

113-117

磁隧穿振荡研究 GaAs/AlAs 双势垒 结构中的 Γ -X 电子态混合*

刘 剑 李月霞[✓] 郑厚植 杨富华 宋爱民 李承芳

(中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家实验室, 北京, 100083)

A

摘要 报道了非对称 GaAs/AlAs 双势垒结构(DBS)中的 Γ -X- Γ 磁隧穿振荡现象, 用磁场倒数周期求得 AlAs 层中 X 谷和 GaAs 层中 Γ 谷之间的能带不连续值与通常公认值符合很好. 良好的振荡特性可作为定量研究 Γ -X 耦合强度的灵敏的实验办法.

关键词 磁隧穿, Γ -X 混合, GaAs/AlAs.

双势垒

TN304.23

引言

砷化镓 砷化铝

0471.5

理论上已经预言, 在双势垒结构中, 由于异质界面破坏了纵向平移不变性, 可以造成导带中 Γ 电子态与 X 电子态发生耦合^[1]. 双势垒结构中 Γ -X 混合隧穿的影响已引起人们的广泛注意^[2,3]. 但是, 由于电流-电压(I - V)曲线观测到的 Γ -X 混合特征十分微弱^[2], 使得实验研究这种耦合效应相当困难.

7

本文报道了当双势垒结构偏置在 I - V 曲线的电流谷区时从微分电容和微分电导观测到的 Γ -X- Γ 磁隧穿振荡. 在特定偏压条件下, 当发射区费密能级以下的 Γ 电子入射进入 AlAs 垒, 与 AlAs 垒中的 X 态束缚能级共振, 会出现共振 Γ -X 隧穿. 在加垂直磁场情况下, 阱中二维电子态的朗道量子化将对该 Γ -X 隧穿通道产生调制作用. Γ -谷和 X 谷之间的共振电荷转移对发射垒电容起旁路作用, 导致电容谱中出现一系列极大值. 由振荡周期可以求出 AlAs 发射垒 X 谷底与 GaAs 阱中最低子能带的能量差值.

1 实验

本实验所用样品是采用分子束外延技术在 n^+ -GaAs(100)衬底上生长的 GaAs/AlAs 双势垒结构, 两个不掺杂的 AlAs 垒厚度分别为 2.5nm 和 1.5nm(靠近衬底一侧), 不掺杂的 GaAs 阱厚度为 7.5nm. 样品结构设计和隧穿二极管的制作及 I - V 特性以前已报道过^[4]. 样品微分电容和微分电导是采用 HP4284A-LCR 测试仪在 4.2K 测得, 调制信号频率为 1MHz, 幅度为 10mV, 为保证所测结果的可靠性, 将调制频率从 1MHz 降至 276Hz, 均未发现磁振荡形状和峰值位置的变化.

2 结果与讨论

样品的 I - V 曲线特性示于图 1. 这里定义顶端电极相对于衬底电极为正时为正向偏置.

* 国家攀登计划资助项目

本文 1995 年 4 月 14 日收到, 修改稿 1995 年 6 月 18 日收到

器件在正反偏置时的电流峰谷比分别为 20 和 5, 所对应的发射垒分别为 1.5nm 和 2.5nm. 本文着重研究器件在反向偏置时的电流谷区的物理行为.

图 2 给出了反向偏置为 0.978V 时器件微分电容和微分电导随磁场变化的关系曲线. 很明显, 两者的振荡位相正好相反. 但这只是一种虚假现象. 此两条曲线是在 LCR 测试仪采用 CR 简单并联模式时读出的电容与电导值. 在真实样品若考虑隧穿电导的作用, 其等效电路更为复杂, 具体如图 2 中插图所示. C_1 代表靠近发射垒外侧的积累层中三维可动电子和二维束缚电子的电容贡献, C_2 代表两个电容串联: 一个是由两个垒中间阱和靠近收集极的不掺杂隔离层构成的绝缘电容, 另一个是收集极附近的耗尽层电容. G 代表积累层中电子隧穿通过器件产生的电导. 从简单的等效电路分析很容易发现由 LCR 测试仪读出的隧穿电导极大值对应电容的极小值.

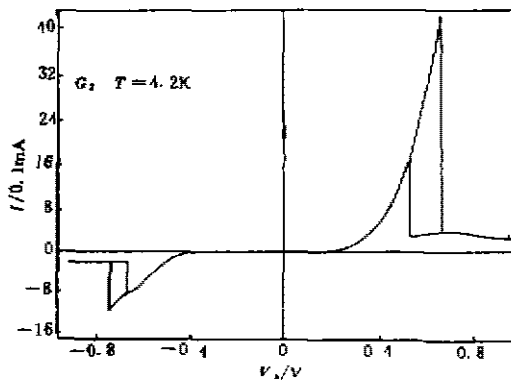


图 1 4.2K 温度下样品的 $I-V$ 曲线
Fig.1 The $I-V$ characteristics
of the samples at 4.2K

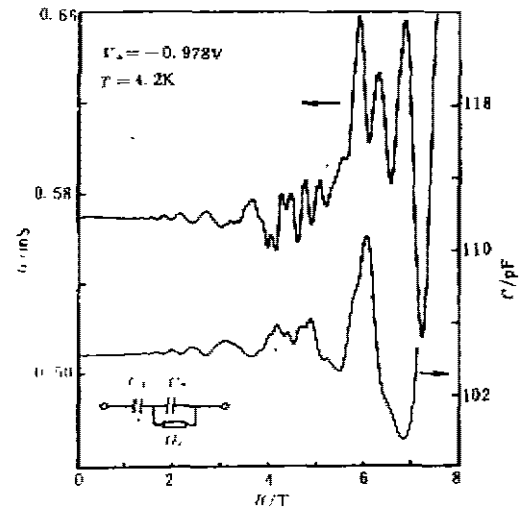


图 2 反向偏压为 0.978V 时非对称 GaAs/AlAs 双势垒样品的微分电容和微分电导随磁场的变化曲线, 插图是双势垒样品的等效电路
Fig.2 The differential capacitance and conductance of an asymmetrical GaAs/AlAs DBS, measured in a B field sweep at 4.2K for the bias of -0.978V, the inset is the equivalent circuit of DBS

仔细研究图 2, 可以发现当磁场低于 4T 时, 存在有一系列规则的电容(电导)振荡. 这个振荡系列的物理起因来自积累层中二维束缚电子^[8]. 在垂直磁场作用下, 积累层中二维子带基态能级分裂成孤立的朗道能级, 随磁场增加, 朗道能级依次越过发射区的费密能级 E_F , 并被逐一撤空, 双势垒结构中的势能分布随之发生突然变化, 使微分电容出现振荡, 其倒数周期 $\Delta(1/B)$ 决定积累层中二维电子的面密度 $N_{2D} = 2e / [h\Delta(1/B)]$. 当偏压 $V_b = -0.978V$ 时, $N_{2D} = 5.09 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$, 电导曲线也有类似结果. 二维电子面密度随偏压的变化示于图 3, 随偏压增加, N_{2D} 也增大, 最后基本达到饱和状态. 有趣的是: 当器件偏置在 $-0.8 \sim -1.2V$ 的范围时, 在高磁场区又出现了新的磁电容(电导)振荡系列. 这后一种振荡系列要比前一

个振荡快,大约能持续 18 个周期,并且在低于 3T 时趋于消失.在 $V_b = -0.978\text{V}$ 时,该振荡系列 $\Delta(1/B)$ 周期为 0.0121T^{-1} ,不可能与二维面密度有关系.

为确定其物理机制,我们试图从以往的实验中寻找答案.从我们已发表的文献[4]中的扇形图中可以看出,有弹性、非弹性散射过程参与非共振磁隧穿与本实验观察到的新振荡系列在物理机制上是完全不同的,因为偏压超过 -0.85V 时有散射过程参与的 EL_p 隧穿系列随磁场变化极慢,无法解释现在的情况.另外,Eaves 等人^[6]也曾报道过一种新磁隧穿振荡,它起因于入射电子隧穿进入 GaAs/AlAs 双势垒结构中阱内第二个子带.他们认为,若能量关系 $E_1 + n\hbar eB/m^* = E_n \approx E_2$ (n 为朗道指数变化, E_1 和 E_2 分别为阱中第一、二个电子能级, E_0 为发射端三角阱中的基态能级)同时满足时,束缚态 E_1 和 E_2 之间的带间散射将会对 $E_0 \rightarrow E_2$ 隧穿通道产生调制效应,导致振荡现象(参看图 4).但是,对于我们的样品而言,第二个共振峰大约出现在 -1.2V ,但所观察到的磁电容(电导)振荡早在此之前就已出现.

我们从 Foster 等人^[3]的实验得到十分有益的启示:在 GaAs/AlAs 双势垒结构中,当中央阱 Γ 能级与收集垒中 X 谷共振时,会对 I - V 曲线的共振特性及阱中电荷存储起重要影响.他们利用静电调节收集垒中 X 谷的能级位置,观察到 Γ -X 隧穿通道开启时阱中存储电荷明显减少.我们认为:由于我们的样品结构采用很宽的隔离层,使得发射垒中 X 谷在偏压作用下可以与入射端费密能级 E_F 持平,从而提供了共振 Γ -X 隧穿通道.在有磁场时,AlAs 发射垒中三维 X 态和阱中 Γ 态均分裂成一系列朗道子带,它们具体的色散关系如图 4 所示,即增加反向偏压,厚发射垒中的 X 谷下降,当它与发射垒左边费密能级以下三维电子的能量相同时,积累层 Γ 电子经过垒中 X 虚束缚态发生共振隧穿.此后,AlAs 层中 X 电子可能通过弹性散射进入阱中 $E_1(\Gamma)$ 子带的朗道能级.

综上所述,隧穿电容(电导)在高场区新出现的振荡系列是起源于阱中二维电子 Γ 态的朗道量子化对入射端 Γ -X 隧穿通道的调制作用,并且,当磁场升高到一定值时,三维可动电子最高朗道子带腾空,以该朗道因子标志的 Γ -X 隧穿通道就关闭.图 2 中在高磁场区缓慢的背景变化就起源于此.

众所周知,隧穿过程遵循以下能量守恒规则:

$$E(X) \approx E_1(\Gamma) + \frac{n\hbar eB}{m^*(\Gamma)},$$

其中 n 为隧穿前后的朗道因子变化, $E(X)$ 、 $E_1(\Gamma)$ 均以阱左边界面的导带底为参考点.不难推出能量差值 $E(X) - E_1(\Gamma)$ 与振荡周期 $\Delta(1/B)$ 应有如下关系:

$$E(X) - E_1(\Gamma) = \frac{e\hbar}{m^*(\Gamma)\Delta(1/B)}.$$

当 $V_b = -0.978\text{V}$, $\Delta(1/B) = 0.121\text{T}^{-1}$ 时, $E(X) - E_1(\Gamma) = 143\text{meV}$. $E(X) - E_1(\Gamma)$ 代替 AlAs 层中 X 谷与 GaAs 阱中 Γ 第一子带间的能量差值.我们用传输矩阵方法计算了阱中第一子带 $E_1(\Gamma)$ 的能量位置,当 $N_{2D} = 5.09 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$, $E_1(\Gamma) = 41\text{meV}$ (零电场 70meV),由此求出 $E(X) = 184\text{meV}$,与公认值 180meV 接近.继续增加偏压,AlAs 层中 X 束缚态带底相对于 $E_1(\Gamma)$ 会有所抬高.另一方面 X 阱中更高的朗道能级将参与隧穿过程.上述过程会导致从 $\Delta(1/B)$ 求出的 $E(X) - E_1(\Gamma)$ 值会有所增大.在 $-0.83 \sim -0.98\text{V}$ 范围内,其数值几乎线性地从 105mV 上升到 143mV ,然后达饱和状态.

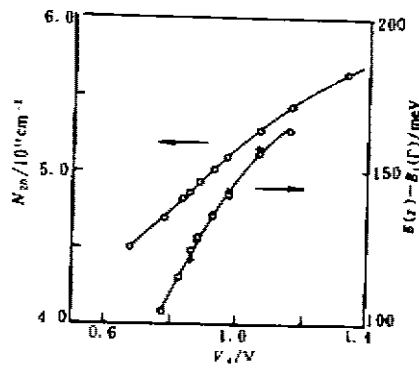


图3 4.2K 温度下二维面密度 N_{2D} 和 $E(X) - E_1(\Gamma)$ 值随偏压的变化曲线
 Fig. 3 The sheet density of the accumulated 2D electrons and the band-offset ($E(X) - E_1(\Gamma)$) as a function of the bias voltage at 4.2K

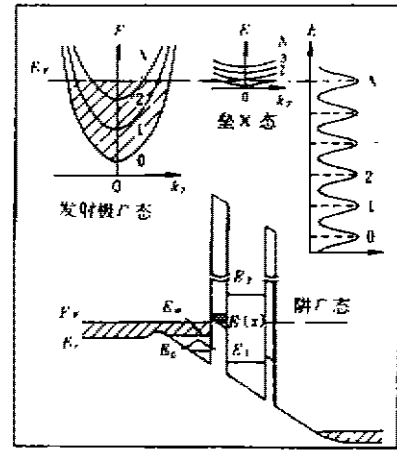


图4 上半部为发射结三维 Γ 态及 AlAs 垒中三维 X 态的 $E-k_x$ 色散曲线(阱中 Γ 态在磁场 B 下的朗道态密度), 下半部为发生 $\Gamma-X-\Gamma$ 磁隧穿时的双势垒结构的偏置图
 Fig. 4 The $E-k_x$ dispersion curves for 3D Γ -states in the emitter and 3D X-states in the barrier and density of states in the well in strong B field, the lower part indicates the bias condition of DBS for $\Gamma-X-\Gamma$ magnetotunneling oscillations

值得提出的是, 正向偏压状态下, 入射电子通过薄垒进入阱区, 在偏压达 1.5V 时, 还未发现上述类似的振荡现象. 其原因可能是: 一是厚的收集垒在决定整个结构的电流时起主要作用, 它掩盖了薄发射垒对电导的调制作用; 二是入射垒越薄, 需要加更高的偏压才能使 AlAs 层发射垒 X 束缚态与入射电子 Γ 共振, 因此, 在器件允许的偏压范围就可能观察不到类似的 $\Gamma-X-\Gamma$ 磁隧穿振荡.

3 结论

我们报道了非对称 GaAs/AlAs 双势垒结构中 $\Gamma-X-\Gamma$ 磁隧穿振荡现象, 讨论了产生这种新磁隧穿振荡的物理机制, 由振荡周期求得的 AlAs 层中 X 谷与 GaAs 阱中 Γ 谷的能量差与公认值符合很好. 如能与相应的理论工作比较, 我们的工作将提供一种研究 $\Gamma-X$ 耦合强度的较为灵敏的实验手段.

参考文献

- 1 Ando T, Akera H. *Phys. Rev.*, 1989, **B40**:11619
- 2 Mendez E E, Calleja E, Goncalves da Silva C E T, et al. *Phys. Rev.*, 1986, **B33**:7368
- 3 Foster T J, Leadbeater M L, Maude D K, et al. *Solid State Electronics*, 1989, **32**:1731
- 4 Zheng Houzhi, Yang Fuhua, Chen Zonggui. *Phys. Rev.*, 1990, **B42**:5270
- 5 Leadbeater M L, Alves E S, Eaves L, et al. *Semiconductor Science and Technology*, 1988, **3**:1060
- 6 Eaves L, Toombs G A, Sheard F W, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**:212

Γ -X MIXING IN GaAs/AlAs DOUBLE BARRIER STRUCTURES STUDIED BY MAGNETO-TUNNELING OSCILLATIONS*

Liu Jian Li Yuexia Zheng Houzhi Yang Fuhua Song Aimin Li Chengfang

(National Laboratory for superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract Γ -X- Γ magneto-tunneling oscillations in asymmetrical GaAs/AlAs double barrier structures (DBS) were reported. The band offset between the X-valley in AlAs barrier and the Γ -valley in GaAs well given by the period in reciprocal field was found to be very close to the commonly adopted value. Owing to the well developed oscillatory feature, a new and sensitive experimental way to quantitatively study the Γ -X coupling strength was provided.

Key words magneto-tunneling, Γ -X mixing, GaAs/AlAs.

* The project supported by the National Climbing Plan of China