

# 半导体量子阱材料的调制光谱研究

钱士雄 袁述 吴建耀 李郁芬

(复旦大学物理系, 上海, 200433)

T. G. Andersson

(Department of Physics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden)

1990年7月5日收到

我们采用光调制透射方法从  $In_xGa_{1-x}As/GaAs$  单量子阱样品测量了调制透射谱, 得到了  $InGaAs$  量子阱中激子的清晰的调制结构。由电场调制原理对调制透射谱进行拟合, 得到了激子的跃迁能量。结果与其他测量以及理论计算结果有较好的一致。

主题词 半导体量子阱, 调制光谱,  $InGaAs/GaAs$

由于应变层超晶格材料可以使用具有不同晶格常数的半导体材料而制成, 所以近年来应变层超晶格及量子阱的研究引起了人们很大的兴趣<sup>[1,2]</sup>。 $InGaAs$  与  $GaAs$  的晶格常数失配, 而且  $InGaAs$  的禁带宽度比  $GaAs$  的禁带宽度小, 处于近红外区域, 这对于工作在近红外区域重要的光纤通信, 近红外区的光谱研究用器件, 自然是很有价值的; 而且, 近来从  $InGaAs$  材料测得了超快速的光学及光电子学效应, 所以对这种  $In_xGa_{1-x}As/GaAs$  应变层超晶格量子阱的研究就有重要的意义。

在单量子阱材料中只有一个阱层, 所以其中的光学效应一般要比多量子阱中的效应弱。近年来, 对于  $In_xGa_{1-x}As/GaAs$  单量子阱的研究已经陆续开展<sup>[3-5]</sup>。据我们所知, 我们首次从几块不同的 In 含量的  $InGaAs/GaAs$  单量子阱样品测得了调制透射谱。

## 一、基本原理

调制透射(PT)是与调制反射(PR)很类似的光谱研究方法。它是当较强的调制激发光照射到样品上时, 再测量样品对另一探测光束的透射光谱而得。这种调制透射谱与一般的透射光谱有很大的不同, 可以测量样品中很弱的吸收结构的存在, 具有很高的灵敏度。从量子阱材料的调制透射光谱研究可以得到有关吸收与激子结构的不少信息。

调制透射的基本原理是: 在量子阱材料中的表面附近, 由于材料的能带发生弯曲, 使得表面处形成了一个耗尽区, 从而存在一个内建场<sup>[6]</sup>。激发光照射量子阱样品会产生光生载流子, 这些光生载流子在内电场的作用下会发生漂移, 从而改变了半导体量子阱表面附近内电场的大小, 即使在靠近表面层的量子阱内部, 由于载流子形成的激子产生的极化也会减弱原来的电场。当电场变化时, 介质的光学性质会发生变化, 主要的即是介质的介电常数  $\epsilon$  发生变化, 从而介质的折射率和消光系数也随之改变, 引起样品的反射和透射发

生变化。这种由于光场照射引起的材料内部电场以及相应光学性质的调制变化, 即是调制反射和调制透射的基本原理。从根本上讲, 调制反射和调制透射是电场调制性的, 所得到的光谱, 就是介电常数的微商谱。

对于调制透射来讲, 我们测量的是样品的透射率  $T$ ,

$$T = (1 - R_0)(1 - R_1)^2(1 - R_2)e^{-\alpha l} \quad (1)$$

其中  $R_0$  是入射表面的反射率,  $R_1$  是量子阱  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  层和  $\text{GaAs}$  层的界面处的反射率,  $R_2$  是后表面的反射率,  $\alpha$  是样品的吸收系数,  $l$  是吸收层的长度。在量子阱材料中, 要分别考虑  $\text{GaAs}$  层和  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  层的吸收作用。在激发光照射样品时, 介质的折射率  $n$  和消光系数  $\kappa$  都得到了调制, 从而对样品的透射率进行了调制, 可以得到调制时透射率的相对变化为

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{\Delta R_0}{1 - R_0} - \frac{2\Delta R_1}{1 - R_1} - \Delta\alpha \cdot l \quad (2)$$

其中略去了后表面的调制反射变化。由此可以看到, 一般来讲, 调制透射谱中不仅包括了吸收系数的调制部分, 还包括了反射率的调制部分。从 S. H. Pan 等人对  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  的多量子阱样品的 PR 测量<sup>[7]</sup>以及 D. S. Chemla 等对  $\text{InGaAs}$  量子阱的电场调制透射的测量<sup>[8]</sup>可以知道, 对  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  多量子阱样品,  $\Delta R/R$  的变化仅在  $10^{-4}$  左右, 而  $\Delta T/T$  的变化可以达到  $10^{-3}$  甚至更大, 因此, 我们可以对(2)式进行简化, 得

$$\frac{\Delta T}{T} = -\Delta\alpha \cdot l \quad (3)$$

而  $\Delta\alpha$  主要是与消光系数有关, 而  $\kappa$  则取决于介电常数  $\epsilon$  的虚部  $\epsilon_2$ , 因此可以得到

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{\omega l}{nc} \Delta\epsilon_2 \quad (4)$$

我们主要研究量子阱部分的调制透射, 因而只考虑  $\text{GaAs}$  的吸收边以下部分, 故(4)式中的  $l$  为量子阱的厚度,  $\Delta\epsilon_2$  是阱层的变化。对于激子跃迁, 有  $\epsilon_2 = \epsilon_2(E_{nm}, \Gamma_{nm}, f_{nm})$ ,  $E_{nm}$  是第  $n$  个电子子带和第  $m$  个空穴子带构成的激子的跃迁能量,  $\Gamma_{nm}$  和  $f_{nm}$  是对应的线宽和振子强度, 于是有

$$\Delta\epsilon_2 = \sum_{nm} \left[ \frac{\partial\epsilon_2}{\partial E_{nm}} \cdot \frac{\partial E_{nm}}{\partial F} + \frac{\partial\epsilon_2}{\partial\Gamma_{nm}} \cdot \frac{\partial\Gamma_{nm}}{\partial F} + \frac{\partial\epsilon_2}{\partial f_{nm}} \cdot \frac{\partial f_{nm}}{\partial F} \right] \Delta F \quad (5)$$

其中  $\Delta F$  是电场调制值,  $\Sigma$  号对所有起作用的跃迁求和。对于高温时激子跃迁的高斯线型, 可以得到

$$\frac{\Delta T}{T} = A \sum_{nm} \frac{E}{\Gamma_{nm}} \left[ U_{nm} \frac{f_{nm}}{\Gamma_{nm}} \cdot x_{nm} - V_{nm} \frac{f_{nm}}{\Gamma_{nm}} (1 - 2x_{nm}^2) + W_{nm} \right] e^{-x_{nm}^2} \quad (6)$$

其中  $A = l\Delta F/(2\sqrt{\pi}\hbar nc)$ ,  $E$  为光子能量  $E = \hbar\omega$ ,  $U_{nm} = \partial E_{nm}/\partial F$ ,  $V_{nm} = \partial\Gamma_{nm}/\partial F$ ,  $W_{nm} = \partial f_{nm}/\partial F$ ,  $X_{nm} = (E - E_{nm})/2\Gamma_{nm}$  (6)式就是调制透射谱的基本关系式。

## 二、样品和装置

我们使用的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱材料是采用分子束外延 (MBE) 方法在

(001)取向的 GaAs 基质上长成。先在基板上长上一层 GaAs 缓冲层, 然后是 50 Å 厚的量子阱层; 量子阱层中 In 的含量  $x$  可以在生长过程中予以控制。在量子阱层上面覆有一层 GaAs 盖层, 其厚度为 500 Å。我们所测量的二个  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱样品的参数为: No.1363,  $x = 0.1$ ; No.1364,  $x = 0.2$ 。样品的结构示于图 1。

实验装置示于图 2。连续溴钨灯光源发出的光经单色仪色散后变成有一定带宽的单色光, 并被聚焦至量子阱样品上, 同时又有一个经过斩波器调制过的 He-Ne 激光束(功率低于 2mW)也照射量子阱样品上, 这两束光在量子阱表面相重叠。然后由硅光电接收器接收透过样品的调制信号, 并馈入锁相放大器进行放大。扫描单色仪输出的探测光, 即可得到调制透射谱。实验测量在室温下进行。

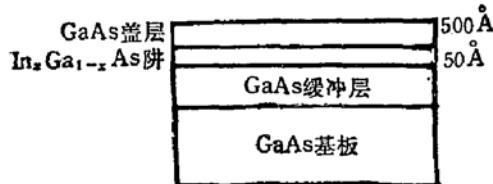


图 1  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱样品的结构图

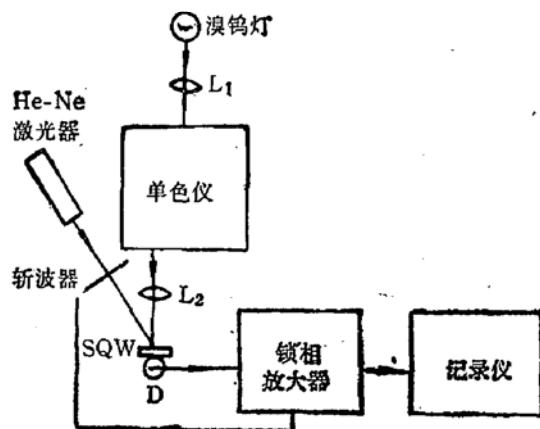


图 2 调制透射光谱的测量装置。其中  $L_1$  和  $L_2$  是透镜, SQW 为样品, D 为接收器

### 三、结果与讨论

对于单量子阱样品, 采用常规透射方法是不能测出其中的激子的吸收谱的。因为量子阱中激子峰的吸收系数一般只有  $10^3 \text{ cm}^{-1} - 10^4 \text{ cm}^{-1}$ , 而单量子阱的阱厚度为 50 Å,  $ad$  值小于  $0.5 \times 10^{-2}$ , 透射率的变化远小于 1%。所测得的典型的透射谱如图 3 所示。谱中只有一个清晰的 GaAs 吸收边, 而没有显示量子阱中的激子结构。

而采用调制透射装置, 可以测到  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱的调制透射光谱, 结果如图 4, 图 5 所示。

对 1363 样品, 在室温的调制透射谱中可以见到二个明显的结构, 而对于  $x = 0.2, l = 50 \text{ \AA}$  的 1364 样品, 在调制透射谱中可以见到三个峰结构。

调制透射谱中结构的存在明确地反映了材料中的跃迁和激子结构。在  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$

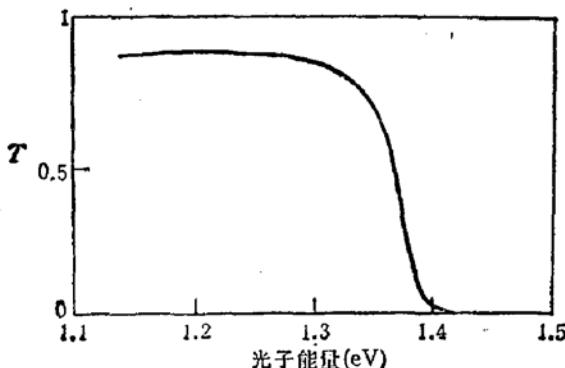


图 3  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱的常规透射谱, 温度为 300K

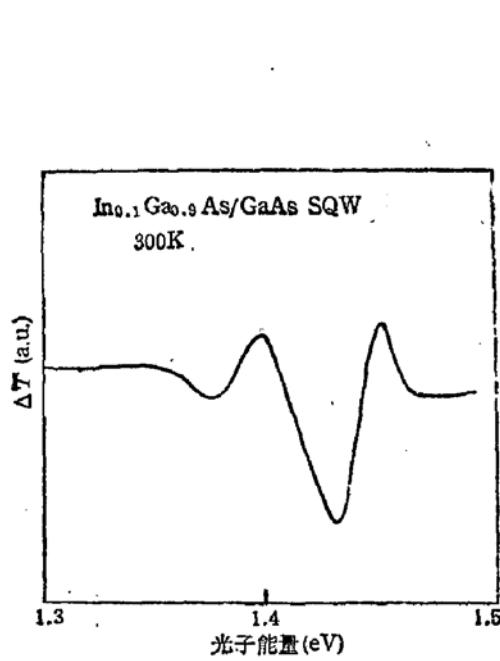


图 4 No. 1363 样品的调制透射谱

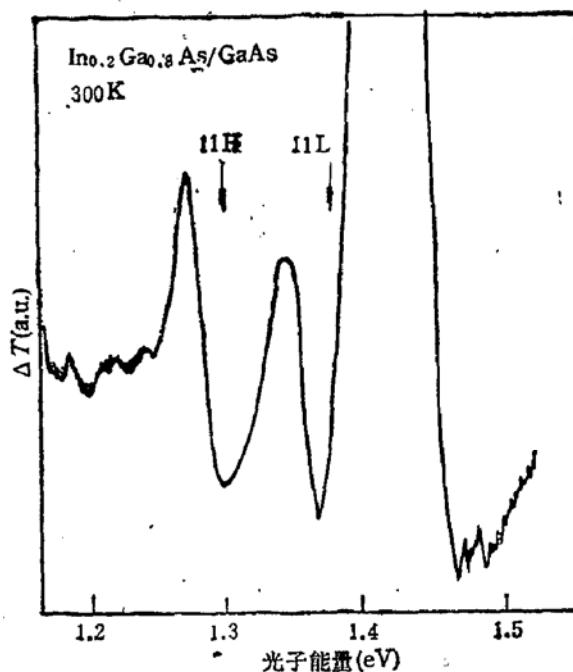


图 5 No. 1364 样品的调制透射谱。图中箭头所示处为计算得到的 11H 及 11L 激子位置(已扣除束缚能)

单量子阱样品中, GaAs 材料作为基板, 其能级结构反映在调制透射谱中是显然的, 它对应于 1.42 eV 处的结构。在我们测量的几个 InGaAs/GaAs 单量子阱样品(除去本文报道的二个外)的调制透射谱中, 这个结构都存在, 并且处于同样的位置。表明这个结构与量子阱的参数无关, 系对应于 GaAs 材料, 即是 GaAs 在室温时的能隙所对应的结构。

至于调制透射谱中其他结构的位置及强度随不同的样品而不同, 它对应于量子阱样品中阱的激子结构。对 1363 样品, 只存在一个结构, 而在 1364 样品中存在二个结构, 表示有二个激子起贡献。

我们采用(6)式对实验测得的调制透射谱进行拟合, 在拟合中调节参数  $U_{nm}$ ,  $V_{nm}$  和  $W_{nm}$ 。由拟合可以得到激子对应的能量, 对 1364 的二个结构, 得出其对应能量分别为 1.265 eV 和 1.368 eV。

对 1363 样品来讲, 一个激子结构即对应于阱中的 11H 激子, 因为不管对于那种构型分析<sup>[9]</sup>, 11H 激子都是存在的, 并且能量为最低, 这个分析与其他光致发光测量和调制反射谱的测量<sup>[6,9]</sup>是一致的。

1364 样品中存在的二个结构, 除去低能量处的 11H 激子之外, 还可以存在其他较高能量的激子结构。我们也对比了我们所作的光致发光及室温调制反射光谱数据, 我们认为 1.265 eV 处的结构对应于 11H 激子, 而 1.368 eV 处的结构对应于 11L 激子。这个指定与 S. H. Pan 等人从调制反射谱中分析次低能量的激子结构为 11L 的结果是一致的。Fortin 等人<sup>[10]</sup>在较高激发光强度时得到的光致发光谱中观察到 21H 激子的较强辐射, 但其实验在 5K 下进行。

我们采用包络函数理论。考虑到应变存在时的情况, 则可以写出相应的哈密顿量  $H$ , 求解  $H$  的本征方程

$$\hat{H}f_n(z) = E_0^n f_n(z) \quad (7)$$

其中  $f_n(z)$  是包络函数,  $E_0^n$  是能量,  $z$  是垂直于阱平面的法线方向。在量子阱情况可取包络函数的形式为:

$$f = ae^{-\beta z^2} + bze^{-\beta z^2} \quad (8)$$

其中  $\beta$  为变分参数,  $a$  和  $b$  是二个常数。由此可以写出能量的关系式,采用变分法则可求得能级的能量值。

对于  $In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ , 求得在室温下 11H 及 11L 的激子跃迁的能量值分别为 1.308eV 和 1.389eV。考虑到激子的束缚能一般为 10meV, 这样初步的计算结果是与实验值接近的。如果进一步调节参数, 还可以得到更好的结果。

#### 四、结 论

采用调制透射方法对  $In_xGa_{1-x}As/GaAs$  单量子阱样品的测量表明, 调制透射法装置简单、测量容易、灵敏度高和信号清楚, 可以成功地用来研究单量子阱样品在透明区域的激子及能级结构, 因而可以用于各种多量子阱和超晶格结构的研究。在量子阱与超晶格材料的光学性质研究中, 调制透射是与调制反射互相补充的一种有效手段。

#### 参 考 文 献

- [1] R. M. Kolbas, N. G. Anderson, W. D. Laidig, Y. K. Sin, Y. C. Lo, K. Y. Hsieh, and Y. J. Yang, *IEEE QE-24*, 1605 (1988).
- [2] G. C. Osbourn, *IEEE QE-22*, 1677 (1986).
- [3] Shixiong, Qian, Shu Yuan, Yufen Li, T. G. Andersson, Zonggui Chen, Wenji Peng, and Zhenxin Yu, *Chinese Phys. Lett.*, **6**, 599 (1989).
- [4] S. Niki, C. L. Lin, W. S. C. Chang, and H. H. Wieder, *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1339 (1989).
- [5] W. Xinghua, and R. Laiho, *Superlatt. Microstruct.*, **5**, 79 (1989).
- [6] W. M. Theis, G. D. Sanders, C. E. Leak, K. K. Bajaj and H. Morkoc *Phys. Rev.*, **B37**, 3042 (1988).
- [7] S. H. Pan, H. Shen, Z. Hang, F. H. Pollak, W. H. Zhang, Q. Xu, A. P. Roth, R. A. Masut, C. Lacelle and D. Morris, *Phys. Rev.*, **B38**, 3375 (1988).
- [8] D. S. Chemla, I. Bar-Joseph, J. M. Kuo, T. Y. Chang, C. Klingshirn, G. Livescu, and D. A. B. Miller, *IEEE QE-24*, 1664 (1988).
- [9] J. Y. Marzin, M. N. Charasse, and B. Sermange, *Phys. Rev.*, **B31**, 8298 (1985).
- [10] E. Fortin, B. Y. Hua, A. P. Roth, A. Charlebois, S. Fafard, and C. Lacelle, *J. Appl. Phys.*, **66**, 4854 (1989).

## Study of Modulation Spectrum of Semiconductor Quantum Wells

Qian Shixiong, Yuan Shu, Wu Jianyao and Li Yufen

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai, P. R. China)

T. G. Andersson

(Department of Physics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden)

### Abstract

Using the phototransmission spectrum technique, we have measured the phototransmission spectra from  $In_xGa_{1-x}As/GaAs$  single quantum well samples. The clear modulation structure of different excitons in  $InGaAs$  well has been got. From the fitting based on the electric field-modulation mechanism, the exciton energies have been obtained which are in good agreement with other measurements and theoretical calculation.

**Key words** Semiconductor quantum well, Modulation spectroscopy,  $InGaAs/GaAs$