

# 用于脉冲n/γ混合场γ强度测量的ICI探测器

欧阳晓平<sup>1,2;1)</sup> 张忠兵<sup>2</sup> 王群书<sup>1,2</sup> 王伟<sup>2</sup>

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (西北核技术研究所 西安 710024)

**摘要** 研制成功一种基于康普顿效应,用于脉冲裂变n/γ混合场γ强度绝对测量的新型辐射探测器——ICI(绝缘体-导体-绝缘体)探测器.除具有现有真空康普顿和介质康普顿探测器时间响应快、线性电流大、抗辐射干扰能力强等优点外,该探测器从结构上抑制了真空康普顿在快脉冲γ测量中的前后负冲信号,并且工作时不需要高真空,而γ灵敏度却与同尺寸介质康普顿探测器相当.由于其探测灵敏介质厚度小于2mm,因而在群脉冲辐射探测中,不会显著影响后续和周围探测器的测量环境,是一种探测脉冲γ射线较理想的探测器.

**关键词** ICI探测器 γ射线 脉冲辐射探测

## 1 引言

在强流n/γ混合场脉冲γ射线测量中,通常采用闪烁体+光电管探测器、真空康普顿二极管和介质康普顿二极管等测量γ时间谱和强度分布<sup>[1-8]</sup>.而对于超强流脉冲γ探测,由于测点注量率很高,要求探测器灵敏度很低,因此,主要采用基于Compton效应的康普顿探测器<sup>[1, 2, 8]</sup>.康普顿探测器具有时间响应快,线性电流大,抗辐射干扰能力强等突出优点,已广泛用于超强流脉冲γ射线测量.目前的康普顿探测器主要有两种<sup>[1-4]</sup>:一种是真空康普顿二极管,其结构见图1所示;一种是介质康普顿,结构见图2所示.

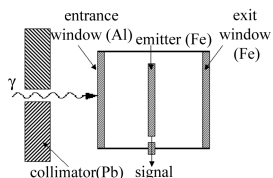


图1 真空康普顿探测器结构示意图

真空康普顿探测器只有在高真空环境中才能正常工作,其入射窗、电荷收集极和出射窗总厚度约2cm左右,单位面积灵敏度一般约为 $10^{-22}C \cdot cm^2$ <sup>[1]</sup>.真空康普顿探测器有两个不足:1)探测器制作完成后,其高真空保持时间一般为1—2a,超期将不能使用;2)由

于其结构特征,在快脉冲γ测量中,信号前端会产生负冲,这对测量数据的质量将产生影响.与真空康普顿相比,介质康普顿不需要真空可以正常工作,其灵敏度比真空康普顿高,单位面积灵敏度可达 $10^{-21}C \cdot cm^2$ <sup>[1]</sup>,其不足之处是入射窗、吸收极和出射窗总厚度一般在10cm左右,若进行强度的绝对测量,同一辐射通道仅能放置一个探测器.此外,由于介质很厚,对来自辐射通道中的中子、γ射线产生将严重散射,这种散射,无疑对周围探测器将产生不利影响.

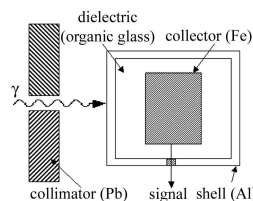


图2 典型的介质康普顿探测器结构示意图

为利用现有康普顿探测器的独特优点,同时避开真空康普顿和介质康普顿在使用中暴露的不足,发展了一种基于Compton作用机制的新型探测器——ICI探测器.这种探测器除具有目前使用的真空康普顿和介质康普顿探测器所具有亚纳秒时间响应、几十安培以上线性输出电流、很强抗中子干扰能力等优点外,

2005 - 06 - 09 收稿

1) E-mail: oyxp2003@yahoo.com.cn, oyxp@yahoo.com

该探测器不需要 $10^{-2}$ Pa的真空工作环境,  $\gamma$ 灵敏度达 $2 \times 10^{-20} \text{C} \cdot \text{cm}^2$  ( $\phi 50, 1.25 \text{MeV}$ ), 不低于现有介质康普顿探测器; 同时, 该探测器通过施加强磁场、采用绝缘体-导体-绝缘体结构, 从原理上抑制了快脉冲 $\gamma$ 测量中的明显负冲信号; 采用聚四氟乙烯和石墨作探测介质, 减少了中子在介质表面的 $(n, p), (n, \alpha)$ 反应截面, 提高了在n/γ混合场测量的抗中子干扰能力. 此外, 其探测介质厚度小于2mm, 在群探测器中不会显著影响后续和周围探测器的测量环境, 是脉冲 $\gamma$ 射线强度探测的理想探测器.

## 2 ICI探测器结构设计原理

ICI探测器的结构原理如图3所示, 探测原理如图4所示. 它由入射窗、探测灵敏单元、出射窗、前后偏转磁场和探测器金属外壳组成.

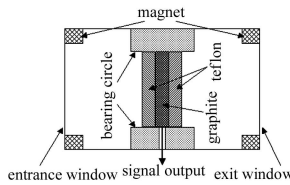


图3 ICI探测器结构示意图

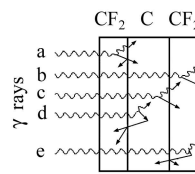


图4 ICI探测器工作原理图

探测器的入、出射窗由0.5mm的铝材料组成, 与金属外壳构成一密闭空腔, 用于屏蔽周围的电磁干扰信号; 前后偏转磁场用于清扫入、出射窗产生的电子, 使之不能到达探测灵敏单元; 探测灵敏单元由前绝缘介质聚四氟乙烯、电荷发射和收集极石墨以及后绝缘介质聚四氟乙烯组成, 它的结构为前绝缘介质-导体-后绝缘介质 (Insulator-Conductor-Insulator). 为保证探测器的灵敏度, 前后聚四氟乙烯介质均很薄. 电荷收集极厚度与材料性质有关, 当采用石墨时, 其厚度一般小于2mm. 来自辐射通道的 $\gamma$ 射线束与探测器的入、出射窗作用产生的向前和向后发射的电子, 将被0.1—0.2T的磁场清扫, 对测量不产生影响.  $\gamma$ 射线与探测灵敏单元的作用分3部分: 与前绝缘介质作用发射的电子(包括一次电子和二次电子), 部分将沉积在电荷收集极产生的电流为 $I_{11}$ ; 与中间的电荷收集极作用, 使之发射电子产生的总电流为 $I_c$ ; 与后绝缘介质作用进入电荷收集极产生的电流为 $I_{12}$ . 则探测器净输出电流为

$$I = I_c - I_{11} - I_{12}. \quad (1)$$

## 3 ICI探测器γ灵敏度

### 3.1 ICI探测器γ灵敏度随结构参数的变化

根据 $\gamma$ 射线与物质的相互作用原理, 采用MCNP程序<sup>[9]</sup>对探测器的 $\gamma$ 灵敏度随结构参数变化进行了理论计算. 探测器 $\gamma$ 灵敏度随前绝缘介质聚四氟乙烯厚度变化关系见图5所示, 从图中可以看出, 随着聚四氟乙烯厚度的增加, 探测器灵敏度急剧下降. 这主要是当前绝缘介质厚度增大时, 其发射的电子进入收集极的数目增加, 导致式(1)中 $I_{11}$ 增大的缘故. 探测器灵敏度随电荷收集极材料石墨厚度变化如图5(b)所示. 从图中可知, 当 $(\text{CF}_2)_n$ 厚度为0.1mm时, 石墨C的厚度小于1mm时探测器灵敏度迅速增加, 到达一定的厚度时, 探测器灵敏度基本恒定, 说明收集极发射和得到的电子数达到了某种平衡. 探测灵敏度随后绝缘介质厚度变化不明显, 主要因为介质向后发射的电子数比向前的少得多, 一般小于10%. ICI探测器测量对象通常包含多种能量的 $\gamma$ 能谱, 探测器灵敏度随 $\gamma$ 能量的变化是我们关心的问题.

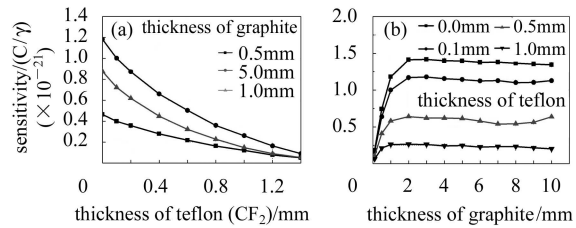


图5 石墨、聚四氟乙烯厚度的变化对ICI探测器灵敏度的影响,  $E_\gamma = 1.25 \text{MeV}$

(a) 灵敏度随聚四氟乙烯厚度变化曲线; (b) 灵敏度随石墨厚度变化曲线.

图6给出了ICI探测器灵敏度随 $\gamma$ 能量变化的情况. 从图中可以看出, 在前聚四氟乙烯厚度为0.1mm, 石墨厚度1mm情况下, 其能量响应较为平坦.

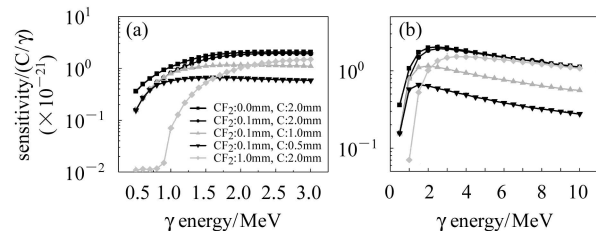


图6 ICI探测器灵敏度随着 $\gamma$ 能量变化曲线

(a) 能量变化范围0.5—3MeV; (b) 能量变化范围0.5—10MeV.

### 3.2 ICI探测器 $\gamma$ 灵敏度

通过选择结构参数, 设计了ICI探测器, 其灵敏度随能量变化计算结果如图7所示. ICI探测器对1.25MeV  $\gamma$ 射线灵敏度理论计算值为 $1.78 \times 10^{-20} \text{C}\cdot\text{cm}^2$ , 实验测量值为 $1.8 \times 10^{-20} \text{C}\cdot\text{cm}^2$ , 两者相当符合. 对于尺寸相同的标准型介质康普顿探测器<sup>[1]</sup>, 其对1.25MeV  $\gamma$ 射线灵敏度为 $1.4 \times 10^{-20} \text{C}\cdot\text{cm}^2$ , 同尺寸真空康普顿探测器相应灵敏度为 $2.37 \times 10^{-21} \text{C}\cdot\text{cm}^2$ . 由此可知, ICI探测器的 $\gamma$ 射线灵敏度比文献给出的介质康普顿探测器高28.6%, 是同尺寸真空康普顿探测器的7.6倍. 而其在辐射通道中的介质总厚度不足4mm, 在群探测中显示出良好的兼容性.

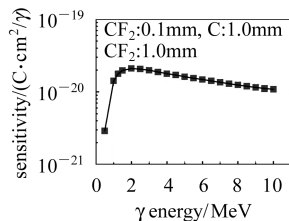


图7 研制的ICI探测器灵敏度随能量变化计算结果(灵敏单元直径 $\phi 50$ )  
对 $^{60}\text{Co}$  1.25MeV  $\gamma$ 射线灵敏度为 $S_\gamma = 1.78 \times 10^{-20} \text{C}\cdot\text{cm}^2$ .

### 4 ICI探测器 $\gamma/n$ 分辨能力

$n/\gamma$ 混合场中测量脉冲中子参数的中子探测器需要具备一定的 $n/\gamma$ 分辨能力<sup>[10-12]</sup>, 同样, 在该类混合场中用于测量 $\gamma$ 参数的ICI探测器也必须有较高的 $\gamma/n$ 分辨能力, 因而要进行特殊的设计. ICI探测器对中子的敏感性主要在于入射中子与电荷收集极两表面通过 $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ 反应产生电荷发射而产生的电流输出. 而在这两种中子引起的带电粒子反应中, 质子的射程远大于 $\alpha$ , 起主要作用. 为提高探测器的 $\gamma/n$ 分辨能力, 必须选择 $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ 反应截面很小的材料作探测介质. 在本课题中, 采用石墨C作电荷收集极, 聚四氟乙烯作绝缘介质构成的ICI探测器, 收集极表面介质为C和F. 其中C的 $(n, p)$ 反应阈值为14.47MeV, 在中子能量为15MeV时作用截面小于2mb, 因而由此引起的干扰电流可以忽略不计. F的 $(n, p)$ 反应阈值为4.97MeV, 在中子能量小于20MeV时, 作用截面小于50mb, 计算估计的中子灵敏度在 $10^{-23} \text{C}\cdot\text{cm}^2$ 量级, 比相应的 $\gamma$ 灵敏度低2个量级以上. 不过, 目前国内尚无足够强的脉冲中子源能够对ICI探测器的中子直照灵

敏度、 $\gamma/n$ 分辨能力进行直接的测量. 对采用Fe材料作电荷收集极的康普顿探测器<sup>[1, 2]</sup>,  $^{56}\text{Fe}$ 的 $(n, p)$ 反应阈值为2.9MeV,  $(n, p)$ 平均作用截面比C和F略大, 因此, 在 $n/\gamma$ 混合场中测量 $\gamma$ 信号时, ICI探测器的 $\gamma/n$ 分辨能力优于康普顿探测器.

下面, 采用强度-时间谱比较法来进一步说明探测器的 $\gamma/n$ 分辨能力. 辐射源同时产生的脉冲中子、 $\gamma$ 信号, 经过一段飞行距离后, 中子信号在时间上滞后于 $\gamma$ 信号到达探测器. 当中子信号强度比 $\gamma$ 信号强度高, 如果探测器没有 $\gamma/n$ 分辨能力, 其测量强度-时间谱将发生畸变. 探测器的 $\gamma/n$ 分辨能力为1:1时, 测出的 $\gamma$ 强度-时间谱将如图8(a)所示(图中 $Y_n$ 表示入射脉冲中子强度-时间谱、 $Y_\gamma$ 表示入射脉冲 $\gamma$ 强度-时间谱、 $Y_n + Y_\gamma$ 表示探测器输出强度-时间谱). 随着探测器 $\gamma/n$ 分辨能力的提高, 测量的 $\gamma$ 强度-时间谱将接近原 $\gamma$ 时间-强度谱. 探测器的 $\gamma/n$ 分辨能力达到50:1时, 测出的 $\gamma$ 强度-时间谱如图8(b)所示, 可见测量结果基本代表了原 $\gamma$ 强度-时间谱. 据此可以得出, 当探测器的 $\gamma/n$ 分辨能力大于50:1时, 中子干扰的影响就可以忽略, 探测器可用于 $n/\gamma$ 混合场脉冲 $\gamma$ 时间-强度谱测量.

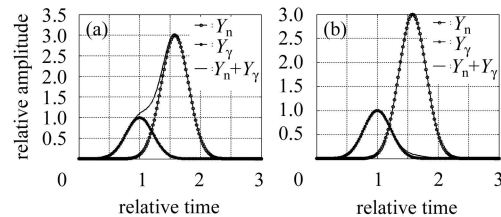


图8 不同 $\gamma/n$ 分辨能力的探测器测量强度-时间谱示意图  
(a) 探测器 $\gamma/n$ 分辨能力1:1; (b) 探测器 $\gamma/n$ 分辨能力50:1.

### 5 ICI探测器应用

将研制的ICI探测器应用于强 $n/\gamma$ 混合场脉冲 $\gamma$ 强度-时间谱测量, 得到了很好的结果. 该混合辐射场的中子强度比 $\gamma$ 强度高出数倍, 且中子和 $\gamma$ 射线在脉冲宽度延续的时间内到达测点(重叠), 测量的 $\gamma$ 强度-时间谱如图9所示. 测量得到的 $\gamma$ 峰值强度、特征时间、强度-时间谱面积等参数与其他 $\gamma$ 探测器获得的结果一致, 测量结果说明ICI探测器的 $\gamma/n$ 分辨能力能够满足强 $n/\gamma$ 混合场脉冲 $\gamma$ 强度-时间谱测量的要求.

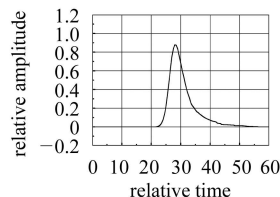


图9 ICI探测器在强n/γ混合场中测得的γ时间-强度谱

本项目得到西北核技术研究所中子项目组全体成员、 $^{60}\text{Co}$ 项目组成员、中国科学院近代物理研究所加工厂沈汉良先生的热情帮助,在此深表谢意.

## 参考文献(References)

- LIU Zhao-Qing et al. Pulse radiation Measurement. Beijing: Science Press, 1994. 186—196 (in Chinese)  
(刘兆庆等. 脉冲辐射场诊断技术. 北京: 科学出版社, 1994. 186—196)
- NI Yuan-Xing. Pulse Radiation Measurement and Diagnosis. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 1997. 64—77 (in Chinese)  
(倪源兴. 脉冲射线测量和诊断技术. 西安: 西北核技术研究所, 1997. 64—77)
- Ebert P J, Lauzon A F. Vacuum Diode Detector for Measuring High Intensity Gamma-Ray Flux. Rev. Sci. Instr., 1967, **38**(12): 1747—1752
- Fewell T R. Compton Diodes: Theory and Development for Radiation Detectors: SC-DR-720118. 1972
- Knoll G F. Radiation Detection and Measurement[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000
- Stevens J. Design and Characterization of an Absolute Gamma-Ray Intensity Detection: EGG1183-2288. 1972
- Artuso J, Stevens J. Linearity, Time Domain Reflector Meter and Fourier Analysis Studies of an Evacuated Compton Detector: EGG 1183—2277. 1971
- Ebert P J, Lauzon A F. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1966, **NS-13**(2): 735—741
- Briesmeister J B. MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport code: LA-12625-M-Manual. 1997
- OUYANG X P, LI Z F, WANG Q S et al. HEP & NP, 2005, **29**(4): 399—403 (in Chinese)  
(欧阳晓平, 李真富, 王群书等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(4): 399—403)
- OUYANG X P, LI Z F, HUO Y K et al. HEP & NP, 2001, **25**(11): 1100—1105 (in Chinese)  
(欧阳晓平, 李真富, 霍裕昆等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(11): 1100—1105)
- OUYANG X P, LI Z F, WANG Q S et al. Acta Physica Sinica, 2005, **54**(10): 4643—4647 (in Chinese)  
(欧阳晓平, 李真富, 王群书等. 物理学报, 2005, **54**(10): 4643—4647)

# ICI Detector for Measuring Gamma-Ray Fluxes in Mixed Gamma-Neutron Fields

OUYANG Xiao-Ping<sup>1,2;1)</sup> ZHANG Zhong-Bing<sup>2</sup> WANG Qun-Shu<sup>1,2</sup> WANG Wei<sup>2</sup>

1 (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2 (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract** A new gamma-ray detecting device called ICI detector has been developed and tested. Like vacuum Compton diode(VCD) and dielectric Compton diode(DCD) generally used in pulsed gamma-ray measurements, ICI detector operates by utilization of the Compton effect and has low sensitivity to gamma-ray fluxes, very fast time response, large linearity and wide dynamic range, it is desired for using the device to measure intense and rapidly changing gamma-ray fluxes. Compared to the existing VCDs and DCDs, the detector requires no vacuum in operation and the active volume is only 2mm thick.

**Key words** ICI detector, gamma-ray, pulsed radiation detection

Received 9 June 2005

1) E-mail: oyxp2003@yahoo.com.cn, oyxp@yahoo.com