

# 直线成形方法在基于SDD探测器的TXRF仪能谱测量中的应用研究

吴和喜<sup>1,2</sup>, 邱润洁<sup>2</sup>, 刘玉娟<sup>1,2</sup>, 徐辉<sup>2</sup>, 刘义保<sup>2\*</sup>

1. 核技术应用教育部工程研究中心(东华理工大学), 江西 南昌 330013  
2. 东华理工大学核科学与工程学院, 江西 南昌 330013

**摘要** 因全反射X射线荧光仪中入射X射线与全反射X射线形成驻波,导致样品被激发产生的特征X射线成周期变化,且在驻波峰区探测器产生的核脉冲重叠严重,有必要提高后续分析电路的重叠核脉冲幅度准确提取能力,进一步提升全反射X射线荧光仪的性能。由于SDD探测器产生的核脉冲下降沿依衰减系数 $\tau_{rc}$ 呈指数规律衰减,依据衰减补偿原则,建立直线成形方法并推导应用于数字化核脉冲的递归公式。实验发现:在ADC转换器的取样周期为 $T$ 下,当 $k \geq T/\tau_{rc}$ 时直线成形后的核脉冲顶部才能形成一条直线;在 $k = T/\tau_{rc}$ 时上升沿最短,重叠核脉冲分辨能力亦最好。直线成形后的核脉冲上升沿及平顶分布与上升时间参数最小时的梯形成形结果相同但前者的平顶更为光滑;由于直线成形后的核脉冲不存在下降沿,使得其宽度更窄,有利于分离相距更近的重叠核脉冲。通过拟合直线成形后的核脉冲分布规律,确定了直线成形方法可准确提取幅度值的最窄重叠核脉冲间隔;且直线成形方法对不同幅度核脉冲的放大倍数一致,证实直线成形方法不会改变谱仪的能量线性。直线成形方法能可靠应用的前提是准确定位核脉冲的起始位置,为此建立起冲击成形递归公式,验证发现冲击成形后的核脉冲仅在其起始位置出现幅度约等于核脉冲幅度的冲击响应,利用阈值判别就能准确定位所有核脉冲起始位置。最后在FPGA内实现上述算法,并进行10组对比实验,实验结果显示直线成形方法在堆积平台与和峰压制能力、峰背比和能量分辨率三个方面均优于梯形成形与模拟式能谱测量系统,证实直线成形方法能极大地提升全反射X射线荧光仪的性能。

**关键词** 直线成形;参数最优取值;全反射X射线荧光

**中图分类号:** O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)07-2148-05

## 引言

自20世纪50年代起,X射线荧光分析技术在材料科学、生物医学、刑事侦查、环境监测等领域广泛应用,相应测量仪器的研发也进入快速发展与更代的阶段<sup>[1]</sup>。1971年Yoneda等<sup>[2]</sup>将全反射原理与X射线荧光分析技术相结合,提出了全反射X射线荧光(total-reflection X-ray fluorescence, TXRF)分析方法,该方法在很大程度上降低了X射线荧光分析中的散射本底,提高了峰背比,能实现痕量元素分析。在TXRF分析中,样品不但被X光管产生的X射线照射,又被全反射X射线激发,且两者在反射体表面形成驻波场,样品中元素被激发产生的特征X射线被驻波场调节出现

周期变化<sup>[3]</sup>,在驻波峰部时探测器产生的核脉冲重叠严重,必须提高后续分析电路的重叠核脉冲幅度准确提取能力。对于数字化多道脉冲幅度分析器而言,重叠核脉冲幅度准确提取能力取决于滤波成形方法<sup>[4]</sup>。目前常用的数字化核脉冲滤波成形方法有高斯成形方法和梯形成形方法,前者难以缩短成形后的核脉冲宽度致使其重叠核脉冲幅度提取能力较差<sup>[5-7]</sup>,后者的重叠核脉冲幅度准确提取能力随成形后的核脉冲上升沿与平顶持续时间的减小而增大<sup>[8]</sup>,但由于成形后的核脉冲存在下降沿使得能有效分离的重叠核脉冲最窄间隔还具有提升空间。本文从核脉冲的数学模型出发,基于衰减补偿原则建立直线成形方法,并详细探讨该算法中参数的最优选取方法,最终将其应用于TXRF仪,并实验分析其可行性。

收稿日期:2020-05-31,修订日期:2020-10-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFF0106500),国家自然科学基金项目(41804114),核技术应用教育部工程研究中心开放基金项目(HJSJYB2014-8, HJSJYB2017-4)资助

作者简介:吴和喜,1985年生,核技术应用教育部工程研究中心(东华理工大学)副教授 e-mail: wujing-7758@163.com

\* 通讯作者 e-mail: ybliu@ecut.edu.cn

# 1 TXRF 仪测量系统

如图 1 左上的原理图所示, X 射线管发射的原级 X 射线经两块玻璃反射体组成的全反射光路激发样品, 此时样品被原级 X 射线与反射 X 射线激发, 产生的 X 射线与探测器相互作用形成核脉冲, 经过多道脉冲幅度分析器处理后得到测量谱。只有当 X 射线发生全反射时, 样品上入射 X 射线与出射 X 射线的强度相当, 才能消除原级 X 射线在反射体上的相干和不相干散射现象, 降低散射本底。为达到上述效果, 需使用角度调节器和高度调节器使得装置达到全反射临界角, 所设计的 TXRF 仪硬件实物图如图 1 所示。

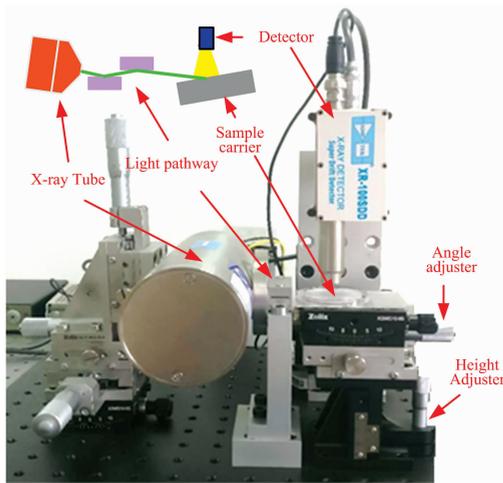


图 1 TXRF 仪原理及实物图

Fig. 1 Principle and prototype of TXRF spectrometer

# 2 直线成形方法

## 2.1 理论依据

在外加电场作用下 SDD 探测器收集到的电流信号被复位型电荷灵敏前置放大器放大, 经 C-R 微分电路后再被主放大器放大以匹配 ADC 转换器输入幅度的需求。此时输出核脉冲的分布规律可用如下数学模型描述<sup>[7]</sup>

$$U(t) = A(e^{-(t-t_0)/\tau_{rc}} - e^{-(t-t_0)/\tau_f}) \quad (1)$$

式(1)中,  $U(t)$  为核脉冲在  $t$  时刻电压值;  $t_0$  为核脉冲的起始时刻;  $A$  为核脉冲的幅度值;  $\tau_{rc}$  为下降沿衰减常数, 主要由 C-R 微分电路内电阻和电容值决定;  $\tau_f$  为上升沿衰减常数, 由 SDD 探测器电荷收集时间、主放大器内运算放大器响应速度和电路间分布的电阻与电容共同决定。一般而言  $\tau_{rc} \gg \tau_f$ , 说明核脉冲的下降沿主要源自  $\tau_{rc}$  的贡献。根据衰减补偿原则, 建立如式(2)所述的时变系统

$$V(t) = U(t) + \int_{t_0}^t \frac{U(s)}{\tau_{rc}} ds = A(1 - \tau_f/\tau_{rc})(1 - e^{-(t-t_0)/\tau_f}) \quad (2)$$

式(2)中,  $V(t)$  为  $t$  时刻系统输出的电压值。可以看出, 当  $\tau_f$  趋近于 0 时  $V(t) = A$ , 为此将其称之为直线成形方法。

## 2.2 递归公式

在数字化多道脉冲幅度分析器中, 主放大器输出的核脉冲被 ADC 转换器以周期  $T$  离散化为数字化核脉冲, 在 FPGA 内使用直线成形方法处理数字化核脉冲时需将式(2)离散化

$$V_n = U_n + \sum_{i=L_j}^{L_{j+1}} kU_i \quad (3)$$

式(3)中,  $V_n$  与  $U_n$  分别为  $nT$  时刻 ADC 转换器对  $V(t)$  与  $U(t)$  信号的采样值;  $L_j$  为第  $j$  个核脉冲的起始位置;  $k$  为衰减补偿系数, 按式(2)取值为  $T/\tau_{rc}$ 。为简化计算, 可得式(3)的递归公式如式(4)

$$V_n = V_{n-1} + (1+k)U_n - U_{n-1} \quad (4)$$

为去除高频电子学噪声的影响, 先采用 3 点均值滤波器对式(4)中  $U_n$  和  $U_{n-1}$  进行平滑, 得到如递归式(5)

$$V_n = V_{n-1} + [(1+k)U_{n+1} + kU_n + kU_{n-1} - U_{n-2}]/3 \quad (5)$$

式(5)的边界条件为: ①当  $n \leq 0$  时  $U_n = 0$ ; ②当  $n = L_j$  时  $V_{n-1} = 0$ 。前者解决了数字化核脉冲起始点直线成形时初值缺失的问题, 后者进行的复位操作避免了重叠核脉冲直线成形结果内后一个核脉冲叠加在前一个核脉冲之上的问题。

# 3 参数最优化选取方法

## 3.1 衰减补偿系数

利用自制的多道脉冲幅度分析器<sup>[9]</sup>于 50MSPS 采样率下采集得到的数字化核脉冲如图 3 所示, 利用式(1)拟合得到  $\tau_{rc} = 63.98T$  和  $\tau_f = 2.01T$ , 拟合优度为 0.997, 拟合曲线如图 2 中红线所示。

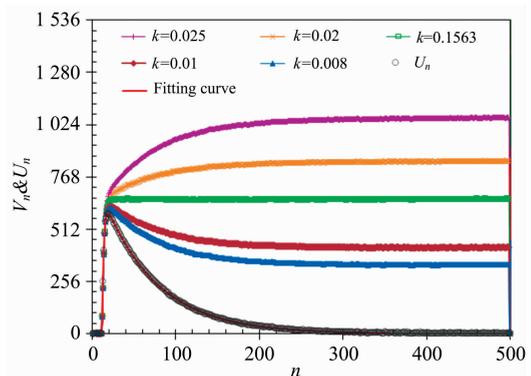


图 2 数字化核脉冲拟合及不同  $k$  值下直线成形结果

Fig. 2 Fitting curve and transform results under different  $k$  values with straight-line shaper of a digital nuclear pulse

在不同  $k$  值下直线成形结果如图 2 所示, 可以看出: ①当  $k \geq T/\tau_{rc} = 0.1563$  时, 直线成形后的核脉冲顶部才能形成一条直线; ②直线成形后的核脉冲幅度值随  $k$  值增大而减小, 且在  $k \geq T/\tau_{rc}$  时均大于原始幅度值, 3.4 节将对其放大倍数的线性程度详加分析; ③直线成形后的核脉冲上升沿宽度随  $k$  值增大而增大, 影响相距较近的重叠核脉冲的幅度准确提取(在核脉冲幅度提取过程中一般选取平顶上相邻 5 点的平均值作为当前核脉冲的真实幅度值<sup>[10]</sup>)。为提高 TXRF

仪的重叠核脉冲幅度提取能力, 后续分析中  $k$  取其理论值, 即  $k = T/\tau_{rc} = 0.1563$ 。

### 3.2 核脉冲起始位置

从式(5)的边界条件②可以看出能否准确定位核脉冲的起始位置, 直接影响直线成形方法的可靠性; 且在 FPGA 中需要通过核脉冲起始位置的间隔来判定是否能准确提取当前核脉冲的幅度值。以往常采用窄三角成形或单指数冲击成形方法, 但因核脉冲存在上升沿, 导致上述算法出现一定的时间延迟, 而输出位于其起始点位的冲击响应则为最理想的定位方法<sup>[11]</sup>。此时冲击成形系统的输入信号为式(1)所述的核脉冲、输出信号为幅度  $A$  的冲击响应, 则该系统响应为

$$H_2(z) = \frac{(1 - M_1 z^{-1})(1 - M_2 z^{-1})}{(M_1 - M_2)z^{-1}} \quad (6)$$

式(6)中,  $M_1 = e^{-T/\tau_{rc}}$ ;  $M_2 = e^{-T/\tau_f}$ 。对式(6)进行逆变换, 得到冲击成形方法的递归公式

$$G_n = \frac{U_{n+1} - (M_1 + M_2)U_n + M_1 M_2 U_{n-1}}{M_1 - M_2} \quad (7)$$

同样利用自制的多道脉冲幅度分析器于 50MSPS 采样率下采集得到的数字化核脉冲序列如图 3(a)所示, 经式(7)成形后的结果如图 3(b), 可以看出: 无论是单一核脉冲还是重叠核脉冲, 均在其起始位置出现强度约为核脉冲幅度值的冲击响应, 证实冲击成形方法能很好地用于核脉冲起始位置的识别。因冲击成形后其他点位也存在响应值, 需采用阈值甄别方法剔除虚假信号, 即只有  $G_n > Nos$  时才认定该点为核脉冲的起始位置。此时阈值  $Nos$  由设备的电子学噪声等决定, 一般取基线最大幅度的 ADC 转换值, 对本文实验装置而言  $Nos = 10$ 。

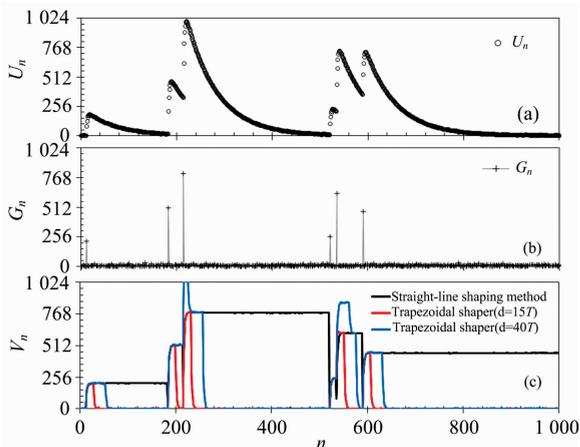


图 3 数字化核脉冲序列成形结果

Fig. 3 Transform results of a series of digital nuclear pulse with different shaper

### 3.3 可分辨重叠核脉冲最窄间隔

对图 3(a)中典型的数字化核脉冲进行直线成形, 结果如图 3(c)所示。因核脉冲本身存在一定的上升沿使得直线成形后的核脉冲也存在上升沿, 对图 3(c)中第一个核脉冲的直线成形结果进行拟合得到拟合结果如式(8)

$$V_n = 207.228 - 289.4e^{-0.4334(n-11.01)} \quad (8)$$

在上升到幅度的 99% 即认为到达平顶区域的假设下, 计算得到上升沿持续时间  $T_0 = 11.39T$ 。因以往在幅度提取过程中多采用 5 点平均值法<sup>[10]</sup>, 则需成形后的核脉冲持续最短时长应为  $T_1 = 17T$ , 该值为直线成形方法能分辨重叠核脉冲的最窄间隔。

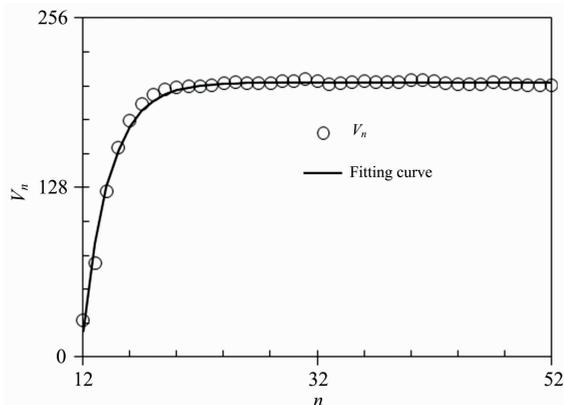


图 4 直线成形后的数字化核脉冲上升沿拟合结果

Fig. 4 Fitting results of rising edge of digital nuclear pulse transformed with straight-line shaper

在梯形成形算法中两个参数(上升时间  $b$  与平顶时间  $d$ )均最小时, 其重叠核脉冲分离能力最好<sup>[8]</sup>。而梯形成形中  $b$  最小为  $T$ , 此时梯形成形后的核脉冲上升沿也最窄。根据梯形成形后的核脉冲持续时间计算方法, 在维持梯形成形后的核脉冲平顶内至少有 5 个点可用于计算幅度值的情况下, 梯形成形算法中  $d$  值最小应取  $15T$ , 此时梯形成形( $b = T$  与  $d = 15T$ )后的结果如图 3(c)中红线所示。可以看出: 直线成形后的核脉冲的上升沿与梯形成形( $b = T$  与  $d = 15T$ )相等; 且成形后的核脉冲平顶区域高度相当, 但直线成形后的平顶更为平滑, 说明直线成形方法的噪声去除能力更好。但由于第 4 和第 5 个核脉冲之间的间隔小于  $T_1$ , 此时第 4 个核脉冲梯形成形后未到达平顶, 导致其下降沿叠加在第 5 个核脉冲之上, 使得第 5 个核脉冲的幅度值无法准确提取; 而直线成形后的核脉冲不存在下降沿, 即使重叠核脉冲间隔小于  $T_1$  也不会影响后一个核脉冲的幅度准确提取, 充分证实直线成形比梯形成形的重叠核脉冲的分辨能力更好。且直线成形方法的计算公式更简单、耗时更短, 相同时间下能够处理的核脉冲也越多, 获得的计数率将会更大。

### 3.4 幅度线性

因直线成形后的核脉冲幅度值比成形前略大, 为保持 TXRF 仪的线性, 必须保证直线成形后的核脉冲幅度值的放大倍数一致。挑选 10 个不同幅度的核脉冲, 利用式(1)进行拟合得到第  $j$  个核脉冲的真实幅度值  $A_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 10$ ); 采用式(5)实现直线成形, 依 3.3 节所述其上升沿需持续  $T_0$  时间, 按 5 点平均值法的思想得到起始位置后第 13 至第 17 个点  $V_n$  值的平均值  $W_j$ , 将其作为直线成形后的核脉冲幅度值, 结果如图 5 所示。拟合发现两者成线性关系, 说明直线成形方法对不同幅度的核脉冲放大程度一致, 不会影响 TXRF 仪的能量线性。

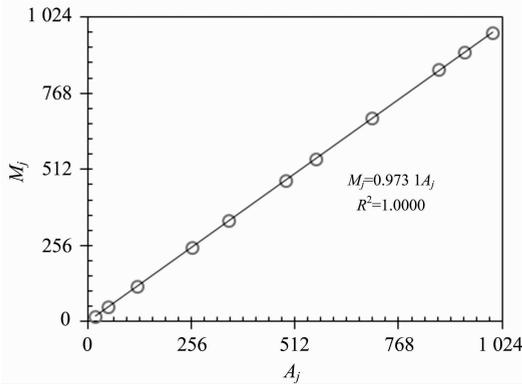


图 5 数字化核脉冲幅度拟合值与直线成形后幅度提取值间的关系

Fig. 5 Relationship between amplitude fitting values by double exponential function and amplitude extraction values transformed with straight-line shaper of digital nuclear pulse

### 4 能谱测量

将图 1 所示的 TXRF 仪中 XR-100 型 SDD 探头输出信号分为三路,同时实现如下测量:①模拟式能谱测量系统:经 ORTEC 672 型主放大器放大后接入 ORTEC 926 型模拟式多道脉冲幅度分析器实现能谱采集;③直线成形:采用自制的多道脉冲幅度分析器于 50MSPS 采样率将核脉冲数字化,存入 FPGA 内 FIFO 中,快通道采用式(5)实现直线成形,慢通道运用式(7)实现冲击成形。对于第  $j$  个核脉冲,在其与前一个核脉冲起始位置差大于  $T_1$  时,利用 5 点平均值法提取当前核脉冲的幅度值  $W_j$ ,并与最小平均值法<sup>[12]</sup>提取的基线值  $B_j$  相减后取整作为当前核脉冲计数道址,将存储能谱 RAM 中对应道址上的计数加 1 即可;反之,则丢弃第  $j$  个核脉冲。具体流程图如图 6 所示。③梯形成形:运用  $b=T, d=15T$  下的梯形成形实现②中快通道成形,其余不变。

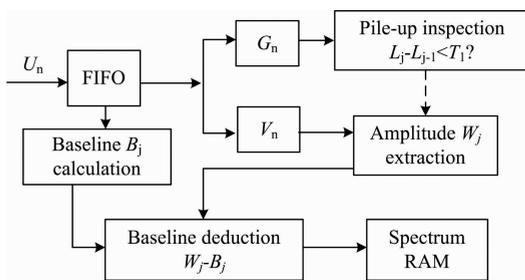


图 6 FPGA 内数字化核脉冲处理过程框图  
Fig. 6 Processing diagram of handling digital nuclear pulse in FPGA

利用上述装置重复测量铁薄膜 10 次,测量谱如图 7 所示,可以看出:由于 ORTEC 926 型模拟式多道脉冲幅度分析器内无法实现重叠核脉冲甄别,使得测量能谱中堆积平台与和峰计数较大;利用冲击成形实现重叠核脉冲甄别后,直线成形与梯形成形两种模式的测量谱均能很好地压制堆积平台与和峰计数,降低了测量谱的本底。

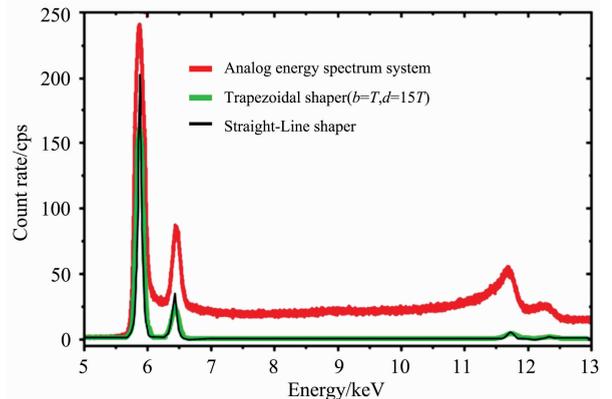


图 7 TXRF 仪对 Fe 薄膜实测谱

Fig. 7 Measured spectrums of Fe film with TXRF spectrometer

同时利用 GammaVision 分析软件计算上述 10 次测量结果中铁  $k_{\alpha}$  峰(能量为 5.898 keV)的峰背比和能量分辨率,得到其平均值与标准不确定度如表 1 所示。结果显示:模拟式能谱测量系统的峰背比和能量分辨率均最差。由于直线成形方法较梯形成形算法更简单,需要的计算时间也越短,处理的核脉冲更多;同时直线成形后的核脉冲没有下降沿,即使前一个核脉冲未达到平顶也不会影响后一个核脉冲幅度的准确提取,记录到的核脉冲也越多,使得直线成形方法的净计数率更高,峰背比亦更大。且直线成形后的核脉冲平顶更光滑,噪声去除能力更强,能量分辨率也最好。

表 1 不同测量模式性能比对

Table 1 Performance comparison of different measurement model

测量模式	能量分辨率/eV	峰背比	和峰计数率/cps
模拟式能谱测量系统	140.21±1.27	6.87±0.36	196.1±21.8
梯形成形 ( $b=T, d=15T$ )	135.47±0.65	20.82±0.17	21.2±0.28
直线成形方法	132.98±0.53	24.36±0.12	15.4±0.24

### 5 结论

因全反射使得 TXRF 仪激发射线强度增大,使得探测器产生更多的重叠核脉冲,必须有效分离重叠核脉冲并准确提取其幅度值。本文依据衰减补偿原则,推导了直线成形方法的递推公式。实验表明衰减补偿系数  $k=T/\tau_{rc}$  时重叠脉冲分辨能力最强,且成形后的核脉冲上升沿和平顶与重叠核脉冲分辨能力最强的梯形成形相同,同时平顶更平滑且无下降沿。其次建立了冲击成形方法用于核脉冲起始位置准确定位,给出了可分辨重叠核脉冲最窄间隔的计算方法。最后于数字化多道脉冲幅度分析器中 FPGA 内编程实现,从堆积平台与和峰压制能力、峰背比和能量分辨率三个指标综合评判,发现本文所述方法优于重叠核脉冲分辨能力最强的梯形成形和模拟式能谱测量系统。后续将深入研究以提升直线成形方法的低频噪声去除能力与基线恢复能力。

## References

- [ 1 ] HU Chuan-hao, ZENG Guo-qiang, GE Liang-quan, et al(胡传皓, 曾国强, 葛良全, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(1): 262.
- [ 2 ] Yoneda Y, Horiuchi T. Review of Scientific Instruments, 1971, 42: 1069.
- [ 3 ] Meirer F, Singh A, Pianetta P, Pepponi G, et al. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2010, 29(6): 479.
- [ 4 ] ZENG Guo-qiang, YANG Jian, OUYANG Xiao-ping, et al(曾国强, 杨 剑, 欧阳晓平, 等). Atomic Energy Science and Technology(原子能科学技术), 2017, 51(9): 1671.
- [ 5 ] Zhou Jianbin, Zhou Wei, Lei Jiarong, et al. Nuclear Science and Techniques, 2012, 23(3): 150.
- [ 6 ] Zhang Huaiqiang, Li Zhuodai, Tang Bin, et al. Nuclear Science and Techniques, 2019, 30(7): 108.
- [ 7 ] Ge Qing, Ge Liangquan, Yuan Hongwen, et al. Nuclear Science and Techniques, 2015, 26(1): 010402.
- [ 8 ] Zhang Huaiqiang, Ge Liangquan, Tang Bin, et al. Nuclear Science and Techniques, 2013, 24(6): 060407.
- [ 9 ] WU He-xi, LIU Yu-juan, LIU Li-po, et al(吴和喜, 刘玉娟, 刘立坡, 等). Nuclear Electronics & Detection Technology(核电子学与探测技术), 2015, 35(8): 814.
- [10] ZHANG Huai-qiang, TANG Bin, WU He-xi(张怀强, 汤 彬, 吴和喜). Nuclear Techniques(核技术), 2013, 36(5): 050401.
- [11] HUANG Yu-yan, GONG Hui, LI Jian-min(黄宇雁, 宫 辉, 李荐民). Journal of Tsinghua University • Science and Technology(清华大学学报 • 自然科学版), 2017, 57(5): 521.
- [12] CHEN Wei, ZHOU Jian-bin, FANG Fang, et al(陈 伟, 周建斌, 方 方, 等). Nuclear Techniques(核技术), 2018, 41(5): 050401.

## Application on Straight-Line Shaping Method for Energy Spectrum Measurement in TXRF Spectrometer Based on SDD Detector

WU He-xi<sup>1,2</sup>, DI Run-jie<sup>2</sup>, LIU Yu-juan<sup>1,2</sup>, XU Hui<sup>2</sup>, LIU Yi-bao<sup>2\*</sup>

1. Engineering Research Center of Nuclear Technology Application (East China University of Technology), Ministry of Education, Nanchang 330013, China
2. School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

**Abstract** Because the interaction of incident X-ray produced from the X-ray tube and reflection X-ray from sample disk create standing wave in Total-Reflection X-ray Fluorescence (TXRF) spectrometer, the characteristic X-ray produce from sample changes periodically. So a large number of piled-up nuclear pulses will be generated at the time of wave crest. In order to improve the performance of the TXRF spectrometer, the ability to accurately extract amplitudes of piled-up pulses must be strengthened. The falling edge of every pulse from an SDD (silicon drift detector) decays with time constant  $\tau_{rc}$  exponentially. According to the principle of attenuation compensating, a straight-line shaping method is devised, and its transfer formula is deduced for digitized pulses. When the ADC sampling period is equal to  $T$ , the method has a stronger ability to remove noise in pulse as the value of attenuation compensation coefficient  $k$  increases. The flat-top of shaping results by this method can be approximated to be straight line only when  $k \geq T/\tau_{rc}$ . And the width of the rising edge is narrowest when  $k = T/\tau_{rc}$ . In this case, the straight-line shaping method has the best ability to extract amplitudes of piled-up pulses. Compare the result of a trapezoidal shaper at smallest rise time with this method at  $k = T/\tau_{rc}$ , both of their rising edge and height of flat-top are same. For the smooth degree of flat-top area, this method is better than trapezoidal shaper. This method is better than trapezoidal shaper in separating piled-up pulses. Through fitting the rising edge of pulse transformed with this method, the distinguishable narrowest interval between the start positions of two pulses is determined. Magnifications of different amplitudes of pulses are the same by experiment, which shows that this method does not change the energy linearity of the TXRF spectrometer. The start position of the pulse must be determined before the application of this method. So the transfer formula of impulse shaper is deduced. By analyzed shaping results of impulse shaper, an impulse response appears at the start position of one pulse and the value approaches to the amplitude of the pulse. A threshold method is used to locate the start position of pulse accurately. Finally, all transfer formulas are implemented in an FPGA chip. Experiment results illustrate that the straight-line shaping method has a better energy resolution, peak to background ratio and suppression ability of sum-peak than trapezoidal shaper and analog energy spectrum system. It shows that the performance of the TXRF spectrometer is greatly improved by applying the straight-line shaping method.

**Keywords** Straight-line shaping method; Optimal values of parameters; Total-reflection X-ray fluorescence

\* Corresponding author

(Received May 31, 2020; accepted Oct. 6, 2020)