

# 中子闪烁探测器前端电子学的抗饱和和改进\*

李 锋, 江 晓, 林成生, 陈 炼, 梁福田, 金 革

(中国科学技术大学 安徽省物理电子学重点实验室, 合肥 230026)

**摘 要:** ICF 实验会产生大量 X 射线和  $\gamma$  射线,其在光电倍增管(PMT)中产生的脉冲信号过大,导致前端电子学电路饱和,严重影响电路的正常工作和中子飞行时间的测量。结合前端电子学系统的结构,对电路饱和的原因进行了深入分析,提出了非线性抗饱和和电路改进方案,并进行了仿真和实验研究。仿真结果表明,该设计方案能够大幅衰减大信号而确保小信号的通过,信号通过后电路基线能在 35 ns 内恢复;电路的实测结果与仿真结果基本相同。这表明:采取的方案简洁有效,能够确保输入高达数十 V 脉冲的情况下电路的正常工作。目前这一电路已经得到应用,并将安装在某大型激光原型的大阵列中子探测器上。

**关键词:** ICF; 前端电子学; 抗饱和; 闪烁探测器

**中图分类号:** TL82 **文献标志码:** A

为了研究 ICF 实验聚变燃料离子温度和燃料密度,将在某大型激光原型上建造一个拥有 960 个闪烁探测器的大阵列中子探测器<sup>[1-4]</sup>。目前已经建立了一个 16 通道探测器与电子学原型系统,其结构框图如图 1 所示。

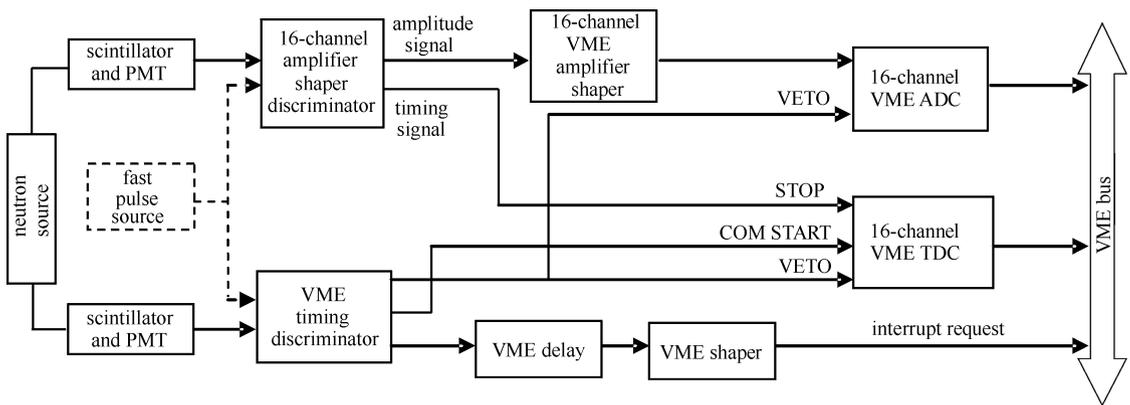


Fig. 1 Schematic of 16-channel detectors and electronics prototype

图 1 16 通道探测器与电子学原型系统框图

宇宙线测试和电子学测试表明各个插件都能够达到所要求的性能指标,但是,在某大型激光原型上进行的实验中发现,在中子之前到达的 X 射线和  $\gamma$  射线在光电倍增管(PMT)中产生的脉冲信号过大,导致电子学系统的接收电路和放大电路饱和,影响到需要测量的次级中子信号,当中子在 PMT 中产生的脉冲信号到达时,电路仍未能恢复正常工作,直接影响了对次级中子的测量。因此,我们需要对电子学系统的接收电路进行抗饱和和改进,使 X 射线和  $\gamma$  射线产生的脉冲信号不再对中子信号的探测与测量产生影响。

## 1 大脉冲对信号接收电路的影响

### 1.1 ICF 实验信号的特征

ICF 内爆产生的 X 射线、 $\gamma$  射线和各种能量范围的中子<sup>[5]</sup>都能在 PMT 中产生电脉冲信号<sup>[6]</sup>。其中 X 射线、 $\gamma$  射线由于数量较多,在 PMT 中产生的信号幅度可能高达 50 V,信号脉冲宽度可能达到数十 ns;初级中子尽管产额高,会在 PMT 中产生几十 V 的脉冲信号,但是由于初级中子在次级中子之后几百 ns 才到达,故而不会对次级中子的测量产生影响,可以不用考虑;而次级中子在某大型激光原型装置上进行的 ICF 实验中产

\* 收稿日期:2008-07-10; 修订日期:2008-11-06

基金项目:国家高技术发展计划项目;博士点基金项目资助(20050358047)

作者简介:李 锋(1980—),男,博士后,主要从事物理电子学方向的研究; phonelee@ustc.edu.cn.

通信作者:金 革(1960—),男,教授,博士生导师; goldjin@ustc.edu.cn.

额很低,平均每个 PMT 探测到的次级中子数量不到 1 个<sup>[7]</sup>,次级中子在 PMT 中产生的信号为幅度  $-10\text{ mV} \sim -1\text{ V}$ ,宽度约  $4\text{ ns}$ ,上升时间约  $1.5\text{ ns}$  的短快脉冲。由于 X 射线、 $\gamma$  射线产生的信号与次级中子产生的信号相差极其悬殊,而且大脉冲信号在次级中子信号之前到达,因此,信号接收电路需要对大脉冲进行处理,以尽量降低其对次级中子信号的影响。

## 1.2 对信号接收电路的要求

某大型激光原型装置上进行的 ICF 实验中, $\gamma$  射线与感兴趣中子到达中子探测器阵列的时间如表 1 所示<sup>[8]</sup>。

表 1  $\gamma$  射线与各种中子到达探测器阵列的飞行时间

Table 1 Flight time of gamma rays and different neutrons arriving at the detector array

species	energy/MeV	velocity/( $\text{cm} \cdot \text{ns}^{-1}$ )	distance/m	flight time/ns
$\gamma$ rays	any	29.98	16.67	55.60
secondary neutrons(high)	17.10	5.64	16.67	295.57
D-T neutrons	14.05	5.14	16.67	324.32
secondary neutrons(low)	11.80	4.71	16.67	353.93
D-D neutrons	2.45	2.16	16.67	771.76

由表 1 可以看出, $\gamma$  射线与高能次级中子在光电倍增管中产生的信号之间有约  $240\text{ ns}$  的时间间隔,为了能正确地探测与测量次级中子产生的小幅度快脉冲,前端电子学的信号接收电路需要在这  $240\text{ ns}$  的时间内对幅度达数十 V、宽度数十 ns 的大脉冲进行处理。在此期间,信号接收电路不但要接受大幅度信号入射的考验,还要在次级中子信号到达之前将基线恢复到零,减小次级中子信号所受到的干扰。

## 2 电路改进与仿真

### 2.1 电路改进分析

首先分析一下改进前的前端电子学信号接收电路,如图 2 所示<sup>[9]</sup>。可以看出,信号接收电路对输入信号作了传输匹配和交流耦合,并加入了保护二极管电路,其作用是为了防止输入信号过大使前置放大器电路饱和。这种设计的缺点在于:保护二极管在输入信号过大的导通状态下呈电阻特性,会发生瞬间过载,使前置放大器电路进入饱和;呈电阻特性的二极管与传输匹配电阻并联,使输入阻抗与传输电缆失配,产生反射;当输入信号非常大时,保护二极管也会饱和,电路的退饱和需要一个比较长的过程。在 ICF 实验中,X 射线、 $\gamma$  射线在 PMT

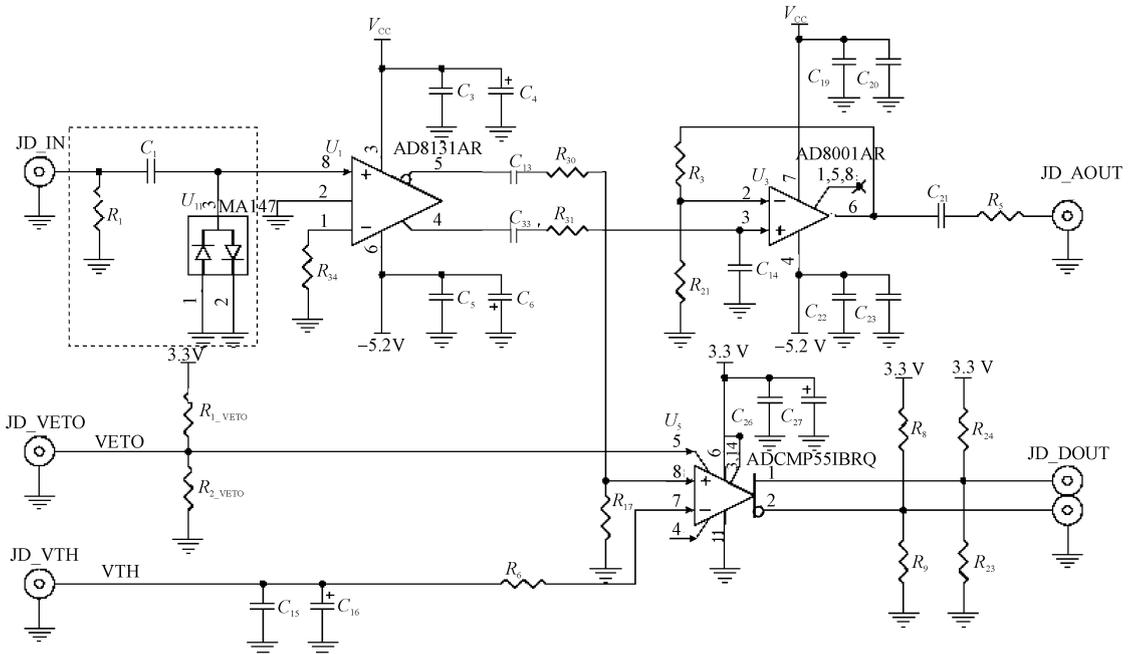


Fig. 2 Front-end electronics circuit before modification

图 2 前端电子学电路改进前的设计

中产生的大脉冲信号将上述缺点全部体现出来,输出信号必然发生错误。在这种情况下,射线所产生的大幅度脉冲使得输入信号基线需要较长时间才能回零,这必然影响了次级中子产生的信号波形,使得测量不准确,严重时会把次级中子信号湮没。

故而,对电路做的改进将会有如下要求:

(1) 对  $\gamma$  射线所产生的大幅度宽脉冲,信号接收电路应该将信号大幅度衰减到至少不会使其后续电路发生过饱和的程度,并在尽可能短的时间内使信号基线恢复到零;

(2) 对次级中子产生的窄快脉冲,因其本来信号就较小难以探测,信号接收电路不能对其有过多的衰减,要尽可能的保留其信号形状和幅度;

(3) 由于整个大面积中子探测器阵列将由其 16 通道原型系统扩展而成,因此对电路所做的改进必须简洁有效,以方便复制。

## 2.2 电路改进方案

改进后的电路的功能应该使小信号通过时其形状、幅度尽量不变,而对大信号产生大幅衰减。为了达到这个要求,对电路作一些改进:输入信号经过接收电路加到前置放大器的输入端,对信号接收电路而言,可以将后面的前置放大器电路等效为一个电阻  $R_3$ ,其阻值为前置放大器的输入阻抗。为了压制大幅度信号,可以用一个高速二极管与这个等效电阻并联。为防止信号幅度过大时二极管发生过饱和,在电路中串联一个电阻  $R_2$ ,以达到降低加到箝位二极管上信号电平的目的。

改进电路的等效电路如图 3 所示。其中  $R_1$  为输入信号脉冲的终端匹配电阻;串联的分压电阻为  $R_2$ ;后面的前置放大器的输入阻抗为  $R_3$ ;  $R_d$  为二极管的阻抗,它是一个随着加在其两端电平的变化而变化的量,可以等效为一个非线性电阻。通过信号接收电路后的电压,即  $R_3$  两端的电压

$$V_o = V_i \frac{R_3 // R_d}{R_2 + R_3 // R_d} \quad (1)$$

式中:  $R_3 \approx 1.25 \text{ k}\Omega$ , 取  $R_2 = 1.25 \text{ k}\Omega$ 。

当输入信号幅度低于二极管正向导通电压时,  $R_d$  很大,表现为高阻态,  $R_3 // R_d \approx R_3$ , 此时通过信号接收电路的电压

$$V_o \approx V_i \frac{R_3}{R_2 + R_3} \approx \frac{V_i}{2} \quad (2)$$

也就是说,小信号通过信号接收电路将会衰减一半。

当输入信号幅度高于二极管正向导通电压时,  $R_d$  阻抗大约为  $50 \Omega$ ,  $R_3 // R_d \approx R_d$ , 此时通过信号接收电路的电压

$$V_o \approx V_i \frac{R_d}{R_2 + R_d} \leq \frac{V_i}{25} \quad (3)$$

即当大信号通过时其电压幅值将被衰减为原信号的  $1/20$  以下,衰减后的电压不会导致二极管及后续电路过饱和。

综上所述,这种电路方案在理论上可以满足对改进电路的要求。值得注意的是,由于  $R_d$  由  $V_i$  决定,而由上述分析可以知道,  $V_o$  也由  $V_i$  唯一决定,经过分析测量可以得到  $V_i$  随  $V_o$  的变化曲线,因此知道了  $V_o$  可以反过来推算出  $V_i$  的幅度大小,这使得实验数据处理时输入信号波形的重建成为可能。

下面分析一下大信号对电路匹配电阻的影响。此时二极管呈电阻特性,表现为一个约  $50 \Omega$  的电阻。输入信号的终端匹配电阻

$$R_T = R_1 // (R_2 + R_d // R_3) = 49.1 \Omega \quad (4)$$

$R_T$  与  $R_1$  相对误差为  $(R_1 - R_T) / R_1 \times 100\% = 3.7\%$ , 也就是说,输入大信号将导致终端匹配电阻的阻值产生  $3.7\%$  的变化,即传输阻抗失配,反映在电压上就是会有反射,电压反射系数<sup>[10]</sup>为  $(R_T - Z_0) / (R_T + Z_0) \approx -1.9\%$ 。如果输入信号幅度达到数十 V 时,反射电压可能超过 1 V,这可能会给后面的定时电路引入较大误

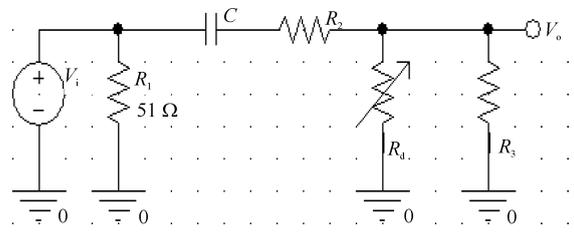


Fig. 3 Equivalent circuit of improved signal receiving circuit

图 3 信号接收电路改进方案等效电路图

差。

### 2.3 改进仿真

我们首先通过 OrCAD 仿真软件对这种改进思路进行有效性评估。图 4 为信号接收电路的 OrCAD 仿真电路图,分别用大幅度宽脉冲和小幅度脉冲作为输入信号。

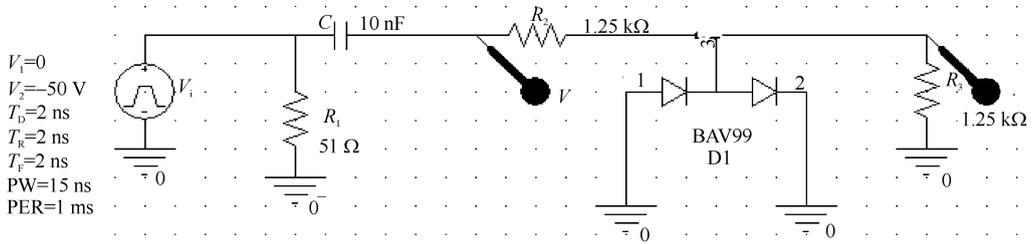


Fig. 4 OrCAD simulation schematic of the signal receiving circuit

图 4 信号接收电路的 OrCAD 仿真电路图

当输入上升时间 2 ns,宽度 15 ns,幅度 -50 V 的大幅度脉冲时,信号通过接收电路后,在等效电阻上的波形如图 5 所示。可以看出,-50 V 的大幅度脉冲已经被压制到约 -820 mV,信号尾部恢复到基线需要约 35 ns;在将信号宽度增至 50 ns 时,仿真幅度峰值仍然是 -820 mV,基线的恢复也是约 35 ns,这说明这种电路的输出信号最大幅度为 -820 mV,基线的恢复时间基本上是一个恒定的量。

当输入的信号为上升时间 2 ns,宽度 15 ns,幅度 -1 V 的小幅度脉冲时,仿真结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,小信号的幅度衰减了一半,这主要是因为电路中串联的分压电阻  $R_2$  与放大电路等效阻抗  $R_3$  分压造成的。

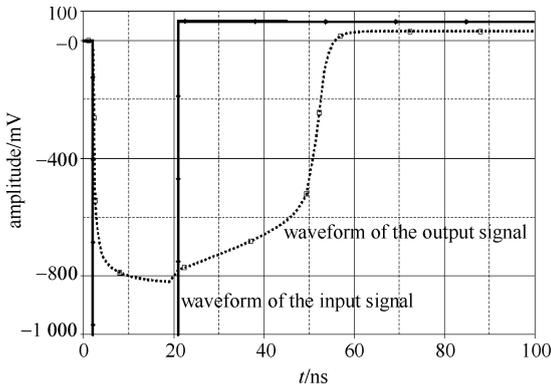


Fig. 5 Simulation result for large input signal

图 5 输入大信号时的仿真结果

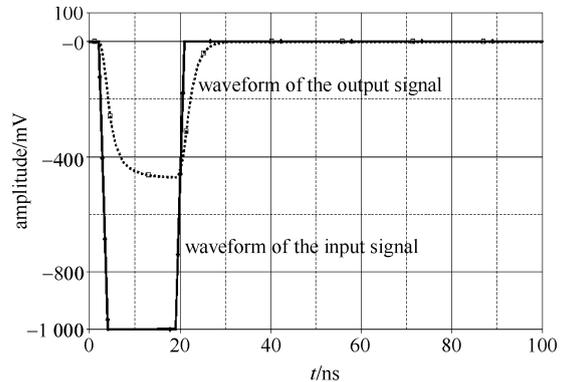


Fig. 6 Simulation result for small input signal

图 6 输入小幅度脉冲时的仿真结果

仿真结果表明对信号接收电路的改进能够大幅衰减大脉冲信号并迅速恢复基线,对小信号则能够尽可能地保持其波形,而且改进电路结构简单,容易复制,能够满足实验对信号接收电路改进的要求。

### 3 改进效果

改进后的电路如图 7 所示。电路中选用的保护二极管与仿真电路用的二极管在性能参数上基本相同。

图 8 中分别给出了当输入幅度达 -60 V 的大脉冲时,在电路的输入端(图 7 中①处)、通过接收电路到达放大器的输入端(图 7 中②处)、第一级放大器的输出端(图 7 中③处)以及整个前端电子学电路的幅度输出(图 7 中④处)的信号波形。

从图中可以看出,改进的信号接收电路能够很好地压制大脉冲的幅度,从而抑制大脉冲对放大器电路的冲击,经过约 50 ns 的时间后,放大器电路的基线就能恢复。实测结果在信号衰减比例、基线恢复时间等性能参数上与仿真结果基本一致。目前,前端电子学系统已经应用这一改进方案,并将被安装在某大型激光原型的大阵列中子探测器上。

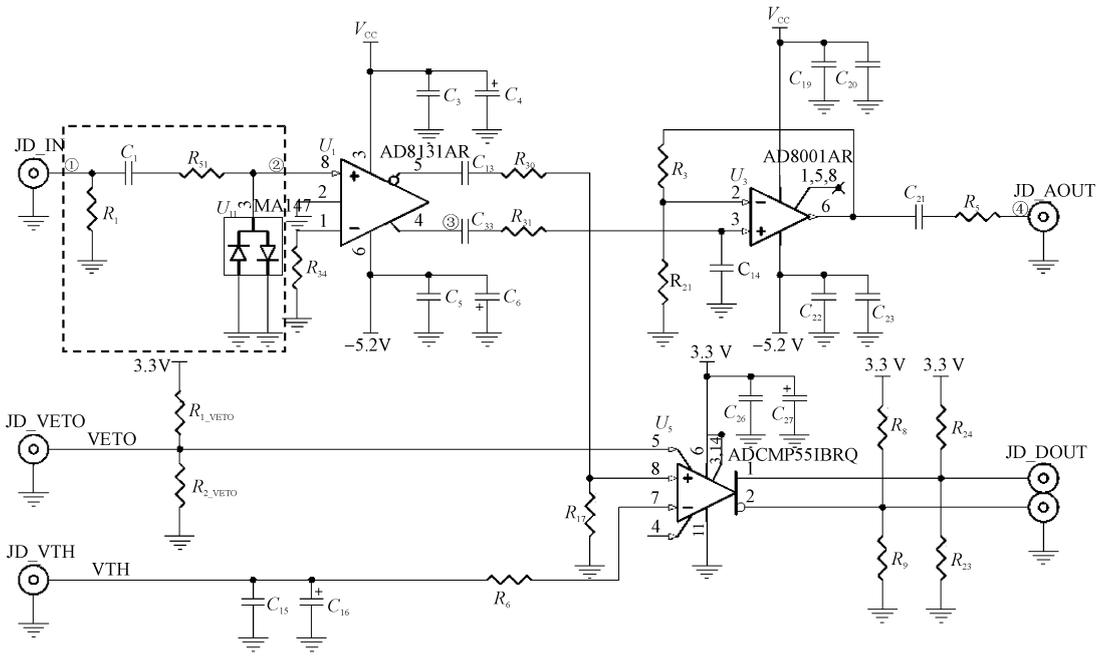


Fig. 7 Diagram of improved circuit

图 7 改进后的电路

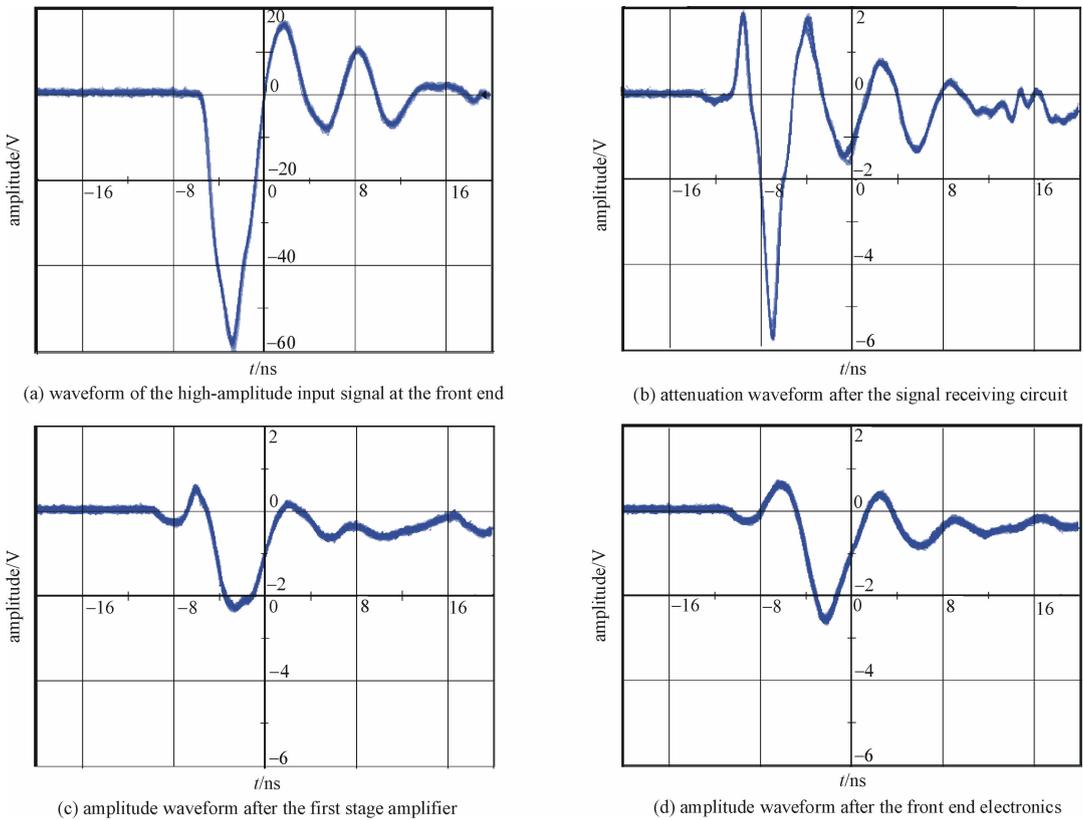


Fig. 8 Waveforms for large input signal from oscilloscope

图 8 输入大脉冲时示波器观察到的波形

### 4 结 论

通过对前端电子学系统改进前后的比较,说明对信号接收电路的改进能够满足抗饱和和改进的要求。由 X 射线和  $\gamma$  射线产生的大幅度脉冲在通过前端电路以后能够被很好地压制,信号基线恢复速度也比较快,不会对由次级中子产生的窄快小信号的探测和测量产生太大影响。

由于这种改进当大信号入射时,其终端匹配电阻会发生改变,产生传输反射,从而影响后面的定时电路,而

且输入小信号时信号幅度会衰减一半,故此电路仍然有改进的余地。从前面的分析可以得出:增大  $R_2$  可以有效减小终端匹配电阻的变化,从而减少电压反射,还能更进一步加强对大信号的衰减能力;如果使后面电路的输入阻抗  $R_3$  远大于串联电阻  $R_2$ ,小信号也能够基本保持其幅度大小而不衰减。因此可以通过挑选输入阻抗更大的前置放大器芯片并适当增大串联电阻  $R_2$  来进一步改进信号接收的电路。

### 参考文献:

- [1] Nelson M B, Cable M D. LaNSA: A large neutron scintillator array for neutron spectroscopy at Nova[J]. *Rev Sci Instrum*, 1992, **63**(10): 4874-4876.
- [2] Izumi N, Yamaguchi K, Yamagajo T, et al. A highly efficient neutron time-of-flight detector for inertial confinement fusion experiments[J]. *Rev Sci Instrum*, 1999, **70**(1): 1221-1224.
- [3] Glebov V Y, Stoeckl C, Sangster T C, et al. Prototypes of National Ignition Facility neutron time-of-flight detectors tested on OMEGA[J]. *Rev Sci Instrum*, 2004, **75**(10): 3559-3562.
- [4] 金革,江晓,李锋,等. 大面积中子探测器阵列研制[J]. 核电子学与探测技术, 2007, **27**(4): 617-620. (Jin Ge, Jiang Xiao, Li Feng, et al. nTOF detector array for ICF. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2007, **27**(4): 617-620)
- [5] Brysk H. Fusion neutron energies and spectra[J]. *Plasma Phys*, 1973, **15**: 611-617.
- [6] 徐克尊. 粒子探测技术[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1981. (Xu Kezun. Detection technology of particles. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1981)
- [7] 陈家斌. 大面积中子闪烁探测器阵列技术研究[J]. 中国核科技报告, 2006, (02): 38-47 (Chen Jiabin. Technique investigation on large area neutron scintillation detector Array. *China Nuclear Science and Technology Report*, 2006, (02): 38-47)
- [8] Robert E, David F S, Dale L H. Neutron time-of-flight ion temperature diagnostic for inertial-confinement-fusion experiments[J]. *Rev Sci Instrum*, 1992, **63**(10): 4886-4888.
- [9] 李锋,张岳华,江晓,等. 16 通道 nTOF 放大定时甄别器[J]. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(4): 767-769. (Li Feng, Zhang Yuehua, Jiang Xiaoa, et al. 16-channel amplifier timing discriminator for nTOF detector. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, **28**(4): 767-769)
- [10] Johnson H, Graham M. High-speed digital design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

## Anti-saturation improvement of front-end electronics for neutron detectors array system

Li Feng, Jiang Xiao, Lin Chengsheng, Chen Lian, Liang Futian, Jin Ge

(Anhui Key Laboratory of Physical Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The too strong pulse from a photomultiplier tube, produced by X-rays and gamma rays generated in the ICF experiment, leads to the saturation of the front-end electronics. It impedes normal circuit operation and measurement of the flight time of neutrons. An improved anti-saturation nonlinear circuit has been put forward and tested on the basis of the front-end electronics structure and further analysis of its saturation. Simulation results indicate that the improved circuit could introduce great attenuations for large amplitude pulses and pass through small amplitude pulses. The baseline of the circuit can recover within 35 ns. The experimental test has got the same results as the simulation does. It shows that the improved solution is simple and effective, and it could ensure the normal circuit operation for input pulses with dozens of volts. Now the circuit has been applied to the front-end electronics and will be installed on the large neutron detector array of certain large laser prototype soon.

**Key words:** ICF; front-end electronics; anti-saturation; scintillation detector