

射频溅射 CoMnNiO 非晶薄膜中 空穴的迁移率*

陶明德 谭辉 秦东 韩英

(中国科学院新疆物理所,乌鲁木齐市)

1989年10月11日收到

测量薄膜的热电动势,很容易确定薄膜中载流子的迁移率。本研究根据 CoMnNiO 非晶薄膜在 200—350K 温区的热电动势测量和直流电导,计算了薄膜中空穴的迁移率。结果表明,330K 时,薄膜中空穴的迁移率为 $1.25\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$,且具有热激活性质。由此可以推断,射频溅射 CoMnNiO 非晶薄膜在常温下发生跳跃导电。

主题词 非晶薄膜,热电动势,迁移率

一、引言

确定半导体材料中载流子的迁移率有多种方法。如霍尔系数测量法^[1]。光注入少数寿命测量法^[2],热电动势结合电导测量法及近年发展起来的传输波法^[3]。由于非晶薄膜特别是多成分非晶薄膜具有很高的态密度,使得霍尔系数法或少数寿命测量法确定载流子的迁移率受到一定的困难。传输波法确定载流子迁移率对于高阻材料仍是不方便的。热电动势测量结合直流电导确定载流子的迁移率,适用面广,装置简单,但这是一种间接测量,确定载流子的迁移率需要计算,计算中涉及到某些参数的确定。因此,迁移率的可信度需要做理论上的分析。

本研究用测量热电动势结合直流电导确定了 CoMnNiO 非晶薄膜中空穴的迁移率,并将其结果与传输波法测量的结果进行比较,两者符合得很好。根据迁移率的热激活性质,可以推断,常温下 CoMnNiO 非晶薄膜发生跳跃导电。这一结论与交流电导的分析结果一致。

二、CoMnNiO 非晶薄膜的热电动势

热电动势测量装置如图1。将溅射在条形陶瓷衬底上的 CoMnNiO 非晶薄膜样品 S 安放在真空室内带有小型加热器的两铜块 A, B 之间。样品的阻值 R , 及热电动势 V , 由平行电极测出。样品两端的温度由标定好的热敏电阻测量。

* 国家自然科学基金资助项目。

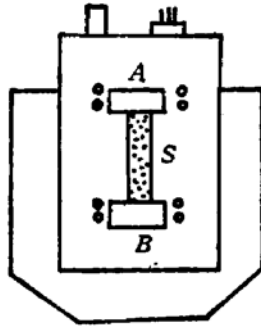


图1 热电动势测量装置

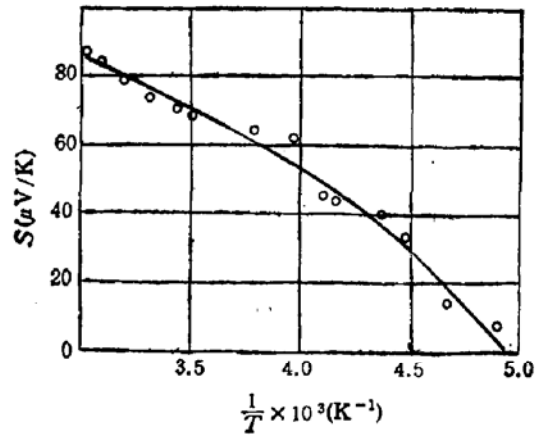


图2 热电动势与温度的关系

CoMnNiO 非晶薄膜的热电动势与温度的关系如图2。在测量温度,热电动势 S 为正,说明薄膜为P型材料,参与导电的载流子以空穴占优势。热电动势随温度的升高而增大,不同的温度有不同的斜率,具有不同热激活性质。

三、CoMnNiO 非晶薄膜中空穴的迁移率

CoMnNiO 非晶薄膜的交流电导测量表明,温度低于 500k,薄膜内发生带尾跳跃导电。根据非晶半导体理论,声子辅助跳跃导电时热电动势的表达式,对于空穴为

$$S = -\frac{k}{e} \left(\frac{E_F - E_B}{kT} + \frac{C^*}{C} \right) \quad (1)$$

利用 $n = N(E)e^{-(E_F - E_B)/kT}$, 热电动势 S 可写为:

$$S = -\frac{k}{e} \left(\ln \frac{\sigma}{eN(E)\mu} + \frac{C^*}{C} \right) \quad (2)$$

式中 E_F 为费米能级的能量, E_B 为价带尾的能量, $N(E)$ 为迁移率边附近的态密度, k 为玻尔兹曼常数, e 为电子电荷。常数 $\frac{C^*}{C}$ 取决于定域态的密度分布。若态密度随能量线性变化,则热电动势^[4]

$$S = -\frac{k}{e} \left(\ln \frac{\sigma}{eN(E)\mu} + \frac{C_1^*}{C_1} \right) \quad (3)$$

式中

$$C_1^* = 2 - \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \left[2 + 2\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) + \left(\frac{\Delta E}{kT}\right)^2 \right]$$

$$C_1 = 1 - \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \left(1 + \frac{\Delta E}{kT} \right)$$

根据非晶半导体理论,声子热助跳跃电导

$$\sigma_{hop} = \sigma_{ohp} \frac{kT}{\Delta E} C_1 \exp[-(E_F - E_B + W)/kT] \quad (4)$$

$$\sigma_{hop} = \left(\frac{1}{6}\right) \nu_{ph} e^2 R^2 N(E)$$

式中 $\Delta E = E_V - E_B$, C_1 与上面式中的 C_1 相同; 声子频率 ν_{ph} , 其典型值为 10^{13}s^{-1} ; 跳跃距离 R . 根据 X 射线衍射实验得到 CoMnNiO 非晶薄膜中有序区之间的平均距离为 $23 \text{\AA}^{[9]}$, 态密度 $N(E)$ 可由交流电导

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

确定. 假设波函数被局域在有序区的范围, 则波函数衰减系数 α 应与有序区的平均间距呈比例, $\alpha = \frac{\beta}{R}$ (β 为一常数). 实验得到 CoMnNiO 非晶薄膜在 500k 时, 交流电导与频率无关, 为典型的扩展态导电; 这时材料 B 值 $\left(\frac{\Delta E}{K}\right)$ 为 2800k , 相应的激活能为 0.2411eV ; 300k 薄膜呈现带尾跳跃导电, 材料 B 值 $\left(\frac{\Delta E}{K}\right)$ 为 2500k , 相应的激活能为 0.2155eV . 如果载流子在定域之间的跳跃能量很小, 则两个激活能之差可近似当作带尾的宽度, 即 $E_V - E_B = 0.2411 \text{eV} - 0.2155 \text{eV} = 0.0256 \text{eV}$, 这个值与 kT 同量级. 于是(3)式中的 $\frac{C_1^*}{C} \approx \frac{2}{3}$; 代入(3)式则有

$$S = - \frac{k}{e} \left(\ln \frac{\sigma}{e N(E) \mu} + \frac{2}{3} \right). \quad (6)$$

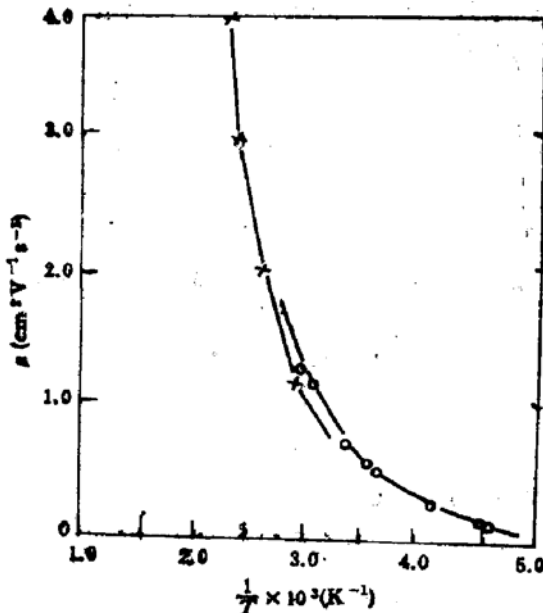


图3 CoMnNiO 非晶薄膜迁移率的温度特性
○——由热功计算的迁移率
×——用波传输法测量的迁移率

根据测得的热电动势 S 和直流电导 σ , 利用前面的条件和(5)式求出态密度 $N(E)$, 最后由(6)式计算出空穴的迁移率 μ , 将其结果和用波传输法对同一样品测得的迁移率绘于图3. 图3表明 CoMnNiO 非晶薄膜中空穴的迁移率在 330k 时约为 $1.25 \text{cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$. 随着温度的增加, 迁移率变大, 且具有热激活性质. 这一性质正好反应了非晶半导体带尾声子辅助跳跃电导的特征.

四、结 论

由热电动势测量和直流电导计算得到的 CoMnNiO 非晶薄膜在 330k 时, 空穴的迁移率约为 $1.25 \text{cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$; 用传输波法测得 330k 时空穴的迁移率为 $1.02 \text{cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$. 两者极为相近, 且与非晶固体理论预示的带尾跳跃导电载流子迁移率的范围^[6]相吻合.

图 3 表明, CoMnNiO 非晶薄膜在常温下, 空穴的迁移率具有热激活性质 $\mu_{hop} = \mu_{hop0} e^{-\frac{W}{kT}}$ 。这一结果与 CoMnNiO 非晶薄膜交流特性分析得到的结果一致, 进一步证实了常温下这种薄膜发生带尾跳跃电导的推论。

值得注意的是, 如果载流子在定域态中靠跳跃的方式运动, 电导基本上随温度指数变化, 所测得的激活能是载流子产生和跳跃激活能的和。跳跃激活能并不出现在热电动势的表达式中。电导激活能与热电动势激活能之差为跳跃激活能 $W(E)$ 。

关于非晶薄膜中载流子迁移率的确定, 无论是用热电动势结合直流电导的方法, 或是用传输波法, 在计算载流子迁移率时都要借助其他某些参量。由于非晶材料结构的复杂性, 这些参量的确定往往遇到困难。因此, 非晶材料中载流子迁移率的确定仍是一个值得探讨的问题。

参 考 文 献

- [1] W. W. Gärtner, *Semiconductor Products*, P29, July 1960.
- [2] T. Tiedje, J. M. Cebulka, D. L. More, and B. Abeles, *Phys. Rev. Lett.*, 46, 1425 (1981).
- [3] H. Fritzsche and K. -J. Chen, *Phys. Rev.*, B28, 15 (1983).
- [4] *Amorphous Semiconductors*, p. 130. Ed. by M. H. Brodsky Springer-verlag, Berlin, Heidelberg, New York, (1979).
- [5] 陶明德、谭辉等, CoMnNiO 非晶薄膜的热激电导, 本刊本期发表。
- [6] *Electronic Transport and Localization in Low Mobility Solid and Liquids*, Ed. by W. F. Spear, (1975).

Mobility of Holes in CoMnNiO Amorphous Film Deposited by R. F. Sputtering

Tao Mingde, Tan Hui, Qin Dong and Han Ying

(Xinjiang Institute of Physics, Academia Sinica, Urumqi)

Abstract

The mobility of holes in amorphous CoMnNiO film is calculated from the measurement of dc conductivity and thermo-emf of the film in the temperature range of 200—300 K. The results show that the mobility of holes at 330 K is of $1.25\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$ and thermally activated. It is concluded that band tail hopping conduction in amorphous CoMnNiO film will occur at 300 K.

Key words Amorphous Film, Thermopower, Mobility