

文献[4]。由图2知,当 $\nu < 1.2025$ 时,零序衍射光强的包络线与声波的包络相同。如用声音讯号去调制声驻波,则光波中亦带有声音讯号。图1中用声音讯号去调制电讯号。光电倍增管采用RC负载,电容C滤去高频光分量即可获得声音讯号,用此声音讯号驱动扬声器。图1所示装置即是一种激光电话实验装置。它的特点是调制与解调都很方便。

由式(1),(5)知,衍射光强与 $\nu$ 的关系是贝

塞尔函数平方关系,而 $\nu$ 在光波波长一定声光介质一定的情况下只与声功率有关,而与介质中的声波形状无关。由图2当已知衍射光强波形后可用作图法绘出介质中的声波形。

### 参 考 文 献

- [1] B. D. Cook, E. A. Hiedemann, *J. Acoust. Soc. Am.*, **33**-7 (1961), 945-948.
- [2] L. E. Hargrove, *IEEE SU-14-1* (1967), 33-36.
- [3] 于连生, *激光*, **6**-6(1979),
- [4] 于连生, *激光*, **7**-8,(1980).

## 硫系 $\text{Ge}_{15}\text{Te}_{81}\text{S}_2\text{Sb}_2$ 非晶态半导体薄膜的电导特性

陈宗才 钟伯强

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

1980年10月9日收到

近年来,我们用硫系非晶态半导体 $\text{Ge}_{15}\text{Te}_{81}\text{S}_2\text{Sb}_2$ 材料研制的 $8 \times 8$ 位主读存储器,已在本所自动控制中试用,效果良好。为探讨电性机理,测量了该材料的交、直流电导特性。

### 一、样品制备

先将光谱纯的Ge, Te, S, Sb各元素按组份配制成靶,在真空下再将靶料溅射于已制好铂电极的基片上,光刻成直径为 $20 \mu\text{m}$ 、厚 $1.5 \mu\text{m}$ 的薄膜,其上再溅射并光刻上铂电极。

### 二、实验结果及分析

$\text{Ge}_{15}\text{Te}_{81}\text{S}_2\text{Sb}_2$ 薄膜的电导是温度和外电场频率的函数。总电导 $\sigma(\omega, T)$ 可表示为直流电导 $\sigma_{dc}(T)$ 与交流电导 $\sigma_{ac}(\omega, T)$ 之和的形式,即 $\sigma(\omega, T) = \sigma_{dc}(T) + \sigma_{ac}(\omega, T)$ 。在不同温度范围,二者对总电导贡献的大小亦不同。

#### 1. 直流电导 $\sigma_{dc}(T)$

在 $201 \sim 400\text{K}$ 范围,温度从高到低,在 $\ln \sigma_{dc}$ 与 $1/T$ 的关系中观察到两个线性区,如图

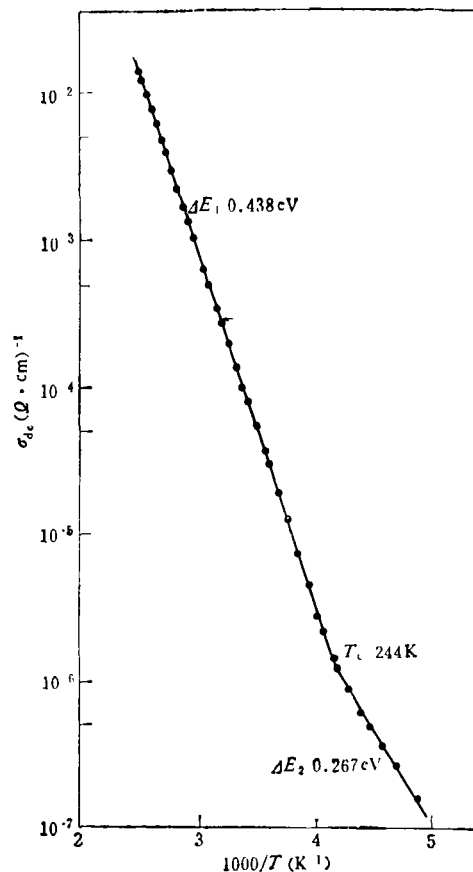


图1 直流电导与温度的关系

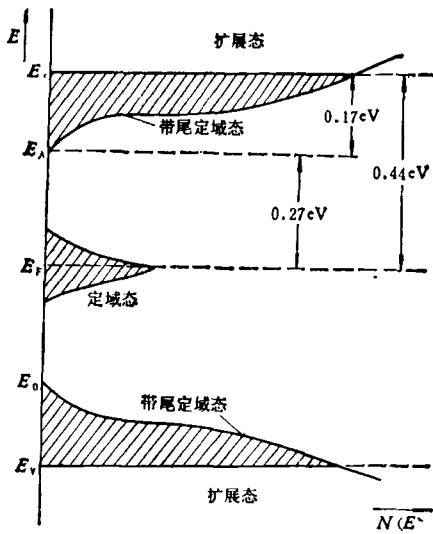


图2 能态密度图

1所示。这一特性可用下式描述:

$$\sigma_{dc}(T) = \sigma_{01}e^{-\Delta E_1/kT} + \sigma_{02}e^{-\Delta E_2/kT} \quad (1)$$

式中  $k$  是玻耳兹曼常数,  $T$  是绝对温度。两个线性区反映了载流子在两种区域的运输。  $T > 244\text{K}$  [(1)式中第一项]的高温区表明,载流子被热激发到迁移率边以上的扩展态运输(如图2)。此时载流子有较大的迁移率,故  $\sigma_{01}$  较大。对于非晶态半导体,  $\sigma_{01}$  与扩展态迁移率  $\mu_c$  的关系可表为<sup>[1]</sup>

$$\sigma_{01} = eN(E_c)kT\mu_c e^{\gamma/k} \quad (2)$$

式中  $N(E_c)$  是迁移率边处之能态密度,  $\gamma$  是迁移率隙随温度的变化率。若取

$$\gamma = 3 \times 10^{-4} \text{eV/K},$$

$N(E_c)kT$  为  $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ,  $\sigma_{01}$  为  $0.15 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ , 代入(2)得  $\mu_c = 1.5 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$

激活能  $\Delta E_1 = E_c - E_F$  为  $0.438 \text{eV}$ 。在大多数共价键非晶态半导体中,存在着  $10^{17} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$  的缺陷态密度,它往往将  $E_F$  “钉死”在迁移率隙中心附近,因而可视  $E_c - E_F$  为光学能隙的一半。故材料之迁移率隙为  $0.876 \text{eV}$ 。这与 Owen<sup>[2]</sup> 的结果 ( $0.88 \text{eV}$ ) 相近。

$T < 244\text{K}$  [(1)式中第二项]的低温区表明,载流子在热激发下跃迁到带尾定域态运输。此时,载流子的迁移率较小,估计值为  $1 \times 10^{-4}$

$\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。从而导至  $\sigma_{02}$  较小 [其值为  $10^{-3} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ ], 故电导率亦较小。激活能  $\Delta E_2 = E_A - E_F$  为  $0.27 \text{eV}$ 。由此,带尾定域态之宽度为  $0.17 \text{eV}$ 。

## 2. 直流电导的退火效应

图3是样品经过退火处理前后所测得之  $\ln \sigma_{dc}$  与  $1/T$  的关系。退火后  $\Delta E_1$  由  $0.35 \text{eV}$  增加到  $0.39 \text{eV}$ ,  $\Delta E_2$  由  $0.25 \text{eV}$  增加到  $0.27 \text{eV}$ ; 同时定域态电导率变小。其原因是(1)退火处理后材料结构有微小变化,使迁移率隙变宽,故  $\Delta E$  增大;(2)退火处理使迁移率边附近的等效能态密度减小,引起  $\sigma_{02}$  减小,从而电导率亦随之减小。

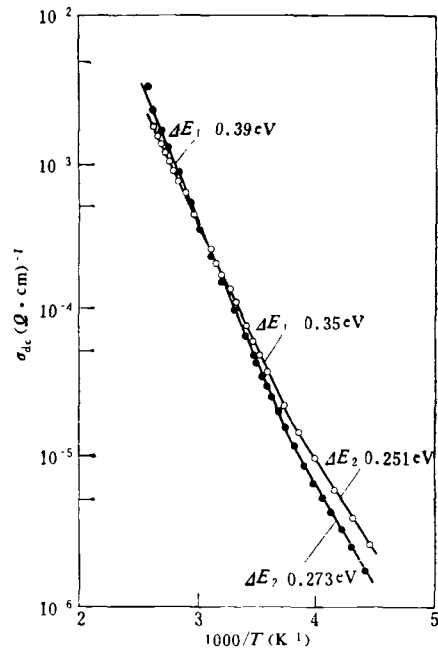


图3 退火处理对激活能及电导率的影响

○退火处理前; ●退火处理后

图4是三种不同厚度样品之  $\ln \sigma_{dc}$  与  $1/T$  的关系。从图中可知,  $\Delta E$  在  $0.40 \sim 0.49 \text{eV}$  范围,基本上与厚度无关。其中厚为  $1 \mu\text{m}$  和  $1.53 \mu\text{m}$  样品之  $\Delta E$  更为接近,而厚为  $2.8 \mu\text{m}$  样品之  $\Delta E$  相差稍大些,这种差异亦可用退火效应加以解释。

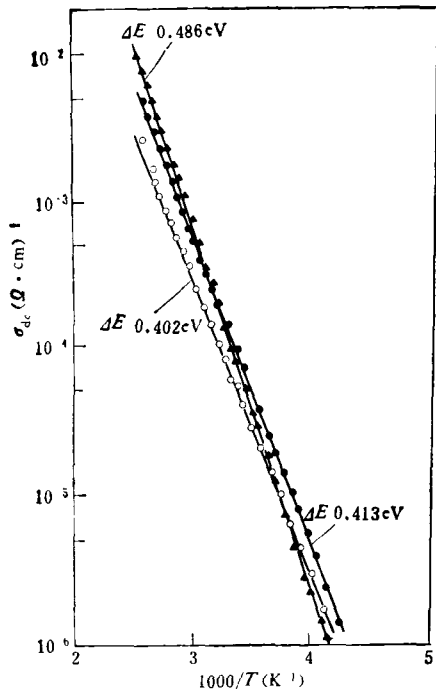


图4 三种厚度样品之直流电导与温度的关系  
●膜厚  $1\mu\text{m}$ ; ○膜厚  $1.53\mu\text{m}$ ; ▲膜厚  $2.80\mu\text{m}$

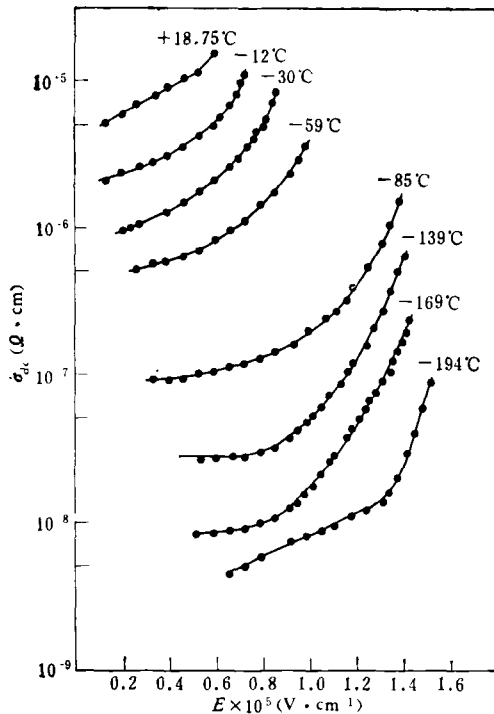


图5 直流电导与外电场的关系

### 3. 直流电导 $\sigma_{dc}(T)$ 与外电场的关系

$\text{Ge}_{15}\text{Tc}_{81}\text{S}_2\text{Sb}_7$  材料之直流电导是外电场场强的函数, 如图 5 所示. 与 Owen<sup>[2]</sup> 得到该材料的曲线基本相似. 当电场  $E < 1 \times 10^5 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$  时, 电导随电场缓慢地增加; 而当电场  $E > 1 \times 10^5 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$  时, 电导便随电场迅速地增加. 电导增加快慢的转折点随温度升高而向低场方向移动, 到 188K 时, 转折点已不明显了.

### 4. 交流电导 $\sigma_{ac}(\omega, T)$

在 154~385K 温度范围, 测量了 400Hz, 1KHz 和 10KHz 三种频率时交流电导与温度的关系, 如图 6 所示. 从图中可知: 高温时, 不同频率的交流电导逐渐趋于直流电导值. 此时, 交流电导对总电导的贡献很小. 总电导由直流电导所支配. 换言之, 载流子受热激发跃迁比外场对它的作用要大得多. 在较低温度下, 直流电导比交流电导要小一个数量级以上. 此时, 总电导由交流电导所支配, 亦即, 载流子靠电场作用跃迁比热激发跃迁要强得多. 交流电导与温度无明显关系.

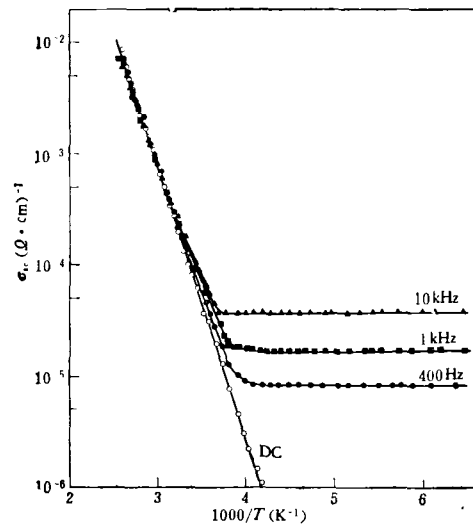


图6 不同频率下交流电导与温度的关系

在  $10^4 \text{Hz}$  至  $10^7 \text{Hz}$  频率范围, 测量了 221.5K 时交流电导  $\sigma_{ac}(\omega)$  与频率  $\omega$  的关系, 如图 7 所示. 它遵从关系式

$$\sigma_{ac}(\omega) = A\omega^s, \quad 0.99 < s < 1.095.$$

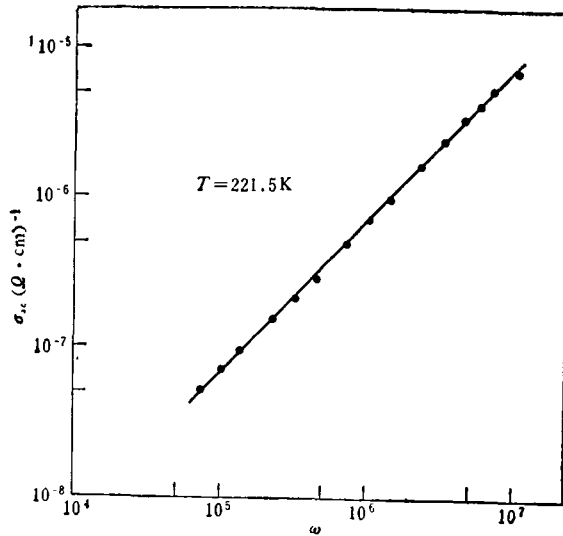


图7 221.5K 时交流电导与频率的关系

### 三、理论模型探讨

Austin 和 Mott<sup>[3]</sup> 认为,低温下之交流电导是载流子在电场作用和热激发下,借声子的协助,以隧道方式在两个定域态间跃迁所形成的,并利用 Pollak 和 Geballe<sup>[4]</sup> 的理论得到

$$\sigma_{ac}(\omega, T) = \frac{\pi}{3} [N(E_F)]^2 k T e^2 \alpha^{-5} \omega \cdot [\ln(\nu_{ph}/\omega)]^4, \quad (3)$$

式中  $N(E_F)$  是费密能级附近的态密度,  $\alpha$  是波函数衰减半径,  $\nu_{ph}$  是声子频率。(3)式所表述的隧道跃迁模型之关系式在以下几方面与实验结果不符:

(1)  $\sigma_{ac}(\omega, T) \propto T$ , 即低温下,交流电导与温度成直接线性关系;

(2)  $\sigma_{ac}(\omega, T) \propto \omega [\ln(\nu_{ph}/\omega)]^4 \sim \omega^s$ . 根据  $s = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \omega)}$  的定义得到

$$s = 1 - \frac{4}{\ln(\nu_{ph}/\omega)}. \quad (4)$$

(4)式表明,  $s$  依赖于声子频率,它的大小受到严格限制.当  $s$  值较小时,所得  $\nu_{ph}$  是正常的.例如  $s$  取 0.80,  $\omega$  取  $10^5$  Hz, 则  $\nu_{ph}$  为  $4.99 \times 10^{13}$  Hz; 但当  $s$  较大时,  $\nu_{ph}$  就大得不可思议了.例如在相同  $\omega$  下,  $s$  取 0.96, 则  $\nu_{ph}$  为  $2.69 \times$

$10^{48}$  Hz. 对于  $s > 1$  的情形,(4)式就更无法解释了.

(3)  $s$  是温度的函数,因为  $\nu_{ph}$  随温度升高而增大.若声子的束缚能为  $W_p$ , 则

$$\nu_{ph} = \nu_0 e^{-W_p/2kT}.$$

其中  $\nu_0$  是不失真格子之频率.代入(4)并求导数得

$$\frac{ds}{dT} = + \frac{4W_p}{2kT^2} \cdot \frac{1}{\{\ln(\nu_0/\omega) - W_p/2kT\}^2}$$

为正值.

为克服上述困难, Elliott<sup>[5]</sup> 提出了载流子在两个定域态间跃迁时,是从势垒上面越过该势垒的模型,并得到

$$\sigma_{ac}(\omega) = \frac{\pi^2 N^2 E}{24} \left[ \frac{8e^2}{\epsilon W_M} \right]^6 \cdot \frac{\omega^s}{\tau_0^s}, \quad (5)$$

式中  $W_M$  是跃迁所需之能量,近似为带宽.  $s = 1 - \beta$ ,  $\beta = \frac{6kT}{W_M}$ . 由(5)式知: (1) 低温下,

$\sigma_{ac}(\omega)$  与  $T$  不成明显的函数关系; (2)  $\sigma_{ac}(\omega)$  的大小取决于  $W_M^6$ , 而与声子频率无关; (3) 由  $s$  对  $T$  求导数得到  $\frac{ds}{dT} = - \frac{6k}{W_M}$ , 为负值. 实验得出  $\frac{\Delta s}{\Delta T} = -6.23 \times 10^{-4} (\text{K}^{-1})$ , 算出  $W_M = 0.83 \text{ eV}$ , 与带宽测量值  $0.88 \text{ eV}$  之结果相近.

由以上分析可知, Elliott 的越过势垒跃迁模型能较好地解释  $\text{Gc}_{15}\text{Te}_{61}\text{S}_2\text{Sb}_2$  材料的实验结果,但仍不能解释  $s > 1$  的情况.

### 四、结 论

1. 在扩展态中(高温时)载流子输运是由热激发引起的直流电导占优势,遵从

$$\sigma_{dc} = \sigma_0 e^{-\Delta E/kT}$$

之关系,与频率无关.

2. 定域态中(低温时),载流子输运主要由交流电导所支配.遵从  $\sigma_{ac}(\omega) = A\omega^s$ ,  $0.99 < s < 1.095$  之关系,与温度无关.

3. 本材料之直流电导和激活能均有退火效应.

4. 直流电导是外电场场强的函数.

(下转第 300 页)