

# InGaAs/GaAs 应变量子阱的低温光伏谱\*

吴正云 王小军 余 辛 黄启圣  
(厦门大学物理系, 福建, 厦门, 361005)

**摘要** 用光伏谱方法研究了 InGaAs/GaAs 应变量子阱结构中各子能级间的光跃迁, 并与理论计算的结果进行了比较. 分析了光伏谱峰能量随阱宽与温度的变化, 并讨论了光伏谱峰强度的温度关系.

**关键词** 光伏谱, 应变量子阱, InGaAs/GaAs.

## 引言

在诸多的应变量子阱结构中, 高质量的应变 InGaAs/GaAs 量子阱和超晶格材料体系倍受重视<sup>[1,2]</sup>. 与 GaAs 量子阱相比, InGaAs 的禁带宽度小, 可以通过改变 In 的组分和量子阱的宽度, 获得制作适用于光纤通讯的激光器、探测器等材料, 因而在光电子技术中有广泛的应用前景.

目前已用多种实验手段研究了 InGaAs/GaAs 量子阱和超晶格材料的光学性质, 例如光致发光谱、光吸收谱、光电流谱、光调制反射谱等方法<sup>[3-5]</sup>. 但采用光伏(PV)谱研究 InGaAs/GaAs 应变量子阱和超晶格材料光电性质的报道还比较少<sup>[6,7]</sup>. 本文采用光伏谱方法, 不需要在样品上制备任何电极, 手段简单, 操作容易, 与其他较复杂的测量手段相比, 也能得到样品的许多光电性质信息.

## 1 实验

本文样品是在半绝缘 GaAs 衬底上用 MOCVD 方法生长的 InGaAs/GaAs 应变量子阱. 衬底温度为 580 °C, 样品含有 4 个阱宽分别为 4、7、12.2 和 16nm 的量子阱, 势垒宽度为 100nm. 阱中的 In 组分为 0.18, 样品的 In 组分由双晶衍射(DCD)测定, 阱宽由 DCD 和 TEM 方法测定, 样品虽为多量子阱, 因阱间势垒厚度大, 实际上由 4 个单量子阱组成.

光伏谱测量系统由光源、斩波器、双光栅单色仪、静电计管放大器、单色仪扫描控制器、锁相放大器、低温循环致冷机、IBM 486 微机组成.

## 2 结果和讨论

在不同的温度下, 测量了样品的光伏谱. 测量温度为 290、250、200、150、100、77、55K. 温度更低时, 光伏信号弱且谱形特征模糊.

\* 国家自然科学基金和福建省自然科学基金资助项目  
稿件收到日期 1996-04-19, 修改稿收到日期 1997-02-28

图 1 为样品在 77K 温度下的典型光伏谱, 具有明显的二维材料谱峰特征, 经与理论计算结果比较, 对各谱峰进行了指认. 图中各谱峰以 nmH 或 nmL 标记, 分别代表自导带第  $n$  个子能级到价带重空穴第  $m$  个子能级或到价带轻空穴第  $m$  个子能级的跃迁, 以 QW1 ~ QW4 分别代表阱宽为 16 ~ 4nm 的量子阱.

表 1 为样品在 77K 时各谱峰的实验值与相应子能级跃迁能量的理论计算值, 可以看出, 理论计算与实验值吻合得相当好. 阱宽较大的 QW1 的 11H、QW2 的 21H、22H、11L, 在实验中没有观察到, 显然是被其他宽量子阱的跃迁峰淹没了. 在图 1 中, 还可以看到光伏谱的台阶状结构, QW1 的 21H、22H 跃迁强度比  $1n \rightarrow 1m$  跃迁高出一个台阶. 对于 QW2, 我们只观察到 11H、12H 跃迁, 没有观察到 21H 等跃迁, 而且强度较小, 这可能是量子阱的生长质量较差, 阱内复合中心较多而引起. 计算表明, QW3 和 QW4 由于阱宽较小, 处于阱中的子能级少, 只可能有 11H、12H、11L 跃迁. 实验中的确也只观察到这两个量子阱很强的 11H 跃迁峰, 而在较高能量位置上有两个不同于激子跃迁峰谱形的强度较低的宽谱峰, 其能量位置与这两个量子阱的 11L 能量计算值相符. 由于样品 1 属于  $\text{InGaAs}$  类量子阱, 电子及轻空穴各被限制在  $\text{InGaAs}$  和  $\text{GaAs}$  层, 在实空间距离, 它们之间的跃迁具有强度较弱的带-带跃迁谱形, 因而这两个谱峰很可能为 QW3、QW4 的 11L 跃迁. 在接近  $\text{GaAs}$  禁带边, 光伏信号的凹峰可能是由于  $\text{InGaAs}$  和  $\text{GaAs}$  界面的深能级导致光伏信息淬灭<sup>[8]</sup>而引起的.

表 1 77K 温度下实验与理论跃迁能量值的比较(单位: eV)

Table 1 Experimental and theoretical transition energies (in eV) at 77K

	11H		12H		21H		22H		11L	
	实验	计算	实验	计算	实验	计算	实验	计算	实验	计算
QW1	1.328	1.327	1.340	1.335	1.376	1.372	1.385	1.380	-	1.415
QW2	1.340	1.337	1.346	1.348	-	1.400	-	1.411	-	1.425
QW3	1.364	1.363	-	-	-	-	-	-	1.438	1.438
QW4	1.414	1.408	-	-	-	-	-	-	1.483	1.478

从图 1 中还可以看到, 跃迁强度较大的谱峰(例如 11H 或 22H), 都属于  $\Delta n = 0$  的允许跃迁, 但是, 由于表面电场的作用, 也出现  $\Delta n \neq 0$  的原来是禁戒跃迁的 PV 峰, 例如 12H、21H 跃迁, 其相应的跃迁强度较小, 与理论计算结果一致<sup>[9]</sup>.

图 2 表示样品中各量子阱的 11H 跃迁能量(77K) 与阱宽  $w_d$  的关系, 图中实线是以导带带阶因子  $Q_c = 0.70$  为拟合参数的理论计算结果. 从图中可以看到, 理论值能较好地拟合实验结果, 说明拟合采用的  $Q_c$  值是合适的, 这也与其他作者的结论相符<sup>[1, 10, 11]</sup>.

实验观察到各光伏谱峰能量随温度明显变化, 结果如图 3. 可以看出, 随着温度降低, 样品光伏谱中的各跃迁谱峰都向高能方向移动. 作为比较, 图中还示出了  $\text{GaAs}$  体材料带隙能量随温度变化的计算值. 尽管 QW1 及 QW4 量子阱宽度不同, 但其 11H 跃迁峰能量随温度变化的斜率非常相近. 表明导带带阶因子  $Q_c$  及应变可能与温度无关, 这与其他作者的结论

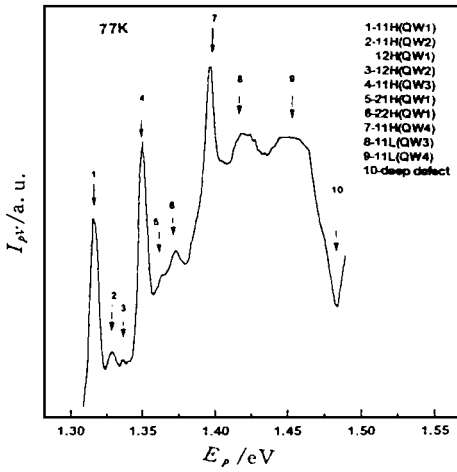


图1 样品低温(77K)光伏谱  
Fig.1 PV spectrum of the sample at 77K

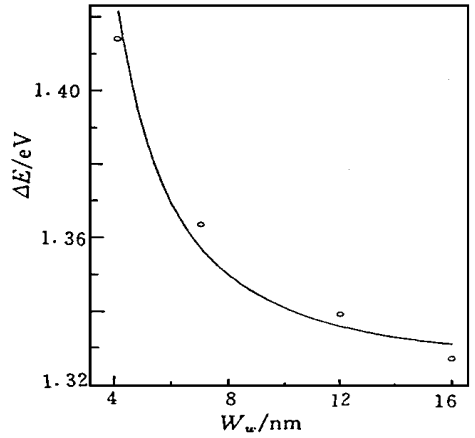


图2 样品各量子阱中 11H 跃迁  
能量与阱宽的关系  
Fig.2 The 11H transition energy vs  
the quantum well width

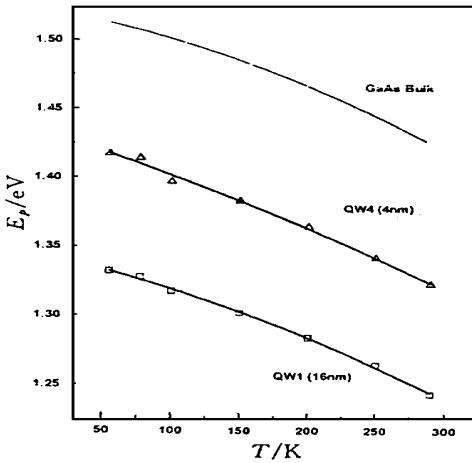


图3 样品 QW1 与 QW4 量子阱  
11H 跃迁能量与温度关系  
Fig.3 The 11H transition energy of QW1  
and QW4 vs the temperature

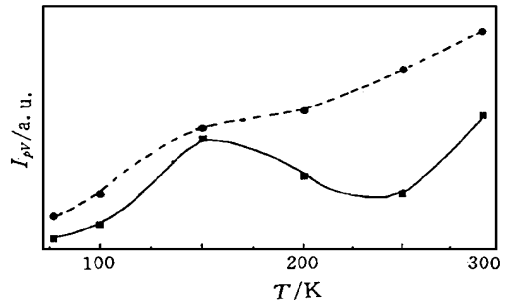


图4 QW1(阱宽为 16nm) 的 11H 谱峰强度与温  
度的关系,虚线为阱宽为 5nm 的单量子阱样品的  
11H 谱峰强度  
Fig. 4 The 11H transition intensities of QW1  
( $W_d=16\text{nm}$ ) and a single quantum well  
( $W_d=5\text{nm}$ ) vs the temperature

实验还观察到光伏强度与温度的关系,图4是 QW1 量子阱的 11H 谱峰强度的温度关系,可以看到,在室温附近较高温区,谱峰强度随温度下降而减小;在中间温区(约 150~250K),随温度下降,谱峰强度反而增大;在低于 150K 的较低温区,谱峰强度又随温度下降而减小。

光伏响应涉及的因素较多,除与光吸收谱相关之外,还包含光生载流子在电场(表面电场及内建电场)作用下的输运(漂移、扩散)及通过表面态和深中心复合的信息,样品两端测到的开路电压,其幅度首先涉及光生载流子(电子与空穴)的产生率、它们在实空间的分离、以及最终在样品前后表面的积累.如果忽略光生载流子输运过程中的损失,实验光伏谱似应为光吸收谱的复印图.由于二维激子的特性,这时的光伏谱即使在室温条件下,也可能显示出与光吸收谱相类似的各量子能级之间光跃迁的激子谱峰及台阶状态密度分布.由于光伏谱比光吸收谱更为复杂,还应考虑以下几点.(1) 激子离化:经光吸收产生的激子只有先分离为电子及空穴,才可能对光伏响应有贡献.(2) 热激发:势阱中光电子和空穴必须先以热激发的方式跨越量子阱势垒,然后在电场作用下才能可能到达样品的前后表面,通过热激发跨越势垒的载流子数目正比于  $\exp(-\Delta E/kT)^{[12]}$  ( $\Delta E$  为带阶),与温度有较强依赖关系,随温度下降,这一效应减弱,因而光伏响应变小.(3) 隧穿效应:势阱中的光生电子与空穴隧穿通过势垒,最终到达前后表面.温度下降时,由于声子散射减弱,隧穿的几率增大,因此,隧穿效应可使光伏响应随温度下降而有所增强.(4) 位移效应<sup>[13]</sup>:样品的势垒较厚时,载流子隧穿几率很小,但在表面电场作用下,光生电子及空穴向势阱内两端位移,可能形成正负电荷的积累,产生电势差.随温度下降,热运动减弱,积累增加,使光伏效应有所增大.很明显,阱宽增大,有利于正负电荷的积累,使测得的光伏增大.

从图 4 可知,在较高温度区( $> 250\text{K}$ ),所有量子阱的谱峰强度均随温度的下降而减小,这说明光电子和空穴跨越量子阱势垒的热激发机制在此温区可能是主要的,它使光伏响应随温度降低而减弱.在中温区( $150 \sim 250\text{K}$ ),隧穿和位移效应都可能使光伏强度随温度降低而增大,但对我们的样品,因为阱间势垒厚度大,可以忽略隧穿效应的作用.在考虑位移效应的作用时,随着温度下降,电子与空穴在阱内两端的积累增强,使光伏响应增大,同时,随阱宽的减小,位移效应的作用将减弱.对 QW2~QW4,实验得到其光伏强度在中温区的变化逐渐趋于平缓.为提高测量的准确性,我们测量了阱宽为 4nm 的单量子阱样品的 11H 光伏强度的温度关系,结果如图 4 中虚线.可以看到,由于阱宽变小,位移效应的影响减弱,随温度下降,光伏强度的中温区几乎不再出现.温度进一步降低( $< 150\text{K}$ ),谱峰强度又随温度降低而减弱,这可能涉及激子的离化,因为在低温下,如果设想光吸收产生的激子只有很少一部分分离为电子及空穴,光伏强度应急剧减弱,谱峰结构也可能变得模糊.上述有关谱峰强度与温度关系的讨论,还有待于深入.

### 3 结论

对 InGaAs/GaAs 量子阱在不同温度条件下进行了光伏谱研究,结合理论计算对样品光伏谱的诸多谱峰进行了指认,实验结果与理论计算吻合得相当好.

实验得到光伏谱跃迁谱峰能量随阱宽的变化,并通过理论拟合得到导带带阶因子  $Q_c$ .分析了各跃迁谱峰能量随温度的变化,通过与 GaAs 体材料带隙温度关系的比较,表明量子阱的应变和导带带阶因子  $Q_c$  与温度基本无关,这与其他方法得到的结果一致.

定性地分析了光伏谱强度随温度的变化,认为光电子和空穴跨越量子阱势垒的热激发、激子离化和位移效应可能是光伏强度随温度变化的主要因素,它们各在不同的温区起主要作用.

本文研究结果表明光伏谱方法可以成为研究低维材料电子态及其他性质的有效方法。

## REFERENCES

- 1 Marzin J Y, Charasse M N, Sermage B. *Phys. Rev.*, 1985, **B31**: 8298
- 2 Anderson, Chen Z G, Kulakovskii V D, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**: 725
- 3 Shen W Z, Tang W G, Shen S C, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**: 2278
- 4 Chen J H, Chi W S, Huang Y S, *et al. Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**: 1420
- 5 Yu P W, Sanders G D, Evans K R, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**: 2230
- 6 Hua B Y, Fortin E, Roth A P. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**: 1062
- 7 Fafard S, Fortin E, Roth A P. *Can. J. Phys.*, 1991, **69**: 246
- 8 Wang J, Gong D, Lu F, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**: 1782
- 9 夏建白, 黄 昆. 物理学报(XIA J B, HUANG K. *Acta Physica Sinica*), 1988, 1, 1
- 10 Ji G, Huang D, Reddy U K. *et al. J. Appl. Phys.*, 1987, **62**: 3366
- 11 Pan S H, Shen H, Hang Z, *et al. Phys. Rev.*, 1988, **B 38**: 3375
- 12 刘恩科, 朱秉升, 等. 半导体物理学, 北京: 国防工业出版社(LIU E K, ZHU B S, *et al. Semiconductor Physics*, Beijing: National Defence Industry Publishing House), 1981, 256
- 13 朱文章, 陈 朝, 刘士毅, 等. 半导体学报(ZHU W Z, CHEN C, LIU S Y, *et al. Chin. J. Semiconductors*), 1992, **13**: 405

## LOW TEMPERATURE PHOTOVOLTAIC SPECTRA OF STRAINED InGaAs/ GaAs QUANTUM WELL\*

WU Zheng-Yun WANG Xiao-Jun YU Xin HUANG Qi-Sheng

(Department of physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract** The low temperature photovoltaic (PV) spectroscopy was used to study the optical transitions between the subbands of strained InGaAs/GaAs quantum well. The experimental results are well consistent with that of theoretical calculation. The dependence of PV peak energy on well width and temperature was analyzed and the PV intensity as a function of temperature was discussed.

**Key words** photovoltaic spectroscopy, strained quantum well, InGaAs/GaAs

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and the Natural Science Foundation of Fujian Province of China  
Received 1996-04-19; revised 1997-02-28