

## 用光电灵敏度法研究 a-Si:H 中的电荷放大效应<sup>1</sup>

海宇涵 海 灏\* 奚中和\*\* 张 蕾\*\*\*

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

\*(南开大学, 天津 300071)

\*\* (北京大学, 北京 100871)

\*\*\* (北京联合大学, 北京 100101)

**摘要** 测量了缝电极和梳形电极 a-Si:H 样品的光伏安特性和光电灵敏度, 提出了由光电灵敏度计算电荷放大增益的方法。由此法测出的 a-Si:H 的电荷放大增益, 在  $10^5$  V/cm 电场下, 高达  $4.3 \times 10^3$ 。本文从能态图讨论了 a-Si:H 中电荷放大效应的产生过程。由测量的增益值计算了电子迁移率与寿命之积。

**关键词** 非晶硅, 电荷放大效应, 光电灵敏度法

**中图分类号** TN304.8

### 1 序 言

自 A. Rose<sup>[1]</sup> 提出光电导增益的概念以来, 已发现一些材料有很高的光电导增益。例如 CdS 和 CdSe 的光电导增益高达  $10^4$ 。关于 a-Si:H 的光电导增益, 已有一些报道。1973 年 Loveland<sup>[2]</sup> 测出光电导增益接近 1。Zanzucchi<sup>[3]</sup> 报道了缝电极样品在  $4 \times 10^3$  V/cm 电场下增益为 10, 而用高正偏压肖特基位垒结构能获得  $10^3$  增益。他们测量光电导增益的方法, 是以 Rose 光电导公式为依据的。这种方法比较麻烦, 且有局限性。Williams<sup>[4]</sup> 采用 p-i-n 结构的 a-Si:H 太阳能电池, 测量正偏压下的光电流和反偏压下的饱和光电流, 二者之比即为光电导增益。他得到的最大增益为  $10^2$ 。这种方法比较简便。但由于结构的特殊, 不具普遍性。它又是以反偏压下光生载流子全部收集为基础的; 这一点很难实现。

我们采用测量光电灵敏度的方法来研究 a-Si:H 中的电荷放大增益。电荷放大增益的概念比光电导增益涵盖宽; 它包括线性范围的光电导增益, 又复盖非线性的范围。我们的这种测量方法具有普遍性。它不单能测量光电导增益, 亦能测量其他电荷放大增益。如雪崩倍增、隧道击穿等。这种方法的思考来源于我们对 a-Si:H 光电灵敏度的测量<sup>[5]</sup> 和对场增强光电发射体的研究<sup>[6-11]</sup>。我们测量的光电灵敏度高达  $2 \times 10^6 \mu\text{A}/\text{lm}$ , 而假定最大光电量子效率为 1 计算的光电灵敏度预期值不超过  $2 \times 10^3 \mu\text{A}/\text{lm}$ 。表明光生电荷有  $10^3$  倍的增加。不论样品结构如何, 这都是电荷放大增益。于是形成这样一种测量方法, 电荷放大增益等于测量的光电灵敏度与假定最大量子效率为 1 计算的光电灵敏度之比。由于光电灵敏度的测量很简单, 这种方法自然也较简便。

本文主要讨论这种测量方法, 采用的样品是常用的缝电极结构。它的增益属于光电导增益, 它与电场成正比。但这种结构难于获得很高的电场, 因而不能获得很大的光电导增益。减小缝距能提高电场, 却又大大减小了光电流, 不便于光电灵敏度的测量。于是我们采用多组缝电极, 即梳形电极结构。它容易得到  $10^5$  V/cm 的高电场。关于非线性范围的工作将另文发表。

本文还将讨论 a-Si:H 中光电导增益的产生机理。并用测出的增益值计算电子迁移率与寿命之积, 这也是测量这个乘积的简便方法。

<sup>1</sup> 1997-04-29 收到, 1999-01-18 定稿  
国家自然科学基金资助项目 (批准号 69676016)

## 2 样品制备和实验方法

采用两种电极。一种是常用的缝电极结构。它是在 a-Si:H 膜上蒸发两个铝条, 缝宽 0.44mm。a-Si:H 膜用辉光放电法淀积, 厚  $1\mu\text{m}$ , 淀积温度  $320^\circ\text{C}$ 。a-Si:H 的淀积参量见文献 [12]。另一种是梳形电极结构, 电极像两把梳子交叉一起。实际上是若干对平行铝条并联, 因此所加电压是正负相间的。铝条宽与间距相等, 为  $20\mu\text{m}$ 。其他结构与缝电极样品相同。

光伏安特性的测量是本文的重点。电场  $E$  的范围, 对缝电极结构是  $3 \times 10^2$ – $4 \times 10^3\text{V/cm}$ , 对梳形电极结构是  $10^4$ – $10^5\text{V/cm}$ 。虽然 Al 与 a-Si:H 界面有肖特基位垒, 但与所加电压相比是微不足道的, 仍可看作欧姆接触。光源用 12V, 30W 钨丝灯, 经中国国家计量局标定, 在 a-Si:H 面上的照度  $F$  为 3.2lx。由所测的光电流密度  $i_p(\mu\text{A/cm}^2)$ , 可算出 a-Si:H 的光电灵敏度  $S_p$ :

$$S_p(E) = 10^4 i_p(E)/F \quad (\mu\text{A/lm}). \quad (1)$$

利用光电流与波长  $\lambda$  的关系, 计算光电灵敏度  $S_p$  的方法 [13] 已为人熟知, 即

$$S_p = \sigma_m \int_0^\infty R(\lambda)W(\lambda)d\lambda / \left\{ 680 \int_0^\infty y(\lambda)W(\lambda)d\lambda \right\} \quad (\mu\text{A/lm}), \quad (2)$$

式中  $W(\lambda)$  和  $y(\lambda)$  分别是标准光源和人眼的相对光谱响应, 是已知的。  $R(\lambda)$  是 a-Si:H 材料的相对光谱响应, 是可测的。  $\sigma_m$  是辐射灵敏度  $\sigma(\lambda)$  的最大值。  $\sigma(\lambda)$  与量子效率  $Y(\lambda)$  有如下关系:

$$\sigma(\lambda) = 10^6 Y(\lambda)\lambda/12395 \quad (\mu\text{A/W}), \quad (3)$$

式中波长  $\lambda$  的单位是  $\text{\AA}$ 。我们测量 a-Si:H 的相对光谱响应  $R(\lambda)$ , 并假定最大量子效率  $Y_m = 1$ , 即可由 (3) 式和 (2) 式算出 a-Si:H 光电灵敏度的预期值  $S_{pe}$ , 则光电导增益  $G$  为

$$G(E) = S_p(E)/S_{pe}. \quad (4)$$

## 3 实验结果

图 1 是测量的两种电极样品的伏安特性。曲线  $a$  是缝电极样品的光伏安特性, 它是线性的, 即  $i_p \propto E$ 。缝电极样品的暗伏安特性示于图 1 曲线  $c$ , 它平行于曲线  $a$ 。这就表明在高电压下, Al-a-Si:H 接触近似欧姆接触。曲线  $b$  是梳形电极样品的光伏安特性, 随电场的增加, 光电流密度上升较快,  $i_p \propto E^{1.2}$ 。略为超线性的原因可能是铝条毛边的作用, 使实际电场比平均电场略大。由这种结构的暗伏安特性 (图 1 曲线  $d$ ) 也接近平行于它的光伏安曲线  $b$ , 可以说明这种推测的正确。

图 2 是由图 1 中的光伏安特性和 (1) 式得到的两种电极样品的光电灵敏度  $S_p$  与电场  $E$  的关系。曲线  $a$  是缝电极样品的  $S_p$ - $E$  曲线。在  $4 \times 10^3\text{V/cm}$  电场下, 光电灵敏度为  $5.3 \times 10^4 \mu\text{A/lm}$ 。与图 1 曲线  $a$  的光伏安特性类似,  $S_p \propto E$ 。曲线  $b$  是梳形电极样品的  $S_p$ - $E$  曲线, 同样  $S_p \propto E^{1.2}$ 。在  $10^5\text{V/cm}$  电场下,  $S_p$  高达  $7.8 \times 10^6 \mu\text{A/lm}$ 。

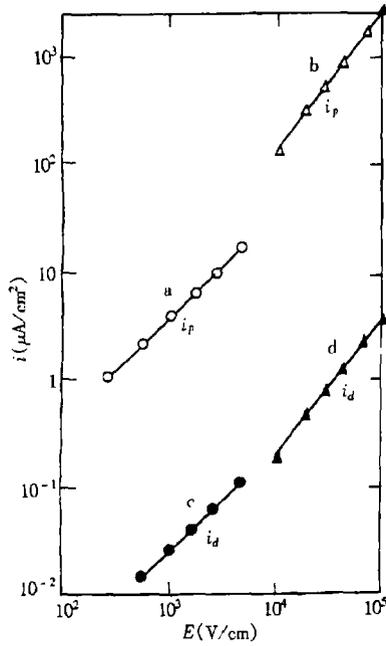


图 1 缝电极和梳形电极样品的伏安特性: a 和 c, 缝电极样品; b 和 d, 梳形电极样品

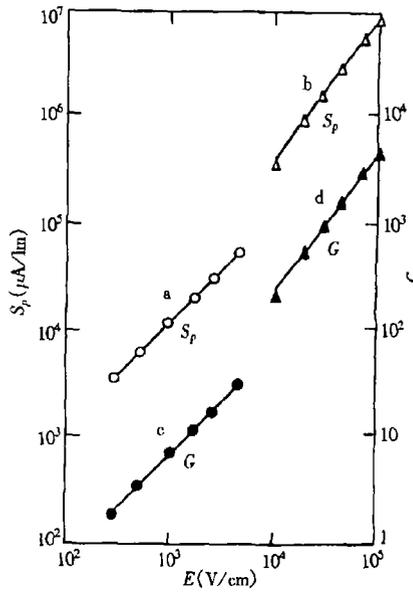


图 2 缝电极和梳形电极样品的光电灵敏度和电荷放大增益特性: a 和 c, 缝电极样品; b 和 d, 梳形电极样品

为了计算光电导增益, 我们测量了缝电极样品在  $E = 4 \times 10^3 \text{V/cm}$  时的相对光谱响应  $R(\lambda)$ , 示于图 3。它复盖整个可见光区, 长波限为  $8200\text{\AA}$ , 峰值波长为  $5800\text{\AA}$ 。我们也测了梳形电极样品的相对光谱响应, 与缝电极的响应接近。

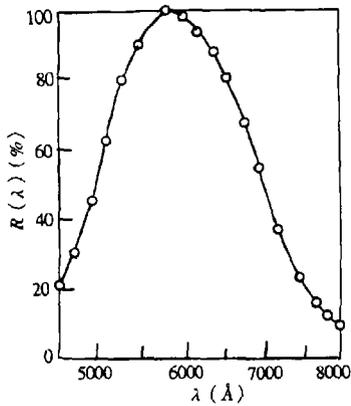


图 3 缝电极样品的相对光谱响应

在光谱响应  $R(\lambda)$  的峰值波长 ( $5800\text{\AA}$ ), 假定最大量子效率  $Y_m = 1$ 。由 (3) 式可算出  $\sigma_m = 4.7 \times 10^5 \mu\text{A/W}$ 。再由  $R(\lambda)$  和 (2) 式可算出光电灵敏度预期值  $S_{pe} = 1.8 \times 10^3 \mu\text{A/lm}$ 。由图 2 中的光电灵敏度  $S_p$  的测量值, 和用 (4) 式计算, 可获得两种电极样品的光电导增益  $G(E)$ 。它亦示于图 2 中。图 2 曲线 c 是缝电极样品的  $G(E)$ , 有  $G(E) \propto E$ 。在  $4.0 \times 10^3 \text{V/cm}$  电场下,  $G = 2.9 \times 10$ 。图 2 曲线 d 是梳形电极样品的  $G(E)$ , 有  $G(E) \propto E^{1.2}$ , 在  $1.0 \times 10^5 \text{V/cm}$  电场下,  $G = 4.3 \times 10^3$ 。

### 4 讨 论

现在重新考虑 a-Si:H 膜的实际量子效率  $Y(\lambda, E)$ , 我们曾假定  $Y_m = 1$  得到光电灵敏度的

预期值  $S_{pe}$ , 它比实测光电灵敏度  $S_p$  低得多. 在  $1.0 \times 10^5 \text{ V/cm}$  电场下, 后者是前者的  $4.3 \times 10^3$  倍. 因此实际量子效率在同样电场下应为  $4.3 \times 10^3$ . 这就是说 1 个光子在 a-Si:H 中可以产生并达到阳极的电子数为  $4.3 \times 10^3$  个. 光电激发率当然不超过 1. 电荷的增加表明存在电荷放大效应. 由于两种样品的  $i(E)$  和  $G(E)$  曲线都接近线性, 而按 Rose 公式,  $i_p(e)$  和  $G(E)$  曲线接近线性是光电导增益的标志, 所以这种电荷放大效应是“光电导增益”的效应.

有大的光电导增益的材料具备以下特点: (1) 大的光吸收率和最大光电激发率接近 1; (2) 光生电子的迁移率  $\mu_e$  远大于光生空穴的迁移率  $\mu_p$  (或反之); (3) 存在合适的空穴陷阱 (或电子陷阱); (4) 光生电子的寿命  $\tau_e$  (或光生空穴寿命  $\tau_p$ ) 远大于渡越时间  $T$ , 即可存在很高的电场. a-Si:H 的带隙宽 1.7eV, 是很好的光敏材料. 它的电子迁移率比空穴迁移率约大 3 个数量级<sup>[14]</sup>. 在价带顶上面 0.4 和 0.5–0.6eV 存在空穴陷阱<sup>[15]</sup>. 它的光电子寿命很长, 约为  $2 \times 10^{-1} - 2 \times 10^{-5} \text{ s}$ <sup>[16]</sup>. a-Si:H 有很高的电阻率, 可以建立超过  $10^5 \text{ V/cm}$  的高电场. 这些条件决定了 a-Si:H 膜有很大的光电导增益.

图 4 是 a-Si:H 中产生光电导增益的原理图. a-Si:H 的带隙  $\epsilon_c - \epsilon_v = 1.7 \text{ eV}$ . 在价带顶上面 0.4 和 0.5–0.6eV 的两处空穴陷阱, 我们合并以  $\epsilon_y$  表示. 两个铝电极间加有很大的偏压. 图 4 中, 过程①是 1 个光子激发产生 1 个电子-空穴对. 过程②是光生电子在高电场中很快漂移到阳极. 过程③表示, 由于光生空穴迁移率低, 移动缓慢, 被空穴陷阱  $\epsilon_y$  俘获, 形成正空间电荷中心. 过程④表示此空间电荷中心引导 1 个阴极中的电子进入 a-Si:H 层, 并很快漂移到阳极. 过程⑤表示, 过程④结束后这个引导过程不断进行, 直到  $\epsilon_y$  上的被俘空穴被复合为止. 如果这个正空间电荷存在的时间很长, 而电子的渡越时间又很短, 从阴极引导的电子是很多的.

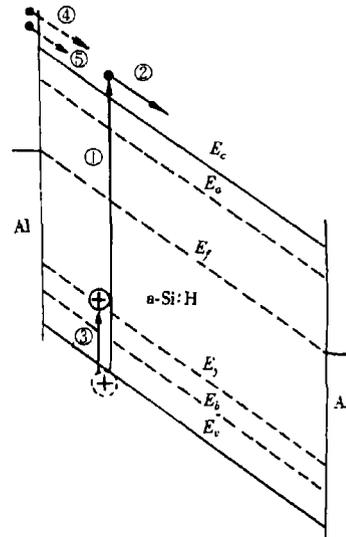


图 4 a-Si:H 中产生电荷放大效应的原理图

由于光生电子只能与空穴陷阱中的空穴复合<sup>[17]</sup>, 所以这个被俘空穴存在的时间就是电子寿命  $\tau_e$ . 因此光电导增益  $G$  为

$$G = \tau_e / T = \mu_e \tau_e E / l, \quad (5)$$

式中  $l$  为缝电极间距. 由 (5) 式可知  $G \propto E$ . 由图 2 中  $G(E)$  的数据, 可算出  $\mu_e \tau_e$  值. 对于缝电极样品,  $\mu_e \tau_e$  值为  $3.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}$ . 对于梳形电极样品,  $\mu_e \tau_e = 7.3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}$ . 此值比缝电极样品小, 原因还不太清楚. 假定电子迁移率  $\mu_e$  为  $5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , 则  $\tau_e$  为  $1.5 \times 10^{-5} - 6.4 \times 10^{-5} \text{ s}$ . 这个时间是很长的, 是它有大光电导增益的重要原因.

## 5 结 论

测量量子缝电极和梳形电极 a-Si:H 样品的光伏安特性, 前者  $i_p \propto E$ , 后者  $i_p \propto E^{1.2}$ . 由样品照度 3.2lx, 得到它们的光电灵敏度  $S_p(E)$ . 缝电极样品在  $4 \times 10^3 \text{ V/cm}$  电场下, 光电灵敏度为  $5.3 \times 10^4 \mu \text{ A/lm}$ . 梳形电极样品在  $1 \times 10^5 \text{ V/cm}$  电场下, 光电灵敏度为  $7.8 \times 10^6 \mu \text{ A/lm}$ .

由测量的 a-Si:H 的光谱响应和假定最大量子效率为 1, 便可算出光电灵敏度预期值  $S_{pe}$ 。它约为  $1.8 \times 10^3 \mu\text{A}/\text{lm}$ 。光电导增益  $G = S_p(E)/S_{pe}$ 。对于缝电极样品,  $G(E) \propto E$ , 在  $4 \times 10^3 \text{V}/\text{cm}$  电场下,  $G = 29$ 。对于梳形电极样品,  $G(E) \propto E^{1.2}$ , 在  $10^5 \text{V}/\text{cm}$  电场下,  $G = 4.3 \times 10^3$ 。这就是说, 电荷放大了  $4.3 \times 10^3$  倍。

本文还讨论了 a-Si:H 中电荷放大的过程。由  $G(E)$  的实验数据, 算出缝电极样品的  $\mu_e \tau_e = 3.2 \times 10^{-4} \text{cm}^2 \text{V}^{-1}$ , 和梳形电极样品的  $\mu_e \tau_e = 7.3 \times 10^{-5} \text{cm}^2 \text{V}^{-1}$ 。估计的光电子寿命  $\tau_e = 1.5 \times 10^{-5} - 6.4 \times 10^{-5} \text{s}$ 。

本文采用的光电灵敏度法, 不仅适用于光电导增益, 也适用于其它电荷放大效应的研究。当然也不仅适用于 a-Si:H 材料, 对其他光敏材料的研究亦很有用。

### 参 考 文 献

- [1] Rose A. Concepts in Photoconductivity and Allied Problems. New York: John Wiley Sons, Inc., 1963, 77.
- [2] Loveland R, *et al.* Photoconductivity and absorption in a-Si:H. J.Non-cryst. Solids, 1973, 13(1): 55-68.
- [3] Zanzucchi P, Wronski C, Calson D. Optical and photocoductive properties of discharge-produced amorphous silicon. J.Appl. phys., 1977, 48(12): 5227-5236.
- [4] Williams R, Crandall R. Carrier generation, recombination and transport in a-Si:H solar cells. RCA Rev., 1979, 40(4): 371-389.
- [5] 韩泾涛, 海宇涵, 周忠毅. 高灵敏度 a-Si:H 膜的光电特性. 第 3 届全国非晶态材料和物理学术讨论会论文集, 黄山: 1982, 142-145.
- [6] 海宇涵. 场增强 a-Si:H 光阴极的理论和初步实验研究. 中国真空电子学会第 8 届年会论文集, 咸阳: 1990, 56-57.
- [7] 海宇涵, 陈远星, 臧宝翠. a-Si:H 光电发射的漂移场模型. 电子科学学刊, 1991, 13(1): 57-64.
- [8] 海宇涵, 陈远星, 臧宝翠. 场增强 a-Si:H 光电发射体结构设计和实验研究. 第 6 届全国非晶态材料和物理学术讨论会论文集, 桂林: 1991, 115-117.
- [9] 海宇涵, 陈远星. 场增强 a-Si:H 光电发射体的实验研究. 电子学报, 1992, 20(2): 26-30.
- [10] 海宇涵. 漂移型非晶硅光电阴极. 中国专利, ZL 90109222.3, 1990.
- [11] Hai Yuhan, Li Xingshi. Studies on a Field-enhanced a-Si:H photoemitter. J. Phys. D, 1995, 28(3): 576-580.
- [12] 海宇涵, 周忠毅, 臧宝翠. 高灵敏度非晶硅靶摄像管的研制. 电子科学学刊, 1988, 10(6): 528-535.
- [13] Engstrom R. Calculation of radiation sensitivity from luminous sensitivity. RCA Rev., 1955, 16(2): 116-121.
- [14] Lecomber P, Spear W, Allan D. Transport studies in doped amorphous silicon. J.Non-cryst. Solids, 1979, 32(1-3): 1-16.
- [15] Smole F, Furlan J. Effects of abrupt and graded a-Si: C: H/a-Si: H interface on internal properties and external characteristics of p-i-n a-Si:H solar cells. J. Appl, Phys., 1992, 72(12): 5964-5969.
- [16] Fritzsche H. Si-H alloy in amorphous semiconductor. Solid State Tech., 1978, 21(1): 55-60.
- [17] Spear W, Loveland R, Al-Sharbaty A. The temperature dependence of photoconductivity in a-Si. J. Non-cryst. Solids, 1974, 15(3): 410-422.

INVESTIGATION OF CHARGE INTENSIFICATION EFFECT IN  
a-Si:H BY MEANS OF PHOTOELECTRIC SENSITIVITY METHOD

Hai Yuhan    Hai Hao\*    Xi Zhonghe\*\*    Zhang Qiang\*\*\*

*(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)*

*\*(Nankai University, Tianjin 300071)*

*\*\* (Peking University, Beijing 100871)*

*\*\*\* (Beijing United University, Beijing 100101)*

**Abstract** The photocurrent-voltage characteristics and photoelectric sensitivity of a-Si:H samples with slit and comb electrodes are measured. A method for calculating the charge intensifying gain from the photoelectric sensitivity is proposed. The obtained charge intensifying gain of a-Si:H under an electric field of  $10^5$  V/cm with this method is as high as  $4.3 \times 10^3$ . The generation process of the charge intensification effect in a-Si:H is discussed on the basis of the energy level diagram. And the product of electron's mobility and its lifetime is calculated from the measured values of the gains.

**Key words** a-Si:H, Semiconductor, Charge intensification effect, Photoelectric sensitivity method

- 海宇涵: 男, 1939 年生, 美国 IEEE 高级会员, AAAS 特邀会员, Marquis Who's Who 世界名人、世界科学名人, 从事光电子学和非晶态物理研究.
- 海 灏: 男, 1973 年生, 南开大学学生.
- 奚中和: 男, 1938 年, 教授, 从事非晶态物理研究.
- 张 藩: 男, 1947 年生, 副教授, 从事半导体物理研究.