

GaAs/AlAs 超晶格 Γ -X 级 联隧穿导致的电场畴

张耀辉 杨小平 刘伟 崔丽秋 江德生

(半导体超晶格国家重点实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 我们研究了掺杂耦合 GaAs/AlAs 超晶格的级联隧穿，在这种结构中，AlAs 层 X 能谷中的基态能级位于 GaAs 层中 Γ 能谷的基态($E_{\Gamma 1}$)和第一激发态($E_{\Gamma 2}$)能级之间。实验结果证明，这种超晶格中的高电场畴是由 Γ -X 级联共振隧穿所形成的，而不是通常的相邻量子阱子带的级联共振隧穿所形成的。在这种高场畴中，电子从 GaAs 量子阱的基态隧穿到邻近的 AlAs 层的 X 能谷的基态，然后通过实空间电子转移从 AlAs 层的 X 能谷弛豫到下一个 GaAs 量子阱的 Γ 能谷的基态。

PACC: 7320, 7220H, 7340G

动态电场畴最早在 GaAs 体材料中被观测到，被认为是耿氏振荡的起因^[1]。它是由 Γ 到 X 或 L 谷间电子转移导致的负微分电阻效应引起的。超晶格中电场畴首先是由 Esaki 和 Chang 发现的^[2]，他们把这种稳态电场畴归因为另外一种负阻效应，它是由相邻量子阱子带间的级联隧穿引起的^[3]。

超晶格的电场畴可以用来设计调谐量子阱红外探测器。随着偏压的增加，高场畴区扩展和畴边界移动，就会发生一个阱一个阱的级联共振隧穿，这样在 I-V 特性曲线上就会看到周期性的电流振荡。由此我们就可以得到超晶格的子带间距，因为这个能量间距接近于电流振荡的电压周期。通过这种测量可以区分级联隧穿是发生在束缚态之间，还是发生在束缚态与扩展态间。

本文报道了我们在 77 K 温度下对两个掺杂 GaAs/AlAs 超晶格进行了 I-V 测量，来研究其级联隧穿过程。这两个超晶格的势垒宽度相同而势阱的宽度不同。GaAs 阵较宽的超晶格，其 AlAs 层的 E_{X_2} 的能级非常接近于 GaAs 量子阱中的 $E_{\Gamma 2}$ 能级。而 GaAs 阵较窄的晶格，其 AlAs 层的 E_{X_2} 的能级位于 GaAs 量子阱中的 $E_{\Gamma 1}$ 能级和 $E_{\Gamma 2}$ 能级之间。从窄量子阱超晶格的 I-V 曲线中我们发现，其电流振荡对应的电压周期值远小于子带的能级

张耀辉 男，1967 年生，博士生，从事电场作用下短周期超晶格的光学和电学性质、弱耦合超晶格的输运性质、量子阱子带间跃迁及量子阱红外探测器等方面的研究

1994 年 4 月 12 日收到

间距($E_{\Gamma_1}-E_{\Gamma_2}$)，并且也比宽量子阱超晶格的也要小。这与通常的超晶格的子带间级联共振隧穿导致高场畴不同。为了解释这个现象，我们认为 GaAs/AlAs 超晶格中的高场畴是由 Γ -X 级联共振隧穿引起的，而不是通常认为的子带间级联共振隧穿的结果。由于高电场的存在，GaAs 量子阱的基态电子通过 Γ -X 混合隧穿到邻近的 AlAs 层中，然后通过无辐射弛豫到下一个 GaAs 量子阱的基态。

样品是分子束外延法用 VGMK 系统生长的两个掺杂 GaAs/AlAs 超晶格。GaAs 量子阱较窄的样品(记为 SL1)是 40 个周期的 75Å 的 GaAs 阵与 40Å 的 AlAs 垒多量子阱，另一 GaAs 阵较宽的样品(记为 SL2)是 40 个周期的 90Å 的 GaAs 阵层与 40Å AlAs 垒层的多量子阱。这些层厚经 X 射线双晶衍射测定，其晶体质量很高。为了降低界面态密度，分别在 SL1 的量子阱中央 35Å 处和 SL2 的量子阱中央 50Å 处掺 Si($3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)，用两个 0.5 μm 掺杂为 $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 n^+ 型 GaAs 作为接触层，用 AuGe/Ni 合金形成欧姆接触。二级管的电流电压特性是在 77 K 温度下，用赝四端技术测量的，测量时将一个 1.5 nF 的电容器与二极管并联，以消除偏压电路的自激振荡。

GaAs 量子阱中的 Γ 能谷束缚态能级的理论计算值分别为：SL1 的是，61 meV, 246 meV, 559 meV；SL2 的是，45 meV, 180 meV, 411 meV。因为 AlAs 的晶格常数大于 GaAs 的晶格常数，AlAs 层处于双轴压应力下。这种压应变导致 AlAs 的 X₁ 能谷(平行于界面)相对 X₁ 能谷(垂直于界面)降低几个 meV。由于量子限制，AlAs 层中的 X 能谷束缚态能级相对于 AlAs 中 X 带的谷低分别：X₁ 谷，15 meV, 61 meV, 135 meV；X₃ 谷，59 meV, 223 meV。所以，AlAs 层中 X₁ 能谷低于 X₃ 能谷。GaAs 的 Γ 能谷 AlAs 的 X 能谷的能量间隔(Ex)近似是 0.16 eV，这样，SL1 样品的 AlAs 层的 X₁ 能谷基态就位于 GaAs 量子阱的 Γ 能谷的基态(E_{Γ_1})和激发态(E_{Γ_2})能级之间，而 SL2 样品，AlAs 层的 X₁ 能谷基态非常接近于 GaAs 量子阱的 Γ 能谷的激发态。

图 1(a)和图 1(b)分别为样品 SL2 和 SL1 的 77 K 温度下的伏安特性曲线。两图都展示了一个有 38 个周期性振荡的电流平台。电流振荡周期数和超晶格的周期数相符。这就表明，级联共振隧穿导致超晶格中形成高场畴。SL2 的电流振荡电压差 ΔV 是 116 ± 15 mV，SL1 的电压差 ΔV 是 97 ± 12 mV。按照相邻量子阱的子带间级联共振隧穿模型^[4]。

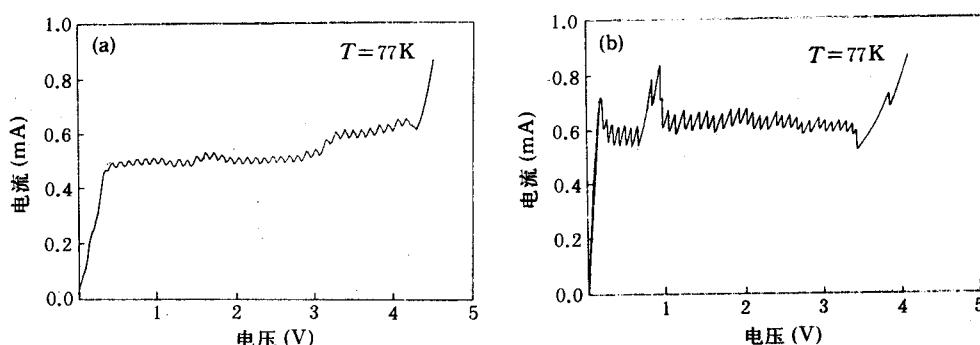


图 1 伏安特性曲线

$$\Delta V = (E_2 - E_1 - \Delta E_1 - \Delta E_2)/e \quad (1)$$

ΔE_1 和 ΔE_2 分别是 E_1 和 E_2 能级的半宽度。从式(1)得到 SL2 样品的实验值 $(E_2 - E_1) = (E_{\Gamma 2} - E_{\Gamma 1}) = 131 \pm 15$ meV, 与预期的值 135 meV 一致。但对 SL1 样品, $(E_2 - E_1) = 109 \pm 12$ meV, 远小于预期的 185 meV。因此, SL1 样品的电流振荡不能归因于相邻量子阱的 $E_{\Gamma 1}$ 和 $E_{\Gamma 2}$ 能级间级联共振隧穿。

我们断言, 电流的周期振荡是由 GaAs/AlAs 超晶格的 Γ -X 共振导致的, 而不是相邻量子阱的 $E_{\Gamma 1}$ 和 $E_{\Gamma 2}$ 能级间级联共振隧穿的结果。SL1 的理论计算 $E_{\Gamma 1}$ 值与 $(E_2 - E_1)$ 实验值的和是 170 meV, 与 AlAs 层的 X_1 能谷基态到 GaAs 量子阱的 Γ 能谷底的能量差十分接近。夏建白^[5]的计算表明 GaAs/AlAs 超晶格中的 Γ -X 共振强于 Γ - Γ 共振。郑厚植等人^[6]通过磁隧穿实验已发现在阱宽为 75 Å 的 GaAs/AlAs 双势垒结构中, 出现 Γ -X 共振隧穿的偏压小于产生与 GaAs 量子阱的 $E_{\Gamma 2}$ 能级共振时的偏压。

以上分析得知: SL1 样品中形成了一种高场畴, 图 2 所示的导带图可以使我们更好的理解这一点。在低场畴中, GaAs 量子阱的基态上的电子通过基态之间的共振隧穿而输运(图 2 所示)。但在高场畴中, 第 n 个阱的基态不与第 $n+1$ 个阱的第一激发态简并, 而是与相邻 AlAs 势垒的 X_1 能谷基态对齐。因此电流振荡是 Γ -X 共振隧穿的结果。电子从第 n 个 GaAs 量子阱的基态隧穿到邻近 AlAs 势垒的 X_1 能谷的基态, 然后弛豫到第 $n+1$ 个 GaAs 量子阱的基态。电子从 AlAs 势垒的 X 能谷转移到 GaAs 量子阱的 Γ 能谷的弛豫时间只是几个 ps 或更小^[7], 可以和 GaAs 体材料的 Γ -X 谷间电子转移时间相比拟。这就给出了 GaAs/AlAs 超晶格中高场畴的形成机制的新物理图象。当 GaAs 量子阱厚度减小, 尽管 $E_{\Gamma 2} - E_{\Gamma 1}$ 值增大, 但 GaAs 量子阱的 $E_{\Gamma 1}$ 能级与 AlAs 层 X_1 能谷的基态能量差会减小, 因而会导致电流振荡的电压周期减少。

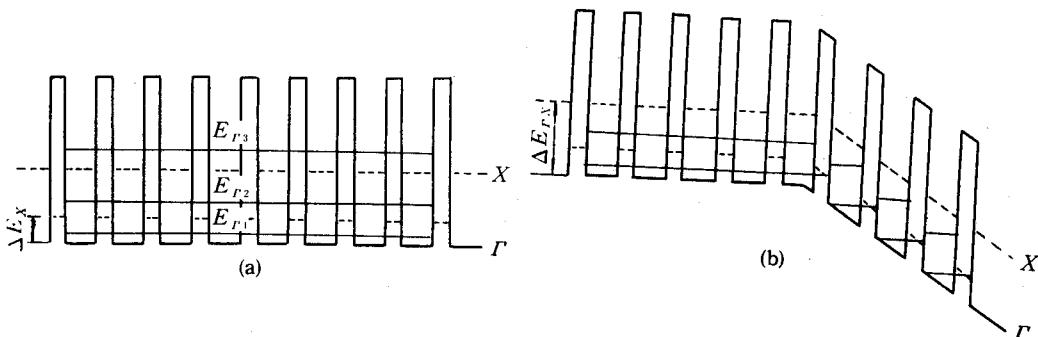


图 2 (a) SL1 样品在零偏压下导带
边 Γ 谷和 X 谷的能带图
(b) SL1 样品在偏压下的能带图

另外, 图 1(b)中在 0.9 V 附近出现了三个高电流峰。这些异常峰被认为是靠近衬底的第 8, 9, 10 层 GaAs 或 AlAs 层的厚度不符合要求的缘故。所以, I -V 特性曲线可以得到有关超晶格各层的信息, 比 X 射线双晶衍射以及 TEM 更方便。

结论: 在弱耦合掺杂 GaAs/AlAs 超晶格中, 利用其 AlAs 层的 X 带基态位于 GaAs

量子阱的 Γ 谷基态和第一激发态之间，我们观察了超晶格 Γ -X 共振的级联隧穿。正是 Γ -X 级联共振隧穿，而不是相邻量子阱的子带级联共振隧穿，导致了一种新的高场畴的形成。

参 考 文 献

- [1] J. B. Gunn, IBM J. Res. Dev., 1966, **10**: 300; 1964, **8**: 141.
- [2] L. Esaki and L. L. Chang, Phys. Rev. Lett., 1974, **33**: 495.
- [3] F. Capasso, K. Mohammad, et al., Appl Phys. Lett., 1986, **48**: 478.
- [4] K. K. Choi, B. F. Levine, et al., Phys. Rev., 1987, **B35**: 4172.
- [5] J. B. Xia, Phys. Rev., 1990, **B41**: 3117.
- [6] H. Z. Zheng, F. H. Yang, et al., Superlattices and Microstructures, 1992, **12**: 279.
- [7] J. Feldmann, J. Nunnenkamp, et al., Phys. Rev., 1990, **B42**: 5809.

Novel Sequential tunneling due to Γ -X resonance in GaAs/AlAs superlattices

Zhang Yaohui, Yang Xiaoping, Liu Wei, Cui Liqiu and Jiang Desheng

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

Received 12 April 1994

Abstract We have studied the sequential tunneling of doped weakly-coupled GaAs/AlAs superlattices (SLs), whose ground state of X valley in AlAs layers is designed to be located between the ground state (E_{Γ_1}) and the first excited state (E_{Γ_2}) of Γ valley in GaAs wells. The experimental results demonstrate that the high electric field domain in these SLs is attributed to the Γ -X sequential tunneling instead of the usual sequential resonant tunneling between subbands in adjacent wells. Within this kind of high field domain, electrons from the ground state in GaAs well tunnel to the ground state of X valley in the nearest AlAs layer, then through very rapid real-space transfer from the X valley in the AlAs layer relax to the ground state of Γ valley of the next GaAs well.

PACC: 7320, 7220H, 7340G