

真空紫外和软 X 线波段成像探测器

余永正 杨晓文

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

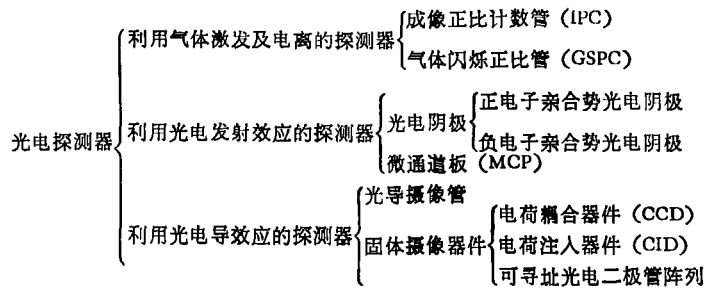
一、引言

随着科学技术的发展,人类的观测范围从可见光扩展到红外、紫外和软 X 射线波段。例如,宇宙空间存在着大量紫外、X 射线辐射源——恒星、河外星系、类星体等。通过对这些天体的研究,有助于了解天体的演化过程。由于地球大气的吸收,这些紫外、X 射线达不到地面,限制了人类对这些天体的了解。随着空间技术的发展,可以在地球大气层外探测来自天体的辐射,这就把人类的认识延伸到距离远达 80 亿光年的地方。而对紫外、软 X 射线敏感的高性能探测器,是实现这种观测的关键。又如在研究核聚变时,高温等离子体辐射的真空紫外和软 X 射线,能给出等离子体的许多重要参数。此外如人体的 X 线诊断,真空紫外光谱

研究等,都离不开这类特殊的探测器。

从信噪比和空间分辨率来看,成像探测器优于非成像探测器。高性能的成像探测器要求在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。此外空间应用还要求重量轻、体积小、功耗低、牢固可靠。

成像探测器可分为摄影胶片和光电探测器两大类。胶片能作永久记录,一次曝光可记录大量数据。但胶片灵敏度低;动态范围窄,难于光度定标;乳剂对宽的能量范围敏感,难于忽略由散射光和高能荷电粒子引起的背景影响;输出不是电信号,无法同计算机联用,空间应用需要回收。这一系列缺点使得摄影胶片逐渐为具有优良性能的光电探测器所代替。真空紫外及软 X 线波段成像探测器按其工作原理可分类如下:



二、利用气体激发及电离效应的成像探测器

惰性气体分子吸收入射光子而电离,产生的电子-正离子对在电场作用下分别向阴极和阳极丝漂移。电极的几何形状使阳极丝附近的

电场特别强,漂移电子在此区域内发生二次电离及雪崩倍增,从而收集到与入射辐射产生的初电离事件数成正比的输出离子流。这就是单丝正比计数管的简单工作原理。当阳极附近的强电场超过某值时会破坏正比性,使输出饱和。继续增强电场,雪崩倍增将发生在整个管内,进入典型的 Geiger-Müller 区。所以,为使正比计

数管正常工作,雪崩倍增过程需限制在阳极丝附近的狭小区域内。受激情性气体分子回复到基态时辐射出较大能量的光子,使阴极发生光电子发射。这些额外的光电子参与再一次的雪崩电离;同时气体离子漂移到阴极还会产生二次发射或辐射光子,从而叠加一延迟信号。因此即使中等的增益也会导致永久性的放电。这样,正比计数管增益只能达到 10^3 。若再加入碳氢化合物一类多原子分子,由于它有大量非辐射激发态,可吸收宽范围能量的光子,而且当它弛豫到基态时在阴极处很少发生二次发射。这样,正比管出现放电前的增益可达 10^7 。

把一组平行等距离的阳极丝对称地排列于两个阴极板之间,就构成 IPC。不同阳极丝上收集到的电荷采用上升时间法或电荷分配法来确定电离事件的位置。IPC 的空间分辨率取决于阳极丝间距,而缩小间距要提高工作电压,所以 IPC 的分辨率只有 1mm,但有极高的量子效率。美国 1977 年 8 月发射的“HEAO-I”(高能天文卫星-I)及日本 1979 年 2 月发射的“白鸟”X 线天文卫星中的星载 X 线望远镜焦平面探测器都是 IPC。探测的能量范围是 0.15—60 keV。观测了超新星遗迹、X 线双星源和星系团。“HEAO-I”载 IPC 的量子效率曲线示于图 1。其光敏面积达 400cm^2 ,采用聚丙烯作窗口,充丙烷气体(气压 200Torr)。

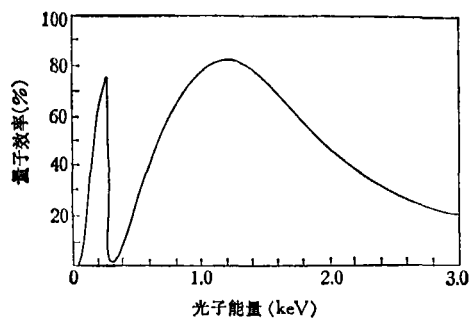


图 1 IPC 在软 X 线波段的量子效率曲线

在 GSPC 中,建立较弱的电场,漂移电子仅仅激发气体分子到亚稳态。气体分子由亚稳态弛豫到基态时,发射连续谱紫外光子,经紫外成像镜头用紫外变像管转换成电信号,再由像物理

增强器放大输出。由于无雪崩过程, GSPC 的能量分辨率和动态范围均高于 IPC,测得最佳空间分辨率为 $500\mu\text{m}$ 。欧洲空间局 (ESA) 已设计由 GSPC 取代 IPC 用于 X 射线天文光谱观测。

三、利用光电发射效应的成像探测器

A.H.Sommer 把光电发射模型简化为三阶过程: 光电阴极材料的价电子被入射光子激发;受激的光电子从被激位置向真空界面输运;光电子越过表面势垒逸出进入真空。其示意图见图 2(a)。若 $h\nu > 2(E_g + E_A)$ (E_g 是禁带宽度, E_A 是电子亲和势),则一次光电子在输运过程中还可激发产生二次电子。当二次电子能量仍高于真空能级 E_0 时,就形成二次电子发射。收集光电子流或二次电子流都可探测入射光子。

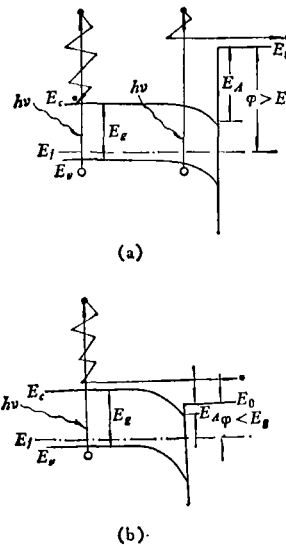


图 2 光电阴极的三阶过程示意图

(a) 正电子亲和势光电阴极; (b) 负电子亲和势光电阴极

1. 传统的正电子亲和势光电阴极

这类阴极尚可分为透射式及反射式两种。在透射式光电阴极中,入射光子和发射的光电子或二次电子分别在阴极两侧。这有利于成像器件中的电子光学聚焦。根据光电发射的三阶过程,高效光电阴极要求材料对辐射有高的吸

收, $E_g + E_A < h\nu$, 且 $E_g/E_A > 1$ 比 $E_g/E_A < 1$ 有更高的量子效率。一般说来, 对可见光灵敏的光电阴极对紫外也有良好的响应。只是由于作为光电阴极衬底的窗口材料对紫外的透过性能, 限制了它们的紫外灵敏度。图 3 给出 MgF_2 窗口、透射式双碱和三碱光电阴极的量子效率曲线。ESA 为 2.4m 空间望远镜提供的弱天体摄影机的主探测器, 就是采用 MgF_2 窗口, 光敏面为三碱光电阴极的三级像增强器。

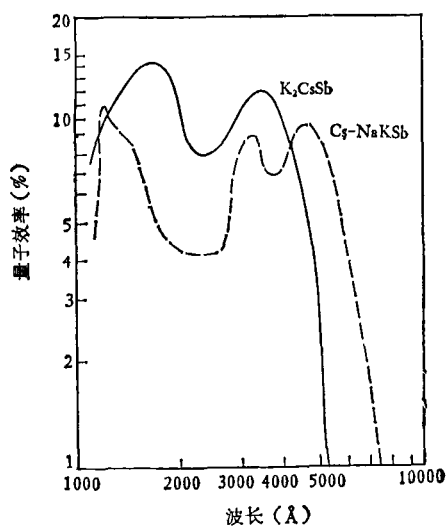


图 3 双碱和三碱透射式光电阴极的紫外量子效率曲线

为抑制强烈的可见辐射背景, 空间天文学希望用日盲型光电阴极, 即只对 2000 \AA ($h\nu \approx 6\text{eV}$) 以下的辐射灵敏的阴极。根据 $E_g + E_A \geq h\nu$ 及 $E_g/E_A \gg 1$, 日盲型光电阴极多为绝缘体。其中 CsI 是对真空紫外有高质量效率的一种材料, 即使在空气中它仍有稳定的性能。

对波长更短的软 X 射线, 由于透射式光电阴极衬底有较强吸收, 且考虑到光电子逸出深度为几百埃, 对阴极层厚度有上限, 不能忽略阴极层的透射损失, 因而量子效率下降。

反射式光电阴极则没有这些缺点, 可充分吸收入射光子, 因而量子效率要比透射式的大。在反射式光电阴极中, 入射光子和发射的光电子都在材料的同侧。这样短波响应不再受衬底透过性能的限制。若采用 CsI 一类阴极, 可以无窗口, 在空间应用中不再存在高能带电粒子轰

击窗材料产生的荧光和闪烁造成的背景噪声。两种阴极的真空紫外波段量子效率比较见图 3。

可是, 反射式光电阴极不能直接用于通常的光电成像器件中, 因为无法将光电子聚焦成二维图象读出。至今已发展了几种聚焦电子像读出的方法, 见图 4。

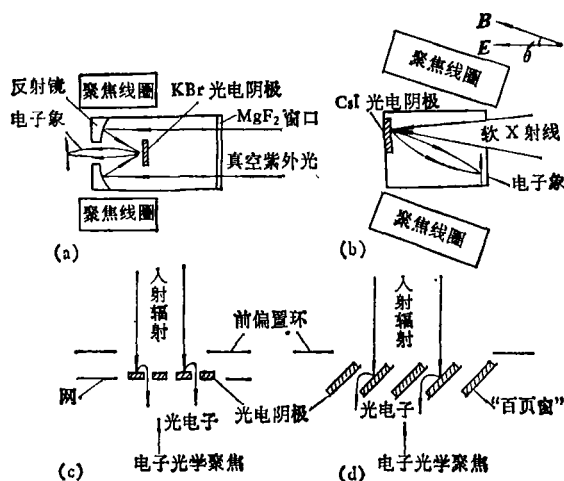


图 4 反射式光电阴极的几种成像方式

图 4(a) 是内反射型成像方式, 获得的电子像用电学方法处理。Appolo16 登月探测所用的远紫外摄影机光谱仪就是采用这种方式。图 4(b) 是斜聚焦图像转换器。当外磁场同内电场成某角度时, 入射光束和光电子聚焦束互相叉开。用 CsI 阴极可不需窗口, 能工作于软 X 线波段。这两种方式都有笨重的磁聚焦线圈, 且不适用于快速光学系统。图 4(c) 是一种网支撑结构。把如 CsI 的阴极材料蒸发在镍网格上。网前置前偏压环, 发射的光电子在前面的排斥场和后面的强吸引场作用下通过网孔进入后部聚焦区输出。这种结构综合了透射式和反射式阴极的优点。但穿过网孔的那部分入射光子没有被利用, 量子效率要比反射式的小, 但比透射式的仍高 2—3 倍。以后又发展了一种谓之“百页窗”式的结构[图 4(d)], 它挡住了所有的人射光, 避免了光穿过开孔面积的损失, 是很理想的一种结构, 但工艺上难度较大。

在软 X 线波段, 测得 CsI 的二次电子发射

占总光电发射电流的 99% 以上,有相对窄的二次电子能量分布,量子效率是金的 100 倍,是一种很有希望的软 X 射线光电阴极材料. 美国海军实验室用网支撑 CsI 光电阴极已制成真空紫外区的相机.

2. 负电子亲合势 (NEA) 光电阴极

由光电发射的三阶过程可知,正电子亲合势光电阴极中在大于逸出深度处产生的受激电子,在热弛豫时间内与声子散射,损失能量,降到导带底,不能逸出进入真空. 只有在逸出深度内产生的经散射后能量仍高于 E_0 的受激“热”电子才有可能逸出. 由于热电子迁移距离很短,所以逸出深度很小 ($\sim 100 \text{ \AA}$),量子效率因而不高.

NEA 光电阴极利用表面吸附技术,使 E_0 位于体内导带底之下 [图 2(b)]. 由于受激电子在导带底具有比热弛豫时间长得多的寿命,所以逸出深度达扩散长度 (μm) 量级,输运过程从“热”电子运动变为“冷”电子扩散. 因而 NEA 光电阴极量子效率高,且光电子能量分布更为集中. 实现 NEA 的关键是降低逸出功 φ , 满足条件 $E_c - E_f \approx E_g > \varphi$ (NEA 材料多为重掺杂,所以 $E_f \approx E_v$). 用偶极子层模型或异质结模型很好地解释了吸附 Cs 或 Cs_2O 的表面降低 φ 的机理. 吸附原子的电离能就是降低的最小 φ 值. 第一个研制成功的 NEA 光电阴极是 $\text{GaAs}:\text{Cs}$. 在 0.8—3.0keV 范围内, $\text{GaAs}:\text{Cs}_2\text{O}$ 的量子效率近似为 1, 能量分辨率 $\frac{\Delta E}{E}$ 近似为 1—3, 空间分辨率达 $10 \mu\text{m}$. 反射式 NEA 光电阴极 InGaAsP 的真空紫外量子效率近似为 10%. NEA 光电阴极吸附的表面要求是高度完整的原子纯清洁表面,需在超高真空 (10^{-10}Torr) 中获得.

3. 微通道板 (MCP)

MCP 是具有电子倍增作用的一种阵列光电器件. 它由分立的内壁二次发射系数大于 1 的玻璃细管集束而成,每个通道就是一个独立的光电倍增器. MCP 输入面吸收入射光子发射光电子,在 MCP 两端加高压的内电场作用下碰

撞内壁产生二次电子的倍增,在输出端获得正比于入射光子的倍增了的电荷包. 这种直通通道 MCP 的增益同电压及通道的径长比有关. 由于通道内正离子反馈的产生,使增益限制在 $10^3 \sim 10^4$ 范围内. 采用两块直通通道 MCP 串联成“V”形以及采用“C”形弯通道 MCP,有效地抑制了正离子反馈,增益可高达 10^7 .

MCP 的探测效率定义为 MCP 的计数率同每个通道入射光量子数之比. 若在 MCP 入射端淀积真空紫外、软 X 射线光电阴极材料(如 CsI),则比没有淀积层的 MCP 探测效率要高. 结果示于图 5. 预计这种无窗的入射端比 CsI 的弯通道 MCP 在真空紫外到软 X 射线的整个光谱区有较高的增益和效率.

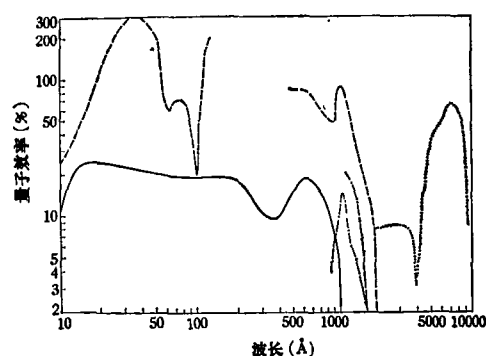


图 5 MCP, CCD, CsI 光电阴极的真空紫外、软 X 射线波段

.....Si CCD (背面涂 C_2H_{12}) -----反射式 CsI
- · - · - 透射式 CsI ————MCP (输入端涂 CsI) ————MCP

MCP 的空间分辨率和信号读出技术有关. MCP 的读出方法有用输出电荷包直接轰击荧光屏的光学方法和电学方法两种. 电学方法中早期采用在 MCP 输出端连接阳极电阻位置编码器,可获得 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ 分辨率的图像. 但当信号超过 $10^4/\text{s}^{-1}$,由于脉冲的积累,使分辨率变坏. 以后发展了一种称为“Photicon”的结构,它由两组互相垂直的带有各自放大器的条状电极作读出系统,通过电学处理确定入射辐射的座标.空间分辨率为 $50 \mu\text{m}$. Photicon 已将它用于 1978 年 11 月发射的 HEAO-II 卫星上,发现几乎所有的恒星和已知的类星体均有明显的 X 射线辐射,为 X 射线空间天文学积累了大量

资料。有最高空间分辨率和最大动态范围的读出技术是多阳极微道阵列(MAMA)。两组互相垂直、绝缘、套合的金属阳极阵列紧贴于MCP输出面。输出的电荷包分配给对应的两组电极上,根据到达各自自带的放大器的脉冲测定电荷包的位置。这种MCP的空间分辨率可达 $25\mu\text{m}$ 。

由此可见,入射面涂有CsI的弯通道MCP采用MAMA读出系统后,具有极佳的真空紫外、软X射线摄像特性。它既有与摄影胶片类似的摄像能力,又适合空间应用。日本浜松电视株式会社研制的真空紫外摄像存储管采用带KBr光电阴极的MCP,输出在 CaF_2 表面存储,用于1978年发射的“极光”卫星上,成功地摄取了北极上空的极光。NASA和ESA预计在1983年用航天飞机将“空间实验室”送入近地轨道。卫星上装备有三种主要的太阳物理仪器,其中的软X射线($300-1.7\text{\AA}$)太阳望远镜和掠入射式真空紫外($90-1500\text{\AA}$)太阳望远镜,要以尽可能大的空间分辨率和光谱分辨率观测太阳大气。其焦平面摄像器件必须用高灵敏的光电阵列探测器。MCP是有最大可能的人选者。

四、利用光电导效应的成像探测器

1. 视像管

光敏面是p-n或p-i-n结光电导靶的视像管在可见光范围有良好的性能,可以满足多种电视摄像要求。但工作于远紫外区的视像管,至今进展甚微。已见报道的只有 SiO_2 窗口的 $\text{CdSe}/\text{As}_2\text{S}_3$ 异质结光导靶摄像管,其响应下限为 2000\AA ,有较大暗电流和放大器噪声,需在强辐照下工作。除窗口的吸收外,光导靶所需的透明电极即使尽可能的薄,对紫外光仍有强烈的吸收,所以目前还没有能工作于真空紫外波段的视像管。

2. 固体摄像器件

同真空摄像器件相比,固体摄像器件体积小,重量轻,功耗少,噪声低,寿命长,无滞后,

牢固可靠,线性响应好,量子效率高,特别适合于空间应用。固体摄像器件中获得迅速发展和广泛应用的是电荷耦合器件(CCD)。

CCD是一种有一系列紧密排列MOS结构的功能器件。栅极加一定电压时,就在半导体表面形成“势阱”,它收集并储存光生信号电荷。依次对栅电极施加时钟脉冲电压,使存储的信号电荷沿半导体表面定向转移到输出端,经放大器输出。即CCD兼有电荷存储和转移(自扫描)两种功能。这种CCD叫做表面沟道CCD,其转移特性受半导体表面性能的强烈影响。埋沟CCD是使信号电荷的转移在离表面一定距离的体内进行,消除了表面态的影响,提高了转移效率。目前已研制出最高像元数为 800×800 的CCD,正在研制像元数为 1600×1600 的CCD。当然线阵CCD加上另一维的机械运动,也可实现摄像。例如地球资源卫星对地面摄像,利用卫星本身的一维运动,线阵CCD就可输出地面高分辨率的二维图像。目前最高像元数为 1×2048 。法国即将发射的第一颗地球资源卫星SPOT,其多光谱扫描仪就是用三块 1×1024 像元的CCD外部光学联结作探测器。上述这些面阵或线阵器件,采用多晶硅栅电极, SiO_2 绝缘层和正面光照方式,都对可见光和近红外有响应。近几年来,着力于把响应范围向红外及真空紫外、软X射线波段延伸。由硅的紫外吸收系数可知,吸收仅发生在硅表面 $100-1000\text{\AA}$ 范围内,因此表面层对紫外响应有决定作用。这意味着正面光照CCD由于多晶硅和 SiO_2 的吸收及反射,甚至连蓝光灵敏度都很差。从对着栅电极的背面光照CCD,则可避免辐射被栅电极和绝缘层吸收和反射。但为使光生载流子在一个扩散长度内被对应势阱收集,减少因横向扩散引起分辨率下降,必须减薄硅片到小于一个分辨像元尺寸($15\mu\text{m}$)。这种减薄的背面光照CCD的蓝紫外响应要比正面光照的高10倍。入射光辐照硅表面,在硅表面存在着“死层”,即该层内产生的光电子由于被界面态复合,不能为势阱收集,对信号无贡献。一般采用背面重掺杂以减轻“死层”的作用,并

涂减反射膜,以减少反射损失。NASA 和 ESA 计划在 1983 年各发射一艘载有“国际太阳极地探测器 (ISPM)”的宇宙飞船,利用木星引力首次离开黄道面进入通过太阳两极的轨道,用 ISPM 中的 X 射线远紫外望远镜获取太阳极区表面温度的数据和耀斑、日珥的清晰图像。其焦平面摄像器就是用背面减薄、重掺杂的 CCD (像元数为 512×320),工作温度为 -80°C ,曝光时间为 4.5s。

另一种途径是在减薄 CCD 的背面蒸涂有机荧光转换膜 CORONENE ($\text{C}_{24}\text{H}_{12}$),它可将紫外辐射以接近 1 的效率转换成波长为 $0.5\mu\text{m}$ 并对 CCD 敏感的可见光。NASA 预计在 1983 年用航天飞机将 2.4m 空间望远镜送入近地轨道,其宽视场行星摄像机的探测器就是用减薄的背面蒸涂 CORONENE 的 800×800 像元的硅 CCD 四块拼接而成,对 $1400-3300\text{\AA}$ 的辐射有较好的灵敏度。由于硅的峰值响应波长是 $0.7\mu\text{m}$,更佳匹配的转换膜是含水杨酸钠的红宝石化合物,它可将大于 600\AA 的辐射以 0.5 的效率转换成 $0.7\mu\text{m}$ 的辐射。

硅表面“死层”的吸收限制了软 X 射线响应波段的上限;而更高能量的 X 射线则完全穿透减薄的硅,因而目前硅 CCD 还只对 $1-10\text{keV}$

的辐射有响应。对深度冷却的器件(-100°C),每个像元的暗信号电荷已达到 1e/s ,均方根读出噪声为 $15-20\text{e}$ 。因此可以工作于单个 X 光子计数模式。

由于硅 CCD 有上述一系列特性,加之国外正大力扩展其软 X 射线波段的响应范围,可以预期硅 CCD 是未来空间 X 射线天文学的理想摄像器件。

五、结 论

上述各类成像探测器的真空紫外、软 X 射线响应性能比较见表 1。能在该波段以较高效率工作,适于空间应用的成像探测器,目前还只有入射面复盖 CsI、采用 MAMA 读出系统的弯通道 MCP。它有类似摄影胶片的摄像能力,又有较高的空间分辨率和一定的动态范围,能工作于单光子计数模式,体积、重量和坚固性都适于空间应用。但 MAMA 读出系统复杂。若用面阵 CCD 作 MCP 的读出系统,则既简单又有更高的空间分辨率。目前硅 CCD 光敏面还不能做到可同 MCP 输出面直接耦合,但可通过光纤面板来耦合。例如 NASA 最近的 Magellon 计划是一个空间天文学实验,工作于

表 1 真空紫外、软 X 射线成像探测器的性能比较

	响应范围	量子效率	空间分辨率	能量分辨率	动态范围	空间应用的评价
摄影胶片	特殊乳剂 $> 170\text{\AA}$	很低	很高	无	很小	不适合空间应用
IPC	$< 100\text{\AA}$	80%	1mm	中等	小	从发展看,不能满足空间应用的要求
GSPC	$< 100\text{\AA}$	80%	$500\mu\text{m}$	好于 IPC	中等	结构复杂,应用受限制
CsI 光电阴极	透射式 $1000-2000\text{\AA}$ 反射式 $< 2000\text{\AA}$	10-20% 80-90%	$\sim 10\mu\text{m}$	中等	大	性能良好,无窗方式更适于空间应用。但需聚焦线圈和高压,且对外空间磁场敏感
NFA 光电阴极	$> 1500\text{\AA}$ $15-4\text{\AA}$	10% $\sim 100\%$	$\sim 10\mu\text{m}$	中等	大	尚未见空间应用报道
MCP	复盖 CsI $< 2000\text{\AA}$	$\sim 20\%$	$\leq 25\mu\text{m}$	无	中等	是目前最佳的空间用真空紫外、软 X 射线成像探测器。但需高压,读出系统复杂
CCD	$> 600\text{\AA}$ $1-12\text{\AA}$	$\sim 90\%$ $\sim 50\%$	$15\mu\text{m}$	好于 GSPC	很大	未来空间用理想的成像探测器

270—680 Å 及 800—1360 Å 波段, 需要光子计数. 摄像器件的最后选择尚未完成, 但上述方案是他们考虑的可能方案之一. 可是 MCP 的高压工作对空间应用是不利的. 从发展来看, 未来理想的空用成像探测器还应推 CCD.

参 考 文 献

- [1] C. I. Coleman, *Appl. Opt.*, **20** (1981), 3693.
 [2] R. Rothschild et al., *Space Sci. Inst.*, **4** (1979), 269.
 [3] A. H. Sommer. *Photoemissive materials*, Wiley, New York, (1968).
 [4] B. L. Henke et al., *J. Appl. Phys.*, **52** (1981), 1509.
 [5] R. U. Martinelli, D. G. Eisher, *Proc. IEEE*, **62** (1974), 1339.
 [6] D. Bardes, E. Kellogg et al., *Rev., Sci. Instrum.*, **49** (1978), 1273.
 [7] J. G. Timothy, *Space Sci. Rev.*, **29** (1981), 461.
 [8] J. G. Timothy et al., *Proc. SPIE*, **183** (1979), 169.
 [9] 鈴木義二, 木二勝ゆき, 中山雅夫テレビ学会誌, **33** (1979), 114.
 [10] D. C. Harrison et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-27** (1980), 391.
 [11] M. M. Blouke et al., *Appl. Opt.*, **19** (1980), 3318.
 [12] H. O. Pritchard et al., *Appl. Opt.*, **18** (1979), 2085.
 [13] P. Burstein et al., *Proc. SPIE*, **143** (1978), 114.
 [14] R. C. Catura, R. C. Smithson, *Rev. Sci. Instrum.*, **50** (1979), 219.



中国物理学会光散射专业委员会 《全国一、二届光散射学术会议文集》征订通知

文集登载了 1981 年在厦门和 1983 年在苏州召开的全国光散射会议论文、提要共 143 篇, 30 万字. 主要内容有: (A)喇曼散射(物理); (B)喇曼散射(化学与生物等); (C)布里渊散射; (D)非线性光散射; (E)米氏散射等; (F)仪器装置.

文集预计 1984 年 6 月发行. 一、二集共收工本费

(包括邮费)三元. 订购者请与《光散射文集编辑委员会》联系(四川省成都市四川大学物理系转), 并邮寄所需款项. 征订日期到 1984 年 5 月 15 日止(以邮戳为准). 过期预订视印数余额分配.

中国物理学会光散射专业委员会

《光散射文集》编委会 1984 年 2 月



(上接第 253 页)

- (1893), Chelsea Publishing Co., New York.
 [9] J. J. Thomson, *Notes on Recent Researches in Electricity and Magnetism*, (1893); 重印本: Dawsons of Pall Mall, London, (1968).
 [10] J. Larmor, *Proc. Lond. Math. Soc.*, **26** (1894), Dec., 119—144.
 [11] Lord Rayleigh, *Phil. Mag.*, **S. 5**, 43—261, 26 (1897), 125—132.
 [12] G. C. Southworth, *B. S. T. J.*, **15-4** (1936), 284—309.
 [13] Б. А. Введенский и А. Г. Аренберг, «Радиоволноводы», Огиз, Гостехиздат, (1946). 译文见: 李敦复、钱景仁译, «无线电波导», 科学出版社, (1959).