

GaAs/AlGaAs 多量子阱光生电压谱研究*

朱文章

(集美航海学院物理室, 厦门 361021)

沈颢华

(厦门大学物理系, 厦门 361005)

(1994年11月14日收到)

在18—300 K温度范围内,研究了用半绝缘体 GaAs 作为衬底的 GaAs/AlGaAs 多量子阱的光生电压谱. 共观测到 11H, 11L, 22H, 22L, 33H, 33L, 13H 和 31H 等多种允许和禁戒的激子吸收峰. 低温下的光生电压谱清晰地反映了多量子阱台阶式的状态密度分布. 认为光生电压谱也可以作为一种判断多量子阱和超晶格外延生长质量的方法. 还讨论了光生电压随温度的变化和光生电压效应的机理.

PACC: 7240; 7340L

1 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和光电子器件的开发和研究开辟了广阔的前景,近年来一直是半导体领域中最活跃的前沿课题. 量子阱和超晶格具有两个重要特征:一是导带和价带分裂成子能带,电子和空穴的状态密度分布成台阶式形状^[1];二是以本征激子跃迁过程为主导^[2,3],激子在室温下仍保持稳定. 这两个特征使得量子阱和超晶格具有一系列优于体材料的光学和电学性质. GaAs/AlGaAs 量子阱和超晶格在光吸收谱、光电流谱、光致荧光光谱及激发光谱、调制光谱等方面已经有很多研究工作^[4-6],但关于光生电压特性的研究报道却很少^[7]. 以半绝缘体 GaAs 作为衬底的 GaAs/AlGaAs 多量子阱的光生电压谱研究尚未见报道,在半绝缘衬底上外延的多量子阱用光电流谱方法是无法研究的. 光生电压特性不仅反映了量子阱和超晶格光谱响应的能力,而且也能提供子能带结构及其光跃迁和载流子输运等方面的信息,它的研究对量子阱和超晶格的实际应用是很有意义的. 本工作采用电容耦合的方法,测量了用半绝缘体 GaAs 作为衬底的 GaAs/AlGaAs 多量子阱在不同温度下在光生电压谱和光生电压随温度的变化,研究量子阱的二维状态密度分布和光跃迁,并对光生电压效应机理进行探讨.

2 实验样品与测量结果

实验样品是用分子束外延技术(MBE)生长的,有两种结构,衬底均为掺铬半绝缘体

* 福建省自然科学基金资助的课题.

GaAs, 先外延一层 GaAs 缓冲层, 在缓冲层上生长 GaAs/AlGaAs 多量子阱. 样品 A 量子阱为 GaAs(6 nm)/Al_{0.4}Ga_{0.6}As(10 nm), 30 周期. 样品 B 量子阱为 GaAs(6 nm)/AlAs(10 nm), 30 周期. 缓冲层和量子阱均无有意掺杂.

测量装置采用自建的微机控制光生电压谱自动测量系统, 整个系统结构框图如图 1 所示. 该系统以一台 IBM-PC/AT 286 计算机作为测量控制、数据获取和数据处理中心, 采用扫描控制器控制步进电机改变光栅单色仪的输出波长, 可以以 0.1 nm 的波长间隔逐点扫描进行测量, 具有较高的精度.

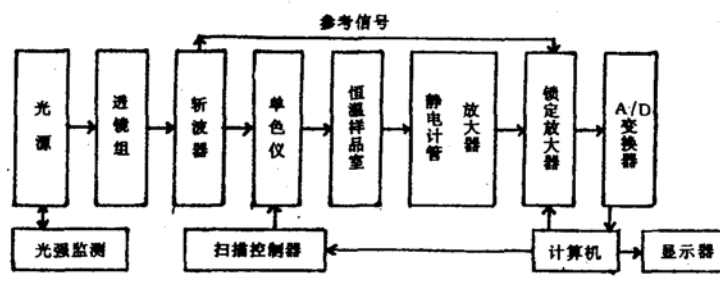


图 1 计算机控制光生电压谱自动测量系统框图

采用电容耦合方法测量, 即样品的光生电压通过电容器高阻耦合输出. 我们在样品两面各贴一片云母片, 构成一电容器, 电极压在云母片上. 为了使入射光能够大部分照射在样品上, 前面电极采用导电玻璃, 后面电极用铜片. 用溴钨灯作光源, 由溴钨灯发出的光经透镜聚焦后, 通过斩波器形成矩形调制光进入光栅单色仪, 从单色仪出来的光经过滤光片后(该滤光片是为了消除二级光谱)成为单色调制光, 该单色光通过导电玻璃和云母片后照射在样品上, 产生光电压. 光生电压通过一高阻到静电计管放大器, 经静电计管放大器实现阻抗变换后, 由锁定放大器测出. 静电计管控制栅极所接的高阻 $R \geq 10^{12} \Omega$, 耦合电容与输入电阻构成的 RC 时间常数远大于斩波器的周期, 所以光生电压信号的波形是完好的方形波, 这样可保证锁定放大器测出的是定态光生电压. 锁定放大器测出的光生电压通过 A/D 卡变换后送入计算机, 计算机实时采样光生电压信号, 并在显示器上显示波长及对应的光生电压, 同时自动描绘出光生电压谱曲线. 测量完一个波长的光生电压, 计算机通过扫描控制器改变光栅单色仪的输出波长, 进行下一个波长的测量. 低温的获得是通过美国 Air Products 公司制造的 IR02A 型氦气循环低温机和温度控制器来实现.

光生电压谱测量是在等光子流密度条件下进行的, 即要求照射在样品上的不同波长的光具有相同的光子流密度, 这样测出的光生电压谱才能准确反映被测样品对不同波长的光的反应灵敏度. 考虑到溴钨灯发出的光的光强与波长有关, 测量前先用真空线性热电堆对测量系统进行等光子流密度校对, 考虑到导电玻璃和云母片对不同波长的光的吸收可能有差异, 因此校对时把导电玻璃和前云母片一起装上进行校对, 校对值输入计算机, 用于校准光生电压谱.

在 18—300 K 温度范围内, 选择 8 个温度点为 18, 40, 70, 100, 150, 200, 250 和 300 K, 测量 GaAs/AlGaAs 多量子阱在不同温度下的光生电压谱. 样品 A 和 B 的光生电压谱如

图 2, 3 所示. 还选择 4 个入射光波长为 0.68, 0.72, 0.75 和 0.78 μm , 测量在入射光波长不变的条件下, 光生电压随温度的变化, 样品 A 和 B 光生电压随温度变化的曲线分别如图 4, 5 所示.

3 实验结果分析与讨论

从图 2, 3 中可以看出, 在样品 A 中观测到 6 个激子跃迁峰, 在样品 B 中也观测到 6 个激子跃迁峰. 为了辨认各个激子峰, 我们采用 Kronig-Penney 模型的新形式^[8]和 Bastard 边界条件^[9], 计算了样品 A, B 中势阱导带子能带和价带子能带的位置. 对于激子束缚能

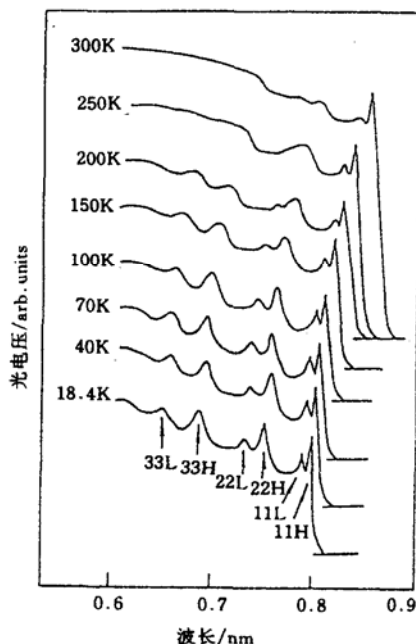


图 2 样品 A 多量子阱在不同温度下的光生电压谱

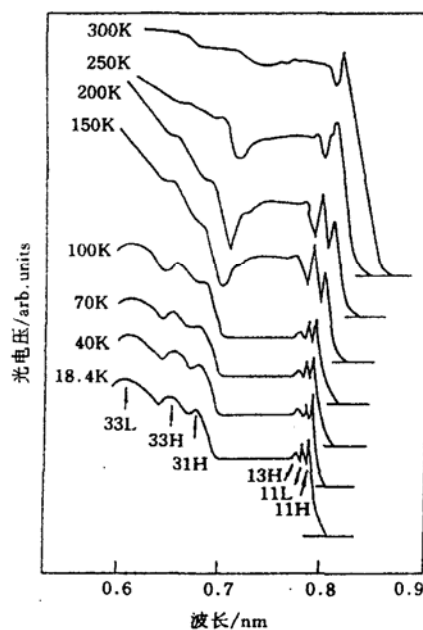


图 3 样品 B 多量子阱在不同温度下的光生电压谱

的考虑, 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 组分 x 的变化采用 Greene 的理论计算值^[10], 对样品 A 取重空穴和轻空穴激子束缚能均为 10 meV, 对样品 B 取重空穴激子束缚能为 10.5 meV, 轻空穴激子束缚能为 12 meV. 样品 A 中的 6 个激子峰分别指认为 11H, 11L, 22H, 22L, 33H 和 33L, 如图 2 所示. 在 200 K 以下温度, 这 6 个激子峰都清晰可辨, 而在室温下只能分辨出 11H, 11L 和 22H 3 个激子峰. 样品 B 中的 6 个激子峰分别指认为 11H, 11L, 13H, 31H, 33H 和 33L, 如图 3 所示. 在 100 K 以下温度, 这 6 个激子峰都清晰易辨, 而在室温下只能分辨出 11H 一个激子峰. 在 150—200 K 温度范围内, 在入射光能量为 1.75 eV 附近, 光生电压急剧下降, 形成一个较尖锐的凹谷. 这个凹谷只在少数样品中观测到, 似乎与样品的表面腐蚀处理有关. 凹谷可能是由表面态光吸收形成的, 这种吸收产生的光生载流子在表面复合掉, 对光生电压无贡献. 1.75 eV 接近 $n=2$ 的激子吸收能量, 可能这就是为什么在该样品中没有观测到 $n=2$

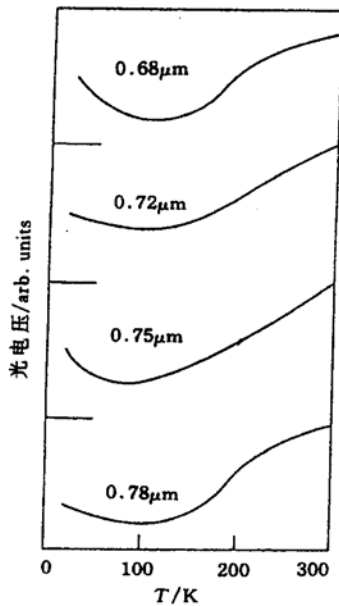


图 4 固定 4 个入射光波长, 样品 A
光生电压随温度的变化

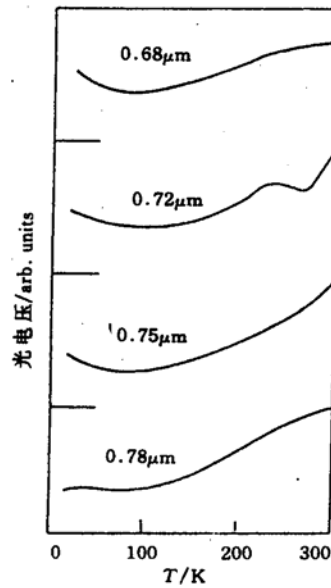


图 5 固定 4 个入射光波长, 样
品 B 光生电压随温度的变化

的激子光跃迁峰的原因。

从图 2, 3 中可以看出, 光生电压随入射光子能量的增大(波长减小)呈台阶式上升, 并且每一台阶处都伴有激子峰, 不难判定, 第 n 个台阶对应于第 n 支价带子带到第 n 支导带子带的光跃迁。低温下光生电压谱的台阶状结构尤为清楚, 直观地反映了量子阱台阶式的二维状态密度分布。光生电压与光生载流子密度成正比, 而光生载流子密度正比于光吸收系数。如果 GaAs/AlGaAs 界面完好无缺陷, 即 GaAs/AlGaAs 界面不存在深能级复合中心, 光生载流子没有被复合损失掉, 则光生电压 V_{ph} 正比于光吸收系数 α , 又光吸收系数正比于光跃迁联合状态密度 ρ_{vc} , 所以 V_{ph} 正比于 ρ_{vc} , 即光生电压谱反映了量子阱的状态密度分布。图 2 中光生电压谱的 3 个台阶结构很理想, 说明 GaAs/AlGaAs 界面较完好, 界面态密度很小, 光生载流子通过界面缺陷的复合可以忽略。而样品 B 中 GaAs/AlGaAs 界面的完整性则要差一点。因此, 通过测量光生电压谱也可以判断分子束外延生长的质量。因为光生电压谱测量是非破坏性的, 即对被测样品无任何影响, 因此, 光生电压谱方法很适合于作为量子阱和超晶格外延生长的质量监测手段。

光生电子和空穴只有通过某种方式分开或通过某种方式输运分别到达样品的前后面, 形成正负电荷在空间上的分离, 才对光生电压有贡献。特别是光激发产生的激子只有在分离后, 才可能对光生电压有贡献, 即并非所有的光吸收跃迁都对光生电压有贡献, 这是光生电压谱与光吸收谱^[1, 11]不同之处。一系列不同温度下的光生电压谱不仅反映了光吸收跃迁, 而且包含有光生载流子输运和激子电离的信息。根据不同温度下激子峰高度变化不大这一实验现象, 可以猜测在本实验温度范围内, 温度对激子电离并非起决定性作用, 而表面势垒区电场对激子的电离可能起重要作用。

从图 4, 5 中可以看出, 光生电压与温度有关, 其变化趋势为: 从室温开始, 光生电压随温度下降而减小, 尔后光生电压随温度的变化趋于平缓, 到了 100 K 左右, 温度降低光生电压反而略有增大. 这是由于产生光生电压的两种光生电压效应与温度有关. 下面来讨论 GaAs/AlGaAs 多量子阱中两种光生电压效应的机理.

本实验样品是在半绝缘体 GaAs 衬底上外延 GaAs/AlGaAs 多量子阱, 不是 p^+-i-n^+ 结构. 多量子阱总厚度为 $30 \times (6 + 10) = 480 \text{ nm} = 0.48 \text{ }\mu\text{m}$, 而一般 GaAs 半导体表面势垒区厚度约有 $1 \text{ }\mu\text{m}$ 的数量级, 所以多量子阱都在表面势垒区内, 受表面势垒区电场的作用. GaAs/AlGaAs 量子阱的光生电压来自两种光生电压效应, 一是 GaAs 势阱中产生的光生电子和空穴被表面势垒区电场分离, 并以热激发的方式跨越势垒, 分别朝样品的前后表面运动, 形成正负电荷在空间上的分离而产生电压; 二是光生电子和空穴在 GaAs 势阱内由于“位移效应”而产生的光生电压. 位移效应是指光生电子和空穴被表面势垒区电场分离, 但仍被限制在势阱内, 结果在势阱内两端出现正负电荷的累积, 如图 6. 整个样品所产生的光生电压就是各个势阱电势差的迭加.

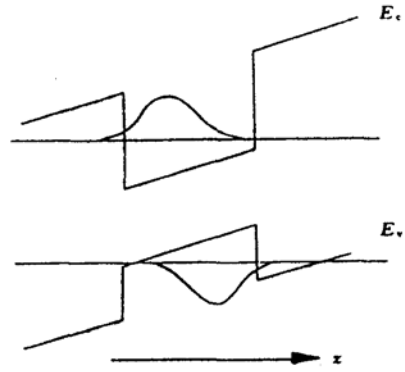


图 6 光生电子和空穴的位移效应

通过热激发跨越势垒的载流子数目正比于^[12] $\exp(-e\Delta E/kT)$, ΔE 为势垒高度, 对光生电子 $\Delta E = \Delta E_c$, 对光生空穴 $\Delta E = \Delta E_v$. 因此, 光生电子和空穴通过热激发方式跨越势垒而产生的光生电压 V_e 正比于 $\exp(-e\Delta E/kT)$, V_e 随温度下降而减小.

对于由位移效应而产生的光生电压, 可以把量子阱的每一个周期都看成一个平行板电容器, 电容器的正极板位于空穴波函数的平均值 z_h , 电容器的负极板位于电子波函数的平均值 z_e , 如图 6. 整个多量子阱系统可以看作是一系列平行板电容器的串联, 由位移效应产生的总的光生电压 V_s 就是这一系列电容器电压的和. 由于每个周期的量子阱都是等价的, 所以空穴与电子的位移 $z_h - z_e$ 可以看作相等, V_s 可写成

$$V_s = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{C} = \frac{z_h - z_e}{\epsilon_r \epsilon_0 S} \sum_{i=1}^N Q_i, \quad (1)$$

式中 Q_i 为第 i 个量子阱中的光生电子(或空穴)总电荷量, C 为量子阱对应的电容, ϵ_r 为 GaAs 材料的相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, S 为样品的面积, N 为多量子阱周期数. 如果入射光子能量小于 AlGaAs 禁带宽度, 即吸收只发生在 GaAs 势阱内, 则有

$$\sum_{i=1}^N Q_i = eI_0(1 - R)S(1 - e^{-Na\alpha}), \quad (2)$$

式中 e 为电子电量, I_0 为入射光强, R 为 GaAs 表面反射系数, α 为 GaAs 势阱吸收系数, a 为势阱宽度. 把(2)式代入(1)式得

$$V_s = eI_0(1 - R)(1 - e^{-Na\alpha}) \frac{z_h - z_e}{\epsilon_r \epsilon_0}. \quad (3)$$

V_s 随温度的变化主要表现在 $(z_h - z_e)$ 与温度的关系上. 温度降低, 载流子热运动减

弱, 位移效应增强, $z_h - z_e$ 变大, 所以 V_s 随温度下降而增大. 但 V_s 与温度的关系不如 V_e 与温度的关系强烈.

把上述对两种光生电压效应机理的讨论应用于分析图 4, 5 中光生电压随温度的变化, 可以得出, 从室温至 150 K 左右, 光生载流子通过热激发方式跨越势垒而产生的光生电压起主导作用, 而在 100 K 以下温度, 则是光生电子和空穴的位移效应产生的光生电压起主要作用.

4 结 论

光生电压谱方法是一种研究多量子阱子能带结构、状态密度分布和光跃迁的有效方法, 也是一种判断超晶格、量子阱生长质量的简单方法, 可以容易地观测到多量子阱的激子跃迁峰. 对于用半绝缘体 GaAs 作为衬底的 GaAs/AlGaAs 多量子阱同样具有很高的灵敏度. 而在半绝缘衬底上外延的多量子阱和超晶格用电流谱是无法研究的. 低温下的光生电压谱清晰地反映了多量子阱台阶式的状态密度分布. GaAs/AlGaAs 多量子阱的光生电压来自两种光生电压效应, 室温附近光生电压主要是光生载流子通过热激发跨越势垒产生的, 低温下光电压主要是光生电子和空穴的位移效应产生的.

- [1] R. Dingle *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **33**(1974), 827.
- [2] T. Ishibashi *et al.*, *Proc. Int. Symp. GaAs and Related Compounds* (Inst. Phys. Conf., No. 63, Japan, 1981), p. 587.
- [3] D. A. B. Miller *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **41**(1982), 679.
- [4] R. People, *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-22**(1986), 1696.
- [5] 沈学础, *物理学进展*, **8**(1988), 395.
- [6] S. Schmitt-Rink *et al.*, *Adv. Phys.*, **38**(1989), 89.
- [7] 朱文章等, *半导体学报*, **13**(1992), 405.
- [8] H. S. Cho and P. R. Prucnal, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 3237.
- [9] G. Bastard, *Phys. Rev.*, **B24**(1981), 5693.
- [10] R. L. Greene and K. K. Bajaj, *Solid State Commun.*, **45**(1983), 831.
- [11] W. T. Masselink *et al.*, *Phys. Rev.*, **B32**(1985), 8027.
- [12] 刘恩科、朱秉升等, *半导体物理学* (国防工业出版社, 北京, 1981), 第 256 页.

PHOTOVOLTAGE SPECTROSCOPY STUDY OF GaAs/AlGaAs MULTIPLE QUANTUM WELLS

ZHU WEN-ZHANG

(*Physics Section, Jimei Navigation Institute, Xiamen 361021*)

SHEN QI-HUA

(*Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005*)

(Received 14 November 1994)

ABSTRACT

The photovoltage spectra of GaAs/AlGaAs multiple quantum wells (QMWs) in which the substrates are semiinsulation GaAs have been studied at temperatures ranging from 18 to 300 K. A series of distinct excitation absorption peaks were observed. At low temperature, the photovoltage spectra reflect the steplike distribution of state density of QMWs. It is believed that the photovoltage spectroscopy is an effective technique for inspecting the growing quantity of QMWs and superlattice. The changes of photovoltage with temperature and the mechanism of photovoltaic effect are also discussed.

PACC: 7240; 7340