

ICI 探测器的时间响应特性研究

张忠兵 欧阳晓平 王 兰 黎春华 马彦良

(西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 基于集电型探测器的等效电路模型得到了 ICI 探测器的输入-输出等效电路,应用实际测量的分布电容和电感计算得到 ICI 探测器的时间响应。采用快脉冲 X 射线源实验获得 ICI 探测器时间响应为 (0.677 ± 0.144) ns。实验结果与理论计算结果的一致验证了理论模型的正确性。研究结果表明,ICI 探测器具有亚纳秒时间特性,可以用于快脉冲 γ 射线强度的测量。

关键词 探测器, 时间响应, γ 射线, 脉冲辐射探测

中图分类号 O571, O572

测量快辐射脉冲信号时,探测系统时间响应的快慢直接影响测量数据质量和测量结果的可靠性。为了满足中子、 γ 射线混合场中的高强度、快上升时间的脉冲 γ 射线测量需要,我们研制了一种基于 Compton 作用机制的新型探测器——ICI 探测器^[1],其结构为前绝缘介质-导体-后绝缘介质(Insulator-Conductor-Insulator)。探测器的时间响应是探测器研制必须考虑的参数,是衡量其能否适用于探测快辐射脉冲信号的重要指标^[2,3]。ICI 探测器研制过程中必须研究其时间响应特性,也即研究在 $\delta(t)$ 脉冲射线源的作用下 ICI 探测器输出响应。通常情况下,可将探测器的时间响应分为两部分^[4]:1) 脉冲射线同探测灵敏单元作用的时间过程;2) 探测灵敏单元在脉冲射线作用下产生的电信号在输出电路中的时间过程,这与探测器几何结构、寄生参数、信号引出分布参数等因素有关。本文从射线与探测灵敏单元作用过程和探测器的几何结构两方面研究 ICI 探测器的时间响应特性。

1 理论模型

基于康普顿效应研制的 ICI 探测器主要用于测量脉冲 γ 射线强度和时间谱,如图 1 所示,其由入射窗、出射窗、金属外壳和探测灵敏单元组成。探测灵敏单元由前绝缘介质(聚四氟乙烯薄膜)、电荷收集极(石墨片)、后绝缘介质(聚四氟乙烯片)组成。前聚四氟乙烯薄膜厚度 <0.1 mm,后聚四氟乙烯片厚度 <1 mm,电荷收集极石墨片厚度 <2 mm。ICI 探测器探测灵敏单元结构及其工作原理如图 2 所示,来自辐射通道的 γ 射线束与前绝缘介质作用发射的电子(包括一次电子和二次电子)部分沉积在电荷收

集极中; γ 射线束与电荷收集极作用发射电子后,使收集极带正电荷; γ 射线束与后绝缘介质作用,发射电子进入电荷收集极中。这三部分电荷在收集极中的净电荷形成信号,通过与收集极相连的引线输出。因此,ICI 探测器是一种集电型探测器。

根据 ICI 探测器的结构和探测 γ 射线的工作原理,可将 ICI 探测器的时间响应分成两个主要部分来考虑:1) γ 射线同探测灵敏单元作用的时间过程,该时间过程包括 γ 射线同探测灵敏单元中的聚四氟乙烯和石墨作用产生次级电子的时间、次级电子在探测灵敏单元中的飞行时间。 γ 射线同物质相互作用时间约为 10^{-19} s^[5],由于探测器灵敏单元的厚度小于 2 mm,则 γ 射线在绝缘介质(聚四氟乙烯)中产生的电子进入收集极(石墨)的时间并在其内产生电子的发射时间均小于 10^{-10} s。因此,在 $\delta(t)$ 脉冲 γ 射线的作用下,探测灵敏单元产生信号的时间近似看作 $\delta(t)$;2) 次级电子电荷的收集和电信号在电路中的形成时间过程,该时间过程与 ICI 探测器几何结构尺寸、探测器内部固有的寄生参数(分布电阻、分布电容和电感)、信号引出分布参数等因素有关,研究 ICI 探测器的时间响应主要是考虑与这一部分相关的时间特性。

将 γ 射线与 ICI 探测器的探测灵敏单元相互作用在收集极上形成电信号看作一个具有集总参数的电流发生器。根据集电型探测器的等效电路^[6]可以得到 ICI 探测器等效电路如图 3 所示,图中 C 为收集极与探测器外壳之间的分布电容; R_i 为探测器的内阻; L 为信号输出引线的分布电感; R_o 为输出负载电阻; $g_o(t)$ 是脉冲 γ 射线在探测灵敏单元的收集极上产生的信号; $g(t)$ 是探测器的输出信号。

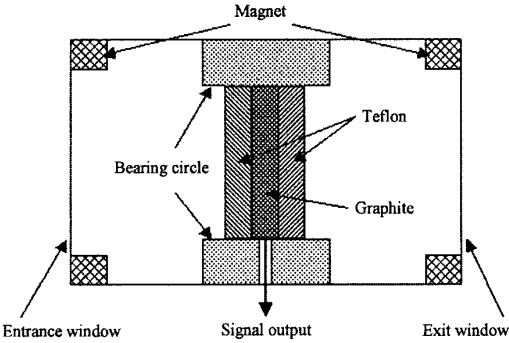


图 1 ICI 探测器结构示意图
Fig.1 Schematic of the ICI detector

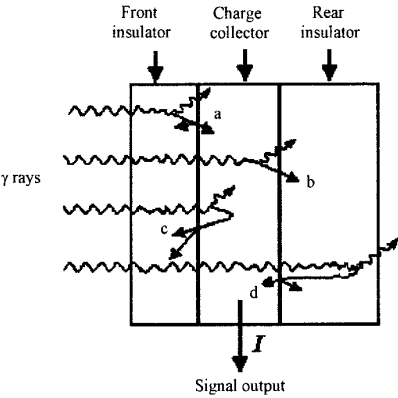


图 2 ICI 探测器探测灵敏单元工作原理图
Fig.2 The basic configuration and detection mechanism of ICI detector for gamma-ray

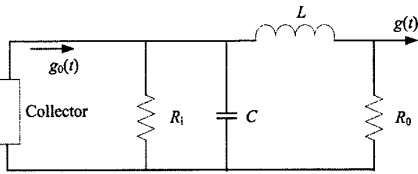


图 3 ICI 探测器输-输出等效电路图
Fig.3 Equivalent circuit of the ICI detector

如上所述，在 $\delta(t)$ 脉冲 γ 射线的作用下，ICI 探测器的探测灵敏单元产生的信号 $g_0(t)$ 近似看作 $\delta(t)$ 。收集极和金属外壳之间的绝缘支架(图 1)的表面电阻和体电阻构成了内阻 R_1 ，由于绝缘支架采用的材料是聚四氟乙烯，其表面电阻和体电阻均大于 $10\text{ M}\Omega$ 。为了与传输线的特性阻抗($50\text{ }\Omega$ 、 $75\text{ }\Omega$)匹配，探测器输出负载 R_0 通常也取 $50\text{ }\Omega$ (或 $75\text{ }\Omega$)。

因此，在图 3 所示的等效电路中， $R_1 \gg R_0$ 。根据图 3 所示的电路可以推导得出 ICI 探测器的冲激响应 $g(t)$ 表达式为

$$g(t) = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \left(\exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) \tag{1}$$

式中， $\tau_1 = L/R_0$ ， $\tau_2 = R_0 C$ 。

2 探测器结构参数对时间响应的影响

通常采用探测器对 $\delta(t)$ 脉冲辐射响应的前沿时间 t_r 研究探测器时间响应特性。式(1)给出冲激响应 $g(t)$ 表征了 ICI 探测器对 $\delta(t)$ 脉冲 γ 射线输入的时间响应特性。由式(1)，ICI 探测器的时间响应特性主要受输出负载电阻 R_0 、分布电容 C 和分布电感 L 影响。负载电阻 R_0 取值为 $50\text{ }\Omega$ ，分布电感 L 取值为 $0.1\text{ }\mu\text{H}$ 时，应用式(1)的冲激响应函数求得 ICI 探测器时间响应前沿时间 t_r 与分布电容的关系如图 4 所示。该结果表明，分布电容增大时，ICI 探测器时间响应的前沿时间 t_r 也随之而增大，为减小前沿时间 t_r ，则应尽量减小分布电容。

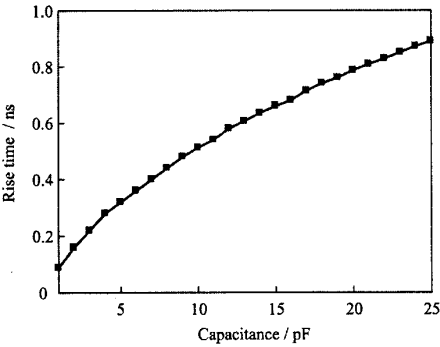


图 4 ICI 探测器时间响应上升时间 t_r 与分布电容的关系

Fig.4 The rise time of the ICI detector versus the distributed capacitance

我们研究了 ICI 探测器的结构尺寸与分布电容之间的关系。设探测器结构尺寸为：收集极直径 100 mm 、金属外壳长度 220 mm ，采用 Ansoft 软件程序^[7]计算得到探测器的分布电容(不包括高频电缆头的分布电容)随着金属外壳直径的变化如图 5 所示。可以看出，金属外壳直径从小向大的方向增加时，分布电容由大变小。

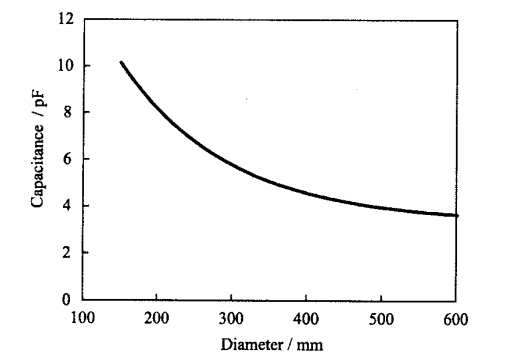


图 5 分布电容随着金属外壳直径的变化关系

Fig. 5 Variation of the distributed capacitance versus the metal shell diameter

考虑到探测灵敏单元直径与探测 γ 射线灵敏度的关系,探测灵敏单元直径须 >40 mm。金属外壳直径大,其分布电容当然较小,但是设计过程中须考虑探测器尺寸大小的要求,金属外壳直径又不能设计得太大。

当探测器金属外壳的直径确定为 150 mm、长度 220 mm 时,测量得到的几种不同收集极直径(ϕ_c)对应的分布参数如表 1 所示。从表 1 中可以看出,收集极直径由大变小时,则分布电容也随之变小,而分布电感没有变化。在研究中发现,收集极直径小到 10 mm 时,甚至为零时,也不会使探测器的分布电容小于 5 pF,其原因是探测器信号输出采用的高频电缆头存在分布电容(约为 5 pF)。

表 1 测量得到的 ICI 探测器分布参数和计算的响应时间

Table 1 Distribution parameters of the ICI detector and time response

ϕ_c / mm	C / pF	L / μ H	τ_2 / ns	τ_1 / ns	t_r / ns	t_{FWHM} / ns
74	12.38	0.1	0.619	2.0	0.59	2.88
50	8.14	0.1	0.407	2.0	0.45	2.47
40	7.02	0.1	0.35	2.0	0.40	2.35

按表 1 给出的分布电容和电感(负载电阻 R_0 取值为 50 Ω)计算时间常数 $\tau_1(L/R_0)$ 和 $\tau_2(R_0C)$,并将 τ_1 和 τ_2 代入式(1),得到 ICI 探测器的时间响应函数如图 6 所示。表 1 也给出了由时间响应函数求得的前沿时间 t_r 和半高宽 t_{FWHM} 。这些结果表明,探测灵敏单元的收集极直径越小,时间响应越快。探测灵敏单元的收集极直径 <74 mm 时,ICI 探测器的前沿时间 $t_r<0.59$ ns。

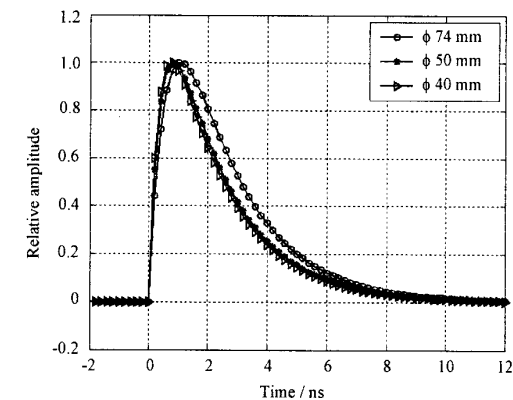


图 6 ICI 探测器的时间响应函数

Fig. 6 Time response function of the ICI detector

3 实验研究

3.1 实验装置及测量结果

为验证理论模型获得的 ICI 探测器时间响应的正确性,采用四用辐射仪输出的快脉冲 X 射线对探测器时间响应进行了实验测量,实验装置如图 7 所示。四用辐射仪输出的快脉冲 X 射线经过准直器入射到 ICI 探测器(探测灵敏单元直径 74 mm),探测器输出的信号由宽带数字示波器记录。四用辐射仪快脉冲 X 输出通道输出脉冲 X 射线时,同时也伴随输出时间特性与脉冲 X 射线相同的脉冲电子,实验测量得到 ICI 探测器对脉冲辐射响应的输出波形如图 8 所示。测量波形为下降沿很快的负脉冲,由于源的电磁干扰、探测器输出阻抗与电缆阻抗的不完全匹配等因素引起了波形后面的振荡。

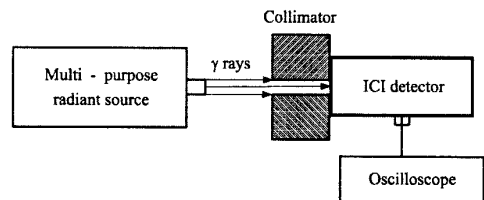


图 7 ICI 探测器时间响应实验装置示意图

Fig.7 Experiment set-up for measuring the time response of the ICI detector

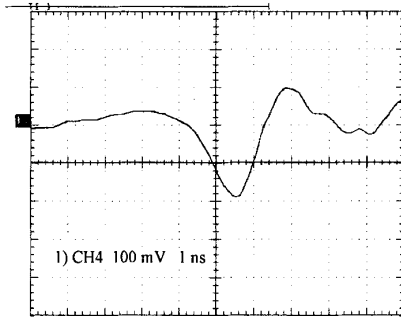


图8 在四用辐射仪实验装置上测量得到的 ICI 探测器时间响应波形

Fig.8 Time response of the ICI detector to the fast pulsed γ -ray in the multi-purpose radiant source

根据测量系统各部分时间响应的关系^[6], ICI 探测器对快辐射脉冲的时间响应 t_{ICI} 可表示为,

$$t_{\text{ICI}} = \sqrt{t_r^2 - t_{\text{ry}}^2 - t_{\text{rs}}^2} \quad (2)$$

式中, t_r 为示波器记录波形的前沿时间, t_{ry} 为信号源前沿时间, t_{rs} 为记录系统的响应时间。

四用辐射仪输出脉冲 X 射线的前沿时间 t_{ry} 约为 0.6 ns, 信号传输电缆和示波器组成的记录系统带宽为 1 GHz, 由带宽与信号上升时间的关系^[8]得到记录系统的响应时间 $t_{\text{rs}} = 0.35$ ns。由示波器记录波形得到测量的前沿时间 $t_r = 0.97$ ns。将 t_r 、 t_{rs} 、 t_{ry} 代入式(3), 求得 ICI 探测器的时间响应 $t_{\text{ICI}} = 0.677$ ns。

3.2 测量不确定度分析

脉冲辐射源的前沿时间 t_{ry} 、记录系统的响应时间 t_{rs} 和记录波形的前沿时间 t_r 可视为彼此不相关的量, 则由式(4)给出的 ICI 探测器时间响应 t_{ICI} 的测量不确定度, 可用合成标准不确定度^[9]来表示

$$u_c(t_{\text{ICI}}) = \left[\left(\frac{\partial t_{\text{ICI}}}{\partial t_r} u_c(t_r) \right)^2 + \left(\frac{\partial t_{\text{ICI}}}{\partial t_{\text{ry}}} u(t_{\text{ry}}) \right)^2 + \left(\frac{\partial t_{\text{ICI}}}{\partial t_{\text{rs}}} u(t_{\text{rs}}) \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: $\partial t_{\text{ICI}} / \partial t_r = t_r / \sqrt{t_r^2 - t_{\text{ry}}^2 - t_{\text{rs}}^2}$;

$$\partial t_{\text{ICI}} / \partial t_{\text{ry}} = t_{\text{ry}} / \sqrt{t_r^2 - t_{\text{ry}}^2 - t_{\text{rs}}^2};$$

$$\partial t_{\text{ICI}} / \partial t_{\text{rs}} = t_{\text{rs}} / \sqrt{t_r^2 - t_{\text{ry}}^2 - t_{\text{rs}}^2}$$

$u_c(t_r)$ 为记录波形前沿时间的合成标准不确定度, 该参数与数字示波器采样频率的不确定度、示波器内部晶体的短期稳定性和示波器垂直分辨率引入时间分辨的不确定度相关。对于该实验测量中采用的数字示波器, 通常取 $u_c(t_r) = 0.079$ ns; $u(t_{\text{ry}})$ 为脉冲辐射源前沿时间的标准不确定度, 通常取 $u(t_{\text{ry}}) = 0.1$ ns; $u(t_{\text{rs}})$ 为记录系统响应时间的标准不确定度, 通常取 $u(t_{\text{rs}}) = 0.01$ ns。

因此, 根据式得到测量 ICI 探测器时间响应的合成标准不确定度 $u_c(t_{\text{ICI}}) = 0.144$ ns。

4 结束语

研究了 ICI 探测器的分布电容随着探测灵敏单元结构尺寸的变化关系。根据集电型探测器的等效电路模型得到的 ICI 探测器的输入-输出等效电路, 研究得到 ICI 探测器(灵敏单元直径小于 74 mm)时间响应小于 0.59 ns。在四用辐射仪实验装置上实验得到 ICI 探测器的时间响应为 (0.677 ± 0.144) ns, 该实验结果与理论结果基本一致, 从而验证了所采用理论模型的正确性。理论和实验研究结果均表明 ICI 探测器具有快的时间响应特性, 该探测器可以用于具有亚纳秒时间特性的脉冲 γ 射线测量。

致谢 本工作得到西北核技术研究所黄涛和从培天等大力帮助, 在此深表感谢。

参考文献

- 1 欧阳晓平, 张忠兵, 王群书, 等. 高能物理与核物理, 2006, 30(3): 228—231
OUYANG Xiaoping, ZHANG Zhongbing, WANG Qunshu, et al. HEP & NP, 2006, 30(3): 228—231
- 2 刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术. 北京: 科学出版社, 1994, 186—196
LIU Qingzhao. Pulse radiation measurement. Beijing: Science Press, 1994, 186—196
- 3 欧阳晓平. 低强度脉冲裂变中子探测技术研究. 上海: 复旦大学(博士学位论文), 2002
OUYANG Xiaoping. Studies on the detection of pulsed fission neutron from low-intensity radiation sources. Shanghai: Fudan University(Ph. D. Dissertation), 2002
- 4 Artuso J, Stevens J. Linearity, time domain, reflectometer and Fourier analysis studies of an evacuated Compton detector, EGG 1183—2277
- 5 K H 穆辛著. 沈志通, 殷雄, 等译. 实验核物理学. 北京: 原子能出版社, 1996, 166—167

- SHEN Zhitong, YIN Xiong, *et al.*(Translated). Experimental nuclear physics, Beijing: Atomic Energy Press, 1996, 166—167
- 6 3 A 阿利比科夫, А И 维利坚尼科夫, О В 科兹洛夫著. 宿昌厚, 译. 脉冲电离辐射探测器. 北京:原子能出版社, 1983, 22—25
- SU Changhou(Translated). Pulse ionization radiation retector. Beijing: Atomic Energy Press, 1983, 22—25
- 7 Ansoft Maswell 3Duser's Guide, [Online]. Available: <http://www.ansoft.com>
- 8 康光华. 电子技术基础. 北京:高等教育出版社, 1988, 306—308
- KANG Guanghua. Foundation of electronic technology. Beijing: Higher Education Press, 1988, 306—308
- 9 叶德培. 测量不确定度. 北京:国防工业出版社, 1996, 22—23
- YE Depei. Measurement uncertainty. Beijing: National Defence Industry Press, 1996, 22—23

Time response of the ICI detector

ZHANG Zhongbing OUYANG Xiaoping WANG Lan LI Chunhua MA Yanliang

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

Abstract The equivalent circuit of the ICI detector has been established in this paper. The rise time of the ICI detector is 0.59 ns, which is calculated with the distributed parameters. The experiment for measuring the time response of the ICI detector is carried out on the multi-purpose radiant source. The time response obtained by the experiment is (0.677 ± 0.144) ns, which agrees well with the calculation result. It is shown that the ICI detector has sub-nanosecond time response property and can be used to measure the rapidly changing pulsed gamma-ray flux.

Key words Detector, Time response, Gamma-ray, Pulsed radiation detection

CLC O571, O572