

半导体量子器件物理讲座

第五讲 弹道运输器件和量子干涉器件*

李 国 华

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)

摘 要 当器件的尺度小到与电子的平均自由程相当时,电子的输运可以看作弹道输运.文章介绍了隧穿热电子晶体管在输运放大器和电子能谱仪两种工作模式下的工作原理以及用共振隧穿热电子晶体管做成的记忆器.如果器件的尺寸进一步减小,电子的波动特性也必须考虑.文章介绍了研究这种器件中的输运特性的方法及量子干涉晶体管和量子反射晶体管的工作原理.

关键词 弹道输运,热电子晶体管,量子干涉器件

BALLISTIC TRANSPORT DEVICES AND QUANTUM INTERFERENCE DEVICES

LI Guo Hua

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

Abstract Electrons travel ballistically when the device size is of the same order of magnitude as their mean free path. The principles underlying tunneling hot electron transistors operating both in the transfer amplifier mode and electron energy spectroscopy mode are described. Also presented is the resonant tunneling hot electron transistor operating as a memory device. The wave-like properties of electrons must be considered if the device size decreases further. The basic concepts for analyzing the electron transport in such devices and the principle of operation of quantum interference and quantum reflection transistors are described.

Key words ballistic transport, hot electron transistors, quantum interference devices

1 引言

“弹道”这个名词大家可能并不陌生,最初它用来描述炮弹出膛后的运行路线,这时炮弹主要依靠惯性运行.弹道输运则是借用“弹道”的概念来描述电子的运动.在固体中虽然存在着大量的原子,但只要这些原子严格地位于周期性的晶格格点上,电子在固体中的运动仍可以看作是自由的,电子可以依靠惯性运动而不与晶格原子碰撞.当然,在实际的固体中总是存在一些晶格缺陷、杂质等散射中心,晶格原子的热运动也会引入散射机制.因此电子在实际的固体中的运行会受到各种散射,它的自由运动距离也随之减小.电子在实际器件中的平均自由运动距离称为平均自由程.分子束外延等现代半导体生长技术的发展,使人们可以生长非常薄的高质量半导体.在利用这些材料做成的器件中,器件的尺度可

以小到与电子的平均自由程相当.这时电子的输运可以看作是弹道输运(电子无散射地穿过器件)或准弹道输运(电子在穿过器件时只散射一次或几次).这种弹道输运可以使半导体器件具有与通常半导体器件不同的特性.在第2节中我们将介绍两种这样的弹道输运器件.

目前常见的半导体中电子的平均自由程约为 $1\mu\text{m}$ 左右,因此在微米量级的器件中电子的弹道输运就比较明显.如果器件的尺度进一步减小,进入亚微米或纳米量级,这时电子的波动特性也必须加以考虑.我们在机械波和电磁波中常见的干涉、相干的现象也会在电子的输运中表现出来.这种器件称为量子干涉器件,在这种器件中,电子的输运特性与通常器件中的输运特性会有很大不同.在第3节中我们将介绍一些这样的器件以及研究它们的输运特性

* 2000-11-08 收到

的方法。

2 隧穿热电子晶体管和共振隧穿热电子晶体管

图1画出了一个隧穿热电子晶体管的能带结构^[1],它由发射极、基极和集电极组成,三极之间被两个势垒(发射垒、收集垒)隔开。它的发射极、基极、集电极均为n型GaAs,发射垒、收集垒为未掺杂的AlGaAs层。选择不同的 x 值,可以使发射垒窄而高而收集垒宽而低。发射极电子隧穿通过发射垒进入基极,发射垒的作用是使发射极中只有在费米能级附近的电子才有足够的几率穿过势垒进入基极,这样进入基极的电子的能量分布比较单一。注入基极的电子的能量由发射极-基极电压决定。从图1可以看到,它远高于基极导带底的能量,因此注入的电子在基区中成为热电子。当基区足够薄时,注入的电子可以通过弹道运输或准弹道运输穿过基区。通过弹道运输穿过基区的电子基本上是单一能量,而通过准弹道运输通过基区的电子的能量稍有分散。

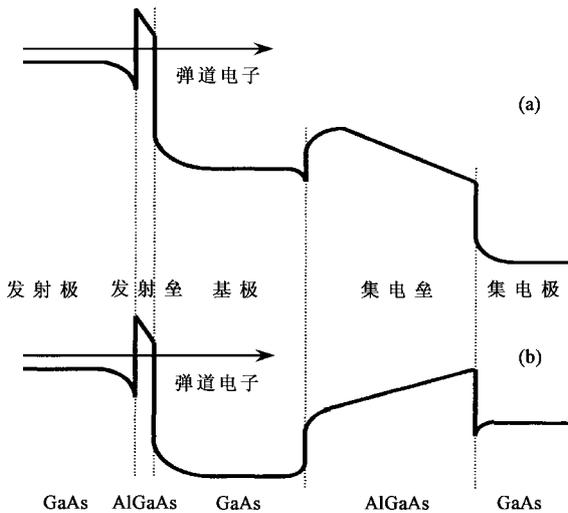


图1 隧穿热电子晶体管工作在(a)运输放大器和(b)电子能谱仪模式下的能带结构图

如果选择集电极的电压比基极电压高,如图1(a)所示。这时收集垒比发射垒低,穿过基区的电子基本上都可以越过收集垒被集电极收集。集电极电流基本上不随集电极-基极电压 V_{CB} 变化,因此输出微分电阻很大。如果采用共基极配置,利用晶体管输入阻抗小、输出阻抗大的特点,就可以得到功率增益。因此,在这种工作模式下隧穿热电子晶体管可以用来做运输放大器。

隧穿热电子晶体管也可以工作在另外一种模式下:电子能谱模式。众所周知,一个器件中的电流是由各种不同能量的电子组成的,为了了解电子的能量分布,需要在收集电子时用一个能量“窗口”把各种不同能量的电子区分开来,这种模式就称为电子能谱模式。通常可以用两种方式做成电子能量“窗口”,一种是带通式“窗口”,即只有某一能量的电子可以通过“窗口”。这种“窗口”原则上可以用双势垒结构做成,通过改变外场来改变窗口能量。另一种是高通式“窗口”,即只有能量高于某一个数值的电子可以通过“窗口”。通过计算通过“窗口”的电子数随“窗口”高度的变化,也可以得到电子的能量分布。隧穿热电子晶体管中的收集垒就可以用来做这种高通“窗口”。如果在隧穿热电子晶体管中选择集电极的电压相对于基极为负,则收集垒的高度被提高,从而只有能量高于收集垒的电子才可以被集电极收集。这时隧道热电子运输放大器就成为一个高通电子能量谱仪,如图1(b)所示。收集垒成为高能“窗口”,改变集电极与基极的电压差 V_{CB} 就可以改变窗口高度。于是电子的能量分布就可以由集电极电流 I_C 随 V_{CB} 的变化 dI_C/dV_{CB} 得到。

图2是从一个实际的隧穿热电子晶体管测得的 dI_C/dV_{CB} 随 V_{CB} 的变化关系。图中分别画出了基区宽度为30nm和72nm的两个器件的 $(dI_C/dV_{CB}) - V_{CB}$ 特性曲线。发射极-基极电压 V_{BE} 作为注入电子的能量的参数。这个特性曲线反映了到达集电极的电子的能量分布。从图2可以看到,在基区宽度为30nm时,特性曲线在 $V_{CB} = -120$ meV附近有一个高峰,表明从发射极注入的电子经过弹道运输后到达集电极时它的能量仍是比较集中的,分布在某一个能量的附近。这也是弹道运输的特点。不同的 V_{BE} 时能量峰值也会变化,反映了通过入射垒入射的电子的能量的变化。从图2也可以看到,在 V_{CB} 高于-50mV时仍有一些电子分布。这些电子是经过准弹道运输到达集电极的,因此能量较低,也比较分散。在基区厚度为72nm的特性曲线中,弹道运输的峰比较低,表明在基区比较厚时,能通过弹道运输到达集电极的电子数减少。更多的电子通过准弹道运输到达集电极,或通过散射,成了通常的热平衡电子。

如果将隧穿热电子晶体管中的发射垒改成双势垒,就成为共振隧穿热电子晶体管^[2]。它与隧穿热电子晶体管的不同之处是从发射极注入基极的电子的能量更加单一,而且它具有负阻特性。图3(a)画出

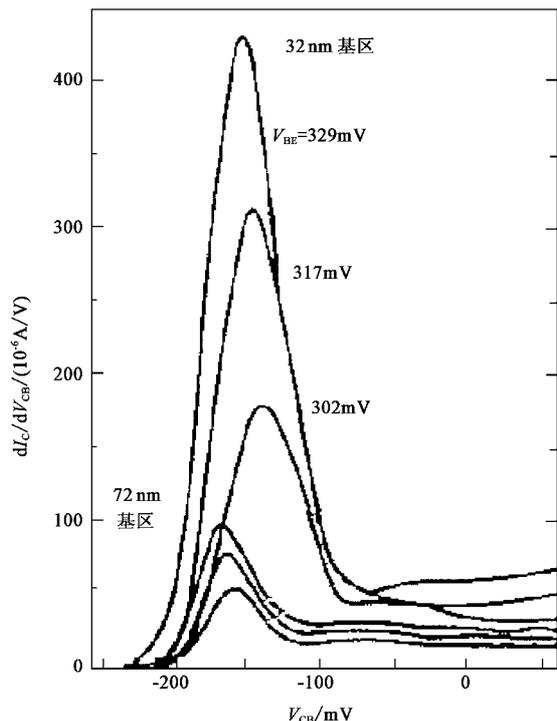


图 2 用隧穿热电子晶体管测得的弹道电子的能量分布

了共振隧穿热电子晶体管的工作原理. 当 $V_{BE} > 0$ 时, 发射极电子通过共振隧穿注入基极, 然后通过弹道输运到达集电极. 这时集电极电流 I_C 随 V_{BE} 的增加而增加. 当 V_{BE} 足够大时, 共振隧穿截止. 集电极电流减小, 从而在 $I_C - V_{BE}$ 特性曲线中形成负阻. 如果在双势垒结构中两个能级, 第一能级共振隧穿时隧穿电子的能量比收集垒低, 电子不能进入集电极而从基极流走. I_B 随 V_{BE} 增加, $I_C \sim 0$, 负阻出现在基极电流中. 而第二能级共振时隧穿电子的能量比收集垒高, 电子可以到达集电极, I_C 随 V_{BE} 增加. 这样的共振隧穿热电子晶体管可以作为双稳态记忆器, 如图 3(b) 所示. 在基极上接上负载电阻和电源, 使负载线与 $I_B - V_{BE}$ 特性曲线交于三点, 其中两点是稳定点. 通过外加脉冲可以使晶体管工作在两个稳定点之一. 当晶体管工作在低电压点 S_1 时, 集电极电流 I_C 很小, 可用来表示“关”; 而当晶体管工作在高电压点 S_2 时, 集电极电流 I_C 很大, 可用来表示“开”.

3 量子干涉器件

在半导体中电子的德布罗意波长为 100 \AA 的量级, 当器件的尺寸与电子的德布罗意波长相当时, 在

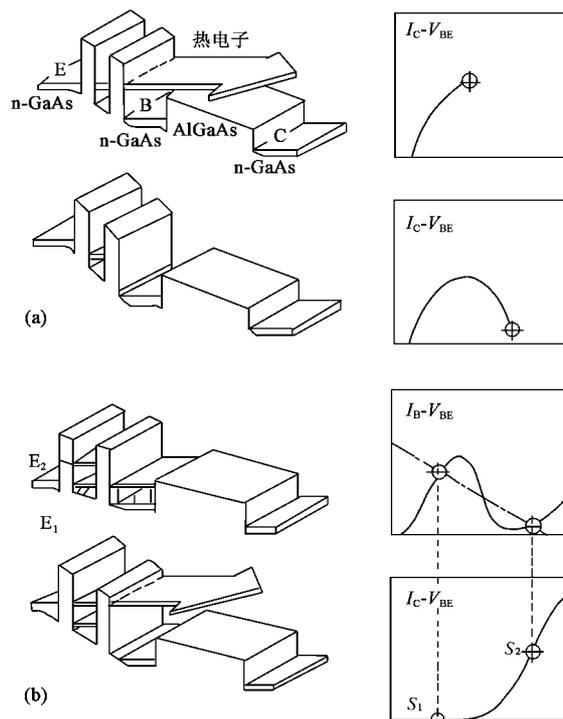


图 3

- (a) 共振隧穿热电子晶体管的工作原理;
- (b) 共振隧穿热电子晶体管用作记忆器

电子的输运中必须考虑电子的波动特性. 电子的运动要用它的波函数来描述, 它的振幅、波矢、相位等参数都要考虑. 图 4 画出了一个两端量子干涉器件的示意图. 量子器件通过理想导体连接到两个端电极上, 端电极是发射或吸收电子的源和漏, 它可以处在不同的电位. 理想导体可以看作是一根长而直的电子波导, 电子沿导线的运动可以看作一维的平面波, 而在垂直于导线的方向, 电子的能量是量子化的, 通常可以有几个能量本征值. 这在量子输运中称为有几个导电通道. 量子干涉器件可以看作是一个多通道的散射体. 电子在经过器件后可以从一个通道散射到另一个或几个通道. 如果我们把端电极 a 处的电子看成是由两部分组成: 一部分从端电极流向器件, 称为入射电子, 入射电子波的振幅为 a^+ ; 另一部分是从器件流向端电极的电子, 称为出射电子, 出射电子波的振幅为 a^- . 同样, 端电极 b 处的入射电子波振幅为 b^+ , 出射电子波振幅为 b^- . 经过量子器件的散射以后, 从端电极 a 入射的电子可以透射到端电极 b, 也可以反射回端电极 a. 整个量子器件的散射矩阵可写为

$$\begin{pmatrix} a^- \\ b^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & t \\ t & r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a^+ \\ b^+ \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 r 为电子从 a 电极入射又反射回 a 极的分量, t 为电子从 a 电极入射透射到 b 极的分量, r' 为电子从 b 极入射又反射回 b 极的分量, t' 为电子从 b 极入射透射到 a 极的分量. 电子从端电极 a 透射到端电极 b 的几率为

$$T = |t|^2. \quad (2)$$

如果导线有几个导电通道, 则需要对所有的导电通道求和. 这样可以得到器件的电导

$$G = \frac{e^2}{h} T, \quad (3)$$

其中 e 是电子电荷, h 是普朗克常数. (3) 式是最简单的量子输运公式. 更复杂的理论可以参阅文献 [3].

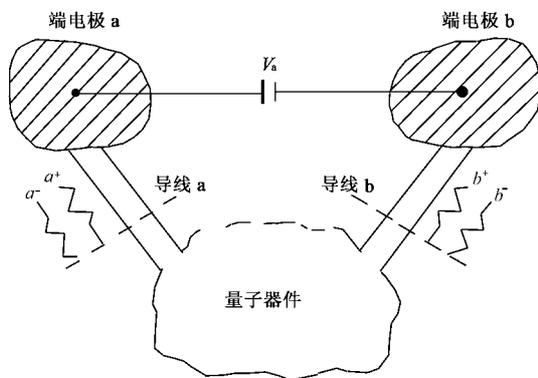


图4 两端量子器件示意图

为了对量子干涉器件有一个感性的了解, 我们介绍一个实际的器件^[4]. 图5画出了量子干涉晶体管的器件结构示意图. 它是在一个通常的场效应晶体管的通道中生长一个势垒, 使势垒长度足够小, 电子可以弹道输运通过势垒区, 而且通道足够窄, 每个通道只有一个子能带(单通道). 电子从左端注入, 它可以分别通过通道1和通道2到达右端, 透射矩阵元为

$$t = t^{(1)} + t^{(2)}, \quad (4)$$

$t^{(1)}$ 和 $t^{(2)}$ 分别是通过通道1和通道2的透射系数. 当 $t^{(1)}$ 和 $t^{(2)}$ 振幅相同且相位差为 θ 时, 电子通过两个通道的总几率为

$$T = |t|^2 = 2|t^{(1)}|^2(1 + \cos \theta), \quad (5)$$

它将随 θ 的变化而振荡. 这种效应称为 Aharonov - Bohm 效应^[5]. 如果通过栅极加上电压, 使两个通道的电势相差 V_{12} . 由于加上电场后通道1, 2中 z 方向的量子化能级的能量不同, 而电子在输运时总能量要满足守恒条件, 所以电子在通道1, 2中的动能不同. 相应的电子沿 x 方向的波矢也将不同. 电子通

过两个通道后的相位将发生变化, 其相位差为

$$\theta = (k_1 - k_2)L, \quad (6)$$

其中 k_1 和 k_2 分别是电子在通道1, 2中沿 x 方向运动的波矢, L 是通道长度. θ 与外加电压有关, 可将它写成外加电压的函数:

$$\theta(V_{12}) = \theta(0) + \alpha V_{12}, \quad (7)$$

其中 α 与电压无关. 则晶体管的电导可以写成

$$G = G_0[1 + \cos(\theta(0) + \alpha V_{12})]. \quad (8)$$

这样, 晶体管的电导将随外加电压的变化而振荡, 频率为 $2\pi\alpha$. 如果器件的通道足够窄, 每个通道只有1个子能带, 那么这种振荡的调制度可达100%. 如果通道中存在多个子能带, 则调制度会小于100%.

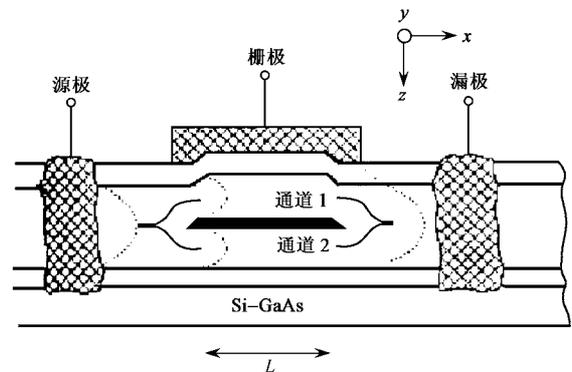


图5 量子干涉晶体管

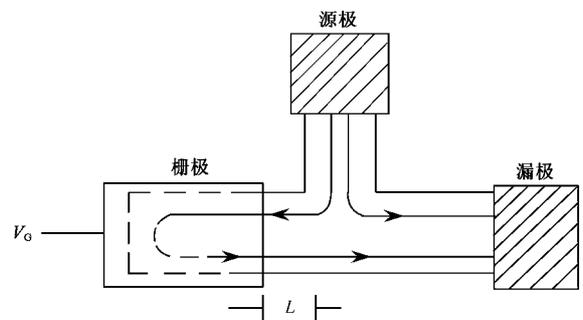


图6 量子反射晶体管

下面再介绍一个由三个电极构成的量子反射晶体管. 图6给出了这种晶体管的器件结构示意图. 其中源极和漏极是欧姆接触, 栅极是肖特基结. 如果通过改变栅极电压来改变栅极的反射系数, 则可以改变源 - 漏之间的电流. 与两端器件类似, 一个由三个端电极构成的低维电子系统中的散射矩阵可以写成

$$\begin{pmatrix} S^- \\ D^- \\ G^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{SS} & t_{SD} & t_{SG} \\ t_{DS} & r_{DD} & t_{DG} \\ t_{GS} & t_{GD} & r_{GG} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S^+ \\ D^+ \\ G^+ \end{pmatrix}, \quad (9)$$

其中 S, D, G 分别表示源、漏和栅极。因为栅极是肖特基结, 流入栅极的电子波 G^- 会从栅极反射回来, 因此它和从栅极注入的电子波 G^+ 之间有一定的关系:

$$G^+ = RG^-, \quad (10)$$

其中 R 是栅极的反射矩阵。利用 G^+ 和 G^- 之间的关系可以将(9)式的散射矩阵降阶, 成为

$$\begin{vmatrix} S^- \\ D^- \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r & t \\ t & r' \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S^+ \\ D^+ \end{vmatrix}, \quad (11)$$

它的矩阵元可以从(9)和(10)式算得。例如从源极到漏极的透射系数可以算得为

$$t = t_{DS} + t_{DG}(I - Rr_{GG})^{-1}Rt_{GS}, \quad (12)$$

如果将它展开成级数, 则有

$$t = t_{DS} + t_{DG}Rt_{GS} + t_{DG}Rr_{GG}Rt_{GS} + \dots, \quad (13)$$

它有十分明确的物理意义。其中第 1 项是电子直接从源极透射到漏极, 第 2 项是电子从源极出射后经栅极反射 1 次再透射到漏极, 第 3 项是电子经栅极反射 2 次再到漏极, 依次类推。假定栅极的反射率可写成

$$R_{mm} = \delta_{mm} \exp(i2k_m L), \quad (14)$$

其中 k_m 是第 m 个模式的波矢, L 是栅极到结的距离, 改变 L 可以使电导发生周期性的变化。与量子干涉晶体管类似, 如果导体中只有一个导电通道时, 电导的变化可达 100%, 而如果导体中有多个导电

通道, 则电导变化的振幅将变小。

4 结语

本讲介绍了两种量子电子器件, 在弹道输运器件中, 电子可以无散射地通过基区, 类似于炮弹的“弹道”运动。利用这种特性可以做成放大器, 也可以做成测量电子能量分布的电子能谱仪。如果将弹道输运与双势垒共振隧穿结合起来, 则可以做成双稳态记忆器。

当器件的尺寸与电子的德布罗意波长可比拟时, 电子的波动特性必须加以考虑, 这种器件称为量子干涉器件。在量子干涉晶体管和量子反射晶体管中, 都可以看到由于电子波的相位变化引起的电流振幅的变化, 这种干涉效应是通常电子器件中所没有的。

参 考 文 献

- [1] Heiblum M. Solid State Electron., 1981, 24:343
- [2] Yokoyama N, Imamura K, Muto S *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1985, 24:L853
- [3] 郑厚植. 物理学进展, 1992, 12:249 [Zhen H Z. Progress in Physics, 1992, 12:249 (in Chinese)]
- [4] Datta S, Cahay M, McLennen M. Phys. Rev., 1987, B36:5655
- [5] Washburn S, Webb R A. Adv. Phys., 1986, 35:375

2001 年第 9 期《物理》内容预告

研究快讯

纳米金线的生长序列、奇特结构和性质(王广厚等)。

评 述

生命体吸收的红外光的非热生物效应的研究(庞小峰)。

知识和进展

自旋电子学和相干态(夏建白);
化学热解——一种优异的制备纳米材料的新方法(II)(邹炳锁等);
实验室天体物理学中的标度变换规律(夏江帆等);
金融市场中经纪人相互竞争和适应性行为的物理模

型(全宏俊等)。

物理学和高新技术

光谱技术在大气环境监测中的作用(王振亚等)。

实验技术

质谱仪在激光等离子体物理研究中的应用(腾浩等)。

讲 座

天体物理学讲座第一讲 恒星的演化(黄润乾);
光通信中的光电子器件讲座第二讲 光纤光栅器件在光纤通信中的应用(辛雨等)。