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

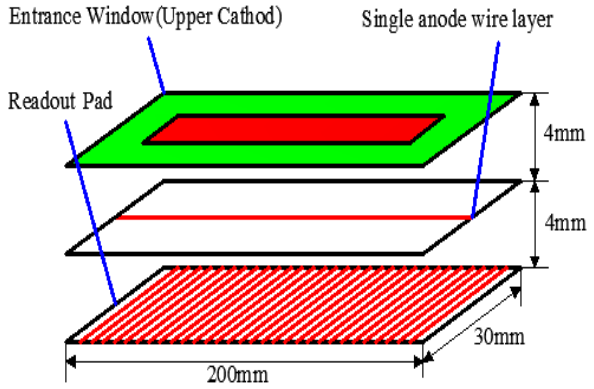


图1 探测器的主要结构示意图

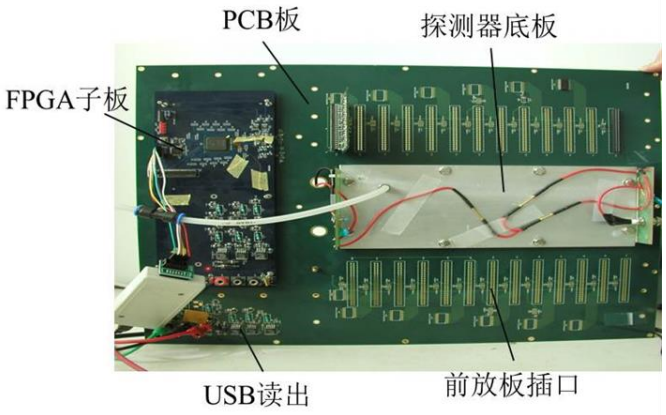


图2 探测器的实物图

1.3 探测器的主要参数

入射窗：200×10mm^2 铝箔

上阴极：200×50mm^2 铝箔

阳极丝：15um 镀金钨丝

读出条：30mm*0.5mm，1mm间距 200根

探测器的一维有效探测长度200mm。入射窗平面、阳极丝平面和读出条平面间距都是4mm。

2. 同步辐射测量

2.1 测量探测器的坪曲线

在Fe源5.9keV X-ray，2mm狭缝条件下测量5种气体，不同电压的计数率。

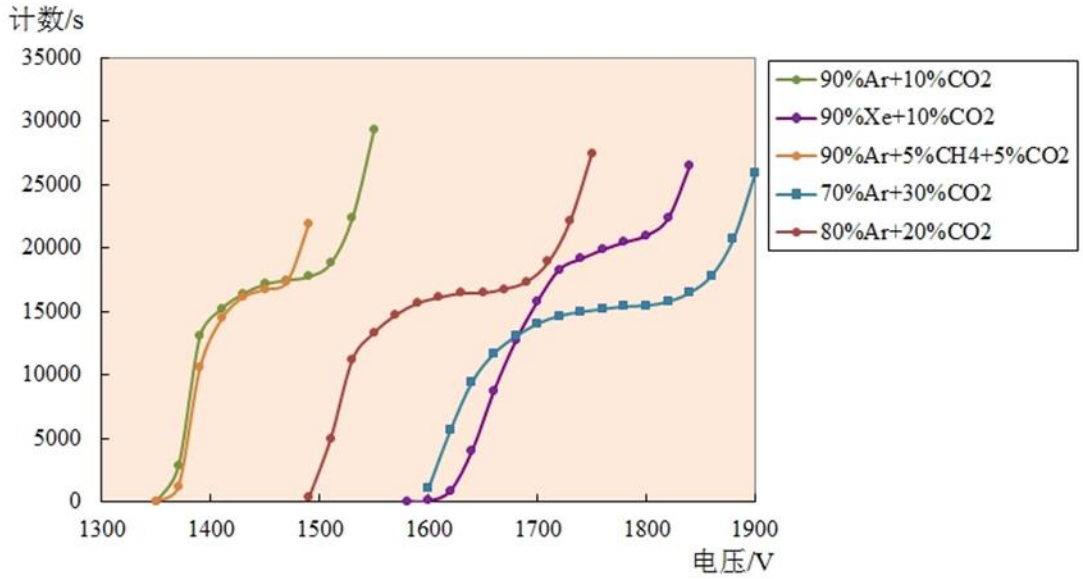


图3 探测器的坪曲线

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

工作气体：90%Xe+10%CO2

工作电压：1800V

狭缝:20um

测量位置：126mm

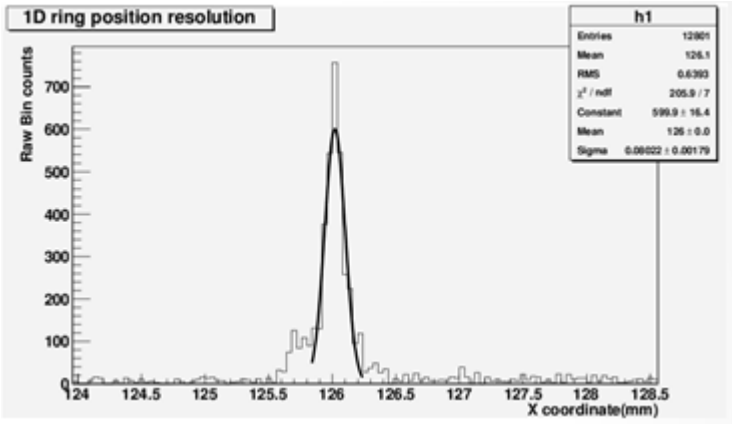


图4 8keV X射线的位置分辨拟合图

从图5可以看出。除了6keV X射线因能量低，空气散射严重，位置分辨差外，其余能量的X射线位置分辨率（σ）都在68~80um间浮动。

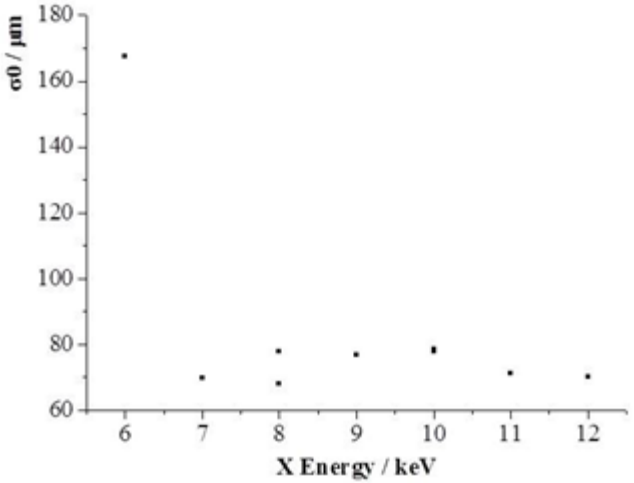


图5 不同能量的位置分辨

2.3 同步辐射衍射实验结构装置

同步辐射衍射实验装置主要包括：束流管、狭缝、样品和样品平台、铅板、探测器和探测器平台。

实验前调节狭缝，使打在荧光屏的光斑极细极亮（这个光斑可用于确定衍射圆的圆心）。固定束流位置不变，调节样品平台，使样品与束流在同一高度（y轴），同一水平位置（x轴），再调节探测器平台使探测器中心对准光斑，且探测器平行于x轴，垂直于y轴和z轴。

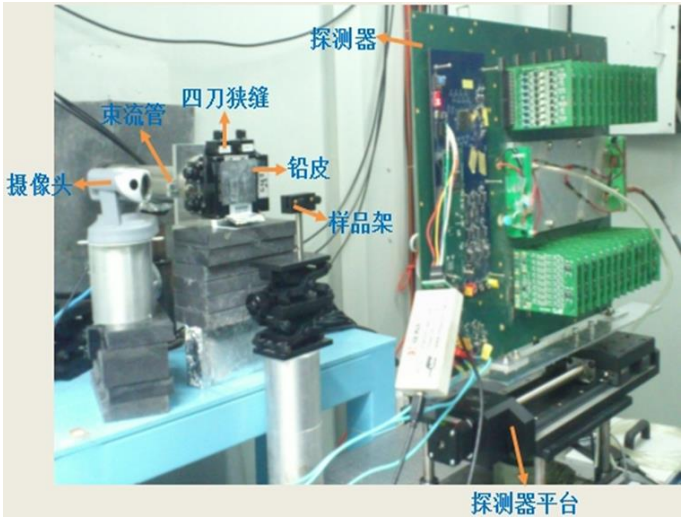


图6 实验结构装置实物图

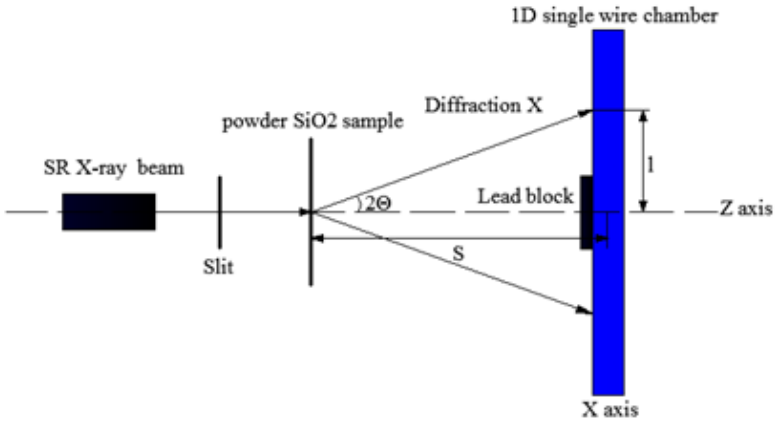


图7 实验结构装置原理图

2.4 探测器的一维测量

样品：Si

X-ray能量：16keV

工作气体：90%Xe+10%CO2

工作电压：1800V

样品到探测器中心距离：255mm、305mm、405mm、605mm

衍射角：14.299°、23.453°、27.575°

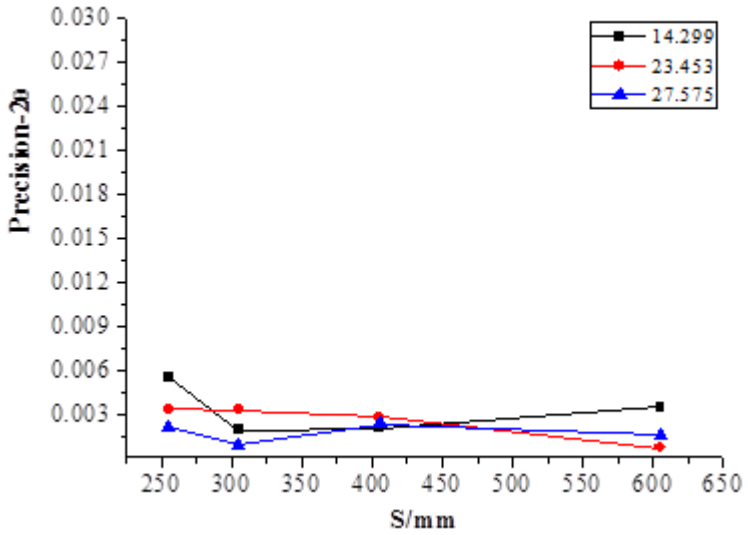


图8 不同距离下衍射角的测量

衍射角的测量精度在0.08%~0.6%之间。
衍射角的精度不随样品到探测器的中心距离而改变。

3 一维单丝探测器的二维衍射应用

X射线经过样品衍射后是多个同心圆，如图9所示，利用一维单丝探测器实现二维成像的测量方法是多次平行移动探测器，测量探测器两端的对称峰，用测量到的这些峰位可拟合出X射线经样品衍射后的圆。

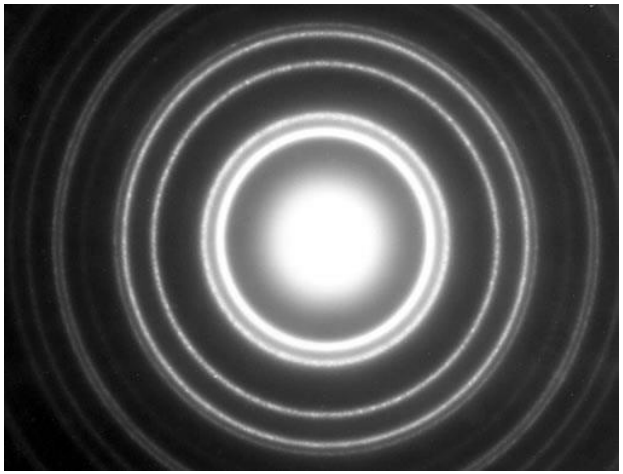


图9 X射线经样品衍射后的图像

3.1 二维衍射应用的测量结果

实验条件：样品　　SiO2
工作气体　70%Ar+30%CO2
工作电压　1820V
样品到探测器中心距离 255mm
探测器的中心高度 8、13、18、23、28、33、38、43（mm）
测量的衍射角：11.148°　14.201°

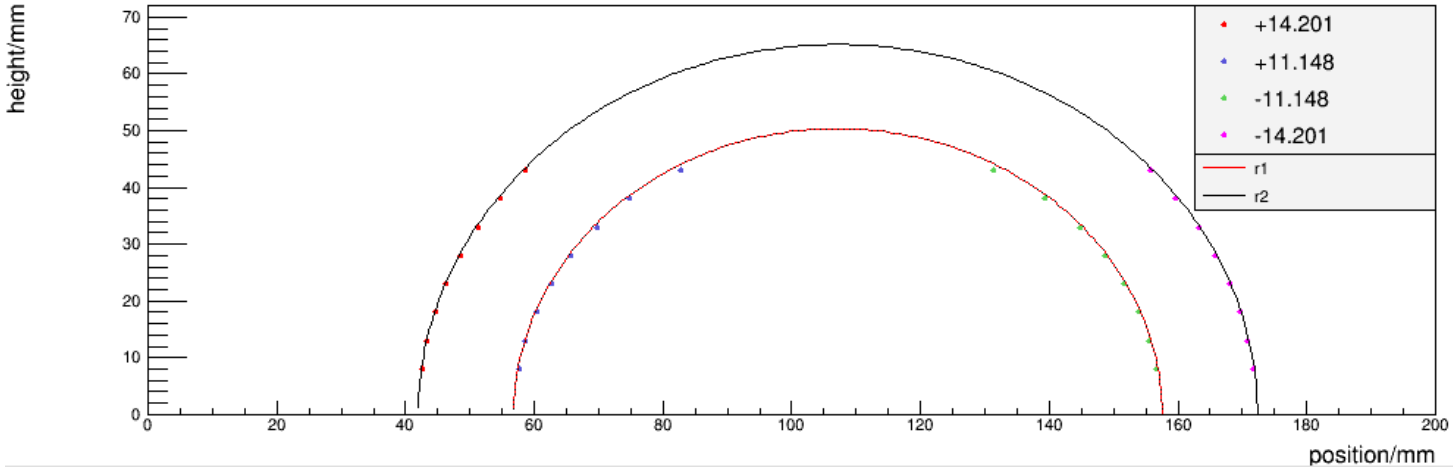


图10 二维峰位测量结果

图10测量到的衍射位置到理论衍射圆的距离大于探测器的约200um位置分辨，所以要进行位置修正。

4 修正方法研究

探测器的气体厚度和入射窗宽度都会给探测器测量到的衍射位置带来误差，所以需要计算出因探测器气体厚度和入射窗宽度带来的误差，再对衍射数据进行修正。

4.1 气体厚度误差分析

从图11可以看出，X射线经衍射后是以2θ角斜入射到探测器内，理论上探测器测量到的位置应该是图中A点位置。但根据X射线衰减公式（4.1），得到X射线在探测器内的每段射程被探测到的概率是不一样的，而探测到的结果是通过拟合整个探测器内探测到的X射线形成的高斯峰位。所以气体厚度会使测量的衍射位置带有误差。

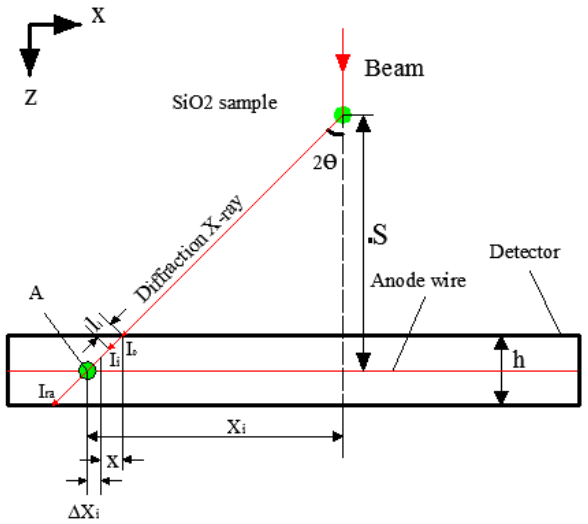


图11 气体厚度误差分析图

X射线在探测器内的衰减公式：

$$I_i = I_0\left(1 - e^{-\mu\rho l_i}\right) \qquad (4.1)$$

根据公式（4.1）可得到X射线在l_i处被探测到的权重为：$\frac{dI_i}{I_{ra}}$（I_{ra}为X射线在整个探测器内衰减掉的强度）

因此可求出探测器测量到的位置到X射线入射位置在x轴的投影距离：

$$x = \int_0^{I_{ra}} \frac{l_i/cos2\theta dI_i}{I_{ra}} \quad (4.2)$$

其中 $I_{r_a} = I_0\left(1 - e^{-\mu\rho htan2\theta/cos2\theta}\right)$

因此可以求出因气体厚度引起测量位置的误差：

$$\Delta x_i = \frac{htan2\theta}{2} - \frac{\cos2\theta\left(1-e^{-\mu\rho htan2\theta/cos2\theta}\right)-r_a\mu\rho e^{-\mu\rho htan2\theta/cos2\theta}}{\mu\rho\left(1-e^{-\mu\rho htan2\theta/cos2\theta}\right)} \quad (4.3)$$

因为在探测器内的前半射程被探测到的概率大于后半射程的概率，所以在探测器左端测到的位置偏大，右端测到的位置偏小，因此可得到因气体厚度引起的测量位置误差修正公式为：

$$f(x_i)=\begin{cases} x_i - \left(\frac{htan2\theta}{2} - x\right) & \text{左边} \\ x_i + \left(\frac{htan2\theta}{2} - x\right) & \text{右边} \end{cases} \quad (4.4)$$

$f(x_i)$为修正后的衍射位置，x_i为探测到的衍射位置。

从公式（4.3）可以看出因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。

图12根据公式（4.3）算出在8 keV X射线，70%Ar，15°、20°、25°和30°条件下不同气体厚度引起的衍射位置误差。

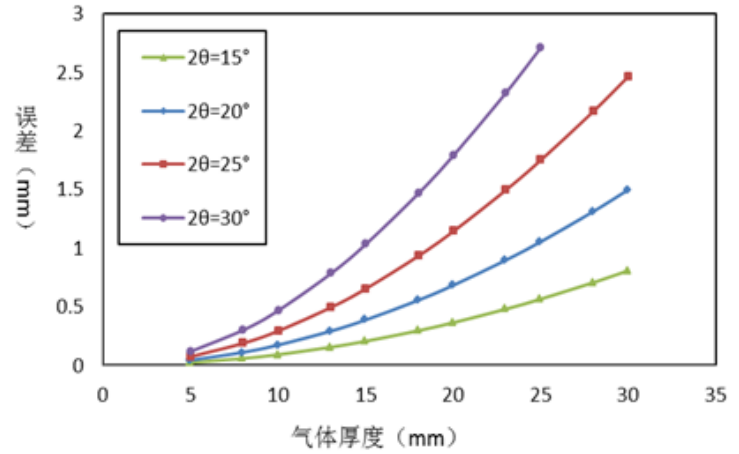


图12 在不同衍射角，不同气体厚度条件下，探测到的衍射位置误差

从图12可以看出，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

X射线经样品衍射后打在探测器上的是如图13所示的红色圆弧，因为X射线衍射后在同一个大小的衍射角方向是各向同性的，所以衍射后的X射线打在圆弧上的每一点的权重是一样的，探测到的衍射位置是通过拟合多个事例形成的高斯峰。所以探测器测量到的位置是：

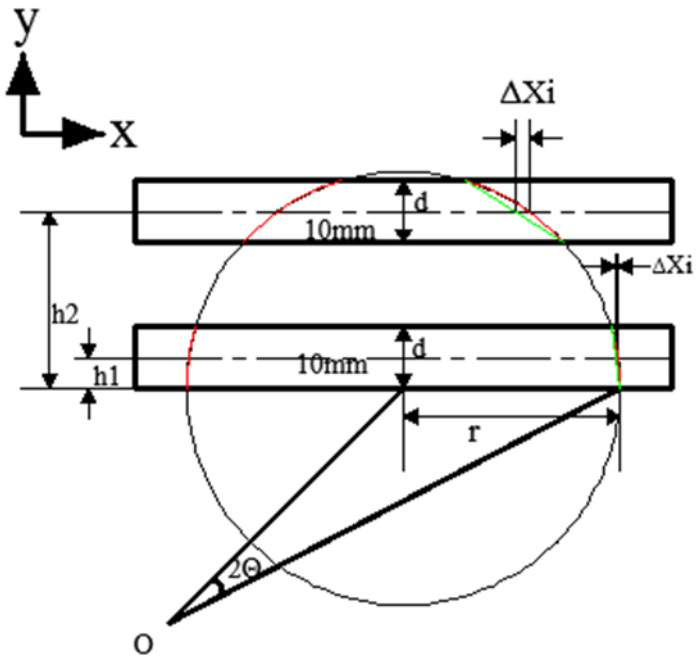


图13 入射窗宽度引起误差分析图（虚线表示阳极丝的位置）

$$X = \sum_{x_i=\sqrt{r^2-(h+d/2)^2}}^{\sqrt{r^2-(h-d/2)^2}} x_i \times A \Big/ \sum_{x_i=\sqrt{r^2-(h+d/2)^2}}^{\sqrt{r^2-(h-d/2)^2}} A$$

$$= \frac{1}{2}\left(\sqrt{r^2-(h+d/2)^2} + \sqrt{r^2-(h-d/2)^2}\right)$$

（A为每个测量点的权重）

所以入射窗引起的位置误差为：

$$\Delta x_i = \sqrt{r^2 - h^2} - 1/2\left(\sqrt{r^2 - (h + d/2)^2} + \sqrt{r^2 - (h - d/2)^2}\right) \quad (4.5)$$

从图13可以看出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

$$\mathrm{f}(x_i) = \begin{cases} x_i - \Delta x_i & \text{左边} \\ x_i + \Delta x_i & \text{右边} \end{cases} \quad (4.6)$$

$\mathrm{f}(x_i)$为修正后的峰位，x_i为测量到的峰位。

从公式（4.5）因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。

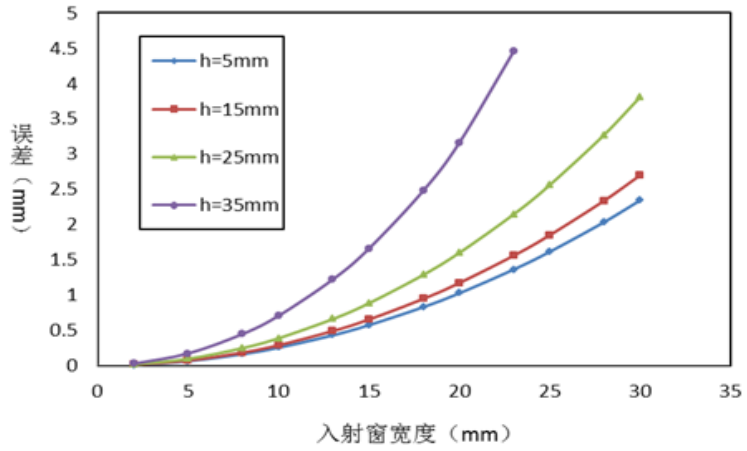


图14 在不同探测器中心高度，不同入射窗宽度条件下测量到的衍射位置误差（衍射圆半径50mm）

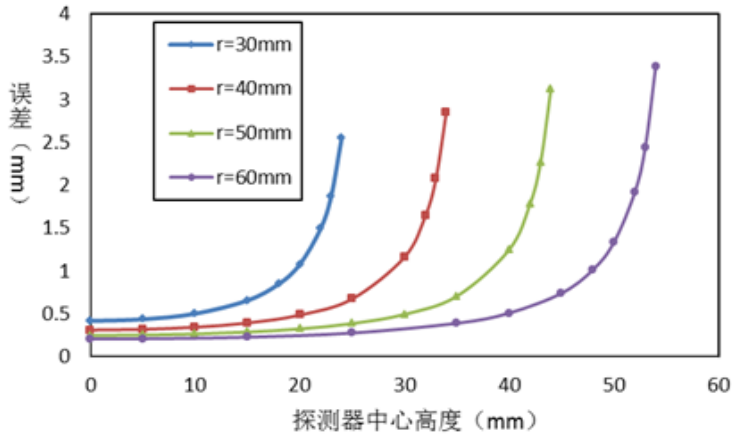


图15 在不同衍射圆半径，不同探测器中心高度条件下，测量的衍射位置误差（入射窗宽度10mm）

从图14可以的出，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。

从图15还可以得到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

对探测器的二维衍射应用测量到的数据进行修正。根据前面的误差分析，算出在二维衍射应用实验条件下的气体厚度引起的误差大小和入射窗宽度引起的误差大小，计算得到气体厚度在11.148°和12.201°衍射角下引起的误差分别为5.271um和8.80um，入射窗宽度引起的误差在259~2127um之间。因为探测器的位置分辨为200um左右，所以只需要对测量到的衍射数据进行入射窗宽度引起的误差修正。

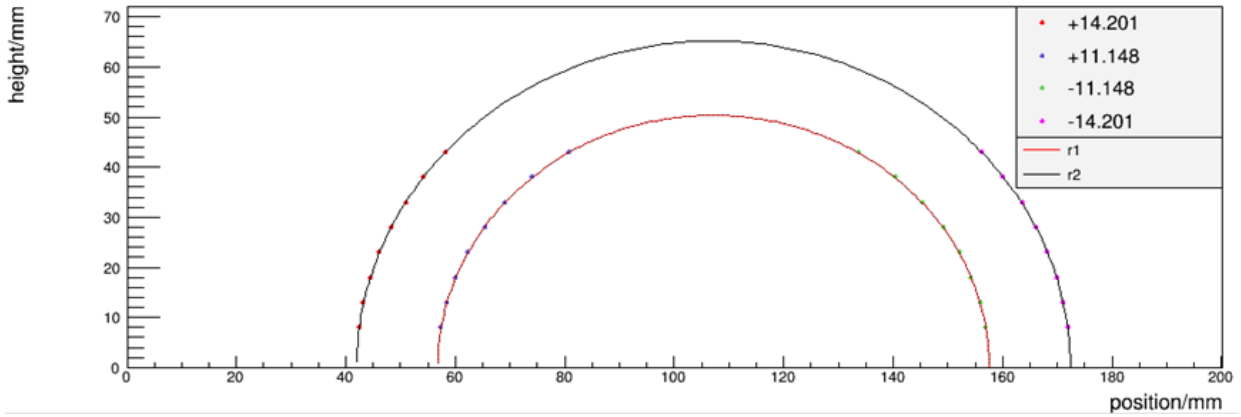


图16 修正后的二维衍射峰位图

修正后的衍射位置与理论衍射圆符合很好

5 小结

a 探测器的工作原理，主要结构和主要参数。

b 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。

c 探测器的二维衍射应用，测量二维衍射圆。

d 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！