

# 滤波-荧光谱仪的优化设计

王 栋<sup>†</sup>

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2009 年 8 月 19 日收到 2009 年 9 月 11 日收到修改稿)

滤波-荧光法是一种重要的 X 射线诊断技术, 对于温度为  $1.4 \times 10^7 - 1.6 \times 10^7$  K 的黑体辐射, 设计了包含 V-Ti, Co-Fe, Cu-Ni 和 Zn-Cu 四个组合的滤波-荧光谱仪, 信号测量通道增加了相应本底测量辅助通道. 计算结果表明, 采用与信号通道相同设置的辅助通道测量效果不佳, 需要对辅助通道后滤片进行重新设置以确保对本底的正确测量.

关键词: 滤波-荧光谱仪, 优化设计, 本底测量

PACC: 5270L

## 1. 引 言

滤波-荧光谱仪是测量高通量 X 射线源能谱的有力工具<sup>[1]</sup>, 已被广泛应用于 Z-pinch<sup>[2]</sup>、激光聚变等大型 ICF<sup>[3]</sup> 装置 X 射线能谱测量当中, 包括美国早期的 Nova<sup>[4]</sup> 激光装置、目前的国家点火装置<sup>[5]</sup> (NIF), 我国的神光 II<sup>[6]</sup>、神光 III 原型<sup>[7]</sup> 等, 在未来神光 III 以及国际热核聚变实验堆 (ITER) 也有广泛的应用前景. 滤波-荧光法测量 X 射线能谱具有对环境条件要求相对较低、可调参数多等优点, 但缺点是其前滤片无法将被测能谱中的高能部分完全过滤, 能量高于所测能带的光子辐照荧光片, 从而形成很强的本底辐射<sup>[1,4,5]</sup>, 因此在滤波-荧光谱仪当中需要留出辅助通道用于本底测量<sup>[4]</sup>.

对于本底测量技术, Kornblum 等人使用与前滤片相同的材料作为荧光片<sup>[1,8]</sup>, Burns 等人使用与荧光片相同的材料作为前滤片<sup>[9]</sup>, 其目的都是单独测量高能部分产生的荧光, 最后从信号中扣除这一部分的影响, 从而得到所需的测量结果.

本文设计了包含 V-Ti, Co-Fe, Cu-Ni 和 Zn-Cu 四种前滤片-荧光片组合的滤波-荧光谱仪, 对于  $1.4 \times 10^7 - 1.6 \times 10^7$  K 的黑体辐射, 优化前滤片和荧光片的厚度以获得较高的信噪比, 信噪比确定后, 优化后滤片厚度获得合适的探测器输出. 每个信号测量通道都增加了测量本底的辅助通道, 对其测量效果进

行了计算和讨论.

## 2. 测量原理

滤波-荧光法的原理<sup>[1,5,10]</sup> 并不复杂, 测量能段上下限分别由前滤片与荧光片的吸收限构成, 由于荧光片产生的荧光 X 辐射各向同性分布, 为降低直照辐射形成的本底, 相对于入射 X 射线方向, 探测器放置在大于或等于  $90^\circ$  的方位上. 对于本底测量通道, 为获得与主通道尽可能接近的高能响应函数<sup>[4]</sup>, 除了将荧光片、前滤片设置为相同元素外 (同为主通道前滤片元素  $Z$  或荧光片元素  $Z-1$ ), 其他参数与信号测量通道完全相同<sup>[9,11]</sup>.

## 3. 计算方法

滤波-荧光谱仪的测量对象为达到热力学平衡的黑体, 其能谱分布符合 Plank 公式. 原始信号经过滤片后, 其响应函数主要分为两部分, 位于前滤片和荧光片吸收限之间的窄能带为待测信号, 透过滤片的高能部分辐照荧光片形成本底, 对两部分分别进行积分可以得到信号和本底的大小.

对于黑体辐射谱, 所测能段越靠近维恩区, 其信噪比越高<sup>[10]</sup>, 因此选用 V-Ti, Co-Fe, Cu-Ni 和 Zn-Cu 四个组合, 见图 1.

(1) 式<sup>[10]</sup> 为探测器单位时间内接收单位频率黑

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: carpenter\_pw@sina.com

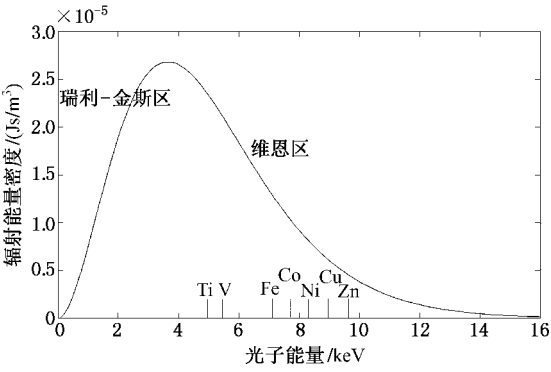


图 1  $1.5 \times 10^7$  K Plank 谱和测量能段

体辐射能量的计算公式. 对于所用元素组合,  $K$  系荧光产额远高于其他壳层, 计算只考虑  $K$  系荧光.

$$I = \frac{s_{de} s_{Be} 2 h \nu^3}{r^2 \sin^2 \phi c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h \nu}{k T}\right) - 1} \frac{s}{4 \pi R^2} \frac{S_q - 1}{S_q} \omega_q P_i \tau_0$$
$$\times \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda_i}}{\mu_0 \csc \phi + \mu_i \csc \psi}$$
$$\times \{1 - \exp[-(\mu_0 \csc \phi + \mu_i \csc \psi)] t\}. \quad (1)$$

4. 优化结果

图 2 到图 5 给出了信噪比的计算结果, 荧光片厚度取  $1-50 \mu\text{m}$ , 前滤片厚度分别为  $10 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m}, 30 \mu\text{m}, 40 \mu\text{m}$  和  $50 \mu\text{m}$ .

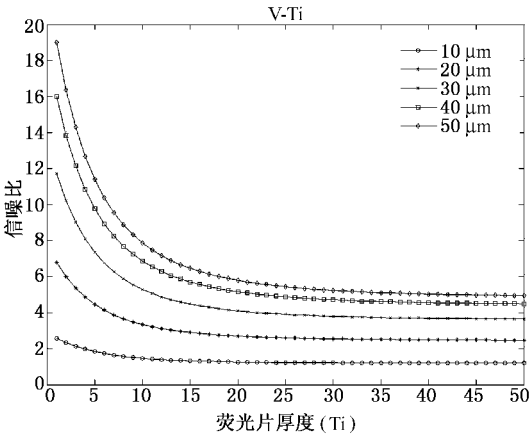


图 2 不同厚度 V 对应信噪比

谱仪采用 PIN 探测器, 对于本征探测效率为 50% 的探测器, 根据表 1 给出的谱仪各部件尺寸, 可计算得到探测器输出电流数据. 对于测量的温度范围, 表 2 给出了优化后主通道厚度组合数据以及对应信噪比和电流大小.

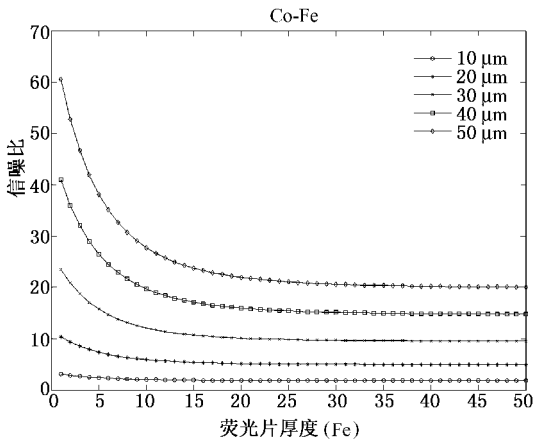


图 3 不同厚度 Co 对应信噪比

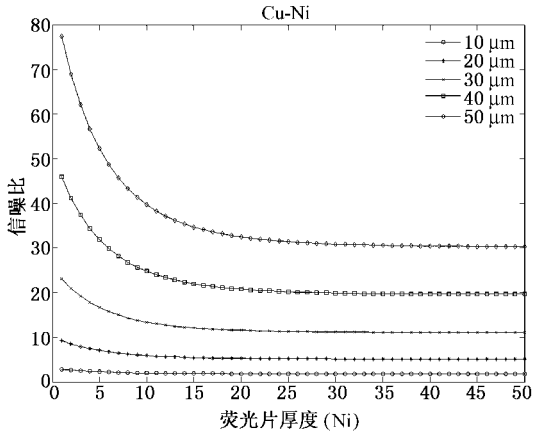


图 4 不同厚度 Cu 对应信噪比

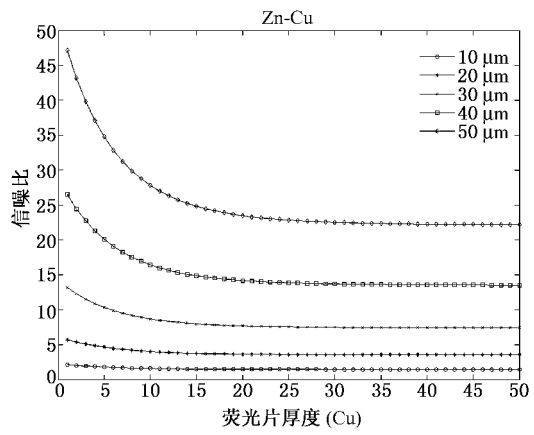


图 5 不同厚度 Zn 对应信噪比

辅助通道的设置与主通道相同, 图 6 给出了  $1.5 \times 10^7$  K 条件下两种辅助通道测量的测量结果 (以主通道本底归一).

可以看到, 如果采用与主通道相同的设置, 无论使用元素  $Z$  或是  $Z-1$ , 辅助通道都不能准确的对本

底进行测量,并且不同能段本底测量效果差异很大,随着能量增加,采用  $Z-1$  元素时本底测量值与实际本底的比值逐渐减小,采用  $Z$  元素时比值逐渐增加,实际本底与辅助通道测量本底差异最大接近 10 倍,这时本底测量通道已经失去了意义.

表 1 谱仪各部件尺寸

|                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| 源 X 射线出射窗直径/m         | 0.015              |
| 荧光片直径/m               | 0.006              |
| 源 X 射线与荧光片法线夹角/弧度     | $\pi/4$            |
| 源 X 射线与探测器接收荧光方向夹角/弧度 | $3\pi/4$           |
| 出射窗到荧光片距离/m           | 31.4               |
| 探测器有效面积/ $\text{m}^2$ | $3 \times 10^{-4}$ |

表 2 主通道计算结果

| 前滤片<br>(元素)<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | 荧光片<br>(元素)<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | 后滤片<br>(元素)<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | 测量<br>能段<br>/keV | 信噪比       | 电流<br>/A |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------|-----------|----------|
| (V)50                            | (Ti)6                            | (Ti)120                          | 4.96—5.46        | 7.7—14.5  | 5.5—10.0 |
| (Co)41                           | (Fe)10                           | (Fe)130                          | 7.11—7.70        | 15.3—28.2 | 3.9—8.7  |
| (Cu)41                           | (Ni)10                           | (Ni)135                          | 8.33—8.97        | 20.0—35.0 | 4.3—10.9 |
| (Zn)49                           | (Cu)12                           | (Cu)145                          | 9.65—8.97        | 19.7—32.7 | 4.2—11.2 |

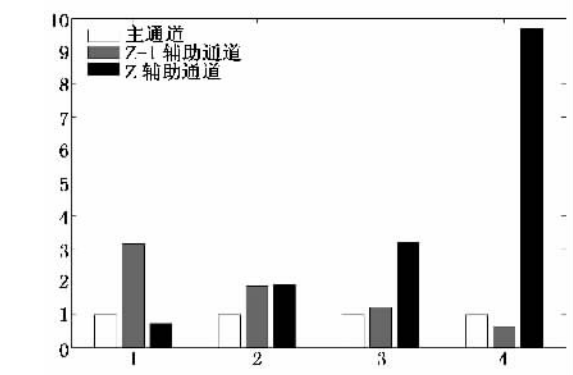


图 6 主通道本底与辅助通道比较( $1.5 \times 10^7$  K)

为保证正确的本底测量,需要对辅助通道设置进行更改,比较简便的办法是对后滤片厚度重新设置,表 3 和表 4 分别给出了最佳测量效果两种辅助通道后滤片厚度的设定值,同时给出了三个平衡温度下辅助通道测量值(以主通道本底归一).

表 3  $Z-1$  辅助通道后滤片厚度优化设置

| 后滤片<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | 与实际本底比值             |                     |                     |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                          | $1.4 \times 10^7$ K | $1.5 \times 10^7$ K | $1.6 \times 10^7$ K |
| 145                      | 1.06                | 1.00                | 0.95                |
| 143                      | 1.03                | 1.00                | 0.97                |
| 139                      | 1.03                | 1.02                | 1.01                |
| 135                      | 0.96                | 0.98                | 1.00                |

表 4  $Z$  辅助通道后滤片厚度优化设置

| 后滤片<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | 与实际本底比值             |                     |                     |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                          | $1.4 \times 10^7$ K | $1.5 \times 10^7$ K | $1.6 \times 10^7$ K |
| 114                      | 1.00                | 1.01                | 1.01                |
| 138                      | 1.01                | 1.02                | 1.02                |
| 165                      | 1.01                | 1.01                | 1.01                |
| 225                      | 1.04                | 1.01                | 1.04                |

## 5. 结 论

本文给出了测量平衡温度  $1.4 \times 10^7 - 1.6 \times 10^7$  K 黑体辐射滤波-荧光谱仪的设计,谱仪包含 V-Ti, Co-Fe, Cu-Ni 和 Zn-Cu 四个测量能段,通过优化每个能段前滤片-荧光片-后滤片组合的厚度可以提高测量信噪比并提供合适的探测器输出.此外,每个测量主通道都有配置了辅助通道用于本底测量,经过优化后辅助通道可准确的对本底进行测量.

[1] Wang C L 1981 *Rev. Sci. Instrum.* **52** 1317

[2] Sanford T W L, Nash T J, Marder B M, Spielman R B, Seamen, J F, McGum J S, Mock R C, Gilliland TL, Jobe D, Vargas M, Mosher D, Maxon S, Hammer J H, Alley W E, Zimmerman G B, Eddleman J L, Thee R S, Emig J, Bruns C, Hernandez J, Springer P T, Groot J S D, Welch D R, Struve K 1996 *Sandia Report SAND96-0222* <http://ftp.fas.org/srgp/othergov/doi/lanl/lib-www/sand/960222.pdf> [2009]

[3] Glenzer S H, Rosmej F B, Lee R W, Back C A, Estabrook K G, MacGowan B J, Shepard T D, Turner R E 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 365

[4] Kornblum H N, Kauffman R L, Smith J A 1986 *Rev. Sci. Instrum.* **57** 2179

[5] McDonald J W, Kauffman R L, Celeste J R, Rhodes M A, Lee F D, Suter L J, Lee A P, Foster J M, Slark G 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3753

[6] Qi L Y, Chen J B, Jiang X H, Liu S Y, Zheng Z J, Zhang B H, Ding Y K, Li C G, Wang D H, Zhu S C, Zhang J T 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2068 (in Chinese) [祁兰英、陈家斌、蒋小华、刘慎业、郑志坚、张保汉、丁永坤、李朝光、王大海、朱森昌、张家泰 2002 *物理学报* **51** 2069]

[7] Li S W, Yi R Q, Jiang X H, He X A, Cui Y L, Liu Y G, Ding Y

K, Liu S Y, Lan K, Li Y S, Wu C S, Gu P J, Fei W B, He X S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3255 (in Chinese) [李三伟、易荣清、蒋小华、何小安、崔延莉、刘永刚、丁永坤、刘慎业、蓝 可、李永升、吴畅书、古培俊、裴文兵、贺贤士 2009 物理学报 **58** 3255]

[8] Kornblum H N, Pruett B L, Tirsell K G, Slivinsky V W 1978 *Bull. Am. Phys. Soc.* **23** 806

[9] Bruns H C, Emig J A, Thoe R S, Springer P T, Hernandez J A M 1995 *X - Ray and Ultraviolet Sensors and Applications* San Diego July 13 1995 p60

[10] Wang D 2009 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **29** 773 (in Chinese) [王 栋 2009 核电子学与探测技术 **29** 773]

[11] Liu Q Z 1994 *diagnostic techniques for pulse radiation field* (Beijing : Science Press) p688 (in Chinese) [刘庆兆 1994 脉冲辐射场诊断技术 (北京 : 科学出版社) 第 688 页]

# Optimized design of filter-fluorescer spectrometer

Wang Dong<sup>†</sup>

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 19 August 2009 ; revised manuscript received 11 September 2009)

## Abstract

The filter-fluorescer method is an important X-ray diagnostic technique. For  $1.4 \times 10^7 - 1.6 \times 10^7$  K blackbody radiation, a four channel spectrometer consisting of filter-fluorescer combinations of V-Ti, Co-Fe, Cu-Ni and Zn-Cu was designed, and the corresponding supplementary channels were supplied for each primary channel. The calculation results show that the measurement of supplementary channel which has the same configuration as that of primary is not accurate, the postfilters of supplementary channels should be reconfigured to make an proper background measurement.

**Keywords :** filter-fluorescer spectrometer, optimized design, background measurement

**PACC :** 5270L

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : carpenter\_pw@sina.com