

通过单电子泵实现对单电子运动的控制及其相图分析*

吴 凡 王太宏

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2002 年 4 月 5 日收到, 2002 年 7 月 2 日收到修改稿)

介绍了单电子泵的工作原理, 讨论了如何利用库仑阻塞和单电子隧穿实现对单电子泵中单个电子运动的控制, 从而给出它的相图, 并由此得到了单电子泵的一个重要用途, 即控制微小电流. 指出栅极可能引入的随机电荷对单电子泵的应用并无影响.

关键词: 单电子泵, 库仑阻塞, 相图

PACC: 7335C, 8130

1. 引 言

1951 年, Gorier 观察到颗粒状金属的电阻随温度下降表现出反常增加的行为, 他解释为每个金属微粒相互之间存在隧穿势垒. 这就是最早提出的单电子隧穿效应, 但当时并没有产生很大的影响. 直到 20 世纪 80 年代后期, 随着微细加工技术的发展, 相继在金属和半导体微结构中观察到了库仑阻塞现象, 单电子隧穿效应才重新得到注意, 并很快成为凝聚态物理学研究中的一个热点. 以这一效应为基础, 人们在纳米加工工艺发展的基础上开始研究一个全新的器件领域: 单电子器件 (SEDs), 其中研究最广泛、理解最深刻的是单电子晶体管 (SETs)^[1-10]. 以其小体积、低功耗和高度集成化的特点得到了人们的广泛重视, 在功能上有其独特之处. 单电子晶体管是通过改变栅极电压控制量子点的状态, 实现对源漏极间电导和晶体管通断的控制, 在其导通时, 电子是一个一个依次通过晶体管, 但是并不能掌握电子何时通过量子点. 单电子泵^[11, 12]是比单电子晶体管更复杂的单电子器件, 与单电子晶体管相同, 它主要由量子点、隧穿结、源漏极和控制栅极构成, 不同之处在于整体上它始终处于库仑阻塞状态, 工作时利用多个栅极实现对器件中单个电子运动的控制, 使

器件的局部状态随单个电子的状态改变而发生改变. 在微电流控制、高灵敏计量、逻辑电路等方面都有重要的用途. 本文主要讨论单电子泵的工作原理, 由计算分析多个栅极对单电子泵的影响和控制作用, 得到了单电子泵的状态和栅极电压的相图, 指出了单电子泵极具实用价值的重要用途. 通过控制栅极电压得到微小电流. 同时也简要讨论了非理想情况下可能引入的随机电荷等对单电子泵的影响.

2. 原 理

库仑阻塞现象最初是在微小隧道结实验中发现的. 当电子通过隧道结时, 会使其两端的电位差发生变化. 如果结面积很小, 从而使得结电容小到由一个电子隧穿所引起的静电能的变化远超过热能 $k_B T$, 则此时由一个电子隧穿引起的电位变化会对下一个电子的隧穿产生阻止作用, 这就是所谓的隧穿过程的库仑阻塞.

对于单结系统, 由于电极引线间包含的杂散电容通常远大于结本身的电容, 致使总电容变得很大, 使得单结系统中难以观察到库仑阻塞. 解决方法是采用图 1(a) 中的双结结构. 对两结之间的“岛”而言, 岛与周围环境之间的电容为 $C = C_1 + C_2$, 并不受引线间杂散电容大小的影响. 只要 C_1, C_2 足够

* 国家重点基础研究专项基金(批准号: G2001CB3095)和国家自然科学基金(批准号: 69925410 和 60236010)资助的课题.

小, 通过任一结的单电子隧穿即可导致岛的静电能的明显改变. 且隧穿引起的电荷改变以单电子电荷为单位, 因此两结之间的岛也常称为单电子岛或量子点.

为有效地控制岛上的电荷, 我们通常通过一小电容 C_g 由栅电压 V_g 向量子点引入一个控制电荷 $q_0 = C_g V_g$, 形成三极管式的电路. 由于栅极电压可以完全控制器件的电导, 因此这一由栅压控制的双结器件就具有晶体管的作用, 称为单电子晶体管, 是一种最基本的单电子器件. 图 1 (b) 就是单电子晶体管的电路示意图, 图 1 (c) 是一种点接触平面栅型单电子晶体管^[13].

图 2 (a) 为两端不加偏压时单电子晶体管的平衡势能图. 图中 ϵ_N 为量子点中第 N 个电子相对于导带底的能量, $e\varphi_N$ 为 N 个电子在岛中的总静电势, μ_l, μ_r 为左右两电子库的化学势. 量子点的基态能量可写为

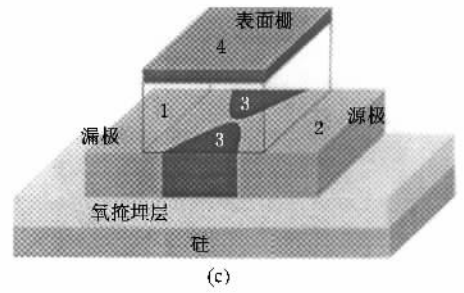
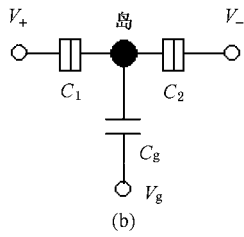
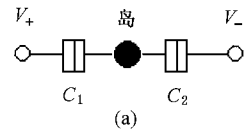


图 1 单电子岛和单电子晶体管

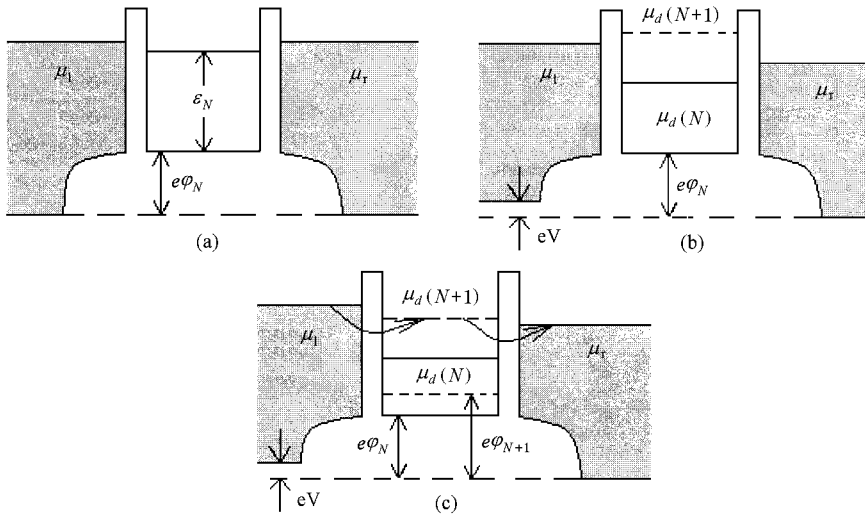


图 2 单电子晶体管的势能图

$$U(N) = \sum_{p=1}^N \epsilon_p + \frac{(-eN + q_0)^2}{2C}, \quad (1)$$

其中 C_g 为岛与栅极间的电容, C 为岛与所有电极间的总电容. 将第 N 个电子加到岛上所需的最小能量定义为岛的电化学势

$$\begin{aligned} \mu_d(N) &= U(N) - U(N-1) \\ &= \epsilon_N + \frac{[N - (1/2)]e^2}{C} - e \frac{C_g}{C} V_g. \end{aligned} \quad (2)$$

由于后两项为静电势能, 电化学势 $\mu_d(N)$ 也可写成化学势 $\mu(N) = \epsilon_N$ 与静电势能 $e\varphi_N$ 之和. 岛中电子数改变 1 时, 电化学势之差为

$$\mu_d(N+1) - \mu_d(N) = \epsilon_{N+1} - \epsilon_N + \frac{e^2}{C}. \quad (3)$$

除单电子能量之差 $\Delta\epsilon = \epsilon_{N+1} - \epsilon_N$ 外, 还包括充电的静电能 e^2/C . 当 $\Delta\epsilon \geq e^2/C$ 时, 充电能不重要, 起作用的是共振隧穿. 本文讨论 $\Delta\epsilon \leq e^2/C$, 充电能

重要的相反情形。

在外加偏置电压 V 作用下,左右电子库不再处于同一水平, $\mu_l - \mu_r = eV$. 此时岛的电势有两种情形. 图 2(b) 相应于 $\mu_d(N) < \mu_r < \mu_l < \mu_d(N+1)$ 的情形, 此时第 $N+1$ 个电子不能隧穿到岛中, 因为 $\mu_d(N+1)$ 比电子库中的化学势高, 而 $\mu_d(N)$ 已为占据态, 因此是库仑阻塞的情形. 图 2(c) 是单电子隧穿情形, 此时 $\mu_r < \mu_d(N+1) < \mu_l$, 电子可从左边电子库隧穿到岛中, 岛的电化学势增加主要是静电势能的增加, $e\varphi_{N+1} - e\varphi_N = e^2/C$. 由于 $\mu_d(N+1) > \mu_r$, 电子可隧穿出点到右边电子库中, 点电化学势回复到 $\mu_d(N)$, 另一电子从左边隧穿入, 过程重复.

由 (2) 式, $\mu_d(N)$ 随栅电压 V_g 改变, 故 V_g 变化时, 量子点的状态将在库仑阻塞和单电子隧穿间变化, 导致器件的电导在零和非零间振荡, 通常称为库仑阻塞振荡或库仑振荡. 在库仑阻塞区, 量子点的电导取极小值, 岛中电子数固定; 在单电子隧穿区, 电导极大, 相邻的电导极大处电子数相差 1, 振荡周期 V_g 由 $\mu_d(N, V_g) = \mu_d(N+1, V_g + V_g)$ 决定. 有

$$\Delta V_g = \frac{C}{C_g} \left(\frac{\epsilon_{N+1} - \epsilon_N}{e} \right) + \frac{e}{C_g}. \quad (4)$$

对 $\epsilon_{N+1} - \epsilon_N \leq e^2/C$ 情形,

$$V_g = e/C_g.$$

由以上分析可知, 对单电子晶体管而言, 当量子点中电子数 n 变化时, 晶体管一定处于单电子隧穿情形, 否则就是库仑阻塞情形. 所以当栅极电压改变使得晶体管状态变化时, 一定是从库仑阻塞状态变成导通状态或相反. 而在单电子晶体管导通时, 其电流很难小到在一定时间内仅有单个电子通过晶体管. 因此, 类似于图 1(c) 的普通的单电子晶体管并不能实现对单个电子运动的控制.

为了精确控制单个电子的运动, 需要不止一个的量子点^[4], 使得器件始终处于库仑阻塞状态. 随控制参量的连续改变, 当器件从一个库仑阻塞态变成另一个库仑阻塞态时, 器件状态的改变恰是由单个电子的状态改变所引起. 因而通过控制系统参量, 使得系统在不同的阻塞区域之间连续变化, 就可以实现对器件中某个单个电子运动的控制.

一个典型的单电子控制器件如图 3 所示的单电子泵.

在金属栅 g_1, g_3, g_5 上加一定偏压, 耗尽金属栅下面的二维电子气, 则 g_1, g_3 和 g_3, g_5 之间未被耗尽的区域形成两个量子点, 通过在栅极 g_2, g_4 上

加小偏压, 就能控制这两个量子点的状态.

图 3 中单电子泵的等效电路图如图 4(a) 所示. 栅极 g_1, g_3, g_5 对应三个隧穿结 C_{01}, C_{12} 和 C_{23} . 栅极 g_2, g_4 对应两个独立的栅压 U_1, U_2 . U_1, U_2 通过理想电容 C_1, C_2 与两个量子点相互作用. 单电子泵两端的电压降 V 是为了使电子能够隧穿通过隧道

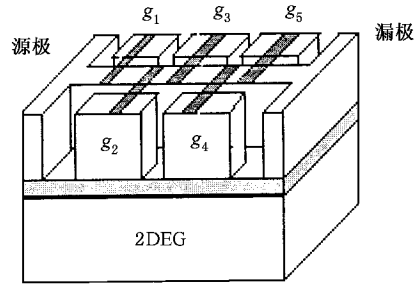
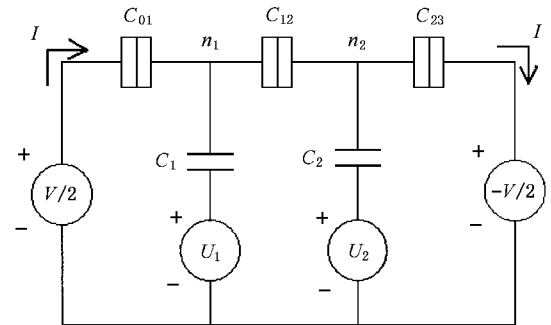
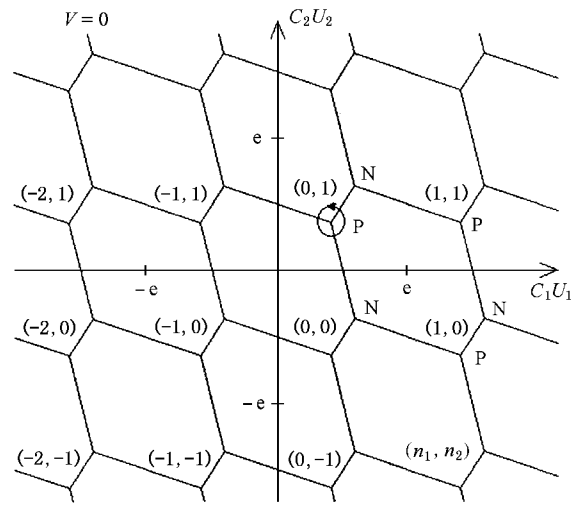


图 3 单电子泵



(a)



(b)

图 4 单电子泵的电路图及其相图

结. 由对单电子晶体管的分析可知, 当 V 较大时, 不论 U_1, U_2 的大小, 隧道结总会导通. 本文讨论的是

对单电子运动的控制,所以仅需考虑 $V \approx 0$ 的情况. 即 V 仅使单电子泵两端的电子费米面产生一个小的偏差,从而决定电子在器件中的运动方向,同时 $V \leq U_1, U_2$, 于是系统的状态变化将由 U_1, U_2 决定. 为了求得单电子泵的相图,现在分析图 4(a) 中的电路图.

对于系统的某个稳定状态,两个量子点上将存在多余的电子.如图 4(a) 所示,电子数目为 n_1, n_2 . 它们可以是任意整数.从而量子点上带电 $Q_{D_i} = -n_i e$ (下标 D 表示量子点, $i = 1, 2$). 对应于 Q_{D_1}, Q_{D_2} 系统应该有一个关于 Q_{D_1}, Q_{D_2} 的总能量函数 $E(Q_{D_1}, Q_{D_2})$. 假设有电子隧穿发生,将初态的 E 减去末态的 E ,若这个差小于零,则说明隧穿不能发生,初态是系统的一个稳定状态.并可以求得对应这个状态的 U_1, U_2 应该满足的条件.

对某个量子点,将其看成带电 Q_{D_i} 、对外的总电容 C_{D_i} 的多端系统,那么它的储能为 $Q_{D_i}^2 / 2C_{D_i}$. 在隧穿过程中,改变的仅有 Q_{D_i} ,由其他外界条件(例如 U_i, V)决定的储能在隧穿过程中并没有发生改变,从而对过程中的能量变化并没有影响.所以对于状态 $E(Q_{D_1}, Q_{D_2})$,电容器中(起作用)的储能将由 Q_{D_i}, C_{D_i} 决定($i = 1, 2$). 两个量子点之间由电容 C_{12} 相互作用,其总储能可以利用行列式写成^[12, 15, 16]

$$E_s(Q_{D_1}, Q_{D_2}) = \frac{1}{2} \Delta Q^T \begin{pmatrix} C_{\Sigma D_1} & -C_{D_1 D_2} \\ -C_{D_1 D_2} & C_{\Sigma D_2} \end{pmatrix}^{-1} \Delta Q, \quad (5)$$

其中 $\Delta Q = \begin{pmatrix} Q_{D_1} \\ Q_{D_2} \end{pmatrix}$, ΔQ^T 为其转置矩阵,中间的行列式为这个系统电容矩阵的逆矩阵, $C_{\Sigma D_i}$ 为第 i 个量子点对外的总电容, $C_{D_1 D_2}$ 为两个量子点之间相互作用的电容.与图 4(a) 比较,可得

$$C_{\Sigma D_1} = C_{01} + C_{12} + C_1, \quad C_{\Sigma D_2} = C_{12} + C_{23} + C_2, \\ C_{D_1 D_2} = C_{12}, \quad Q_{D_1} = -n_1 e, \quad Q_{D_2} = -n_2 e.$$

由(5)式可解得

$$E_s(Q_{D_1}, Q_{D_2}) = (Q_{D_1}^2 C_{\Sigma D_2} + 2Q_{D_1} Q_{D_2} C_{D_1 D_2} + Q_{D_2}^2 C_{\Sigma D_1}) / (C_{\Sigma D_1} C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}^2). \quad (6)$$

同时,在量子点从初态的电中性变成带电 Q_{D_i} 的过

程中,电源 V, U_1, U_2 都将对通过它们的电荷做功. 假设从初态有电荷 q 通过电容 C_{01} 隧穿入量子点 1, 即 $Q_{D_1} = q$, 而 C_{01} 左端带电 $-q$. 为了保持静电平衡,这些电荷将在电路中重新分配.现在来计算重新分配后通过电源 U_1, U_2 的电量(由于 $V \approx 0$, 可以忽略它对电荷所做的功).

由于过程中 $V, U_{1,2}$ 对电路的影响并无改变,可以在电路图中把它们略去.电荷隧穿以后,为了保持静电平衡,应该有 $V_{01} = V_1 = V_{12} + V_2 = V_{12} + V_{23}$ (V_x 表示电容 C_x 上的压降,以接近量子点 1 的极板为正).再由 $Q_{D_1} = q$, 不难求得

$$Q_1 = q C_1 C_{\Sigma D_2} / (C_{\Sigma D_1} C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}^2), \\ Q_2 = q C_2 C_{D_1 D_2} / (C_{\Sigma D_1} C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}^2). \quad (7)$$

同样, Q_x 表示电容 C_x 上的压降,以接近量子点 1 的极板为正.于是,电源 $U_{1,2}$ 对这些电荷所做的功(用 Q_{D_1} 代替 q)为

$$W_s(Q_{D_1}) = -Q_1 U_1 - Q_2 U_2 = -Q_{D_1} (C_{\Sigma D_2} C_1 U_1 + C_{D_1 D_2} C_2 U_2) / (C_{\Sigma D_1} C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}^2), \quad (8)$$

其中负号是因为有 $-Q_{D_1}$ 从 $U_{1,2}$ 的负极流向正极,故电源对其做功为负.类似地,当有电荷 q 通过 C_{23} 隧穿进入量子点 2 时,将(8)式中下标 1, 2 互换,即得

$$W_s(Q_{D_2}) = -Q_{D_2} (C_{\Sigma D_1} C_2 U_2 + C_{D_1 D_2} C_1 U_1) / (C_{\Sigma D_1} C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}^2) \quad (9)$$

(若用行列式表示,有 $W_s(Q_{D_1}) + W_s(Q_{D_2}) = (C_1 U_1 - C_2 U_2) \begin{pmatrix} C_{\Sigma D_1} & -C_{D_1 D_2} \\ -C_{D_1 D_2} & C_{\Sigma D_2} \end{pmatrix}^{-1} \Delta Q$, 结果与以上两式相同),于是

$$E(Q_{D_1}, Q_{D_2}) = E_s(Q_{D_1}, Q_{D_2}) - W_s(Q_{D_1}) - W_s(Q_{D_2}). \quad (10)$$

系统可能发生的状态变化有三种:单个电子通过 C_{01}, C_{12}, C_{23} 隧穿.下面分三种情况讨论.(事实上,由于隧穿的方向由 V 决定,仅需讨论在单个方向上的隧穿.需要反向隧穿时,将 V 反向,两个不同状态间的分界线由 U_1, U_2 决定)并不变化,只是相图上系统状态变化方向相反.例如,要求系统不能从 $E(Q_{D_1}, Q_{D_2})$ 隧穿变化至 $E(Q_{D_1} + e, Q_{D_2})$ 的不等式

与不能从 $E(Q_{D_1} + e, Q_{D_2})$ 变化至 $E(Q_{D_1} + e) - e, Q_{D_2}$ 的不等式应该只有不等号上的区别. 以下同时讨论两个方向的做法只是为了更容易看出相图的形状.)

要求电子不能通过 C_{01} 隧穿, 有

$$E(Q_{D_1}, Q_{D_2}) - E_s(Q_{D_1} \pm e, Q_{D_2}) < 0. \quad (11)$$

将(6)(8)(9)(10)式代入(11)式, 化简后可得

$$\mp \left(C_1 U_1 + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_2}} C_2 U_2 \right) \mp \left(Q_{D_1} + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_2}} Q_{D_2} \right) < \frac{e}{2}. \quad (12)$$

同样, 要求电子不能通过 C_{23} 隧穿, 有

$$E(Q_{D_1}, Q_{D_2}) - E_s(Q_{D_1}, Q_{D_2} \pm e) < 0. \quad (13)$$

将(12)式中下标 1 2 互换, 即得

$$\mp \left(C_2 U_2 + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_1}} C_1 U_1 \right) \mp \left(Q_{D_2} + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_1}} Q_{D_1} \right) < \frac{e}{2}. \quad (14)$$

若要求电子不能通过 C_{12} 隧穿, 有

$$E(Q_{D_1}, Q_{D_2}) - E_s(Q_{D_1} \pm e, Q_{D_2} \mp e) < 0. \quad (15)$$

将(6)(8)(9)(10)式代入, 可以解得

$$\begin{aligned} & \mp [C_1 U_1 (C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}) - C_2 U_2 (C_{\Sigma D_1} - C_{D_1 D_2})] \\ & \mp [Q_{D_1} (C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}) - Q_{D_2} (C_{\Sigma D_1} - C_{D_1 D_2})] \\ & < \frac{e}{2} (C_{\Sigma D_1} + C_{\Sigma D_2} - 2C_{D_1 D_2}). \end{aligned} \quad (16)$$

当任何隧穿均不可能发生时(12)(14)(16)三式同时满足, 系统处于对应 Q_{D_1}, Q_{D_2} 的稳定态. 由(12)式可得

$$\begin{aligned} & - \left(Q_{D_1} + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_2}} Q_{D_2} \right) - \frac{e}{2} \\ & < C_1 U_1 + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_2}} C_2 U_2 \\ & < - \left(Q_{D_1} + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_2}} Q_{D_2} \right) + \frac{e}{2}. \end{aligned} \quad (17)$$

再将 $Q_{D_1} = -n_1 e$ 代入

$$\begin{aligned} & \left(n_1 + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_2}} n_2 - \frac{1}{2} \right) e \\ & < C_1 U_1 + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_2}} C_2 U_2 \\ & < \left(n_1 + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_2}} n_2 + \frac{1}{2} \right) e. \end{aligned} \quad (18)$$

在 $C_2 U_2 - C_1 U_1$ 平面图上, 这是由 n_1, n_2 决定的平行线组. 其斜率为 $-C_{\Sigma D_2} / C_{D_1 D_2} < -1$. 在 $n_2 = 0$ 时, 平行线组在 $C_1 U_1$ 轴上截距为 $(n_1 + 1/2)e$.

类似地, 由(14)式得

$$\begin{aligned} & \left(n_2 + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_1}} n_1 - \frac{1}{2} \right) e \\ & < C_2 U_2 + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_1}} C_1 U_1 \\ & < \left(n_2 + \frac{C_{D_1 D_2}}{C_{\Sigma D_1}} n_1 + \frac{1}{2} \right) e. \end{aligned} \quad (19)$$

在 $C_2 U_2 - C_1 U_1$ 平面图上, 这也是由 n_1, n_2 决定的平行线组. 其斜率为 $-C_{D_1 D_2} / C_{\Sigma D_1}$, 在 0 和 -1 之间. 在 $n_1 = 0$ 时, 平行线组在 $C_2 U_2$ 轴上截距为 $(n_2 + 1/2)e$. 由(16)式

$$\begin{aligned} & C_2 U_2 (C_{\Sigma D_1} - C_{D_1 D_2}) - C_1 U_1 (C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}) \\ & > \left[n_1 (C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}) - n_2 (C_{\Sigma D_1} - C_{D_1 D_2}) \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{2} (C_{\Sigma D_1} + C_{\Sigma D_2} - 2C_{D_1 D_2}) \right] e, \\ & C_2 U_2 (C_{\Sigma D_1} - C_{D_1 D_2}) - C_1 U_1 (C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}) \\ & < \left[n_1 (C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}) - n_2 (C_{\Sigma D_1} - C_{D_1 D_2}) \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{2} (C_{\Sigma D_1} + C_{\Sigma D_2} - 2C_{D_1 D_2}) \right] e, \end{aligned} \quad (20)$$

是斜率为正的平行线组, 其斜率为 $(C_{\Sigma D_2} - C_{D_1 D_2}) / (C_{\Sigma D_1} - C_{D_1 D_2})$.

由(18)(19)(20)式, 对于任意给定的 n_1, n_2 , 将给出 6 个不等式, 在 $C_2 U_2 - C_1 U_1$ 平面图上将得到一个六边形, 在六边形内, 系统处于稳定状态. 六边形的对边平行, 其中有两条边的斜率为正, 另外 4 条为负. 当 n_1, n_2 变化时, 所得的六边形形状完全相同, 相邻的两个六边形有一条公共边. 相邻状态对应的 n_1, n_2 必须满足 $\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta(n_1 + n_2)$ 都不能超过 1. 每个六边形都有 6 个相邻的稳定态, 对应电子通过三个隧道结的 6 种可能的隧穿方式. 单电子泵的相图见图 4(b), 是一个蜂窝状的相图, 六边形中的两个数字表示 n_1, n_2 . 可以看出, 对我们给出的单电子泵, 在电压 V 较小时, 它始终处于库仑阻塞状态. 每一个阻塞态在 $C_2 U_2 - C_1 U_1$ 平面图上呈全等的六边形. $C_{\Sigma D_1}, C_{\Sigma D_2}$ 和 $C_{D_1 D_2}$ 决定了六边形三组对边的斜率: $-C_{\Sigma D_2} / C_{D_1 D_2}, -C_{D_1 D_2} / C_{\Sigma D_1}$ 和 $(C_{\Sigma D_2} -$

$C_{D_1 D_2} \times (C_{\Sigma D_1} - C_{D_1 D_2})$. 由此也可见, 量子点对外的特性主要是由其对外的总电容 C_{D_i} 决定的, 而 $C_{D_1 D_2}$ 反应了两个量子点相互影响的效果. 相图的其他特点均可由 (18)(19)(20) 式给出.

由图 4(b) 可见, 任意一个六边形的顶点都是一个三相点, 图中共有两类三相点. 如果我们将直流偏压 U_1, U_2 取值在图中“P 类”三相点的附近, 然后在 U_1, U_2 上加上小的同频交流信号 u_1, u_2 , 就可以使系统状态在 P 点附近作周期变化. 例如使 u_2 的相位比 u_1 落后 $\pi/2$, 系统状态将围绕 P 点作逆时针运动. 量子点中的电子数 n_1, n_2 将从 00 到 10 到 01, 再回到 00, 亦即有一个电子从系统左边通过 C_{01} 隧穿进入量子点 1, 然后进入量子点 2, 最后通过 C_{23} 从右边离开. 从而实现了对单电子运动的控制. 对于交流信号的一个周期, 总的效果是一个电子通过了器件, 于是电路中的电流 $I = -ef$ (f 为交流电的频率). 因为交流电的频率可调, 于是通过单电子泵不但可以控制单电子的运动, 还可以实现对微小电流的控制. 在相图中, 如果交流信号 u_1 的相位比 u_2 落后, 系统状态将围绕 P 点顺时针运动, 对应的电流 I 为正的 ef . 而如果直流偏压取值在另一类三相点(如 N 点)附近, 系统状态作逆时针运动时, 对应的电流 I 为正值, 与在 P 点附近的情况相反. 当然, 为了使电子隧穿发生, 电压 V 的正负有一定要求, 即 $I > 0$ 时, 需要 $V > 0$, 同时 V 的绝对值也不能太大, 否则将使单电子泵导通. 在以上条件下, 通过单电子泵的量子化电流 I 将独立于 V, U_1, U_2 , 仅与交流信号的频率有关. 这个特性使得它具有极大的应用价值. 可以运用在诸如微电流测量、单电子存储器 and 单电子逻辑电路等方面.

3. 讨 论

1) 实验中能够准确测定的值并不包括 C_1, C_2 只能知道 U_1, U_2 , 但这并不影响对单电子泵的使用. 因为在实验中三相点总是能测量的. 实际上, 我们甚至能从 U_2-U_1 的边界上求得一些有关电路中电容的信息. 例如, 假设测得如图 5 所示的 U_2-U_1 相图, 令 U_1, U_2 标度相同, 从以上的分析就可知 $C_{D_1 D_2} = C_{\Sigma D_2} (b/a)$. 类似地, 由 U_2 轴上的截距, 可得 $C_{\Sigma D_1}$ 与 $C_{D_1 D_2}$ 的关系.

2) 实际使用中, U_1, U_2 会向量子点中引入随机的电荷(可能由极化或是通过 $C_{1,2}$ 隧穿引入), 即 $Q_{D_1} = -n_1 e + Q_{p_1}, Q_{D_2} = -n_2 e + Q_{p_2}$. 考察 (18), (19)(20) 式, 我们可以将 Q_{p_i} 移项之后与 $C_i U_i$ 合并, 变成 $C_i U_i'$, 将 U_i 换成 U_i' 讨论, 结论完全不变, 只需考虑 U_i 和 U_i' 的关系. 容易知道, 若使用零级近似, 假设 Q_{p_i} 为定值, 则它只会使相图图形发生平移, 使用一级近似, 假设 Q_{p_i} 正比于 U_i , 则坐标轴的标度要乘以一个系数, 但是这都不影响以上的讨论; 而二级以上的偏差一般可以忽略. 另外, 在我们使用 Q_{D_i} 进行讨论的地方, 结论与 Q_{p_i} 无关, 仍然正确. 而 (5) 和 (6) 式的应用范围更广, 可以用在任何双结系统.

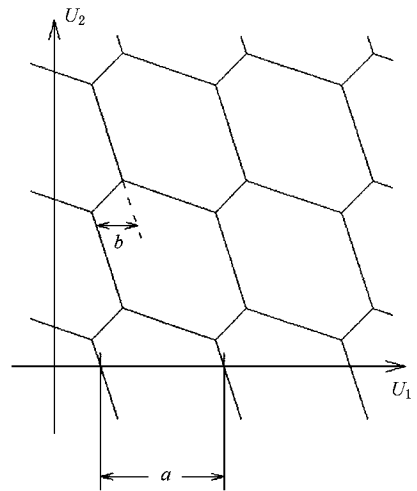


图 5 单电子泵的 U_2-U_1 相图

3) 图 4(a) 的电路图只是理想情况, 对于图 3 中的器件, 加在 g_2, g_4 上的栅压除了控制对应的量子点外, 还可能影响另外一个量子点. 取一级近似, 则 $C_1 U_1 = C_{11} U_{g_2} + C_{12} U_{g_4}, C_2 U_2 = C_{21} U_{g_2} + C_{22} U_{g_4}$. 比较 $U_{g_4}-U_{g_2}$ 图与 $C_2 U_2-C_1 U_1$ 图, 可以知道只有坐标轴的旋转变换和标度变换, 对三相点和微控电流的讨论仍然成立.

4. 结 论

本文通过对单电子泵相图的简单分析, 指出了只有在存在超过一个量子点的器件中, 系统才能存在相邻的库仑阻塞态. 而通过控制系统参量使得系统在不同阻塞态之间变化, 就能实现对单电子运动

的控制,从而控制通过器件的电流.单电子器件的小体积、低功耗、高集成度和量子效应等特点,使其具

有广阔的应用前景,但同时也对我们的研究提出了许多新的问题.

-
- [1] Wang T H ,Li H W and Zhou J M 2001 *Chin . Phys .* **10** 844
 [2] Wang T H ,Li H W and Zhou J M 2001 *Chin . Phys .* **10** S1
 [3] Wang T H and Tarucha S 1997 *Appl . Phys . Lett .* **71** 2499
 [4] Wang T H and Tarucha S 1996 *Appl . Phys . Lett .* **69** 406
 [5] Wang T H and Aoyagi Y 2001 *Appl . Phys . Lett .* **78** 634
 [6] Nakazato K ,Blaikie R J ,Cleaver J R A and Ahmed H 1993 *Electron . Lett .* **29** 384
 [7] Nakazato K and Ahmed H 1995 *J . Appl . Phys .* **34** 700
 [8] Fu Y ,Wang T H and Willander M 2001 *J . Appl . Phys .* **89** 1759
 [9] Fujisawa T ,Saku T ,Hirayama Y and Tarucha S 1993 *Appl . Phys . Lett .* **63** 51
 [10] Yusa G and Sakaki H 1997 *Appl . Phys . Lett .* **70** 345
 [11] Clark A F ,Zimmerman N M and Villiansetal E R 1995 *Appl . Phys . Lett .* **66** 2588
 [12] Pothier H *et al* 1992 *Europhys . Lett .* **17** 249
 [13] Wang T H ,Li H W and Zhou J M 2001 *Appl . Phys . Lett .* **78** 2160
 [14] Lent C S ,Tougaw P D and Porod W 1993 *Appl . Phys . Lett .* **62** 714
 [15] Evans A K ,Glazman L I and Shklovskii B I 1993 *Phys . Rev . B* **50** 15113
 [16] Hofmann F *et al* 1995 *Phys . Rev . B* **51** 13872

Single-electron control by single-electron pump and its stability diagrams^{*}

Wu Fan Wang Tai-Hong

(*Institute of Physics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100080 ,China*)

(Received 5 April 2002 ; revised manuscript received 2 July 2002)

Abstract

Based on both Coulomb blockade and single-electron tunneling , the single-electron control by a single-electron pump is discussed. The stability diagram is obtained by considering its equivalent circuit in terms of the electrostatic energy. One of Its applications is discussed by analyzing its stability diagram. Our results show that random charges on the gate have less influence on the control of small current.

Keywords : single-electron pump , Coulomb blockade , phase diagrams

PACC : 7335C , 8130

^{*} Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China(Grant No. G2001 CB 3095) and the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 69925410 and 60236010).