

单电子三势垒隧穿结 I-V 特性研究

刘彦欣 王永昌[†] 杜少毅

(西安交通大学理学院 , 西安 710049)

(2003 年 5 月 26 日收到 2003 年 10 月 13 日收到修改稿)

在正统理论的基础上 , 提出了单电子三势垒隧穿结模型的主方程 , 并用线性方程组解法求出了其稳态解 . 通过数值模拟 , 得到了该系统的 I-V 特性曲线 . 发现其有别于双势垒隧穿结的情况 , 在传统库仑台阶的平台处曲线存在波纹状结构 , 分析得出这是由于第二个库仑岛上的电子数变化对 I-V 曲线的影响 . 此外 , 研究了各物理参数对 I-V 曲线的影响 , 发现三结系统可以降低对温度的要求 , 并应用 Fermi 能级处的能级间隔估算出出现库仑台阶现象的最高温度 T_{\max} , 为相关单电子器件的参数选择提供了理论依据 .

关键词 : 正统理论 , 库仑台阶 , 主方程 , 隧穿概率

PACC : 7335C , 7340G

1. 引言

自 20 世纪 90 年代以来 , 单电子隧穿现象和单电子器件就以其广阔的应用前景而成为前沿研究的热点 . 目前已研制出许多器件原型 , 如单电子晶体管^[1-3] 、量子点旋转门^[4] 、单电子泵^[5,6] 、单电子数字逻辑电路以及超大容量信息存储器^[7] . 此外 , 纳米单电子学的进一步应用还包括直流电流标准、温度标准以及红外线辐射探测等^[7] . 由于要求克服热起伏的影响 , 相关实验均在超低温下进行 . 但随着精细加工工艺的进一步发展 , 一些单电子器件已可在室温下实现其功能 . 日本 Matsumoto 等^[8,9] 利用 STM 氧化技术在 Ti 膜上成功地制作出单电子晶体管 , 由于由 TiO_x 绝缘层所包围的中心库仑岛的小尺寸 , 因而其隧道电容可小至 0.1 aF 量级 , 从而保证了其在室温下正常工作 . 最近 , 在 Thelander 等^[10] 的工作中用碳纳米管代替原系统中的金属引线 , 在 200 K 时观测到了库仑台阶现象 , 为提高单电子晶体管的工作温度开辟了又一条新的途径 .

但是 , 包括单电子晶体管在内的理论研究多集中在双势垒隧穿结 (DBTJ) 系统中 . 本文在正统理论^[11,12] 的基础上 , 给出了三势垒隧穿结 (TBTJ) 系统的主方程 . 此方程传统的解法为迭代法^[13] . 本文用线性方程组解法求其稳态解 , 从而得到了 TBTJ 系统的 I-V 特性曲线 , 并讨论了各参数尤其是温度 T 对

该系统 I-V 曲线的影响 , 分析了库仑岛上的电子数 n_1, n_2 对曲线形状的影响 . 应用 Fermi 能级处的能级间隔估算出出现库仑台阶现象的最高温度 T_{\max} , 解释了 TBTJ 系统降低了对温度要求的原因 , 为相关单电子器件的参数选择提供了理论依据 .

2. 理论计算

2.1. 理论模型

与单电子晶体管的情形相同 , TBTJ 系统也是由介观尺度的库仑岛和势垒以及宏观电极组成 . 等效电路如图 1(a) 所示 , R_j, C_j 为结 j 的电阻和电容 ($j = 1, 2, 3$) ; n_i, q_i 为岛 i 的剩余电子数以及极化电荷 ($i = 1, 2$) , 且 $|q_i| < \frac{e}{2}$. 在给定电压 V 的情况下 , 如图 1(b) 所示 , 在某一时刻存在六种可能的隧穿途径 , 表示为 Γ_j^{\pm} , 其中 $+(-)$ 表示隧穿方向与电压下降的方向相同 (相反) , j 表示通过结 j 的隧穿过程 . 在正统理论的假设下 , 该系统的状态仍可用主方程^[12] 进行描述 ,

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(n_1, n_2)}{\partial t} = & P(n_1 - 1, n_2) \Gamma_1^-(n_1 - 1, n_2) \\ & + P(n_1 + 1, n_2) \Gamma_1^+(n_1 + 1, n_2) \\ & + P(n_1, n_2 + 1) \Gamma_2^-(n_1, n_2 + 1) \\ & + P(n_1, n_2 - 1) \Gamma_2^+(n_1, n_2 - 1) \end{aligned}$$

[†] 通讯联系人 . E-mail : ycwang@mail.xjtu.edu.cn

$$\begin{aligned}
& + P(n_1 + 1, n_2 - 1) \Gamma_2^-(n_1 + 1, n_2 - 1) \\
& + P(n_1 - 1, n_2 + 1) \Gamma_2^+(n_1 - 1, n_2 + 1) \\
& - P(n_1, n_2) \Gamma_1^+(n_1, n_2) + \Gamma_1^-(n_1, n_2) \\
& + \Gamma_2^+(n_1, n_2) + \Gamma_2^-(n_1, n_2) \\
& + \Gamma_3^+(n_1, n_2) + \Gamma_3^-(n_1, n_2)], \quad (1)
\end{aligned}$$

式中 $P(n_1, n_2)$ 表示岛 i 电子数为 n_i 的态占据概率; $P(n_1 - 1, n_2) \Gamma_1^-(n_1 - 1, n_2)$ 表示电子通过结 1 的负向隧穿使系统状态由岛 1、岛 2 分别有 $n_1 - 1$ 和 n_2 个电子到岛 1、岛 2 分别有 n_1 和 n_2 个电子的变化速率; $P(n_1, n_2) \Gamma_1^+(n_1, n_2)$ 表示电子通过结 1 的正向隧穿使系统状态由岛 1、岛 2 分别有 n_1 和 n_2 个电子到岛 1、岛 2 分别有 $n_1 - 1$ 和 n_2 个电子的变化速率。同理 (1) 式等号右端其他各项均表示岛 1、岛 2 分别有 n_1 和 n_2 个电子的状态与其邻态间的变化速率。

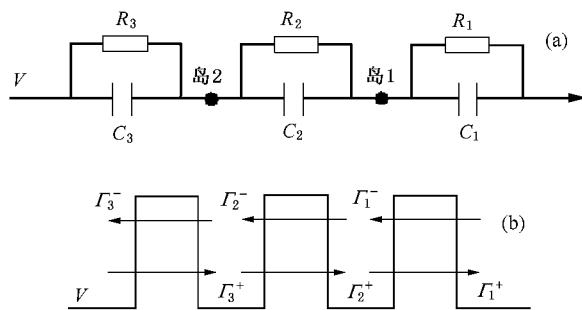


图 1 串联 TBTJ 体系示意图 (a) 为等效电路图 (b) 为电子隧穿势垒示意图

2.2. 计 算

由 Fermi 黄金规则可得电子隧穿概率^[12-14]

$$\Gamma_j^\pm = \frac{\Delta F_j^\pm}{e^2 R_j} \left[\frac{1}{\exp(\Delta F_j^\pm/k_B T) - 1} \right], \quad (2)$$

式中 $\Delta F_j^\pm = F_f - F_i$ 为电子隧穿前后体系的吉布斯自由能的改变量。由热力学可知 $dF = dU - SdT - dW$; U, S, T 分别为系统的静电能、熵和温度; W 为电源做功。在恒温条件下

$$dF = dU - dW. \quad (3)$$

如图 1(a) 所示, 系统的对外总电容等于 C_1, C_2, C_3 的串联电容:

$$\begin{aligned}
C &= \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3} = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_\Sigma}, \\
C_\Sigma &= C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3.
\end{aligned}$$

总的充电电荷 $Q = CV$, C_1 上的充电电荷 $Q_1 = C_1 V_1$, 且 $Q = Q_1$, 所以

$$V_1 = \frac{C_2 C_3}{C_\Sigma} V. \quad (4a)$$

同理,

$$V_2 = \frac{C_1 C_3}{C_\Sigma} V, \quad (4b)$$

$$V_3 = \frac{C_1 C_2}{C_\Sigma} V. \quad (4c)$$

岛 1 的对外电容可视为 C_2, C_3 串联后与 C_1 并联

$$C'_1 = C_1 + \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} = \frac{C_\Sigma}{C_2 + C_3}.$$

同理, 岛 2 的对外电容

$$C'_2 = C_\Sigma (C_1 + C_2).$$

所以, 根据(3)式可得

$$\begin{aligned}
\Delta F_1^\pm &= \pm \frac{e}{C_\Sigma} \left[\left(q_1 - n_1 e \pm \frac{e}{2} \right) \right. \\
&\quad \times (C_2 + C_3) + C_2 C_3 V \left. \right],
\end{aligned}$$

$$\Delta F_2^\pm = \mp \frac{e}{C_\Sigma} \left[\left(q_1 - n_1 e \mp \frac{e}{2} \right) (C_2 + C_3) \right. \quad (5) \\
\left. - \left(q_2 - n_2 e \pm \frac{e}{2} \right) (C_1 + C_2) - C_1 C_2 V \right],$$

$$\begin{aligned}
\Delta F_3^\pm &= \mp \frac{e}{C_\Sigma} \left[\left(q_2 - n_2 e \mp \frac{e}{2} \right) \right. \\
&\quad \times (C_1 + C_2) - C_1 C_2 V \left. \right].
\end{aligned}$$

结合(2)和(5)式可求各种情况下的隧穿概率

Γ_j^\pm 。在稳态情况下, 主方程(1)的左侧 $\frac{\partial P(n_1, n_2)}{\partial t} = 0$, 即

$$\begin{aligned}
0 &= P(n_1 - 1, n_2) \Gamma_1^-(n_1 - 1, n_2) \\
&+ P(n_1 + 1, n_2) \Gamma_1^+(n_1 + 1, n_2) \\
&+ P(n_1, n_2 + 1) \Gamma_2^-(n_1, n_2 + 1) \\
&+ P(n_1, n_2 - 1) \Gamma_2^+(n_1, n_2 - 1) \\
&+ P(n_1 + 1, n_2 - 1) \Gamma_3^-(n_1 + 1, n_2 - 1) \\
&+ P(n_1 - 1, n_2 + 1) \Gamma_3^+(n_1 - 1, n_2 + 1) \\
&- P(n_1, n_2) \Gamma_1^+(n_1, n_2) + \Gamma_1^-(n_1, n_2) \\
&+ \Gamma_2^+(n_1, n_2) + \Gamma_2^-(n_1, n_2) + \Gamma_3^+(n_1, n_2) \\
&+ \Gamma_3^-(n_1, n_2)]. \quad (6)
\end{aligned}$$

令 n_1, n_2 的最大值为 m_1, m_2 , 则当外加恒压源电压 V 非负时, 系统可能存在的状态有 $(m_1 + 1) \times (m_2 + 1)$ 个(为简化讨论起见, 假设 $V = 0$ 时两个岛均无剩余电子, 即 n_1, n_2 的最小值均为零), 依次代入(6)式,

可得($m_1 + 1 \times m_2 + 1$)个方程(当 $n_i < 0$ 或 $n_i > m_i$ 时 $P(n_1, n_2) = 0$).由于归一化条件的存在,使得这些方程中的任意一个与其他方程线性相关.此时归一化条件为

$$\sum_{n_1=0}^{m_1} \sum_{n_2=0}^{m_2} P(n_1, n_2) = 1.$$

于是方程组可解,得到($m_1 + 1 \times m_2 + 1$)个态占据概率 P .稳态下通过体系的总电流应等于每个结的隧穿电流. V 为非负的情况下,各结的隧穿电流等于 n_1 由零到 m_1 , n_2 由零到 m_2 变化时,所有相应隧穿过程贡献的代数和,即

$$\begin{aligned} I &= e \sum_{n_1=0}^{m_1} \sum_{n_2=0}^{m_2} P(n_1, n_2) [\Gamma_1^-(n_1, n_2) - \Gamma_1^+(n_1, n_2)] \\ &= e \sum_{n_1=0}^{m_1} \sum_{n_2=0}^{m_2} P(n_1, n_2) [\Gamma_2^-(n_1, n_2) - \Gamma_2^+(n_1, n_2)] \\ &= e \sum_{n_1=0}^{m_1} \sum_{n_2=0}^{m_2} P(n_1, n_2) [\Gamma_3^-(n_1, n_2) - \Gamma_3^+(n_1, n_2)]. \end{aligned} \quad (7)$$

综上所述,在给定 $T, C_1, C_2, C_3, R_1, R_2, R_3, q_1, q_2$ 以及电压 V 的情况下可求系统电流 I .

3. 模拟结果及分析

由上述方程及计算结果可对系统 $I-V$ 曲线进行

$$n_2 = \text{sgn} \left[\frac{C_1 C_3 V - (q_1 - n_1 e + e/2) (C_2 + C_3) + (q_2 - e/2) (C_1 + C_2)}{(C_1 + C_2)e} \right]. \quad (8)$$

计算可得在 $n_1 = 1$ 的平台上,对应 $n_2 = 1, 2$ 两个值,曲线波纹状结构即由此产生.其他平台上由于 V 值较大, n_2 只有一个对应的值.这一点在图3(a)中表现得更为明显,尤其是在 $C_1 = C_2 = 1 \text{ aF}$ 时.此时,由于 C_1 的增大,使得在相同 V 的变化范围内, n_2 的取值更多,所以在前几个平台内曲线均出现波纹状结构.随着 V 增大, n_2 的取值逐渐减少到一个,曲线波纹状结构消失.但 C_1 的增大使三个隧道结的不对称性($C_3 R_3 \geq C_2 R_2 \geq C_1 R_1$)减弱,平台上波纹状曲线的平均斜率增大,库仑台阶现象削弱.

图3给出了 $C_3 \geq C_2 \geq C_1$ 的前提下各电容的变化对 $I-V$ 曲线的影响.如上所述, C_1 越小库仑台阶

模拟,图2给出了相应各参数下的 $I-V$ 曲线($k_B T = 0.05 \text{ meV}, C_1 = 0.1 \text{ aF}, C_2 = 1 \text{ aF}, C_3 = 2.5 \text{ aF}, R_1 = 1 \text{ M}\Omega, R_2 = 100 R_1, R_3 = 10 R_2, q_1 = 0.2e, q_2 = 0.3e$)(以下文中的模拟若无特殊声明均沿用此参数),该曲线与实验符合得较好^[15].文献[15]中用以形成库

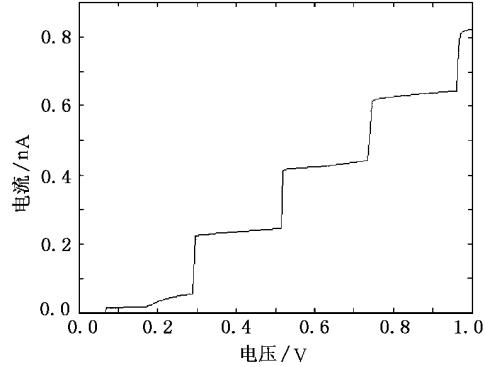


图2 TBTJ系统的 $I-V$ 曲线对应参数

仑岛的是掺杂在 Al_2O_3 薄膜中的Au纳米微粒,存在着多条复杂的隧穿路径,所以得到了不等高不等宽的库仑台阶.我们的模拟结果也出现明显的库仑台阶现象.每一个台阶代表着 n_1 值的一次跃迁,即岛1上增加了一个电子.此外,在 $n_1 = 1$ 的平台上曲线出现波纹状结构,这是因为在 V 较小的情况下, ΔF 中静电能的变化起主要作用, n_2 值的改变也会导致阶跃.令 $\Delta F_2^- = 0$,在给定 n_1 和 V 的情况下可求

现象越明显.因为电压控制 n_1 ,进而控制台阶形状,当 C_1 与 C_2 逐渐接近甚至相等时, n_1, n_2 变化均会影响台阶形状,但 n_1 起主要作用.系统中 C_2 对 $I-V$ 曲线的贡献也很大,当 C_2 增大时曲线形状没有大的变化,但限度(尺寸)按比例缩小. C_3 的影响相对较小.随着 C_3 增大,台阶尺寸在缩小,平台处斜率增大.

图4给出了各隧穿电阻对 $I-V$ 曲线的影响.其中 R_j 的作用与普通欧姆定律中相同,阻碍电流增大.电路的总电阻 R_1, R_2, R_3 的串联电阻, $R = R_1 + R_2 + R_3$, $I-V$ 成正比,比例系数为 R ,这进一步证明了隧穿电阻这一唯象概念引入的正确性.岛上极化电荷的影响在图5中给出.可见 q_1 严重影响着 n_1 突变时的阶跃电压,这一点很容易在(5)式中得到.

令 $\Delta F_1^- = 0$,可得

$$V = -\frac{(q_1 - n_1 e - e/2)(C_2 + C_3)}{C_2 C_3},$$

即为对应 n_1 的阶跃电压.而 q_2 对阶跃电压几乎无影响,但影响着台阶高度,随着 V 的增大,这种影响逐渐减小.

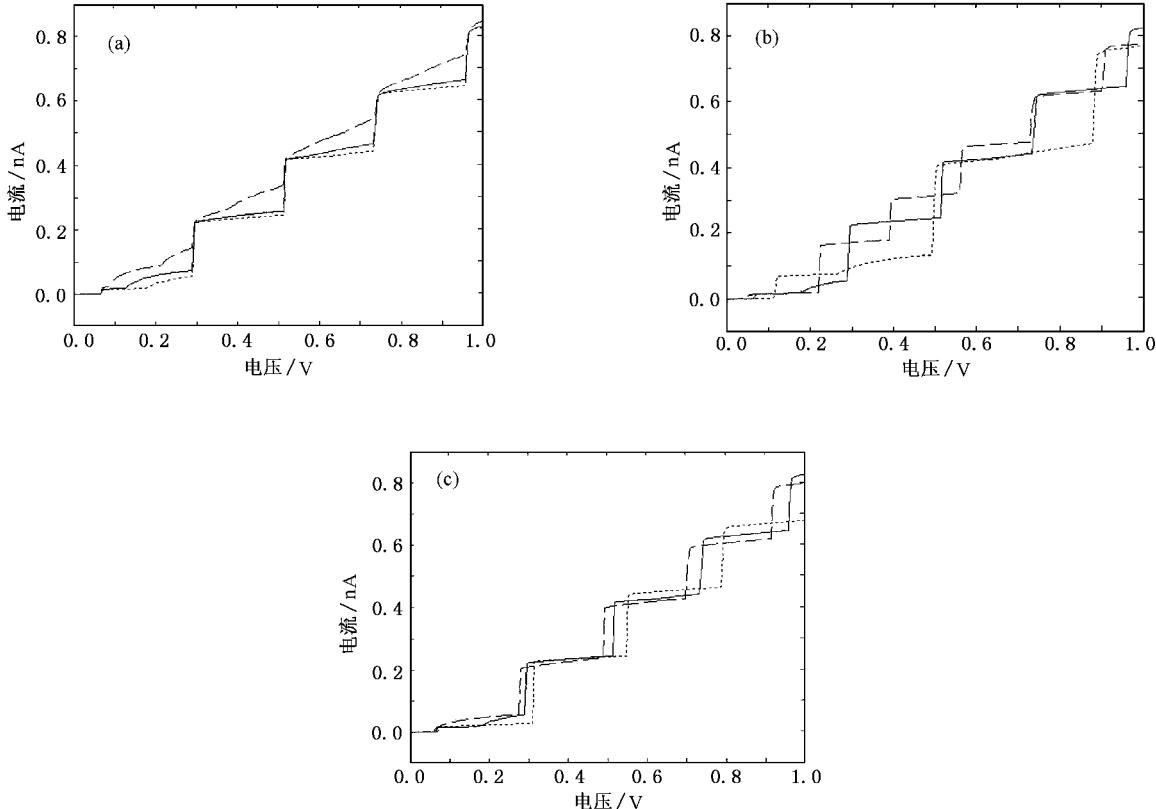


图 3 $I-V$ 曲线随各电容的变化规律 (a) $I-V$ 曲线随 C_1 的变化规律(曲线对应的 C_1 值:虚线 1 aF, 实线 0.2 aF, 点线 0.1 aF) (b) $I-V$ 曲线随 C_2 的变化规律(曲线对应的 C_2 值:虚线 1.5 aF, 实线 1 aF, 点线 0.5 aF) (c) $I-V$ 曲线随 C_3 的变化规律(曲线对应的 C_3 值:虚线 3 aF, 实线 2.5 aF, 点线 2 aF).

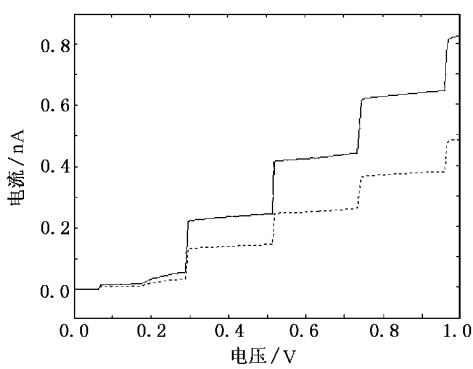


图 4 $I-V$ 曲线随 R 的变化规律 曲线对应的 R 值:实线 $R_1 = 1 \text{ M}\Omega, R_2 = 100 \text{ M}\Omega, R_3 = 10 \text{ M}\Omega$;虚线 $R_1 = 1.2 \text{ M}\Omega, R_2 = 120 \text{ M}\Omega, R_3 = 12 \text{ M}\Omega$

TBTJ 系统最突出的优点在于降低了库仑台阶,出现对温度 T 的要求.在本文给定的参数下,将 T

提高到 100 K,仍可模拟出较好的台阶曲线,如图 6 所示.观测到库仑阻塞及库仑台阶的条件是 $\Delta F \gg k_B T$.

从(5)式中可以看出,由于串联的原因导致岛的对外电容与双结相比有明显减小,从而增大了 ΔF ,降低了系统对 T 的要求.进一步的模拟和研究表明,当 T 进一步增大时,由(2)式可以知道,虽然电子隧穿导致体系自由能增加 $\Delta F > 0$,但是由于温度较高,使得隧穿概率 Γ 不为零,从而使得理论计算中由 $\Delta F \geq 0$ 得到的岛上电子数目的最大值不再合适.这时 ΔF 与 $k_B T$ 的量级已经可比,电子隧穿受到温度的严重影响,正统理论不再成立.在实际的应用中也将由于热起伏的影响使电子隧穿不可控,失去使用价值.

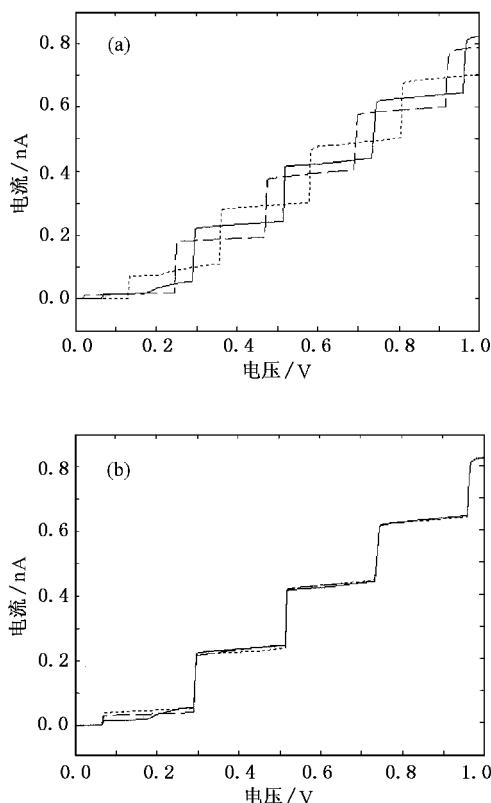


图 5 库仑岛上极化电荷对 $I-V$ 曲线的影响 (a) $I-V$ 曲线随 q_1 变化规律(曲线对应的 q_1 值:虚线 $0.4e$, 实线 $0.2e$, 点线 $-0.1e$) (b) $I-V$ 曲线随 q_2 变化规律(曲线对应的 q_2 值:虚线 0 , 实线 $0.3e$, 点线 $-0.3e$)

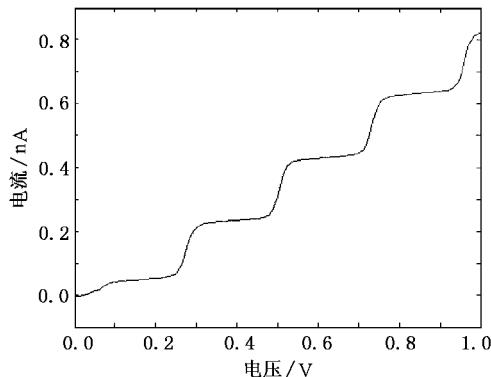


图 6 $T = 100$ K 时的 $I-V$ 曲线

4. 系统对温度 T 的要求

对系统所要求的最高温度 T_{\max} 的进一步讨论将涉及库仑岛上的 Fermi 能级 E_F 处的能级间隔^[16]。为计算简便,假设库仑岛是边长为 L 的正立方体,其

中的电子处于束缚态下,有着分立的能级和相等的能级间隔,其能量本征值

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \\ (n_x, n_y, n_z = 1, 2, 3, \dots).$$

电子气的态密度

$$D(E) = \frac{m^{3/2} L^3}{2^{1/2} \pi^2 \hbar^3} E^{1/2}.$$

电子气的电子总数

$$N = \int_0^{E_F} 2D(E) dE,$$

其中的因子 2 是考虑到电子自旋的影响,使在每一个能级可以容纳两个电子。所以

$$E_F = 3^{2/3} \pi^{4/3} \frac{\hbar^2}{2m} n^{2/3},$$

其中 $n = N/v$ 是单位体积内的自由电子数,则 Fermi 能级处的能级间隔

$$\frac{dE_F}{dN} = \frac{2E_F}{3N}.$$

出现库仑台阶的条件^[14]

$$4k_B T = 2E_F/3N.$$

可得

$$T_{\max} = \frac{E_F}{6k_B N} = \frac{3^{2/3} \pi^{4/3} \hbar^2}{12m k_B v n^{1/3}}. \quad (9)$$

可见库仑岛的体积越小 T_{\max} 越高,不同的材料对应不同的 n 值,也影响着 T_{\max} 。例如,Al 的原子量是 27,密度为 $2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,1 mol Al 所占的体积为 $27/2.7 = 10 \text{ cm}^{-3}$,即每立方厘米有 $6 \times 10^{23}/10$ 个 Al 原子, $3 \times 6 \times 10^{23}/10$ 个自由电子, $n = 1.8 \times 10^{23}$ 。若已知库仑岛的形状和对外电容,可求得岛的体积。假设库仑岛为球形,对外电容

$$C = \epsilon \epsilon_0 A/d,$$

其中 ϵ 是绝缘层的相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, A 是库仑岛的表面积, d 是库仑岛之间以及库仑岛与极板之间的距离,所以表面积

$$A = \frac{dC}{\epsilon \epsilon_0} = 4\pi R^2,$$

半径

$$R = \sqrt{\frac{dC}{4\pi \epsilon \epsilon_0}},$$

体积

$$v = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{dC}{4\pi \epsilon \epsilon_0} \right)^{3/2}.$$

将 A, R, v 代入(9)式,得

$$T_{\max} = \frac{E_F}{6k_B N} = \frac{3^{2/3} \hbar^2 \pi^{11/6} (\epsilon \epsilon_0)^{3/2}}{2m k_B (dC)^{3/2} n^{1/3}}. \quad (10)$$

从(10)式可以看出, T_{\max} 与库仑岛的材料(n)形成势垒的绝缘层(ϵ)以及 d 和 C 均有关系。Matsumoto 等^[9]的工作中使用了 TiO_x 绝缘层, 就是因为其较高的相对介电常数能够提高 T_{\max} 。而 TBTJ 系统中较高的 T_{\max} 是由于电容串联的原因降低了库仑岛的对外电容 C 。

5. 结 论

为简化物理过程, 本文未考虑共同隧穿(cotunneling)以及系统耗散的影响。从已得的结果看出, 由于 TBTJ 系统中存在两个库仑岛, 而两个岛上

的电子数都可以影响库仑台阶。当 C_1, C_2 接近时, 岛 2 上电子数的改变导致库仑台阶的不规则性, 并使台阶处曲线斜率上升, 不利于系统在数字电路等方面的应用。为此可以减小 C_1 , 从而减小其与 C_2 的比值, 此时其库仑台阶更趋近于 DBTJ 系统, 加强系统稳定性。此外, TBTJ 系统相对于研究较多的双结系统的优越性也十分明显, 尤其在对温度的要求方面。由以上的推导可以看出, 采用自由电子密度较小的材料形成库仑岛, 用相对介电常数较高的材料作为提供势垒的绝缘层, 减小绝缘层厚度或直接减小库仑岛的尺寸都可以提高 T_{\max} 。在制作工艺可行的情况下可以采用串联更多电容的办法, 即在多结情况下进一步降低系统对 T 的要求, 从而使得单电子器件可以在室温下得到应用。

-
- [1] Likharev K K 1987 *IEEE Trans. Magn.* **23** 1142
 [2] Kastner M A 1992 *Rev. Mod. Phys.* **64** 849
 [3] 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]
 [4] Geerligs L J, Anderegg V G, Holweg P A M *et al* 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 2691
 [5] Pothier H, Lafarge P, Orfila P F *et al* 1991 *Physica B* **169** 1598
 [6] 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]
 [7] Likharev K K 1999 *Proc. IEEE* **87** 606
 [8] Matsumoto K, Ishii M, Segawa K *et al* 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 34
 [9] Matsumoto K, Takahashi S, Ishii M 1995 *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** 1387
 [10] Thelander C, Magnusson M H, Deppert K *et al* 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2106
 [11] Averin D V, Likharev K K 1986 *J. Low. Temp.* **62** 345
 [12] Wasshuber C 2001 *Computational Single-Electronics* (New York: Springer) p9
 [13] Amman M, Wilkins R, Ben-Jacob E *et al* 1991 *Phys. Rev. B* **43** 1146
 [14] Hanna A E, Tinkham M 1991 *Phys. Rev. B* **44** 5919
 [15] Bar-Sadeh E, Goldstein Y, Zhang C *et al* 1994 *Phys. Rev. B* **50** 8961
 [16] Tinkham M 1996 *Am. J. Phys.* **64** 343

The study of I - V characteristics of single-electron triple-barrier tunnel-junction

Liu Yan-Xin Wang Yong-Chang Du Shao-Yi

(School of Science , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049 , China)

(Received 26 May 2003 ; revised manuscript received 13 October 2003)

Abstract

The master equation of the single-electron triple-barrier tunnel-junction (TBTJ) model is developed based on the orthodox theory. The steady distribution of electrons on the Coulomb islands is obtained with the linear system of equations method and the I - V curves through the simulation method are presented in this paper. Discontinuities of the slope of the curve at the flat-form of Coulomb staircase compared to double barrier tunnel-junction system, which is caused by the change of the electron numbers on the second Coulomb island, are found. The system temperature requirement can be reduced in the TBTJ system, and the maximum temperature at which Coulomb staircase can be resolved is estimated using the energy spacing at the Fermi energy.

Keywords : orthodox theory , Coulomb staircase , master equation , tunneling rate

PACC : 7335C , 7340G