

不对称双势垒结构中的非共振 磁隧穿现象*

杨富华 郑厚植 陈宗圭

(“半导体超晶格”国家实验室,中国科学院半导体研究所,北京)

1989年10月13日收到

本文系统研究了不对称 GaAs/AlAs 双势垒共振隧穿结构中非共振磁隧穿谱在正反偏压方向上的特征差异,并且用渡越电子沿正反方向隧穿通过双势垒结构时在势阱中停留时间的不同合理解释了实验结果。

主题词 共振隧穿,非共振磁隧穿,磁隧穿谱,声子散射,渡越时间

近年来,电子穿越双势垒共振隧穿结构(DBRTS)的动力学过程引起人们极大的兴趣^[1-3],磁隧穿实验是研究它的一种非常有效的手段。Leadbeater 等人^[3]首先采用外加与势垒平面垂直的强磁场方法研究了 DBRTS 结构中在 $I-V$ 特性电流谷区的各种散射过程;并且利用磁隧穿谱鉴别了起源于弹性散射和非弹性散射的非共振隧穿对谷电流的贡献。然而,实验中观察到的磁隧穿谱常常是相当复杂的。在具体的 DBRTS 结构中 LO 声子辅助的隧穿过程可以强于弹性散射诱发的隧穿过程;也可以出现相反情况,其物理机制尚不清楚。由于 LO 声子辅助的跃迁是电子隧穿经过 DBRTS 结构时的一种非弹性散射事件,因此 LO 峰的强弱不仅与电子-声子耦合强度有关,而且也和电子在隧穿过程中与声子的相互作用时间有关。在以往文献中曾定义过不同含义的隧穿时间^[4-7],其中究竟哪一种时间域是真正影响 LO 声子参与的隧穿过程,尚未有实验工作认真研究过。本文的实验结果为回答上述问题提供了某些论据。为此,我们系统研究了若干不对称 GaAs/AlAs DBRTS 结构在 $I-V$ 特性电流谷区的磁隧穿谱。我们发现 DBRTS 结构的磁隧穿谱在正反偏置方向上表现出来的差异确实是和电子在阱内的寿命有关。

我们的 DBRTS 结构是采用分子束外延技术生长在掺杂为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 n⁺GaAs(100)衬底上。它由一个 75 Å 厚的未掺杂 GaAs 势阱和两个分别为 25 Å 和 17 Å 厚的未掺杂 AlAs 势垒构成。双势垒两侧的欧姆接触采取了常用的层次结构^[3],具体器件是采用 $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ 和 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ AuGeNi 金属欧姆电极作掩膜,用光刻技术腐蚀台面而成。DBRTS 结构的 $I-V$ 特性是在 4.2K 温度下用准四端技术进行测量。为了抑制偏置电路在负阻区可能出现的振荡,将 1.5nF 电容紧挨着样品进行并联连接^[8]。由图 1 可见,我们的 DBRTS 结构的 $I-V$ 特性在正向偏置下(顶端电极相对于衬底电极为正向)

* 国家自然科学基金资助项目。——编者注

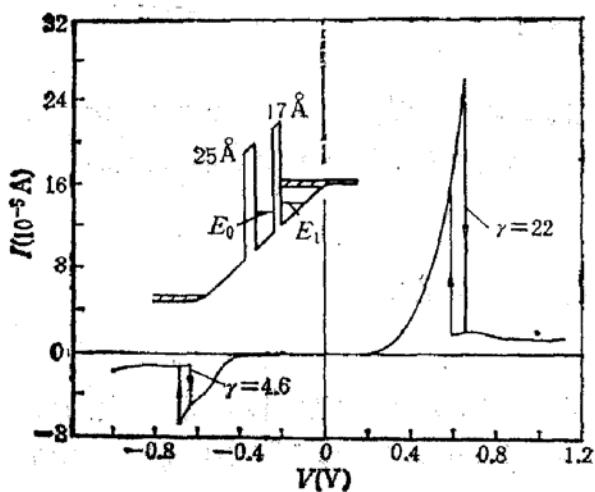


图 1 样品 4 在 $T = 4.2\text{K}$ 下的 $I-V$ 曲线, $\nu = I_p/I_v$ 为电流的峰谷比。插图表示正偏压下的能带结构草图

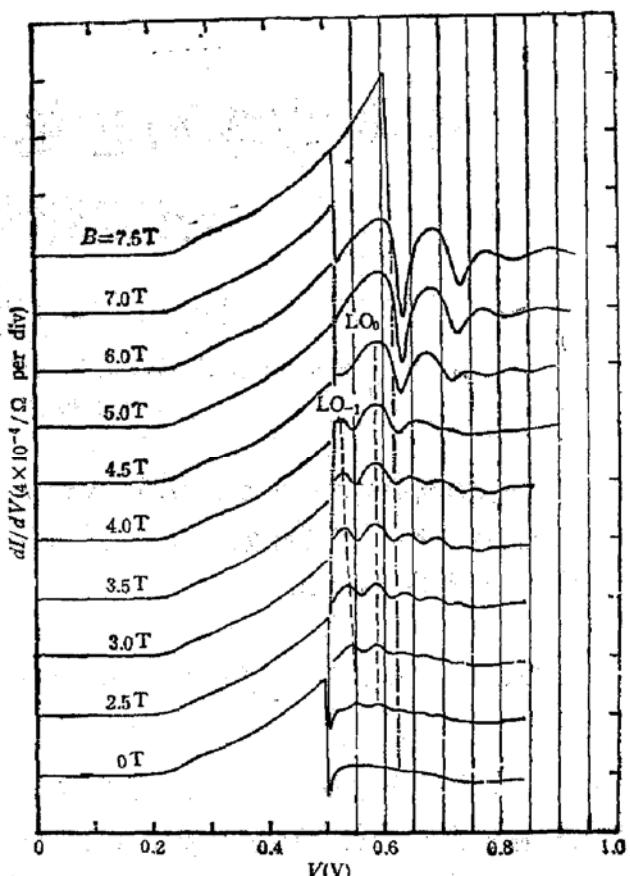


图 2 样品 4 在 $T = 4.2\text{K}$ 和不同磁场下的微分电导 dI/dV 随正向偏压变化的曲线, W_s 是收集势垒的厚度 ($W_s = 25\text{\AA}$)

偏置)的电流峰谷比为 22, 在反向偏置下, 其值为 4.6(偏压由负向正扫描)。在两个偏置方向上都存在明显的双稳区域。图 1 的插图画出了当 DBRTS 样品正向偏置在主共振隧穿峰以外时的能带结构。器件的微分电导 dI/dV 是采用通常的交流测量技术进行测量, 交流恒压源的调制幅度取 1mV。位于图 2 最底部的曲线是在零磁场和 $T = 4.2\text{K}$ 的条件下测得的 dI/dV 随偏置电压变化的特性。我们将重点讨论电流谷区的特性。为清楚起见, 只用两条垂直的点划线来标志双稳区域。在零磁场下紧挨着主共振峰之后出现一个微微隆起的峰结构。该峰结构首先由 Goldman 等人^[7]观察到, 它起源于 LO 声子辅助隧穿对电流的贡献。随磁场从零开始增加, 上述较平坦的峰结构逐渐演变成不同的磁振荡系列。它们既有弹性散射诱导跃迁的贡献; 又有 LO 声子辅助跃迁的贡献。正如 Leadbeater 等人指出的那样, 对于主共振峰以外的磁隧穿过程而言, 渡越电子在垂直于隧穿电流方向上的动量不再守恒, 因此只需满足能量守恒

$$E_t = E_0 + \frac{p\hbar eB}{m^*} + i\hbar\omega_{\text{LO}} \quad (1)$$

式中 E_t 标记发射区中二维子能带的带底能量。由于我们的 DBRTS 结构采用了较宽的 GaAs 隔离层; 因此发射区中的三维电子被积累区的界面势阱量子化而凝聚到 E_t 二维子能带上去。 E_0 是势阱中的二维束缚态的最低子带能量; $\hbar\omega_{\text{LO}}$ 为 LO 声子能量; p 给出隧穿前后 Landau 能级指数的变化, 当 $i = 0$ 磁隧穿过程仅仅与弹性散射诱导的跃迁过

程有关。 $i = 1$ 则代表单个 LO 声子参与的跃迁过程。根据(1)式很容易把峰值电压位置不随磁场而变的振荡峰指派成 $p = 0, i = 1$ 的单纯 LO 声子辅助的隧穿峰。在高磁场下以 LO_p ($p = -1, 1, 2, 3$) 标记的各种卫星振荡系列从 LO_0 主峰衍生出来。图3(a)中的扇形图概括了上述全部可以分辨的振荡系列。正如图中所示的那样，所有 LO_p 振荡系列在磁场趋于零时均外推回到 $V = 0.585V$ 的 LO_0 峰值位置，箭头标记主共振峰位置。迄今为止，我们从 GaAs/AlAs DBRTS 器件测量到的结果再现了以往 Leadbeater 等人在 GaAs/(Al,Ga)As DBRTS 器件上所报道的主要特征。但是 LO_{-1} 是本文首次报道的，我们新观察到的 LO_{-1} 峰起源于积累层中第 $(n + 1)$ 个 Landau 能级上的电子隧穿进入阱中第 n 个 Landau 能级上；并且同时释放一个 LO 声子的跃迁过程。和其他 LO_p 峰不同， LO_{-1} 峰随磁场的增加不是逐渐远离主共振峰；而是逐渐融合进入主共振峰。

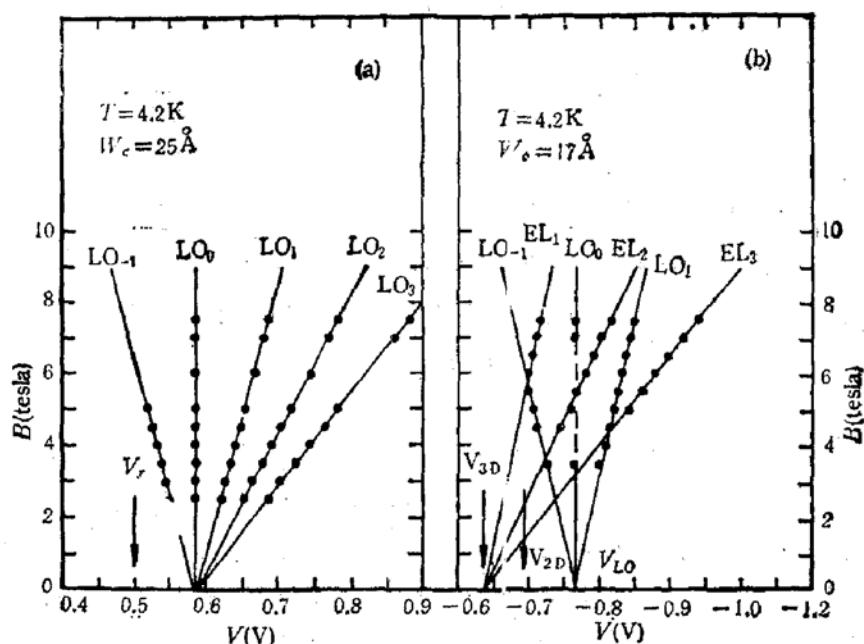


图3 扇形图是不同磁场下的 $dI/dV-V$ 曲线谷区域振荡峰对应的电压位置。

(a) 样品 4 在正偏压下的扇形图。(b) 样品 3 在反向偏压下的扇形图

下面，我们将比较不对称 DBRTS 器件的非共振磁隧穿在正反偏置方向上表现出的特征差异。图3(b)给出了在反向偏置条件下由样品 3 测得的典型扇形图。样品 3 和样品 4 是同一片子上的两个 DBRTS 二极管。 V_{3D} 代表了下述电压偏置条件：势阱中子能带底部 E_0 恰好降到低于发射区三维态的带底，从而三维电子共振隧穿进入阱内准二维态 E_1 的跃迁过程被禁戒。而当偏置电压等于 V_{2D} 的时候，阱中的 E_0 能级不再能和 E_1 能级持平，由 E_1 二维态向阱中 E_0 二维态的共振隧穿也将不可能发生。有关 V_{3D} 和 V_{2D} 的类似判别 Goldman 等人^[8]曾隐约地讨论过，但是对他们的结果存在不少争议。

和正向偏置下的扇形图相比较反向偏置下的扇形图具有下述若干重要特性。

第一，在反向偏置下出现一支新的振荡系列，我们将它记作 EL_p 系列。 EL_p 系列虽然和文献[3]中的 E_1 系列十分类似，但是二者并不完全相同。随磁场 B 降至零， EL_p 振荡系列渐近地会聚到 V_{3D} 处而不是 V_{2D} 。如果我们的 EL_p 系列完全和文献[3]中 E_1 系

列相同,那么 EL_p 系列应当随磁场的降低会聚到 V_{2D} 电压位置。实际上,每当势阱中的第 $(n+p)$ 个分离 Landau 能级被拉到恰好低于发射区三维电子的第 n 个 Landau 子能带的带底时,那么在它们之间由弹性散射诱导的非共振隧穿将被完全抑制;在 dI/dV 微分电导上将观察到 EL_p 峰值。

第二,在反向偏置下上述由弹性散射诱导的隧穿过程 (EL_p 系列)似乎比 LO 声子辅助的隧穿过程 (LO_p 系列)更为明显。在正向偏置下,共有五组 LO_p 振荡系列 ($p = -1, 0, 1, 2, 3$)十分清晰地出现在电流谷区域,没有观察到 EL_p 振荡系列。与此相反,在反向偏置下仅有二组 LO_p 系列,即 LO_{-1} 和 LO_1 尚保持清晰可辨,并且在磁场达到 7 T 以前 LO_0 主峰几乎无从识别。

第三,在 V_{2D} 和 V_{3D} 之间的电压范围内 (V_{Lo} 标记 LO_0 峰的偏压位置) 出现十分有趣的 LO_{-1} 峰和 EL_1 峰在不同磁场区间内的共存现象。

为了正确理解不对称 DBRTS 结构在正反偏置方向上表现出来的明显特征区别,我们将进一步探讨其可能的物理机制。在假设电-声子相互作用仅仅局限于阱区的条件下, Wingreen 等人^[10]最近采用 S 散射矩阵法推导了通过 DBRTS 结构的 LO 声子辅助隧穿的几率,并且证实了实验中在电流谷区观察到的 LO 声子“复制”峰。出于相同的考虑,我们也假设电-声子相互作用主要发生在阱区。这样不难理解对于像 LO 声子辅助隧穿这样一个动力学过程,渡越电子在阱区的停留时间(或者称电子在阱区的寿命)应当是一个主要影响因素。在接连隧穿模型中电子在阱中的停留时间由下式给出^[8,11]

$$\tau = \frac{2W}{T_e} \left(\frac{m^*}{2E_0} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中 W 为势阱宽度; E_0 为阱内准束缚态的能量; T_e 是收集势垒的透穿几率。很显然, T_e 越大(即收集势垒越薄)电子在阱内的寿命 τ 就越短。对于正向隧穿,我们的 DBRTS 结构具有较厚的收集势垒(25 Å)。因此电子在阱内有较长的停留时间使得它们有较大的机会和 LO 声子相互作用,所以 LO_p 振荡系列变得较强。在反向偏置下情况则是相反。较薄的收集势垒(17 Å)和较短阱内停留时间使 LO 声子辅助隧穿变得微弱(即 LO_0 系列的振荡峰)。由此我们可以看出,电子在阱内的寿命 τ 是控制 LO 声子辅助隧穿的主要因素,同时也解释了实验中在正反两个方向上表现出来的差异。

作为结束语,本文系统研究了在不对称双势垒共振隧穿结构中与弹性散射和非弹性散射有关的非共振磁隧穿过程。它们在正反偏置方向上表现出来的特征差异是无可置疑的。出现这种差异的原因是由于渡越电子沿两个相反方向隧穿通过 DBRTS 结构时在阱内的停留时间不同。

感谢国家表面物理实验室为我们提供分子束外延的 DBRTS 基片以及李承芳同志的工艺制作。

参 考 文 献

- [1] V. J. Goldman, D. C. Tsui and J. E. Cunningham, *Phys. Rev.*, **B35**, 9387 (1987).
- [2] M. Helm, F. M. Peeters, P. England, J. R. Hayes and E. Colas, *Phys. Rev.*, **B39**, 3427 (1989).
- [3] M. L. Leadbeater, E. S. Alves, L. Eaves, M. Henini, O. H. Hughes, A. Celeste, J. C. Portal, G. Hill and M. A. Pate, *Phys. Rev.*, **B39**, 3438 (1989).

- [4] M. Buttiker and R. Landauer, *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 739 (1982).
- [5] M. Buttiker, *Phys. Rev.*, **B27**, 6178 (1983).
- [6] E. H. Hauge, J. P. Falick and T. A. Fjeldly, *Phys. Rev.*, **B36**, 4203 (1987-I).
- [7] C. R. Leavens and G. C. Aers, *Phys. Rev.*, **B39**, 1202 (1989-I).
- [8] V. J. Goldman, D. C. Tsui and J. E. Cunningham, *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 1256 (1987).
- [9] V. J. Goldman, D. C. Tsui and J. E. Cunningham, *Phys. Rev.*, **B36**, 7635 (1987-I).
- [10] N. S. Wingreen, K. W. Jacobsen and J. W. Wilkins, *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 1396 (1988).
- [11] T. Weil and B. Vinter, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1281 (1987).

Nonresonant Magneto-Tunneling in Asymmetric GaAs/AlAs Double Barrier Structures

Yang Fuhua, Zheng Houzhi and Chen Zonggui

(National Laboratory for Superlattice and Related Microstructures and
Institute of Semiconductors, Academia Sinica, P. O. Box 912, Beijing, China)

Abstract

The characteristic differences in nonresonant magneto-tunneling processes measured from a number of asymmetric GaAs/AlAs double-barrier resonant-tunneling structures in two opposite biases have systematically been studied, and ascribed to the different dwell times of traversing electrons in the well as they tunnel along two opposite directions.

Key words Resonant Tunneling, Nonresonant Magneto-Tunneling, Magneto-Tunneling spectra, Phonon scattering, Dwell time