



# 非晶硅辐射探测器

焦洪震

(南京大学物理系 南京 210008)

**摘要** 近年来,许多国家开展了用非晶硅(a-Si:H)作为探测器材料的研究,并取得了明显的进展.本文简要介绍这种探测器的原理、结构、现状及其应用前景.

**关键词** a-Si:H, 辐射探测器, 高能物理, 核医学成像, 材料科学, 生命科学.

## 1 引言

单晶固态探测器,特别是用硅和锗制造的探测器,已有较长的生产历史.结晶半导体技术需要很高的化学纯度和高质量结晶材料,这导致单位面积的成本很高,而且探测器最大面积受硅锭直径限制.粒子探测器需要大面积器件.中性粒子探测,特别是X射线探测是一个需求很大的领域,它们是核医学和国防应用所需要的,预计不久会有迅猛的发展.从市场角度看,对带电粒子探测器件的需求量较少,缺少方便的技术也阻碍了一些应用的增长,如射线自动照相和同位素标记.

现有探测器朝高质量材料和高性能器件方向发展.初看非晶体半导体只是一种低性能材料,除其成本低,似乎不能与晶体竞争,但近年研究表明,应将它看成是一种完全不同的技术,而不仅仅是一种廉价替代材料.

自1985年以来,日本、美国、法国、加拿大、英国、德国和前苏联,相继开展了这方面的研究工作,并取得明显进展<sup>[1~4]</sup>.在我国,至今未见这方面研究的报导.下面就探测器的原理、结构、一些有希望的技术、以及它们的应用前景作一简单介绍.

## 2 探测器的原理和结构

根据不同的用途,制成了各种结构形式的探测器.从现有资料看,大致有以下几种类

型.(1)直接探测模式.带电粒子在厚度约50~60 $\mu\text{m}$ 的a-Si:H耗尽层中产生电离事件.研究表明,a-Si:H的能隙约1.8eV,产生一对电子-空穴对所需平均能量约60eV,这大于能隙宽度,原因是一部分入射粒子能量消耗在非电离事件上.这些由辐射产生的电子-空穴对在电场作用下漂移,在电极上感应出电荷,再由外电路将它放大.(2)间接探测模式.在a-Si:H表面上蒸上一层磷光体,使入射辐射转换为波长在400~500nm范围的可见光,然后大部分可见光在1~2 $\mu\text{m}$ 厚的a-Si:H层中被吸收,在表面附近产生电子-空穴对,并在电场作用下漂移.利用光子的迁移率高的优点,a-Si:H层这样偏置,让电子通过整个非晶硅层漂移,而空穴立即被邻近的电极收集.再用探测器设计相应的读出电路.(3)量热器模式.它由若干金属或a-Si:H层堆积而成.入射辐射光在金属层中产生光电效应和康普顿散射,在金属转换层中产生的电子再在a-Si:H层中产生电子-空穴对,也需要根据用途设计一个读出电子学装置.(4)位置灵敏模式.将a-Si:H分割成窄的小条或小的象素,并给每个条或象素提供一个读出电路,由此实现一维或二维位置灵敏性.对注量探测,读出电路是简单的开关器件,建立x、y地址坐标,以顺序确定条或象素的地址.对于单粒子探测,读出电路包含一个高增益的电荷灵敏放大级和顺序寻址级.电子电路

立式集成. 地址总线既要能读出每个象素的信号, 又不能减少同辐射发生作用的面积.

### 3 存在的主要困难和克服方法

用 a-Si : H 材料制作辐射探测器时遇到以下几个问题: (1) 对于厚度为几个  $\mu\text{m}$  的 a-Si : H 层, 如果电极又是平行板形式的探测器, 其结电容相当大, 因此噪声大, 难于用作单粒子探测; (2) 为减少探测器电容, 必须制备厚 a-Si : H 层, 这将导致成本提高. 一些新的技术如 VHF-GD 和可控等离子磁控法是快速淀积 a-Si : H 层很有希望的方法. 但增加厚度又必须避免脱皮和层内应力等问题, 以确保层的均匀性; (3) 在物理性质上, a-Si : H 是一种高阻材料,  $\rho = 10^9 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  (结晶硅为  $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ), 这对制作探测器是有利的. 但其载流子迁移率很低, 对电子  $\mu_e = 1 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  (结晶硅为  $1350 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ), 对空穴  $\mu_h = 0.05 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  (结晶硅为  $480 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ), 对非晶硅合金更低, 这是很不利的, 为确保漂移时间小于载流子寿命, 必须在 a-Si : H 层内建立大的电场, 这又将引出新的困难; (4) 同数目很大的象素联接所产生的问题, 即“水平”结构的读出电子学和“垂直”结构的层序列最佳化有关的技术问题.

为克服上述困难进行了多方面的探索, 目前公认比较有希望的技术有下列三种.

1) 埋置型 p-i-n 结构. 对于高线性能量转移的粒子, 如  $\alpha$ 、重离子等, 在沿粒子径迹所产生的等离子体柱中, 辐射引起的电子-空穴对有很大一部分因复合而损失. 这种复合损失原则上可用提高电场的方法降低. 但是, 对普通的 p-i-n 型二极管或肖脱基位垒二极管所加的最高反偏电压受表面微等离子体击穿的限制. 埋置型 p-i-n 结构及相应的电场分布如图 1 所示. 它可使最大电场区移离表面, 从而抑制了这种击穿. 普通的厚度为  $5 \mu\text{m}$  的 p-i-n 型器件, 最大偏压为  $20 \text{V}/\mu\text{m}$ , 而埋置型 p-i-n 结构可达  $50 \text{V}/\mu\text{m}$ , 这种结构也有助于低线

性能量转移粒子的单粒子探测, 因为高电场使电荷收集时间缩短, 而快的收集时间又可获得更高的计数率或更大的信号.

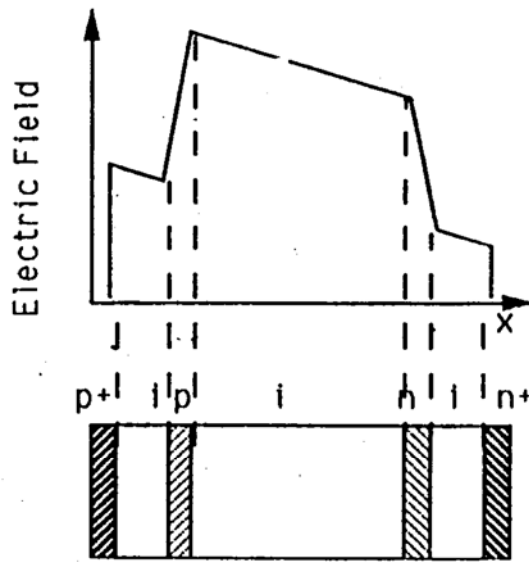


图 1 埋置型 p-i-n 型结构及相应的电场分布示意图

2) 闪烁面板. 图 2 为闪烁面板的示意图. 把含有稀土元素的玻璃光纤熔融并拉制成几  $\mu\text{m}$  的圆柱状结构, 闪光被限制在每根光纤内, 这样, 由光分散引起的空间分辨的下降在间接探测模式下可避免. 虽然稀土元素闪烁面板因光产额低而不足以进行最小电离粒子探测, 但适用于注量探测. CsI 闪烁体有希望用于单粒子探测. CsI (Na) 的光产额可同 NaI (Tl) 相比拟. 适当制备的有碘空位的纯 CsI 具有一  $10 \text{ ns}$  的快分支, 这对需要快探测响应和严格调节定时的应用是重要的. 已制成厚  $300 \mu\text{m}$ , 直径  $50 \mu\text{m}$  的 CsI 圆柱层. 厚度更厚, 直径更大的 CsI 面板采用一种在蜂窝结

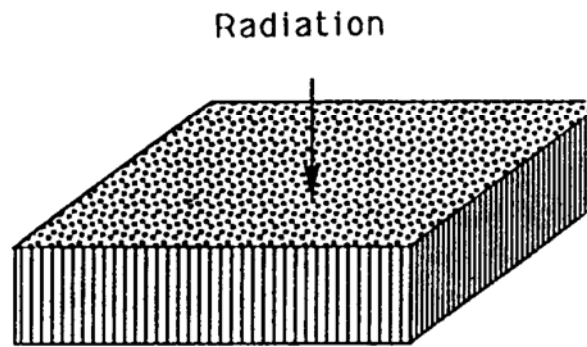


图 2 闪烁面板示意图

构内部使 CsI 熔融和再结晶的方法制作.

3) 叉指电极. 对间接探测模式,  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  厚的 a-Si:H 层已足以吸收来自磷光体的所有闪光. 对单粒子探测, 必须降低由大的探测

器电容引起的噪声. 叉指电极能提供小电容, 但代价是牺牲响应时间, 或者必须提高偏压. 这类电极的 a-Si:H 层内部电场的不均匀性对新器件的结构可能有着有趣的含义.

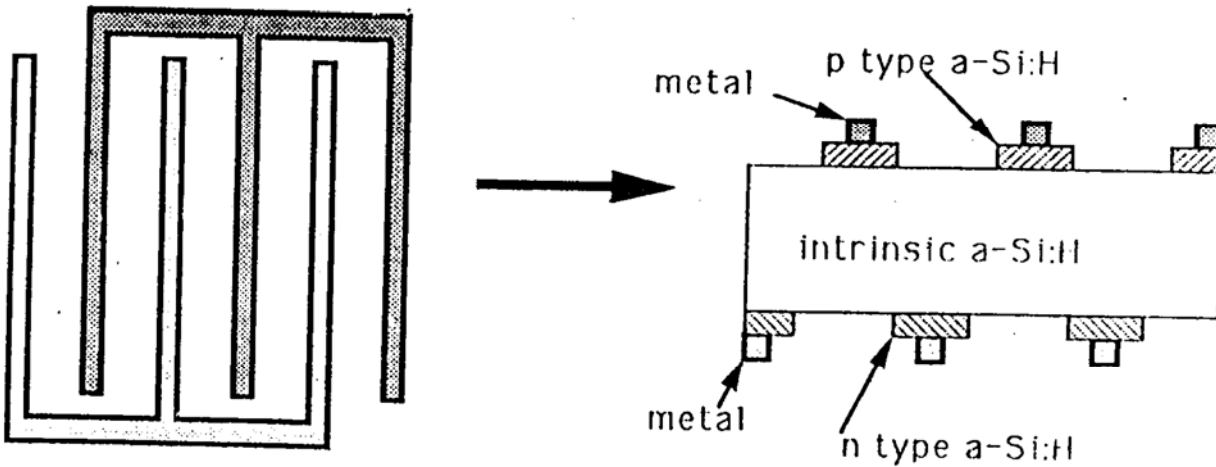


图3 叉指极结构示意图

### 4 应用前景

#### 4.1 高能物理应用

在高能物理实验中, 一类应用是作为径迹器件. 一次初级粒子的碰撞事件后会发出许多次级带电粒子. 这些次级粒子可用包围碰撞点的位置灵敏 a-Si:H 探测器探测. 对来自每个探测器的信息进行处理, 以鉴别每个粒子的径迹. 实验证明, 对于最小电离粒子, 是完全可以 a-Si:H 层来进行探测的. 对于厚 a-Si:H 层形成的像素, 在直接探测模式下有高的信噪比, 其替代方法是间接探测模式. 对于薄 a-Si:H 层, 即使信号很大, 减小探测器电容仍然是重要的. 由于径迹器件需要大面积和高的辐射阻抗, 即使信号小, 对现行结晶器件来说, a-Si:H 探测器仍有优越性.

另一类应用是作量热器, 它由铅、铀等构成的转换材料层和像素探测器层构成多层结构. 一束高能  $\gamma$  射线产生电磁簇射, 记录簇射径迹的位置和径迹数, 可确定入射  $\gamma$  射线的能量和方向. 现行记录簇射的充气探测器或结晶硅探测器完全由 a-Si:H 探测器代替.

#### 4.2 医学成像应用

下面我们讨论医学成像中采用 a-Si:H

探测器的可能性. 分通量成像器件和单光子成像器件两种类型.

1) 通量成像器件. X 射线胶片因它的良好空间分辨而得到广泛应用. 但它的动态范围有限, 缺乏实时能力, 重复应用时稳定性差, 为获得数字化成像还需作进一步的努力. X 射线象增强器常用于 X 射线数字化成像, 但它体积庞大, 机械上要设计巧妙. 和闪烁面板相结合的像素探测器可用来代替这些器件, 且信号足够大, 能简化读出电子学系统, 其空间分辨由像素大小和磷光体的闪光分散程度确定, 输出象已是数字化的, 并适于现有数字成像处理技术.

X 射线 CT 是一种高通量成像系统, 它由一个 X 射线管和一维位置灵敏探测器构成, 整个系统可围绕人体旋转. 位置灵敏探测器通常是一个充氙电离室列阵. 用一个磷光体和 a-Si:H 探测器条的结合体可代替充氙电离室列阵, 其分辨率可与氙电离室一样, 且不需精心设计读出系统.

2) 单光子成像器件. 在核医学中, 将放射性药剂注入人体, 探测人体发射的  $\gamma$  射线, 以给出放射性核素在人体内分布的图像. 和通量成像不同, 这里必须记录单个光子. 闪烁照

相是这类成像设备的实例. 高光产额闪烁面板像素器件可以代替这种闪烁照相. 单光子发射 CT (SPECT) 和正电子 CT (PET) 是核医学中的新设备. 用闪烁体和 a-Si:H 光二极管阵列的组合可代替这些设备中的闪烁体和光电倍增管的组合. 这些设备中所用的其它  $\gamma$  射线探测器也可用 a-Si:H 器件代替, 且有良好的空间分辨.

#### 4.3 材料科学中的应用

对于现有材料科学研究中所用的辐射探测器, J. E. Bateman 给出了详细的评述<sup>[5]</sup>. 这些探测器在 X 射线结晶学中用以记录衍射花样; 在非破坏研究中用于记录 X 射线或同步辐射的透射成像. 对于已得到广泛应用的半导体探测器, 其主要局限性是它的有限的面积, 因此 a-Si:H 便成了这些应用中探测器材料的更好选择. 在 X 射线结晶学中单色特征 X 射线用一维位置灵敏探测器探测, 如胶片、多丝正比室等. 淀积在可靠衬底上的非晶硅合金可用来替代这些器件. 厚度为 30~50 $\mu\text{m}$  的 a-Si:H 合金其探测效率同加压充氩多丝正比室相似. 在非破坏研究中, 用了更高能的 X 射线通量, X 射线的直接或间接探测都可用积分模式下的 a-Si:H 探测器来实现. 对于 X 射线显微学, 尺寸优势并不重要, 但 a-Si:H 的高辐射阻抗仍然是要求的.

#### 4.4 生命科学中的应用

在生命科学中, 射线自动照相是从放射

性同位素标记的有机体薄片获得蛋白质分布和 DNA 序列信息的有用工具, 常用于这些研究的电泳凝胶放射性同位素有  $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$  和  $^{32}\text{P}$  等, 它们都是  $\beta$  发射体, 其最大能量分别为 18keV、155keV 和 1.7MeV. 对于这些  $\beta$  粒子, 可用 a-Si:H 探测器作单粒子探测, 除  $^3\text{H}$  外, 直接或间接探测模式都可以. 对于  $^3\text{H}$ , 由于信号小, 必须仔细设计读出电子学系统.

综上所述, a-Si:H 能否代替现有的胶片、气体探测器、闪烁探测器和结晶半导体探测器, 很大程度上依赖各种具体应用, 但如下优点是明显的: (1) 比结晶半导体有更大的面积、更高的辐射阻抗和更低的成本; (2) 比充气探测器有更高的空间分辨和探测效率; (3) 比胶片成像增强器更适于医学数字成像.

半导体物理教研室陈坤基教授为本调研提供了部分参考资料, 在此谨致谢意.

#### 参 考 文 献

- 1 Fujieda I, et al. LBL-27457
- 2 ICAS 14 Science & Technology, (1991)J. Non-Cryst. Sol., 1991, (137~138):1291~1329
- 3 Miresghhi A, et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS 1992, 39:635
- 4 ICAS 15 Science & Technology, 1993, 335
- 5 Bateman J E. Nucl. Instr. and Meth., 1988, A273:721

## Amorphous Silicon Radiation Detector

Jiao Hongzhen

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008)

**Abstract** Recently, the investigation to make radiation detectors with amorphous Silicon (a-Si:H) were reported in many countries of the world. In this paper, operation principles, structures, current status and prospect of applications in various fields of science on these detectors were reviewed briefly.

**Key Words** a-Si:H, radiation detector, high energy physics, nuclear medical imaging, material science, life science.