

GaAs/AlGaAs 双量子阱中 量子相干特性的研究

王杏华 郑厚植 李承芳 刘 剑 杨小平

(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)

余 琦 Reino Laiho

(芬兰 Turku 大学 Wihuri 物理研究所 20500 Turku 芬兰)

摘要 研究了低温、平行磁场下两种 GaAs/AlGaAs 双量子阱的量子干涉特性。两种样品的阱宽均为 $60 \text{ \AA}$ ，但势垒层厚度不同，分别为 $120 \text{ \AA}$ 和 $20 \text{ \AA}$ 。实验结果表明，样品的电导随磁场呈周期性振荡，振荡周期近似为 $h/(e \cdot S)$ ，这一结果同 Aharonov-Bohm 效应的理论值相吻合。我们也发现，薄势垒层样品比厚势垒层样品的电导振荡幅度更大一些。

PACC: 0365, 6865, 7340L

1 引言

1959年 Aharonov-Bohm^[1] 报道了一种新型的量子相干现象。图1示出了一个圆环构成的理想自由电子系统，在垂直于圆环的方向上加一磁场 B ，M处一束电子波分为二部份，它们分别经回路 I 和 II 运动至N处，电磁场的矢势 A 对运动电子的波函数有直接的影响。当电子在回路中运动，沿运动路径对矢势 A 的积分 $\int A \cdot d\vec{l}$ 将提供电子波函数一个附加的相位。在回路 I 和 II 中运动电子获得的附加相位是不同的，这样，在N处重新合成的电子波会出现量子相干振荡，其振荡周期为 $h/(e \cdot S)$ ，其中 h 、 e 和 S 分别为普朗克常数、电子电荷和二回路所包围的圆面积。这种现象简称 A-B 效应。

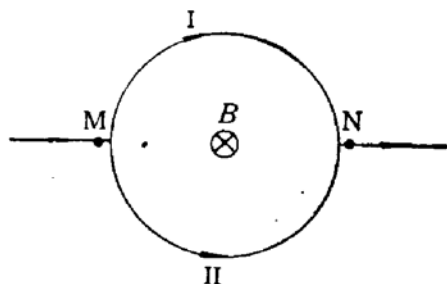


图1 A-B 效应的原理图

量子相干性质的研究是一个十分有意义的凝聚态物理课题。A-B 效应是量子相干介观运输的主要现象之一，它引起了人们极大的兴趣，并试图从实验上验证它。但直到八十年代中期才在细小的金属环^[2]上报导了 A-B 效应。同一时期用 GaAs/AlGaAs 双量子阱^[3]构成封闭环在平行界面的磁场中也观测到 A-B 振荡。近年来人们利用分离栅、电子束曝光在 GaAs/AlGaAs 异质结^[4,5]上刻出零维、一维图形，将一维边缘通道闭合成环，

观测到更强的 A-B 振荡。

本研究中,我们选用高迁移率的 GaAs/AlGaAs 双量子阱结构的样品,二个平行的量子阱代替了图 1 中的运动路径 I 和 H, 由于低温下沿阱平面方向的相位相干长度达几微米,因此我们利用微米级光刻技术便可满足量子相干输运条件。我们观测到了电导振荡,并对实验结果进行了一些分析讨论。

2 样品制备与实验装置

实验样品是用分子束外延生长的。它是在半绝缘 GaAs 衬底上外延生长了二个量子阱,阱宽均为 $60 \text{ \AA}$, 两阱间的 AlGaAs 势垒层厚度不同,样品 1 为 $120 \text{ \AA}$, 样品 2 为 $20 \text{ \AA}$; 所有的外延层都不掺杂,铝的百分比含量为 0.3, 其结构如图 2 所示。采用光刻胶掩模、硅离子注入、退火和合金等工艺形成两个欧姆接触 n^+ 区,它们限定的 GaAs 沟道在 x 方向和 y 方向都为 2 微米。从低温荧光光谱可见,两种样品都具有较窄的单峰, 4.2 K 下半高宽度为 2 meV , 说明样品的质量很好。

实验中让电流沿 x 轴通过 GaAs 量子阱,磁场沿 y 轴方向,样品放在液氮系统中,泵浦液氮可控制温度稳定在 1.9 K 。

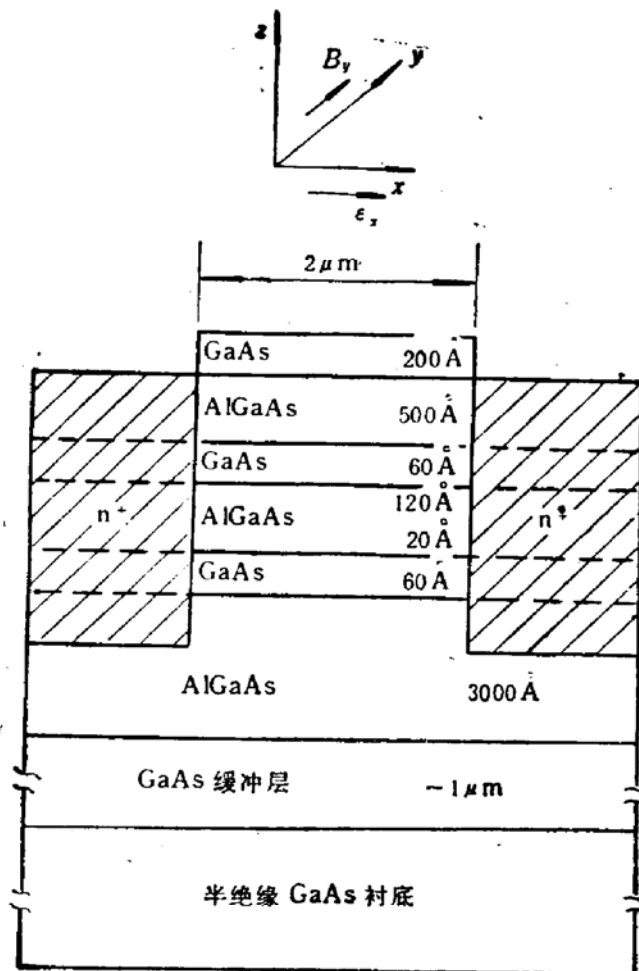


图 2 样品结构的剖面图

3 实验结果与讨论

磁场直接影响量子阱中运动电子波函数的相位,因此可以扫描磁场来调制样品的电导。电导与外加磁场的关系曲线由 X-Y 记录仪记录,所得结果如图 3 所示。我们得到结果如下:

在 AlGaAs 势垒层厚度不同的两种双量子阱样品中都观测到了电导振荡。从图 3 上得到电导振荡周期分别为 $B_1 = 0.131\text{T}$ (样品 1) 和 $B_2 = 0.281\text{T}$ (样品 2)。依照 Aharonov-Bohm 理论 $B = h/(e \cdot S)$, 其中 S 为两个量子阱中心位置所包围的面积。对于样品 1, $S_1 = 2\text{ }\mu\text{m} \times 180\text{ }\text{\AA} = 3.6 \times 10^{-10}\text{cm}^2$, 计算得 $B_1 = h/(e \cdot S_1) = 0.115\text{T}$; 同样,对于样品 2, $S_2 = 2\text{ }\mu\text{m} \times 80\text{ }\text{\AA} = 1.6 \times 10^{-10}\text{cm}^2$, $B_2 = h/(e \cdot S_2) = 0.258\text{T}$ 。实验值比理论值大 10—15%。事实上,在制备样品时,离子注入、退火和合金等工艺过程的影响,使得量子阱沟道长度很难精确地等于所设计的尺寸,实验中的 S 值往往稍小些,导致计算值与实验结果不同,因而这种差异是合理的。

振荡幅度对温度的依赖十分灵敏。4.2 K 下电导与磁场的关系曲线上,样品 1 的曲线上没有观测到任何振荡,样品 2 的曲线上稍稍有些起伏,极不明显。当温度降至 1.9 K,两样品都清楚地显现出电导振荡。一般来说,温度愈低,振荡幅度愈大。这是由于低温下,平均非弹性散射时间增长。近年来,人们认为弹性散射并不影响电子波的相位记忆,只有非弹性散射才使电子不能保持确定的能量,丧失相位记忆,破坏干涉效应。如果平均非弹性散射时间长,那么电子波沿量子阱沟道运动几个微米不会受到非弹性碰撞,依然保持原来的相位记忆,这些电子波重新组合时会出现量子相干振荡。从上面讨论可以看出,为了展示较大的电导振荡,需要选择高迁移率样品,尽量降低系统温度,以获得长的相位相干长度。

实验中电导振荡幅度随样品有所不同。具有 $20\text{ }\text{\AA}$ 薄层势垒的样品 2 中,振荡幅度明显大于厚势垒层的样品 1。原因不很清楚,似乎与两阱之间的耦合效应有关。显然,样品 2 中两量子阱之间电子波函数交迭,存在很强的耦合。但需要更多的实验事实来证实,例如可以改变两阱间势垒层厚度或者加偏压改变两阱之间的电势分布来观测 A-B 振荡的变化,进一步探讨在这种结构中产生 A-B 振荡的物理机制。

在电导-磁场曲线中,除了周期振荡外,还看到电导单调下降和随机涨落。零磁场附近电导单调下降的原因还难以解释。在 GaAs/AlGaAs 单量子阱样品中,我们曾多次测量到负磁阻效应。但从未观测到 GaAs/AlGaAs 双量子阱中的负磁阻效应。为了弄清机

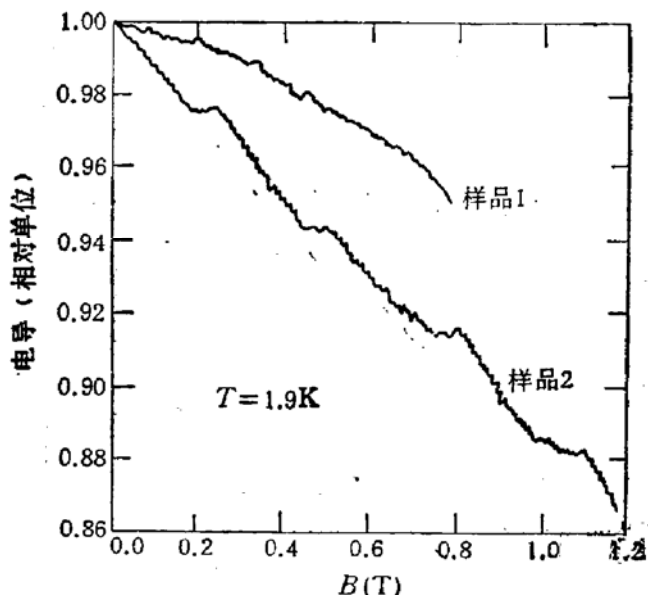


图 3 GaAs/AlGaAs 双量子阱的电导相干振荡 (1.9 K)

理,有必要在样品上加偏压使其中一量子阱耗尽,然后测量样品电导随磁场的变化。

低温下电导涨落现象,可能是电子波函数干涉效应的无规则变化所引起的。也有人认为它是量子混沌的反映。这种涨落曾在介观 Si-MOSFET 系统中得到了证实^[6]。

从本研究可以看出, GaAs/AlGaAs 双量子阱样品的电导随磁场呈周期性振荡,这是一种新型的量子干涉现象,也就是著名的 Aharonov-Bohm 效应。我们的实验不是在图 1 所示的理想电子系统中进行的,样品中两个量子阱沟道首尾是靠重掺杂的 n^+ 区连接的。实际上, n^+ 区中存在着许多杂质、缺陷,它们对电子波强烈地散射,势必会缩短非弹性散射时间,降低相位相干长度。两次非弹性碰撞之间的相位相干会引起量子干涉效应,相位相干长度的减少对观测量子相干效应是很不利的。另外,量子阱沟道宽 (y 方向尺度)为 2 微米,还不够窄,不同模式的电子波可同时通过量子阱沟道,也导致振荡幅度的降低。我们希望通过进一步对物理机制的研究和改进工艺制备条件以观测到更明显的 A-B 效应。

4 结论

我们研究了两种类型的 GaAs/AlGaAs 对称双量子阱的量子相干性质。在温度为 1.9K, 平行于异质结界面的磁场下观测了电导相干振荡现象,电导振荡周期由磁通量子 (h/e) 决定,而与样品的材料、尺寸以及制备过程无关。这和 Aharonov-Bohm 效应预期的理论结果一致。我们也发现具有薄层势垒的样品中振荡幅度更大一些。

参 考 文 献

- [1] Y. Aharonov and D. Bohm, Phys. Rev., 1959, 115: 485.
- [2] R.A. Webb, S. Washburn, C.P. Umbach and R.B. Laibowitz, Phys. Rev. Lett., 1985, 54: 2696.
- [3] S. Datta, M.R. Mallet, S. Bandyopadhyay and R. Noren, Phys. Rev. Lett., 1985, 55: 2344.
- [4] C.J.B. Ford, T.J. Thornton, R. Newbury, M. Pepper, H. Ahmed, D.C. Peacock, D.A. Ritchie, J.E.F. Frost and G.A.C. Jones, Appl. Phys. Lett., 1989, 54:21.
- [5] P.J. Simpson, D.R. Mace, C.J.B. Ford, I. Zailer, M. Pepper, D.A. Ritchie, J.E.F. Forst, M.P. Grimshaw and G.A.C. Jones, Appl. Phys. Lett., 1993, 63: 3191.
- [6] S.B. Kaplan, Phys. Rev. 1988, B38: 7558.

Studies on Quantum Interference Characteristics GaAs/AlGaAs Double Quantum Wells

Wang Xinghua, Zheng Houzhi, Li Chengfang, Liu Jian and Yang Xiaoping

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

Yu Qi and Reino Laiho

(*Wihuri Physical Laboratory, University of Turku, Turku 20500, Finland*)

Abstract Quantum interference characteristics of GaAs/AlGaAs double quantum wells were studied in a parallel magnetic field at low temperature. For two types of samples used, the widths of two quantum wells are of same thickness of $60\text{ \AA}$, AlGaAs barrier layers are of $120\text{ \AA}$ and $20\text{ \AA}$, respectively. Our experimental results demonstrated that the conductance oscillations of the samples with increasing the magnetic field were periodic. The oscillatory period is approximately equal to $h/(e \cdot S)$. The results agree with theoretical value predicted by Aharonov-Bohm effect. We also found that the oscillatory amplitudes of the conductance in samples with a thin barrier layer were larger than those in samples with a thick barrier layer.

PACC: 0365, 6865, 7340L