

GaAs/AlGaAs 多量子阱结构的光吸收谱和横向光电流谱*

滕 达 徐仲英 庄蔚华 王守武

(中国科学院半导体研究所)

1989年1月23日收到

研究了 MBE GaAs/AlGaAs 多量子阱结构的横向光电流谱和光吸收谱。在光电流谱中观测到多种允许和禁戒的激子吸收峰以及一个阱中受主态至 $n = 1$ 电子态的非本征吸收峰。确定出 5 个空穴子带至 2 个电子子带的跃迁以及这些子带的间距。采用简单带方势阱模型并取参数 $Q_c = 0.6$, $m_e = 0.0665$, $m_h = 0.45$ 和 $m_l = 0.12$ 的计算结果与实验数据符合得相当好。将光吸收谱与光荧光谱进行了比较。

主题词 量子阱, 横向光电流, 光吸收

一、引言

半导体量子阱和超晶格结构为新一代半导体电子器件、光电子器件的研究开辟了广阔的领域, 特别是其以本征激子跃迁为主导的特性, 具有重要的应用前景。近年来人们已用激发谱^[1,2] 和外加电场垂直于异质界面的纵向光电流谱^[3] 等多种方法研究了 GaAs/AlGaAs 多量子阱 (MQW) 结构中的受限量子态和激子吸收, 并拟合出重要的能带参数——导带跃变与带隙差之比 $Q_c = \Delta E_c / \Delta E_g$ 及重、轻空穴有效质量等。近期多数实验结果倾向于 $Q_c = 0.6$ 而不是早期由吸收谱确定的 $Q_c = 0.85$, 一些作者亦根据禁戒跃迁 ($\Delta n \neq 0$) 等对重、轻空穴有效质量作较大修正^[1,3]。本文报道: (1) 用透射谱观测 GaAs/AlGaAs MQW 结构的激子吸收峰, 通过将激子吸收峰与光荧光谱中相应的激子发光峰能量相比较, 证实一般吸收峰能量均高于发光峰能量, 其主要原因是阱宽层内扰动的存在和电子向子带底的有效弛豫。样品质量越差, 此能量差越大。(2) 在横向光电流谱中, 观测到多个允许的和禁戒的跃迁以及一个由阱中受主态至 $n = 1$ 电子态的非本征吸收。用简单带理论(不考虑重、轻空穴耦合及电场影响)对实验结果进行拟合, 证实取 $Q_c = 0.6$ 较合理, 当取 GaAs 中电子、重空穴和轻空穴有效质量分别为 $m_e = 0.0665$ 、 $m_h = 0.45$ 和 $m_l = 0.12$ 时, 能很好地解释实验观测到的各激子吸收峰。

* 国家自然科学基金资助项目。

二、实 验

样品由国产 MBE 系统生长, 均不故意掺杂, Al 组份 x 值和阱宽 L_w 由生长条件确定。透射谱样品局部刻蚀掉衬底及 GaAs 缓冲层, 选择腐蚀液为 $H_2O_2 + NH_4OH$, 使 pH 值约为 7。横向光电流样品, 为了获得平行于多层异质界面的电场, 须制备两个间距为 2 mm 的条形 In 电极。在氢气氛中, 450°C 下扩散 In 至 GaAs 缓冲层, 形成欧姆电极。

透射实验以 400 W 碘钨灯为光源, 光束聚在样品上, 透射光斑经透镜成像在 Spex 1403-0.85 m 双光栅单色仪的入射狭缝上, 分光后由 GaAs 阴极光电倍增管接收。横向光电流谱以 400 W 碘钨灯为光源, 经 WDG-30 单色仪分光后照在样品上。通过光电流取样电路和锁相放大器对光电流取样和放大, 并用 X-Y 记录仪记录。斩波器频率为 26 Hz。测量中样品电极两端加直流电压 5—20 V, 相应的电场强度为 25—100 V/cm, 可知电场极弱。10 K 以上的变温测量采用 Air product 公司的 CS-202 低温制冷器。

三、实验结果和讨论

1. 光吸收谱

图 1 给出 1# 样品 ($x = 0.2$, $L_w = 70 \text{ \AA}$, 20 周期) 11 K 光荧光谱 (a) 和归一化透射谱 (b)。图 1(a) 中 1.574 eV 峰是 $n = 1$ 重空穴激子发光 E_{11h} , 半宽为 8.7 meV; 1.564 eV 峰是阱中受主束缚激子发光 $A^0 - E_{11h}$, 此峰半宽 11 meV, 相对于 E_{11h} 峰略有饱和, 其能量比 E_{11h} 低约 10 meV, 约在 30 K 时发生热猝灭; 1.546 eV 峰是 $n = 1$ 电子至阱中心受主态发光 ($e - A^0$), 该峰强度最弱, 半宽约 20 meV, 有明显的饱和, 约在 70 K 时热猝灭, 其能量与理论计算的阱中心受主(可能是残留的碳)发光相符。我们用改变激发功率、激发波长和温度的手段, 以及采用两种入射方式(激光由样品顶盖层入射和激光从衬底方向经腐蚀孔射至 AlGaAs 限制层), 对上述光荧光谱结构进行了较深入的实验研究, 并与理论计算结果相比较, 得出了如上的指派。详细的实验结果及讨论已另文报道^[4]。图 1(b) 中 1.579 eV 峰是 E_{11h} 吸收峰, 半宽 11.8 meV, 可知激子吸收能量高于发光约 5 meV。图 2 给出 2# 样品 ($x = 0.3$, $L_w = 100 \text{ \AA}$, 100 周期) 11 K 光荧光谱 (a) 和归一化透射谱 (b)。图 2(a) 中 1.548 eV 峰为 E_{11h} , 半宽 7.7 meV。图 2(b) 中出现了强且尖锐的 E_{11h} 吸收 (1.549 eV, 半宽约 8.7 meV) 和 $n = 1$ 轻空穴激子吸收 E_{11l} (1.559 eV)。一般使量子阱中准 2 维激子吸收与发光能量不同的因素有下列几种: (1) 应变的影响: 光荧光和透射谱是分别在刻蚀掉衬底之前和之后进行的, 两者之间样品应力发生变化, 通常异质结晶格失配应变会使窄带隙材料的带隙增大而宽带隙材料的带隙减小。Weisbuch 等^[5] 在 GaAs/AlGaAs MQW 样品的透射谱中, 观测到 E_{11h} 和 E_{11l} 等吸收峰比光荧光谱中的发光峰能量低约 1.5 meV, 并把此移动归结为应变的影响。(2) 强吸收(如激发谱)中二维子带上 $k_y = 0$ 和 $k_y \neq 0$ 的态都可发生垂直或有声子协助的斜跃迁, 而发光过程中, 具有较高能量的电子 ($k_y \neq 0$) 快速弛豫到子导带底

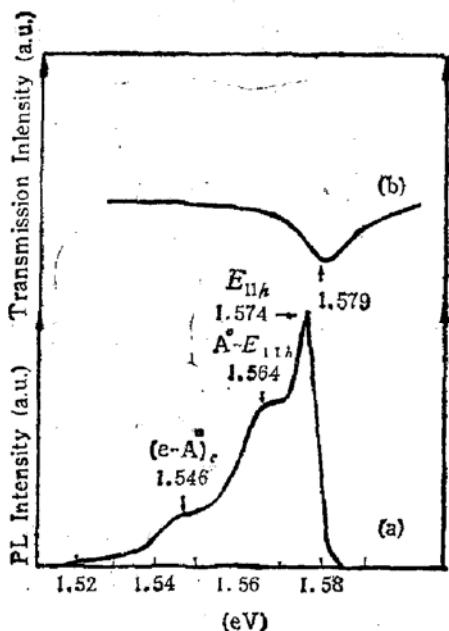


图1 1#样品($x=0.2$, $L_w=70\text{ \AA}$, 20周期)在11 K下的光荧光谱(a)和归一化透射光谱(b)

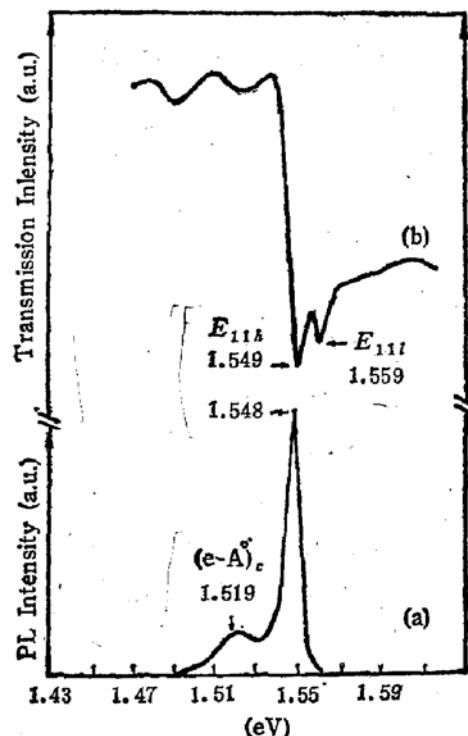
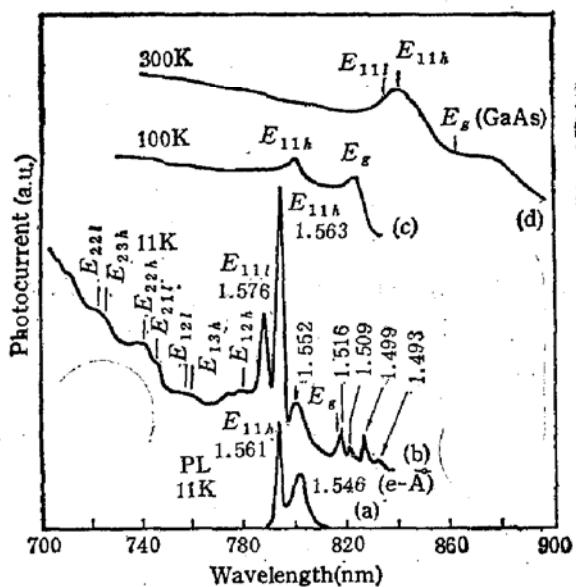


图2 2#样品($x=0.3$, $L_w=100\text{ \AA}$, 100周期)在11 K下的光荧光谱(a)和归一化透射光谱(b)

($k_h=0$)后与子价带顶的空穴复合发光。(3)由界面不平整引起阱宽扰动, 对应于阱宽较大和较小的激子吸收都可发生, 而在低温下这冲二维激子倾向于移动至最低能位置(L_w 最大处)再发光。根据上面的分析, 对于我们的实验, 由于光荧光和透射谱都是在刻蚀掉衬底后进行的, 可以认为只有因素(2)和(3)起作用。将1#和2#样品比较可知, 由于1#样品阱宽较窄, 界面不平的影响更明显, 此外周期数也小, 在最初生长的阱里残留杂质多、界面不平度大, 这些不利条件使其激子吸收能量高于发光约5 meV, 轻空穴激子也未能观测到。

2. 横向光电流谱

光电流技术与光吸收实验比较, 具有灵敏度高、设备简单(不需要探测器)、不用刻蚀衬底等优点, 但需制备电极。Miller等人^[6]已经证明, 光电流实验的机理与电场下的光吸收过程是等价的; 对于量子阱材料, 当外加电场平行于多层异质结界面时, 电场不影响生长方向上形成的量子受限, 电场仅对与库仑作用有关的类氢束缚作用产生影响, 因此这是一种类似于体材料在外加电场下吸收的横



向 Stark 效应。在这种横向电场作用下，量子阱材料的光电流谱主要表现是激子吸收峰的展宽。对于 GaAs/AlGaAs MQW 材料，激子峰淬灭所需要的场强 $\sim 4 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 。在本实验中，由于电场强度 $\leq 100 \text{ V/cm}$ ，是极弱的，可以忽略电场的影响。图 3 给出 3# 样品 ($x = 0.18$, $L_w = 70 \text{ \AA}$, 10 周期) 11 K 光荧光谱 (a)，及 11 K、100 K 和 300 K 光电流谱 (b)、(c) 和 (d)。图 3(b) 中观测到非常强且尖锐的 $n = 1$ 重空穴激子吸收峰 E_{11h} (1.563 eV) 和 $n = 1$ 轻空穴激子吸收峰 E_{11l} (1.576 eV)；高能端还出现了 5 个以上高序数 ($n \geq 1$) 本征激子吸收峰 (允许和禁戒跃迁)；在 E_{11h} 能量以下，观测到 1.552 eV 的量子阱中非本征吸收峰，我们认为该峰为阱中受主态到 $n = 1$ 电子的吸收跃迁。虽然在 11 K 时，大部分受主并未热致电离，但残留的施主仍可对受主进行补偿，即施主上的电子几乎全部被受主接收，1.552 eV 吸收峰就是由这些电离受主态的光吸收引起的。再低能端还观测到来自 GaAs 缓冲层 (体 GaAs) 的吸收峰。图 3(b) 上 E_g 标出 11 K 时 GaAs 带隙能量；1.516 eV 峰为体 GaAs 自由激子吸收峰；1.509 eV 峰为缺陷束缚激子 (d.x.)；1.499 eV 峰尚不能确定其来源，可能与异质结界面有关^[7]；1.493 eV 峰为碳受主至导带的光吸收。上述诸多光谱结构，充分说明了光电流技术具有相当高的灵敏度。由图 3(c) 和 (d) 可以看到，当温度升高至 100 K 以至 300 K 时，仍可看到非台阶状的 $n = 1$ 重空穴激子吸收，但其宽度明显增加。说明在量子阱中，准二维激子的有效 Bohr 半径减小，激子的振子强度增大约 8 倍，其跃迁几率大大增加，即使在室温下，也可观测到激子吸收。

为了对图 3(b) 中各本征激子吸收峰进行指派，采用简单带理论 (一维方势阱模型、不考虑轻、重空穴耦合及电场的影响)，计算了 $k_B = 0$ 处各子能级位置。此时由波函数 ψ 及 $\frac{1}{m^*} \frac{d\psi}{dz}$ 在界面连续条件可推出计算子能级的公式为

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \left(\frac{L_w}{\hbar} \sqrt{\frac{mE_n}{2}} \right) &= \sqrt{\left(\frac{V}{E_n} - 1 \right) \frac{m}{M}}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \\ -\operatorname{ctg} \left(\frac{L_w}{\hbar} \sqrt{\frac{mE_n}{2}} \right) &= \sqrt{\left(\frac{V}{E_n} - 1 \right) \frac{m}{M}}, \quad n = 2, 4, 6, \dots \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 L_w 是阱宽， \hbar 为普朗克常数除以 2π ， V 是势阱深度， E_n 为第 n 个子能级能量 (以阱底为参考点)， m 和 M 分别是 GaAs 和 AlGaAs 中载流子有效质量。对于电子考虑到导带非抛物形的影响，采用经验公式^[8]

$$m_e = 0.0665 + 0.0436 E_{nc} \times 10^{-3} + 0.236 E_{nc}^2 \times 10^{-6} - 0.147 E_{nc}^3 \times 10^{-9} \quad (2)$$

其中 E_{nc} 以 meV 为单位。计算中近似认为不同 n 值跃迁对应的激子束缚能均相等，激子束缚能随阱宽及 Al 组份 x 值的变化取自 Greene 的理论值^[9]。通过调节 Q_c 及轻、重空穴有效质量，对实验值进行了拟合。其中的三种拟合结果列于表 I 和表 II (E_{ii} 表示第 i 子导带电子与第 j 子价带空穴的激子，下标 h 和 l 分别表示重、轻空穴)。方法(1) 采用早期的 $Q_c = 0.85$ 及惯用的有效质量参数 $m_e = 0.0665$, $m_h = 0.45$ 和 $m_l = 0.088$ 。此法 $n = 1$ 重、轻空穴激子与实验值基本相符，但由于 Q_c 较大，使导带势阱深达 191 meV 而价带势阱只有 34 meV，因而 $n = 3$ 重空穴子能级 E_{3hh} 和 $n = 2$ 轻空穴子能级 E_{2ll} 均

表 I 3# 样品 ($x = 0.18$, $L_w = 70 \text{ \AA}$, 10 周期) 在 11 K 时各激子吸收峰能量的实验值和理论值

激 子	$E_{\text{实验}}$ (eV)	$E_{\text{理论}}$ (eV)		
		(1)	(2)	(3)
E_{11h}	1.563	1.565	1.561	1.560
E_{11l}	1.576	1.575	1.576	1.575
E_{12h}	1.594	1.585	1.590	1.591
E_{13h}	1.631	—	1.632	1.635
E_{12l}	1.637	—	1.636	1.635
E_{14h}	—	1.675	1.650	1.646
E_{13l}	1.664	1.686	1.665	1.662
E_{22h}	1.677	1.695	1.678	1.678
E_{13h}	1.719	—	1.720	1.722
E_{22l}	1.719	—	1.725	1.722

表 II 3# 样品 ($x = 0.18$, $L_w = 70 \text{ \AA}$, 10 周期) 在 11 K 时电子和空穴各子能级间距的实验值和理论值

子能级间距	$E_{\text{实验}}$ (meV)	$E_{\text{理论}}$ (meV)		
		(1)	(2)	(3)
$2e-1e$	83~88	110	88	87
$1lh-1hh$	13	11	15	16
$2hh-1lh$	15~18	9	14	16
$3hh-2hh$	37~42	—	42	44
$2lh-3hh$	0~6	—	5	0

出阱, 结果使与之有关的跃迁 E_{12l} , E_{13h} 和 E_{22l} 等均不出现, 这与实验结果不符。当调整 Q_c 为 0.6 而有效质量不变时, E_{3hh} 和 E_{2lh} 没有出阱, 计算结果比方法(1)有较大改进, 但与轻空穴有关的跃迁能量计算值明显高于实验值约 10 meV (表中未给出)。为此对轻空穴有效质量进行了修正, 方法(2)取 $Q_c = 0.6$, $m_e = 0.0665$, $m_h = 0.45$ 和 $m_l = 0.12^{[3]}$ 。计算结果表明理论值与实验值符合得相当好, 图 3(b) 中箭头标出用方法(2)求得的各激子吸收峰的位置。方法(3)采用 Miller 等^[1]由激发谱确定的一套新有效质量参数 $m_e = 0.0665$, $m_h = 0.34$ 和 $m_l = 0.094$, 并取 $Q_c = 0.6$ 。结果表明: 由于重空穴有效质量变轻, 其子能级向高能移动, 只有将阱宽修改为 $L_w = 75 \text{ \AA}$ 时, 才能得出较好的拟合结果 (见表 I 和 II)。由于样品参数 ($x = 0.18$ 和 $L_w = 70 \text{ \AA}$) 是由生长条件确定的, 具有一定误差, 所以仅根据本实验尚难判断方法(2)和(3)两套参数究竟哪个更符合实际情况。我们的实验支持 $Q_c = 0.6$ 以及在量子阱中重、轻空穴有效质量之差比在体材料中减小的结果。这与一些作者的结论相一致^[1,3]。理论工作表明^[10]: 只有在 $k_{\parallel} = 0$, 重、轻空穴之间是不耦合的, 一旦离开 $k_{\parallel} = 0$, 重、轻空穴将耦合在一起, 随着 k_{\parallel} 深入到子带之中, 将会逐渐背离带间光跃迁中量子数 $\Delta n = 0$ 的选择定则。我们推测本实验中重、轻空穴有效质量差减小, 以及观测到较多 $\Delta n \neq 0$ 跃迁, 可能与重、轻空穴耦合及 $k_{\parallel} \neq 0$ 的影响有关。

四、结 论

在 GaAs/AlGaAs MQW 结构中,一般激子吸收峰能量均高于相应的发光能量,其主要原因是阱宽层内的扰动和电子向子带底的有效弛豫。样品质量越差此能量差越大。为获得较满意的吸收谱,除要求样品质量好外,还需有足够大的周期数。在 70 \AA GaAs/ 90 \AA $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ MQW 结构的横向光电流谱中观测到多种允许和禁戒的重、轻空穴激子吸收峰及一个阱中受主态至 $n = 1$ 电子态的非本征吸收峰。由允许和禁戒跃迁确定出 5 个空穴子带至 2 个电子子带的跃迁以及这些子带的间距。采用简单带方势阱模型并取 $Q_c = 0.6$, $m_e = 0.0665$, $m_h = 0.45$ 和 $m_l = 0.12$ 的计算值与实验值符合得相当好。在量子阱中重、轻空穴有效质量差减小以及出现较多 $\Delta n \neq 0$ 跃迁,可能与重、轻空穴耦合及 $k_{\parallel} \neq 0$ 的影响有关。

本所七室吴荣汉、曾安等同志在选择腐蚀技术上给予大力帮助;与本所夏建白同志作了有益讨论,在此谨表感谢。

参 考 文 献

- [1] R. C. Miller, D. A. Kleinman and A. C. Gossard, *Phys. Rev.*, **B29**, 7085(1984).
- [2] R. C. Miller, A. C. Gossard, D. A. Kleinman, and O. Munteanu, *Phys. Rev.*, **B29**, 3740(1984).
- [3] K. Yamanaka, T. Fukunaga, N. Tsukada, K. L. I. Kobayashi and M. Ishii, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 940 (1986).
- [4] Teng Da, Xu Zhongying Zhuang Weihua Wangshouwu to be published in Chinese Journal of Infrared Research **8B**(1989); 红外研究, **7A**, 5-6, 349(1988).
- [5] C. Weisbuch, R. C. Miller, R. Dingle, A. C. Gossard and W. Wiegmann, *Solid State Commun.*, **37**, 219(1981).
- [6] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus, *Phys. Rev.*, **B32**, 1043(1985).
- [7] 庄蔚华, 滕达, 徐仲英, 许继宗, 陈宗圭, 半导体学报, **8**, 90(1987).
- [8] R. M. Kolbas, Ph. D. Thesis, University of Illinois (1979).
- [9] R. L. Greene and K. K. Bajaj, *Solid State Commun.*, **45**, 831(1983).
- [10] 汤蕙, 黄昆, 半导体学报, **8**, 1(1987).

Absorption Spectra and Transverse Photocurrent Spectra of GaAs/AlGaAs Multiple Quantum Wells

TENG Da, XU Zhongying, ZHUANG Weihua and WANG Shouwu

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

Transverse photocurrent spectra and absorption spectra of MBE GaAs/AlGaAs MQWs have been studied. The photocurrent spectra show various exciton peaks and an extrinsic absorption from acceptor levels in the wells to the $n=1$ electron subband. From both allowed and forbidden transitions, two electron and five hole subbands are determined. Our data are in excellent agreement with a square well calculation using $Q_e = 0.60$, $m_e = 0.0665$, $m_h = 0.45$ and $m_i = 0.12$. A comparison of absorption spectra with photoluminescence spectra has been made.

Key words QW, Transverse photocurrent, Photoabsorption