

宽响应高灵敏度软X射线 单光子计数探测器

杨名恪 王占山

摘要: 本文阐述了不同类型的软X射线探测器的机理及近期发展,总结了以往的工作,针对当前软X射线研究的迫切需要,提出了用CsI光电阴极做为转换材料、道电子倍增器做为电子倍增元件的宽响应,单光子计数探测器。

一、前 言

由于同步辐射、X射线激光、等离子体诊断技术和软X射线天文学的发展,推动了软X射线探测器的发展。特别是近几年,出现了许多高性能探测器,这些高性能的探测器在其敏感波段有高的量子效率、良好的空间分辨率和能量分辨率以及宽的动态范围。但并不是某种探测器能在各方面都能达到最佳,而是根据应用的不同,在不同的方面强调探测器的性能,也就是说某种探测器只能在某些方面达到最优。下面简要介绍各种软X射线探测器的最新发展。

二、气体正比计数器

气体正比计数器是利用气体激发和电离效应制成的软X射线探测器。到目前为止,这种探测器的制造技术是最完善的,它可以做成较大的接收面积是当前面积最大,灵敏度最高的软X射线探测器。在应用中,其能量分辨率是一个重要的参数。通常气体正比计数器的能量分辨率可用下式表示:

$$\Delta E/E = 2.36 [W(F+f)/E]^{1/2} = A/E^{1/2} \quad (1)$$

其中 W 是气体中产生一个二次离子对所需的平均能量; F 是混合气体的Fano因子, E 为接收的能量,单位为keV。分析(1)式可以找到许多提高能量分辨率的途径:1. 受雪崩效应影响的项 f 可以通过不用电子的雪崩过程而收集气体分子受激后放出的紫外光子来减小,这正是气体闪烁正比计数器的原理;2. 减小Fano因子,Hepper和Simons^[1]报导了一个能量分辨率的 A 值只有0.18的气体闪烁正比计数器,他们正是利用了上面这两条途径来实现的。3. 可以用Penning混合气体来减小能量分辨率,这是通过减小 W 和 F 来实现的,B. D. Ramsey^[2]等人完成了这项研究,并得到了能量分辨率系数 A 在0.33附近。成像或线阵正比计数器最佳的空间分辨率为1.0mm,最近Budtz-Jorgensen等人^[3]用光刻的办法在一个绝缘的衬底上制成了微条带代替了多丝计数器的阴极和阳极,从而把线敏计数器的空间分辨率提高到150 μ m。

三、利用光电效应的软 X 射线探测器

近几年,各国科学家对在软 X 射线区域内敏感的光电阴极材料进行了深入细致的研究,取得了许多有意义的结果,其中研究最多的光电阴极是碱金属卤化物。结果表明^[4,5,6,7],不透明和低密度的 CsI 是在软 X 射线波段最佳的光电阴极,也是应用最多的光电阴极。

目前,利用光电发射效应制成的软 X 射线探测器中,为人们偏爱的是表面镀有 CsI 光电阴极的微通道板 (MCP) 探测器,这种探测器能提供 $>10\%$ 的探测量子效率,有较大的接收面积 ($10\text{cm} \times 10\text{cm}$),高的时间分辨率 ($<1\text{ns}$),低噪声 (计数率 <0.2 个/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) 和高的空间分辨率 ($<20\mu\text{m}$)。当用高增益 ($G > 1.0 \times 10^7$) 的微通道板 (Chevron 型、Z 型、C 型、螺旋型) 时,它们可以做成单光子计数探测器。这种探测器有不同的输出电极,其中由哈佛·斯密斯天体物理学中心^[8,9]发明的交叉线阵列系统可以在 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的灵敏面上在位置偏差 $<10\mu\text{m}$ 时得到 $20 \sim 25\mu\text{m}$ 的空间分辨率,其动态范围为 1×10^4 。由加州大学空间科学实验室^[10,11]发明的尖形和条形阳极读出系统得到了 $80\mu\text{m}$ 的空间分辨率,由斯坦福大学的空间科学与天体物理学研究中心发明的 MAMA 读出系统^[12,13],得到了象元面积为 $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$, 1024×1024 列阵的敏感面积,其动态范围为 1×10^6 。

除了上面介绍的光电发射型探测器外,还有其它类型如 X 射线像增强器与 CCD 耦合来探测软 X 射线等。

四、利用光电导效应的探测器

利用光电导效应的探测器的种类很多,如 CCD、光导摄像管、Si(Li) 探测器、Ge(Li) 探测器等。在此我们只介绍当前发展最快的 CCD 软 X 射线探测器。它同时具有能量分辨率和空间分辨率以及较高的探测效率。从已报导的结果看,其能量分辨率和空间分辨率都优于气体正比计数器。在软 X 射线波段,硅内光子的吸收长度大大地增加了,可采用厚的前照明 CCD。由于在耗尽层每沉积 3.5eV 的能量便产生一个电子空穴对,所以在软 X 射线波段会产生多个电子空穴对,这是 CCD 具有能量分辨率的原因,也使它可工作于脉冲计数模式。在 $>10\text{\AA}$ 的波段,目前能量分辨率主要受读出噪声的限制。在低于 10\AA 的波段,为进一步提高能量分辨率,应产生充分多的电子空穴对。为增加软 X 射线的吸收,目前正在发展“深耗尽” CCD。

CCD 现阶段的发展目标主要是增加敏感面积和探测较硬的 X 射线,在保持象元尺寸不变的条件下增加芯片的尺寸可以增加敏感面积^[14],但这意味着读出数据需要更多的时间,这就影响到接收的总时间。而且,每个轴上的象元数目的增加,在电荷转移效率 (CTE) 不变的条件下,必然导致读出时间内读出损失的增加,增加了转移噪声,从而影响了能量分辨率。CTE 是辐射损伤最严重的一个参数,文献^[14]报导了 CCD 在 ^{60}Co 辐射下辐射剂量为 14krad 下 CCD 的 CTE 从 0.99998 变到 0.99997 。当然 CCD 的辐射损伤是人们最关心的一个问题。

克服 MOSCCD 相对于敏感面积、象元尺寸和辐射允限的限制是正在发展的 pn 结 CCD^[15],这将带来更高的探测效率。

使用 CCD 必须考虑的一个问题是 CCD 在非常宽的波长范围内都有响应,必须用滤光片

滤掉不必要的光，现在最常用的滤光片是薄铝箔，当然也可使用其它的滤光片。

五、热 探 测 器

单光子量热器是根据热效应的原理制成的。当一个X射线光子被冷却到零点几K温度的一个小吸收体 ($\sim 1\text{mm}^3$) 吸收时，吸收体的温度发生变化。根据这个温度的变化，可以判定探测到的X射线光子的能量，其能量分辨率的表达式为：

$$\Delta E = 2.36\xi(KT^2C)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中 C 是吸收体在温度 T 时的热容量， K 是玻尔兹曼常数， ξ 是探测器的参数（在1~3之间），它依赖于热敏电阻在热平衡时的温升特性， KT 是平均的声子能量。从原理上讲，量热器的分辨率接近1eV，是现在探测器中能量分辨率最好的探测器。到目前为止，在80mK温度下，用HgCdTe做吸收体的量热器在入射光子能量为5.9keV时，其最佳的分辨率为17.4eV^[14]。当前另一种低温X射线探测器正在发展，它能在较高的操作温度下 ($T > 1\text{K}$) 提供较好的能量分辨率 ($\Delta E < 10\text{eV}$)，因此它需要比量热器简单的制冷器，这种探测器叫超导隧道结 (STJ) 探测器。其原理为：入射的X射线沉积的能量打破了超导金属薄膜中的电子Cooper对，它们通过一个薄的氧化物势垒产生一个过剩的量子隧道电流。Twerenbold^[15]描述了天文学中应用的STJ列阵，达到的最佳分辨率为65eV。但它的寿命短，热重复性差而限制了在天文学中的应用。

在软X射线的探测方面，国内和国外差距较大。长春光机所从1978年开始研究软X射线探测器，开始时研究了侧窗封闭型软X射线正比计数管^[16]，其探测范围受窗口材料的限制，只对0.1~6.7nm的软X射线有响应。为了扩展正比计数管的响应，我们又研制了流气式正比计数管，其响应范围为0.1~11.0nm，但它有输出脉冲幅度漂移严重，温度效应强烈及使用不便等缺点，因此软X射线的探测问题仍未彻底解决。同时为了提高X射线的探测效率，我们研制了端窗型正比计数管，它已成功地用在BX-85型软X射线应力仪上。为了扩大正比计数管的敏感面积，我们又研制了线窗正比计数管，在正比计数管前加入卷帘式快门可做为线敏探测器使用，这种正比计数管已经在新型软X射线小光点残余应力仪中得到应用。我们还成功地解决了软X射线正比计数管的存放寿命问题，使其存放寿命达5~6年。

与此同时，长春光机所还对软X射线光电阴极进行了研究，掌握了光电阴极的制备工艺，研究了它们在软X射线激发下的光电发射特性。指出：从次级电子发射性能看，CsBr的次级电子发射系数峰值和表面的逸出几率均优于CsI，因此有可能是比CsI更灵敏的软X射线光电阴极材料。测定的CsBr的次级电子平均逸出深度明显高于CsI^[17]，并研究了更适合于光电成像器件的两种材料的软X射线透射式发射过程；在不同的波长下测定了光电阴极的特性，证明了CsI和CsBr都是良好的软X射线光电阴极；且CsBr光电阴极对软X射线的光电响应比CsI更高，它们都有良好的环境稳定性。在上述研究的基础上，研制了软X射线光导摄像管^[20]，成功地实现了疏松溴化铯靶的制备，解决了工艺中的困难，找到了在4.4nm的辐射下最佳的靶结构，制成了一英寸软X射线光导摄像管。这种摄像管具有较高的空间分辨率和灵敏度、低暗电流、良好的信号积累和贮存能力，图像均匀性良好。在软X射线成像探测中有一定的应用价值，管子的灵敏度约为10电子/光子，分辨率为20lp/mm。

从七十年代末我们对微通板 (MCP) 的应用进行了研究^[21], 之后又研究了 MCP 对软 X 射线的响应^[22], 测试了 MCP 与荧光屏近贴聚焦的组件对软 X 射线成像的极限分辨率, 达到 $10lp/mm$ 。同时我们还测量了在两个波长下, MCP 的量子效率随软 X 射线入射角的变化, 指出对偏角为 13° 的 MCP, 入射软 X 射线与 MCP 法线方向夹角为 $8^\circ \sim 10^\circ$ 和 $16^\circ \sim 18^\circ$ 时, 量子效率最大。根据上述研究的基础, 我们制成了平板式 X 射线像增强器, 其分辨率达 $10lp/mm$, 具有较高的增益, 可在明室条件下进行观察。

封闭型软 X 射线正比计数管在短波段是很好的探测器, 流气式正比计数管本身固有的问题没有得到完美的解决, 尤其是它的稳定性差而限制了它的应用。由于窗口材料吸收的限制, 在整个软 X 射线波段都有响应的探测器必定是开窗式的。在用常规的软 X 射线源测量时, 灵敏度和信噪比是两个重要的参数。由 MCP 组成的探测器和软 X 射线光导摄像管由于受噪声的影响很难进行这样的测试, 正因为如此, 发展一种新型的高灵敏度, 高信噪比的探测器势在必行。

光子计数技术充分利用了探测器输出的光电信号的脉冲特性以及它的幅度分布与噪声幅度谱的差异作计数测量, 因而只要合理选择为去掉噪声而设置的窗口甄别器的阈值, 就可以获得极好的信噪比和相当好的稳定性。单光子计数是目前测量微弱信号最灵敏的实验手段, 它有较宽的线性动态范围。就其本质而言, 光子计数技术是一种离散的信息处理技术, 易与计算机进行联接, 从而可提高数据精度, 实现快速数据处理, 提高工作效率。

根据软 X 射线光学技术的发展, 我们将把重点放在发展一种高灵敏度, 宽响应的软 X 射线单光子计数探测器。

CsI 是目前研究较多的光电阴极, 它的密实结构和低密度结构可以探测整个软 X 射线波段, 并有较高的量子效率。根据文献的报导和我们的工作, 我们决定选择其作为光电转换材料。

通道电子倍增器 (CEM) 是一种基于二次电子发射原理制成的连续打拿极的电子倍增器件, 它具有增益高、功耗低、结构简单、操作方便、重量轻、体积小、响应快和供电简单等优点, 在多方面得到应用。但它对软 X 射线的响应率较低^[23], 对于探测软 X 射线仍显灵敏度不够。我们的实验方案是利用光电阴极的高转换特性和 CEM 的高增益及其适合于脉冲计数工作的特性来制成软 X 射线单光子计数探测器。

CEM 的增益特性如图 1。它由三个区域组成, 其中在第二区域, 随着电压的变化, 增益保持不变。这个特性用于脉冲计数最为合适, 并且在累积计数小于 10^{11} 时, 增益不随累积计数增加而变化, 同时它的响应速度 $< 10ns$, 本底噪声 < 0.1 个计数/秒, 动态范围可达 10^6 。

本项工作的难点是怎样最大限度地提高软 X 射线光子计数探测器的灵敏度和信噪比。在实验中, 首先对器件的结构进行研究, 找到可使光电阴极灵敏度最佳的器件结构, 这可以通过理论计算和实验相结合的办法进行解决。器件的最佳结构定下来后, 根据器件的结构研究光电阴极的制备工艺。因为对于不同的器件结构, 采用不同方式的光电阴极, 可以得到不同的结果。因此研究光电阴极的制备工艺对于器件的灵敏度的提高至关重要, 是解决问题的关键。在此研究的基础上, 我们还要提出对 CEM 的改进意见, 例如改进 CEM 的开口大小, 入

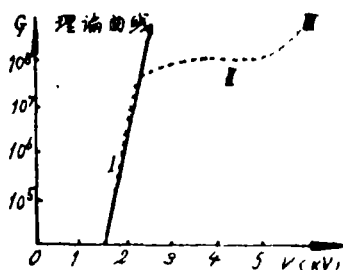


图 1

射角度等。为了提高器件的信噪比, 还需对脉冲计数方法进行研究, 尽可能降低线路产生的噪声, 使整个器件的信噪比得到改善。

我们研制出能实际应用的宽响应高灵敏度软X射线单光子计数探测器, 其性能达到:

波长响应范围: 1~20nm

最大计数率: $10^5/s$

动态范围: $10^5\sim 10^6$

暗噪声计数: $10^{-1}/s$

参 考 文 献

- [1] M.Heppener and D.G.Simons, Proc SPIE, 982(1988), 139
- [2] C.Budtz-Jorgensen, M.M.Madsen, P.Jonasson, H.W.Schnopper and A.Oed, Proc. SPIE, 982(1988)152
- [3] B.D.Ramsey and P.C.Agrawal, Proc.SPIE, 982(1988)258
- [4] E.B.Saloman, J.S.Pearlman and B.L.Henke, Appl.Opt., 19 No.5(1980)749
- [5] B.L.Henke, J.P.Knauer and K.Premaratne, J.Appl.Phys., 52(1981)1509
- [6] G.W.Frase, Nucl.Instrum. & Methods 206(1983)256
- [7] M.P.Kowalski, G.G.Fritz, R.G.Cruddace, A.E.Vnzicker and N.Swanson, Appl. Opt., 25 No.14(1986)2440
- [8] J.P.Henry et al., Proc.SPIE, 106(1977)196
- [9] E.Pfefferman et al., Proc.SPIE, 733(1986)529
- [10] Martin, C.P.Jelinsky, M.lampton, R.F.Malina and H.O. Anger, Rev. Sci. Inst., 52(1981)1067,
- [11] O.H.W.Siegmund, R.F.Malina, K.Coburn and D.Werthimer, IEEE, Trans. Nuc. Sci., V NS-31 No.1(1984)776
- [12] J.G.Timothy, IEEE, Trans. Nuc. Sci., V NS-32(1985)427
- [13] J.G.Timothy, J.S.Morgan and D.C.Slater, SPIE, 1158(1989)104
- [14] D.H.Lumb and A.D.Holland, Proc.SPIE, 982(1988)116
- [15] L.Struder et al., Proc.SPIE, 982(1988)129
- [16] R.L.Kelley et al., Proc.SPIE, 982(1988)219
- [17] D.Twerenbold, Nucl.Instrum. & Methods 273(1988)575
- [18] 杨名恪, 光学机械, 1985年, No.1 15
- [19] She Yongzheng, Yang xiaowen, Ding Yishan, A.E.E.P, 643(1985)541
- [20] 余永正、杨晓文、丁义山, 光学机械, 1987年, No.3, 9
- [21] 檀慧明、陈愈积, 光学机械, 1980年, No.4, 9
- [22] 余永正、杨晓文、丁义山、檀慧明, 光学机械, 1987年, No.3, 15
- [23] Jone.E.Mack, Francesco Paresce and Stuart Bowyer, Appl.Opt., 15 No. 4(1976) 861

A Soft X-ray Single Photo Counting Detector with Wide Response and High Sensitivity

Yang Mingke Wang Zhanshan

Abstract

The theory and current development of different typical soft X-ray detectors are described. Studied researches are concluded. For current requirement of soft X-ray research, A wide-response, photo counting detector with CsI photocathod and channel electron multiplier is illustrated.

《光学机械》编辑委员会

主 编 唐九华
副主编 陈星旦
编 委 王世焯 王汝勤 王雅黎 李明杰 杨厚民
姚立常 薛培中 曾柏川 (常委)
本期责任编辑 陈星旦

光 学 机 械
编 辑 《光学机械》编辑委员会
(长春1024邮政信箱)
出 版 中国科学院长春光机所

印 刷 长春新华印刷厂
主 编 唐 九 华
发 行 长春光机所情报研究室
国内统一刊号: CN-22-1141