

电容耦合三结单电子晶体管特性分析*

童明照 蒋建飞 蔡琪玉

(上海交通大学微电子研究所 上海 200030)

摘要 本文基于电容耦合多个纳米隧道结串联结构的半经典模型, 研究了三结单电子晶体管的基本方程, 分析了其 $I-V$ 特性, 并对三结与两结单电子晶体管的特性进行了比较. 结果表明, 单电子晶体管的特性与常规晶体管有很大的差别, 且三结单电子晶体管与两结单电子晶体管相比较, 具有更高的灵敏度和更强的抗电磁干扰能力.

EEACC: 2560B, 2560S, 1130, 1130B, 1150

1 引言

Likharev 等人指出在尺寸非常小的隧道结中会出现库仑阻塞和单电子振荡效应^[1]. 要在室温下观察库仑阻塞和单电子振荡效应, 就必须: (1) 使结电容 $C \ll 10^{-18} \text{F}$, 这只有在微细加工技术逼近纳米量级的今天才能达到; (2) 要克服量子扰动, 即要求结电阻 R_j 大于量子电阻 $R_Q = h/4e^2 \approx 6.5 \text{k}\Omega$; (3) 要克服电磁扰动, 通常是将多个纳米隧道结串联起来, 形成自我保护^[1]. 已经有人应用这些效应设计出新型的单电子器件, 例如将两个纳米隧道结串联起来, 并通过电容耦合到两结的公共极来控制电流, 构成类似于 MOS 器件的单电子晶体管^[2~5]. 本文的目的是通过一个电容耦合多个纳米隧道结串联结构的半经典模型来分析三结单电子晶体管, 并对三结和两结单电子晶体管的特性进行比较.

本文较详细地叙述了电容耦合多个纳米隧道结串联结构的半经典模型, 研究了三结单电子晶体管的基本方程, 计算了结参数相同的电容耦合三结单电子晶体管的特性, 并对三结和两结单电子晶体管的特性进行了分析、比较. 最后, 讨论了实现这种单电子晶体管的可能性.

2 电容耦合多结串联结构的半经典模型

图 1 给出了电容耦合多个纳米隧道结串联的结构, 图中相邻两个岛区与其中间的势垒

* 国家自然科学基金资助项目 (项目批准号: 69671005)

童明照 男, 硕士研究生, 研究方向为纳米电子学

蒋建飞 男, 教授, 博士生导师, 目前研究的兴趣是纳米电子学和超导电子学

蔡琪玉 女, 副教授, 目前的兴趣是纳米电子学以及超导电子学

1997-06-08 收到, 1998-01-12 定稿

层构成隧道结, 栅极与岛区之间电子不能隧穿, 整个隧道结阵列由电压源 V_d 驱动, 并由电压源 V_g 控制岛区上的电荷数. 为讨论方便, 我们假设电子运动方向即为电流方向. 整个系统的状态可由所有隧道结两端的电压 $\{V_i\}$ 描述, 但同时电子隧穿过某结后将引起岛区上电子数重新分布, 因而也将改变结电压 $\{V_i\}$, 所以各岛区的过剩电荷数 $\{N_i\}$ 也对系统的状态有影响. $\{V_i\}$ 与 $\{N_i\}$ 之间的关系可由基尔霍夫电压定律以及电荷守恒定律得出^[4]:

$$\sum_{i=1}^{m+1} V_i - V_d = 0 \tag{1}$$

$$V_g - V_{gt} - \sum_{j=i+1}^{m+1} V_j = 0 \tag{2}$$

$$-V_i C_i - V_{gi} C_g + V_{i+1} C_{i+1} = N_i e \tag{3}$$

在考虑电子隧穿的过程中, 我们忽略了多个结同时发生隧穿的情况, 每次只有一个隧道结中有电子隧穿, 此时其它隧道结只是作为一般的电容器, 可以用图 2 说明其等效模型^[3],

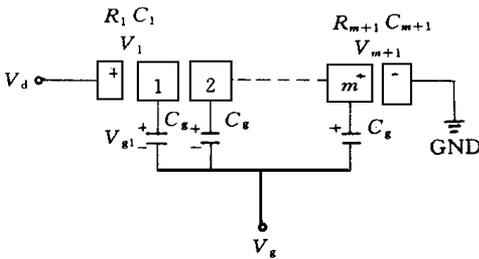


图 1 电容耦合的多个纳米隧道结串联结构示意图

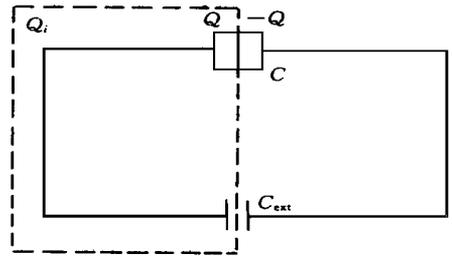


图 2 多结串联结构中某个结发生隧穿时的等效模型

图中 C_{ext} 表示与隧道结 C 并联的等效电容, Q_i 表示整个岛区上的总电荷, Q_c 表示隧道结的电荷, 即 $Q_c = C V_i$, 且 $Q_c = C Q_i / (C + C_{ext})$. 带电荷 Q_i 的岛区的充电能为 $E = Q_i^2 / [2(C + C_{ext})]$. 当电子正向隧穿时, 岛区的电荷由 Q_i 变为 $Q_i - e$, 充电能增加了:

$$\Delta E = [(Q_i - e)^2 - Q_i^2] / [2(C + C_{ext})] = e(Q_c - Q) / C \tag{4}$$

其中

$$Q_c = eC / [2(C + C_{ext})] \tag{5}$$

同理, 当电子反向隧穿时, 岛区的电荷由 Q_i 变为 $Q_i + e$, 充电能增加了:

$$\Delta E = e(Q_c + Q) / C \tag{6}$$

在所谓的“库仑阻塞”区内, 即 $-Q_c < Q < Q_c$, 电子的正向和反向隧穿都将使充电能增加, 这是做不到的, 因此在这个区域内电子不能发生隧穿. 我们定义 $V_T^\pm = \pm Q_c / C$ 为阈值电压

同时由充电能的变化还能得出第 i 个结中电子隧穿的几率为^[4]:

$$\Gamma_i^+(V_i) = \begin{cases} \frac{\Delta E_i(N_i)}{e^2 R_i} = \frac{V_i}{e R_i} - \frac{V_T^+}{e R_i} & V_i > V_T^+ \\ 0 & V_i \leq V_T^+ \end{cases} \tag{7}$$

以及

$$\Gamma_i(V_i) = \begin{cases} \frac{\Delta E(\{N_i\})}{e^2 R_i} = \frac{V_i}{eR_i} - \frac{V_{Ti}}{eR_i} & V_i < V_{Ti} \\ 0 & V_i > V_{Ti} \end{cases} \quad (8)$$

式中 R_i 表示第 i 个隧道结的结电阻

3 电容耦合三结单电子晶体管的基本方程

将方程(1)~(3)应用于电容耦合三结单电子晶体管的情况,可求得其结电压 $\{V_i\}$ 与岛区上的过剩电荷数 $\{N_i\}$ 之间的函数关系:

$$V_1 = \frac{1}{C_T} \{ [(C_3 + C_g)(C_2 + C_g) + C_2 C_g] V_d - (C_2 + C_3 + C_g)(N_{1e} + C_g V_g) - C_2(N_{2e} + C_g V_g) \} \quad (9)$$

$$V_2 = \frac{1}{C_T} \{ C_1(C_3 + C_g)V_d + (C_3 + C_g)(N_{1e} + C_g V_g) - (C_1 + C_g)(N_{2e} + C_g V_g) \} \quad (10)$$

$$V_3 = \frac{1}{C_T} \{ C_1 C_2 V_d + C_2(N_{1e} + C_g V_g) + (C_1 + C_2 + C_g)(N_{2e} + C_g V_g) \} \quad (11)$$

式中

$$C_T = (C_1 + C_g)(C_3 + C_g) + C_2(C_1 + C_g) + C_2(C_3 + C_g)$$

根据(5)式,三结单电子晶体管的阈值电压可表示为:

$$V_{T1}^{\pm} = \pm e/2C_{T1}, V_{T2}^{\pm} = \pm e/2C_{T2}, V_{T3}^{\pm} = \pm e/2C_{T3}$$

式中

$$C_{T1} = C_T / (C_2 + C_3 + C_g), C_{T2} = C_T / (C_1 + C_g + C_3 + C_g), C_{T3} = C_T / (C_1 + C_g + C_2)$$

分别为岛区 1 和周围环境之间、岛区 1 和 2 之间以及岛区 2 和周围环境之间的总电容,这可从其等效电路图中看出,把电压源 V_d 和 V_g 都看作电容量和电荷量均为无穷大的电容,且其电压 $V = Q/C$ 为常数

电子隧穿过整个晶体管结阵列的物理过程是一个概率过程,只要结电压 $\{V_i\}$ 超出库仑阻塞区,电子就能以一定的几率隧穿,并改变电荷以及电压分布,使结电压回落到库仑阻塞区内.此处我们假设各个结是轮流阻塞和导通的,且一结导通时其余结均阻塞.只有当电子能隧穿过整个晶体管结阵列时,才会有电流.从结电压 $\{V_i\}$ 与岛区上过剩电荷数 $\{N_i\}$ 以及 V_d 、 V_g 的关系来看,整个系统经历的最有可能的状态是: $\{N_1, N_2\}$ $\{N_1, N_2 - 1\}$ $\{N_1 - 1, N_2\}$ $\{N_1, N_2\}$..., 即三个结依次导通的次序为: 结 3 结 2 结 1. 流过晶体管的电流由三个结的隧穿几率共同决定:

$$I_d = \left[\frac{1}{e\Gamma_{11}^+(N_1 - 1, N_2)} + \frac{1}{e\Gamma_{12}^+(N_1, N_2 - 1)} + \frac{1}{e\Gamma_{13}^+(N_1, N_2)} \right]^{-1} \quad (12)$$

对于两结单电子晶体管的分析,我们已作过论述^[5].由于电子经结 1 和结 2 隧穿进入或逸出中心岛区所要克服的充电能相等,都为 $e^2/2C$, 其中 C 为中心岛区对周围环境的总电容,即 $C = C_1 + C_2 + C_g$. 因此,结 1 和结 2 的阈值电压相等.结电压 V_1 、 V_2 和中心岛区上的过剩电荷数 N 的关系可由式(1)~(3)解出:

$$V_1 = \frac{1}{C} [(C - C_1)V_d - C_g V_g - N e] \quad (13)$$

$$V_2 = \frac{1}{C} [C_1 V_d + C_g V_g + N e] \quad (14)$$

同样我们假定两个结是轮流导通和阻塞的,并假定结 2 先导通,那么流过单电子晶体管的电流是:

$$I_d = \left[\frac{1}{e\Gamma_{i1}^+ (N - 1)} + \frac{1}{e\Gamma_{i2}^+ (N)} \right]^{-1} \quad (15)$$

根据(12)和(15)电流公式,可得出单电子晶体管的跨导公式,在晶体管的导通区域内,两结和三结单电子晶体管的跨导公式分别如下:

$$g_m = \frac{C_g}{C} \left[\frac{I_d^2}{R_2 I_{i2}^2 (N)} + \frac{I_d^2}{R_1 I_{i1}^2 (N - 1)} \right] \quad (16)$$

$$g_m = \frac{-I_d^2 C_g (2C_2 + C_3 + C_g)}{R_1 I_{i1}^2 (N_1 - 1, N_2) C_T} + \frac{I_d^2 C_g (C_3 - C_1)}{R_2 I_{i2}^2 (N_1, N_2 - 1) C_T} + \frac{I_d^2 C_g (2C_2 + C_1 + C_g)}{R_3 I_{i3}^2 (N_1, N_2) C_T} \quad (17)$$

4 电容耦合三结和两结单电子晶体管的特性分析和比较

基于以上讨论我们计算了结参数相同的三结和两结单电子晶体管的 I - V 特性,如图 3 所示.在各个结参数相同的情况下,电子的隧穿过程只有在结阵列的两端受到限制,电子一旦进入晶体管结阵列中,就能隧穿整个结阵列形成电流.在图 3 中,我们可看到晶体管电流 I_d 随栅电压 V_g 作周期性变化且周期为 $\Delta V_g = e/C_g$,这是由于电压源 V_g 通过栅电容 C_g 向晶体管的岛区感生电荷 $C_g V_g$,当 V_g 达到 e/C_g 时,岛区中感生出相当于一个电子的电荷,这部分感生电荷可通过晶体管结阵列中电子的隧穿从岛区移走,使晶体管回落到 $V_g = 0$ 时的状态.这可从结电压 $\{V_i\}$ 与 $\{N_i\}$ 的关系式中得以说明.两结和三结晶体管都有这一特点.

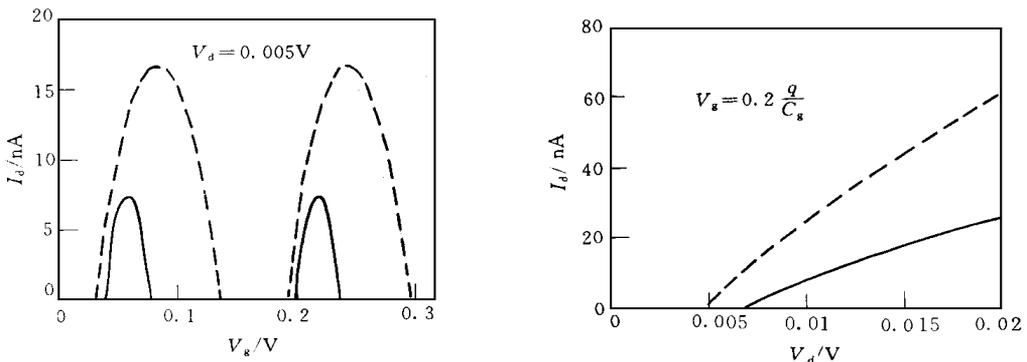


图 3 单电子晶体管的电流电压特性

图中虚线和实线分别为两结、三结单电子晶体管的特性

在本文的工作中,比较了两结和三结单电子晶体管特性的差异,并假定晶体管中隧道结的参数完全一致,结电容 $C_i = 10\text{aF}$, 结电阻 $R_i = 75\text{k}\Omega$, 栅电容 $C_g = 1\text{aF}$. 图 4 和图 5 分别画

出了我们计算所得的两结和三结单电子晶体管跨导和 V_g 、 V_d 的关系, 可以看出: 三结和两结相比较, 三结单电子晶体管有更大的跨导, 更高的灵敏度, 及更低的功耗。单电子晶体管的跨导具有突变性, 利用这一特点有可能设计出高灵敏度的单电子晶体管放大器。另外, 单电子晶体管的特性与结参数密切相关, 结参数稍有不同, 就能够引起晶体管特性很大的变化。

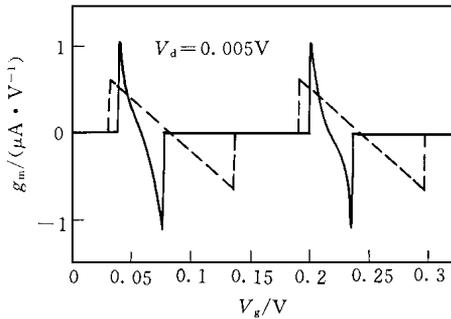


图 4 单电子晶体管跨导
与栅电压 V_g 关系的比较

图中虚线和实线分别对应于两结、三结单电子晶体管

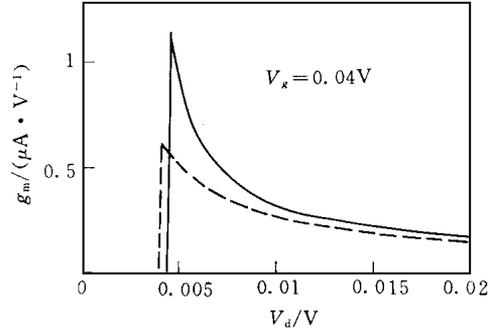


图 5 单电子晶体管跨导
与偏置电压 V_d 关系的比较

图中虚线和实线分别对应于两结、三结单电子晶体管

5 结论和讨论

本文研究的电容耦合三结单电子晶体管特性的结果表明, 采用多结串联结构的单电子晶体管不仅具有 Likharev 等指出的抗电磁干扰能力, 提高了稳定性, 而且我们的结论是有更高的增益, 这在未来的应用中很重要。这种单电子晶体管不仅限于用半导体材料制作, 也可以是金属或超导体材料, 如 Nakazato 等人提出的在 GaAs 中进行 δ 掺杂, 形成多个纳米隧道结串联的结构^[3], 又如我们指出的用高- T_c 超导体本身所具有的层状结构也可以实现纳米隧道结^[6]。单电子晶体管的特性与其结构和尺寸密切相关, 而且对工作环境的要求特别苛刻。

参 考 文 献

- [1] K. K. Likharev, *IBM J. Res. Develop.*, 1988, **32**(1): 144
- [2] J. R. Tucker, *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(9): 4399
- [3] K. Nakazato, R. J. Blaikie and H. Ahmed, *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(10): 5123
- [4] M. Amman *et al.*, *Physics Letters A*, Volume 142, 1989, **6**(7): 431
- [5] 沈波, 蒋建飞, *半导体学报*, 1997, **18**(8): 626
- [6] Jiang J. F., Cai Q. Y., Tong M. Z., *Proceeding of 6th International Superconductive Electronics Conference*, Berlin, Germany, 1997, 376

Analysis of Capacitance-Coupled Three-Junction Single-Electron Transistor Characteristics

Tong Mingzhao, Jiang Jianfei, Cai Qiyu

(Microelectronics Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Received 8 June 1997, revised manuscript received 12 January 1998

Abstract On the basis of semiclassical model for capacitance-coupled nanometer tunneling junction array (NTJA), we study the basic equations for three-junction single-electron transistor (SET) and its I - V characteristics, compare it with two-junction SET. Our results indicate obvious differences between the characteristics of SETs and conventional transistor. Three-junction SETs seem to have higher sensitivity and be able to resist stronger electromagnetic disturbance.

EEACC: 2560B, 2560S, 1130, 1130B, 1150