

同步辐射探测器的应用与发展*

刘 鹏[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘 要 探测器是同步辐射实验的重要环节。探测器水平必须不断提高才能适应同步辐射发展的需求,最大限度地发挥先进光源为人类研究提供的强大支持作用。文章介绍了当前同步辐射实验中普遍使用的各种探测器的原理和特点,并就一些新型探测器的发展情况进行了阐述。

关键词 探测器,同步辐射,综述

The application and development of detectors for synchrotron radiation

LIU Peng[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Detectors play a key role in synchrotron radiation experiments, and so should be constantly improved to keep up with the advances in synchrotron radiation sources and fully exploit their potential. The structure and principle of operation of various detectors commonly used for synchrotron radiation are reviewed, and recent developments of some new types are also described.

Keywords detector, synchrotron radiation, review

1 引言

近几十年来,同步辐射装置发展十分迅猛,这主要得益于光源性能的不不断提高、计算机技术的飞跃发展以及探测器技术的不断突破。

同步辐射装置从第一代发展到第二代、第三代,光子通量提高了几个数量级,探测器水平必须同步发展,才能充分发挥先进光源为研究实验提供的巨大潜力。目前很多同步辐射装置上探测器水平与光源和束线性能仍存在差距,探测器水平的提高往往可以使同步辐射实验效率获得数量级的改进。

同步辐射探测器的更新提升很多直接得益于高能物理实验中探测技术的发展成果^[1],尤其是近几十年,由于高能物理实验升级的需要,探测器技术获得很多重要进展^[2,3]。

当前基于半导体技术的探测器在同步辐射实验中逐渐占据主导地位,尤其是在二维成像方面,CCD几乎已经成为同步辐射实验中的标准设备。半导体探测器的快速发展,得益于专用集成电路水平的不

断提高。目前一些新型探测器采用探测单元与电子学系统集成设计,分辨率与读出时间仍在不断改进。

本文主要根据同步辐射装置的特点,对同步辐射探测器的应用及发展情况进行介绍。

2 探测器的主要指标以及同步辐射实验的需求

对于任何一种同步辐射探测器,都有很多指标可用来表征其性能参数^[4],其中包括适用的能量范围、量子效率(QE)、线性范围、动态范围、能量分辨率、信号输出时间、有效探测面积、噪声本底等,对于二维面探测器还有像素阵列大小及空间分辨率等等。

各种探测器结构和原理不同,特点也各有差异。能满足所有实验需求的探测器并不存在。

* 北京正负电子对撞机重大改造工程项目

2007-07-06 收到初稿,2007-07-24 收到修改稿

[†] Email: liup@mail.ihep.ac.cn

对于同步辐射实验中应用的探测器一般考虑以下几方面的性能:探测效率、空间分辨能力、时间分辨能力和能量分辨能力^[6]。对于具体的同步辐射实验,根据研究目标的差异,对探测器性能指标的侧重也各不相同。高的探测效率几乎是所有同步辐射实验对探测器发展的需求,包括好的量子效率、高的饱和计数率和快速读出时间等;而对于衍射、散射实验,还追求大的探测面积、好的空间分辨和动态范围;谱学实验则还看重能量分辨率的提高和信噪比的改进;成像实验探测器发展的焦点在于提高空间分辨率,而动态研究领域探测器发展的重点则集中在提高时间分辨能力方面。

3 同步辐射实验中探测器的应用情况

目前应用于同步辐射领域的探测器主要有各种气体探测器、闪烁探测器、固体探测器、成像板系统、CCD 系统、像素阵列探测器等,现简单介绍如下。

气体探测器^[6]种类较多,其中结构最简单的是电离室(见图 1)。电离室是在空气或充有惰性气体的装置中,设置一个平行极板电容器,加几百伏高压后,在极板间产生电场,当 X 射线入射到电离室后,使气体产生电离,在电场作用下,正离子趋向负极板,电子趋向正极板,产生电离电流,通过检测电流或响应电压即可得到入射 X 射线的强度信息。电离室因其结构简单,制作方便,作为强度检测手段而广泛应用于同步辐射光束线与实验站。

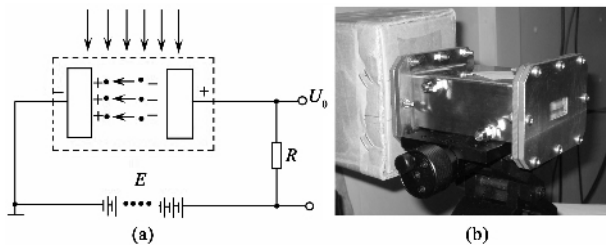


图 1 (a)电离室工作原理 (b)实物示意图

电离室的工作电压一般位于饱和坪区,即气体电离的电子全部收集到阳极,气体并不存在放大作用。如果将工作电压进一步升高,到达气体放电的正比区(1000—2000V)时,将产生二次以至多次的电离并伴随着光电效应,此时电离的数目大量增殖,从而形成放电(称为电子雪崩或气体放电),而脉冲电流在负载电阻上产生的平均电压降与入射 X 射线的量子能量成正比,这就是正比计数管的工作原

理。

正比计数管目前在同步辐射应用已不多见,但是基于正比计数器工作原理的位敏探测器在同步辐射衍射和散射实验中还有较多的应用。

位敏探测器^[7]不仅能够测量入射 X 射线光子的数量和能量,而且可以确定其在一维或二维平面内的位置。一维位敏探测器根据位置信号获得方法的不同分为延迟线型、阳极读出型和楔形阴极型等。将多根位敏信号丝平行排列,便发展成为二维面积型的位敏探测器,如图 2 所示。这类器件的位置分辨能力可达 0.1—0.3mm,可以对整个窗口范围内的每个位置同时进行测量,不用扫描。所以可以在很短(微秒级)的时间内同时完成 X 射线强度和方向的测量,高速记录 X 射线衍射图,动态跟踪 X 射线衍射图的变化。二维多丝位敏探测器的相关参数见表 1。

表 1 几种二维气体位敏探测器的相关参数

型号	2D-200	2D-200X	RAPID2	Axiom 200
厂商	D2L	Molmet	SRS	Bruker AXS
国家	法国	美国	英国	美国
推出时间	1980 年	1996 年	1999 年	2005 年
探测器类型	多丝	多丝	微通道板	微通道板
有效探测面	200 mm (直径)	200 mm (直径)	200 mm (边长)	200 mm (直径)
能量范围/keV	5—20	6—10	8—18	8—30
最佳能量/keV	8	8	8	8
空间分辨率 (FWHM)/ μm	600	250	270	180
像素尺寸/ μm	600		200	100
总计数率/cps	2×10^6	1×10^5	7×10^6	2×10^6
读出死时间/s	0	0	0	0
读出时间	ms/每幅图	ms/每幅图	ms/每幅图	ms/每幅图
读出噪音 (e/s^{-1})	2×10^{-5}	~0	~0	~0
动态范围 (标准模式)	10^6	10^6	10^6	10^8
量子计数效率 (最佳能量)	90%	60%	50%	82%
操作气体	Ar Xe + CO ₂ + C ₂ H ₆	Ar	Xe + Ar + CO ₂	Xe + CO ₂

气体电子倍增器(GEM)^[8,9]是近几年由欧洲核子研究中心(CERN)发展起来的一种平板式气体探测器,其结构及工作原理如图 3 所示。GEM 位敏探测器相对于传统的多丝位敏探测器具有革命性的改变,通过特殊的多孔导电膜来改变工作气体中的电

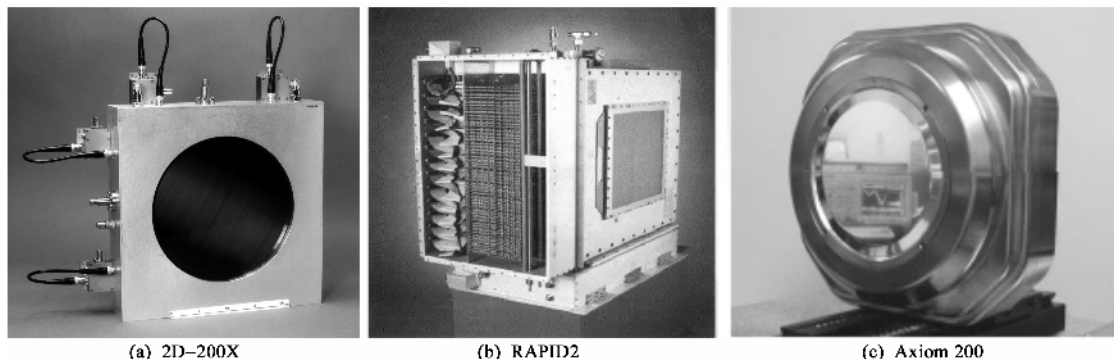


图2 几款气体位敏探测器

场分布,从而提高电子放大倍数,具有优异的位置分辨($< 100\mu\text{m}$),很好的耐辐照性能以及可以在很高的计数率(10^6 Hz)条件下工作等特点。基于这些优点,GEM位敏探测器的发展一直受到高能物理和同步辐射众多实验室的关注。

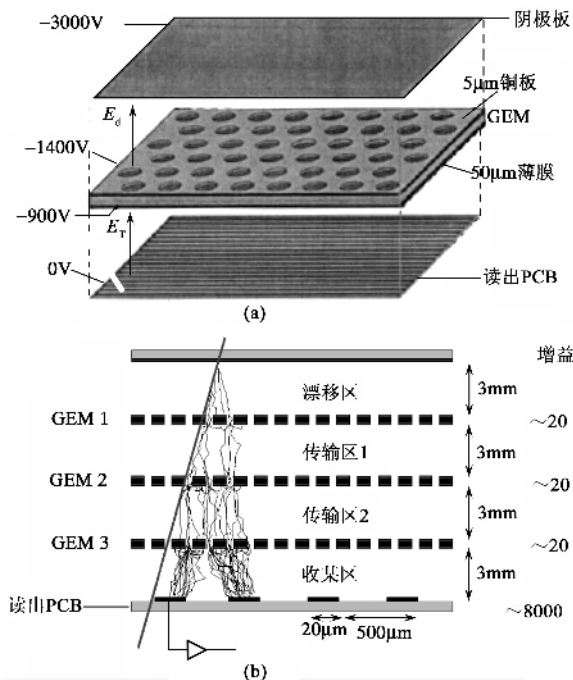


图3 气体电子倍增器(GEM)的结构及工作原理示意图

以 NaI(Tl) 为代表的闪烁探测器^[6,7,10]主要由闪烁晶体和光电倍增管组合而成,其结构如图4所示。入射X射线光子将使晶体产生一次闪烁,每次闪烁将激发光电倍增管光电阴极产生光电子,经过多级激发倍增后,收集极能获得约为初始电子数目 10^5 倍的电子,从而形成可检测的电脉冲信号。目前,闪烁探测器仍是同步辐射衍射、散射等实验中通用性较好的检测器之一。它的主要优点是,对较宽范围波长的X射线均具有很高的量子效率(接近

100%)稳定性好,使用寿命长,计数范围和动力学范围大,饱和计数率可达 10^7 ,价格相对便宜,缺点是能量分辨能力差,约为40%。

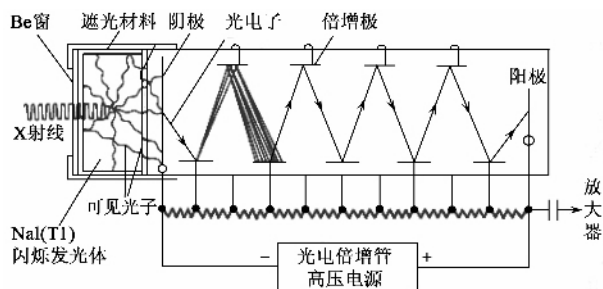


图4 NaI探测器结构示意图

固体探测器具有很好的能量分辨能力,由于其以半导体材料为探测介质,实际上是一个半导体二极管,因此也叫半导体探测器。

半导体探测器p-n结之间的耗尽层为探测灵敏区域,X射线进入该区域后使p-n结区的原子发生电离,产生电子-空穴对;在两极加上电压后,电子和空穴分别向两极作漂移运动,收集电极上会感应出电荷,从而在外电路形成信号脉冲,脉冲高度对应X射线光子的能量,脉冲数则对应光子的数量。

由于入射X射线在探测灵敏区产生电子-空穴对所需的能量很小,因此半导体探测器能量分辨率很高,可达 130 eV 。半导体探测器的灵敏区应是接近理想的半导体材料,而实际上一般的半导体材料都有较高的杂质浓度,必须对杂质进行补偿或提高半导体单晶的纯度。

最通用的半导体材料是锗和硅,而目前在同步辐射领域应用的半导体探测器主要为锂漂移型 Si(Li) 和高纯锗两种类型。 Si(Li) 探测器可以用来探测较低能量的X射线,而高纯锗探测器则适于探测中、高能X射线。

半导体探测器的优点除了能量分辨高外,还有:

脉冲上升时间较短,可用于快速测量;窗可以做得很薄,可测量低能 X 射线;结构简单,体积轻巧,不用很高电压。缺点是难以做大,对高能辐射和低强度辐射测量困难;输出信号小,读出电子学相对复杂;为了提高能量分辨率,一般需要液氮冷却。

对于半导体探测器,量子效率主要取决于半导体材料及探测灵敏体积。对于给定的半导体材料,表征其性能的一个重要指标是对不同能量 X 射线的吸收效率或吸收长度。除了目前广泛应用的半导体材料漂移 Si、漂移 Ge 和高纯锗外,其他一些复合半导体材料,如 GaAs、CdTe、CdZnTe 等发展也很迅速。这些复合材料具有较小的吸收长度,更适合对较高能量的 X 射线进行测量。近年来在 CdTe 和 CdZnTe 等材料技术上取得重要进展,基于这些材料的探测器得到发展^[11,12]。

在同步辐射谱学研究中,通过采用半导体阵列探测器^[13],即将多个半导体探测器并联使用,不仅可以增加信号收集量,提高实验效率,而且可以有效地增加相同立体角条件下的探测计数率上限,从而提高探测效率和分析灵敏度。这种高效率的多探头系统近几年已开始在同步辐射谱学实验站上越来越多地得到应用。图 5 为 13 探头半导体探测器系统照片。



图 5 13 探头半导体探测器

随着科学技术不断发展需要,科学家们在硅锂 Si(Li)、高纯锗 HPGe 等探测器的基础上研制出许多新型的半导体探测器,如硅微条探测器、像素阵列探测器、电荷耦合器件探测器等,并在同步辐射实验中得到广泛应用。

大面积、高分辨的面探测器的快速发展与同步辐射蛋白质晶体学衍射实验的迫切需求密切相关,同时探测器水平的不断提高也对蛋白质晶体学的发

展产生了巨大的推动作用。

20 世纪 80 年代末和 90 年代初,能够大幅度提高衍射数据收集速度和灵敏度的二维数字化 X 射线探测器(成像板 IP 和电荷耦合器件 CCD)的应用给单晶晶体结构分析带来了突破性的进展。

面探测器型衍射系统由于可以同时测量众多衍射点,因而能够使数据收集速度提高几个数量级,而且由于其灵敏度高,对于弱衍射能力或小尺寸的晶体样品也能获得高质量的衍射数据,因此,在目前同步辐射衍射实验中,面探测器已经基本取代了传统的四圆衍射仪和照相法,从而成为 X 射线晶体结构分析的主要手段。

照相底片是最早使用的面探测器,但其动态范围小,灵敏度低,使用和处理繁琐。但照相法在实验方法和数据处理等方面为数字化面探测器的发展打下了基础。

较早推出的数字化面探测器有多丝正比计数器和 TV 型面探测器,但其空间分辨较差,饱和计数率和动态范围不及 IP 和 CCD 而逐渐为后二者所替代。

成像板(IP)^[14]的工作原理基于光励荧光(PSL),其原理如图 6 所示。成像板的结构是在基片上涂有一层光励荧光涂层,一般由掺杂 Eu^{2+} 的 $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$ 微晶组成。当 X 射线入射到成像板后, Eu^{2+} 受到激发失去一个电子变为 E^{3+} ,失去的电子进入导带并为晶格中卤素离子的空穴所俘获,形成亚稳态色心。当用激发光照射 IP 时,色心吸收激发光释放被俘获的电子,与 Eu^{3+} 结合成激发态的 Eu^{2+} ,并释放光励荧光,光励荧光可以通过光电倍增管(PMT)读取。使用成像板探测 X 射线的工作流程由以下几个步骤构成:IP 在 X 射线中曝光,形成 X 射线图像的潜像;然后用红色激光逐个像素地扫描 IP(光激励),激发光励荧光(蓝色荧光),其强度正比于在该像素所接受的 X 射线照射剂量,通过光电倍增管将光励荧光转化为电信号,形成数字化 X 射线图像;获得 IP 记录的 X 射线图像后,用卤素灯照射 IP 可完全擦去潜像,使 IP 恢复原来的空白状态,重新使用。

IP 灵敏度高,动态线性范围宽,空间分辨率较高,测量面积大,背景低,可重复使用,但测量、读出和消光需分开进行,读出时间一般需要几十秒,相对于 CCD 过长。图 7 为目前常用的一款成像板 mar345 成像板实物照片。表 2 为 mar345 成像板性能参数。

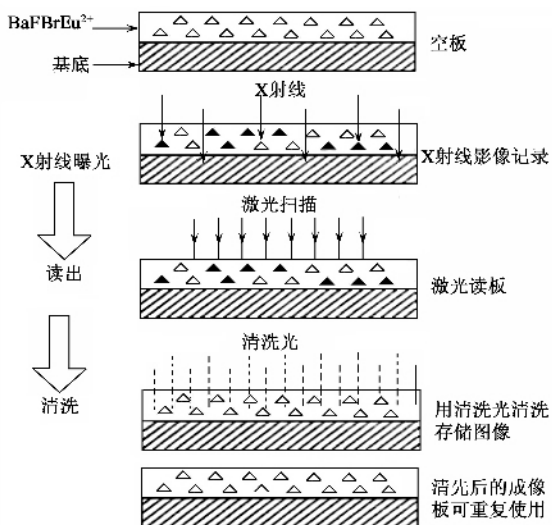


图6 成像板成像原理



图7 mar345 成像板

表2 mar345 成像板性能参数

像板直径	345mm
像素大小	100 μm \times 100 μm
灵敏度	1个X射线光子(8keV)
内部噪声	1—2个等效光子
动态范围	131000
读出时间	~100s

电荷耦合器件探测器(CCD)^[16,17]属固体探测器的一种,探测器阵列中的每个单元都相当于一个金属氧化物半导体电容(MOS),一般通过在p型硅衬底上热氧化生成一层氧化薄膜SiO₂,然后再蒸镀一层金属制成。对MOS电容器的金属层进行光刻,制成间距很小的一些栅极。栅极上加正电压,硅片中的多数载流子(空穴)被排斥,形成耗尽层,而在硅的表面层下出现一个位阱,所加电压越高,耗尽层就越深。此时,负电荷落入位阱就被俘获,起到储存电荷的作用。在CCD各个栅极上加上具有相对相

位延迟的时间脉冲,就可以实现电荷转移,配备适当的读出电子学线路,就得到了一维或二维CCD阵列。在CCD单元上形成的电荷量正比于入射光强,这是CCD光学成像的基础。

X射线CCD探测器分为直接探测和间接探测两类。前者通过增大耗尽层的厚度直接对入射X射线进行探测。而目前应用于同步辐射实验中的CCD主要采用间接探测方法,即通过转换靶(闪烁体或磷光体)将入射的X射线转换成可见光,通过光学耦合系统(光学透镜组、光导纤维或图像增强器与透镜系统组合)传送到CCD芯片进行图像读出。X射线CCD探测器结构如图8所示。

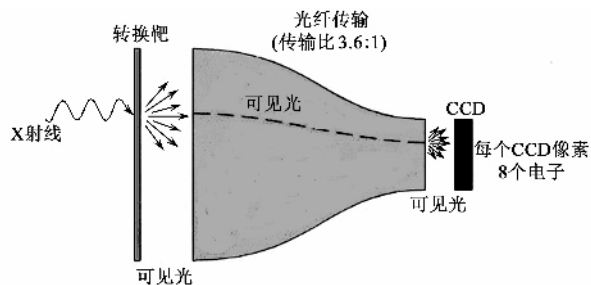


图8 X光CCD(光纤耦合)结构示意图

图9给出了目前在同步辐射中使用广泛的一款ADSC-CCD(Q210)的实物照片。表3给出了ADSC-CCD(Q210)性能的有关参数。

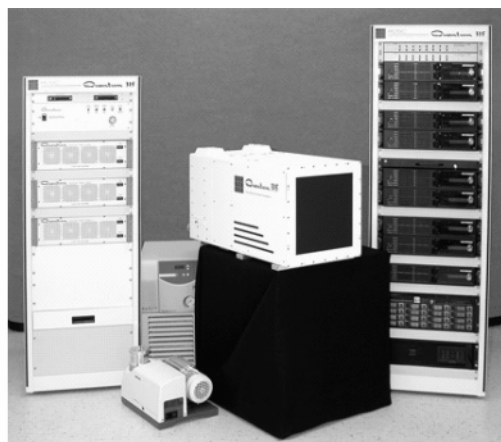


图9 ADSC-CCD(Q210)实物照片

表3 ADSC-CCD(Q210)性能参数表

有效面积	210mm \times 210mm
像素大小	51 μm \times 51 μm
空间分辨(FWHM)	90 μm
前端增益(电子/X射线光子)	8.5(@1 \AA)
最大阱深(电子)	440000
读出噪声(电子)	10(9s)
读出时间(2 \times 2)	1s

硅微条探测器(silicon micro strip detector , SMD)^[18]是近十几年来首先在高能物理研究领域迅速发展起来的一种顶点探测器。它是以 p-n 结为基础研制成的,多数结构采用 p⁺-n-n⁺形式^[19]。早先的硅微条探测器为单边读出(其结构如图 10 所示)随着水平的提高,采用双金属层等新技术工艺,科学家们研制成双边读出的硅微条探测器^[20-21],即在一块 n 型硅片的两面,通过氧化和离子注入法、局部扩散法、表面位垒法及光刻等先进工艺技术,分别制成重掺杂 p⁺型和 n⁺型微条。这种探测器有 p⁺型和 n⁺型上下两层读出条,这两层读出条相交成一定的角度,因而具有两维的位置测试能力。其工作原理为:在两侧条型 p-n 结加上负偏压时,耗尽层在外加电场的作下几乎扩展到整个 n 型硅片,实现基本全耗尽,动态电阻很大,漏电流很小,同时减小了电容,压低噪声。待测粒子通过时,产生电子-空穴对,在 p 型和 n 型两边读出条上都读出电信号,得到二维信息。

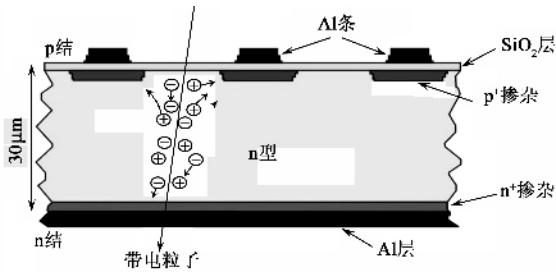


图 10 单边读出的硅微条探测器截面图

硅微条探测器具备以下优点(1)非常好的位置分辨率(微米量级);(2)很高的能量分辨率(比气体探测器约高一个数量级);(3)很宽的线性范围;(4)非常快的响应时间(5ns 左右),可以实现高计数率,可超过 $10^8/\text{cm}\cdot\text{s}$ 。

硅微条探测器的缺点是对辐射损伤比较灵敏;电子学相对复杂,大面积制作成本较高,在同步辐射领域的应用研究尚在进行中。

像素阵列探测器(PAD)^[22]是最有发展潜力的同步辐射探测器之一。PAD 将半导体探测单元(二极管)阵列通过 ASIC 集成捆绑,每个单元都有独立的微电子学读出,直接对信号进行并行处理。传统 X 射线 CCD 一般采用分段输出(如 16 路),而 PAD 则是数百万路并行输出,从而有效地克服了传统 Ge 或 Si 半导体探测器计数率的瓶颈限制,计数能力提高几个数量级。此外,通过对背衬阳极电子学的处理,可以获得光子的能量信息,使 PAD 具有能量分

辨能力。根据灵敏区和电子学是否建立在相同的基片上,像素阵列探测器分为单一像素阵列探测器和混合像素阵列探测器。作为探测器的矩阵和相配的读出电子学矩阵只是在最后一步才连接在一起,两部分的工艺流程相对独立。这就是说,混合技术的探测器和电子学部分可以根据需求各自采用不同的材料和处理方法,从而达到最先进的水平。PAD 和 ASIC 是当前探测器发展的核心领域,其技术的完善和进步不仅使同步辐射实验效率得到提高,而且为新的实验方法和领域的拓展提供了可能。

4 结束语

同步辐射为人类研究物质结构提供了强大的手段。而要充分发挥同步辐射光源的各种优点,同步辐射探测器起着关键性的作用。探测器的应用与发展已经引起各个国家同步辐射实验室的高度重视,提升探测器各项性能的工作在各级组织的大力支持下不断推进。探测技术的每一个进步都将有效地提高同步辐射实验的质量,并为人们的研究工作开辟更多的领域和更广泛的空间。

参 考 文 献

- [1] A Program in Detector Development for the US Synchrotron Radiation Community, A white paper based on a workshop held in Washington, DC, Oct. 30 - 31st 2000
- [2] Sadrozinski H F W, Sciden A. Nucl. Instrum. Method. A, 2005, A 514 :434
- [3] Behnke T, Bertolucci S. Eds. Heuer R-D *et al.* " TESLA , Technical Design Report ", Report DESY-01-011, Vol. IV, 2001
- [4] Westbrook E M. Proceedings of SPIE, 1999, 3774 :2
- [5] Dabrowski W. Proceedings of SPIE, 2005, 5948 :1
- [6] Bertin E P. Principles and Practice of X-ray Spectrometric analysis. 2nd Edt. NewYork : Plenum Press. 1975, 219—284
- [7] 马礼敦. 近代 X 射线多晶体衍射——实验技术与数据分析. 化学工业出版社, 2004, 184—224 [Ma L D. Neoteric X-ray Polycrystalline Diffraction. Beijing : Chemical Industry Press 2004, 184—224(in Chinese)]
- [8] Sauli F. Nucl. Instrum. Method. A, 1997, 386 :531
- [9] Sauli F. Nucl. Instrum. Method. A 2004, 522 :93
- [10] 王宗仁. 核仪器电子技术. 北京 : 原子能出版社, 1977 [Wang Z R. Electronic technique in Nuclear Instruments. Beijing : Atomic Energy Press(in Chinese)]
- [11] Gostilo V *et al.* Nucl. Instrum. Method. A 2001, 460 27
- [12] He Z. Nucl. Instrum. Method. A 2001, 463 250
- [13] Gareth D, Kan-Cheung C, Pat S *et al.* J. Synchrotron Rad., 1999(6) :62

- [14] Miyahara J , Takahashi k , Ameimiya Y *et al.* Nucl Instrum Methods , 1986 , A246 : 572
- [16] 王德武. 现代物理知识 , 1997 9(1) : 16 [Wang D W . Modern Physics , 1997 9(1) : 16 (in Chinese)]
- [17] Gruner S M , Tate M W , Eikenberry E F. 2002 , Rev. Sci. Instrum. , 2002 , 73 : 2815
- [18] 孟祥承. 核电子学与探测技术 , 2003 , 23 (1) : 4 [Meng X C. Nuclear Electronics & Detection Technology , 2003 , 23 (1) : 4 (in Chinese)]
- [19] Karmanov D *et al.* The measurement of the interstrip capacitance of single sided silicon microstrip detector with capacitive charge division for D0 experiment , D0 note 3513
- [20] Bruner N L *et al.* Nucl. Instrum. Methods , 1995 , A 362 : 315
- [21] <http://www.oslo.sintef.no/ecy/7230/microstrip.shtml>
- [22] Peter W. Nucl. Instrum. Method. A 2000 , 453 : 60
- [23] Basolo S , Be'rar J F , Boudet N *et al.* J. Synchrotron Rad. , 2007 , 14 : 151

· 物理新闻和动态 ·

ξ 激光技术可帮助确定热力学温标

玻尔兹曼常数 k_B 是物理学中的一个重要常数,它联系着微观粒子系统(如气体分子)的动能与系统温度之间的关系,所以它是原子、分子世界与宏观物质的性质(如压强、温度等)之间的桥梁。目前只有采用在氩气中测声速的方法能使 k_B 数值的测量达到百万分之二之精确度,一般将百万分之一的标准称为百万分率,简称为 ppm。其他测量 k_B 的方法,如测量电阻器中的噪声,测定气体中的介电常数和测量黑体辐射等都达不到 ppm 的标准。

位于巴黎的国际计量委员会(International Committee for Weight and Measures, 简称为 CIPM)计划于 2011 年利用 k_B 值来重新定义热力学温标,即开尔文温标。现在国际计量委员会规定的热力学温标是在一定的压强下,纯净水三相点的热力学温度为 273.16 K。利用测定水的三相点方法可以对热力学温标达到 ppm 的标准,但对它所处的物理状态要求非常严格。CIPM 要求热力学温标以及其他的国际单位(SI)都能利用基本物理常数彼此相互表述。对于热力学温标来说,它的测定将涉及到秒和 k_B 的数值,而秒的测定现在已达到 $1/10^{16}$ 的精度。

最近巴黎大学第 13 研究所的 Chardonnet C 教授和他的同事们利用激光光谱技术将 k_B 数值的测定提高到 ppm 的标准。他们的方法主要是利用氮分子的热运动可使它的光吸收谱的峰值展宽这一物理特性来测定 k_B ,这种光谱峰值展宽的特性称为热展宽。热展宽的宽度是由气体的压强、温度以及吸收光谱的频率来决定的。若将温度与频率固定,则可测出热展宽的宽度与气体压强间的函数关系,从而可推出 k_B 的数值。Chardonnet 教授的研究组能将 k_B 的数值测定到到 2 ppm 的精度。如果进一步将温度控制得更严格的话, k_B 的数值可达到 1 ppm 的精度。

(云中空 摘自 physical Review Letters , 18 June 2007)



北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

www.goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校、科研机构、试验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询。我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌,硫化锌,多光谱硫化锌等。



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等。
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜,及其他常用棱镜。
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝、镀银、镀金,及介质反射镜,直径 5mm - 200mm。
- 光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶,直径 5mm - 200mm。
- 各种有色玻璃滤光片:规格为直径 5mm - 200mm。(紫外,可见,红外)及窄带干涉滤片。
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤, SMA 接口光纤探头,紫外石英聚焦探头。

地址 北京市海淀区知春路 49 号希格玛大厦 B 座#306 室

电话 010-88096218/88096217 传真 010-88096216 网址 www.goldway.com.cn

联系人 陈镛先生 施楠小姐 曾安小姐

E-mail kevinchen@goldway.com.cn shinan@goldway.com.cn zengan@goldway.com.cn