

⑤ 182-106

# n-HgCdTe 表面积累层的定量迁移率谱研究\*

<sup>1)</sup>桂永胜 <sup>1)</sup>郑国珍 <sup>2)</sup>蔡毅 <sup>1)</sup>褚君浩

<sup>1)</sup>中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海, 200083;

<sup>2)</sup>昆明物理研究所, 云南, 昆明, 650223)

TV214

**摘要** 利用定量迁移率谱技术, 通过对霍尔系数和电阻率与磁场强度的关系, 获得了 n-HgCdTe 光导器件表面积累层中子带电子的浓度和迁移率, 结果与 Shubnikov-de Hass 实验和理论计算的结果非常吻合。

**关键词** 定量迁移率谱分析, 表面积累层, HgCdTe.

系/隔/带

光导器件

## 引言

制造过程中会在 HgCdTe 光导探测器其表面引入一个势阱和大量活性的缺陷态<sup>[1]</sup>, 引起能带弯曲, 在 n 型材料表面处形成电子积累层, 电子积累层对器件性能有重要的影响<sup>[2-4]</sup>. 人们对 HgCdTe 表面积累层进行了一系列实验, Nemirosky 和 Kidron<sup>[5]</sup>采用霍尔效应和电容-电压测量获得了 HgCdTe 积累层的电子浓度和迁移率, Nicholas<sup>[6]</sup>等测量了积累层的 SdH 振荡, 指明 HgCdTe 表面积累层可以用具有多个子带的二维电子气来描述, 理论上需要利用自洽计算方法<sup>[7,8]</sup>计算这些子带的精确色散关系, 但如果只需要知道表面子带的电子浓度和有效质量, 并不需要了解波函数, 半经典近似也可以获得较理想结果<sup>[9-11]</sup>.

本文利用定量迁移率谱分析获得了 HgCdTe 表面积累层的子带电子浓度和迁移率, 子带电子浓度结果与理论计算结果及 Shubnikov-de Hass (SdH) 测量结果都吻合得很好。

## 1 定量迁移率谱分析

霍尔实验中获得的霍尔系数  $R_H$  和电阻率  $\rho$  实际上都是磁场强度  $B$  的函数, 因此电导张量元  $\sigma_{xx}$  和  $\sigma_{xy}$  与磁场强度  $B$  有如下关系:

$$\sigma_{xx} = \frac{1}{\rho(B)[R_H(B)/\rho(B)]^2 + 1}, \quad (1)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{R_H(B)B}{\rho^2(B)[R_H(B)B/\rho(B)]^2 + 1}. \quad (2)$$

由于不同种类的载流子具有不同的迁移率, 它们在不同的磁场下对电导的贡献也不同, 通过分析电导张量元与磁场强度  $B$  的依赖关系就可以获得样品中电子和空穴的种类, 以及每种电子和空穴的迁移率与浓度. 在弛豫时间近似下, 通过求解玻尔兹曼方程可获得电导张

\* 国家自然科学基金(编号 69738020)资助课题  
稿件收到日期 1997-10-13, 修改稿收到日期 1997-11-19

量与样品中各类载流子浓度  $n_j$  和迁移率  $\mu_j$  有如下关系:

$$\sigma_{xx} = \sum_j \frac{en_j\mu_j}{1 + \mu_j^2 B^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = \sum_j S_j \frac{en_j\mu_j^2 B}{1 + \mu_j^2 B^2}, \quad (4)$$

式(4)中  $S_j$  为载流子电荷性. 分析电导张量随磁场强度变化的实验数据, 传统上采用多载流子拟合方法<sup>[12]</sup>, 由于该方法必须首先确定样品中电子和空穴种类, 以及每种载流子的近似迁移率, 所以得到的结果往往不是唯一结果. 迁移率谱方法<sup>[13, 14]</sup>初步解决了这个问题, 但是由于其结果只是定性的或半定量的, 所以还得通过其它方法获得定量结果.

我们将迭代算法与迁移率谱结合, 发展了定量迁移率谱技术, 将式(3)和(4)变形为

$$S_i^{xx} = (1 + \mu_i^2 B_i^2) \left[ \sigma_{xx}^{exp}(B_i) - \sum_{j=0}^{i-1} \frac{S_j^{xx}}{1 + \mu_j^2 B_j^2} - \sum_{j=i+1}^m \frac{S_j^{xx}}{1 + \mu_j^2 B_j^2} \right], \quad (5)$$

$$S_i^{xy} = \frac{(1 + \mu_i^2 B_i^2)}{\mu_i B_i} \left[ \sigma_{xy}^{exp}(B_i) - \sum_{j=0}^{i-1} \frac{S_j^{xy} \mu_j B_j}{1 + \mu_j^2 B_j^2} - \sum_{j=i+1}^m \frac{S_j^{xy} \mu_j B_j}{1 + \mu_j^2 B_j^2} \right], \quad (6)$$

式中  $m$  为迁移率谱中所取的迁移率的数目,  $S_i^{xx} = s^p(\mu_i) + s^n(\mu_i)$ ,  $S_i^{xy} = s^p(\mu_i) - s^n(\mu_i)$ . 空穴和电子的电导密度函数(即所谓电导密度函数的迁移率谱)  $s^p(\mu_i)$  和  $s^n(\mu_i)$  定义为

$$s^p(\mu_i) = e\beta(\mu_i)\mu_i, \quad (7)$$

$$s^n(\mu_i) = en(\mu_i)\mu_i. \quad (8)$$

为了加快计算速度, 我们采用了超级松弛法用来求解形如式(5)和(6)的线性方程组, 即

$$S_i^{xx}(k+1) = (1 - \omega_{xx})S_i^{xx}(k) + \omega_{xx}(1 + \mu_i^2 B_i^2) \left[ \sigma_{xx}^{exp}(B_i) - \sum_{j=0}^{i-1} \frac{S_j^{xx}(k+1)}{1 + \mu_j^2 B_j^2} - \sum_{j=i+1}^m \frac{S_j^{xx}(k)}{1 + \mu_j^2 B_j^2} \right], \quad (9)$$

$$S_i^{xy}(k+1) = (1 - \omega_{xy})S_i^{xy}(k) + \omega_{xy} \cdot \frac{(1 + \mu_i^2 B_i^2)}{\mu_i B_i} \left[ \sigma_{xy}^{exp}(B_i) - \sum_{j=0}^{i-1} \frac{S_j^{xy}(k+1)\mu_j B_j}{1 + \mu_j^2 B_j^2} - \sum_{j=i+1}^m \frac{S_j^{xy}(k)\mu_j B_j}{1 + \mu_j^2 B_j^2} \right]. \quad (10)$$

式中  $S_i^{xx}(k)$  和  $S_i^{xy}(k)$  分别是  $S_i^{xx}$  和  $S_i^{xy}$  第  $k$  步迭代结果, 将迁移率谱对零场进行电导归一化处理, 将其作为迭代初始值, 在每步迭代过程中保证  $s^p(\mu_i)$  和  $s^n(\mu_i)$  为正, 以确保结果明确的物理意义. 收敛系数  $\omega_{xx}$  和  $\omega_{xy}$  决定了迭代过程的收敛速度, 当  $\omega_{xx} = \omega_{xy} = 1$  时, 收敛速度最快, 但最初的迁移率谱形状很快被破坏, 结果很容易发散;  $\omega_{xx} = \omega_{xy} = 0$  时, 收敛速度最慢, 最终结果还是最初的迁移率谱. 为了兼顾收敛性和收敛速度, 通过大量实际计算, 我们认为  $\omega_{xx} = 0.05$  和  $\omega_{xy} = 0.01$  为最优选择, 另外, 为了尽可能全面准确反映材料的电学性质, 对数据进行了平滑插值, 使在迭代过程中迁移率取值的密度为每个数量级中有 100 个点.

## 2 实验结果与讨论

实验所用样品为昆明物理所的标准霍尔样品, 尺寸为  $888\mu\text{m} \times 290\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ . 样品上下

表面的钝化均采用阳极氧化,采用 In 接触的扩展电极,电极与材料形成良好的欧姆接触.在 1.2~200K,0~10T 的范围内对样品进行了变磁场的霍尔测量.

图 1 为样品 A 和 B 磁阻振荡数据的傅里叶变换结果.从图中可以发现样品中存在两套子能级,分别对应于上下表面的积累层,图中“'”和“''”表示不同表面,峰位上的数字表示所属子能级量子数.

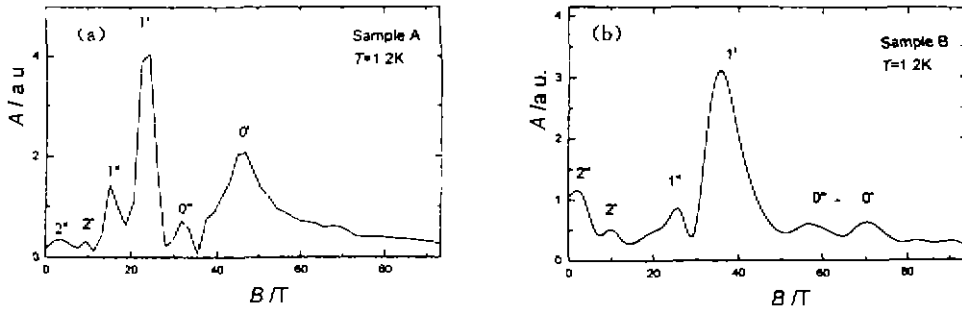


图 1 样品 A 和样品 B 的磁阻振荡数据的傅里叶变换曲线  
Fig. 1 The Fourier transforms of magneto-resistance oscillation for sample A(a) and sample B(b)

图 2(a)和(b)分别为样品 A 在 35K 和 1.2K 时的定量迁移率谱.在 35K 时,SdH 振荡基本消失,此时可以获得样品中不同载流子准确的迁移率和浓度.图 2(a)中的 3 个峰分别表示体电子、样品两个不同表面积累层中的二维电子.在 35K 时,我们发现同一表面中的子带电子具有相同的迁移率,谱中每种载流子的浓度  $n = \sum \sigma_i / (e\mu_i)$ ,  $\sum$  表示对峰内的所有载流子加权求和,由此可得体电子的浓度为  $2.14 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ,两表面的电子浓度分别为  $4.31 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$  和  $3.25 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ .1.2K 时样品的定量迁移率谱明显比 35K 时复杂,具体表现在 1.2K 时表面二维电子中不同子带的电子具有不同的迁移率.

采用定量迁移率谱、SdH 测量理论计算<sup>[11]</sup>得 1.2K 时各类电子浓度如表 1.由 1.2K 时的

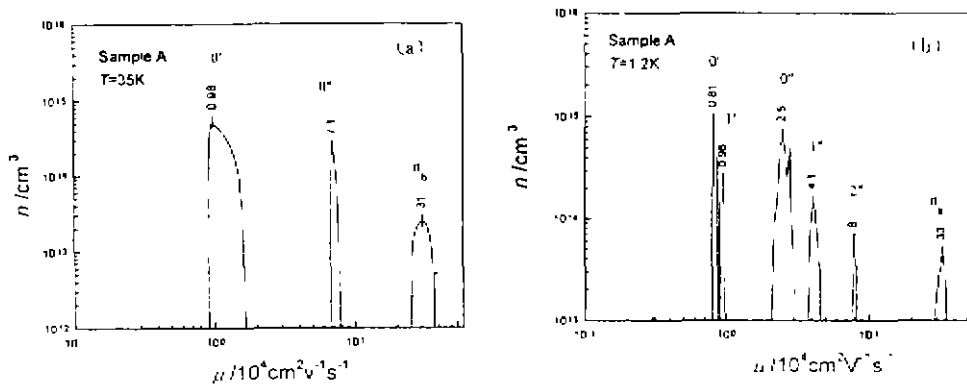


图 2 样品 A 在(a)35K 和(b)1.2K 时的定量迁移率谱  
Fig. 2 The quantitative mobility spectra for sample A at 35K(a) and 1.2K(b)

定量迁移率谱得到的体电子浓度  $2.20 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ , 两表面总的电子浓度分别为  $4.11 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$  和  $3.03 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ , 与 35K 时相当, 各子带电子分布与理论计算基本一致, 与 SdH 测量结果也十分相近.

表 1 1.2K 样品 A 中不同子带种类的浓度和迁移率  
Table 1 The density and mobility of each subband for sample A at 1.2K

		QMSA		SdH	理论计算
		浓度 ( $10^{14} \text{cm}^{-3}$ )	迁移率 ( $10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$ )	浓度 ( $10^{12} \text{cm}^{-2}$ )	浓度 ( $10^{12} \text{cm}^{-2}$ )
Bulk		$2.20 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$	33		
Surface	n=0	3.02	0.81	2.25	2.88
	n=1	1.09	0.96	1.17	0.94
	n=2			0.44	0.33
	total	4.11		3.86	4.31
Surface	n=0	2.20	2.5	1.53	2.17
	n=1	0.70	4.1	0.72	0.71
	n=2	0.137	8	0.18	0.25
	total	3.03		2.43	3.25

图 3 为样品 B 在 1.2K 和 49K 时的定量迁移率谱, 同样品 A 一样, 样品 B 中表面积累层的不同子带电子在 1.2K 时具有不同的迁移率, 而在 49K 时却表现出具有相同的迁移率. 从变温实验也可以发现在温度高于 35K 时, 各子带的电子迁移率趋于一致, 可以定性地解释这种现象: 在 1.2K 时, 电离杂质散射起着决定主导地位, 由于不同的子带具有不同的有效质量, 对应的迁移率就会不同, 表现在定量迁移率谱上就是可以分辨出不同子带的峰; 温度升高后, 比如 35K 时, 许多散射机制都起作用, 特别是子带间散射, 它对激发态的作用比基态强得多<sup>[12]</sup>, 所以随着温度升高, 各子带上电子迁移率间的差别越来越小.

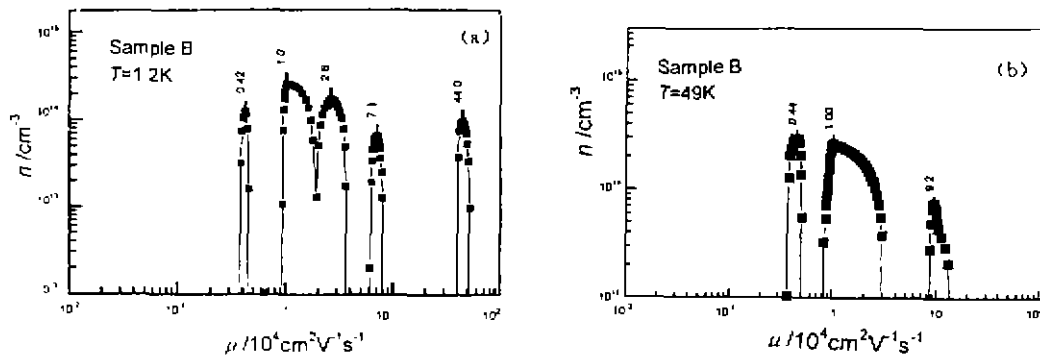


图 3 样品 A 在(a)1.2K 和(b)49K 时的定量迁移率谱  
Fig. 3 The quantitative mobility spectra for sample B at 1.2K(a) and 49K(b)

### 3 结论

我们采用定量迁移率谱对 n-HgCdTe 表面积累层中子带电子的电学性质进行了研究,

发现极低温度(1.2K)下,各子带上的电子具有不同的迁移率,而当温度高于 35K 时,各子带的电子迁移率基本相同。*n*-HgCdTe 光导探测器一般工作在 77K,因此我们在优化设计探测器时,可以不用考虑其表面积累层中具有多个子带这个特征,而将整个表面看成只有一种二维电子参与导电,这必将大大简化设计的复杂程度。

#### REFERENCES

- 1 Nemirovsky Y, Bahir G. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991, **A7**:450
- 2 GUI Y S, *et al.* *J. Infrared. Millim. Waves*(桂永胜,等. *红外与毫米波学报*), 1997, **16**:121
- 3 Nemirovsky Y, Bahir G. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1989, **A7**:450
- 4 Nemirovsky Y. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1990, **199**, **A8**:1185
- 5 Nemirovsky Y, Kirdron I. *Solid-State Electron.*, 1979, **22**:831
- 6 Nicholas R J, Nasir F, Singleton J. *J. Cryst. Growth*, 1988, **86**:656
- 7 Nachev I. *Semicond. Sci. Technol.*, 1988, **3**:29
- 8 Lowney J R, *et al.* *J. Electron. Mater.*, 1993, **22**(8):985
- 9 Ando Tsuneya. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 1985, **54**(7):2676
- 10 Gui Y S, *et al.* *Chinese Journal of Semiconductors*(桂永胜,等. *半导体学报*), 1997, **18**:667
- 11 Gui Y S, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**:5000
- 12 Gold M C, Nelson D A. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1986, **A4**:2040
- 13 Beck W A, Anderson J R. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**:541
- 14 Meyer J R, *et al.* *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**:805
- 15 Ando T, *et al.* *Review of Modern Physics*, 1982, **54**:509

### QUANTITATIVE MOBILITY SPECTRUM ANALYSIS OF *n*-HgCdTe ACCUMULATED LAYERS\*

<sup>1)</sup>GUI Yong-Sheng <sup>1)</sup>ZHENG Guo-Zhen <sup>2)</sup>CAI Yi <sup>1)</sup>CHU Jun-Hao

<sup>1)</sup>National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

<sup>2)</sup>Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China)

**Abstract** By using quantitative mobility spectrum analysis technique, the density and mobility for each subband of the accumulated layer on the *n*-HgCdTe devices were determined from field-dependent Hall and resistivity data. The results agree well with the Shubnikov-de Hass measurements and theoretical calculations.

**Key words** quantitative mobility spectrum analysis, accumulated layer, HgCdTe.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China  
Received 1997-10-13, revised 1997-11-19