

# 半导体多量子阱结构的非线性光学

程文芹

(中国科学院物理研究所)

1982年以前,人们对半导体光学非线性的研究都局限于体材料。激子的非线性效应大都局限于低温。1982年以来,由于半导体材料生长技术,特别是分子束外延技术的发展,开始对多量子阱结构(也叫超晶格结构)材料的光学非线性及非线性效应进行研究。

研究表明,体材料的激子只在低温下才存在(对带宽不太宽的材料),而多量子阱结构的激子在室温下仍然存在。半导体中的很多非线性效应是由于激子的饱和吸收引起折射系数的非线性变化而产生的。所以,MQWs(多量子阱结构)使半导体的光学非线性效应由低温扩展到了室温。现在已用MQWs研制了一些光学逻辑器件,这为光集成提供了一个基本的和必要的条件。

可以从两个方面研究半导体的光学非线性问题。一是研究与光学非线性有关的半导体中的过程,另一是研究它们的非线性光学效应及其应用。本文侧重于后者。

什么是半导体多量子阱结构呢?简单来说,就是由相间生长带隙宽窄不同的半导体薄层所造成的结构。为了直观起见,在图1给出它的示意图。多量子阱结构被夹在两层宽带隙材料之间。两层宽带隙材料层厚度相等,以保证多量子阱两边所受的应力相等。它们起保护作用并供选择腐蚀用,而且对能量大于窄带隙材料的带隙但低于它们的带隙的光是透明的。

MQWs的空间能带如图2所示。由图2看出,在窄带隙材料中的载流子(导带电子或价带空穴)的运动被限制在势阱中。

到目前为止,MQWs的光学非线性的研究绝大部分限于GaAs/GaAlAs。其中GaAs是窄

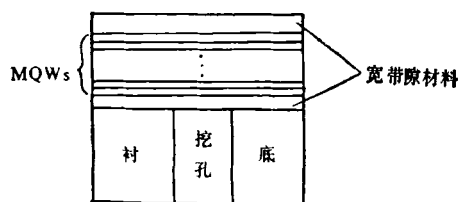


图1 MQWs示意图

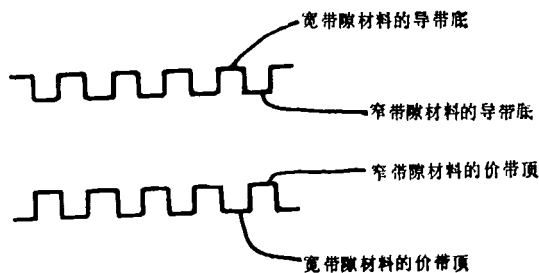


图2

带隙的,室温禁带宽度为1.43eV,  $Ga_{1-x}Al_xAs$  的禁带宽度是  $x$  的函数。通常  $x = 0.3$  左右,禁带宽度为1.72eV

Weiner等人<sup>[1]</sup>对  $Ga_{0.47}In_{0.53}As/Al_{0.48}In_{0.52}As$  MQWs的吸收进行了研究,发现在  $1.6\mu m$  处有室温激子共振吸收,但远不如GaAs/GaAlAs的明显。 $Ga_{0.47}In_{0.53}As$  的禁带宽度  $E_g = 0.74eV$ ,  $Al_{0.48}In_{0.52}As$  的  $E_g = 1.47eV$ 。对这一材料的兴趣,在于它可以与光纤的透射最大的光子能量 ( $1.55\mu m$ ) 相匹配。

另外有人正在对HgTe/CdTe MQWs的光学性质进行研究。因为HgTe是零带隙材料,对红外有特殊用处。Wu等人<sup>[2]</sup>对厚度为  $38.5\text{ \AA}$  HgTe和CdTe的MQWs进行了理论研究。吸收曲线在0.233eV有一个吸收边。有可能利用这个吸收边做一些红外非线性效应的应用工作。

## 一、GaAs/GaAlAs MQWs 的吸收与折射

很多光学非线性效应是由于激子的饱和吸收引起的折射率的变化造成的。我们知道吸收和折射不是孤立的。它们的变化由 Kramers-Kronig 关系式:

$$\Delta n(\omega) = \frac{c}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\Delta \alpha(\omega') d\omega'}{\omega'^2 - \omega^2}$$

联系着。知道了吸收系数的变化  $\Delta \alpha(\omega)$ , 就可以求出折射系数的变化  $\Delta n(\omega)$ , 式中  $P$  表示取积分主值。

Smirl 等人<sup>[3]</sup>及 Miller 等人<sup>[4]</sup>测量了体 GaAs 及 GaAs/GaAlAs MQWs 的室温吸收谱 (见图 3)。由图 3 可看出它们有如下的区别: (1) 体 GaAs 只在带边有一小的激子吸收突起。而 MQWs 的激子吸收峰很清楚, 轻空穴激子和重空穴激子吸收峰完全分开。(2) MQWs 的激子吸收峰移向短波长, 也就是移向高能量一边。

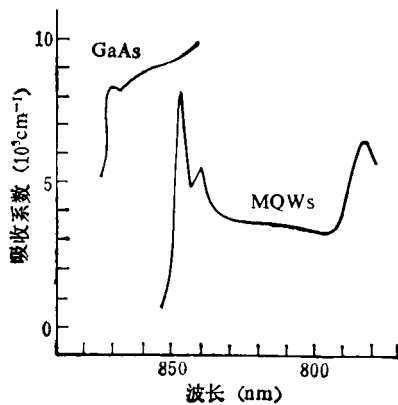


图 3 体 GaAs 及 GaAs/GaAlAs MQWs 的吸收谱

可以定性地解释上述的现象。在 MQWs 中, 由于量子阱的限制, 激子半径减小, 因而激子结合能增加。体 GaAs 的激子结合能约为 4.2 meV。高于 120°K 以后, 激子吸收峰就不明显了。GaAs/GaAlAs MQWs 的激子结合能可增加到 10 meV。激子吸收峰到 70°C 才消失。

激子吸收峰的线形是高斯型的, 线宽  $\Gamma$  由两部分组成: 一部分由  $\Gamma_0$  表示, 它不随温度变化, 被认为是由于量子阱的宽度而限制势的起伏造成的; 另一部分用  $\Gamma_{ph}$  表示, 它随温度变化, 被认为是  $L_0$  声子散射的结果。由  $\Gamma_{ph}$  可求出激子的寿命  $\tau_{ex} \approx 0.4$  ps。

前面讨论的是光很弱时的线性吸收。下边讨论光较强时的非线性光吸收。对非线性光吸收有两种研究方法。一种是直接测量吸收系数随光强的变化, 这种方法容易看出吸收饱和。另一种方法是采用所谓泵-探技术, 即用一强光束激发, 测量在强激发下对另一弱光束的吸收。Chemla 等人<sup>[5]</sup>用这一方法测量了 GaAs/GaAlAs MQWs 的非线性光吸收。在室温下, MQWs 的吸收比低温下 GaAs 体材料的激子吸收更容易饱和。这是由于激子热电离形成的电子和空穴对激子的屏蔽作用的结果。

用这一方法可以得到吸收截面  $\sigma_{ch}$ , 并根据 Kramers-Kronig 关系式可得到折射截面  $n_{ch}$ 。  $\sigma_{ch}$  和  $n_{ch}$  分别为一个电子-空穴对引起的吸收系数和折射系数的变化 (见图 4)。由图 4 看出, 激发一个激子可以引起折射率很大变化。折射率变化最大是发生在激子吸收峰的低能边。很多

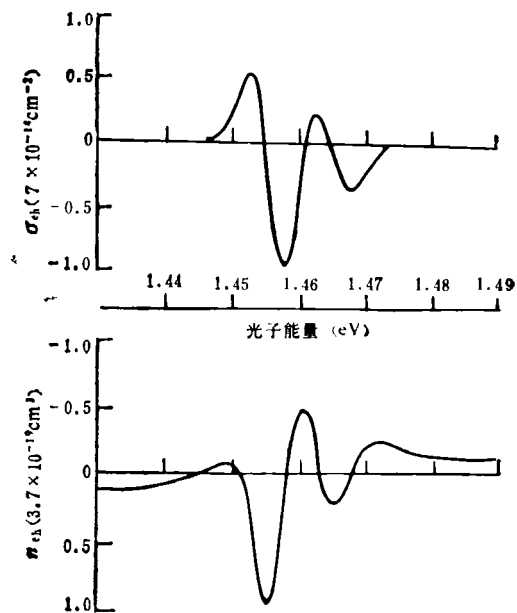


图 4 激发一个电子-空穴对引起的吸收系数和折射系数的变化

非线性效应就是由于折射率的快速变化而产生的。

## 二、电场对激子的影响

电场对激子的结合能有很大影响,因而对激子的吸收也有很大影响。下边分别对电场平行于界面和垂直于界面的情况进行讨论。

### 1. 电场平行界面的情况<sup>[6]</sup>

Chemla<sup>[6]</sup>对平行于界面的电场对 GaAs/GaAlAs MQWs 激子的影响进行了研究。MQWs 的组成是: 65 个周期, GaAs 层厚 96 Å, Ga<sub>0.72</sub>Al<sub>0.28</sub>As 层厚 98 Å。电极是由先蒸发 100 Å Cr, 再蒸发 1000 Å Au 制成。电极之间距离为 300 μm。光源是 750 染料激光器。光斑是 50 μm。所用激光功率低至 10 μW。电压为 150V 时, 电流为 10 μA。

约在 200V 以前, 激子峰位移随电场变化很慢。200V 以后变化加快。这可以作如下定性的解释: 在不加外电场时, 异质界面电场激子的取向是垂直界面的方向。加平行于界面的电场后, 首先使激子取向逐渐发生变化。激子取向变到一定程度后, 激子半径才能随电场发生大的变化。

### 2. 电场垂直界面的情况

当加上垂直界面的电场时, MQWs 的激子吸收峰移向低能边。其原因是加电场时电子和空穴分别被推到势阱的相对的壁, 激子的半径增加, 因而激子的结合能降低。利用这一效应可以制做光调制器。

## 三、MQWs 的光学非线性效应及其应用

本文所用的 MQWs 都是用分子束外延技术生长在掺 Cr 的半绝缘 GaAs 衬底上的。外延生长方向为 (100)。所用样品都需要在衬底上挖一个小孔, 以便研究或利用 MQWs。在衬底上挖孔的方法有两种: 一种是用选择腐蚀剂将衬底腐蚀掉, 另一种是用等离子体刻蚀的方

法。前者用得较多。

### 1. 光非门、光调制和锁模

#### (1) 光非门

Migus 等人在(1985年)实现了 GaAs/GaAlAs Fabry-Perot 标准具光非门。门的速度可达 1ps。所需开关光能为 100fJ/μm<sup>2</sup>。MQWs 的组成是: 100 个周期, GaAs 层厚 152 Å, GaAlAs 层厚 104 Å。MQWs 夹在两个玻璃片之间, 玻璃片上镀有 90% 反射率的介质膜。

所用激光波长为 620nm, 脉宽为 ~100fs, 分成两束, 一束光强, 一束光弱。使它们通过 2cm 的水池, 以产生波长连续的光。强光束通过窄带滤光片后, 得到波长为 ~760nm 的光。GaAlAs 对它是透明的, 只激发 GaAs。探测束聚焦成 50—100 μm 的光斑。

调节标准具, 使不加泵束时对探测束是透明的, 而探测束的光子能量在 MQWs 激子峰的低能边。加泵束后, 泵束激发的电子-空穴对屏蔽了激子, 激子吸收不存在, 折射率降低, 标准具的透射峰移向更长的波长, 使探测束不能通过标准具, 因此成为非门。

#### (2) 光调制

Wood 等人<sup>[7]</sup>用 MQWs 的 p-i-n 二极管实现了电光调制。响应时间为 2.8ns。这一响应时间是受电路的限制。而激子对电场的响应时间小于 1ps。在 p-i-n 中 i 是 MQWs, p, n 层是 GaAlAs。MQWs 的组成是: 65 个周期, GaAs 层厚 96 Å, Ga<sub>0.72</sub>Al<sub>0.28</sub>As 层厚 98 Å。二极管是反向偏置的, 以便减小电流从而减少发热。

我们知道, 激子的结合能是随垂直电场的增加而降低。如果光的波长位于激子吸收谱的范围内, 那么透过 MQWs, 也就是透过 p-i-n 二极管的光将随着电场的变化而受到调制。

#### (3) 锁模

Miller 等人<sup>[8]</sup>用 GaAs/Ga<sub>0.71</sub>Al<sub>0.29</sub>As MQWs 作饱和吸收剂, 利用激子吸收饱和在外腔中对 GaAs 激光器进行锁模, 得到了 1.6ps 的激光脉冲。这是迄今为止 GaAs 激光二极管的最短脉冲。所用 MQWs 的组成是, 47 个周期, GaAs

层厚 98 Å, Ga<sub>0.71</sub>Al<sub>0.29</sub>As 层厚 99 Å.

## 2. 简并的四波混频 (DFWM)

四波混频是三个波通过三阶非线性系数  $\chi^{(3)}$  的耦合产生第四个波. 当三个波的频率相同时称为简并的四波混频. 四波混频可用于研究三阶极化率  $\chi^{(3)}$ , 也可用于光波波前畸变的修正.

Miller 等人<sup>[9]</sup>用 GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As MQWs 实现了前向四波混频. 采用了两种 MQWs 的组成. 激光器是 Kr<sup>+</sup> 激光泵浦的环形染料激光器, 激光脉宽为 12ns. 所用光路具有普遍意义, 如图 5 所示. 图中 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> 表示衰减器, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> 表示斩波器, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 表示分光镜, P 表示延时器, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub> 表示探测器.

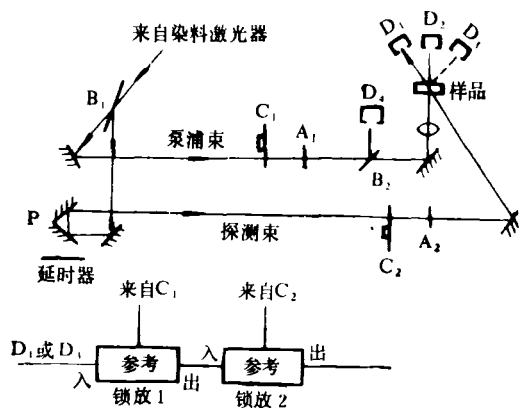


图 5 DFWM 光路图

由图 5 得到了三个结果: (1) 由探测器 D<sub>2</sub> 和 D<sub>4</sub> 得到了 MQWs 的线性吸收谱. 轻、重空穴激子的吸收峰分得很清楚. 重空穴激子峰在 1.457eV 处, 轻空穴激子吸收峰在 1.467eV 处. (2) 将 D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 的信号送入级联的锁相放大器中, 得到了非线性吸收. (3) 将 D<sub>3</sub> 的信号送入级联的锁相放大器中, 得到了 DFWM 信号. Chemla 等人 (1984 年) 对这一测量结果作了详细分析, 得到了  $\sigma_{eh}$  和  $n_{eh}$ , 并测量了载流子的复合寿命 ( $\tau \sim 30\text{ns}$ ) 和扩散系数 ( $D \sim 13\text{cm}^2/\text{s}$ ).

Miller 等人<sup>[10]</sup>用 GaAs 激光二极管作探测束光源, 染料激光器作泵束光源, 在 GaAs/GaAlAs MQWs 中实现了 DFWM. 测得三阶极化

率  $\chi^{(3)} \sim 6 \times 10^{-2}\text{esu}$ , 它是室温 Si 的  $10^6$  倍, 体 GaAs 的 10 倍. 所用 MQWs 的组成是: 65 个周期, GaAs 层厚 96 Å, Ga<sub>0.72</sub>Al<sub>0.28</sub>As 层厚 98 Å.

## 3. MQWs 的光学双稳

人们对半导体光学双稳的研究兴趣很大, 这不仅是因为它具有一定的基础研究意义, 更重要的是它具有重要的应用价值. Gibbs 等人<sup>[11]</sup>第一次用 GaAs/GaAlAs MQWs 实现了室温光学双稳. 所用 MQWs 的组成是: 61 个周期, GaAs 层的厚度是 336 Å, Ga<sub>0.73</sub>Al<sub>0.27</sub>As 的厚度为 401 Å. MQWs 的两面镀反射膜, 在 820—890nm 之间反射率为 90%. 激光光源是 Kr<sup>+</sup> 激光器泵浦的 HITC 染料激光器.

开关时间为 20—30ns, 透射率为 10%. 双稳是这样得到的: 当激光的光强较弱时, 标准具与激光共振, 标准具是高透射状态; 当光强增加到一定强度之后, 激光所激发的电子-空穴对屏蔽了激子, 折射率降低, 标准具的共振频率改变, 激光相对标准具偏离共振, 成为低透射状态. 也就是说, 器件有低光强的高通和高光强的低道两种稳定状态.

Tarng 和 Gossard 等人<sup>[12]</sup>用 GaAs 激光二极管和 GaAs/GaAlAs MQWs 实现了室温光学双稳. 目的显然是为了光集成的需要. 所用 MQWs 的组成是: 300 个周期, GaAs 层厚为 66 Å, Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As 层厚为 64 Å. MQWs 两边镀反射率为 90% 和 98% 的介质膜, 以便构成谐振腔. 激子共振峰在 806nm. 光学双稳发生在 819—840nm 之间. 激光二极管单模工作, 需要的最低功率为 6mW. 改善衬底的刻蚀, 可以得到更好的 MQWs 的刻蚀平度, 因而能降低需要的功率.

值得注意的是, Miller 等人<sup>[13]</sup>用 GaAs/GaAlAs MQWs 实现了室温吸收型的光学双稳. 它的好处是不需要腔. 从 GaAs/GaAlAs MQWs 的吸收谱看到它的吸收边很陡. 当光子能量位于吸收边的较低部分时, 吸收很少, 随着光强的增加, 吸收急剧增加, 吸收的能量使材料加热, 加热使带隙减小, 因而又增加了吸收, 即存在一

个正反馈过程,正反馈结果使透射率降得很低。就是说这种材料存在一个低光强的高透射状态和一个高光强的低透射状态。

MQWs 的组成是: 375 个周期, GaAs 层厚 85 Å, Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As 层厚 87 Å。MQWs 上面镀有 SiN 增透膜,以防止腔效应,使成为吸收型的。

此光学双稳的工作机理应该进一步研究,以确定是由于加热使带隙变窄还是由于多体相互作用使带隙变窄,或是二者兼有。

应用价值最大的也许是 Miller 等人<sup>[4]</sup>用 GaAs/GaAlAs MQWs p-i-n 二极管实现的 optics 双稳器件,称作 Self-Electro-Optic-Effect-Device 或 SEED。SEED 器件是将 p-i-n MQWs 放在电路中。

当偏压为零时,光波长位于 MQWs 的激子吸收峰附近,吸收高,透射率低;加偏压(反向偏置)后,激子吸收峰向长波长方向移动,吸收降低,透射率增高。当光强增加时,光电流增加,电阻 R 上的电压降增加, MQWs 上的电压降降低,激子峰向短波长方向移动,吸收增加;光电流再增加,电阻 R 电压降也再增加, MQWs 上电压降再降低……直到低通状态。开关所需重要的光能约为 4fJ/μm<sup>2</sup>,加上电能,总的开关能量约为 18fJ/μm<sup>2</sup>。这是目前最低的能量。

GaAs/GaAlAs MQWs 的非线性系数很大,而且用它做的器件可以在室温下工作。本文介绍的所有器件的工作温度都是室温。所需开关能量低,工作速度快(开 1ps,关 10ns)。除此之

外,同一器件在不同条件下可以实现不同的功能。它可以用作光门、双稳开关,也可以做光晶体管。目前看来它是最有希望用于光计算机和光数据处理。它用于多路并行的数据处理中很方便,可以使不同光路的光聚焦在同一器件的不同位置上,也可以用等离子刻蚀做成器件阵列。目前虽然已研制成功了各种器件,但还没有做成实用的器件,还需要做一些改善性能的工作,如减短关的时间,改善器件之间耦合等。

就普遍的 MQWs 而言,还需要研究新材料及它们的生长问题。

### 参 考 文 献

- [1] J. S. Weiner, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **46**(1985), 619.
- [2] G. Y. Wu et al., *Appl. Phys. Lett.*, **46** (1985), 72.
- [3] A. L. Smirl et al., *Appl. Phys.*, **B28**(1982), 96.
- [4] D. A. B. Miller et al., *Appl. Phys.*, **B28** (1982), 95.
- [5] D. S. Chemla et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-20** (1984), 265.
- [6] D. S. Chemla et al., *Appl. Phys. Lett.*, **42**(1983), 864.
- [7] T. H. Wood et al., *Appl. Phys. Lett.*, **44**(1984), 16.
- [8] D. A. B. Miller et al., *Opt. Lett.*, **9**(1984), 507.
- [9] D. A. B. Miller et al., *Appl. Phys. Lett.*, **42** (1983), 925.
- [10] D. A. B. Miller et al., *Opt. Lett.*, **8**(1983), 477.
- [11] H. M. Gibbs et al., *Appl. Phys. Lett.*, **41** (1982), 221.
- [12] S. S. Tarng et al., *Appl. Phys. Lett.*, **44**(1984) 360.
- [13] D. A. B. Miller et al., *Opt. Lett.*, **9**(1984), 162.
- [14] D. A. B. Miller et al., *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984), 13.

## 1985 年穆斯堡尔效应应用国际会议在比利时召开

1985年穆斯堡尔效应应用国际会议(简称ICAME)于9月16日—20日在比利时鲁文(Leuven)召开。来自世界各地的280名专家、学者参加了这次会议。我国的三名代表和正在国外工作的五名科技工作者参加了会议。

穆斯堡尔效应是原子核对γ射线的无反冲共振吸收的现象。它在自然科学各个领域中都有广泛的应用。这次会议有综述报告22篇,研究报告510篇,可分为以下几个方面:

(1)非晶态材料;(2)磁学和超精细场;(3)电子

结构和化学;(4)表面现象和催化;(5)金属和合金;(6)矿物、地质和考古学;(7)辐射损伤、离子注入和滞后效应;(8)稀释系统、基体离析和晶簇;(9)晶格动力学、弛豫和相变;(10)生物体系;(11)工业中的应用;(12)在理论和实验中的发展。

在这次会议上宣读的论文中,有我国穆斯堡尔谱学工作者的研究报告30多篇,其中有不少论文是属于前沿性的基础研究,受到与会国外同行的重视。

(薛祖)