

# 400nm IMPL RADFET 剂量计的性能研究

官辉<sup>1;1)</sup> 李金<sup>2</sup> 杨世明<sup>1</sup> 邵贝贝<sup>1</sup> 龚光华<sup>1</sup> 李裕熊<sup>3</sup> 谢小希<sup>2</sup>

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

3 (中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** RADFET 多通道探测器将要用来测量北京谱仪 BES III 中量能器附近的累积剂量. 探测器的技术关键是对 400nm IMPL RADFET 剂量计具体性能的了解和掌握. 本工作以  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  源为辐射源, 实验研究了 400nm IMPL RADFET 剂量计的各项性能, 包括 RADFET 通道间的一致性、测量累积剂量时的辐照强度相关性以及退火特性等, 同时也讨论了测量数据的拟合方法, 为该类型 RADFET 剂量计在 RADFET 多通道探测器的设计、建造和其他方面的应用提供了实验基础.

**关键词** BES III RADFET 剂量计 累积剂量测量 辐照强度相关性 退火

## 1 引言

晶体量能器是 BES III 重要探测器之一, 主要是测量电子和  $\gamma$  光子的能量和位置, 提供中性 ( $\gamma$ ) 能量触发信号. 但量能器上的 CsI(Tl) 晶体在辐射场中受到照射后, 其闪烁性能将会有一定程度的下降, 也就是辐射损伤, 这会严重影响量能器的能量响应和分辨率<sup>[1]</sup>. 因此, 必须知道量能器所受到的辐射累积剂量, 并能对辐射损伤做校正.

但 BES III 晶体量能器附近预留的空间非常小, 这要求用来测量辐照累积剂量的剂量计的体积很小; 同时, 它需要满足在线测量的要求, 为此在北京谱仪 BES III 中使用了一种新型探测器, 即 RADFET 探测器. 这是基于 RADFET 剂量计<sup>[2]</sup>的探测器, 在国内尚属首次使用. 在测量辐射累积剂量方面, 该剂量计具有传统剂量计无法比拟的优点, 比如体积小、价格低、读取系统简单及可在线测量等. 它可以应用在核工业、航天等多个领域中.

根据 BES III 设计的要求, 最终选择了 NMRC 公司的 400nm IMPL RADFET 剂量计, 并在中国军事医学院针对该型号剂量计做了定标试验, 详细研究了它各方面的性能, 为该剂量计在 BES III 累积剂量探测器中的使用及其他方面的应用提供了试验基础.

## 2 RADFET 剂量计原理

RADFET 是一种 P 通道金属氧化物半导体场效应管 (MOSFET), 它的灵敏区域集中在它的栅极区域, 如图 1 所示. 其中, G, S, B 和 D 分别为 RADFET 剂量计的栅极、源极、衬底和漏极.

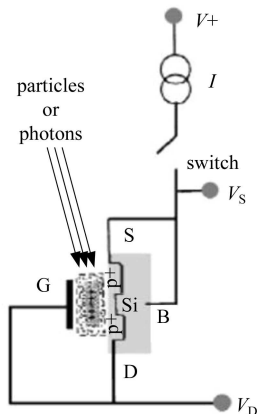


图 1 RADFET 读出电路示意图

当 RADFET 受到辐照时, 在灵敏区域中就会有电子空穴对产生, 其中一定数量的电子空穴对会立即发生复合并消失. 而那些没有发生复合的电子空穴对在电场的作用下会慢慢漂移. 如果在栅极加上正偏压,

2006 - 05 - 25 收稿

1) E-mail: gonghui02@mails.tsinghua.edu.cn

那么电子就会迅速漂移到栅极上并离开灵敏区域. 这意味着, 在栅极上加正偏压可以增加剂量计的灵敏度. 当然也可以不加偏压.

与电子运动方向相反, 空穴会缓慢地向Si衬底方向移动. 作为SiO<sub>2</sub>的一个固有特性, 在SiO<sub>2</sub>中会有一些空穴陷阱. 在Si和SiO<sub>2</sub>的分界面附近, 空穴陷阱的密度是最高的. 因此, 当空穴向Si衬底方向移动时, 一定数量的空穴就会被空穴陷阱俘获, 从而引起SiO<sub>2</sub>区域中所带的正电荷增加. SiO<sub>2</sub>区域中正电荷的增加量跟所受到的照射量服从一定的函数关系, 但并不是线性关系, 而是一种次线性关系. 这是因为随着受照量的增加, 空穴陷阱的数量会减少, 灵敏区域灵敏度会下降.

随着SiO<sub>2</sub>区域中正电荷的增加, RADFET场效应管的开端电压会增加, 所以通过测量RADFET的开端电压之差 $\Delta V$ , 就可以计算出RADFET剂量计受到的辐射累积剂量 $D$ . 二者近似服从如下函数关系

$$\Delta V = a \times D^b. \quad (1)$$

其中,  $a$ ,  $b$ 为系数, 具体数值与剂量计的灵敏度有关, 不过 $b$ 一定小于1.

RADFET剂量计在受辐照时与读出时的电路配置是不一样的, 可以通过数据采集系统中的模拟开关自动切换. 在受辐照时, 除了栅极以外, 其他3个电极都接地; 栅极上加的电压就是偏置电压, 当然栅极也可以接地, 这就意味着零偏压受照模式<sup>[3]</sup>. 而RADFET剂量计的读出电路如图1所示. 在读出时, 通过加上一定大小的恒流源 $I$ , 测量 $V_s$ 和 $V_a$ 之间的电压差就可以得到RADFET剂量计的当前开端电压, 再减去辐照之前开端电压就是开端电压差 $\Delta V$ .

在BESIII试验中, 所使用的400nm IMPL RADFET产品为标准DIP14封装, 内含4个通道. 其中2个通道的灵敏区域的面积为 $300\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ , 另外2个通道为 $690\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ , 灵敏厚度都是400nm. 工作温度为 $-20^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ .

### 3 累积剂量的标定

累积剂量的标定的目标是测量出各种条件下开端电压差与累积剂量的关系, 计算出函数式(1)中的系数 $a$ ,  $b$ , 并研究RADFET受辐照时的辐照强度相关性和退火特性.

性能研究所采用的前端电路和数据采集系统的结构框图如图2所示, 它能够每隔15分钟把所有通道的开端电压差及当前的环境温度采集一遍, 并做温

度校正<sup>[4]</sup>, 然后保存到Flash存储器中. 系统的电压采集范围为 $0 \sim 12\text{V}$ , 精度为 $1\text{mV}$ ; 温度采集范围为 $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ , 精度为 $0.1^\circ\text{C}$ .

前端电路只是把RADFET剂量计和温度传感器的相关引脚连接到电缆上. 其中, 温度传感器为抗辐照型的. 因此, 前端电路受辐照影响可以忽略不计.

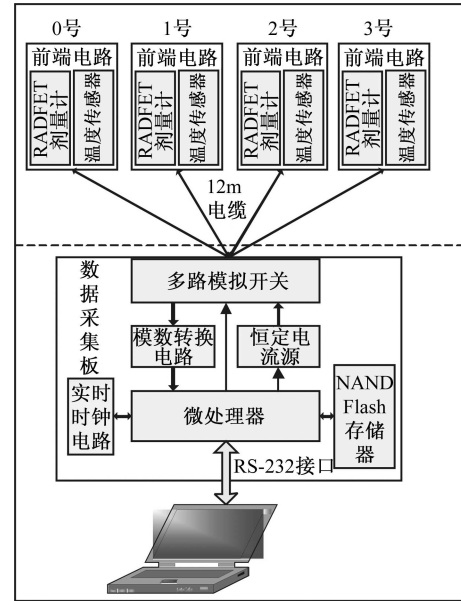


图2 数据采集系统结构框图

定标过程中, 共用到4片RADFET, 分别编号为0, 1, 2, 3号. 每片RADFET包含4个通道, 分别标记为300/50-0, 690/15-0, 300/50-1, 690/15-1. 各个通道的工作条件如表1.

表1 各个通道的工作条件

	300/50-0	690/15-0	300/50-1	690/15-1
0号剂量计	5V 10 $\mu\text{A}$	5V 10 $\mu\text{A}$	0V 10 $\mu\text{A}$	0V 10 $\mu\text{A}$
1号剂量计	5V 10 $\mu\text{A}$	5V 10 $\mu\text{A}$	0V 10 $\mu\text{A}$	0V 10 $\mu\text{A}$
2号剂量计	5V 10 $\mu\text{A}$	5V 10 $\mu\text{A}$	0V 10 $\mu\text{A}$	0V 10 $\mu\text{A}$
3号剂量计	0V 50 $\mu\text{A}$	0V 10/50 $\mu\text{A}$	0V 10 $\mu\text{A}$	0V 10 $\mu\text{A}$

表中的5V(或0V)表示受照时所加的偏压, 10 $\mu\text{A}$ (或50 $\mu\text{A}$ )表示读出时所用的恒流源大小. 其中测量3号RADFET的690/15-0通道时交替使用了10 $\mu\text{A}$ 和50 $\mu\text{A}$ 的恒流源.

所用的辐射源的平均能量为 $1.25\text{MeV}$   $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 源. 定标时所采用的3种辐照强度分别为:  $8.91\text{rad}/\text{min}$ ,  $3\text{rad}/\text{min}$ ,  $0.5\text{rad}/\text{min}$ , 精度为1%. 系统的采样周期为15min, 这样RADFET在一个采样周期内的受照剂量就是辐照强度和15min的乘积. RADFET受照的累

剂量就是辐照强度和总的受照时间乘积. 各个剂量计的受照情况见表2.

表2 各个RADFET的受照情况

试验次序	受照剂量计	辐照强度/(rad/min)	受照时间/h
1	0号	8.91±0.09	7
2	1和3号	3±0.03	17
3	2号	0.5±0.005	70

### 4 定标曲线的拟合

对各个RADFET通道所测量的试验数据进行拟合的方法是一样的, 这里以0号RADFET的300/50-1通道为例进行讨论. 该通道的试验数据如图3中的三角形点所示. 拟合方法很多, 但效果理想的方法主要有两种: 乘幂拟合与多项式拟合.

乘幂拟合所基于的关系式就是函数式1, 因此该方法得到的拟合结果符合RADFET的工作原理, 做外推时效果较好. 拟合结果为  $\Delta V = 0.0028 \times D^{0.8358}$ , 判定系数  $r_2$  为0.9953. 其中, 判定系数表示拟合的优劣, 也就是说, 判定系数越接近1, 拟合的效果越好. 该拟合方法的判定系数不够高, 只有0.995, 意味着拟合结果与试验数据之间还有一定误差. 经计算可知, 在累积剂量为3500rad的时候, 误差约为6%.

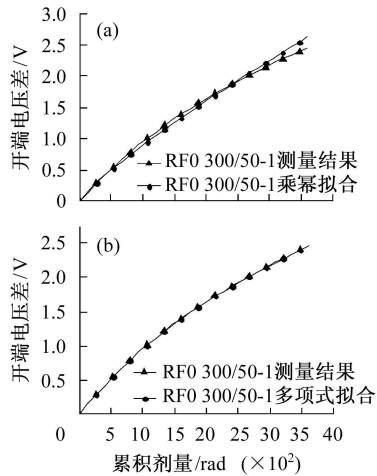


图3 (a) 乘幂拟合; (b) 多项式拟合

三阶多项式拟合所基于的关系式如下

$$\Delta V = a_3 D^3 + a_2 D^2 + a_1 D + a_0. \quad (2)$$

具体拟合结果为

$$\Delta V = 0.000041 D^3 - 0.0034 D^2 + 0.1563 D - 0.1537,$$

判定系数  $r_2$  为0.99998.

该拟合方法的判定系数要远高于乘幂拟合, 其拟合结果能够很好地符合拟合所用的试验数据. 如图

3(b)所示, 由试验数据绘成的曲线与多项式拟合曲线基本重合, 经计算可知, 二者误差最大约为0.5%. 但多项式拟合有一个固有的缺点, 就是外推性能欠佳, 不能很好地反映在拟合所用数据之外时曲线的变化规律.

两种拟合结果各有优缺点, 在实际使用时, 可以根据需要选择使用.

### 5 RADFET通道间的一致性

从表1和表2可以看出, 1号和3号RADFET的后两个通道的工作条件和受辐照情况都完全一样, 因此可以用来研究RADFET通道间的一致性. 图4(a)中的4条曲线的顺序与图标的顺序一致(RF3表示3号RADFET, 其他同理). 从该图可以看出两个RADFET的300/50-1通道之间及690/15-1通道之间的差别(即在受到相同的辐射累积剂量时, 各个通道的开端电压差  $\Delta V$  之间的差别) 都很小, 小于2%.

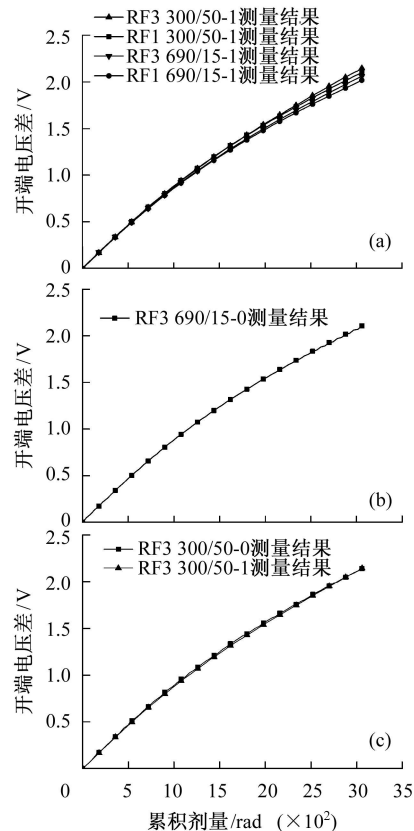


图4 (a) 1号和3号RADFET的测量结果比较; (b) 3号RADFET的690/15-0通道的测量结果; (c) 3号RADFET的2个300/50通道的测量结果

不过, 同一个RADFET的300/50-1通道与690/15-1通道, 由于灵敏区域大小不一样, 所以差

别比较大, 约为4%, 其中300/50-1的灵敏度稍高一点. 这一现象在0, 1, 2, 3号RADFET的测量结果中都可以看到.

在测量3号RADFET的690/15-0通道时, 交替使用了 $10\mu\text{A}$ 和 $50\mu\text{A}$ 的恒定电流. 两种情况下, 针对该通道测量所得的初始开电压差别很大, 分别为 $1.057\pm 0.001\text{V}$ 和 $0.423\pm 0.001\text{V}$ , 但在后面的测量中, 交替计算出的开电压差却符合得很好. 图4(b)中的曲线正是由这两种情况下得到的数据点交替构成. 可见, 恒定电流为 $10\mu\text{A}$ 还是 $50\mu\text{A}$ 对开电压差造成的影响很小, 根据试验数据可计算出这种影响小于1%.

既然恒定电流大小基本不影响测量结果, 所以3号RADFET的两个300/50通道之间也具有可比性, 二者的测量结果如图4(c)所示. 二者的测量曲线基本上重合, 相对差值小于0.5%, 这说明了同一个RADFET上两个同类型通道之间具有良好的 consistency.

## 6 RADFET的辐照强度相关性

0号、1号、2号RADFET的工作条件完全一致, 但受辐照强度依次降低, 因此可用来研究RADFET测量累积剂量时的辐照强度相关性. 在这里我们以类型为300/50的通道为例把所有3个RADFET的试验数据都做到图5上. 从该图可以看出各个RADFET的300/50-0通道的灵敏度要明显高于300/50-1通道的灵敏度, 这是符合RADFET的原理的, 具体原因是300/50-0通道都加了+5V偏压, 而300/50-1通道没有加偏压.

更重要的是, 从图5中还可以看出RADFET测量累积剂量时确实有辐照强度相关性, 而且加了+5V偏压的通道受辐照强度的影响程度要高于不加偏压的通道. 从测量的准确性考虑, 当然希望这种相关性越小越好.

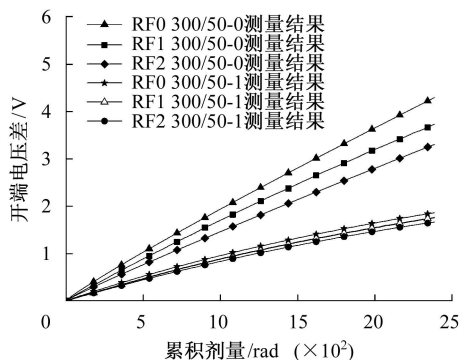


图5 RADFET的辐照强度相关性

加了+5V偏压的通道的灵敏度基本是不加偏压的同类型通道的灵敏度的2倍, 但在不同辐照强度下的各个通道的测量曲线之间的绝对差值却是不加偏压时的5倍左右. 也就是说, 虽然加+5V偏压能增加RADFET的灵敏度, 但是会造成辐照强度相关性大幅度提高. 因此在该类型RADFET的使用时, 最好不要加偏压; 定标时应尽量使用与RADFET最终工作环境接近的条件.

另外, 对测量数据的分析还表明类型为690/15的通道的辐照强度相关性与类型为300/50的通道基本是一致的.

## 7 RADFET退火的研究

在RADFET剂量计受辐照结束后, 被俘获的空穴中有少量会逃逸, 因此RADFET剂量计的开电压差会下降, 这就是退火现象. 退火是RADFET剂量计一个主要的缺点. 为了分析其退火特性, 在剂量计受辐照结束后, 数据采集系统并没有停止, 而是继续运行了大约1个月.

图6为0号RADFET的退火曲线, 其他RADFET与之相似. 曲线最开始的上升部分为受照阶段. 可见, 在辐照刚停止的时候, 退火是最快的, 然后随着时间推移慢慢趋于稳定. 而且加+5V偏压的两个通道的退火率(即相比最大开电压差衰退的百分比)要明显高于不加偏压的两个通道.

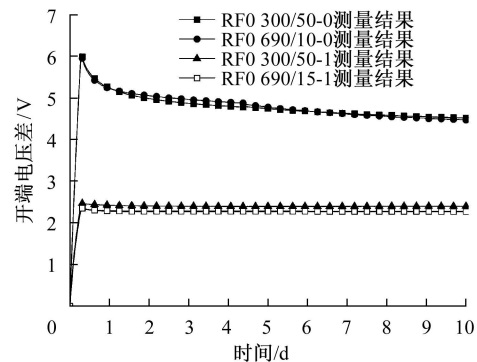


图6 0号RADFET的退火曲线

表3列出了0号、1号和2号RADFET的各个通道的退火率. 从中可以看出:

- 1) 无论是否加偏压, 类型为690/15的通道的退火率要高于300/50.
- 2) 对于同种类型的通道, 加+5V偏压后的退火率要远高于不加偏压时.

3) 辐照强度越低退火率也越低. 在辐照强度很低和不加偏压的情况下(比如0.5rad/min时), 类型为300/50的通道的退火率很小, 一般是可以忽略的. 其他情况下, 可根据实际情况做修正.

表3 0号、1号和2号RADFET的各个通道的退火情况

	300/50-0 (+5V 偏压)	690/15-0 (+5V 偏压)	300/50-1 (零偏压)	690/15-1 (零偏压)
0号剂量计	25.6%(10天后)	26.1%(10天后)	2.8%(10天后)	4.4%(10天后)
	30.1%(30天后)	31.3%(30天后)	2.8%(30天后)	5.0%(30天后)
1号剂量计	21%(10天后)	23.0%(10天后)	2.2%(10天后)	3.8%(10天后)
	25.8%(30天后)	28.0%(30天后)	2.9%(30天后)	4.8%(30天后)
2号剂量计	13.8%(10天后)	17.2%(10天后)	0.5%(10天后)	3.4%(10天后)
	18.4%(30天后)	22.2%(30天后)	0.5%(30天后)	3.4%(30天后)

## 8 结论

类型为300/50的通道不仅灵敏度要比类型为690/15的通道略高一点, 而且其退火率也要比后者小一些, 因此在选用RADFET的通道时, 应尽量选择类型为300/50的通道. 另外从降低辐照强度相关性和退

火率的角度考虑, 使用该类型RADFET时, 最好不要加偏压.

北京谱仪BESIII的累积剂量监测探测器中使用大约80个RADFET剂量计. 基于以上研究的成果, 我们应该只使用400nm IMPL RADFET中的两个类型为300/50的通道, 而且都不加偏压. 这样不仅降低了数据采集系统的复杂程度, 也保证了系统的冗余性.

## 参考文献(References)

- 1 LIU Chun-Xiu et al. HEP & NEP, 2004, **28**(4): 335—339 (in Chinese)  
(刘春秀等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(4): 335—339)
- 2 Holmes-Siedle A, Adams L. Radiat. Phys. Chem., 1986, **28**: 235—244
- 3 Jakšić A, Kimoto Y, Ogourtsov V et al. The Effect of Different Biasing Configurations on RADFET Response Measured by Automated and Manual Read-out Systems. Radiation Effect on Components and Systems Conference (RADECS), The Netherlands, Sept. 2003
- 4 O'Sullivan M, Kelleher A, Ryan J et al. Proc. ESA Electronic Components Conf., 1990. 281—285

# Study of the Features of 400nm IMPL RADFET Dosimeter

GONG Hui<sup>1,1)</sup> LI Jin<sup>2</sup> YANG Shi-Ming<sup>1</sup> SHAO Bei-Bei<sup>1</sup> GONG Guang-Hua<sup>1</sup>  
LI Yu-Xiong<sup>3</sup> XIE Xiao-Xi<sup>2</sup>

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

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

3 (NSRL, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** RADFET multi-channel detector will be used to measure the integrated dose near the BESIII crystal calorimeter. In the design of this detector, it is significant to know the detailed features of 400nm IMPL RADFET dosimeter. By using <sup>60</sup>Co source, we made experiments and studied the features of this kind of RADFET dosimeter, including the consistency between different channels, the radiation intensity dependence to the integrated dose measurement and the annealing phenomena of RADFET dosimeter. The study results are very useful for the design of RADFET multi-channel detector and the application of RADFET dosimeter in other fields.

**Key words** BESIII, RADFET dosimeter, integrated dose measurement, radiation intensity dependence, annealing

Received 25 May 2006

1) E-mail: gonghui02@mails.tsinghua.edu.cn