

# 用恒定光电导分析非晶硅薄膜的次带吸收

韩大星 赵世富

(中国科学院物理研究所)

表 1 列出测量薄膜样品吸收系数的几种方法。对于  $1\mu\text{m}$  左右的非晶硅, 当吸收系数  $\alpha < 10^{-2}\text{cm}^{-1}$  时, 透射法因受到测量精度的限制不再适用。由于非晶硅是良好的光电导体, 用光电导分析法延长其低吸收区, 是一种简便方法。

表 1

方 法	灵敏度 (可测最小 $\alpha d$ )	特 点
透射法 <sup>[1]</sup>	$\sim 10^{-2}$	方法简便、仪器通用
低温量热法 <sup>[2]</sup>	$\sim 10^{-4}$	需要极低温条件
热偏光谱法 <sup>[3]</sup>	$\sim 10^{-8}$	灵敏度高、调准较难
光声光谱法 <sup>[4]</sup>	$\sim 10^{-4}$	需要专用光声光谱仪
光电导分析 <sup>[5]</sup>	$\sim 10^{-4}$	与透射法结合使用, 方法简便

## 一、用恒定光电导法测低吸收区吸收系数的原理

当光电导体吸收了一定能量的光子后, 产生非平衡的电子-空穴对, 这种光生载流子提供给回路的电流就是光电流。所以, 当吸收的光子数与光电流成正比时, 就可以通过光电导测量得到材料的吸收系数。具有欧姆接触的光电导率可写为

$$\sigma_{\text{ph}} = e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p), \quad (1)$$

其中  $\Delta n$ ,  $\Delta p$  分别为光生电子, 空穴浓度,  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别为电子和空穴的扩展态迁移率。对于本征 a-Si:H 样品,  $\Delta n \gg \Delta p$ ,  $\mu_n \gg \mu_p$ , 故(1)式简化为

$$\sigma_{\text{ph}} = e \Delta n \mu_n = e f \mu_n \tau_n, \quad (2)$$

其中  $\Delta n = f \tau_n$ ,  $\tau_n$  为电子复合寿命,  $f$  为体产生率, 可写为

$$f = \eta F(1 - R)(1 - e^{-\alpha d})/d, \quad (3)$$

其中  $\eta$  为量子效率,  $F$  为入射光通量,  $R$  为表面反射率,  $\alpha$  为吸收系数,  $d$  为样品厚度。在低吸收区,  $\alpha d \ll 1$ , (3)式简化为

$$f = \eta \alpha F(1 - R). \quad (4)$$

将(4)式代入(2)式, 可得

$$\sigma_{\text{ph}} = \eta \alpha e F(1 - R) \mu_n \tau_n. \quad (5)$$

用热偏光谱<sup>[3]</sup>法和光声光谱<sup>[4]</sup>法测量 a-Si:H 低吸收区的吸收系数, 并将其与用光电导法得到的结果进行

比较, 得出在我们测量的范围内的量子效率  $\eta \approx 1$ 。将(5)式中的常数项移到左边, 可得归一化的光电导率为

$$\sigma_{\text{ph}}/eF(1 - R) = \alpha \mu_n \tau_n. \quad (6)$$

Cody 等测得特征 a-Si:H 扩展态电子迁移率  $\mu_n = 10\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。剩下的问题只是电子复合寿命  $\tau_n$ 。对于非晶硅, 由于存在连续分布的带隙态,  $\tau_n$  不是常数, 表现在光电导的光强依赖关系  $\sigma_{\text{ph}} \propto F^\gamma$  中的  $\gamma \approx 1$ , 而且随光强及温度变化。有的作者<sup>[6]</sup>以  $1/eF^\gamma$  来归一化他们的光电导数据, 这只在  $\gamma$  为常数时适用。实际样品的  $\gamma$  常常是光强和温度的函数, 其值可能在 0.5—1.5 范围内变化。我们采用的恒定光电导法可从实验上保证测量范围内  $\tau_n$  值不变, 从而由  $\sigma_{\text{ph}}$  数据直接得到  $\alpha$  的信息。

根据稳态光电导理论<sup>[7]</sup>, 电子寿命  $\tau_n$  由热平衡费米能级  $E_{\text{F0}}$  与准费米能级  $E_{\text{in}}$  之间的复合中心决定,

$$\tau_n = 1 / \int_{E_{\text{F0}}}^{E_{\text{in}}} b_n g(E) dE, \quad (7)$$

其中  $b_n$  为复合中心对电子的俘获率,  $g(E)$  为带隙态密度, 准费米能级由下式决定:

$$E_{\text{in}} = E_{\text{F0}} + kT \ln(\Delta n/n_0). \quad (8)$$

由(2)式可知, 在光电导谱测试过程中, 保持光电导  $\sigma_{\text{ph}}$  值为常数, 就意味着  $\mu_n \tau_n$  为常数, (6)式可重写为

$$\sigma_{\text{ph}}/eF(1 - R) \mu_n \tau_n = \alpha \quad \text{当 } \alpha d \gg 1 \text{ 时}, \quad (9)$$

其中  $\mu_n \tau_n$  值可由  $\alpha d \gg 1$  时的光电导值得出。由(2)和(3)式, 当  $\alpha d \gg 1$  时, 有

$$\sigma_{\text{ph}} = eF(1 - R) \mu_n \tau_n / d. \quad (10)$$

## 二、实验和结果

实验中所用样品为高频及直流辉光放电法制备的本征 a-Si:H。膜厚  $0.6-1.0\mu\text{m}$ 。衬底为 7059 玻璃和 95 玻璃。采用共面型欧姆接触电极, 测试场强  $\sim 5 \times 10^3 \text{V/cm}$ 。对每块样品做透射谱及光电导谱两种测量。在光电导谱测量中, 对应不同的光子能量, 测  $\sigma_{\text{ph}}-F$  关系, 用中性滤光片改变入射光通量  $F$ , 使光电导  $\sigma_{\text{ph}}$  尽量维持在同一水平附近。图 1 示出室温下测量的  $\sigma_{\text{ph}}(h\nu)-F$  曲线组和归一化后的光电导谱。

用透射法得出的吸收系数与光电导谱的数据在  $1.6\text{eV} < h\nu < 1.8\text{eV}$  范围内有一段重合。我们的样品的光吸收边与光电导率的 Urbach 边在测试误差范围

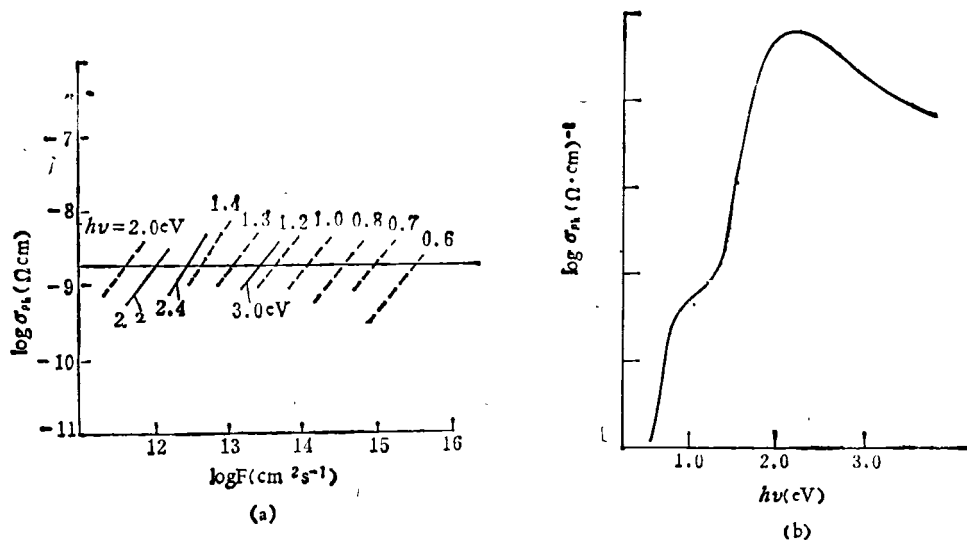


图1 (a) 不同光子能量的光电导与光强关系曲线;  
(b) 归一化后的光电导谱(纵坐标为任意刻度)

内重合得很好。  $h\nu < 1.4 eV$  的次带吸收数据与样品制备条件, 样品受光、受热历史等有关。良好退火态的样品的次带吸收  $\alpha \sim 1 cm^{-1}$ , 曝光态样品的次带吸收增加 5—10 倍。图 2 示出由透射法和恒定光电导法结合得出的 a-Si:H 样品退火态及曝光态吸收谱。由次带吸收数据可推算样品的带隙态密度。由带隙态引起的附加吸收可写为

$$\Delta\alpha = \alpha(E) - \alpha_0 \exp(\Delta E/E_0), \quad (11)$$

其中第二项为没有带隙态时的吸收谱,  $\alpha_0$  和  $E_0$  都可由实验定出,  $E_0$  通常称为 Urbach 参数, 表示指数吸收部分的斜率。带隙态密度与附加吸收之间的关系可

写为

$$N_t = A \int \Delta\alpha dE. \quad (12)$$

若认为 a-Si:H 的带隙态为悬挂键, 则可以定出  $A = 7.9 \times 10^{13} cm^{-2} eV^{-1}$ , 从而可由图 2 中次带吸收的面积  $\int \Delta\alpha dE$  推算出隙态密度  $N_t$ 。我们所测的本征 a-Si:H 样品退火态带隙态密度  $\sim 10^{16} cm^{-3}$ , 曝光态  $\sim 10^{17} cm^{-3}$ 。

此法所得结果与其它方法可以相比<sup>[2,3]</sup>。应指出, 当入射光子能量小于迁移率禁带宽度时, 由于孪生复合起重要作用, 量子效率  $\eta$  对场强有很强的依赖关系。按 Onsager 理论<sup>[8]</sup>, 光子能量越小,  $\eta$  将越低。但光声光谱及热偏光谱测量<sup>[2,3]</sup>都表明, 在 0.8—1.5 eV 范围内  $\eta \sim 1$ 。原因不清楚。我们处理数据时, 令  $\eta = 1$ 。假使  $\eta < 1$  时, 得到的  $\alpha$  只能更高, 相应的带隙态密度更大。

### 参 考 文 献

- [1] E. C. Freeman, W. Paul, *Phys. Rev. B*, **20**(1979), 716.
- [2] 赵世富, 物理, **13-1**(1984), 33.
- [3] W. B. Jackson, N. M. Amer, *Phys. Rev. B*, **25**(1982), 5559.
- [4] S. Yamasaki, N. Hata et al., *J. Phys. Colloque*, **42**(1981), C4-297.
- [5] Daxing Han and H. Fritzsche, *J. Non-Cryst. Solids*, **59/60**(1983), 397.
- [6] P. D. Persans, *Phil. Mag.*, **46**(1982), 435.
- [7] Han Daxing, Gu Benyuan, Li Chenxi and Zhao Shifu, *Theoretical Phys. Comm.* (to be published)
- [8] L. Onsager, *Phys. Rev.*, **54**(1938), 554.

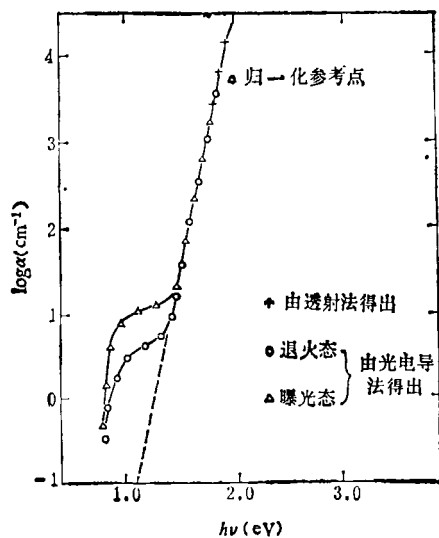


图2 由透射法和光电导分析得到的 a-Si:H 吸收谱