



一维丝室探测器衍射数据修正方法研究

报告人：温志文

单位：实验物理中心

代洪亮、祁辉荣、张建、刘荣光、欧阳群、庄保安，刘梅



概要

- 一维单丝探测器的介绍
- 同步辐射的测量
- 一维单丝探测器的二维衍射应用
- 修正方法研究
- 小结

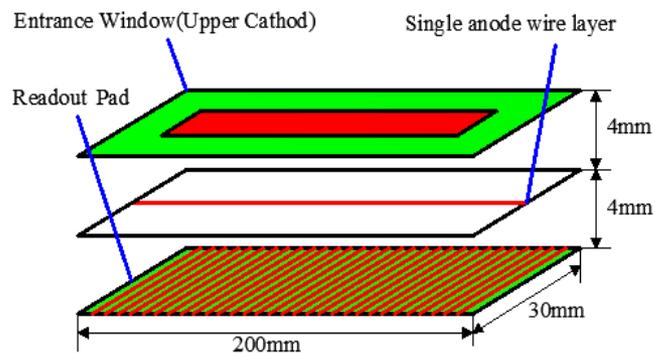


1. 一维单丝探测器的介绍

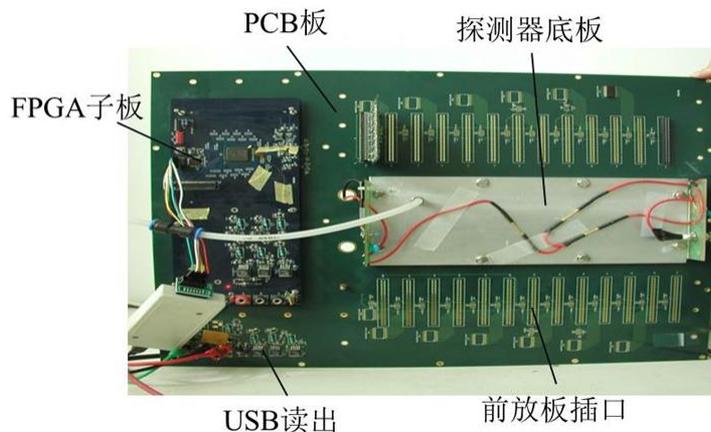
1.1 探测原理

一维单丝探测器对X射线的探测原理：X射线经过入射窗进入探测器内，发生光电效应产生原初电子，原初电子沿漂移电场向阳极丝移动，在阳极丝附近发生雪崩倍增，产生大量的离子和电子对，分别向阴极和阳极移动，在离子和电子的移动过程中，阳极丝和读出条感应出电荷信号，感应信号经后续电子学系统的放大、甄别、处理得到X射线的入射位置。

1.2 探测器结构



探测器的主要结构示意图



探测器的背面实物图

1.3 探测器的主要参数

入射窗：铝铂 $200 \times 10\text{mm}^2$

上阴极： $200 \times 50\text{mm}^2$

阳极丝：镀金钨丝 $15\mu\text{m}$

读出条： $30 \times 0.5\text{mm}^2$

间距 1mm

200 根

平面间距： 4mm

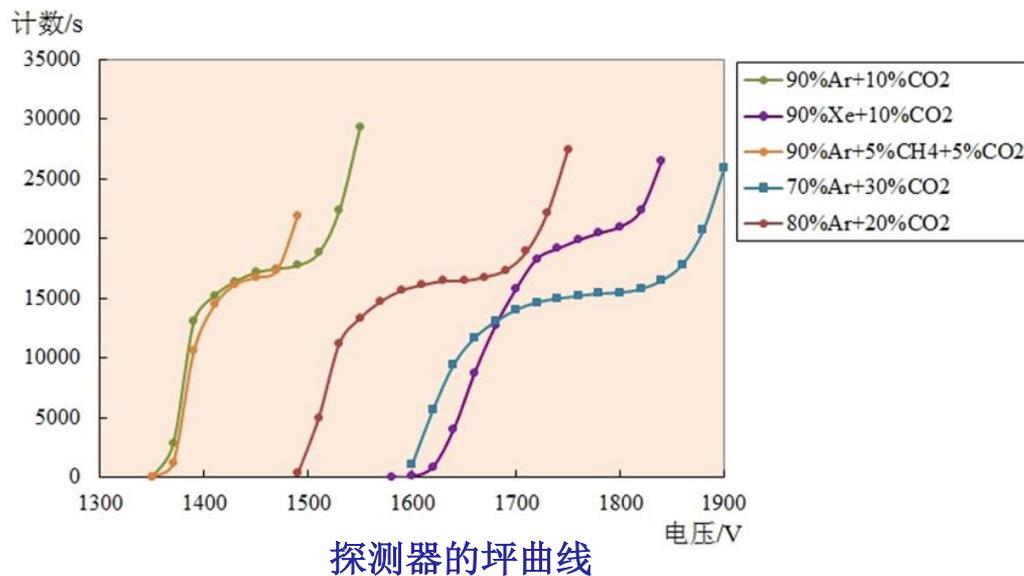
有效探测长度： 200mm

2.同步辐射测量

2.1 测量探测器的坪曲线

条件:

- ◆ ^{55}Fe 5.9keV X-ray
- ◆ 2mm准直狭缝
- ◆ 5种混合气体



结论:

90%Xe+10%CO₂具有最高的计数率，工作电压可选择1800V

70%Ar+30%CO₂具有最长的计数率坪区，工作电压可选择1820V

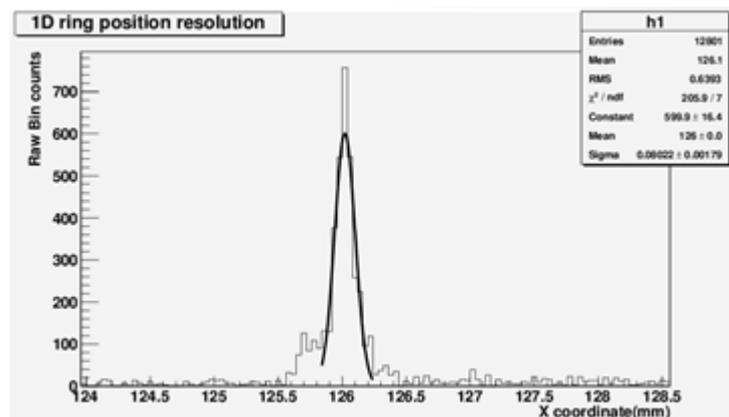
2.2 探测器在同步辐射下的位置分辨测量

测量不同能量X射线的位置分辨

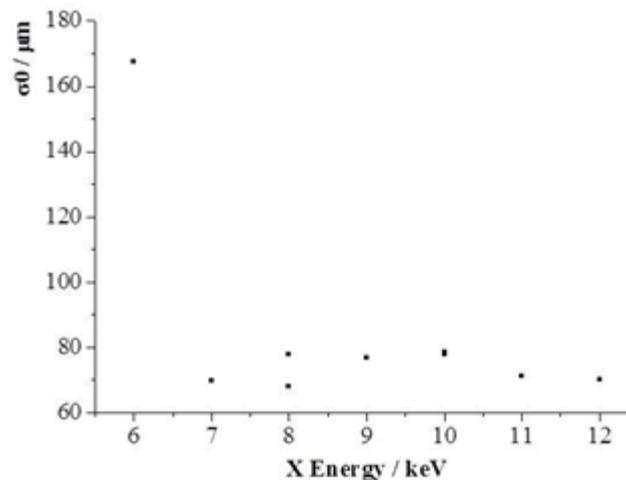
条件:

- ◆ 90%Xe+10%CO₂ 工作气体
- ◆ 1800V 工作高压
- ◆ 20 μ m 准直狭缝
- ◆ 126mm 入射位置

结果: 6keV X射线因能量低, 空气散射严重, 位置分辨差, 其余能量的位置分辨率 (σ) 在68~80 μ m间浮动。



8keV X射线的位置分辨拟合图



不同能量的位置分辨

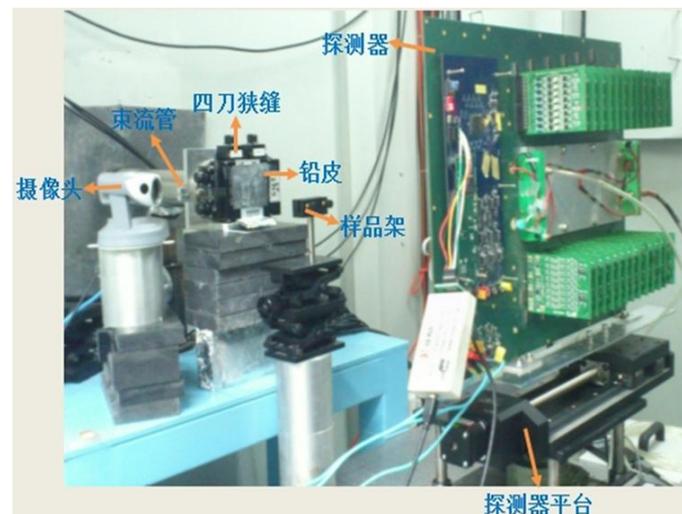
2.3 同步辐射衍射实验结构装置

主要实验装置:

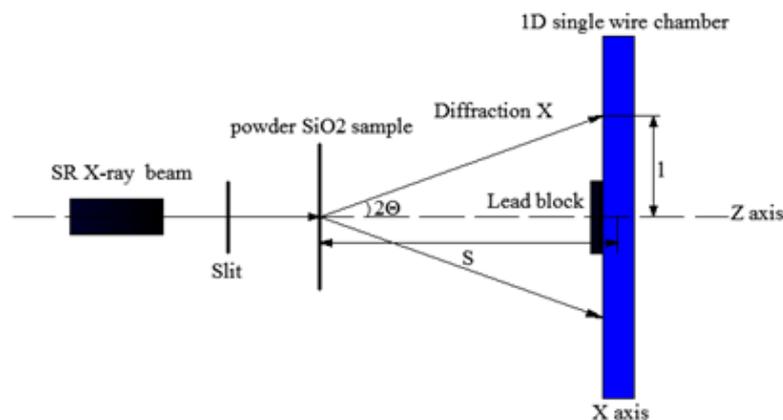
束流管、狭缝、样品和样品平台、铅板、探测器和探测器平台

实验步骤:

- ◆ 调节束流光斑的大小
- ◆ 调节束流，样品和探测器的位置
- ◆ 充气（3小时以上）
- ◆ 电子学取数系统预热半小时
- ◆ 按照计划进行实验



实验结构装置实物图



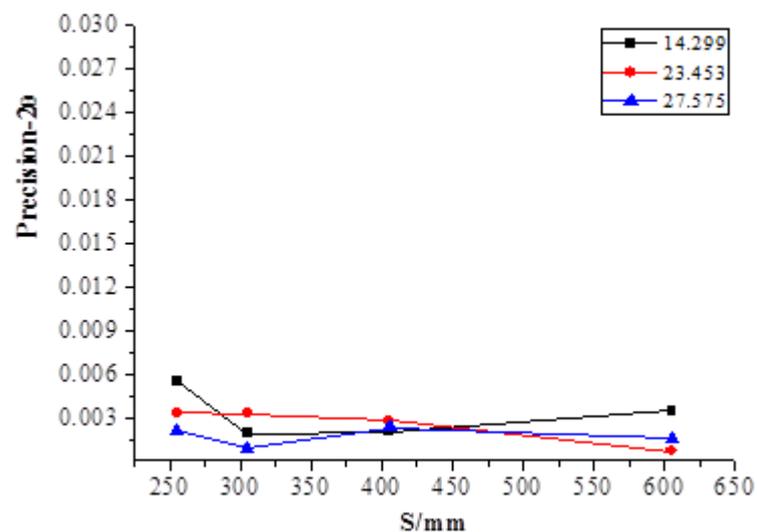
实验结构装置原理图

2.4 探测器的一维测量

测量不同衍射距离下衍射角的精度

条件:

- ◆ Si样品
- ◆ 16keV X-ray
- ◆ 90%Xe+10%CO₂ 工作气体
- ◆ 1800V 工作高压
- ◆ 样品到探测器距离 (mm) : 255、305、405、605
- ◆ 衍射角: 14.299°、23.453°、27.575°



不同距离下衍射角的测量

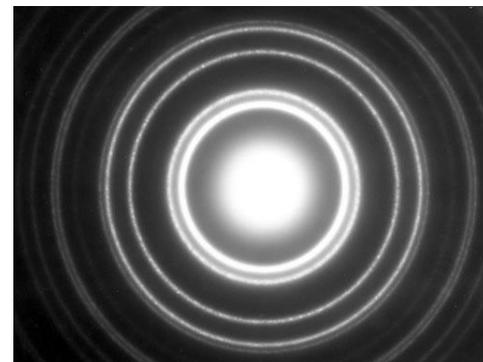
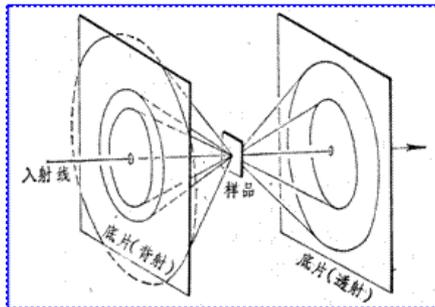
结论: 衍射角的测量精度在0.08%-0.6%之间
衍射角的测量精度与衍射距离无关

3 一维单丝探测器的二维衍射应用

衍射原理

布拉格公式:

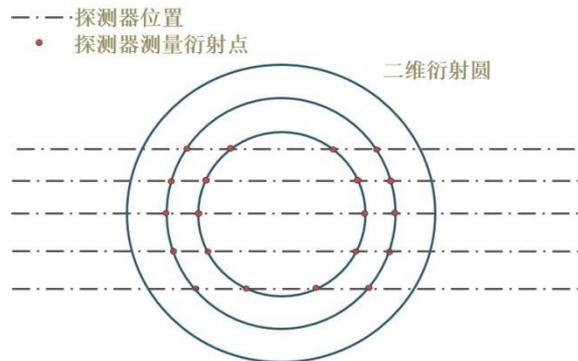
$$d\sin 2\theta = \lambda$$



X射线经样品衍射后的图像

成像方法:

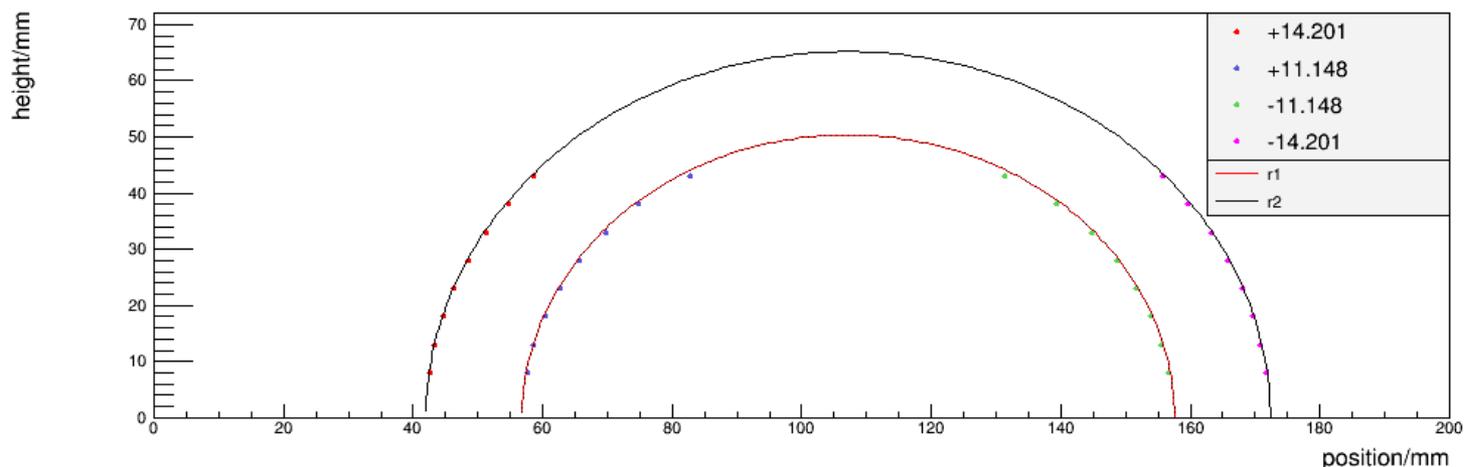
多次平行移动探测器, 测量探测器两端的对称峰位, 用这些测量到的峰位, 拟合出衍射圆。



3.1 二维衍射应用的测量结果

测量不同探测器中心高度的峰位

- 条件：
- ◆ SiO₂ 样品
 - ◆ 15keV X-ray
 - ◆ 70%Xe+30%CO₂ 工作气体
 - ◆ 1820V 工作高压
 - ◆ 样品到探测器距离：255mm
 - ◆ 衍射角：11.148°、14.201°
 - ◆ 探测器中心高度 (mm)：8、13、18、23、28、33、38、43



二维峰位测量结果

结果：测量到的衍射峰位与实际衍射圆的距离大于探测器的约200 μ m位置分辨，因此要进行位置修正。

4 修正方法研究

一维单丝气体探测器因本身结构原因导致的测量结果误差有：探测器的气体厚度和入射窗宽度。分析计算出气体厚度和入射窗宽度分别引起的衍射位置误差大小。

4.1 气体厚度误差分析

实际衍射位置：

X射线在探测器内的路径与阳极丝的交点位置，即图中A点位置。

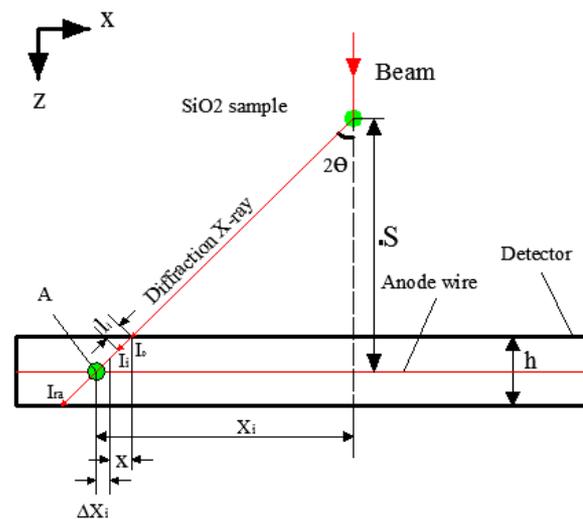
探测到的衍射位置：

根据X射线的衰减公式4.1，X射线在整个探测器射程内被探测器到的概率是不一样的，探测到的衍射位置为高斯拟合整个探测器测量到的事例形成的衍射峰位，肯定不在A点。

探测到的衍射位置与实际衍射位置存在误差。

衰减公式：
$$I_i = I_0(1 - e^{-\mu\rho l_i}) \quad (4.1)$$

X射线在某一位置 l_i 被探测到的概率： dI_i/I_{ra} (I_{ra} 为探测到的整个X射线强度)





因此可求出探测到的衍射位置:

$$\begin{aligned}x &= \int_0^{I_{r_a}} \frac{x dI_i}{I_{r_a}} \\ &= \frac{\sin 2\theta (1 - e^{-\mu \rho h / \cos 2\theta}) - \mu \rho r_a e^{-\mu \rho h / \cos 2\theta}}{\mu \rho (1 - e^{-\mu \rho h / \cos 2\theta})}\end{aligned}$$

气体厚度引起的衍射位置误差:

$$\Delta x_i = \frac{h \tan 2\theta}{2} - x$$

根据X射线的衰减公式, X射线被探测到的概率是最射程增加而减小的, 可得探测器右边测量的衍射位置偏大, 左边偏小, 因此修正公式为:

$$f(x_i) = \begin{cases} x_i - \left(\frac{h \tan 2\theta}{2} - x \right) & \text{左边} \\ x_i + \left(\frac{h \tan 2\theta}{2} - x \right) & \text{右边} \end{cases}$$

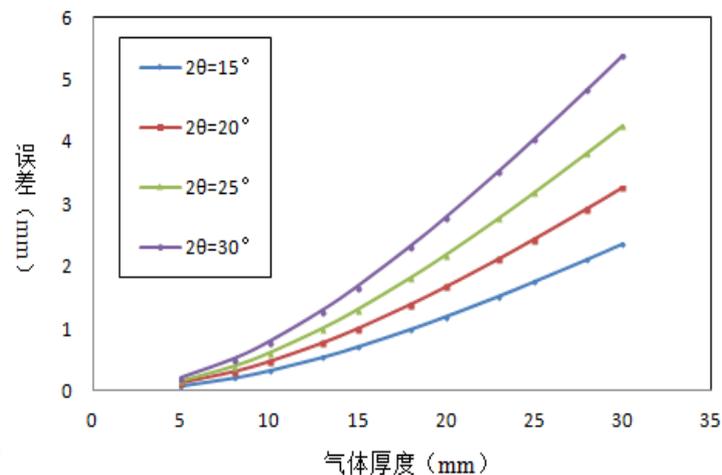
$f(x_i)$ 为修正后的峰位, x_i 为测量到的峰位。

从以上分析可知气体厚度引起的测量位置误差主要与探测器的气体厚度和衍射角有关。

计算在不同衍射角，不同气体厚度条件下，探测到的衍射位置误差

条件：

- ◆ 8keV X-ray
- ◆ 70%Xe+30%CO₂ 工作气体
- ◆ 衍射角：15°、20°、25°、30°
- ◆ 气体厚度：5 ~ 30mm



结果：因气体厚度引起的误差随着气体厚度增加而增加，随着衍射角的增加而增加。

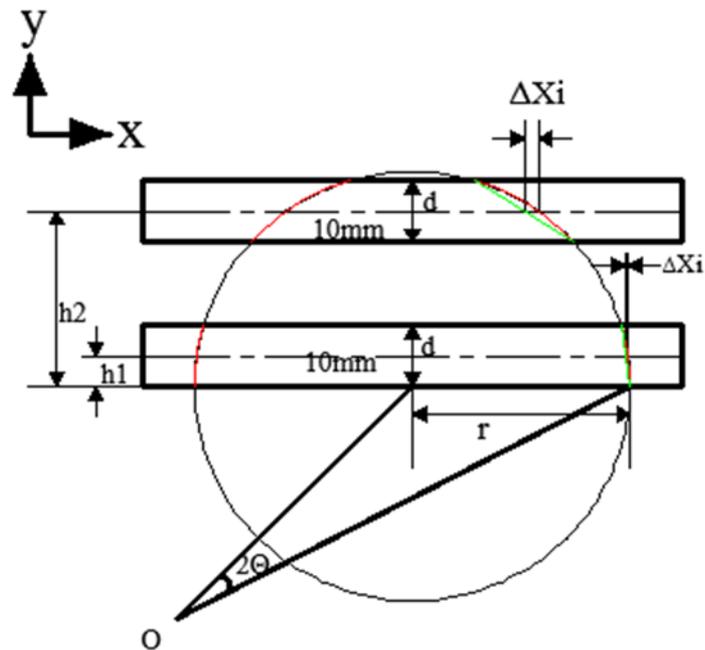
4.2 入射窗宽度误差分析

实际衍射位置：

图中阳极丝（虚线）与衍射圆的交点位置

探测到的衍射位置：

打在入射窗上的每个光子被探测到的概率是一样的，探测到的衍射位置为高斯拟合所有探测到的事例形成的峰位，这个衍射峰位与实际衍射位置存在误差。



计算入射窗宽度引起的误差：

探测到的衍射位置：

$$x = \frac{\sum_{x_i=\sqrt{r^2-(h+d/2)^2}}^{\sqrt{r^2-(h-d/2)^2}} x_i \cdot A}{\sum_{x_i=\sqrt{r^2-(h+d/2)^2}}^{\sqrt{r^2-(h-d/2)^2}} A}$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\sqrt{r^2 - \left(h + \frac{d}{2}\right)^2} + \sqrt{r^2 - \left(h - \frac{d}{2}\right)^2} \right) & \left(h \geq \frac{d}{2}\right) \\ \frac{1}{2} \left(r + \sqrt{r^2 - \left(h + \frac{d}{2}\right)^2} \right) & \left(\frac{d}{2} > h \geq 0\right) \end{cases}$$

(A为每个测量点的权重)



因此入射窗引起的衍射位置误差:

$$\Delta x_i = \begin{cases} \sqrt{r^2 - h^2} - 1/2 \left(\sqrt{r^2 - \left(h + \frac{d}{2}\right)^2} + \sqrt{r^2 - \left(h - \frac{d}{2}\right)^2} \right) & \left(h \geq \frac{d}{2}\right) \\ \sqrt{r^2 - h^2} - 1/2 \left(r + \sqrt{r^2 - \left(h + \frac{d}{2}\right)^2} \right) & \left(\frac{d}{2} > h \geq 0\right) \end{cases}$$

从以上分析可知探测器左端测量的位置偏大, 右端测量到的位置偏小, 所以入射窗宽度引起的误差修正公式为:

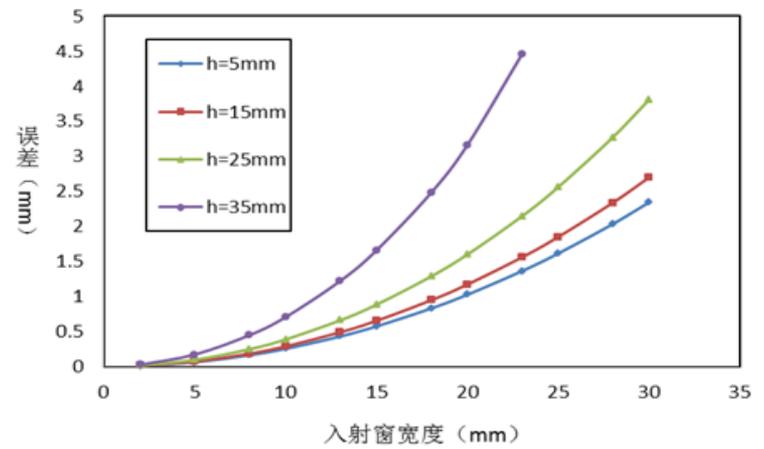
$$f(x_i) = \begin{cases} x_i - \Delta x_i & \text{左边} \\ x_i + \Delta x_i & \text{右边} \end{cases}$$

$f(x_i)$ 为修正后的峰位, x_i 为测量到的峰位。

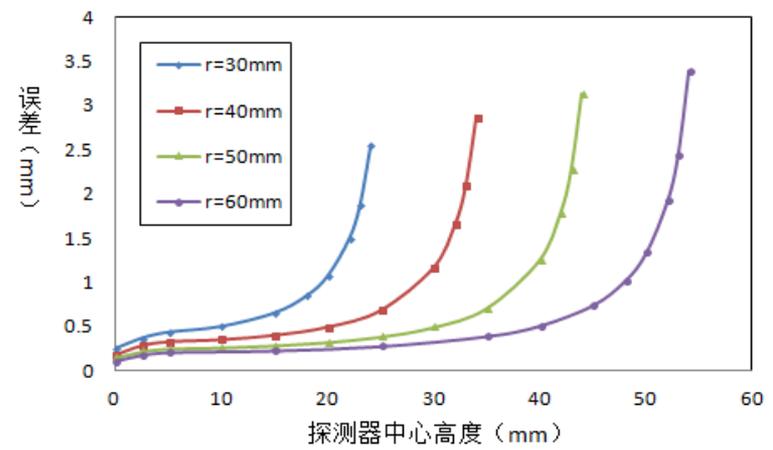


从探测到的衍射位置计算公式可知入射窗宽度引起的衍射位置误差与衍射圆的半径、入射窗的宽度和探测器的中心高度有关。

计算不同探测器中心高度，不同入射窗宽度条件下测量到的衍射位置误差（衍射圆半径50mm）



在不同衍射圆半径，不同探测器中心高度条件下，测量的衍射位置误差（入射窗宽度10mm）



结论：在衍射圆半径一定的情况下，测量到的衍射位置误差随入射窗宽度增加而增加，随探测器的中心高度增加而增加。

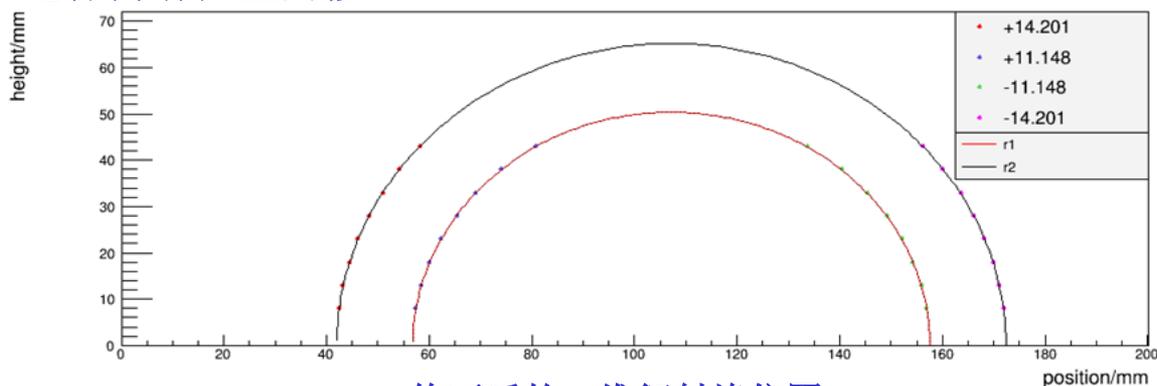
测量到的衍射位置误差随衍射圆半径的增加而减小。

4.3 衍射数据的修正

对探测器二维衍射应用测量到的数据进行修正

- 实验条件：
- ◆ SiO₂ 样品
 - ◆ 15keV X-ray
 - ◆ 70%Xe+30%CO₂ 工作气体
 - ◆ 1820V 工作高压
 - ◆ 样品到探测器距离：255mm
 - ◆ 衍射角：11.148°、14.201°
 - ◆ 探测器中心高度 (mm)：8、13、18、23、28、33、38、43

根据前面的误差分析，气体厚度在引起的衍射位置误差分别为**157μm**和**203 μm**，入射窗引起的误差为**199~2127 μm**，对于位置分辨约为**200um**的探测器需要进行衍射位置的修正。



修正后的二维衍射峰位图

结果：修正后的衍射位置与理论衍射圆符合很好，最大改善衍射位置的相对误差7%。



5 小结

- ◆ 探测器的工作原理，主要结构和主要参数。
- ◆ 探测器的同步辐射测量情况，得出了探测器的位置分辨大小。
- ◆ 探测器的二维衍射应用，测量二维衍射圆。
- ◆ 探测器因气体厚度和入射窗宽度引起的误差分析和修正。



谢 谢!