

获准建成,必将在我国科学园地的建设中,开放出更为鲜艳夺目的花朵。

致谢 感谢吴自勤教授的鼓励和支持.梁岫茹、姜晓明对本文提出了中肯的意见,本人在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 第一次两岸同步辐射学术研讨会.论文集,北京,(1993).
- [2] A Brochure, The Advanced Light Source, 3 (1991); 3(1994).
- [3] David Attwood, Challenges for Utilization of The New Synchrotron Facilities Nucl Instr and Meth., A291 (1990).

单电子效应与单电子晶体管¹⁾

夏 建 白

(中国科学院半导体研究所,半导体超晶格国家重点实验室,北京 100083)

摘要 由于半导体超微细加工技术的发展,在半径为几百nm的量子点结构上观察到了由单个电子的阻塞和隧穿引起的电流振荡,分别称为库仑阻塞、单电子隧穿和库仑振荡.与此效应有关的现象还有库仑台阶、旋转门效应.旋转门器件可利用作为电流标准测量,单电子晶体管将是下世纪大容量存储器的最好选择.单电子效应的研究将开辟一门新的“人造原子物理学”。

关键词 库仑阻塞,单电荷隧穿,库仑振荡,库仑台阶,旋转门效应,单电子晶体管

Abstract Due to the development of the semiconductor ultra-micro fabrication technique it is possible to observe the current oscillation caused by the blockade and the tunneling of a single electron on the quantum dot structure with a radius of several hundred nanometers, which are called Coulomb oscillation, Coulomb blockade and single charge tunneling, respectively. The phenomena associated with these effects also consist of Coulomb staircase, turnstile effect, etc. The turnstile device can be used as a quantum standard for current. The single electron transistor will be the best choice for the memory of the ultra-large capacity for the next century. The research of the single electron effect will open a new field of “artificial atomic physics”.

Key words Coulomb blockade, single charge tunneling, Coulomb oscillation, Coulomb staircase, turnstile effect, single electron transistor

本世纪初(1909年),物理学家密立根(Robert Millikan)做了著名的油滴实验,发现被打碎的微小油滴上带的电量总是一个基本电量的整数倍,于是就推论出带基本电量的粒子就是电子: $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$.当时密立根曾经为不能控制油滴上所带的电子数而烦恼,但是今天微细加工技术的发展使得能够制造小尺寸(<100nm)的固体结构,在这种结构里通过改变电压的方法能操纵电子一个一个地运

动,这就是单电子效应.有关这方面的情况还可参阅本刊的文章^[1].

1989年,Scott-Thomas等人^[2]在Si反型层上用狭缝电极做了一个窄的电子通道,宽度约30nm,长度为1—10 μm .他们在0.4K温度下发现通道的电导随电极电压作周期性的振荡,并且在振荡周期与通道长度之间没有发现

1) 1994年8月17日收到初稿,1994年9月15日收到修改稿。

任何的关联。关于窄通道的电导以前已经有许多人研究过,发现当通道的长度小于电子平均自由程时,电导按 $2e^2/h \approx 8 \times 10^{-5} \Omega^{-1}$ 量子化变化。而 Scott-Thomas 实验是在电导远小于 $2e^2/h$ 的情况下得到的 ($G \sim 5 \times 10^{-6} \Omega^{-1}$)。当时提出了一个理论模型^[3],这个模型认为,在窄通道里由两个杂质原子所限制的区域内包含了整数个电子,而电导的振荡是由电子逐个进出该区域所造成的。

假设窄通道区域两端有两个势垒(由杂质形成或人为制造),区域(以下称“点”)中约束有 N 个电子,在两端不加偏压时,平衡的势能图如图 1(a) 所示。在绝对零度下,点中 N 个电子的基态能量为单粒子能量 E_p 之和加上静电能,即

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

其中 C_g 是点与某一电极 g 之间的电容, C 是

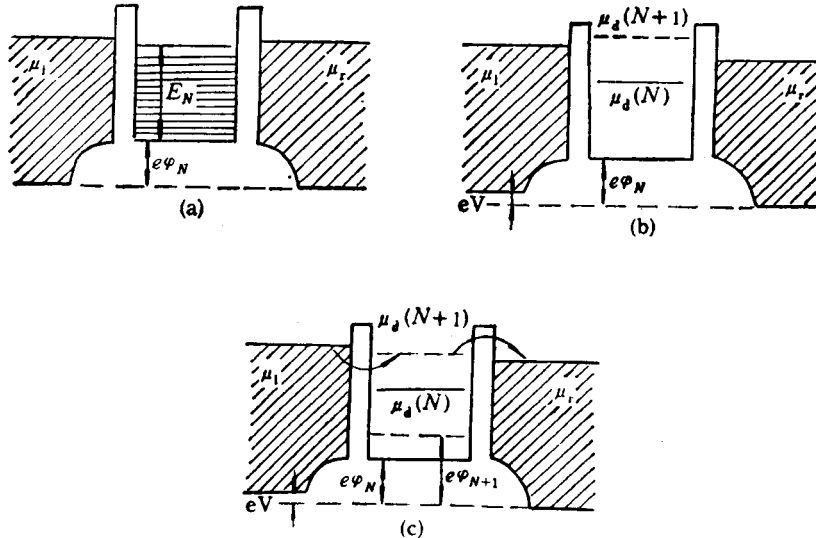


图 1 窄通道结构的势能图

(μ_l 和 μ_r 是左、右两电子库的电化学势, V 是偏压, φ_N 是 N 个电子的静电势, E_N 是点中第 N 个电子的能级)
(a) 平衡 [$\mu_l = \mu_r$]; (b) 库仑阻塞 [$\mu_d(N) < \mu_r < \mu_l < \mu_d(N+1)$]; (c) 单电子隧穿 [$\mu_r < \mu_d(N+1) < \mu_l$]

点与所有电极的电容之和。定义电化学势 $\mu_d(N)$ 为将第 N 个电子加到点上所需要的能量,即

$$\begin{aligned} \mu_d(N) &= U(N) - U(N-1) \\ &= E_N + \frac{\left(N - \frac{1}{2}\right) e^2}{C} - e \frac{C_g}{C} V_g. \end{aligned} \quad (2)$$

因此第 $N+1$ 个和第 N 个电子的化学势之差为

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

化学势之差包括两部分: 第一是单粒子能量之差, 第二是静电势 e^2/C 。可以证明第二部分远大于第一部分。假设点的半径 $R = 300\text{nm}$, 它

的形状是圆盘, 则它的自电容为

$$C_0 = 8\epsilon_r \epsilon_0 R = 2.8 \times 10^{-16} \text{F}, \quad (4)$$

对 GaAs, $\epsilon_r = 13$, 得出静电能量 $e^2/C_0 = 0.6 \text{meV}$ 。而二维电子气的密度 n 为 $1.9 \times 10^{15} \text{m}^{-2}$, 因此在点中平均电子数 N 为 500, 费米能量为

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m^*} (2\pi n) = 6.8 \text{meV}, \quad (5)$$

对 GaAs, $m^* = 0.067m_0$, 得出能级间距

$$E_{N+1} - E_N = \frac{2E_F}{N} = 0.025 \text{meV}, \quad (6)$$

它远小于静电能。

在外加偏压 V 下, 点的电势有如图 1(b), (c) 两种情形。第一种情形[图 1(b)]为

$$\mu_d(N) < \mu_r < \mu_l < \mu_d(N+1),$$

这时不能再加第 $N+1$ 个电子到点中, 电子输

运被禁止,称为库仑阻塞 (coulomb blockade). 如果改变电极电压,达到第二种情形[图 1(c)]即 $\mu_l > \mu_d(N+1) > \mu_r$,这时电子可以从左边库进入点中,然后再出来到右边库,如图中箭头所示,形成电流,这称为单电荷隧穿 (single charge tunneling). 由(2)式可见,如果增加栅压 V_g ,则 $\mu_d(N)$ 就要减小,由图 1(b)变为图 1(c),也就是由库仑阻塞变成单电荷隧穿. 再继续增加 V_g ,则又由图 1(c)变为图 1(b),只不过 $\mu_d(N)$ 变成 $\mu_d(N+1)$, $\mu_d(N+1)$ 变成 $\mu_d(N+2)$,又重新回到库仑阻塞状态. 如此反复,得到电导随栅压增加而振荡,称为库仑振荡 (coulomb oscillation).

图 2 为通道结构中栅极排列的扫描电子显微镜示意图.

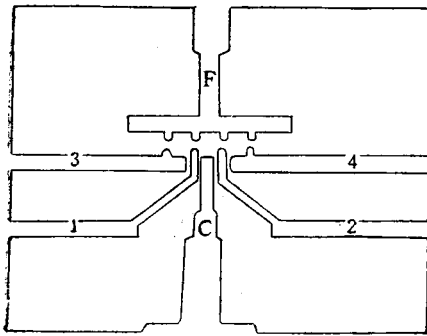


图 2 通道结构中栅极排列的扫描电子显微镜图 (栅极 F 与 C 之间距离为 $1\mu\text{m}$)

图 3 就是 Kouwenhoven 等人^[4]用图 2 所示的通道结构测到的电导随栅极电压 V_c 的变化. 在图 2 的结构中,由于加在栅极 F, C 和 1, 2 等上的负偏压,在电极下面的电子被耗尽,于是在电极 F 与 1, C, 2 之间形成一个窄的电子通道, 1-F 和 2-F 是电子势垒,电子被约束在 F, C, 1, 2 包围的区域中. 由图 3 可见,电导振荡的周期是 $\Delta V_c = 8.3\text{mV}$. 由(2)式,在振荡一个周期前后,要求 $\mu_d(N, V_g) = \mu_d(N+1, V_g + \Delta V_g)$,得到

$$\Delta V_g = \frac{C}{C_g} \left(\frac{E_{N+1} - E_N}{e} \right) + \frac{e}{C_r}. \quad (7)$$

由于 $E_{N+1} - E_N \ll e^2/C_g$,因此 $\Delta V_g = \frac{e}{C_g}$.

由 $\Delta V_c = 8.3\text{mV}$,就得到 $C_g = 0.19 \times 10^{-16}\text{F}$. 除了栅极 C 对电容的贡献外,还有栅极 F, 1, 2, 3, 4. 保持其他栅极电压不变,只改变其中一个栅极的电压,也可以得到电导振荡,由振荡周期得出每个栅极与点之间的电容. 总电容是所有栅极-点电容之和,实验得出约为 $1.7 \times 10^{-16}\text{F}$,与前面估计的点的自电容基本一致. 因此反过来又证实了电导振荡确实是单电子效应.

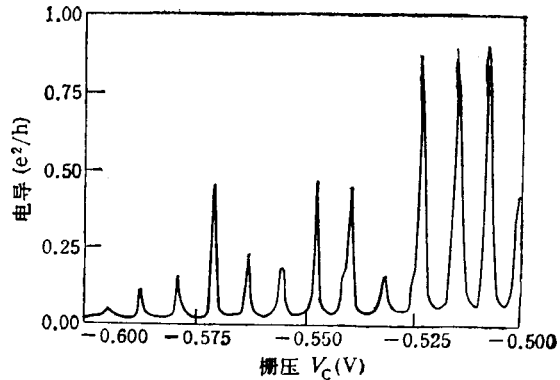


图 3 点的电导随中心栅极电压 V_c 的变化——库仑振荡^[4]

在图 1(c) 的情况下,左、右两个库的电势差 $eV = \mu_l - \mu_r$ 中间包含了一个电荷态,因此打开了一个电子通道. 如果进一步增加两个库之间的偏压 eV ,使其可以包含两个电荷态,这时又打开了第二个电子的通道. 因此,在 $I-V$ 特性曲线上,随着 V 的增加, I 将以台阶式增加,每一个台阶对应增加一个电子输运,台阶之间的间隔为 $\Delta V = e/C$. 这称为库仑台阶. 图 4 就是测得的库仑台阶,不同的曲线对应于不同的 C 极电压,为了清楚起见,各曲线之间错

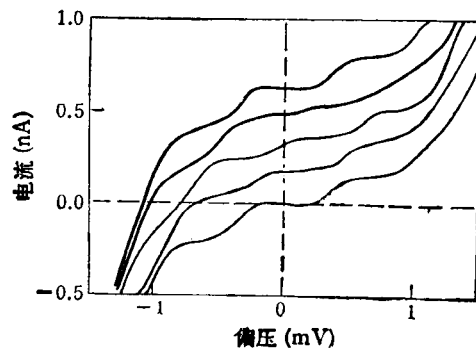


图 4 不同中心栅压下的 $I-V$ 特性曲线——库仑台阶^[4]

开了一段距离。由图上得出 $\Delta V \approx 0.67\text{mV}$, $\Delta I \approx 0.2\text{nA}$ 。由 $\Delta V = e/C$ 估计出点的总电容 $C = 2.4 \times 10^{-16}\text{F}$ 。由 $\Delta I = eG/C$ 估计出隧穿电导 $G \approx (4\text{M}\Omega)^{-1}$ 和隧穿时间 $C/G \approx 10^{-9}\text{s}$ 。

当在两个势垒电极(图 2 的 1 和 2)上加一个位相差 π 的交变电压时(频率 $f = 10\text{MHz}$),在电压变化的一个周期内,点的电势图如图 5(a)~(d) 所示。图中的实线箭头表示允许电子运动,虚线箭头表示禁止电子运动,从图

中可以直观地看出,在电压变化的一个周期内,正好允许一个电子通过。交变电压的频率是 f ,因此电流 $I = ef$ 。如果增加左右库之间的偏压 V ,使得在电压变化的一个周期内可以通过 n 个电子,则电流为 $I = nef$ 。在 $I-V$ 特性曲线上,同样出现库仑台阶,平均电导 $\langle G \rangle = ef/(e/C) = fC$,与频率 f 成正比。图 6 就是不同频率的射频电压下测得的库仑台阶^[5],证实了 $\langle G \rangle = fC$ 。由图 6 可见,电流标度为 pA ,远小于稳态下库仑台阶的电流 nA (图 4)。这

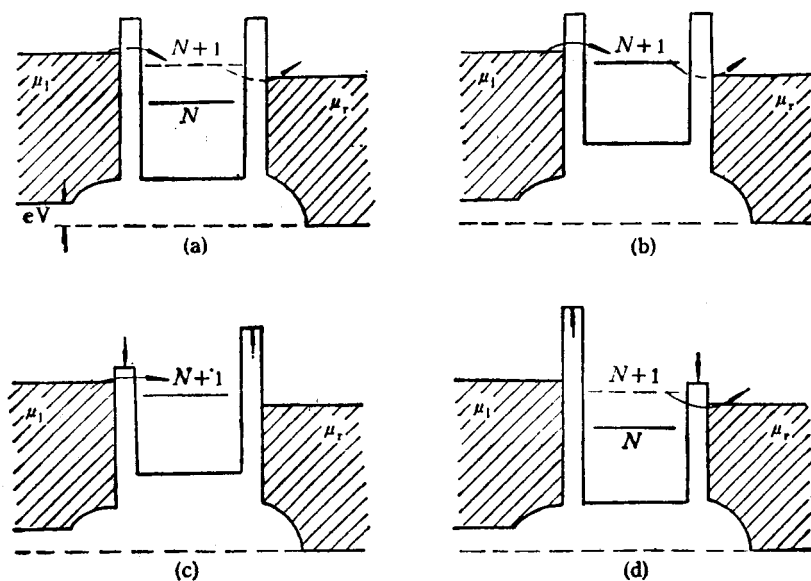


图 5 射频电压的一个周期内点的电势变化(图中符号与图 1 相同)

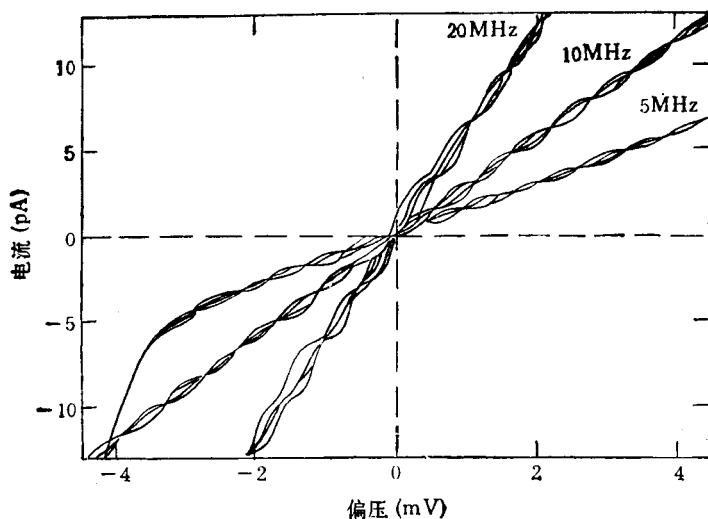


图 6 频率 $f = 5, 10$ 和 20MHz 的射频电压下的 $I-V$ 特性曲线^[5]

现象称为旋转门效应 (turnstile effect), 表示它类似于大饭店的旋转门, 每转一圈只允许一个人通过。

正如量子霍耳效应可以用来确定电阻标准, 约瑟夫森效应可以用来确定电压标准一样, 量子点的旋转门效应也可以用来确定电流标准。理论预言精确度可达到 10^{-8} , 但是目前只达到 10^{-4} 。提高精确度的关键就是要求在库仑阻塞时, 隧穿几率几乎为零。实际上左右两个势垒 1 和 2 有一定厚度, 在库仑阻塞时总有一定的隧穿几率, 也就是有一个泄漏电阻 R 。泄漏几率 $P = 1 - \exp[-(1/f)/RC] \approx (1/f)/RC$, 仅与泄漏电阻线性地成反比。对于 $f = 10$ MHz, $C = 10^{-16}$ F, 如果要达到精确度 $\delta I/ej \approx 10^{-8}$, 则要求泄漏电阻为 $10^{15} \Omega$ 。另一个困难就是 $ej = 1.6$ pA, 对实际应用来说是太小了, 需要将许多量子点结构并联起来, 这又增加了复杂性。

单电子效应的一个最有希望也是最有前途的应用就是单电子晶体管, 它可用作超大容量的存储器。目前 4 兆位的 DRAM, 在每一位中积累了约 50 万个电子的电荷。为了降低功耗, 增大存储量, 有效的方法是减少每一位中存储的电荷量。如果要做成 16 千兆位的存储器, 则要求每一位积累的电子数降到 100 以下, 因此单电子晶体管将是下世纪大容量存储器的最好选择。目前国际上各研究所正在加紧研制, 并已有所报道。目前器件应用的一个最大困难是要在超低温 (< 1 K) 下工作, 本文报道的实验是在 0.01 K 下进行的。从(3)式和(4)式可以看到, 增加一个电子的化学势差约为 0.6 meV, 相当于热运动温度 $T \approx 7$ K。为了得到单电子

效应, 要求 $e^2/C \gg k_B T$, 这样不至于被电子的热运动所淹没。为了克服这一困难, 需要减小量子点的尺寸, 减少其中所容纳的电子数。如果能将容纳的电子数从目前的 500 个减少到几十个, 则将大大提高工作温度, 这就要求微细加工技术的进一步改进。

从基础研究的角度, 单电子效应也提出了一个很有意义的课题。目前量子点中容纳的电子数较多, 我们仍当它是一个电子气系统。前面所介绍的理论分析^[2]基本上是一种半经典的分析, 加一个额外电子的所有效应可以被吸收到一个简单的电容参量中。这是电场作用在一个自由电子气上被屏蔽的结果, 电场不能穿透入电子气, 附加电子不能改变电子的位形, 所以一个简单的静电项就能描述能量的变化。但是如果点中的电子数减少到十几个或者几个, 则屏蔽不再存在, 系统更像一个“原子”。这种原子的能级作为电子数的函数只可能由量子力学的计算得到, 同时也可以实验上用改变栅极电压的方法加以研究。这就开辟了一门新的学科——“人造原子物理学”。这种人造原子的维数是准二维的, 原子中的约束势近似是抛物线型的, 而不是通常原子中的 $1/r$ 核心势, 原子中的电子数可以人为地控制。

参 考 文 献

- [1] 郑厚植, 物理, 11(1992), 646.
- [2] J. H. F. Scott-Thomas et al., *Phys. Rev. Lett.*, 62 (1989), 583.
- [3] K. K. Likharev, *IBM J. Res. Dev.*, 32 (1988), 144.
- [4] L. P. Kouwenhoven et al., *Z. Phys. B*, 85(1991), 367.
- [5] L. P. Kouwenhoven et al., *Z. Phys. B*, 85(1991), 381.