

GaAs/AlGaAs Fibonacci 准周期 超晶格带间跃迁的光谱研究

茅惠兵 陆卫 马朝晖 张家明 姜山 沈学础

(中国科学院红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(1994 年 6 月 8 日收到)

运用光致荧光, 光调制反射和光电流谱等方法研究了 11 级的 GaAs/AlGaAs Fibonacci 准周期超晶格的带间跃迁, 并用转移矩阵方法计算了 Fibonacci 准周期超晶格和相应的周期性超晶格的子能级和子能带。理论计算与实验结果符合得很好。

PACC: 7125T; 6865; 7865; 6855

1 引 言

随着分子束外延 (MBE) 等超薄层材料生长技术的发展和完善, 高质量的周期性半导体超晶格等的生长已经不难实现, 并且其性质也已得到深入广泛的研究。近来非周期性和准周期性的物理体系也正引起众多学者的广泛关注。在这类非周期及准周期体系中, Fibonacci 准周期超晶格是比较简单并且较容易研究的体系之一^[1,2]。在这种准周期性结构中, 由于电子态不再具有 Bloch 不变性, 因此研究它们的特殊能带结构在理论和实验上都有很大的意义。

目前 Fibonacci 准周期超晶格的实验研究主要集中在结构^[3]和晶格动力学^[4]两个方面, 由于实验上的诸多困难, 对其光学和电子态性质的研究还相当少^[5], 尤其对多级次的 Fibonacci 准周期超晶格的子能带结构的实验研究还很少。本文应用高灵敏度的光致荧光 (PL), 光调制反射 (PR) 和光电流 (PC) 等多种实验方法研究其光学性质, 然后用转移矩阵方法计算其子能带的结构, 并与实验结果比较。

2 样品结构与制备

设 l 级的 Fibonacci 准周期系列 S_l 的结构由 l 次连续使用下列规则得到: $TA = AB$, $TB = A$, 其中 T 是作用算符, A 和 B 分别表示两种结构单元。由 $S_0 = A$, 可以得到下面的表示式: $S_1 = AB$, $S_2 = ABA$, $S_3 = ABAAB$, $\dots$, 并且可以认为 $S_{-1} = B$ 。这个规则给出的最主要的性质是自相似性, 由此可以得到下列的递推关系: $S_l = S_{l-1}S_{l-2}$, 其中 $l \gg 2$ 。准周期系列 S_l 包含 F_l 个 A 单元, F_{l-1} 个 B 单元, 其中 F_l 为 l 级的 Fibonacci 数, 它满足 $F_l = F_{l-1} + F_{l-2}$, 并且 $F_0 = F_1 = 1$ 。

本实验所用的样品是由 MBE 技术在 GaAs(001) 衬底上生长的。为了减小应变和缺陷,衬底脱氧后先生长了 500nm 的过渡层,外延生长在超晶格的势阱和势垒的界面处都中断若干秒,以便使界面恢复得更完整,外延生长的速率和 Al 的组份由反射式高能电子衍射 (RHEED) 强度振荡测定。在 Fibonacci 结构中, A 单元的势阱是宽度为 4nm 的 GaAs, 势垒是宽度为 2.5nm 的 $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$, B 单元的势阱是宽度为 6.4nm 的 GaAs, 势垒是宽度为 4.05nm 的 $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ 。本实验所用的 Fibonacci 系列共有 11 级。作为参考样品,本实验同时生长了分别由 A 单元和 B 单元组成的两种超晶格,并分别称为参考样品 1 和参考样品 2。为了便于测量时制备电极,在每个样品的结构生长之前都生长了 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 高掺杂 GaAs(掺 Si 至 $3 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$),在生长完结构之后再生长 50nm 的高掺杂的 GaAs 层。

3 实验结果

3.1 PL 谱

样品的 PL 谱是在 SPEX1403 光谱仪上测定的,并以氩离子激光器的 514.5 nm 谱线作为激发光源。图 1 为 Fibonacci 超晶格样品及两个参考样品 77 K 时的 PL 谱。由图 1 可以看出,它们的 11H 荧光峰的能量位置分别为 1.568, 1.619 和 1.570 eV。参考样品 2 和 Fibonacci 超晶格样品的 PL 谱都有 2 个峰,其中的主峰可以确定为相应样品的 11H 复合发光,高能侧的小峰拟可以确定为相应的 11L 复合发光。其中 Fibonacci 超晶格样品的荧光主峰的半高宽为 4.5 meV,轻重空穴的分裂能为 16 meV。

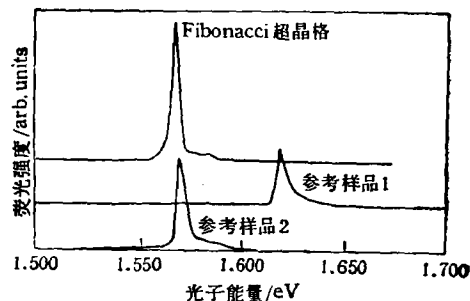


图 1 Fibonacci 准周期超晶格及两个参考超晶格样品 77 K 下的 PL 谱

3.2 PR 谱

本实验的 PR 谱由通常的光反射调制装置测量^[5]。调制光为 514.5nm 的氩离子激光,斩波器的频率为 400 Hz,激光功率为 $100\text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$,卤钨灯经单色仪后作为探测光,探测光经样品反射后由 Si 光电二极管探测器接收,经锁相放大后馈入微机接收处理。

图 2 为 Fibonacci 超晶格样品及两个参考样品在室温下的 PR 谱。虽然 PR 谱的信噪比不很理想,但仍然可以得到如下重要结果。参考样品 1 的导带势阱只有一个子能级,PR 谱给出的是 11H 和 11L 两个结构。参考样品 2 的导带势阱有二个子能级,PR 谱给出的 11H 和 11L 两个结构也很明显,第二子能带则只能区分出一个结构,即 22H。Fibonacci 样品的 PR 谱则含有三组子能级,其中第一组子能级的信号比较弱,只能区分出一个结构,第二组子能级的信号很强,经过拟合分析,可以发现其中含有 3 个结构,它们的能量分别为 1.527, 1.541 和 1.550 eV。经过拟合,第三组子能级也可分辨出 3 个结构。

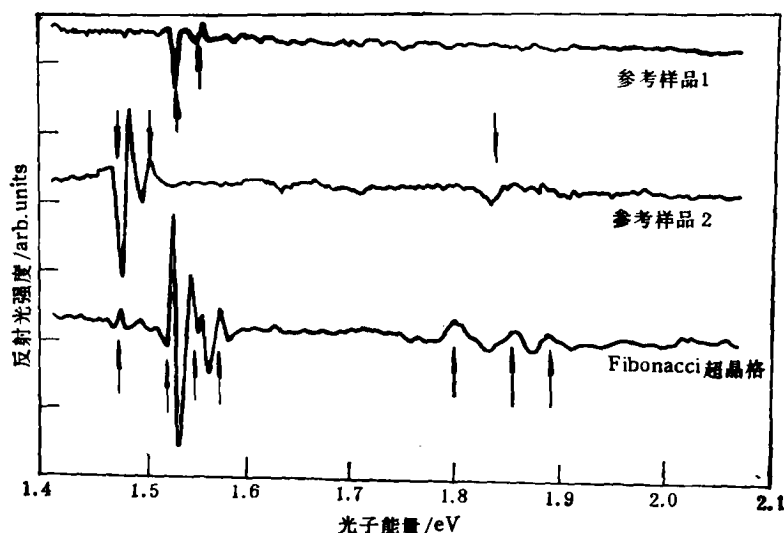


图2 Fibonacci准周期超晶格及两个参考超晶格样品室温下的 PR 谱

3.3 PC 谱

为了研究沿 Fibonacci 准周期超晶格生长方向(z 方向)的 PC 谱,首先用化学腐蚀

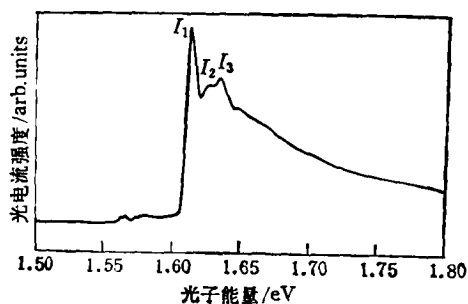


图3 Fibonacci 准周期超晶格 77 K 下的 PC 谱

(I_1, I_2, I_3),这一组峰的强度行为与前一组很显然不一样。这一现象与周期性的超晶格有很大的不同^[6]。如果考虑到温度效应,这三个峰的位置和 PR 谱中与第二组子能级的跃迁相关的三个结构是一致的。

4 Fibonacci 准周期超晶格子能级的理论计算与讨论

4.1 Fibonacci 准周期超晶格中限制态子能级的理论计算

在周期性的超晶格体系中,由于势场在生长方向的周期性变化,其导带和价带都分裂成若干子能级或子能带。在 Fibonacci 准周期体系中,虽然均匀的周期性不再存在,但由于量子限制效应依然存在,其导带和价带仍将分裂成若干的子能级,这些子能级的性质与超晶格子能级或子能带的性质有显著的差别,并且与 Fibonacci 的级次有密切关系。转移矩阵方法是研究非周期性体系的子能级结构的有效而简单的方法^[7], 本文应用这种方

法计算了 Fibonacci 准周期超晶格带子能级。Laruelle 等对低级次($l \leq 5$)的 Fibonacci 体系的子能级在理论和实验上都作了较为详细的研究^[4,6], 因此下面主要研究高级次的 Fibonacci 体系的子能级及其与有关参数的关系。

图 4 是级次分别为 5, 6, 7 的 Fibonacci 准周期超晶格的导带子能级的计算结果。由计算结果可以看出, 虽然级次较低时的子能级的变化比较复杂, 但随着级次的增加, 子能级的分布趋向一致, 只是能级不断变窄。下面以具有本实验样品参数的第 7 级 Fibo-

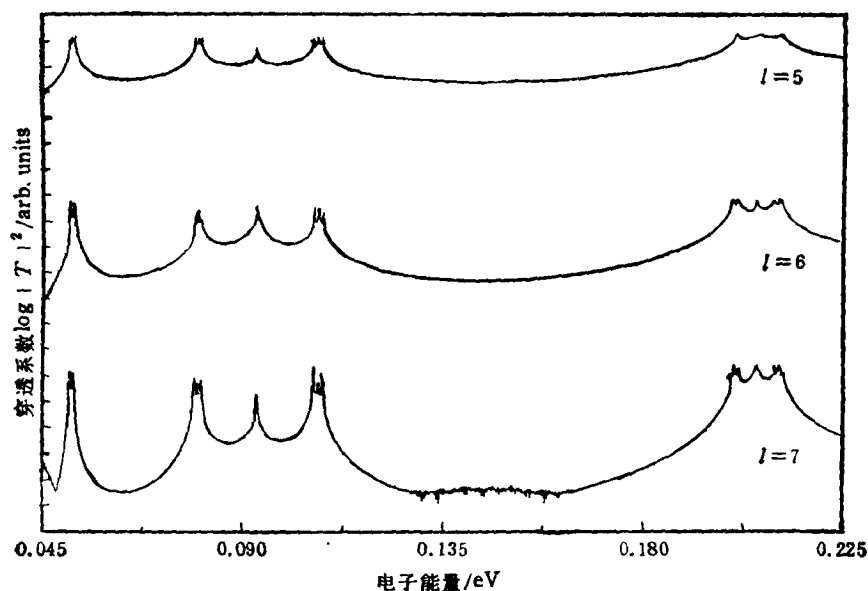


图 4 第 5, 第 6 和第 7 级的 Fibonacci 准周期超晶格的导带电子态结构

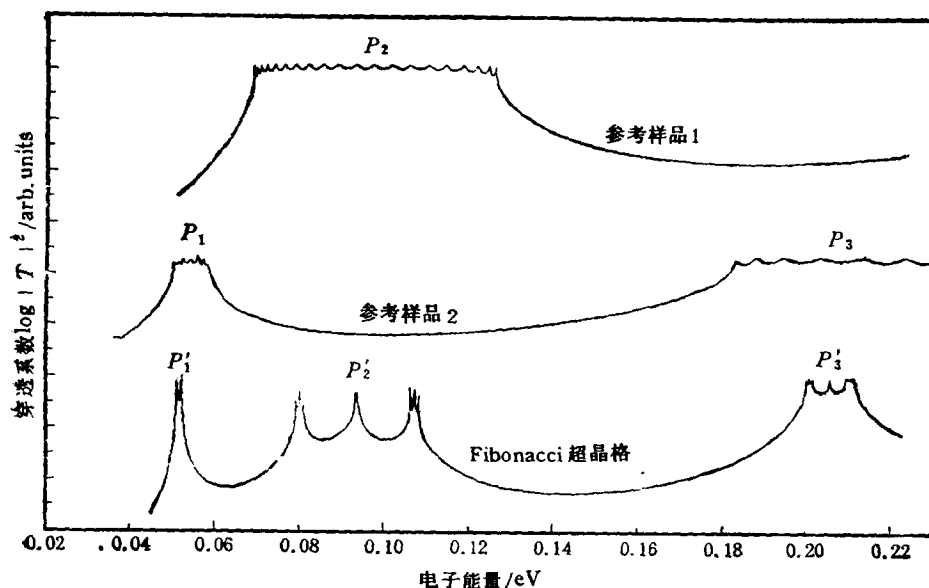


图 5 第 6 级的 Fibonacci 准周期超晶格和相应的周期性超晶格的导带电子态结构

nacci 准周期超晶格为例进行较详细的讨论。根据穿透系数,所有的子能级可分为三组。第一组虽然含有若干子能级,但它们的分裂间距已小于 1 meV , 在实验上已很难区分,它距导带底的距离为 52 meV 。第二组已分裂为三个子能级,距导带底的距离分别为 $82, 95$ 和 109 meV 。它们也分别由若干子能级组成,简并度分别为 $8, 4$ 和 8 。第三组也分为三个子能级,他们距导带底的距离分别为 $202, 207$ 和 212 meV 。

Fibonacci 准周期超晶格的子能级和相应的周期性超晶格的子能级或子能带之间的关系是个令人感兴趣的问题。图 5 分别给出了具有本实验样品参数的第 6 级 Fibonacci 准周期超晶格样品导带子能级及两个参考样品的子能带的计算结果。由计算结果可以知道, Fibonacci 准周期超晶格的各组子能级分别对应着相应的周期性超晶格的某个子能带,但在 Fibonacci 超晶格中,周期性超晶格中电子波函数沿生长方向的 Bloch 不变性不再存在,原来的子能带变窄并分裂,成为一系列的子能级。各组子能级中,有些已显著地分裂(如第二组),有些分裂很小(如第一组)。

4.2 讨论

为了对实验中观察到的峰结构进行正确的辨认,在假设轻重空穴之间的耦合可以不计的条件下,又用转移矩阵方法分别计算了重空穴和轻空穴的子能级。计算结果表明,与电子态的子能级一样,超晶格中的轻重空穴子能带在 Fibonacci 准周期超晶格中也分裂成一系列的子能级。重空穴的第一组子能级距价带顶为 13.5 meV , 第二组子能级距价带顶为 26.4 meV 。由于重空穴的有效质量较大,所以它的第二组子能级的分裂非常小。轻空穴的第一组子能级离价带顶 38.6 meV , 第二组子能级也已明显地分裂成 3 个态,它们距价带顶的距离分别为 $59, 72$ 和 84 meV 。此外,轻重空穴的其它较高能级本文不再讨论。

可以认为 PC 谱和 PR 谱中三个强峰的辨认是首要的问题。根据上述计算结果,可以认为它们分别对应于重空穴的第二组子能级和第二组导带电子的已分裂的三个子能级之间的跃迁。因为理论给出的三个跃迁中的最低能量为 1.616 eV , 与实验峰值能量 1.609 eV 非常接近。而轻空穴与电子的第二组子能级之间的最小能量差为 1.649 eV , 已超出实验测量到的三个跃迁中最高能量的峰位,因此可以确认这三个峰的起源。

转移矩阵法计算的结果与实验之间也有一定的差别。PL 谱和 PC 谱两种方法给出的轻重空穴分裂都是 16 meV , 而理论计算得到的轻重空穴分裂为 23 meV , 造成这一问题的首要因素是计算时没有考虑价带中轻重空穴之间的耦合,但实际上两者之间的耦合是很强的。此外,实验中的三个强峰结构中的间距与理论计算结果也有一些差别。

Fibonacci 准周期超晶格的一些重要性质还有待进一步的研究与讨论。本实验样品的 PC 谱给出了这样一个信息,即与超晶格导带第二组子能级中的三个态的性质和第一组子能级的性质有显著的差别,但还有待研究。

5 结 论

用 PL 谱, PR 谱和 PC 谱等三种光谱学方法研究了 11 级的 Fibonacci 准周期超

晶格的带间跃迁,观察到了与周期性超晶格不同的光谱现象。在 Fibonacci 准周期超晶格中观察到导带与价带三组子能级之间的跃迁,其中第一组没有分裂,而第二和第三组都已分裂。并用转移矩阵方法计算了 Fibonacci 准周期超晶格和相应的周期性超晶格的子能级和子能带。计算结果显示,随着级次的增加,准周期超晶格的子能级的分布趋向一致。它的子能级可分为若干组,每组子能级分别对应着相应的周期性超晶格的一个子能带。在各组子能级中,有的分裂很小,实际上简并成一个能级(例如第一组),有的已明显地分裂。这些结果较好地解释了实验结果。

感谢黄醒良、穆耀明博士和常勇等同学在电极制备,理论计算和测量中的帮助。

- [1] D. C. Hurley, S. Tamura, J. P. Wolfe, K. Ploog and J. Nagle, *Phys. Rev.*, **B 37**(1988), 8829.
- [2] Mahito Kohmoto, Bill Sutherland and Chao Tang, *Phys. Rev.*, **B35**(1987), 1020.
- [3] J. Todd, R. Merlin, R. Clarke, K. M. Mohanty and J. D. Axe *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 1157.
- [4] Francois Laruelle and Benard Etienne, *Phys. Rev.*, **B 37**(1988), 4816.
- [5] 沈学础,红外研究, **6**(1987), 369.
- [6] R. Tsu, L. L. Chang, G. A. Sai-Halasz and L. Esaki, *Phys. Rev. Lett.*, **34**(1975), 1509.
- [7] R. Tsu and L. Esaki, *Appl. Phys. Lett.*, **22**(1973), 562.
- [8] S. Ostlund and R. Pandit, *Phys. Rev.*, **B29**(1984), 1394.

STUDY OF THE SPECTROSCOPY OF INTERBAND TRANSITIONS FOR GaAs/AlGaAs FIBONACCI QUASIPERIODIC SUPERLATTICES

MAO HUI-BING LU WEI MA ZHAO-HUI ZHANG JA-MING

JIANG SHAN SHEN XUE-CHU

(*State Key Laboratory for Infrared Physics, Academia Sinica, Shanghai 200083*)

(Received 8 June 1994)

ABSTRACT

We report in this paper the photoluminescence, photoreflectance modulation spectroscopy and photocurrent spectroscopy of the interband transitions of GaAs/AlGaAs Fibonacci quasiperiodic superlattices. The transfer-matrix method is used to calculate the energy levels or the subbands of the Fibonacci quasiperiodic superlattices and the responding periodic superlattices. The theoretical results confirm our experiments very well.

PACC: 7125T; 6865; 7865; 6855