

基于 PSD 的 X 射线光束位置探测器设计

张帆^{1,2} 谢亚宁¹ 张小威³ 胡天斗¹

1 (中国科学院高能物理研究所多学科中心 北京 100049)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (Photon factory, High energy accelerator research organization, Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan)

摘要 位置灵敏探测器(Position sensitive device, PSD)是一种利用光电二极管表面电阻的光电子位置传感器,具有高速、高分辨率、可靠性好等优点。本文描述了将 PSD 用于 X 射线条件性能测试的结果,给出了基于 PSD 的 X 射线光束位置探测器(X-ray beam position monitor, XBPM)的一个具体设计方案,并进行了相应估算,初步表明了其可行性。

关键词 同步辐射, X 射线光束位置探测器, 位置灵敏探测器

中图分类号 TL8

位置灵敏探测器(Position sensitive detector, PSD)是一种利用光电二极管表面电阻的光电子位置传感器。与分散单元的探测器(如 CCD)不同,它可提供连续的位置坐标数据,位置分辨率高、响应速度快。其中,一维 PSD 设计用于位移计、相机自动聚焦等高精度距离测量场合。

利用同步辐射 X 射线光源的实验对光源的稳定性有较高要求。须对 X 射线光束的强度、位置和方向进行实时测量。传统同步辐射 X 射线光束位置探测器(X-Ray beam position monitor, XBPM)基于光电效应原理, X 射线照射到探测器的金属探头时产生光电流,根据光电流信号判断光束的强度、位置和分布等参数。目前,北京同步辐射装置的 XBPM 结构有双丝型、刀口型等^[1]。其中,双丝型使用 $\Phi 0.1\text{mm}$ 的镀金钨丝。此类 XBPM 存在如下问题:(1)长期在高温强辐射下工作,镀金钨丝强度减弱,运动时易因振动而折断;(2)束线的真空程度有限,高温下探测器金属表面易沉积碳、硫化、氧化,导致光电子发射特性改变;(3)电机在真空中,须通过波纹管将驱动馈入真空,限于机械设计和加工能力,可靠性欠佳、移动时振动较大;(4)对于使用扭摆器光源的硬 X 射线光束线,扭摆器上下游的弯转磁铁和聚焦磁铁产生的 X 射线会导致光束中光强分布的变化和不对称,导致测量误差。

1 PSD 原理

图 1 是一维 PSD 的结构示意图,与 PIN 光电二

极管结构基本相同。在一维 PSD 中,高阻的 n 型硅基底上制作有 p 型电阻层, p 型电阻层两端有一对输出电极。在硅基底背面制作有连接有公共电极的 n 型层。

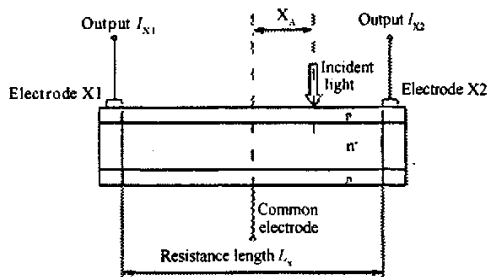


图 1 一维 PSD 的结构示意图

Fig.1 Structure of one-dimensional PSD

极管结构基本相同。在一维 PSD 中,高阻的 n 型硅基底上制作有 p 型电阻层, p 型电阻层两端有一对输出电极。在硅基底背面制作有连接有公共电极的 n 型层。

$$X_A = \frac{L_X}{2} \times \frac{I_{X2} - I_{X1}}{I_{X1} + I_{X2}}$$

其中, I_{X1} 为流过电极 X1 的电流, I_{X2} 为流过电极 X2 的电流, L_X 为器件的电阻长度即敏感区长度, X_A 为以 PSD 电学中心为原点的人射光点重心的坐标。

2 PSD 用于 X 射线的位置探测

本文中使用的 PSD 为日本滨松光子生产的型号为 S3270 的一维 PSD,其器件规格书中 25℃时的主要特性列于表 1。

表 1 S3270 的主要特性参数
Table 1 Main character of S3270

参数	Parameter	数值	Value
敏感区域	Active area	37mm×1mm	
位置分辨率	Position resolution	2.8μm	
位置测量非线性 (典型值)	Position detection error (Typical)	±100μm	
响应波长范围	Spectral response range	0.7—1.1μm	
暗电流 (典型值, 反偏 5V)	Dark current (Typical, Bias 5V)	0.5nA	
饱和光电流	Saturation photon current	300μA	
电容 (反偏 5V)	Terminal capacitance (Bias 5V)	100pF	

该 PSD 设计用于探测红外线,但预计其对与同步辐射扭摆器光源特征能量相近的 X 射线(如 5.6keV)有较大的响应^[2]。如作为其窗口材料的树脂不含氟等较重元素,则对 5.6keV 左右的 X 射线吸收较少。如 0.4mm 厚的聚乙烯能透过 57%的 5.6keV 单能 X 射线。根据器件的极间电容(100pF)、敏感区域面积(37mm×37mm)和硅的相对电容率(11.7),使用 PN 结势垒电容,即平行板电容器电容的表达式,能算出 S3270 在 5V 反向偏压下耗尽层厚度约为 38μm。38μm 的硅能吸收约 81%的入射 5.6keV 的单能 X 射线。

另外,硅的 K 层电子的结合能为 1.8keV,则光电效应产生的电子能量为 5.6keV-1.8keV = 3.8keV。此能量的电子在硅中的能量衰减率约为 6.2keV/μm,所以被耗尽层吸收的 X 射线光子能把其几乎全部能量沉积在耗尽层中。硅的平均电离功为 3.6eV。忽略器件硅片表面的 p 型电阻层和钝化层对 X 射线的吸收,设非耗尽层中产生的光生载流子在扩散到耗尽层前已被复合,整个器件对 5.6keV 的 X 光子的量子效率为 57%×81%×(5600eV/3.6eV) ≈ 720 电子/光子。

3 实验测试

实验在北京同步辐射装置 4W1B 实验站白光模式下进行。S3270 型 PSD 的驱动电路为日本滨松光

子的 C9068,通过 RS232 串行口将数据读出。其中,光斑重心位置的量化输出位数为 12 位,易算出此量化导致的位置分辨能力为 9μm。该 PSD 安装在步进电机驱动的电动升降台上。X 射线经过多层 0.1mm 厚的铝箔过滤后正入射到 PSD 上。发现 5—10 层铝箔层能使 PSD 总输出电流处于驱动电路手册给出的正常工作范围(10—90μA)。

驱动电动升降台垂直运动,每降 50μm 后读取 PSD 驱动电路输出的位置信号 30 次。实验重复多次。图 2 是其中某次实验的结果。可以看出,在此实验条件下,光斑相对于实验站的位置变化可基本忽略,PSD 的位置分辨率远优于 50μm。

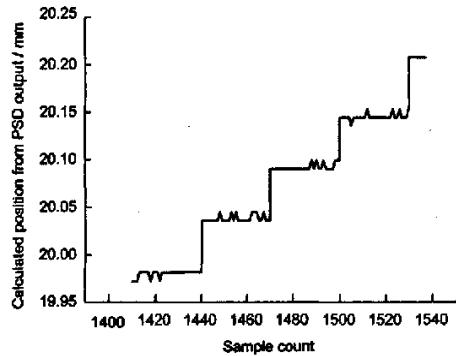


图 2 X 射线下 PSD 位置分辨率测试
Fig. 2 Position resolution test of PSD under X-ray

图 3 为升降台位移与 PSD 测得位置之间的函数关系。可见在本实验条件下,该曲线是单调的,但其非线性超出了器件手册保证的范围,原因还不清楚。但即使该非线性无法避免,也可加以校正。

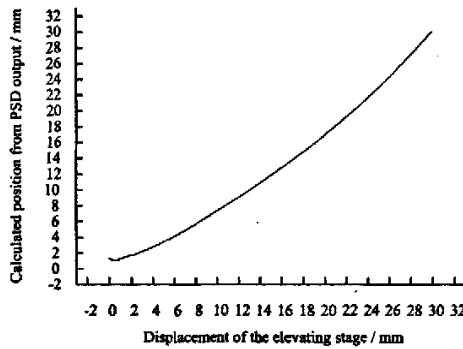


图 3 升降台位移与 PSD 输出计算所得位置间的关系
Fig.3 Calculated position from PSD output as a function of the displacement of the elevating stage

固定光源与 PSD 位置,测定光强对 PSD 位置测量的影响,结果见图 4。该实验使用 X 光机光源,入射到 PSD 上的光束用铅准直为宽约 8mm。横坐

标为 X 光管电流。由图 4 可见, 光强在一定范围内的变化对测得的光斑重心位置影响很小。另外, 实验也证实, 在光斑大小不超过 1cm 时, PSD 的位置分辨率与光斑大小基本无关。

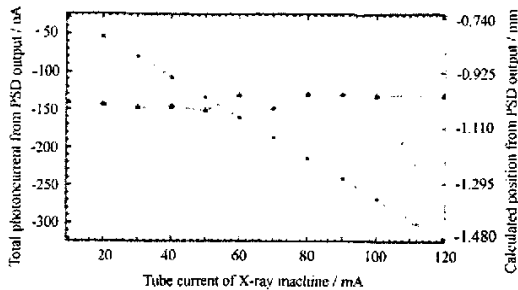


图 4 光强对 PSD 测量得到的位置的影响

Fig.4 The influence of X-ray intensity on calculated position

4 基于 PSD 的 XBPM 设计方案及有关估算

同步辐射弯转磁铁光源具有很大的水平方向发散度, 功率密度也较低。因此, 在 XBPM 设计中, 可使 X 射线通过适当的水冷吸收片后入射于 PSD。

对于同步辐射插入件光源, 其水平发散度较小, 功率密度很大。如北京同步辐射装置 1W1B 光束线为扭摆器光源, 其光束水平发散角仅 1.1mrad。而封装好的 S3270 宽 5mm。若将其安装在距离扭摆器末端 13.63m 处(前端区 4 刀口狭缝后 10cm), 则将遮挡多达 1/3 的同步辐射光, 这是不可接受的, 况且一条光束线上通常需安装多个 XBPM。

因此, 本文提出的设计方案是使用硅单晶体薄片边缘对束线边缘部分衍射, 衍射光通过镀铝铍窗口和适当厚度的树脂吸收片后, 在真空外用 PSD 探测其相对位置。图 5 是此方案 XBPM 的结构示意图。

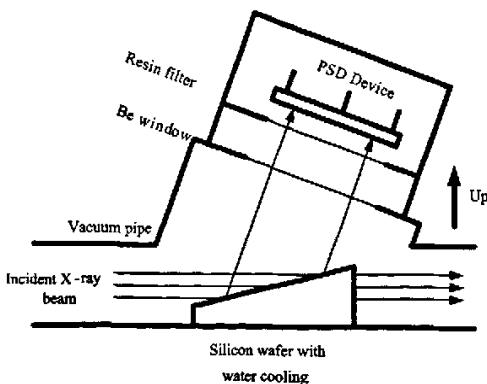


图 5 设计的用于扭摆器光源束线的 XBPM 结构示意图

Fig.5 Designed structure of XBPM used on wiggler beam line

经计算, 此种结构可使 PSD 产生信噪比足够的大电流输出。设使用 Si(220)面衍射 X 射线, 其能量为 5.6keV。已知 Si(220)晶面间距为 1.920Å, 则其衍射的 2 倍布拉格角为 70.5°。还可算出, 晶体在这个角度上, 其衍射平面内 2 倍布拉格角为 65.2°—75.9°的范围内并无晶面指数在 ±16 以内的衍射点。另外, 用考虑吸收的动力学衍射理论可以算出, 在对称布拉格衍射条件下向上衍射同步辐射 X 射线, 衍射后的光通量密度相当于将 0.358eV 带宽内的水平偏振 X 射线和 0.092eV 带宽内的垂直偏振 X 射线全部反射。设储存环参数为电子能量 2.5GeV, 流强 80mA, 用 1W1 扭摆器的参数计算, 忽略电子束团的空间和角度发散, 用同步辐射光强的解析表达式^[3]可算出在距离扭摆器 13.63m、偏离扭摆器轴线 2mrad 处被衍射的垂直方向的光通量密度分布, 如图 6 所示。若使用 0.285mm 厚的硅晶片边缘衍射 X 射线, 可算得入射到硅片上的 X 射线总功率为 1.84W, 衍射光总光通量为 $5.02 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, 不加吸收片时, PSD 表面的最大吸收剂量率约为 700Gy/s。由前文给出的 PSD 的量子效率, 该光通量可使 PSD 产生 5.8μA 的光电流。设电路通频带为 100kHz, 仅考虑热噪声(约 250pA), 电流散粒噪声(约 470pA), 运算放大器等效噪声电流(设为 500pA), 则总噪声电流为 730pA, 可计算得 S3270 的位置分辨率约为 4.5μm。

另外, X 射线衍射效率对晶体缺陷很敏感, 因此衍射 X 射线的硅晶片边缘应该仔细切割、打磨、抛光并刻蚀, 以尽量减少加工过程产生的晶体缺陷。

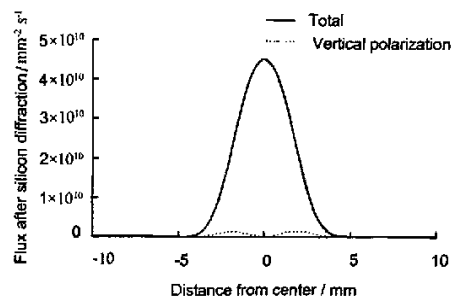


图 6 被衍射的光通量密度的垂直分布

Fig.6 Vertical distribution of diffracted photon flux

5 总结和讨论

XBPM 是同步辐射光束线上的重要部件,然而传统的利用光电子发射工作的 XBPM 有某些不足,主要是其对机械加工的精度要求较高。PSD 是一种具有 PIN 光电二极管结构的可测量光斑强度和重心位置的半导体传感器,具有高的响应速度。本文提出了一种使用 PSD 的 XBPM 的设计方案。方案中直接受 X 射线白光照射的为硅单晶片的边缘,硅片传热良好,预计在水冷条件下温升较小,且 X 射线衍射对硅片表面的轻微玷污不敏感。PSD 测量的是光斑的重心位置,应用于扭摆器光束线时,因偏转磁铁同步辐射在单位水平发散角上扭摆器的特征能量处的总光通量相对较小,因此对 PSD 光斑位置测量的影响可望较小。

初步的计算表明,本文提出的使用硅单晶边缘衍射同步辐射边光引出单色 X 射线并用 PSD 进行位置和强度测量的方案是可行的,能够基本满足目前同步辐射光束线中非聚焦或单色化部分的束流监测要求,尽管尚未制造并在光束线上安装这样的 XBPM 进行实验。在使用 PSD 作为探测器的情况下,其它的引出 X 射线的方案与此方案相比的优劣之处还有待探讨,例如文献[4]、[5]中使用 127 μm 厚的聚酰亚胺薄膜散射 X 射线,散射的射线经过狭缝准直后入射到探测器上。

传统的利用光电子发射工作的 XBPM 需要在真空内的机械运动,对机械加工精度和质量要求很高,达到这样的制造质量有一定困难。而本文提出的基于 PSD 的 XBPM 使用半导体器件,仅在最初将 PSD 对准衍射光斑时需要使用遥控的步进电机驱动的机械装置,在工作时不需要任何机械运动,有望大大降低对机械结构加工精度和质量的要求,提高可靠性,这是本设计的最大优点。

在其他主要性能方面,相同条件下,传统基于光电效应的 XBPM 输出的光电流大小约为几十至几百微安,因而位置分辨率和最大测量速度仅比本设计略好。双丝型 XBPM 在 X 射线光束上下各遮挡 0.1mm,刀片型 XBPM 遮挡边光约 1.5mm,而本设计仅遮挡边光约 0.3mm。

PSD 没有获得光强分布的形状的能力,然而在某些应用中,还是需要测得光强分布的形状的。比如通过在多个位置测量 X 射线通过准直镜后在竖直方向上光强分布的形状,可以得到光束发散度的信息,从而计算得到经过单色器后的 X 射线能量分辨率。这时,可将图 4 中的 PSD 换为采用可透过 X 射线的塑料窗口的线阵普通光学 CCD 或线阵光学 CMOS 传感器。同时,通过使用 CCD 并配合较好的拟合算法,可以期望进一步减轻偏转磁铁和聚焦磁铁引起的同步辐射对 XBPM 光束位置测量的干扰。

CCD 在 1—15keV 的范围内是良好的 X 射线探测器^[6]。与普通光学 CCD 相比较,PSD 的优点是高速、高的对 X 射线光子的量子效率和辐射导致的性能劣化有望相对较小。普通线阵光学 CCD 上的转移栅和 MOSFET 等对辐射损伤可能是相当敏感的,因此在使用时可能不得不设法用狭缝遮挡这些部分而仅露出光电二极管阵列。

PSD 和普通光学 CCD 在长期强 X 射线照射下具体的性能衰减程度还需要进一步调研和实验测试。但是由于器件处于真空外,因此在测量间隔期间可以方便地用遥控运动的铅片屏蔽辐射减缓探测器的辐照损伤,性能劣化的探测器的更换也相对容易。

参考文献

- 1 谢亚宁,刘涛,胡天斗,等.核技术,2005,28(7):496—499
XIE Yaning, LIU Tao, HU Tiandou, *et al.* Nucl Tech, 2005, 28(7):496—499
- 2 Holidack K, Peatman W B, Schroeter T h. Rev Sci Instrum, 1995, 66(2): 1889—1891
- 3 X-Ray data booklet. http://xdb.lbl.gov/Section2/Sec_2-1.html (2006-8)
- 4 Van Silfhout R G, Manolopoulos S, Kyele N R, *et al.* Sens Actuators A, 2007, 133(1): 82—87
- 5 Kyele N R, Decanniere K, Van Silfhout R G J Synchrotron Radiat, 2005, 12(6): 800—806
- 6 Egger J-P. Hyperfine Interactions, 1999, 119:291—299

A design of X-ray beam position monitor based on PSD

ZHANG Fan^{1,2} XIE Yaning¹ ZHANG Xiaowei³ HU Tiandou¹

1 (Beijing Synchrotron Radiation Facility, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

2 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3 (Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization, Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan)

Abstract Position sensitive device (PSD) is an optoelectronic position sensor utilizing photodiode surface resistance, features high-speed response, high position resolution and high reliability. The performance of PSD under X-ray was tested. Based on this test, an X-ray beam position monitor (XBPM) utilizing PSD was designed, some calculation supporting the design was also performed.

Keywords Synchrotron radiation, X-ray beam position monitor, Position sensitive device

CLC TL8