

文章编号: 0253-2239(2001)12-1467-07

用于 X 射线成像的非晶硒合金膜的制备和性能测试

徐向晏¹⁾ 牛憨笨¹⁾ 阔晓梅¹⁾ 王云程¹⁾ 郭振琪²⁾

(1), 中国科学院西安光学精密机械研究所光电子部, 西安 710068)
(2), 西北大学分析测试研究中心, 西安 710069)

摘要: 在 X 射线诊断成像方面, 非晶硒(a-Se)是最有前途的探测材料之一。通过实验研究了 a-Se 合金膜的制备方法, 用飞行时间方法测量了载流子的漂移迁移率和寿命, 讨论了对 a-Se 合金膜性能有重要影响的因素。通过对 400 μm 厚 a-Se 合金膜 X 射线光电流的测量, 确定了 a-Se 合金膜对 X 射线的光电响应特性。实验表明, a-Se 合金膜具有线性的光电转换特性, 灵敏度与场强有关。在 10 V/μm 场强下, 对于医疗诊断常用的钨致辐射 X 射线谱, 用 X 射线在 a-Se 合金膜中产生一电子-空穴对约需 45 eV 的能量。

关键词: 非晶硒合金; X 射线成像; 飞行时间; X 射线光电流; 灵敏度

中图分类号: O484.4⁺1 文献标识码: A

1 引 言

非晶硒(a-Se)具有空间分辨率高、介电常数低、电阻率高等优良性能, 许多工作者试图将 a-Se 应用于探测 X 射线诊断成像中^[1,2]。1995 年, Zhao Wei 提出利用 a-Se 的优良光电导性能研制薄膜晶体管(TFT)读出信号的固体 X 射线成像器件^[3]; 1997 年, Luhta 提出利用 a-Se 研制电子束扫描读出信号的 X 射线视像管^[4], 其基本结构与可见光光电导视像管类似。目前广泛使用的影像增强器加 CCD 的成像系统(XRII/TV), 进行了多次光电转换, 图像分辨率低, 而 a-Se X 射线成像器件是光电一次直接转换成像, 图像分辨率高。特别是用薄膜晶体管读出信号的 a-Se X 射线成像器件, 可实现 X 射线成像器件的平板化、数字化和固体化, 与成像器件的发展趋势相一致, 具有十分诱人的前景; 如果研制成功, 可望成为 X 射线诊断成像的主流器件。

目前国际上用于 X 射线成像的 a-Se 合金材料和器件仍处于实验研究阶段, 国内尚无这方面工作的报道。a-Se 合金作为光电转换的核心材料, 光电特性关系到器件的性能和设计, 其载流子迁移特性直接影响实时成像性能和对 X 射线的灵敏度, 而灵敏度一般用产生一电子-空穴对所需的 X 射线能量来表征。本文通过实验探索 a-Se 合金材料和合金膜的制备方法, 并用数十微米厚合金膜测量载流子迁移特性, 在载流子迁移特性基本达到要求后, 用数

百微米厚的合金膜测试对 X 射线的光电响应, 并重点讨论了灵敏度与电场强度的关系。

2 a-Se 合金材料的制备和合金膜蒸镀

a-Se 是十分优良的光电导材料, 利用热蒸镀的方法可获得极其细密、有很高空间分辨率的非晶态膜。但这种非晶态膜热稳定性不好, 常温下就会逐渐晶化而形成电阻率很低的微晶, 使靶面暗电流急剧增大, 晶化区各像素信号混在一起, 严重影响空间分辨率; 晶化使硒的体积缩小, 进一步引起膜层出现裂纹, 晶化应力甚至使膜层从衬底剥落。因此, a-Se 用作 X 射线光电导时, 必须防止晶化。a-Se 膜晶化与很多因素有关, 如温度、杂质、衬底材料等^[5,6], 光照也会加速结晶^[6]。a-Se 膜作为成像的光电导材料, 所处工作环境温度一般为室温, 其附着的衬底材料(兼作电极)选择余地有限, 有效的方法是制成合金或通过掺杂来防止晶化, 合金元素应有好的抑制晶化的能力, 同时对 a-Se 性能影响小。

在硒合金中, Se:Te 合金研究较多。但 Te 对 a-Se 性能影响较大, 含量 1%(质量分数)时, 即可使电子和空穴的迁移率大幅度下降^[7]; Te 含量增至 4%(原子数分数)时, Se:Te 合金的热稳定性也不好^[6]。用作实时成像的 X 射线光电导, 需要数百微米的厚膜以增加吸收, 同时以空穴和电子作载流子, 要求载流子迁移长度长, 光电导惰性小。Se:Te 合金膜难以满足这些要求, 其它如 Se:Ge 合金^[8]、Se:Sn 合金^[9]等也是如此, 必须另外寻找其它合金元素。

As 与 Se 化合可形成稳定的非晶态物质 As_2Se_3 , 光学禁带宽度 $E_g \approx 1.8 \text{ eV}^{[10]}$ 。成像光电导的暗电阻率要求 $E_g \geq 1.5 \text{ eV}^{[11]}$, 这表明若用 Se:As 合金, 暗电阻率完全满足要求。Se-As-Te 靶面视像管 Saticon 的成功应用证明 As 具有好的抑制 a-Se 结晶的能力^[11], 其中 As 含量约为 10%。当 As 含量较高时, a-Se 合金膜光电导惰性增大^[12,13]; 在几百微米的厚膜运用时, 该影响不能忽略, 因此应尽量降低合金膜中的 As 含量。如果蒸镀时以合金体材料作为原材料, 含 5% As 的合金膜可在 100 °C 下保持稳定^[6]。实验显示, 用含 0.45% As (制备合金时的砷单质含量) 的 a-Se 合金蒸镀的合金膜是稳定的非晶态膜, 在常温和普通光照下一年以上未发现任何可检测到的变化, 同时具有较好的光电性能。

实验中 a-Se 合金膜的制备方法如下: 预先准备石英管和石英-玻璃过渡接头, 将二者接好并严格清洗。纯度 99.999% 的硒丸和砷按一定质量比称量好, 装入上述石英管中, 过渡接头的玻璃端与真空台的玻璃管封接, 用钛泵抽真空 $5 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 以上, 维持数小时后从玻璃管处与真空台分离, 再将装有硒、砷材料的石英管与过渡接头分离。上述工作完成后, 硒、砷已真空密封于石英管中, 然后放入高温炉中加热至 700 °C, 恒温 20 h 以上, 使 Se、As 充分反应, 形成均匀的液态合金。从高温炉中取出后, 立即用室温水淬火, 形成块状合金。用上述方法制备的合金体材料作为蒸镀的原材料。铝衬底经严格的工艺处理, 用热蒸镀方法制备合金膜, 蒸镀时衬底温度约 50 °C, 蒸镀室真空度维持在 $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 左右, 沉积速率约 $0.5 \mu\text{m}/\text{min}$ 时 a-Se 合金膜具有较好的性能。样品的结构分析采用日本理学 D/max-3C X 射线衍射仪 (Cu 元素特征 K_α X 射线, 波长 $\lambda = 0.154 \text{ nm}$, 管电压 40 kV, 管电流 40 mA), 成份分析采用日本 Rigaka 公司 RIX2100 X 射线荧光光谱分析仪 (标称检出限 0.01%)。经分析, 用上述方法制备的合金体材料绝大部分为非晶态, 仅有少量六方硒存在, 其原因可能是液态合金淬火速度不够快所致, 合金体材料的 As 含量约为 0.5%, 接近于制备合金时的砷单质含量 0.45%, 二者不完全一致可能主要是因为测量存在系统误差 (X 射线荧光光谱分析仪未用硒、砷标准样品校准)。由合金蒸镀的合金膜全部为非晶态, As 含量约为 0.35%, 稍低于合金体材料中的 As 含量, 这表明合金在蒸镀过程中发生分解, 蒸气中不同组元分子在衬底上的沉积速率有差异。图 1 是 $400 \mu\text{m}$ 厚合金膜样品的 X 射线衍

射结果, 衍射峰是表面蒸镀铝电极的 Al (111) 晶峰。

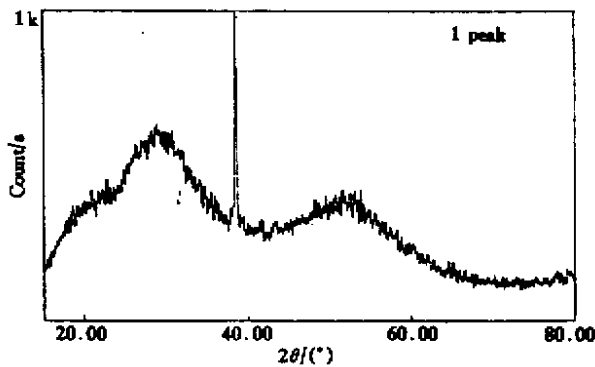


Fig.1 X-ray diffraction of $400 \mu\text{m}$ a-Se alloy film, the diffraction peak is Al (111) of Aluminum electrode deposited on top surface

3 a-Se 合金膜载流子迁移特性测量

a-Se 合金膜用作 X 射线成像探测材料时必须具有良好的载流子迁移特性, 这样在数百微米的厚膜运用时膜层内产生的电子和空穴才有较大的概率到达收集电极, 以降低光电导惰性和提高灵敏度。载流子寿命和迁移率可用飞行时间方法 (time-of-flight method) 测量^[11,13], 本实验采用光脉冲激发载流子。由于可见光在 a-Se 合金膜中 $0.1 \mu\text{m}$ 量级内即可全部被吸收^[11], 可用数十微米厚合金膜测量载流子迁移特性。按上述方法在铝衬底上制备了 $54 \mu\text{m}$ 厚 a-Se 合金膜, 并蒸镀透明金电极。X 射线衍射分析确认合金膜处于非晶态。迁移特性测量实验装置如图 2 所示。Nd:YAG 锁模激光器脉冲重复频率为 73.85 MHz, 输出光经普克尔盒选出单脉冲, 再用 KTP 倍频晶体倍频后作为 a-Se 合金膜载流子的激发光源, 波长 $0.53 \mu\text{m}$, 单脉冲宽度约 70 ps (用我们自己研制的变像管扫描相机测量的结果)。如果输出光不经过普克尔盒选择单脉冲, 经快速光

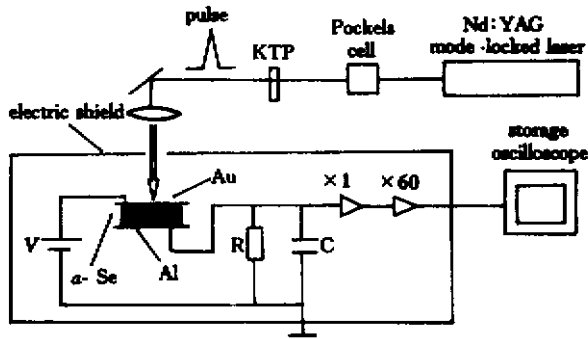


Fig.2 Diagram of experimental setup used for time-of-light measurement

电二极管 (PIN) 用示波器可观察到光脉冲序列时间总长度约 60 ns, 是否选择单脉冲应根据载流子飞行时间长短和信号强弱确定。激光器可手动触发, 为了提高测量灵敏度, 采用积分法, 放大器输出的信号用 Tektronix 公司 7934 存储示波器 (带宽 500 MHz) 观察或拍照。

由于光脉冲很短, 在 a-Se 合金膜中激发出一薄层电子-空穴对, 透明电极为正电压时, 电子进入透明电极, 一薄层空穴在电场作用下向负电极运动, 根据积分电容 C 上输出的信号可确定空穴的迁移率或寿命^[11, 13]; 同理透明电极为负电压时可测量电子的迁移率和寿命。测量结果见图 3、图 4 和表 1。

我们得到的迁移率与 Tabak^[13] 的结果相近。在实验中, 我们注意到砷含量增加, 会使空穴寿命缩短, 但对迁移率影响不大; 低的蒸镀沉积速率可使载流子寿命增加, 但对于厚膜, 低沉积速率会使蒸镀时间加长, 折中考虑, 0.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ 左右的沉积速率是合适的, 提高蒸镀过程中衬底温度可使载流子寿命增加, 但高的衬底温度会引起 a-Se 合金膜晶化, 因此衬底温度保持在 50 $^{\circ}\text{C}$ ~ 60 $^{\circ}\text{C}$ 较宜。

杂质氧对 a-Se 合金膜有不利影响, 会极大地降低电子寿命^[14], 还有可能加速合金膜晶化^[15]。硒丸常温下化学稳定性很好, 但砷单质较易氧化, 因此在合金材料制备过程中应尽量防止砷氧化。

根据上述测量结果, 可求出 a-Se 合金膜中电子或空穴的迁移长度^[11] $l = \mu\tau F$ (μ 、 τ 分别为载流子迁移率和寿命, 见表 1, F 为场强)。在 10 V/ μm 场

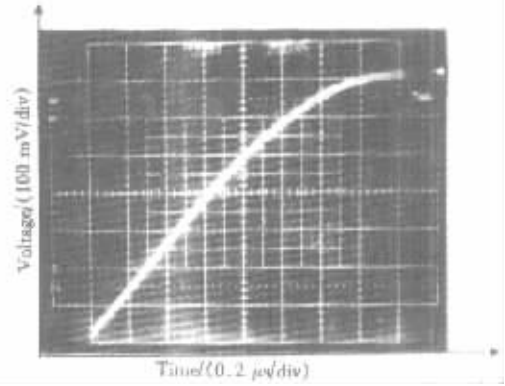


Fig.3 Voltage signal during the measurement of the hole drift mobility. $L = 54 \mu\text{m}$, bias is 133.4 V

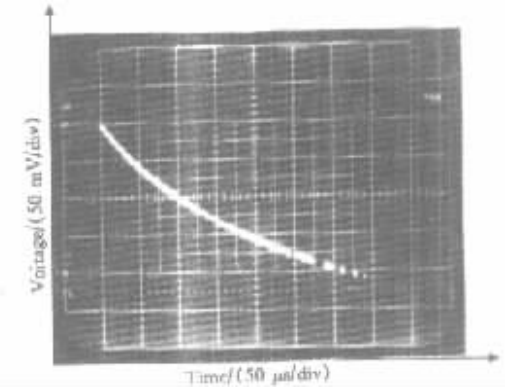


Fig.4 Voltage signal during the measurement of the electron life time. $L = 54 \mu\text{m}$, bias is -12.74 V

强下, 电子迁移长度 $l_e = 1300 \mu\text{m}$, 空穴迁移长度 $l_h = 1600 \mu\text{m}$, 该结果表明数百微米厚 a-Se 合金膜用作光电导时, 被激发的电子和空穴有较大的概率到达收集电极或自由表面, 这使 a-Se 合金膜用作 X 射线探测材料成为可能。

Table 1. Preparation conditions and transport properties of a-Se alloy film (Here, As concentration refers to the pure arsenic determined from the alloying procedure)

atomic number fraction of As /%	substrate temperature / $^{\circ}\text{C}$	deposition rate ($\mu\text{m}/\text{min}$)	film thickness / μm	drift mobility μ ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)		lifetime τ / μs		$\mu\tau$ product ($\mu\text{m}^2/\text{V}$)	
				hole	electron	hole	electron	hole	electron
0.45	about 50	about 0.5	54	0.15	6.4×10^{-3}	11	200	160	130

4 a-Se 合金膜对 X 射线的光电响应

本节将通过实验研究 a-Se 合金膜对 X 射线的光电转换特性, 以及灵敏度与场强的关系。

4.1 实验装置和测试结果

为了增加对 X 射线的吸收, 必须制备数百微米的厚膜, 但膜层厚度增加时, 可能导致膜层与衬底附着力降低, 甚至使膜层从衬底上剥落。为了解决该问题, 我们改进了衬底表面的处理工艺和蒸镀工艺, 但对 a-Se 合金膜性能有重要影响的因素保持不变

(本文第一部分所述)。考虑到测试光电响应所用的 X 射线在 40 kV ~ 80 kV 之间, 在经处理的 Al 衬底上制备了约 400 μm 厚的 a-Se 合金膜, 并蒸镀铝电极。图 1 给出该合金膜的结构分析 X 射线衍射结果。X 射线光电响应测试装置如图 5。

实验特别注意了高压电源的选择和外界干扰对测量的影响。空气中的水蒸气对测量有很大影响, 使输出信号不稳定和暗电流增大。将 a-Se 合金膜置于装有干燥剂的密封金属盒内, 实现遮光 (可见光) 干燥和屏蔽后, 干扰和暗电流显著降低。a-Se 合金膜受 X 射线照射的面积为 $\phi 40 \text{ mm}$ 的圆斑, 其

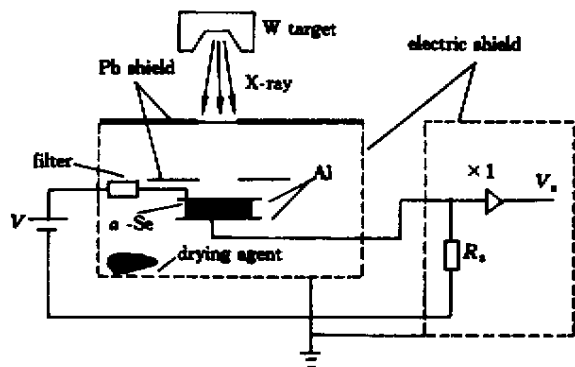


Fig.5 Diagram of experimental setup for measuring response of a-Se alloy film to X-rays

它部分及可能受到 X 射线照射的电路都用铅皮遮挡。分开一定距离的两层铅皮可以同时抑制前向散射 X 射线对测量的影响。实验中采用 NXS50D II 型移动式手术 X 射线机(钨靶),用 FJ-347A χ - γ 剂量仪测量照射率。

实验测量了 X 射线辐射产生的光电流密度与 X 射线照射率 ϵ_x 之间的关系,结果见图 6。

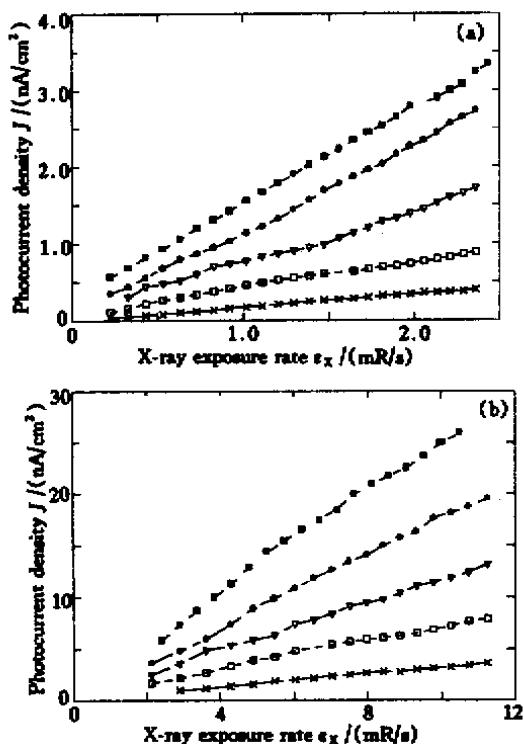


Fig.6 X-ray photocurrent densities versus X-ray exposure rates at different electric fields. (a) 44 kV; (b) 69 kV.
 ■ : $F = 12.5 \text{ V}/\mu\text{m}$; ● : $F = 10.0 \text{ V}/\mu\text{m}$; ▽ : $F = 7.5 \text{ V}/\mu\text{m}$; □ : $F = 5.0 \text{ V}/\mu\text{m}$; × : $F = 2.5 \text{ V}/\mu\text{m}$

在 44 kV 下,测量了 X 射线光电流密度与场强的关系,见图 7(a)。图中 X 射线光电流中已扣除了暗电流。测量暗电流时环境温度为 $(287 \pm 1) \text{ K}$,光电流测量数据多,时间长,测量时环境温度在 $(286 \pm$

2) K 范围内。

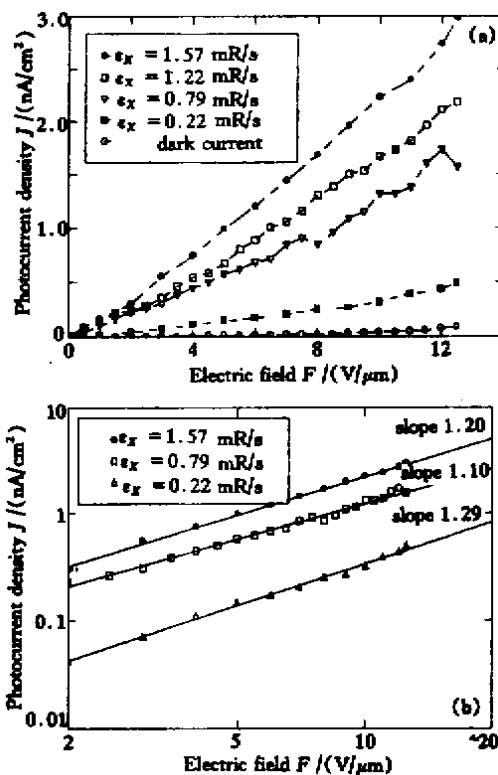


Fig.7 X-ray photocurrent densities versus electric field at different X-ray exposure rates (44 kV), and the dark current density versus electric field at 287 K. (a) In linear scale. (b) A part of data from (a) in log-log scale, and the best straight lines fitting for the data

4.2 分析

4.2.1 光电转换特性

图 6 中,恒定场强下光电流密度与 X 射线照射率呈线性关系,因此 a-Se 合金膜具有线性的光电转换特性,且线性范围不小于 $0.2 \text{ mR/s} \sim 12 \text{ mR/s}$,基本覆盖了医疗诊断成像的常用照射率范围^[4]。这表明,在恒定场强下,a-Se 合金膜 X 射线成像器件无非线性失真现象,该性能可使成像器件的电路简化。

4.2.2 场强对光电流密度的影响

由图 6 的测试结果可求得不同场强下的单位照射率光电流密度,如图 8 所示。X 射线光电流密度除与场强有关外,还与 kV 值有关。在 $10 \text{ V}/\mu\text{m}$ 场强下,44 kV 时光电流密度约为 $1.1 \text{ nA}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mRs}^{-1})$,而 69 kV 时为 $1.75 \text{ nA}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mRs}^{-1})$ 。

考虑到同一组数据实验条件基本不变,精度比较好,利用图 7(a)中数据研究灵敏度与场强的关系。将 0.22 mR/s 、 0.79 mR/s 、 1.57 mR/s 三条实验曲线用双对数坐标重作于图 7(b)中(舍弃场强低于 $2.0 \text{ V}/\mu\text{m}$ 的数据),可看出,各组数据分布在一些近

乎平行的直线上,数据拟合显示光电流密度

$$J \propto F^\gamma, \quad \gamma \approx 1.2. \quad (1)$$

图 8 的数据也给出与此相近的结果。关于 γ 下面还要讨论。

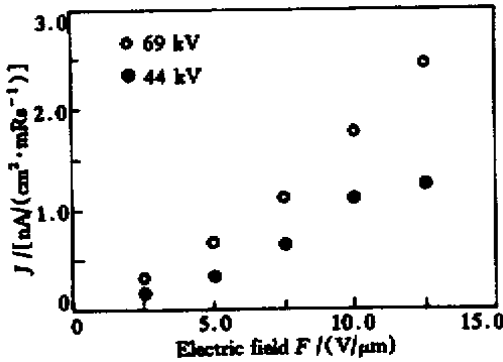


Fig. 8 X-ray photocurrent densities per unit exposure rate at different electric fields for 44 kV and 69 kV

4.2.3 暗电流

对于 a-Se 合金膜这样的高阻样品,除体暗电流外,一般还存在表面漏电流,我们的结果是二者之和,为了便于比较,以暗电流密度的形式示于图 7 (a)中。在干燥状态、12.5 V/μm 场强和 287 K 温度下,暗电流密度不超过 0.1 nA/cm²,可见 a-Se 合金膜暗电流很小,如果采取适当的措施,还有望进一步减小,这对改善图像对比度具有重要意义。

4.2.4 W_{\pm} 计算

这里 W_{\pm} 指用 X 射线在 a-Se 合金膜中激发一有效电子-空穴对所需的能量,一般用它来表征 a-Se 合金膜对 X 射线的灵敏度。有效电子-空穴对是指对光电流有贡献的电子-空穴对,因为部分电子-空穴对产生后有可能复合,电子或空穴也可能被陷阱捕获,这些载流子对光电流没有(或仅有部分)贡献。根据实验数据,可以计算 W_{\pm} 。对于计算 X 射线能量吸收, a-Se 合金膜中的 A_s 可以忽略不计,按 a-Se 计算。a-Se 与 X 射线作用,单位时间单位面积吸收的能量为^[3,16]

$$U = \int_0^{V_{peak}} P(E)S(E, V_{peak})EdE, \quad (2)$$

其中 $S(E, V_{peak})$ 表示 X 射线谱分布, E, V_{peak} 分别表示光子能量和管电压峰值。确定 X 射线谱分布很困难,我们采用 Tucker 等人的半经验公式^[17,18]。 $P(E)$ 表示 a-Se 对单色 X 射线能量吸收的百分数。在 X 射线能量较低时, a-Se 的 K 荧光重吸收对能量吸收有一定影响^[16,19],本文考虑了该因素。按 Boone 提供的吸收截面数据^[20], $P(E)$ 如图 9 所示。

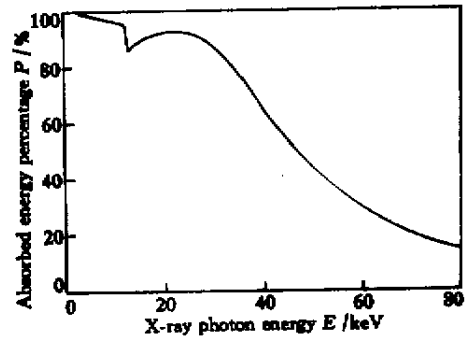


Fig. 9 Absorbed energy percent as a function of X-ray photon energy for 400 μm a-Se film

确定了 a-Se 合金膜吸收的能量后, $W_{\pm}(F)$ 可表示为^[4]

$$W_{\pm}(F) = Ue/J(F), \quad (3)$$

其中 e 为电子电量, $J(F)$ 采用图 8 中的数据,即单位照射率光电流密度,同时吸收的能量归一化为单位照射率吸收能量。统一单位后求出不同场强下的 W_{\pm} ,见图 10。从图中可以看出,69 kV 下的 W_{\pm} 小于 44 kV 下的 W_{\pm} ,这表明 W_{\pm} 随 X 光子能量增大而减小,该结论与 Mah^[21]及 Blevis^[22]的结果相一致。其原因是初级高速光电子能量不同时,在 a-Se 合金膜中电离产生的电荷(包括电子和空穴)密度分布不同,该差异将引起电子与空穴复合的几率有差别,从而使 W_{\pm} 不同^[21,22]。

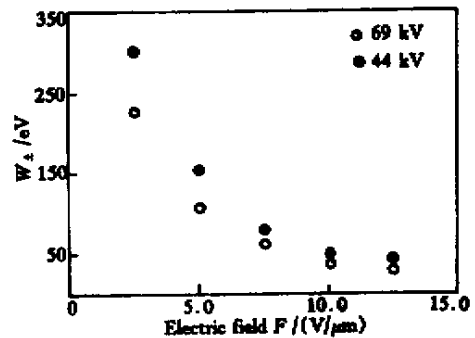


Fig. 10 W_{\pm} versus electric field at 44 kV and 69 kV

我们求得 W_{\pm} 在 10 V/μm 下的值约为 45 eV,与其他工作者的结果相当接近(Mah^[21]对此作了总结),尤其与 Blevis^[22]的最新结果相吻合。

由(1)式和(3)式可得出

$$W_{\pm}(F) \propto F^{-\gamma}, \quad \gamma \approx 1.2. \quad (4)$$

对于 69 kV 也有上述结论。由于实验存在一定的误差,根据图 7 和图 8, γ 可望在 1.2 ± 0.2 范围内变化。Rawlands^[21]给出 $\gamma \approx 0.8$, Mah^[21]给出 $\gamma \approx 0.6$, Blevis^[22]的结果为 $\gamma \approx 2/3$,与我们的结果有一定的差别,这表明我们给出的 W_{\pm} 对场强的依赖关系

稍强于其他作者的结果,场强增加会使 W_{\pm} 下降更快。 a -Se 合金膜的性能与材料及制备方法有很大关系,与他人的结果不同反映了 a -Se 合金膜性能的不同,以及材料和制备方法的差别。由于影响 a -Se 合金膜性能的因素较多,全面的比较和分析存在一定的困难。 W_{\pm} 与场强有较强关系表明,场强在电子空穴的复合、被陷阱捕获等过程中有重要作用,增加场强可降低复合和被陷阱捕获的几率。

根据上面的结果,对于 a -Se 合金膜 X 射线成像器件,可以用场强来调节灵敏度而不会引起信号的失真。调节的幅度受到两方面的限制:场强减弱可使灵敏度下降,但光电导惰性会增加,影响每秒分幅数和动态成像性能,场强增加可使灵敏度提高,但暗电流增大,图像对比度可能降低,很高的场强还有可能使 a -Se 合金膜被击穿。因此,电场调节灵敏度应综合考虑各种因素。若改进工艺,研制光电导惰性小(即载流子寿命长,陷阱少)的 a -Se 合金膜,以及尽量降低暗电流,对拓宽 a -Se 合金膜 X 射线成像器件的性能将是十分有益的。

结论 为了抑制 a -Se 的晶化,同时又能保持其优良的光电性能,根据前人的工作,我们对诸多合金元素作了考查,如 Te、Ge、Sb 等,最后选定 As 作为合金元素。实验得出如下结论:

1) 用含 0.45% As(制备合金时的砷单质含量)的 a -Se 合金蒸镀的合金膜在室温下是稳定的非晶态膜。实验成功制备了均匀稳定的 a -Se 合金厚膜。

2) 实验证明所制备的 a -Se 合金膜具有较长的载流子迁移长度和小的暗电流,可以用作探测 X 射线成像的光电导材料。

3) a -Se 合金膜对 X 射线有线性的光电转换特性,用 X 射线激发一电子-空穴对所需的能量 W_{\pm} 与 X 射线光子能量有关,并与场强有较强的关系。在 $10 \text{ V}/\mu\text{m}$ 场强下,对于医疗诊断常用 X 射线谱, W_{\pm} 约为 45 eV。提高场强可以改善 a -Se 合金膜对 X 射线的灵敏度。

稳定的 a -Se 合金膜研制成功将为进一步研制平板数字 X 光机创造条件。

参 考 文 献

[1] Schiebel U, Hillen W, Zaengel T. Image quality in selenium-based digital radiography. *Proc. SPIE*, 1986, **626**:176~184

[2] Rowlands J A, Hunter D M, Araj N. X-ray imaging using amorphous selenium: A photoinduced discharge readout method for digital mammography. *Med. Phys.*, 1991, **18**

(3):421~431

[3] Zhao Wei, Rowlands J R. X-ray imaging using amorphous selenium: Feasibility of a flat panel self-scanned detector for digital radiology. *Med. Phys.*, 1995, **22**(10):1595~1604

[4] Luhta R, Rowlands J A. Feasibility of a large area X-ray sensitive vidicon for medical fluoroscopy. *Med. Phys.*, 1997, **24**(5):609~631

[5] Legros A, Shi M K, Mouton A *et al.*. Effect of water impurity on the crystallization of vacuum evaporated Se. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(5):3048~3051

[6] Kim K S, Turnbull D. Crystallization of amorphous selenium films. II. Photo and impurity effects. *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**(8):3447~3452

[7] Abkowitz M, Markovics M J. The effect of Te alloying on the electronic gap of a -Se. *Soild State Commun.*, 1982, **44**(10):1431~1434

[8] Nang T T, Okuda M, Matsushita T *et al.*. Electrical and optical properties of $\text{Ge}_x\text{Se}_{1-x}$ amorphous thin films. *Japan. J. Appl. Phys.*, 1976, **15**(5):849~853

[9] 鲍海飞,叶水弛,兰慕杰等. Sb/Se 薄膜的晶化特性研究. *半导体学报*, 1998, **19**(5):337~340

[10] Oheda Hidetoshi. The modulated photocurrent of amorphous As_2Se_3 . *Japan. J. Appl. Phys.*, 1977, **16**(11):1941~1945

[11] 应根裕. 光电导物理及其应用. 北京:电子工业出版社, 1990. 164~165, 181~185, 149~153, 166

[12] 沈庆垓. 摄像管理论基础. 北京:科学出版社, 1984. 351~352

[13] Tabak M D, Hillegas W J. Preparation and transport properties of vacuum evaporated selenium films. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1971, **9**(1):387~390

[14] Oda O, Onozuka A, Tsuboya I. Effect of oxygen on electrophotographic properties of selenium. *J. Non-Cryst. Solids*, 1986, **83**:49~62

[15] Jansen Frank. Effects of oxygen and chlorine on the interfacial crystallization of amorphous selenium films. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1981, **18**(2):215~218

[16] Chan Heangping, Doi Kunio. Energy and angular dependence of X-ray absorption and its effect on radiographic response in screen-film systems. *Phys. Med. Biol.*, 1983, **28**(5):565~579

[17] Tucker D M, Barnes G T, Chakraborty D P. Semiempirical model for generating tungsten target X-ray spectra. *Med. Phys.*, 1991, **18**(2):211~218

[18] Bhat Madhava, Pattison John, Bibbo Giovanni *et al.*. Diagnostic X-ray spectra: A comparison of spectra generated by different computational methods with a measured spectrum. *Med. Phys.*, 1998, **25**(1):114~120

[19] Fahrig Rebecca, Rowlands J A, Yaffe Martin J. X-ray imaging with amorphous selenium: Detective quantum efficiency of photoconductive receptors for digital mammography. *Med. Phys.*, 1995, **22**(2):153~160

[20] Boone John M, Chavez Andres E. Comparison of X-ray cross sections for diagnostic and therapeutic medical physics. *Med. Phys.*, 1996, **23**(12):1997~2005

[21] Mah Dennis , Rowlands J A , Rawlinson J A. Sensitivity of amorphous selenium to X-rays from 40 kVp to 18 MV : Measurements and implications for portal imaging. *Med. Phys.* , 1998 , **25** (4) : 444 ~ 456

[22] Blevins I M , Hunt D C , Rowlands J A. Measurement of X-ray photogeneration in amorphous selenium. *J. Appl. Phys.* , 1999 , **85** (11) : 7958 ~ 7963

Preparation and Properties of Amorphous Selenium Alloy Film for X-Ray Imaging

Xu Xiangyan¹⁾ Niu Hanben¹⁾ Kuo Xiaomei¹⁾ Wang Yuncheng¹⁾ Guo Zhenqi²⁾

(1) , *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics , The Chinese Academy of Sciences , Xi'an 710068*
(2) , *Instrumental Analysis Research Center , Northwest University , Xi'an 710069*

(Received 30 March 2000 ; revised 23 October 2000)

Abstract : Amorphous selenium alloy (a-Se alloy) is currently of great interest as X-ray imaging receptor due to its high resolution. The a-Se alloy films are deposited by vacuum evaporation , the transport properties of hole and electron are measured by time of flight technique. Some factors , which affect the properties of a-Se alloy film , are discussed. X-ray photocurrent is measured by using 400 μ m thick film. The results show that linear photoelectric conversion existed in a-Se alloy film , and its sensitivity to X-ray irradiation depends on electric field. The calculation indicates that about 45 eV is needed for X-ray to release an electric-hole pair in a-Se alloy film at 10 V/ μ m electric field.

Key words : amorphous selenium alloy ; X-ray imaging ; time-of-flight ; X-ray photocurrent ; sensitivity