

文章编号: 1007- 2985(2009) 06- 0063- 03

基于压控单元的单电子晶体管宏模型*

周少华^{1,2}, 熊琦¹, 杨红官², 戴大康², 曾健平², 曾云²

(1. 湖南工程职业技术学院, 湖南长沙 410151; 2. 湖南大学物理与微电子科学学院, 湖南长沙 410082)

摘要:在对纳米隧穿结(SETJ)及单电子晶体管(SET)的特性进行分析的基础上, 笔者采用等效电路的方法, 提出了基于压控单元的 SET 宏模型, 仿真得到单电子晶体管的特性曲线. 通过器件仿真的输出特性曲线与理想特性曲线的对比, 得出曲线的走势与理想曲线基本一致, 偏差不大. 并且通过计算表明, 数值的精度在合理范围内, 验证了模型的合理性.

关键词: 等效电路; 宏模型; 纳米隧穿结; 单电子晶体管

中图分类号: TN32; TN710. 2

文献标识码: A

在单电子器件及电路的研究中, 数值模拟一直是一项重要的工作. 单电子系统的数值模拟方法从算法来源上大致分 2 种, 即主方程法(Master Equation, ME)和蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)法^[1-2]. 前者通过求解单电子系统的主方程, 得到系统处于各种状态下的概率, 从而获得系统的各个电学量的期望值; 后者考虑到单电子系统的工作过程本身就是一个离散电子随机隧穿的过程, 所以可以用计算机来直接模拟这些随机事件, 得到电子的输运过程, 并经过对大量随机隧穿事件的统计求出系统的电学量.

单电子器件及电路的电路模拟也成为研究的热点. Amakawa 等人将传统的经典集成电路仿真软件 SPICE 结合到单电子电路的数值模拟中来, 已做了一定的尝试^[3]. 其主要工作是将电容耦合单电子晶体管器件方程加入了 SPICE, 从而开发了包含电容耦合单电子晶体管器件模型的 SET-SPICE. 为简化器件方程, 提高数值运算速度, 他们采用了一种主方程状态数量的约化技术, 将电容耦合单电子晶体管的主方程中的状态数减到 5 以下, 并能保证单个器件的 $I-V$ 特性的精确度. 另一种方案是设计出单电子器件的等效电路, 并将此等效电路输入到一个宏模块中, 从而在以后的电路数值模拟和设计中, 可以直接调用该宏模块来替代单电子器件^[4]. 这项工作的意义不仅是为单电子电路的大规模设计带来了便利, 而且还在于可以设计和模拟单电子与常规半导体器件的混合电路. 它的局限是目前还无法处理同一电路中不同单电子器件内的电子隧穿相关效应, 而且对外加偏置有一定的限制, 尤其是宏模型的方案^[5].

笔者在对隧穿结(SETJ)及单电子晶体管(SET)的特性进行分析的基础上, 采用等效电路的方法, 提出了基于压控单元 SET 宏模型, 并通过仿真得到了与单电子晶体管的理想特性曲线近似的特性曲线, 验证了模型的有效性.

1 纳米隧穿结的电路模型

根据隧穿结的电学性质, 可以将它等效为一特殊的触发器. 它由 1 个电容和 1 个电压控制电流源构成, 如图 1 所示. 其中, 等效的电压控制电流源由离散的电荷传输决定, 且

$$i(t) = e \cdot \delta(t - t_0),$$

其中 $\delta(t)$ 为单位脉冲函数, 且 $\int i(t) dt = e$. 脉冲信号加在隧穿结上, 隧穿结的电流和电压如图 2 所示.

图 2 中 U_{cr} 为临界电压其表达式为

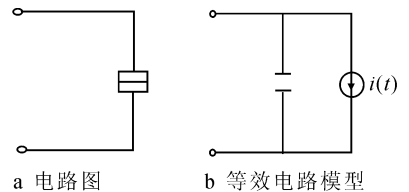


图 1 隧穿结的电路符号与等效电路模型

* 收稿日期: 2009- 07- 26

基金项目: 湖南省教育厅科学研究资助项目(07D025, 08D042); 湖南省科技计划项目(2008FJ3123)

作者简介: 周少华(1963-), 男, 湖南祁阳人, 湖南工程职业技术学院副教授, 硕士, 湖南大学访问学者, 主要从事电子器件与系统研究; 曾健平(1966-), 男, 湖南祁东人, 湖南大学物理与微电子科学学院副教授, 博士生, 主要从事新型微电子器件及其集成化研究.

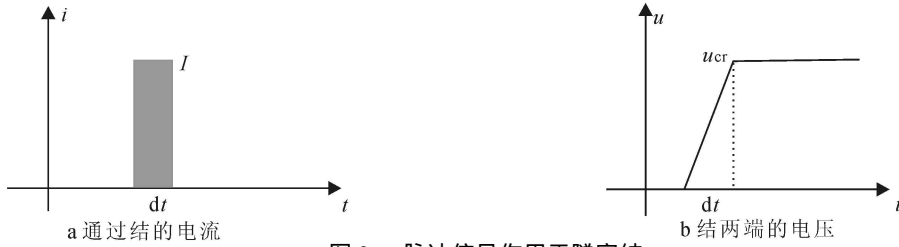


图 2 脉冲信号作用于隧穿结

$$U_{cr} = \frac{2qI}{C_J} = -\frac{\delta_{qj}}{C_J}$$

其中 δ_{qj} 为隧穿后结上的电荷分布的变化量, 近似处理时则

$$U_{cr} = \frac{e}{2C_{eff}}$$

根据以上的分析, 可将纳米隧穿结等效为如图 3 所示的电路模型. 当外加信号(一般为电压)超过临界电压 U_{cr} 时, 即触发器为“1”时, 电压控制电流源导通; 否则, 触发器为“0”, 电流源截止.

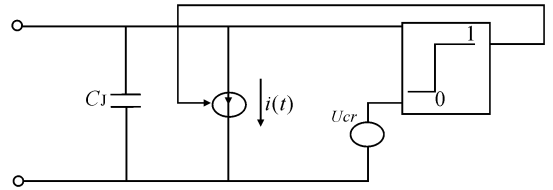


图 3 纳米隧穿结的触发器电路模型

笔者提出了对称的基于压控单元的单电子晶体管宏模型, 如图 4 所示. 该宏模型主要由 2 个电压控制电压源(即触发器

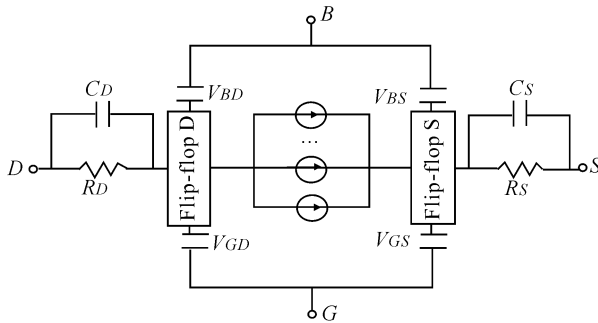


图 4 SET 的宏模型

导致平均单个电子通过隧穿结所需的时间的不同. 当库仑岛上过剩电荷的积累由于范围内充电态的增加而突然增加 1 个电子时, 电流 I 便会跃升 e/τ , 从而形成台阶状的电流-电压特性. 一般来说, 每一个台阶的高度为 e/τ .

由正统理论近似可得:

$$\Gamma(\Delta F) = \frac{\Delta F}{e^2 R_T [\exp(\frac{\Delta F}{K_B T} - 1)]}, I_{Dm} = e \cdot \Gamma_{Dm}, I_{Sm} = e \cdot \Gamma_{Sm}, I_{DSm} = \frac{I_{Dm} I_{Sm}}{I_{Dm} + I_{Sm}}, I_{DS} = \sum_{n=1}^{\infty} I_{DSn}$$

2 数值模拟与分析

在此模型中, 由于分立的能级随 n 的增大而变化很快, 能级间距也将变得很大, 一般 m 为 4~10. 要得到不同温度下的库仑台阶效应, 只需要改变 T 即可. 取 $C_G = C_D = C_S = C_B = 1 \times 10^{-18}$ F, $C_P = 0$, $R_S = R_D = 10^6 \Omega$, $T = 4.2$ K, $Q = 0.5e$ 则仿真得到的 $V_{GS} - I_{DS}$ 曲线如图 5 所示.

图 5 从左到右分别为能级 $n = 3, 2, 1$ 时的电压-电流关系. 由图 5 中看出, 在给定偏压下, 单电子晶体管漏源之间的电流受栅极电压控制, 随栅极电压变化而出现准周期性振荡. 这是因为随着单电子晶体管栅极电压的增加, 使得库仑岛上的电子数周期性地增加, 但相应的单个电子隧穿率不变, 所以形成的电流不变, 只是库仑岛电子概率分布函数向左(或向右)移了一段距离, 此距离可由下式得到

$$\Delta V_g = \frac{e}{C_g} + \frac{E_{N+1} - E_N}{e} \cdot \frac{C}{C_g}$$

图 6 为 1, 10, 100, 300 K 下的台阶效应, 参数为 $R_S = 10^6$ k Ω , $R_D = 10^9$ k Ω , $C_S = C_D = 10^{-18}$ F. 可以看出, 温度较低时, 台阶效应很明显, 随着温度的升高, 库仑台阶逐渐消失. 由图 6 还可看出, 台阶高度约为 0.4×10^{-9} A, 由 $\Delta I = \frac{e}{\tau}$ 可得 $\tau = 4 \times 10^{-9}$ s, 又由 $\tau \approx RC$ 求得 $\tau \approx 10^{-9}$ s, 两者比较发现, 在误差允许范围内, 证明该模型是合理的, 而且功耗一般都在 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ W 范围内.

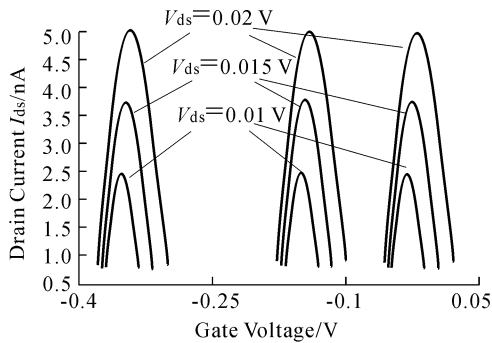


图5 单电子晶体管的曲线

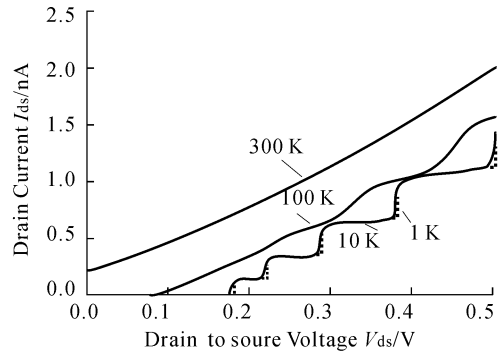


图6 不同温度下的台阶效应

3 结语

通过对纳米隧穿结 (SETJ) 及单电子晶体管 (SET) 的特性分析,笔者采用等效电路的方法,提出了基于压控单元的 SET 宏模型,通过计算表明,数值的精度在合理范围内.此外,在建模的过程中虽然采用了一定的近似,但同时也引入了背景电荷和寄生电容的影响,因此从理论上而言,该模型比较接近实际应用中的单电子晶体管.

参考文献:

- [1] AVERIN D V, LIKHAVER K K. Coulomb Blokade of Single-Electron Tunneling, and Coherent Oscillations in Small Tunnel Junction [J]. Journal of Low Temperature Physics, 1986, 62(3/4): 345- 373.
- [2] 沈波, 蒋建飞, 蔡琪玉. 电容耦合单电子晶体管有源负载 [J]. 电子学报, 1999, 27(11): 65- 67.
- [3] PUGLISI R A, LOMBARDO S, CORSO D, et al. Effects of Partial Self-Ordering of Si Dots Formed by Chemical Vapor Deposition on the Threshold Voltage Window Distribution of Si Nanocrystal Memories [J]. J. Appl. Phys., 2006, 100(8): 86- 104.
- [4] K ROK KIM, SONG Ki-WHAN, DAE HWAN KIM. Analytical Modeling of Realistic Single-Electron Transistors Based on Metal-Oxide-Semiconductor Structure with a Unique Distribution Function in the Coulomb-Blockade Oscillation Region [J]. Jap. Journal of Applied Physics, 2004, 43(4B): 20- 31.
- [5] MAHA S A. Quasi-Analytical SET Model for Few-Electron Circuit Simulation [J]. IEEE Electron Device Letters, 2002, 23: 366.

Macro-Model of Single-Electron Transistor Based on Voltage-Controlled Unit

ZHOU Shao-hua^{1,2}, HIONG Qi¹, YANG Hong-guan², DAI Da-kang², ZENG Jian-ping², ZENG Yun²

(1. Hunan Vocational College of Engineering and Technology, Changsha 410151, China; 2. School of Physics and Microelectronics Science, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the analysis of characteristics in single electron tunneling junction and single-electron transistor, using the equivalent circuit method, macro-model was proposed based on the voltage-controlled unit. Simulation was executed subsequently to get characteristic curves. Comparison between curves was obtained by simulator, and ideal curves was done to indicate the same trend. Numerical calculations verify that the model is reasonable.

Key words: equivalent circuit; macro-model; nanometer tunneling junction; single-electron transistor

(责任编辑 陈炳权)