

一种新型的高频半导体量子点单电子泵*

李 玲¹⁾²⁾ Kaestner B³⁾ Blumenthal M D⁴⁾⁵⁾ Giblin S⁴⁾ Janssen T J B M⁴⁾
Pepper M⁵⁾ Anderson D⁵⁾ Jones G⁵⁾ Ritchie D A⁵⁾ 高 洁¹⁾

1) 四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

2) 四川师范大学物理学院与固体物理研究所, 成都 610066)

3) Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38100 Braunschweig, Germany)

4) National Physical Laboratory, Hampton Road, Teddington TW11 0LW, UK)

5) Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge CB3 0HE, UK)

(2007 年 5 月 23 日收到, 2007 年 7 月 18 日收到修改稿)

除了直流负电压外, 还在浅法刻蚀出的 GaAs/AlGaAs 量子线上的两个金属指形门上分别叠加两个相位相差 π 的正弦信号, 从而对形成量子点的两个势垒作不等幅调制. 在无源漏偏压的情况下, 通过周期形成的量子点实现了单电子的搬运. 由于新的半导体量子点单电子泵不是依赖库仑阻塞效应通过隧穿进行单电子输运, 因此, 该器件就不会受到固定隧穿时间引起的低工作频率限制. 在 1.7 K 温度下, 频率达到 3 GHz 仍然可以观测到量子化电流平台, 对应的电流值达到 0.5 nA 量级. 这种新器件提供了实现高速度、高精度搬运单电子的另一种可能途径.

关键词: 单电子输运, 单电子旋转门, 单电子泵, 量子化电流平台

PACC: 7335C, 7320D, 7360L

1. 引 言

近年来, 单电子输运和单电子器件因其广泛的应用前景而成为一个热点研究领域, 国内外的研究者在该领域内做了大量工作^[1-12]. 目前, 国际计量界正在讨论采用自然量子现象和基本物理常数重新定义国际单位制中的质量、电流强度、热力学温度和物质质量四个基本量对应的基本单位: 千克、安培、开尔文和摩尔. 而 20 世纪 90 年代发展起来的单电子输运器件是最有希望提供量子电流标准的一种器件.

在外加射频信号的作用下, 单电子输运器件产生的量子化电流由信号频率决定, 即 $I = nef$, 这里 n 表示一个周期被输运的电子数. 因此, 只要能够精确控制每个循环内输运的电子数, 就可以使用高精度的频率控制产生的电流. 若产生的高精度的电流能够达到 nA 量级或更大, 便有可能建立起量子电流标准. 根据制备材料的不同, 单电子输运器件可分为两类: 金属系统和半导体系统. 1990 年 Geerligns 等人^[7]研制出的单电子隧穿旋转门 (turnstile) 器件和

1992 年 Pothier 等人^[8,9]研制的具有三个隧道结的单电子泵 (single electron pump), 以及后来制备出的七个隧道结的单电子泵^[10]等属于前者. 金属系统采用的主要材料是金属铝, 相应的隧道结由 Al-AlO_x 构成. 而 Kouwenhoven 等人^[11]和 Nagamune 等人^[12]的半导体量子点旋转门, Shilton 等人^[6]的表面声波单电子输运 (SAWSET) 器件, 以及最近 Fujiwara 等人^[13]的单电子电荷耦合器件 (CCD) 则属于后者. 采用的半导体材料有 GaAs/AlGaAs 异质结和硅. 对于所有的单电子旋转门 (包括 CCD) 器件, 只有在源漏两极加上有限偏压时, 才可能产生量子化电流, 而且其方向也由偏压的极性决定. 而对于其他的器件, 即使在零偏压下, 外加射频信号也能实现单电子输运. 这类器件统称为电子泵, 其产生的电流方向视具体情况而定. 此外, 这些器件的差别还包括: 1) 对于金属系统, 金属/氧化物隧道结是制作在器件中, 因此, 器件一旦完成, 其隧穿电阻 R_T 就固定了. 而对于半导体系统, 则是利用表面门技术, 在门上加适当的负电压耗尽其下方的电子, 形成一耗尽区. 对两边的电子而言, 该耗尽区就相当于一个隧穿势垒. 因此, 在实验

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60436010), 国家科技支撑计划 (批准号: 2006BAF06B09), 四川师范大学校基金 (批准号: 07ZDY004) 资助的课题.

过程中,可以通过改变加在门上的电压调节其隧穿电阻 R_T . 2) 因为 1) 的原因,在金属系统中,由两个固定金属/氧化物隧道结构成的电子岛是固定的,其形状和尺寸不能改变,而在半导体系统中,由两个可变隧穿势垒构成的量子点则可能发生形状上的周期变化或者空间上的周期运动. 3) 对于基于金属制作而成的单电子泵和旋转门器件,以及 Kouwenhoven 等人和 Nagamune 等人的半导体量子点旋转门器件,是基于库仑阻塞和隧穿效应实现单电子输运. 这里主要利用了电子的波动性. 对于 CCD 和 SAWSET 器件,单电子输运则不是通过这种隧穿机理实现的. 电子是依靠周期形成的量子点从源极搬运到漏极的. 这里主要利用了电子的粒子性.

对于金属系统,一方面,只有金属/氧化物隧道结同时满足热涨落条件—— $E_C \gg k_B T$ 和量子涨落条件—— $R_T \gg R_K$ 时,电子岛中的电子数目才可能稳定. 这里 $E_C = e^2/2C$ 表示给电容为 C 的电子岛增加一个电子所需要的能量, $R_K = h/e^2 \approx 25.8 \text{ k}\Omega$ 表示量子化电阻. 另一方面,为了减少漏循环(missing cycle)带来的误差,要求外加射频信号的频率满足条件 $f \ll (R_T C)^{-1}$, $R_T C$ 表示隧穿时间. 这样满足条件 $R_T \gg R_K$ 的固定隧穿电阻就限制了这类器件的工作频率. 另外,对于 Kouwenhoven 等人和 Nagamune 等人的半导体量子点旋转门,虽然可以调节隧道结的 R_T ,但是仍然要求 $R_T \gg R_K$,即电子仍然是通过隧穿机理进行输运的. 因而,该类半导体量子点器件的工作频率仍然要受到隧穿时间的限制. 与理论预言一致,实验发现,金属/氧化物隧道结的单电子泵和旋转门以及半导体量子点旋转门的最高工作频率都没有超过 20 MHz,与该频率对应的电流只有 pA 量级. 因此,尽管七隧道结单电子泵产生的电流精度达到 10^{-7} ,但 pA 量级的量子化电流也只能应用于电容标准^[10],而不能作为量子化的电流标准.

1996 年, Cavendish 实验室首次成功应用表面声波搬运单个电子,并首次实现了千兆赫兹的工作频率,得到了 nA 量级的量子化电流^[14]. 这类器件被称为表面声波单电子器件,它是采用 GaAs/AlGaAs 异质结的二维电子气(2DEG)制作而成的. 由于压电效应,表面声波产生的运动电势叠加在分裂门产生的静电势垒上,形成了运动的量子点. 在一个周期内,量子点就从一端的 2DEG 中俘获一定数量的电子,在量子点爬越势垒的过程中,大部分电子会离开量子点,到最后只有一个电子被搬运到达另一端,因

而,产生的电流为 $I = ef$,其方向由表面声波传播的方向决定. 之后,德国的国家技术物理研究院(PTB)^[15],英国的国家物理实验室(NPL)^[16],丹麦的哥本哈根大学^[17],以及四川大学^[18]都相继开展了对表面声波单电子器件的研究. 不过,到目前为止,表面声波产生的量子化电流的最高精度也只有 10^{-4} ,而且对产生误差的机理也不是很清楚.

2004 年, Fujiwara 等人^[13]研制出的能在高温下工作的硅线 CCD 单电子输运器件也完全放弃了库仑阻塞和隧穿效应. 为了实现单电子输运,首先在两个门上分别加上直流负电压,从而形成一个静态的量子点,然后将有相移的方形电压脉冲周期信号分别叠加在直流电压上,从而控制形成量子点的两个势垒的高度. 当靠近源极的(入口)势垒降到最低(低于费米面),而另一个(出口)升到最高时,量子点消失. 随着入口势垒的升高,部分电子被限制在两个势垒之间(它们不是通过隧穿进入量子点的);到入口势垒升到最高,出口势垒降到最低时,量子点再一次消失,从源极搬运的电子进入漏极;之后出口势垒开始上升,随之形成的量子点也会从漏极俘获(不是隧穿进入量子点的)电子搬运到源极. 但是,由于存在有限的源漏偏压,在一个周期内,从源极搬运到漏极的电子数多于从漏极到源极的电子数,因而净余电子从源搬运到漏,实现了单电子的输运. 原则上讲,该器件的工作频率不受隧穿时间的限制.

最近,我们研制出了一种新型的高频半导体量子点单电子泵^[19]. 从器件制作上讲,器件与 Nagamune 等人^[12]的半导体量子点器件极其相似;从工作原理上讲,本器件与表面声波单电子器件和 Fujiwara 等人研制的 CCD 相似,它们都不是用库仑阻塞和隧穿机理进行单电子的输运. 从实验结果上看,本器件与表面声波相似,再一次实现了千兆赫兹的工作频率,即所得到的量子化电流达到了 nA 量级. 与 CCD 相比, Fujiwara 等人用电压方形脉冲对 CCD 的两个势垒进行调制,而在本实验中,则用单色正弦信号对两个势垒进行调制,这种窄频带信号更能有效地传输到器件的金属门上. 因此,我们的工作频率远高于 CCD 的最高工作频率,达到 3 GHz. 另外,实验结果还表明,新器件产生的量子化电流的极性与源漏之间所加偏压的极性无关,而且即使在零偏压情况下,仍然可以观测到量子化电流平台. 区别于依赖源漏偏压的半导体量子点旋转门和 CCD,我们把这种新的单电子器件称为半导体量子点单电

子泵.

本文第二节介绍新型半导体量子点电子泵的结构和操作,以及相应的单电子搬运模型,第三节给出实验结果和对实验结果的讨论.

2. 实验器件和单电子搬运模型

器件是在 GaAs/AlGaAs 调制掺杂异质结上制作出来的.在温度为 4.2 K 时,距离基片表面 100 nm 的二维电子气(2DEG)的迁移率为 $150 \text{ m}^2/\text{Vs}$,电子浓度为 $1.7 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$.利用溶液 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:4:100$ 在基片表面上采用浅刻蚀方法刻蚀出一条宽 700 nm、长 $5 \mu\text{m}$ 、深 33 nm 的窄量子线,见图 1 的扫描电子显微镜图.量子线的两端连接到 2DEG,在 2DEG 的上方蒸镀欧姆电极.从图 1 可以看到,有六根指形门(finger gates)跨过刻蚀形成的电子沟道.这些金属指形门是用电子束刻和金属蒸镀两种方法制作而成的,其厚度为 48 nm(Ti(15 nm)/Al(33 nm)),宽度为 100 nm,门之间的距离为 150 nm.器件是在剑桥大学 Cavendish 实验室制作成的.

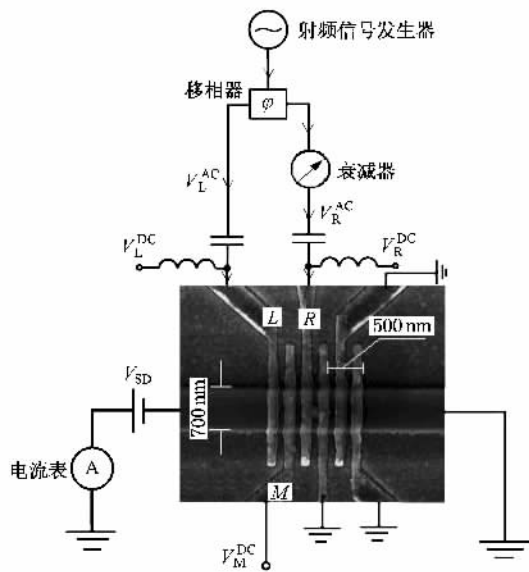


图 1 器件及测量线路的示意图(从扫描电子显微镜图可以看到刻蚀形成的量子线及制作在其表面上的指形门)

为了实现半导体量子点单电子泵对电子的搬运,这里只用到其中的三个门,分别记为 L, M 和 R (见图 1),表示左、中和右;其余不用的三个门接地.在实验过程中,我们首先分别给三个门加上直流负电压 $V_L^{\text{DC}}, V_M^{\text{DC}}$ 和 V_R^{DC} ,从而形成一个静态的量子点.其中用左右两个门分别产生构成量子点的两个势

垒,而中间门则控制量子点的势能.因此,通过调节左和右两个门上所加负电压的大小,就可以调节量子点的势垒高度.为此,除了直流电压 V_L^{DC} 和 V_R^{DC} 外,我们还需在左和右门上分别叠加一个交流电压 $V_L^{\text{AC}}(t)$ 和 $V_R^{\text{AC}}(t)$.从图 1 可以看到,从信号源出来的一正弦射频信号,通过相移器后,一个信号的相位保持不变,直接加在左门上;另一个的相位则变化 π ,再通过一个衰减器后加在右门上.加在左、右两个门上总的电压分别可表示成

$$V_L(t) = V_L^{\text{DC}} + V_L^{\text{AC}}(t) = V_L^{\text{DC}} + \hat{V}_L^{\text{AC}} \sin \omega t$$

和

$$V_R(t) = V_R^{\text{DC}} + V_R^{\text{AC}}(t) = V_R^{\text{DC}} + \hat{V}_R^{\text{AC}} \sin(\omega t + \pi) = V_R^{\text{DC}} - \hat{V}_R^{\text{AC}} \sin \omega t.$$

由此产生的静电势分别记为 $\phi_L(t)$ 和 $\phi_R(t)$.

在图 1 中,从移相器出来的右路信号经过一衰减器后再叠加到右门上,因而 $\hat{V}_L^{\text{AC}} > \hat{V}_R^{\text{AC}}$,这里, \hat{V}_L^{AC} 和 \hat{V}_R^{AC} 分别表示 $\hat{V}_L^{\text{AC}}(t)$ 和 $\hat{V}_R^{\text{AC}}(t)$ 的振幅.这表明,两正弦信号对 \hat{V}_L^{DC} 和 \hat{V}_R^{DC} 所产生的静电势调制的幅度不一样.其中, $\hat{V}_L^{\text{AC}}(t)$ 对量子点左边势垒做大幅度调制,而 $\hat{V}_R^{\text{AC}}(t)$ 则在小范围内对右边势垒做调制.图 2 给出了一个定性描述的简单模型,说明周期形成的量子点搬运电子的过程.在图 2(a) 阶段,量子点的左边势垒降到其最低值,而右边势垒升到其最高值,此时,量子点完全消失,左右 2DEG 仅被右边势垒隔开.之后,右边势垒下降,而左边势垒开始上升,当其到达费米能时,量子点开始形成,见图 2(b) 并从源极俘获电子.右边势垒继续下降,左边势垒继续上升,这相当于量子点向上运动.接近图 2(c) 时, $\hat{V}_L^{\text{AC}}(t)$ 和 $\hat{V}_R^{\text{AC}}(t)$ 都几乎变到零,所形成的量子点与静态量子点一致.到图 2(d) 时,左边势垒升到其最高值,而右边势垒则降到其最低值(注意,在整个过程中,右边势垒总是远远高于费米面,且势垒厚度足够厚,从而电子从右边出来并非由于其隧穿效应,而是由于门 L 和门 R 上施加的交流信号位相为 π 产生的所谓旋转门效应).此时,量子点的右边势垒被打开,从左边俘获的电子就被赶出量子点,进入右边的 2DEG,从而实现单电子的搬运.在一个周期内,产生的净电流为 $I = (n_c - n_k)ef$,其中 n_c 是对应图 2(c) 中量子点内的电子数, n_k 是对应图 2(d) 中仍然留在量子点内的电子数, f 是加在左右门

上的正弦信号的频率. 如果, 衰减器连接到图 1 中的左路, 那末 $\hat{V}_L^{AC} < \hat{V}_R^{AC}$. 很显然, 在这种情况下, 电子被周期性形成的量子点从右边搬运到左边, 从而实现电流方向的改变.

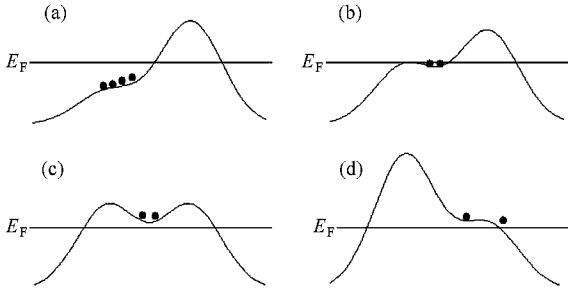


图 2 单电子搬运模型

从图 2 可以看到, 即使在无源漏偏压的情况下, 由外加交流信号周期形成的量子点把电子从一边的 2DEG 搬运到另一边的 2DEG, 实现单电子的搬运. 与其他单电子器件一样, 该器件所产生的量子化电流的大小也由外加交流信号的频率和一个周期内所搬运的电子数决定, 但电流的方向则由外加交流信号在左右两个门上所产生的调制振幅 \hat{V}_L^{AC} 和 \hat{V}_R^{AC} 的相对大小决定. 为了区别于 Kouwenhoven 等人和 Nagamune 等人的半导体量子点旋转门, 我们把该器件称为半导体量子点单电子泵. 对于前者, 交流信号对直流电压 V_L^{DC} 和 V_R^{DC} 产生的静电势垒作调制时, 量子点两个势垒的隧穿电阻始终满足条件 $R_T \gg$

R_K ; 电子是在有限源漏偏压的作用下, 从源极隧穿进入量子点, 然后从量子点隧穿到漏极, 实现单电子的输运, 见图 3. 这种器件所产生的量子化电流的方向由源漏偏压的极性决定.

3. 实验结果及讨论

所有的实验数据是在英国国家物理实验室测得的. 本实验中, 我们只用到图 1 中左边的三个门(分别记为 L, M 和 R)来形成量子点. 首先, 我们分别给三个门电极加上负的直流电压 V_L^{DC} , V_M^{DC} 和 V_R^{DC} , 通过调节其大小, 产生一个静态的量子点. 其中, V_L^{DC} 和 V_R^{DC} 形成量子点的两个势垒, V_M^{DC} 控制量子点的势能. 通常, V_L^{DC} 和 V_R^{DC} 分别略负于左右两个门的钳断电压. 图 4 给出了 $V_L^{DC} = -0.09$ V, $V_R^{DC} = -0.11$ V, $T = 300$ mK 情形下, 通过静态量子点的电流随 V_M^{DC} 和源漏偏压 V_{SD} 的变化. 从图中可以看到明显的库仑振荡. 因此, 加上直流电压 $V_L^{DC} = -0.09$ V 和 $V_R^{DC} = -0.11$ V 后, 在左右两个门之间形成了一个静态的量子点.

在形成静态量子点之后, 我们把从信号源出来的正弦信号首先经过一个移相器, 得到两个相位相差 π 的信号, 然后将没有相移的信号直接叠加在左边的门上, 而将发生相移的信号再经过一个衰减器后叠加在右边门上, 见图 1. 以下实验都是在温度 $T = 1.8$ K 情况下进行的.

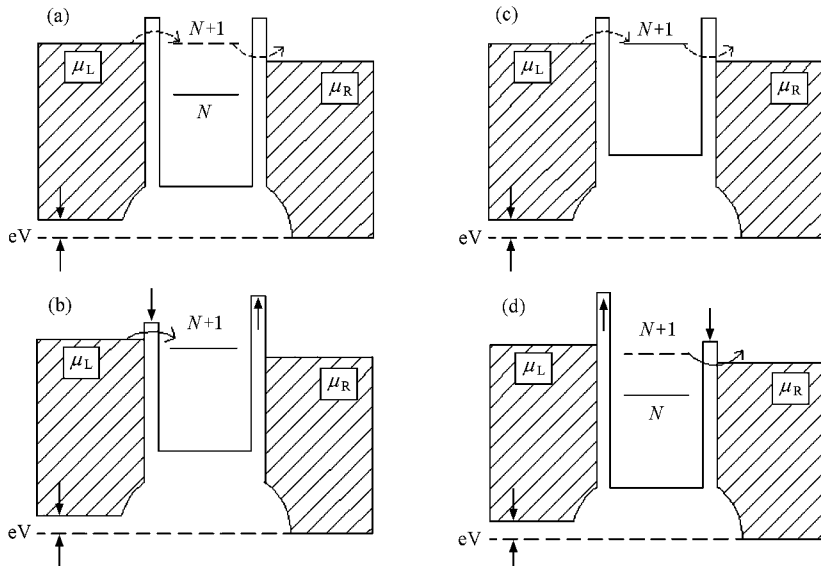


图 3 半导体量子点旋转门所采用的单电子运输模型(图中 μ_L 和 μ_R 分别表示左右电子库的化学势, 见文献 [11])

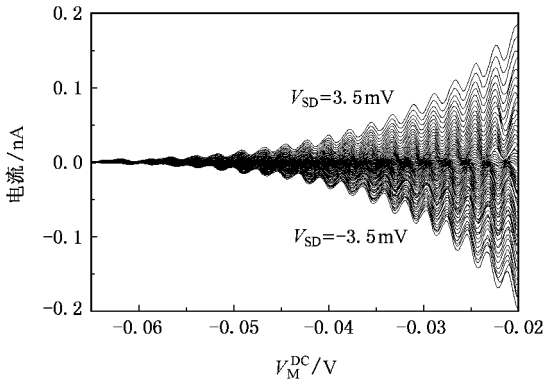


图 4 通过静态量子点的电流随中间门上的直流电压 V_M^{DC} 和源漏偏压 V_{SD} 的变化 ($V_L^{DC} = -0.09$ V, $V_R^{DC} = -0.11$ V, $T = 300$ mK)

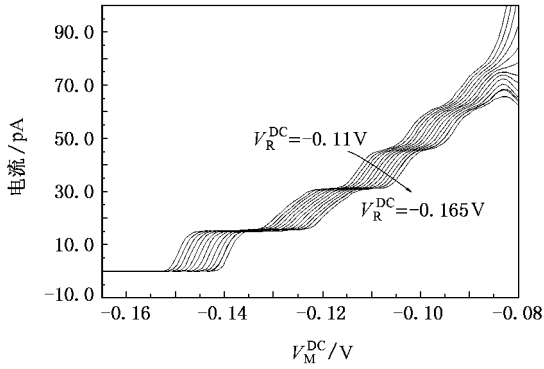


图 5 在改变 V_R^{DC} 情况下,量子化电流随 V_M^{DC} 的变化 ($f = 97$ MHz, $P = -3.5$ dBm, $V_{SD} = 0$ mV, $V_L^{DC} = -0.1$ V, V_R^{DC} 从 -0.11 V 变到 -0.165 V)

图 5 给出了在无源漏偏压的情况下,量子化电流随中间门上的电压 V_M^{DC} 的变化. 信号源输出的正弦信号的频率 $f = 97$ MHz, 功率 $P = -3.5$ dBm, 加在左边门上的直流电压 $V_L^{DC} = -0.1$ V, 让右边门上的直流电压 V_R^{DC} 在 $(-0.11$ V, -0.165 V) 范围内变化. 通过周期性地改变形成量子点的两个势垒高度, 我们成功地观测到了量子化电流平台, 所对应的电流大小接近其精确值 $I = nef$, 这里 $n = 1, 2, 3, 4$. 在其他参数都不变的情况下, V_R^{DC} 越负, 对应的电流曲线向右移动. 从图 2 可以看到, 当 V_R^{DC} 越来越负时, 所产生的势垒就越来越高, 所形成的量子点就越来越小. 因此, 只有在中间门加上更正的 V_M^{DC} 才可能把量子点变大, 从而搬运与具有较低势垒情形下相同数目的电子.

叠加在左右两个门上的交流信号 \hat{V}_L^{AC} 和 \hat{V}_R^{AC} 的振幅随信号源输出的正弦信号的功率 P 的增大而

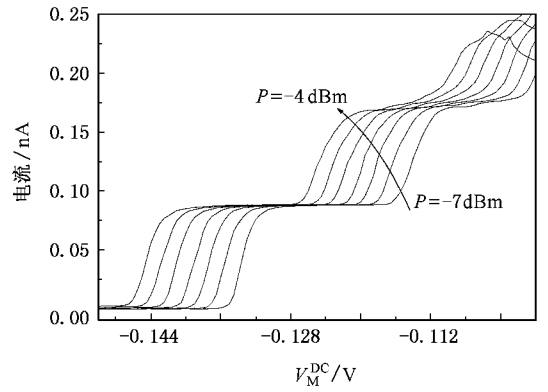


图 6 在改变外加正弦信号功率 P 的情况下,量子化电流随中间门电压 V_M^{DC} 的变化 ($f = 550$ MHz, $V_{SD} = 0$ mV, $V_L^{DC} = -0.11$ V, $V_R^{DC} = -0.15$ V)

增大. 随着 P 的降低, 交流信号对 V_L^{DC} 和 V_R^{DC} 产生的势垒的调制幅度减小, 以至不能将量子点左边的势垒降到费米能以下, 量子点就不能从源极中俘获到电子, 或者不能把右边势垒降到足够低, 从而不能把从源极俘获到的电子赶出量子点. 因此, 为了搬运与大功率情况下相同数目的电子, 必需在中间门上加上更正的 V_M^{DC} . 图 6 给出了无源漏偏压情形下, 外加信号功率对量子化电流平台的影响. 这里, 信号频率 $f = 550$ MHz, 加在左右两个门上的直流电压分别为 $V_L^{DC} = -0.11$ V, $V_R^{DC} = -0.15$ V.

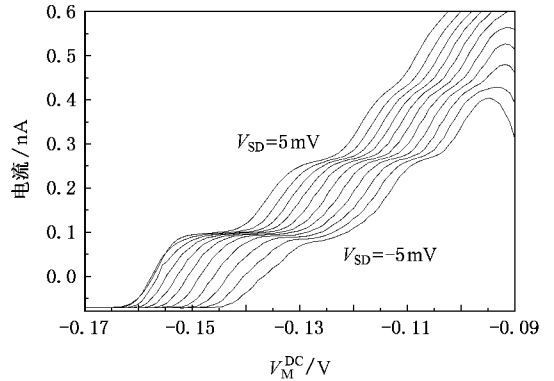


图 7 在改变 V_{SD} 的情况下,量子化电流随 V_M^{DC} 的变化 ($f = 1072$ MHz, $P = 1$ dBm, $V_L^{DC} = -0.095$ V, $V_R^{DC} = -0.085$ V)

在上小节中, 我们曾把我们的器件称为半导体量子点单电子泵. 即本器件在外加射频信号对量子点势垒高度调制产生的量子化电流不依赖于源漏偏置电压 V_{SD} . 图 5 和图 6 证明了即使无源漏偏压情形下, 器件仍然可以实现单电子的搬运. 图 7 进一步表明, 在改变源漏偏压 V_{SD} 的极性时, 量子化电流的

方向并不发生变化.因此,实验结果也证明了我们的单电子器件确实是一种新型的单电子泵.这里,信号频率 $f = 1072$ MHz,功率 $P = 1$ dBm; $V_L^{DC} = -0.095$ V 和 $V_R^{DC} = -0.085$ V 情况下得到的.另外,从图 7 还可以看出,随着 V_{SD} 从正变到负,电流曲线向右移动; V_{SD} 越负,出现平台的 V_M^{DC} 需要越正一些.这是因为,给源漏两端加上负的偏压 V_{SD} 后,量子点的左边势垒被降低,而右边势垒被抬高.在其他参数不变的情况下, V_{SD} 越负,左右两个势垒所形成的量子点就越小.因此,需要更正一些的中间门电压 V_M^{DC} 才能形成电流平台.

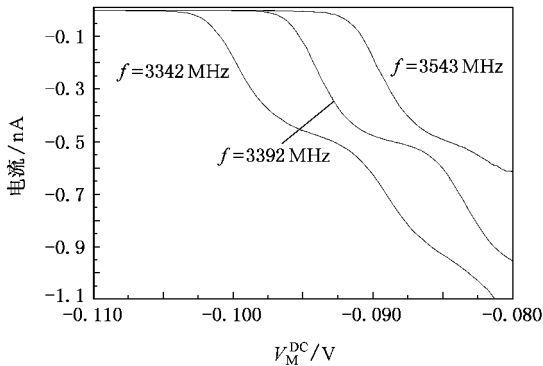


图 8 在高频情况下,量子化电流平台随中间门上所加的直流电压 V_M^{DC} 的变化

前面我们分别给出了射频信号频率 f 为 97 MHz, 550 MHz 和 1072 MHz 时,外加射频信号对单电子的搬运.图 8 给出了更高频率对应的量子化电流平台.利用我们的单电子泵,实现单电子搬运的最高频率已经超过 3 GHz.也就是说,该单电子泵的工作频率远远超过了 Houwenhoven 等人和 Nagamune 等人的单电子旋转门,以及 Fujiwara 等人的 CCD 器件的工作频率,而达到了表面声波单电子器件的工作频率.因此,这是继表面声波单电子器件后,可以产生 nA 量级的量子化电流的又一个千兆赫兹的单电子器件.不过,从图 5—图 9 可以发现,随着频率的增加,量子化电流平台的质量变得越来越差,即平台越来越短,越来越斜;而且,与精确值 nef 的偏差越来越大.与 Fujiwara 的 CCD 器件类似,对于我们的器件,这里仍然存在射频信号传输线与门电极连接处阻抗不匹配的问题.因此,器件的工作频率越高,所产生的电流平台的品质就越差.为了进一步提高该器件的工作频率,需要从技术上克服不同传输线间阻抗不匹配的问题.

另外,根据实验结果(见图 5—7),当衰减器接在信号的右路中,即 $\hat{V}_L^{AC} > \hat{V}_R^{AC}$ (见图 2) 时,电子从左边的 2DEG 搬运到右边的 2DEG,所得电流为正.与图 8 对应,衰减器接在信号的左路,即 $\hat{V}_L^{AC} < \hat{V}_R^{AC}$,所得电流为负,从而改变电流方向.可见,量子化电流方向不由外加偏压决定,而是由加在两个门电极上的信号所产生的势垒相对高度决定.

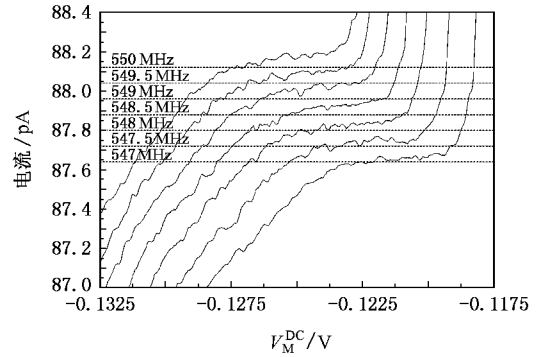


图 9 频率 $f = 547, 547.5, 548, 548.5, 549, 549.5, 550$ MHz 对应的电流平台随 V_M^{DC} 的变化(虚线表示各频率对应的精确的电流平台.其他参数为 $P = -6.0$ dBm, $V_L^{DC} = -0.105$ V, $V_R^{DC} = -0.150$ V, $V_{SD} = 0$ mV)

对于单电子器件,除了关心其工作频率外,人们还关心其产生的量子化平台的精确度.图 9 给出了频率 f 从 547 MHz 到 550 MHz (间隔 0.5 MHz) 对应的电流平台随 V_M^{DC} 的变化.图中,虚线表示与这些频率对应的精确的电流平台,其值为 ef .这里,衰减器是接在信号右路,信号的功率 $P = -6.0$ dBm,用来形成静态量子点的 $V_L^{DC} = -0.105$ V, $V_R^{DC} = -0.150$ V,源漏偏压仍为零.在固定这些参数的情况下,不同频率对应的电流平台的斜率略有差别.在文献 [19] 中,对频率 $f = 547$ MHz 对应的电流平台的精度做了分析.与该频率对应的精确值比较,其误差约为 10^{-4} .因此,除了工作频率远远高于 CCD 器件外,新器件产生的电流平台的精度也大大提高了.

4. 结 论

在无源漏偏压的情况下,通过分别对静态量子点的两个势垒作相位相差 π 且振幅不等的周期调制,周期形成的量子点实现了千兆赫兹的单电子搬运.电流方向由两调制振幅的相对大小决定.与以前的由金属/氧化物隧道结构成的单电子旋转门和单电子泵以及半导体量子点单电子旋转门相比,我们

的半导体量子点单电子泵克服了由于隧穿时间引起的工作频率的限制,从而所产生的量子化电流达到 nA 量级.与另一个能产生 nA 量级的量子化电流的表面声波单电子器件相比,这种新器件的结构更简单,其工作频率有可能更高.另外,在 SAWSET 实验中,通常使用信号的功率都比较高,由此产生的热效

应降低了量子化电流的精度,而在本实验中,信号的功率相对较低,有利于提高量子化电流的精度.因此,半导体量子点单电子泵有望成为提供高精度、较大电流的量子化电流标准的一种新单电子输运器件.

- [1] Kuzmin L S ,Likharev K K 1987 *JETP Lett.* **45** 495
- [2] Likharev K K 1987 *IEEE Trans. Magn.* **23** 1142
- [3] Fulton T A ,Dolan G J 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 109
- [4] Wu F ,Wang T H 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2829 (in Chinese) [吴凡、王太宏 2002 物理学报 **51** 2829]
- [5] Liu Y X ,Wang Y C ,Du S Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2734 (in Chinese) [刘彦欣、王永昌、杜少毅 2004 物理学报 **53** 2734]
- [6] Guo R H ,Zhao Z P ,Hao Y ,Liu Y G ,Wu Y B ,Li M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1804 (in Chinese) [郭荣辉、赵正平、郝跃、刘玉贵、武一宾、吕苗 2005 物理学报 **54** 1804]
- [7] Geerligs L J ,Anderegg V F ,Holweg P A M ,Mooji J E 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 2691
- [8] Pothier H ,Lafarge P ,Urbina C ,Esteve D ,Devoret M H 1992 *Europhys. Lett.* **17** 249
- [9] Wu F ,Wang T H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 696 (in Chinese) [吴凡、王太宏 2003 物理学报 **52** 696]
- [10] Keller M W ,Martinis J M ,Zimmerman N M ,Steinbach A H 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 1804
- [11] Kouwenhoven L P ,Johnson A T ,van der Vaart N C ,Harmans C J P M 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 1626
- [12] Nagamune Y ,Sakaki H ,Kouwenhoven L P ,Mur L C ,Harmans C J P M ,Motohisa J ,Noge H 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2379
- [13] Fujiwara A ,Zimmerman N M ,Ono Y ,Takahashi Y 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1323
- [14] Shilton J M ,Talyanskii V I ,Pepper M ,Ritchie D A ,Frost J E F ,Foad J B ,Smith C G ,Jones G A C 1996 *J. Phys. : Condens. Matter* **8** L531
- [15] Ebbecke J ,Bastian G ,Blocker M ,Peirz K ,Ahlers F J 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2601
- [16] Fletcher N E ,Ebbecke J ,Janssen T J B M ,Ahlers F J ,Pepper M ,Beere H E ,Ritchie D A 2003 *Phys. Rev. B* **68** 245310
- [17] Utoko P ,Gloos K ,Bindslev Hansen J ,Lindelof P E 2003 *Acta Phys. Pol. A* **103** 533
- [18] Gao H L ,Li L ,Gao J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3504 (in Chinese) [高宏雷、李玲、高洁 2004 物理学报 **53** 3504]
- [19] Blumenthal M D ,Kaestner B ,Li L ,Giblin S ,Janssen T J B M ,Pepper M ,Anderson D ,Jones G ,Ritchie D A 2007 *Nature Physics* **3** 343

Single electron pumping at higher frequency in a novel semiconductor-based quantum dot device^{*}

Li Ling^{1,2)} Kaestner B³⁾ Blumenthal M D^{4,5)} Giblin S⁴⁾ Janssen T J B M⁴⁾
Pepper M⁵⁾ Anderson D⁵⁾ Jones G⁵⁾ Ritchie D A⁵⁾ Gao Jie¹⁾

¹⁾ College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

²⁾ Department of Physics and Institute of Solid Physics, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)

³⁾ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38100 Braunschweig, Germany)

⁴⁾ National Physical Laboratory, Hampton Road, Teddington TW11 0LW, UK)

⁵⁾ Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge CB3 0HE, UK)

(Received 23 May 2007 ; revised manuscript received 18 July 2007)

Abstract

The π -shift sinusoidal signals with different amplitudes applied directly to the two metallic finger gates on a shallow etched GaAs/AlGaAs quantum wire tune unequally the two barriers of a static quantum dot induced by applying negative dc voltages on these two finger gates. Single electrons are transported through a periodically formed quantum dot without source-drain bias. Since single electron pumping in the novel semiconductor-based quantum dot device does not rely on Coulomb blockade of tunnelling, the device can not be limited to much lower frequency by the fixed tunneling time constant. Current plateaus due to single electron transport can be observed at 1.7 K with frequencies up to 3 GHz and a current level of 0.5 nA. This novel device represents another possible path in the realization of a high current high accuracy quantum standard for electrical current and also provides another means for high speed high accuracy transport of single electrons.

Keywords : single electron transport , single electron turnstile , single electron pumping , quantized current plateau

PACC : 7335C , 7320D , 7360L

^{*} Project supported by the State Key Program of National Natural Science of China (Grant No. 60436010), the National Key Technology R&D Program (Grant No. 2006BAF06B09), and Education Foundation of Sichuan Normal University (Grant No. 07ZDY004).