

单电子晶体管通断图及其分析*

吴 凡 王太宏

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2002 年 3 月 19 日收到, 2002 年 4 月 23 日收到修改稿)

通过研究单电子晶体管在电路中的静电能量的变化, 得到了它的阻塞、导通情况与其两端偏压和控制栅压之间的关系, 从而给出了它的通断图. 并且发现单电子晶体管的对外特性主要由其对外的总电容决定, 而单电子岛两个隧道结电容的不同主要反映在通断图上由隧道结电容所决定的晶体管阻塞、导通边界线上, 这两条边界线同时也与外电路有关.

关键词: 单电子晶体管, 库仑阻塞, 隧穿

PACC: 7335C, 7340G

1. 引 言

目前, 随着电子器件结构的进一步超小型化, 传统的电子器件不断受到新的挑战, 而单电子器件有可能成为新一代电子器件的重要成员. 其中最有可能也是最有前途的应用就是单电子晶体管^[1-10]. 作为集成电路的基本单元, 晶体管的进步, 将能引起电子技术的新一轮革命. 由于其根本原理上的差别, 较传统晶体管而言, 单电子晶体管可更大规模的集成, 其体积可以缩小到 1%, 所需电力也能够减少到 10^{-6} 以上. 它极低的功耗可解决集成化不稳定因素问题. 其高度集成化程度可远远超越目前大规模集成化的极限, 并能达到海森伯不确定原理设定的极限而成为将来不可被取代的新型器件.

对于单电子晶体管, 由于它属于介观系统, 我们将能在宏观尺度上观测到它的量子效应, 即库仑阻塞现象, 同时也意味着在分析其性质的时候, 我们可以在某些方面绕过计算繁琐的量子力学, 而在使用适当近似的条件下用处理普通宏观系统的方法来考察其特性. 在本文中, 我们通过计算得到整个单电子晶体管的能量函数, 系统的任何变化, 当且仅当系统的总能量减小时, 才可以发生. 从而我们将可以得到单电子晶体管发生库仑阻塞或是单电子隧穿的条件.

2. 原 理

通常的晶体管在工作时电子数目每次在 10^6 以上时才能动作, 而单电子器件工作时每次动作只需一个电子. 在其源极与漏极之间, 电子是一个一个通过的, 即电荷是量子化的. 它的物理背景是库仑阻塞原理.

库仑阻塞和单电子隧穿效应是量子点结构的一种特有的量子效应, 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, 由一个电子隧穿所引起的电位差变化可达数毫伏左右; 如果此时静电能的变化比热能 $k_B T$ 还要大, 则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.

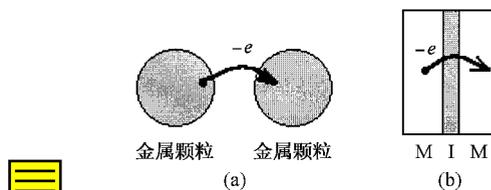


图 1 隧穿结与等效的金属 MIM 结

为了研究方便, 我们将一个典型的隧穿结图 1 (a) 等效为如图 1 (b) 所示的金属 (M) 绝缘体 (I) 构

* 国家重点基础研究专项基金(批准号: G2001CB3095)和自然科学基金(批准号: 69925410 和 19904015)资助的课题.

成的 MIM 结.从量子力学的角度,电子可以隧穿过中间的势垒.与之对应,隧穿结存在一个隧道电阻 R_t .而从经典物理的角度,这是一个电容为 C 的电容器.对于一个电子的隧穿过程,极板上电荷改变 e ,结电压改变 $\Delta V = e/C$,静电能增加 $e^2/2C$.由此可见,要在实验上具体观测到库仑阻塞与单电子隧穿,必须满足几个条件:(1)要求静电能要远大于热起伏的影响,否则单电子隧穿现象将被热效应所掩盖,即实验应在很低的温度下进行,同时隧道结具有较小的结面积,从而使结电容足够小,以满足 $e^2/2C \gg k_B T$ (2)隧道结的电阻 R_t 应远大于量子电阻 $R_k = h/e^2$,使由量子力学的不确定原理而导致的能量不确定值要小于静电能,从而不会使单电子隧穿效应被掩盖.

对于 MIM 单结系统,由于电极引线间还包含杂散电容 C_L ,而 C_L 通常远大于结本身的电容 C_j ,致使总电容 $C = C_j + C_L$ 变得很大,这就导致在单结系统中难以观察到单电子隧穿振荡.解决方法是采用图 2(a) 中的双结结构(即 MIMIM 结).对两结之间的“岛”而言,岛与周围环境之间的电容为 $C_\Sigma = C_1 + C_2$,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库仑岛,或单电子岛.

为有效的控制岛上的电荷,我们通常通过一小电容 C_g 由“栅”电压 V_g 向单电子岛引入一个电荷 Q_p ,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 2(b) 就是单电子晶体管的示意图.

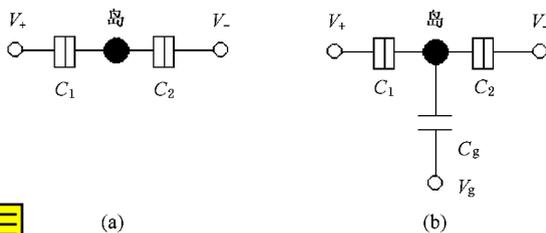


图 2 单电子岛和单电子晶体管

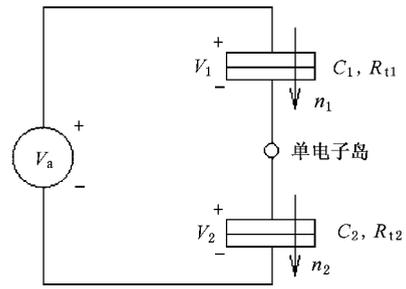


图 3 无栅压时的电路图

2.1. 单电子岛情形

为了简化分析,我们先讨论不加栅电压,即单电子岛在电路中的情形.电路图如图 3 所示.我们忽略了金属-半导体之间的肖特基势垒和单电子岛与电路其他部分之间的电容.假设两个隧道结分别具有结电容 C_1, C_2 和隧道电阻 R_{11}, R_{12} . n_1, n_2 为全过程中通过 C_1, C_2 的电子数目.由电路图可知,结电容上带电

$$Q_1 = C_1 V_1, \quad Q_2 = C_2 V_2, \quad (1)$$

从而,单电子岛上带电

$$Q = Q_2 - Q_1 = -ne, \quad (2)$$

式中 $n = n_1 - n_2$ 为单电子岛上的电子数目(可正可负).而 Q_1, Q_2 由于包含极化电荷,所以是可连续变化的.由(1)和(2)式以及 $V_a = V_1 + V_2$,可以求得电容器上的电压降为

$$\begin{aligned} V_1 &= (C_2 V_a + ne) / C_\Sigma = (C_2 V_a - Q) / C_\Sigma, \\ V_2 &= (C_1 V_a - ne) / C_\Sigma = (C_1 V_a + Q) / C_\Sigma, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $C_\Sigma = C_1 + C_2$ 为单电子岛对外部的总电容.因此,电容器上总储能为

$$E_s = Q_1^2/2C_1 + Q_2^2/2C_2 = (C_1 C_2 V_a^2 + Q^2) / 2C_\Sigma. \quad (4)$$

事实上,可以看出,在隧穿过程中, V_a 为固定的,仅有 Q (或 n_1, n_2) 发生改变.因此, E_s 中起作用的是 $Q^2/2C_\Sigma$.这是可以理解的.将单电子岛看成带电 Q 、对外的总电容 C_Σ 的多端系统,那么它的储能为 $Q^2/2C_\Sigma$,而电容器上的总储能为 $Q^2/2C_\Sigma$ 与外界其他的因素(例如 V_a) 决定.在隧穿过程中,改变的仅有 Q ,从而只需考虑 $Q^2/2C_\Sigma$.这个结论将用在以后讨论的单电子晶体管上以简化计算.

同时,隧穿过程中,电源 V_a 将对通过其的电荷做功

$$W_s = \int dt V_a I(t) = V_a \Delta Q, \quad (5)$$

式中 ΔQ 为过程中通过电源的总电荷.

若一个电子通过隧道结 2 隧穿出单电子岛, 则 $n'_2 = n_2 + 1, Q' = Q + e, n' = n - 1$. 则由(3)式, $V'_1 = V_1 - e/C_\Sigma$. 从而有电荷 $\Delta Q = -eC_1/C_\Sigma$ 通过电源(我们也可以不用(3)式就导出以上结果. 隧穿后, 为了保持静电平衡, $\Delta Q_2 = -e$ 应有一部分移动至 C_1 上使得 $\Delta V_1 + \Delta V_2 = 0$, 同样可求得 $\Delta Q = -eC_1/C_\Sigma$). 所以, 对于所有穿过隧道结 2 的 n_2 个电子, 电源对它们做的总功

$$W_s(n_2) = -n_2 e V_a C_1 / C_\Sigma. \quad (6)$$

类似, 对于穿过隧道结 1 的 n_1 个电子

$$W_s(n_1) = -n_1 e V_a C_2 / C_\Sigma. \quad (7)$$

所以, 将隧道结和单电子岛作为一个系统, 考虑电源做功后系统的总能量函数

$$E(n_1, n_2) = E_s - W_s \\ = (C_1 C_2 V_a^2 + Q^2) / 2C_\Sigma \\ + eV_a(n_2 C_1 + n_1 C_2) / C_\Sigma. \quad (8)$$

(实际上(6)和(7)式仅是为了求得总能量表达式(8), 但这三个式子并不是必须的. 我们只需知道一个电子通过隧道结 1, 2 隧穿出(入)单电子岛时的 $\Delta Q = \pm eC_{1,2}/C_\Sigma$ 即可求得以下(9)和(10)式.)

在低温下, 不考虑热涨落引起的隧穿, 若隧穿后系统总能量增加, 那么隧穿将不被允许. 此时就将发生库仑阻塞, 反之则发生单电子隧穿, 损失的能量在电路中被耗散掉.

在隧道结 1 上发生单电子隧穿时

$$\Delta E_1^\pm = E(n_1, n_2) - E(n_1 \pm 1, n_2) \\ = \frac{Q^2}{2C_\Sigma} - \frac{(Q \mp e)^2}{2C_\Sigma} \mp \frac{eV_a C_2}{C_\Sigma} \\ = \frac{e}{C_\Sigma} \left[-\frac{e}{2} \mp (ne + C_2 V_a) \right]. \quad (9)$$

同样可得

$$\Delta E_2^\pm = E(n_1, n_2) - E(n_1, n_2 \pm 1) \\ = \frac{Q^2}{2C_\Sigma} - \frac{(Q \pm e)^2}{2C_\Sigma} \mp \frac{eV_a C_1}{C_\Sigma} \\ = \frac{e}{C_\Sigma} \left[-\frac{e}{2} \pm (ne + C_1 V_a) \right]. \quad (10)$$

系统处于初态时, 单电子岛是电中性的, $n = 0$, 要求库仑阻塞的话, 有

$$\Delta E_{1,2}^\pm = \frac{e}{C_\Sigma} \left(-\frac{e}{2} \mp V_a C_{2,1} \right) < 0. \quad (11)$$

由(9)–(11)式可见, 1) V_a 很小时, ΔE 一定是负值, 电路中没有电流. 当 V_a 的绝对值超过某个值时, 电路才能导通. 例如若 $C_1 = C_2$, 则 $|V_a| > e/C_\Sigma$. V_a 决定了电路的电流方向, $V_a < 0$ 时, 上式取正号; $V_a > 0$ 时, 上式取负号. 2) 若 $C_1 \neq C_2$, 由计算可知, 当 $n \neq 0$ 时, 不可能发生库仑阻塞. 如若 $|V_a|$ 介于 $e/2C_1$ 与 $e/2C_2$ 之间, 将先有 e 由某一端隧穿出(入)单电子岛, 然后另一端的隧穿条件将会满足, 电路中也会有电流. 3) 库仑阻塞是由单电子岛导致的库仑能量 $e^2/2C_\Sigma$ 的直接结果, 库仑能量反映了一个电子通过隧穿出入单电子岛引起的能量改变. 在大 C_Σ 的情况下, 库仑阻塞将湮没在热涨落和量子涨落中从而无法观测, 通过器件的电流将由隧穿电阻 $R_{t,2}$ 决定.

2.2. 单电子晶体管情形

简单双结系统的电导仅由 V_a 决定, 无法控制, 更有使用价值的器件是图 2(b) 中的单电子晶体管. 其电路图见图 4(a), 其中 V_a 分成两个 $V_a/2$ 是为了形式上的对称. 独立于 V_a 的栅电压 V_g 通过一个理想电容 C_g (即 C_g 与单电子岛中没有隧穿现象) 与单电子岛作用. 于是, 方程组(1)要加上一个方程

$$Q_g = C_g(V_g + V_a/2 - V_2), \quad (12)$$

而单电子岛上带电

$$Q = Q_2 - Q_1 - Q_g = -ne + Q_p, \quad (13)$$

式中 Q_p 是由于 V_g 导致的背景极化电荷以及通过 C_g 随机引入的电荷.

联立(1)(12)和(13)式和电路的电压降方程 $V_a = V_1 + V_2$, 可解得 V_1, V_2

$$V_1 = [(C_2 + C_g/2)V_a - C_g V_g + ne - Q_p] / C_\Sigma \\ = [(C_2 + C_g/2)V_a - C_g V_g - Q] / C_\Sigma, \\ V_2 = [(C_1 + C_g/2)V_a + C_g V_g - ne + Q_p] / C_\Sigma \\ = [(C_1 + C_g/2)V_a + C_g V_g + Q] / C_\Sigma, \quad (14)$$

式中单电子岛对外的总电容为 $C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_g$, 单电子岛上储能为

$$E_s = Q^2 / 2C_\Sigma. \quad (15)$$

(若用类似(4)式的解法, 可解得

$$E_s = Q_1^2 / 2C_1 + Q_2^2 / 2C_2 + Q_g^2 / 2C_g \\ = [C_1 C_g (V_g - V_a/2)^2 + C_2 C_g (V_g + V_a/2)^2 \\ + C_1 C_2 V_a^2 + Q^2] / 2C_\Sigma.$$

由于隧穿过程中 V_a, V_g 不变, 起作用的部分还是 $Q^2 / 2C_\Sigma$.)

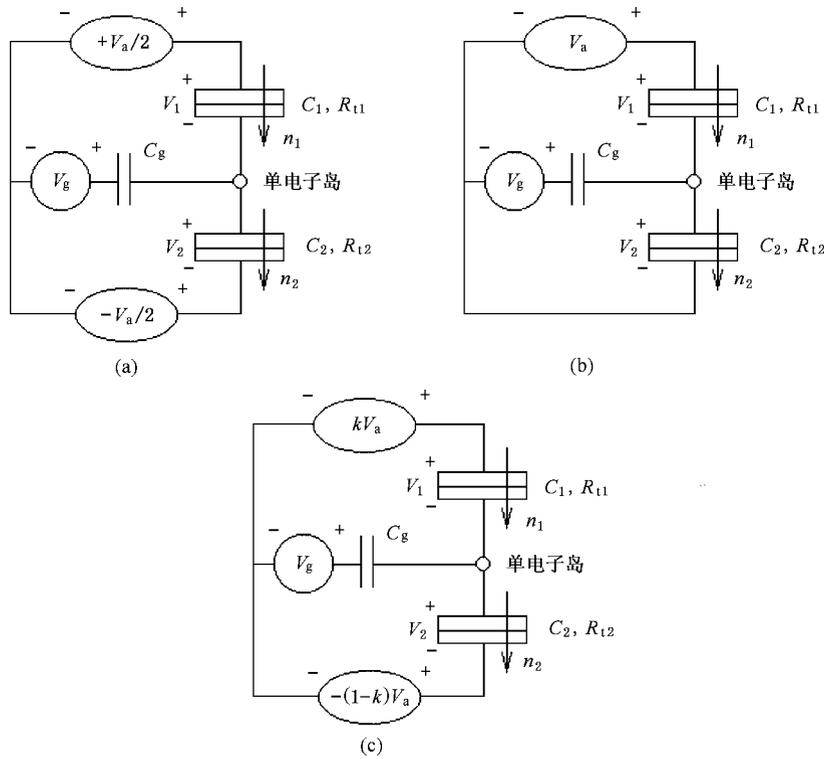


图 4 单电子晶体管的电路图

类似与(6)(7)式的求法,由(14)式可求得对于穿过隧道结的 n_1, n_2 个电子

$$W_s(n_1) = -\frac{n_1 e}{C_\Sigma} \left[\left(C_2 + \frac{C_g}{2} \right) V_a - C_g V_g \right],$$

$$W_s(n_2) = -\frac{n_2 e}{C_\Sigma} \left[\left(C_1 + \frac{C_g}{2} \right) V_a + C_g V_g \right]. \quad (16)$$

从而得到与(9)(10)式对应的

$$\begin{aligned} \Delta E_1^\pm &= \frac{Q^2}{2C_\Sigma} - \frac{(Q \mp e)^2}{2C_\Sigma} \\ &\mp \frac{e}{C_\Sigma} \left[\left(\frac{C_g}{2} + C_2 \right) V_a - C_g V_g \right] \\ &= \frac{e}{C_\Sigma} \left\{ -\frac{e}{2} \mp [ne - Q_p \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{C_g}{2} + C_2 \right) V_a - C_g V_g] \right\}, \\ \Delta E_2^\pm &= \frac{Q^2}{2C_\Sigma} - \frac{(Q \mp e)^2}{2C_\Sigma} \\ &\mp \frac{e}{C_\Sigma} \left[\left(\frac{C_g}{2} + C_1 \right) V_a + C_g V_g \right] \\ &= \frac{e}{C_\Sigma} \left\{ -\frac{e}{2} \pm [ne - Q_p \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{C_g}{2} + C_1 \right) V_a - C_g V_g] \right\}. \quad (17) \end{aligned}$$

与(9)(10)和(11)式相比较,我们可以通过改变 V_g

来改变 $\Delta E_{1,2}$,从而控制单电子晶体管处于阻塞或是隧穿状态.判断仍然是 $\Delta E_{1,2}$ 的符号:大于零时晶体管导通;小于零时关断.可以看出,由 V_g 引入的未知极化电荷 Q_p 就相当于在栅压 V_g 上叠加了一个偏压,我们定义一个新的偏压 $V'_g = V_g + Q_p/C_g$,则库仑阻塞的条件变成

$$\begin{aligned} -\frac{e}{2} \mp [ne + \left(\frac{C_g}{2} + C_2 \right) V_a - C_g V'_g] &< 0, \\ -\frac{e}{2} \pm [ne - \left(\frac{C_g}{2} + C_1 \right) V_a - C_g V'_g] &< 0. \end{aligned} \quad (18)$$

在 $V_a - V_g$ 平面图上,由上式决定的直线构成了单电子晶体管的通断图.如图 5(a) 为了更清楚地看出 V_a, V_g 与电量的关系,我们的坐标轴用的是 $C_\Sigma V_a$ 和 $C_g V'_g$.对于任意一个固定的 n ,在 $V_a - V_g$ 平面图上我们将得到一个平行四边形(图 5 中的阴影部分).平行四边形内部对应单电子岛中存在 n 个电子,同时两个隧道结均为库仑阻塞的稳定状态. n 不同时,平行四边形将在 $C_g V'_g$ 轴上平移,对应的移动量为 ne ;相邻的平行四边形仅在 $C_g V'_g$ 轴上有一个相邻的顶点,对应的电荷为 $(n + 1/2)e$.在所有平行四边形以外的区域,单电子晶体管呈导通状态,电流

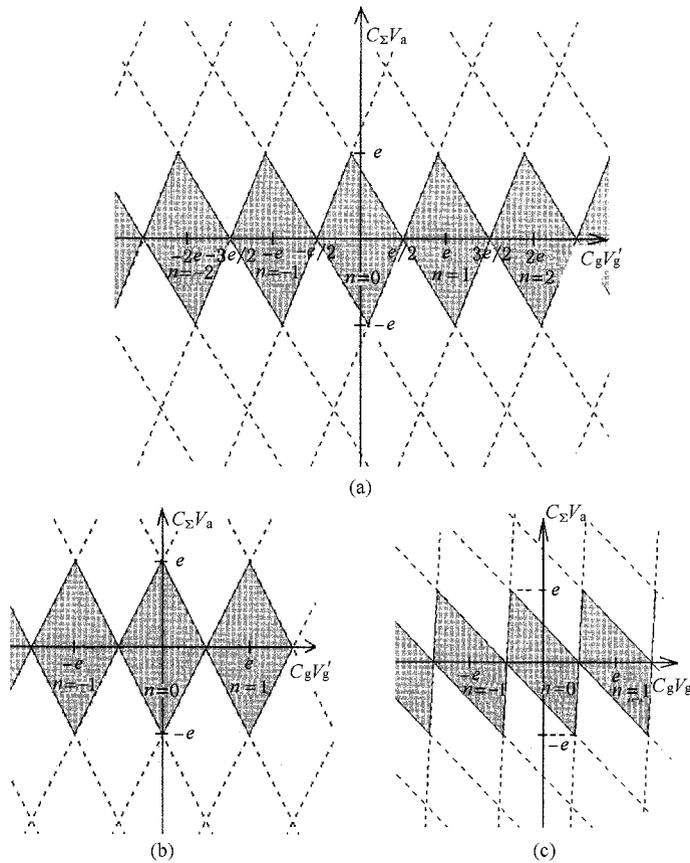


图 5 单电子晶体管的库仑阻塞区域,不同的平行四边形对应单电子岛中的不同电子数 n

可以通过.同时, V_a 仍然决定了回路中电流的方向.

3. 讨 论

1. 单电子岛是单电子晶体管的特例,我们令 $V_g = 0, C_g = 0, Q_p = 0$,就可看出单电子晶体管回到了单电子岛的情况.考察图 5 的 V_a 轴,就能得到我们在单电子岛原理中的所有讨论结果.例如为什么 $V_a \approx 0$ 时电路阻塞, $n \neq 0$ 或 $V_a > \min\{e/2C_1, e/2C_2\}$ 时电路导通,都可以很容易地看出来.

2. 在 $C_\Sigma V_a - C_g V_g'$ 图上,由两个隧道结决定的稳定区域边界线斜率分别为 $k_1 = C_\Sigma(C_2 + C_g/2)$ 和 $k_2 = -C_\Sigma(C_1 + C_g/2)$,它们反映了两个隧道结的不同结电容对通断图的影响.在这张图上,这两个斜率倒数的绝对值之和为 1,每个斜率的绝对值均大于 1.在 $C_1 = C_2$ 时,斜率的绝对值相等,均为 2,与 C_g 无关,如图 5(b).在 $C_1 \gg C_2$ 且 $C_1 \gg C_g$ 时, $k_2 \approx -1, k_1 \rightarrow +\infty$,如图 5(c).在 $C_2 \gg C_1$ 且 $C_2 \gg C_g$ 时,

$k_1 \approx 1, k_2 \rightarrow -\infty$,与图 5(c)类似但左右对称.但是我们应该注意到, $C_{1,2}$ 并不是决定通断图图形的惟一因素.例如,对图 4(b)中的电路(14)–(18)式都将变化

$$V_1 = [(C_2 + C_g)V_a - C_g V_g - Q]C_\Sigma, \quad (14)$$

$$V_2 = [C_1 V_a + C_g V_g + Q]C_\Sigma;$$

$$E_s = [C_1 C_g (V_g - V_a)^2 + C_2 C_g V_g^2 + C_1 C_2 V_a^2 + Q^2]2C_\Sigma, \quad (15)$$

$$W_s(n_1) = -\frac{n_1 e}{C_\Sigma} [C_2 V_a - C_g (V_g - V_a)],$$

$$W_s(n_2) = -\frac{n_2 e}{C_\Sigma} [C_1 V_a + C_g V_g]; \quad (16)$$

$$\Delta E_1^\pm = \frac{e}{C_\Sigma} \left\{ -\frac{e}{2} \mp [ne - Q_p + (C_g + C_2)V_a - C_g V_g] \right\},$$

$$\Delta E_2^\pm = \frac{e}{C_\Sigma} \left\{ -\frac{e}{2} \pm [ne - Q_p - C_1 V_a - C_g V_g] \right\}, \quad (17)$$

$$-\frac{e}{2} \mp [ne + (C_g + C_2)V_a - C_g V'_g] < 0;$$

$$-\frac{e}{2} \pm [ne - C_1 V_a - C_g V'_g] < 0. \quad (18)$$

更普遍的,对图 4(c)中的电路(其中 $0 \leq k \leq 1$)(18)式变成

$$-\frac{e}{2} \mp [ne + (kC_g + C_2)V_a - C_g V'_g] < 0;$$

$$-\frac{e}{2} \pm \{ne - [(1-k)C_g + C_1]V_a - C_g V'_g\} < 0. \quad (18')$$

分界线的斜率范围及其倒数的绝对值之和为 1 并不改变,但 k_1, k_2 与电容之间的关系将会变化,因此,实际工作中,对于具体电路,还是要经过具体分析才能给出正确的结果.

3. V_g 可以直接控制单电子晶体管的电气特性.例如,不管 V_a 有多小,只要不为零,我们使得 V'_g 的取值在 $(n+1/2)e/C_g$ 附近,就能使得晶体管导通.对于较小的 V_a ,发生库仑阻塞的 V'_g 的取值范围为

$$(n-1/2)e + (C_2 + C_g/2)V_a < C_g V'_g$$

$$< (n+1/2)e - (C_1 + C_g/2)V_a \quad (V_a > 0);$$

$$(n-1/2)e - (C_1 + C_g/2)V_a < C_g V'_g$$

$$< (n+1/2)e + (C_2 + C_g/2)V_a \quad (V_a < 0).$$

当以上两式左右相等,即 $|V_a| > e/C_\Sigma$ 时,无论 V_g 如何变化,晶体管始终导通.所以 C_Σ 反应了单电子岛的对外性质,这是单电子岛的一个重要参量.这从通断图上也能看出来.

类似的,对于一定的 V'_g ,仅当单电子岛中有 $n = \text{int}\{(C_g V'_g + e/2)/e\}$ 个电子时,可以发生库仑阻塞,对应的 V_a 满足

$$[C_g V'_g - (n+1/2)e] (C_2 + C_g/2) < V_a$$

$$< [(n+1/2)e - C_g V'_g] (C_1 + C_g/2).$$

当 V_a 超过以上范围时,晶体管导通.

4. 通断图中,不同阻塞区域间只有点接触,对应的 $V_a = 0$,没有电子隧穿发生.即当系统参量连续改变时,晶体管状态一定是从库仑阻塞状态变成导通状态或相反.

5. V_a 固定时,晶体管的电导将随 V'_g 的变化而周期性变化.由通断图易知, $C_g V'_g$ 在半整数电子电量附近时,电导最大,在整数电子电量附近电导最

小,变化周期为 $\Delta V_g = e/C_g$.

6. 我们的讨论均是在满足库仑阻塞的条件下进行的,由于库仑阻塞能量大于热涨落能量,所以并未考虑热涨落的影响.

7. 以上的讨论均没有定量考虑隧穿结电阻的影响.栅极电容上的漏电电阻 R_{lg} 将导致单电子岛与栅极间的漏电流,这是我们应当努力避免的.而两个隧穿结的隧穿电阻 $R_{l1,2}$ 主要决定电子隧穿时通过结的电流的大小,可以近似估计为 $\Delta I_{1,2} \approx \Delta V_{1,2}/R_{l1,2} = e/C_{1,2}R_{l1,2}$.这对于我们讨论的晶体管特性和通断图无大影响.不过在不对称双结系统中,当 V_a 较大 ($V_a \approx 2ne/C_{eq}$) 从而打开 n 个电子通道时,可以观测到库仑台阶现象,即此时 $\Delta I \approx ne/C_{eq}R_l$.

4. 结 论

在通常的尺度下,如结面积为 $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 时,单电子隧穿引起的结电压改变很小, V 约为 10^{-9}V ,其效果为热涨落所掩盖,惟一可能的后果是由于电荷的离散性,在通过隧道结的电流中产生散粒噪声,但当尺寸小到如 $0.1\mu\text{m} \times 0.1\mu\text{m}$,绝缘层厚度为 1.0nm 左右时,结电容 C 为 $\approx 10^{-15}\text{F}$, $e^2/2Ck_B \approx 1\text{K}$,在 mK 温度范围会出现库仑阻塞现象(另一方面, $R_K = h/e^2$ 的数值约为 $26\text{k}\Omega$,即 R_l 至少要达到 $10^6\Omega$ 量级).由此可见,单电子晶体管的小体积、低功耗特点与普通晶体管相比非常显著,而它由于量子效应造成的其他特点也很有特色.不过,本文只分析了理想情况下它的行为,像各个部分之间的附加电容,金属-半导体之间的肖脱基势垒等都没有考虑.另外,很多单电子器件的一个重要特点:通过库仑阻塞和单电子隧穿效应,可以做到让电子“排好队”逐个地通行,即实现对单个电子运动的控制,单电子晶体管并不具备.如图 5, V'_g 改变使得器件导通时,电路中将立刻产生电流.只有当器件中至少有两个单电子岛时,类似图 5 的器件通断图上才可能是阻塞区域与阻塞区域相邻^[11,12],从而器件状态可以在阻塞区域之间变化,在非导通情况下实现单个电子在器件中的运动.

- [1] Wang T H , Li H W and Zhou J M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2160
[2] Wang T H and Aoyagi Y 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 634
[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] Clark A F , Zimmerman N M and Villiansetal E R 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 2588
[6] Nakazato K , Blaikie R J , Cleaver J R A and Ahmed H 1993 *Electr. 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

Stability diagrams for single-electron transistors *

Wu Fan Wang Tai-Hong

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

(Received 19 March 2002 ; revised manuscript received 23 April 2002)

Abstract

Based on an equivalent circuit for single-electron transistors , the electrostatic energy on the charges is deduced. The transistor can be either at Coulomb blockade or conducting under various gate voltages and bias voltages along the single-electron transistor. Its stability diagrams are given and discussed.

Keywords : single-electron transistors , Coulomb blockade , tunneling

PACC : 7335C , 7340G

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