



库仑阻塞、单电子相关隧穿 与单电子晶体管

蒋 平

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室)

越来越多人相信，发展新一代在原理上

全新的电子器件是下一世纪电子工业的希望所在。在这一方面，近年来已有一个又一个的量子器件原型见诸报道；还有更多的设想和建议不断被提出来，引起人们浓厚的兴趣。现在，又有一种新型小尺寸器件——单电子晶体管在向我们招手。根据这种器件的发展前景，有人甚至提出了单电子学这一崭新的学科。

单电子晶体管是与库仑阻塞这一著名的物理现象联系在一起的。

库仑阻塞与单电子隧穿

根据量子力学的理论，电子有一定的几率可以穿越高度超过自身能量的势垒区——量子隧道穿透效应。根据这一效应已发展出不少新型量子器件，例如人们熟知的共振隧穿二极管和双极晶体管。单电子晶体管则是另一种与隧穿现象有关的电子器件。

设想一个由两块金属极板夹以介质形成的平板电容器这一相当简单的结构。对于电子来说，介质就是势垒区。如果介质层足够薄，负极板上的电子可以隧穿电容器而形成通过这一结构的电流。我们称这种电容器为隧道结。显然，通过隧道结的电流不是通常所说的位移电流，而确实是由电荷——电子穿越电容器所占有的空间而形成的电流。不过，这种隧穿是否能发生还同电容器极板上所积累的电荷量有关。

设电容器极板上的电量分别为 Q 与 $(-Q)$ ，相应的静电能为 $Q^2/2C$ 。如果此时有一电子携带电荷 $(-e)$ 从负极隧穿至正极而使电荷 Q 变为 $Q + (-e)$ ，静电能便变为 $(Q - e)^2/2C$ ；也就是说隧穿事件导致能量变化 $\Delta E = (Q - e)^2/2C - Q^2/2C = (Q - e/2)/C$ 。一个实际的事件往往朝着能量下降的方向进行，就是说要求 ΔE 大于零。于是这一简单的计算表明，如果正极板上的电荷小于 $e/2$ ，也就是隧道结上的电压小于 $e/2C$ 时将不可能有电子从负极隧穿到正极板。这就是所谓的库仑阻塞效应。

上面的介绍隐含着这样一个命题：电容器极板上的电荷可以小于基本电荷 e 。这似乎是难以想象的，因为我们已习惯于认为如果在导体中存在电流，必然

意味着传导电流的电子在其中一个一个地象质点一样地运动。也就是说我们实际上是认为导体中的电流是分立取值的。如果我们针对导体的某一截面来测量电流，用单位时间通过的电荷量——这种电荷可称之为传输电荷——来表示电流的数值，则这一数值必然是基本电荷 e 的整数倍。这也就是说传输电荷的数值是分立的。但是，如果我们重新考察上述这一极简单的现象就会得出完全不同的另一幅物理图象。

实际上传输电荷的大小取决于所有传导电流的电子在导体内相对于固定的晶格离子的位移之和。由于每个电子相对于晶格的位移是连续的，可以取任意小的绝对值，它们的和，因而传输电荷的数值也就是连续的。这就意味着导体中的电流真的象水流一样是连续的。根据这一观点，电容器极板上的电荷就是接近极板表面的电子相对于其平衡位置产生位移的结果。于是，当电源对电容器充电时，就象导体中的电流是连续的一样，极板上的电荷量也是连续的，因此具有小于基本电荷的分数值也就不奇怪了。

现在我们设想一个用电流源连接隧道结的实验(见图1)，电流源对器件提供恒定的电流 I 。假设在初始状态结的两个金属极板上并无电荷，相应的电容器上的电压为零。当电流源以电流 I 对极板充电时，板上电荷增加，极板间的电压也相应增加。当正极上的电荷达到 $e/2$ ，即电压增至 $e/2C$ 时才能发生一个电子从负极板向正极板的隧穿，使正极电荷变为 $(-e/2)$ ，电压也降为 $(-e/2C)$ 。不难看出，此时电场阻止下一个电子的隧穿——库仑阻塞。电流源继续对电容器 C 充电使极板电荷与电容器上的电压再度升至 $e/2$ 与 $(e/2C)$ ，第二个电子得以穿过隧道结。只要电流源继续工作，这一循

环将周而复始，造成极板电荷、电压的周期性振荡。显然振荡的频率就是 I/e 。这种振荡常称之为单电子隧穿 (SET) 振荡。

上面的分析使我们看出电子

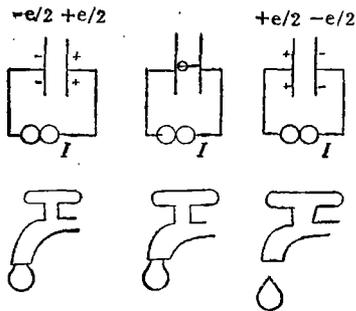


图 1

隧穿之间存在时间上的相关性，一个电子隧穿之后必须等待 \hbar/I 的时间后才能发生第二个电子的隧穿。另一方面还看到在整个过程中电荷在导线中的连续流动与隧道结中电子的分立隧穿共存。使人十分惊异的是这样一个看上去并不奇怪的现象却是直到八十年代中期才引起人们的注意。而恰恰是从这一认识出发，促成了单电子隧穿理论的建立和发展，并且在这种理论的指导下发现了一系列新的效应，成为单电子学的理论和实验基础。

其实，在我们所熟悉的宏观世界里，这类连续与分立现象共存的例子并不难找到，关不紧而有点漏水的水龙头就是一个典型。虽然龙头口水一滴滴“分立”地往下掉，水管内的水却是不停地连续地在缓慢流动。一滴水掉下去后，水又会在管口重新积聚起来，直到积累至一定大小后再突然掉下去。不过这里分立过程的数量——水滴的重量并不一定完全一致，而在单电子隧穿的分立过程中每次隧穿的电量却是严格相同的，都是一个电子(见图 1)。

要观察单电子隧穿现象，在实验上必须具备一定的条件，即热起伏的影响要能忽略不计，这就要求 $kT \ll e^2/2C$ ，否则库仑阻塞与单电子隧穿都将被完全掩盖而观察不到。设想一面积为 $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ 的结， $e^2/2C$ 在 10^{-9} eV 的数量级，在室温时热能 kT 高达 0.026 eV ，远远超过隧穿引起的能量变化。但是如果结面积降至 $0.01 \mu\text{m}^2$ ，即结的线度降至 100 纳米量级，则在 1K 温度能满足 $kT \ll e^2/2C$ 的要求。如果电容 C 进一步减小就可能在更高温度满足这一条件。目前已能用扫描隧道显微镜 (STM) 在室温下观察库仑阻塞与单电子隧穿现象，而电容器的一个极板正是 STM 的针尖。

单电子晶体管

然而，除此而外，还有一个妨碍对单个隧道结作实验观测的因素必须考虑，这就是电流引线的杂散电容 C_L 。通常 C_L 要比结电容 C 大得多，完全破坏了要研究的单电子隧穿现象。为了克服这一困难，通常都采

用多结结构，例如把许多隧道结串联成一串形成一维阵列，并与电压源相连接。这样各个单结之间互相保护从而避免了外界的影响。

图 2 的两根曲线就是对一个由二十五个单结串成的阵列的实验结果。其中一根曲线清楚地表示在低电压下完全没有电流，显然这就是库仑阻塞效应。另一根曲线则是用微波照射体系的结果。在这种情形，库仑阻塞不复存在，但直流电流随电压的变化关系呈阶梯状结构，梯级的高度恰好等于微波频率和电子电荷的乘积。

最简单的多结结构就是由两个单结相串联并与电压源相连的体系。通常将两个结相连的部分称作“岛”。在这一结构中如果有一个电子隧穿第一个结到达岛后岛上马上便会有一个电子隧穿第二个结形成电流。也就是说两个结之间的隧穿是彼此相关的。而且，简单的计算表明，岛上积累的电荷的数量决定电子的隧穿过程能否发生。当加在这一器件上的电压低于某一阈值时，如岛上的电荷接近于零或电子电荷的整数倍，体系处于库仑阻塞状态，没有电子隧穿，因而没有电流通过。但是如果岛上电荷为半个电子电荷的奇数倍(如 $0.5e$ ， $-0.5e$ ， $1.5e$ 或 $-1.5e$ 等)，则库仑阻塞效应被完全抑制，于是即使在很小的外加电压下电子也能隧穿整个结构形成电流。这样，我们便可采用向岛上注入电荷以改变岛上电量的办法来控制通过器件的电流。因此这一双结器件又叫做单电子晶体管。对于单电子晶体管，只要岛上的电流改变半个电子电荷就能开关每秒 10^9 个电子量级的电流。显然在这种单电子晶体管中用来控制电流的信号要比常规半导体晶体管灵敏得多。

关于单电子晶体管的出现还有一段值得一提的故事。前苏联的学者在开创单电子隧穿的研究，特别是理论研究方面作出了不可磨灭的贡献。同样，在实验研究方面也做出了许多杰出的工作。单电子晶体管的设想一提出来，他们就对之进行了实验研究；在 1987 年 1 月 6 日首次观察到前述的隧道结之间的相关隧穿现象，并于同年 3 月 6 日正式投稿前苏联的《理论与实验物理通讯》报道了他们的结果。有趣的是，也就在这同一天，美国的《物理评论通讯》也收到了美国贝尔电话公司的两位作者关于同一题材的实验研究论文。这两项独立的工作标志着单电子学实验研究的开始。然而后来美国研究者的论文经常被引用而前苏联研究者的论文却不大有提及。

应用前景

近几年来，人们已设计出多种型号的单电子晶体管和许多单电子学的线路单元。例如由两个双结串成的所谓“电子转门”，与电压源相连。当对两个双结连接处的公共岛施以频率为 f 的交变电压时就能得到数值为 ef 的电流，犹如公共岛上的电压每“旋转”一周

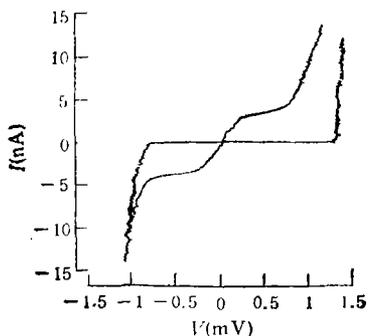


图 2

· 科学书店 ·

编者按：地址在北京朝内大街 135 号的《科学书店》，又向广大读者推出一批由科学出版社出版的物理新作，希望欲购者联系购买（电话：4017892，邮编：100704）。

一 实用类型程序设计 屈延文、邱续欣著

本书详细讨论了面向软件重用与软件自动生成的实用规模软件开发的新技术——类型程序设计方法学。围绕这一主题，本书还讨论了类型程序设计的基本实施原则，这些原则包括：按类型划分模块，类型是由其构造函数（也称构子）唯一确定的，类型中的其他函数的定义是向类型构造函数的归约，系统设计就是类型构造（自下而上）与类型分解（自上而下），类型表达式的处理是软件重用与软件自动生成的基本方法以及应用的开发就是类型的开发等主要原则。配备了大量的 VAXC 语言的实例程序及程序设计习题。

读者对象：计算机软件专业大学生、研究生、工程技术人员（定价：32.20 元）

就转出一个电子一般。也有人提出采用单电子晶体管能象半导体场效应晶体管一样作为基本有源器件用于数字电路和用作存储元件。也还有人建议用单个电子隧穿结时在电极中形成的电流脉冲来加工信息。凡此种种，预示着这一新型的器件具有远大的发展和应用前景。仅从近期的发展来看，以下几方面的应用已是可以看到的。

首先，可以利用前面介绍的微波照射隧道结的直流 $I-V$ 曲线上的阶梯作为测量弱电流的标准，其精度可达 10^{-9} ，比现有的设备高一千倍。而且，如果这种新的电流标准同确定电压标准的约瑟夫森效应及建立电阻标准的量子霍尔效应结合起来，就能使所谓的量子计量三角形（见图 3）封闭起来。如果发现这一三角

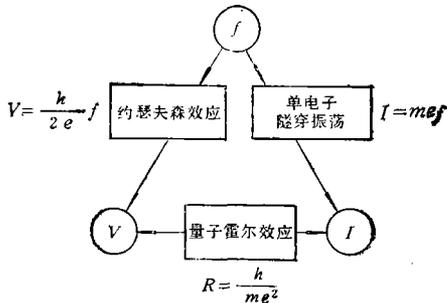


图 3

形封闭不了，就会意味着图中标出的描述三种效应的基本关系式中至少有一个出了毛病。

二 汉英机电工程技术词汇 朱景梓、丁志华编

本书收集了机械学、机器制造工艺学、动力、建筑、采矿、农业等机械及电机、电力工程、仪表、自动控制、电子、无线电技术、计算机技术、信息工程和现代化新技术等方面术语，还收入少量数学、物理学方面的常用术语，共 5 万余条。全书词目均按汉语拼音音序排列，并逐字标注汉语拼音和声调。

读者对象：机电专业翻译工作者，专业英语教师，学习专业英语的读者

三 电磁理论 (美) J. A. 斯特莱顿著 方能航译

本书是一本电磁理论方面的经典著作。书中对宏观电磁理论进行了全面和系统的论述，重点是交变电磁场、电磁波的辐射与传播。本书以麦克斯韦方程为出发点指导读者如何应用它解决各种电磁问题，因此也可称之为应用麦克斯韦方程的手册。

全书共分九章。主要内容包括：场方程；应力与能量；静电场；静磁场；无限、均媒质中的平面波；柱面波；球面波；辐射；边值问题。

读者对象：天线、微波、电波传播、雷达、通信等科研人员和工程技术人员，大专院校有关专业的教师、研究生和大学生（定价：28.00 元）

其次，可以利用单电子晶体管对于岛上电荷极为敏感的特点来制造超灵敏静电计，能用来测量小到万分之一电子电荷的电量，这要比目前的商用静电计的分辨率高一百万倍。

当然，最诱人的应用前景还是在微电子学方面。众所周知，虽然目前计算机芯片的集成度已可高达每平方厘米一千万个元件的水平，却仍然不能满足大家的需要。但是对于这么高的集成度，常规半导体器件已趋向其经典极限，而单电子晶体管有可能进一步提高集成度。这就是本文一开始就提到的人们寄希望于原理上完全不同于常规器件的新一代电子器件的原因。仅就目前已达到的工艺水平看，采用单电子晶体管，原则上集成度可以做到每平方厘米百亿逻辑门级，因为每个隧道结的尺寸可降至 10 纳米左右。无疑，当我们沿着这一方向前进时，还有许多理论和实验方面的工作要做。例如当元件尺度在纳米量级时，电子的量子力学性质必然要表现出来，我们就必须研究量子效应的影响。目前，在这一方面，尤其是对岛区为纳米尺寸的半导体材料的结构，已有不少研究报道。

在结束本文的时候，笔者想强调的是，对于本文介绍的单电子晶体管的物理基础——库仑阻塞与电子相关隧穿现象，看来概念并不复杂，甚至基本上属于基础物理的范畴，但竟然直到八十年代中期才为人们所注意。这就生动地证明了牛顿所谓的“未知真理的海洋”在今天仍然烟波浩淼，波澜壮阔，等待着我们去不断探索。