

- [6] P. Z. Wong, *Physics today*, 41-12(1988), 24.
- [7] Mahammad Sahimmi, *Rev. Mod. Phys.* 65(1993), 1398.
- [8] Matin Blunt and Peter King, *Phys. Rev. A*, 37(1988), 3935.
- [9] B. M. Yu and K. L. Yao, *Phys. Rev. A*, 44(1991), 3664.
- [10] B. M. Yu and K. L. Yao, *Phys. Rev. A*, 41(1990), 5564.
- [11] Matin Blunt and Peter King, *Phys. Rev. A*, 42(1990), 4787.
- [12] J. R. Fanchi and R. L. Chisfiansen, Society of Petroleum Engineers, 19782, (1989), 105.
- [13] D. C. A. Aviles, *J. Geophys. Res.* 92(1987), 331.
- [14] M. Thiercelin, R. G. Jeffrey and Ben Naceur, Society of Petroleum Engineers, 16431, (1987), 441.
- [15] T. A. Hewett, Society of Petroleum Engineers, 15386, (1986), 1.
- [16] Jincai Chang and Yanis C. Yortsos, *SPE Formation Evaluation*, 5(1990), 31.
- [17] D. L. Turcotte, *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge University Press, (1992).
- [18] A. S. Emanuel, G. K. Alameda and R. A. Behrens et al., *SPE Reservoir Engineering*, 4(1989), 311.

## X 射线像增强器及其应用 \*

杨晓文

(厦门大学新技术研究所, 厦门 361005)

余永正

(上海华科电子显像公司, 上海 201800)

**摘要** 综述了 X 射线像增强器的结构、工作原理和性能, 简要介绍了它的可能的应用。

**关键词** 光电成像技术, X 射线探测器, X 射线像增强器

广义地讲, 图像增强器是一种对入射光子或带能粒子像敏感的通过转换、增强输出有更高亮度的可见光像的器件。X 射线像增强器则是对 X 射线(能量 10—100keV)敏感的图像增强器。它将入射的低强度 X 射线像转换并增强为较高亮度的可见光像输出。在空间天文学、物理学、医学和工业等领域, 或是要求探测强度极低的 X 射线图像, 或是要求观测低强度 X 射线图像的细节, 都要求采用能使图像亮度增强而又有一定空间和时间分辨率的器件, X 射线像增强器无疑是极有用的观测工具。自 50 年代研制成功 X 射线像增强器以来, 它的应用领域日益广泛, 同时其性能也得到不断的完善和发展。

### 1 结构和性能

X 射线像增强器主要由接收元件、增益单元和图像读出体三部分组成。由于 X 射线的光子能量高, 不能用光学或电学方法使之聚焦或放大, 所以首先需将高能 X 射线的光子转换成易于控制的低能电子。接收元件是一个能量转换体, 通过二次转换(X 射线光子→可见光光子→电子)或一次转换(X 射线光子→电子), 将 X 射线像转换成电子像。由于各种能量转换体(它由 X 射线荧光屏、可见光光阴极、X 射线光阴极组成)的转换效率都很低, 在低强度 X 射线入射时, 对于记录和读出来说, 这些低能电子是远不够的。增益单元的作用是将输入电子数倍增或使其能量增加。被增强的电子像轰击图像读出体(荧光屏), 利用荧光屏的阴极射线致发光效应最终转换成高亮度的可见光像, 直接目视或用电视摄像显示。

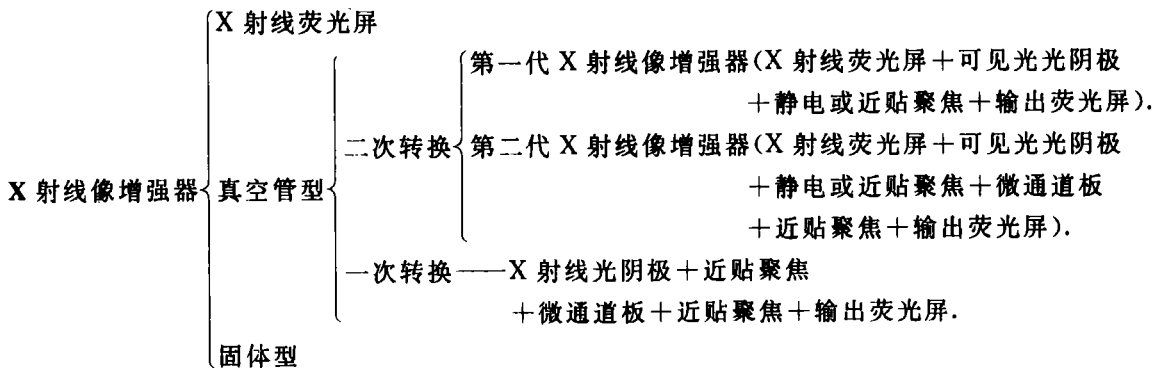
X 射线像增强器主要由接收元件、增益单元和图像读出体三部分组成。由于 X 射线的光子能量高, 不能用光学或电学方法使之聚焦或放大, 所以首先需将高能 X 射线的光子转换成易于控制的低能电子。接收元件是一个能量转换体, 通过二次转换(X 射线光子→可见光光子→电子)或一次转换(X 射线光子→电子), 将 X 射线像转换成电子像。由于各种能量转换体(它由 X 射线荧光屏、可见光光阴极、X 射线光阴极组成)的转换效率都很低, 在低强度 X 射线入射时, 对于记录和读出来说, 这些低能电子是远不够的。增益单元的作用是将输入电子数倍增或使其能量增加。被增强的电子像轰击图像读出体(荧光屏), 利用荧光屏的阴极射线致发光效应最终转换成高亮度的可见光像, 直接目视或用电视摄像显示。

\* 1995 年 3 月 20 日收到初稿, 1995 年 6 月 25 日收到修改稿。

表征 X 射线像增强器性能的重要参数是转换系数和分辨率. 转换系数定义为单位入射 X 射线剂量率( $\text{mR} \cdot \text{s}^{-1}$ )产生的输出荧光屏亮度( $\text{cd} \cdot \text{m}^2$ ). 空间分辨率用调制传递函数

(MTF)或可鉴别的线对/毫米( $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ )表示.

按照结构的不同, X 射线像增强器可作如下分类:



### 1.1 X 射线荧光屏

X 射线荧光屏应用历史悠久. 它集转换、增强、读出功能于一体, 使用简单经济, 分辨率高, 虽然增强性能很差但仍被广泛使用. 组成荧光屏的荧光体材料有宽带、窄带两类发射体. 前者为掺不同激活杂质的硫化物、氧化物和硅酸盐等, 受激发光有较宽的光谱分布; 后者是稀土元素作基晶掺入另一种稀土元素作激活离子, 激发单一光谱. 荧光体接收 X 射线光子能量使激活原子或离子激发, 当回复到稳态时辐射出与能级差相应能量的可见光子. 譬如吸收一个  $50\text{keV}$  的 X 射线光子, 若荧光屏有 100% 的能量转换效率, 应可产生平均能量为  $2.5\text{eV}$  的光子 20,000 个. 实际屏效率远小于此值, 例如 P20 ( $\text{ZnCdS} : \text{Ag}$ ) 的能量转换效率只有 14—16%. 此外还由于 X 射线光子在屏层内的指数式吸收和可见光子在屏层内的再吸收及散射损失, 上述例中只有约  $10^3$  个光子辐射出荧光屏. 从光量子数而言, X 射线荧光屏具有增强作用. 可是人眼正常视觉要求每人射一个 X 射线光子至少需要产生  $10^5$  个光子, 不然后人眼感知细节能力受到限制. 因此, 严格地讲, X 射线荧光屏不属常规 X 射线像增强器范畴. 但多数 X 射线像增强器都用它作能量转换体, 所以把它列为

性能很差的 X 射线像增强器予以概述.

多数荧光物质是多晶材料, 用沉淀法、离心法、电泳法或喷涂法将均匀细颗粒( $\phi 5-10\mu\text{m}$ ) 荧光物质在透明基底上形成薄层. 为了提高发光效率, 在层表面蒸镀一薄铝层(厚  $600-700\text{\AA}$ ), 它反射屏层内的可见光, 又兼作屏电极. 这种粉末屏的转换系数只有  $0.008-0.01\text{cd} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mR}^{-1}$ . 虽然极限分辨率可达到荧光颗粒大小水平, 但对如此低亮度图像, 人眼无法感知大量细节信息. 屏厚度取颗粒大小的量级, 以满足分辨率的要求, 但对 X 射线的吸收变差. 以后发展了碱卤化合物荧光屏(如  $\text{CsI} : \text{Na}$ ,  $\text{NaI} : \text{Tl}$ ) 它们是单晶材料, 用汽相蒸发生长而成, 厚度可达  $\text{mm}$  量级. 虽然其能量转换效率类似于粉末屏, 但对 X 射线吸收好, 量子效率高. 为了克服因厚度增加引起分辨率下降的缺陷, 发展了一种凹雕屏结构, 形成光学上互相绝缘的圆柱状碱卤化物列阵<sup>[1]</sup>. 碱卤化合物极易受潮, 不能在大气环境中长期使用.

### 1.2 真空管型 X 射线像增强器

为了提高荧光屏的 X 射线转换亮度, 必须使人射 X 射线光子转换成电子, 通过电子数量倍增或能量增强后再轰击屏, 从而使输出荧光屏亮度增大. 为此器件必须在真空环境下工作.

物理

这类器件研制成功于 50 年代,根据转换方式不同有二次转换与一次转换之分。

### 1.2.1 二次转换型 X 射线像增强器

它实际是 X 射线荧光屏与可见光像增强器的组合。输入荧光屏将入射 X 射线转换成的可见光像,经光学耦合到可见光光阴极。光阴极

将低亮度可见光像转换成光电子像,通过电场或磁场加速聚焦到输出荧光屏,获得亮度增大的可见光像输出。这类器件又称第一代 X 射线像增强器。磁聚焦分辨性能优良,但结构庞大,只在特殊场合使用。图 1 给出静电聚焦和近贴聚焦的二次转换 X 射线像增强器结构。

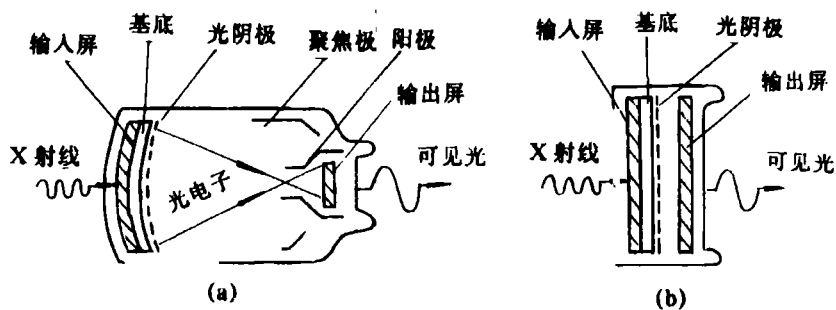


图 1 第一代 X 射线像增强器结构

(a)静电聚焦倒像型;(b)近贴聚焦型

静电聚集倒像型 X 射线像增强器输出屏面积相对输入屏缩小 100 倍左右,故有大头管之俗称。光透明薄材料或光纤面板作基底实现输入屏到光阴极的光学耦合。如何避免制备光阴极时碱金属蒸汽对输入屏的沾污以及制备性能均匀而优良的大面积光阴极是工艺上需要解决的难题,这也是这种器件价格昂贵的原因。静电聚焦电子光学设计要求光阴极成弯曲面。X 射线投射到也是弯曲的输入屏会引起图像空间畸变。加上电子光学固有的一系列像差,这种器件分辨率只有  $1\text{--}3\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,最好的中心分辨率也只有  $4.5\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,但转换系数达  $50\text{--}200\text{cd}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mR}^{-1}$ 。光电子的加速和图像的缩小是获得亮度增益的主要原因。缩小的输出像用短焦距光学系统耦合或电视摄像显示。

近贴聚焦 X 射线像增强器[图 1(b)]不用静电透镜,而是依靠光阴极与输出屏间的强电场( $2\text{--}5\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ )将光电子像平移加速轰击输出屏。这种器件成扁平状,结构紧凑,光阴极面无需成弯曲面,无几何畸变,整个像面上有均匀的

分辨性能。其分辨率和增益与场强有关。亮度增益来自光电子的加速。过大场强会损坏粉末屏进而发生场致发射。用厚  $50\text{--}600\mu\text{m}$  的  $\text{CsI}:\text{Na}$  作输入屏的这种器件分辨率为  $2\text{--}5\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,转换系数为  $0.5\text{--}8\text{cd}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mR}^{-1}$ [2]。图 2 给出两个近贴聚焦 X 射线像增强器增益和分辨性能的测试结果[3]。由图 2 可见,输入屏厚度对转换系数和 MTF 有相反的影响。

上述两种器件可以通过前一级的输出屏与后一级的输入屏光纤耦合构成多级串联,获得更高的转换系数。这种结构工艺更复杂,且大面积光纤面板价格昂贵,亮度虽增加,但像质随级联数增加而下降。理想的办法是在器件内引入电子倍增元件,使光电子不仅能量增加,而且数量也增加。微通道板(MCP)的问世使这种设想得以实现,发展成为第二代 X 射线像增强器。

MCP 是二维电子倍增元件。它由许多内壁具有一定体电阻和次级电子发射性能的高铅玻璃管( $\phi 10\text{--}100\mu\text{m}$ )集束成板状。互相独立的每根玻璃管就是一个电子倍增通道。这些微通道的

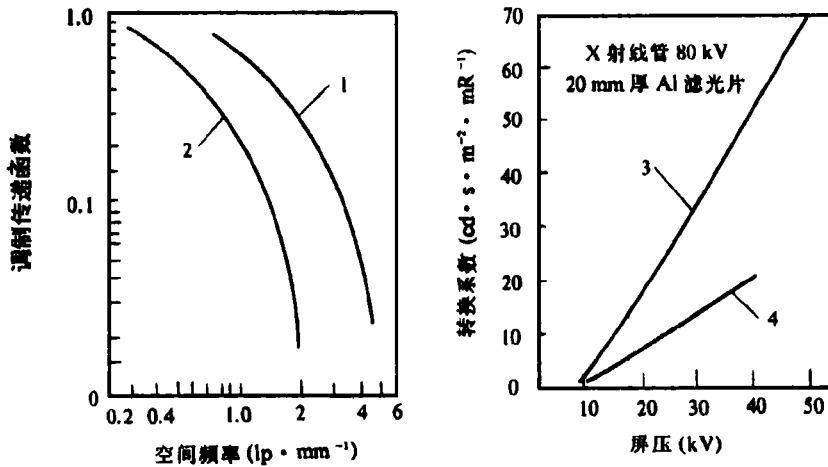


图2 两个近贴聚焦 X 射线像增强器的性能测试<sup>[3]</sup>

- 曲线 1——CsI 厚度为 100 $\mu\text{m}$ , 间距为 8mm, 屏压为 25kV;
- 曲线 2——CsI 厚度为 300 $\mu\text{m}$ , 间距为 20mm, 屏压为 44kV;
- 曲线 3——CsI 厚度为 300 $\mu\text{m}$ , 间距为 20mm;
- 曲线 4——CsI 厚度为 100 $\mu\text{m}$ , 间距为 8mm

二维列阵(通道中心距为 10—100 $\mu\text{m}$ )构成 MCP. 当入射电子进入通道并与内壁碰撞时产生次级电子发射. 由于内壁次级电子发射系数大于 1, 每次碰撞使电子数倍增. 每个次级电子在 MCP 两端所加电场作用下向输出端运动时多次与内壁碰撞, 反复产生次级电子发射, 最后在输出端形成倍增了的电子簇. MCP 增益(输

出与输入电子数之比)与通道的长径比和所加电压有关. 通常长径比为 40—80, 工作电压为 1kV 时增益可达  $10^3$ — $10^4$ . MCP 极限分辨率近似于通道中心距. MCP 电子增益高, 分辨性能好, 功耗低, 体积小, 使用方便, 因而被广泛使用. 在第一代器件的输出屏前引入 MCP, 并与之近贴聚焦, 即构成第二代 X 射线像增强器(图 3).

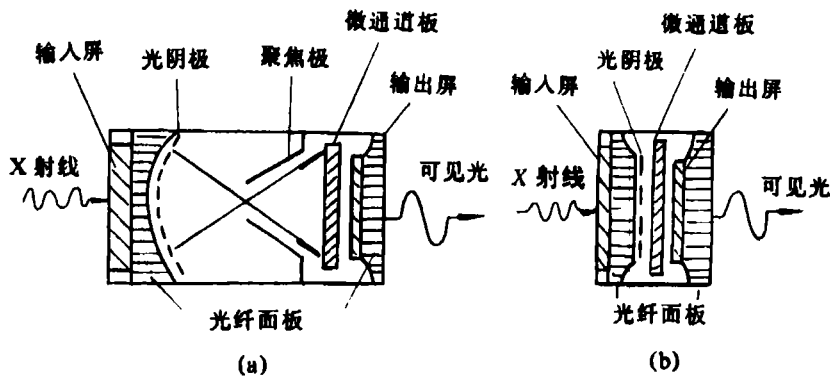


图3 第二代 X 射线像增强器结构  
(a)静电聚焦型; (b)双近贴聚焦型

第二代静电聚焦器件[图 3(a)]中光电子被聚焦到 MCP 输入面,经 MCP 倍增后近贴聚焦到输出屏,得到亮度增强的可见光像输出.输入输出像尺寸大致相同.转换系数为  $500\text{--}1000\text{cd} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mR}^{-1}$ ,分辨性能与第一代的类似.

在第二代双近贴聚焦器件[图 3(b)]中,X 射线致荧光像经光纤面板入射光阴极.光阴极发射的光电子像近贴聚焦到 MCP 输入面.经 MCP 倍增的电子像再近贴聚焦到输出屏,转换成高亮度可见光像,并通过光纤面板输出.输入

和输出像的大小相等.图 4 是一个这种实验器件的转换系数和分辨性能测试结果<sup>[4]</sup>.输入屏是  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S} : \text{Tb}$  和  $\text{La}_2\text{O}_2\text{S} : \text{Tb}$  混合物构成的 Lanex 屏.光纤面板的光纤孔径为  $5\mu\text{m}$ ,板厚  $7\text{mm}$ .MCP 通道孔径  $30\mu\text{m}$ ,中心距  $34\mu\text{m}$ ,长径比为 90.器件转换系数约  $300\text{cd} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mR}^{-1}$ ,极限分辨率约  $4\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ .

第二代器件的高转换系数的获得是以增大工艺复杂程度和噪声为代价的.可用的 MCP 增益有一上限.这是因为 MCP 的正离子反馈

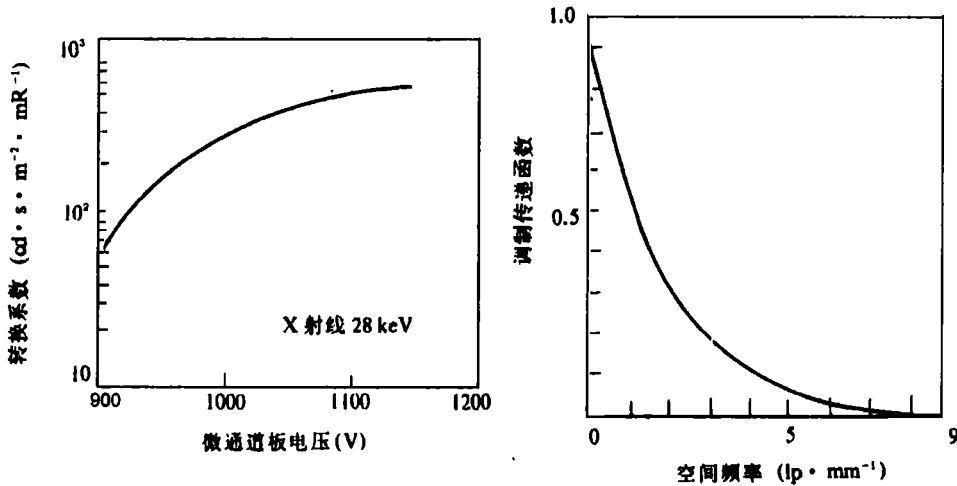


图 4 第二代双近贴聚焦 X 射线像增强器性能测试<sup>[4]</sup>

引入的附加噪声也被倍增放大,信噪比下降导致像质变差.抑制正离子反馈途径是采用弯通道 MCP 或两块 MCP 串接,使通道互成一定角度.这时残留通道内的空气分子和通道壁的吸附分子在通道输出端被电子电离,生成的正离子在通道壁弯曲处即产生碰撞,因而避免正离子反馈到光阴极处而产生额外的电子倍增过程(噪声).这种结构可使增益提高到  $10^7$ ,对探测单 X 射线光子事件是有用的.

### 1.2.2 一次转换型 X 射线像增强器

将二次转换器件的输入屏、可见光光阴极和它们之间的光学耦合用 X 射线光阴极代替,即构成一次转换型 X 射线像增强器.X 射线光阴极将入射 X 射线直接转换为电子像射出阴

极表面.显然实现这种器件的关键是进行高效 X 射线光阴极的研制.由于 X 射线在物质中的高穿透力,为了充分吸收 X 射线,要求光阴极层足够厚,为了使 X 射线激发电子逸出阴极层,要求层越薄越好.近 20 年来,一直没有找到解决这个矛盾的有效方法,一次转换型器件研制进展缓慢,二次转换型器件成为市场的主导器件.有报道用 MCP 既作光电转换器,又作电子倍增器,构成近贴聚焦 X 射线像增强器<sup>[5]</sup>,但在  $30\text{--}100\text{keV}$  范围内,其转换系数仅为  $0.02\text{--}0.03\text{cd} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mR}^{-1}$ ,无法实用.碱卤化物(如 CsI)是良好的真空紫外和软 X 射线光阴极材料,人们对其光电发射机理作了深入研究,提出了软 X 射线致光电发射模型<sup>[6]</sup>.软 X

射线光子(能量 0.1—10keV)激发产生高能光电子.高能光电子在层内激发产生低能次级电子,输运到层表面能量仍大于表面逸出功的那部分次级电子,就可逸出体外而构成外发射电子.作为类推,假设硬 X 射线致光电发射机理也是低能次级电子发射.基于这种假设,Bateman 等进行了用疏松状 CsI 作光阴极,MCP 作电子倍增器,ZnS:Ag 作输出屏的 X 射线像增强器的实验研究<sup>[7]</sup>.为了充分吸收 1—50keV 的 X 射线光子,阴极层厚 250—500 $\mu\text{m}$ .疏松状 CsI 结构(CsI 分子团之间是真空)有利于受激次级电子逸出分子团并可在外电场作用下易于输运到层表面外发射.实验拍摄到输出屏上的 X 射线像,但曝光时间长达数十分钟,可见它不是高效光阴极.

作者研制成功一种有密实层和变密度疏松层多层复合结构的新型 CsI X 射线光阴极和双近贴聚焦一次转换型 X 射线像增强器<sup>[8]</sup>.密实 CsI 层起 X 射线光子吸收层作用.激发产生的高能光电子输运到疏松层,并在层内输运过程中多次激发产生低能次级电子.由于平均只有正常密度 2% 的疏松 CsI 层有比密实层大得多的次级电子平均逸出深度<sup>[9]</sup>,且疏松程度向发射面逐渐增大的这种变密度结构,可减小次级电子在向表面输运过程中的能量损失,所以疏松层主要起次级电子倍增层作用.这种结构既保证了对 X 射线有充分吸收,又有较高的次级电子发射,估算其量子效率约为 0.1.这种阴极有较好的稳定性,用干燥惰性气体保护可短时间暴露于大气.与可见光光阴极相比,它无需在同一真空容器中制作,因而简化了工艺,提高了器件成品率.图 5 给出其结构和工作原理示意图.X 射线光阴极层厚 250 $\mu\text{m}$ 左右,MCP 通道孔径为 20 $\mu\text{m}$ ,长径比为 60,通道倾角为 5 度,输出屏为 P20.测得器件转换系数如图 6 所示.器件分辨率 $\geq 5\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ <sup>[10]</sup>.转换系数虽低于二次转换型器件,但其输出屏亮度已足够在明室目视.一次转换型器件结构简单,体积小,成品率高,性能价格比高于二次转换型器件.

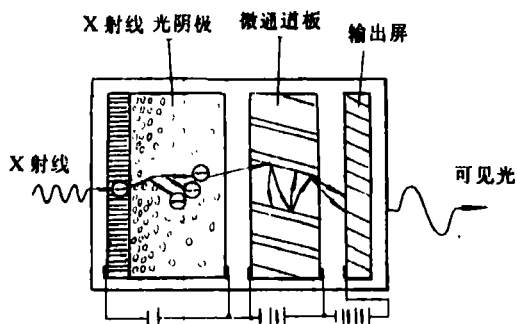


图 5 一次转换器件结构和工作原理

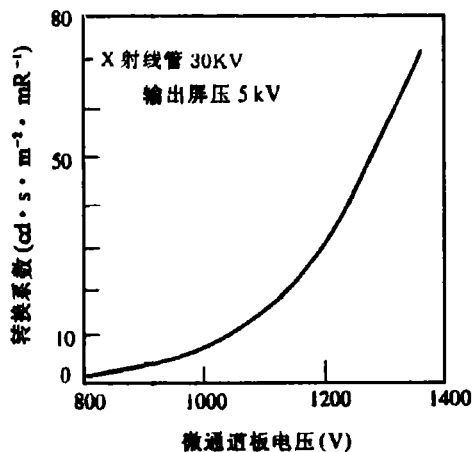


图 6 一次转换型器件增益性能测试

### 1.3 固体型 X 射线像增强器

这类器件的研究在 50 年代很活跃.有人曾提出<sup>[11]</sup>将半导体光电导层(半导体金属肖脱基二极管)和电致发光层(如 ZnS)形成夹层结构,在其两面制备透明电极阵列并加上工作电压.光电导层透明电极外侧紧贴 X 射线荧光屏.无光照时,光电导层与电致发光层电阻相等,各有相等的电压降.当 X 射线照射时,X 射线荧光屏产生的可见光经透明电极照射光电导层,使该处电阻下降,对应的电致发光层压降增加引起发光.由于电致发光层对电压有良好的线性响应,因而可获得增强的可见光输出.可能是由于这种结构的增益和分辨性能达不到实用要求,此后再没有关于这类器件的研究报道.

物理

## 2 应用

在天文学中,X射线天文学为人类在高能波段洞察宇宙打开了新的窗口.漆黑一片的夜空通过X射线敏感仪器观察则是十分“明亮”.观测外空的X射线对进一步了解宇宙十分重要.例如关于类星体的认识,弄清黑洞与四周的相互作用,研究太阳耀斑的性质等等.为此人类已发射了“爱因斯坦天文台”、“伦琴卫星”,即将发射“先进X射线天体物理设备卫星”.利用X射线像增强器增益高、分辨性能好、体积小、重量轻、能实时获取二维信息等特点,可成为星载X射线望远镜焦平面成像探测器.

在物理学领域,例如晶体的X射线衍射分析可用X射线像增强器实时对衍射图样定位,减少拍照次数和胶片损耗.又如用X射线像增强器探测激光核聚变的X射线辐射像,可获取实现可控热核反应的有用知识.

在医学领域,X射线透视是医生诊断疾病的重要手段.X射线像增强器的应用可减少患者接收X射线的剂量,改善医生工作环境,降低医生受辐射损伤的程度,改善对细节的诊断能力.利用X射线像增强器可制成小型便携式X射线成像仪,它能携带到任何地方为患者服务.

在工业领域,对某些工件进行X射线无损探伤是必需的检测项目.与常规的消耗大量胶片、事后抽样检查的拍片法相比,X射线像增强器应用于工业无损探伤可实时获得工件内部缺

陷图像,定会受到工业界的欢迎.此外它还可应用于保安检查、刑警侦探等部门.

综上所述,可以看出,与常规二次转换型器件相比,一次转换型X射线像增强器有更高的性能价格比.研制具有更大视野和更高转换系数的一次转换型X射线像增强器应是今后的发展方向.

## 参 考 文 献

- [1] J. R. Piedmont, H. K. Pollehn, *Proc. SPIE.*, **99**(1976), 155.
- [2] Wang Shingping, Panel Type X-Ray Image Intensifier Tube and Radiographic Camera System, U. S. Patent 1,447,721. 1984-05-8.
- [3] Wang Shingping, C. D. Robbins, C. W. Bates et al., *Proc. SPIE.*, **127**(1977), 188
- [4] L. I. Yin, J. I. Trombka, S. M. Seltzer, *Nucl. Instrum. Meth.*, **158**(1979), 175
- [5] S. Balter et al., *Radiology*, **110**(1974), 673.
- [6] B. L. Henke, J. P. Knaner, K. Premaratne, *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 1509.
- [7] J. E. Bateman, R. J. Apsimon, *Adv. Electr. Elec. Phys.*, **52**(1979), 189.
- [8] 杨晓文、余永正、吴存亚,一种X射线像增强器,中国专利 88,102912.2. 1988-05-13
- [9] She Yongzheng, Yang Xiaowen, Ding Yishan, *Adv. E. E. P.*, **64B**(1985), 541.
- [10] Yang Xiaowen, Wu Cunya, She Yongzheng, *Biomedical Electronics*, **2**(1993), 42.
- [11] W. Sruermer, A Solide State Image Converter German Patent 968,667. 1952-05-4.

(上接第 167 页)

导引.对于那些已在介观域进行专题研究的物理工作者,本书仍能帮助他们全面了解整个介观物理.对于在大、中学校从事物理教学的教师,阅读本书后,将会不满足于传统的物理教学——只引导学生“游览”宏观和微观世界.(阎守胜、甘子钊主编的《介观物理》一书由

北京大学出版社 1995 年 4 月出版,定价 19.80 元.需要者可到该出版社门市部或与该出版社邮购部联系购买.该出版社邮购部联系购买.该出版社的邮政编码为 100871——编者注)

(中山大学物理系 周义晶 李华钟)