, 在  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  方向硬 X 射线出现对称的峰, 说明在双束打靶实验中各种非线性过程产生的超热电子主要分布在激光光轴方向 (即等离子体密度梯度方向)。所有这些实验信息为 ICF 靶的优化设计、理论推算超热电子的能量份额提供了依据。

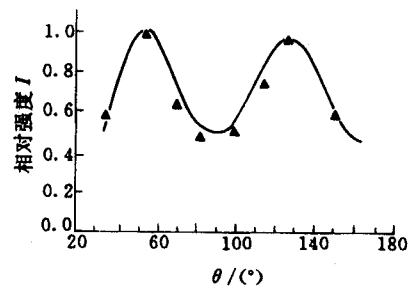


图 4 黑洞靶发射的硬 X 射线角分布  
Fig. 4 Angular distribution of hard X-ray from hohlraum target

### 参 考 文 献

- 1 Kanl. DR. Radiation-induced Conductivity: High-speeded Detection of X-Rays and Neutrons. *Laser and Particle Beams*, 1991, 9(1): 91—97.
- 2 Galli R, Barday S. Picosecond GaAs X- and Gamma-Ray Photodetectors. *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 1989, A283: 318—322
- 3 Frank HA. Attix Topics in Radiation Dosimetry. *Radiation Dosimetry Supplement*, 1972, 1:75—378.

## GaAs PHOTOCONDUCTOR USED IN LASER FUSION EXPERIMENT

Yang Xiangdong Zheng Zhijian Li Chaoguang

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry,  
China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 525-77, Chengdu, 610003*)

### ABSTRACT

The photoconductor detectors using neutron irradiated GaAs material are fabricated. The performance are determined such as time response  $\approx 100$  ps, sensitivity  $\approx 10^{-19}$  C/keV. It is used in the X-ray angular distribution measurement of the laser fusion experiment.

**Key words** Photoconductor detector Hard X-ray Energy deposition Sensitivity

---

## 软件对核电厂安全的重要性

Software Important to Safety in Nuclear Power Plants

本书是技术报告丛书 No.367, 1994 年由国际原子能机构出版。

该书是软件工程的最新出版物, 特别为核电软件设计者与管理者提供了最新资料。主要内容如下:

一、导论:目的、范围、基础知识与结构。二、软件对核电厂安全的重要性及现存安全准则的应用:经验与最新实践。三、工作范围与管理。四、技术要求分析与设计的模拟:核安全技术要求、防护系统设计、计算机系统及技术要求、软件技术要求与设计。五、鉴定与确认:经验、最新实践、结论与追踪。六、工作人员素质与培训。