

XIEZHENSUI CHUANGQI JIAN
谐振隧穿器件

及其数字集成电路

JIGI
SHUZI JICHENGDIANLU

郭维廉 李效白 袁明文 编著

河北科学技术出版社

谐振隧穿器件及其数字集成电路

郭维廉等 编著

河北科学技术出版社

序

量子效应以全新的概念改变了半导体器件的发展面貌，国际上各种新型的量子晶体管不断涌现，微电子领域满园春色。但是大多数量子器件离实用化的距离较远，目前只有谐振隧穿器件能构成具有鲜明特色的实用化的数字单片集成电路，因此它将是新一代超高速数字集成电路的希望之一。

郭维廉老师 1952 年清华大学毕业，天津大学教授，中国电子科技集团公司第十三研究所客座研究员，天津工业大学兼职教授，研究方向为化合物半导体器件及其集成技术，是我国谐振隧穿器件的著名科学家和首席开拓者，在受聘“专用集成电路国家重点实验室”期间，为我室研究人员就“共振隧穿器件及其应用”授课二十余讲，并受邀在十三所创办的“微纳电子技术”杂志上发表了一系列文章，今整理编辑成书——《谐振隧穿器件及其数字集成电路》出版。

本书第一章主要介绍各种量子器件，第二章主要介绍谐振隧穿二极管、带间谐振隧穿二极管、谐振隧穿三极管，第三章主要介绍由谐振隧穿器件构成的数字电路。本书第一章第一、第二、第三节由袁明文研究员编写；第一章第四节，第二章，第三章第二、第三、第四、第五、第六、第七、第八节由郭维廉教授编写；第三章第一节由李效白研究员编写。

本书可作为微电子专业的研究生和科技工作者的参考用书。由于时间仓促，书中的错误还希望读者不吝赐教。

专用集成电路国家重点实验室

2008. 11. 11

目 录

第一章 新概念晶体管

第一节 晶体管的新概念	(1)
第二节 后 CMOS 器件的候选者	(21)
第三节 太赫兹 (THz) 波器件的几个基本问题	(29)
第四节 固体纳米电子器件和分子器件	(41)

第二章 谐振隧穿器件

第一节 谐振隧穿二极管概论	(59)
第二节 谐振隧穿二极管的物理模型	(75)
第三节 谐振隧穿二极管中的电荷积累效应	(86)
第四节 谐振隧穿二极管的材料结构设计	(97)
第五节 RTD 的器件结构及制造工艺	(107)
第六节 RTD 交流小信号等效电路模型	(131)
第七节 RTD 器件参数和测量方法	(144)
第八节 RTD 的器件模型和模拟	(162)
第九节 带间谐振隧穿二极管 (RITD)	(174)
第十节 谐振隧穿晶体管	(194)

第三章 谐振隧穿晶体管数字集成电路

第一节 谐振隧穿晶体管数字集成电路概述	(251)
第二节 单一双稳转换逻辑单元 (MOBILE) 及其构成的 数字电路	(275)
第三节 MOBILE 的瞬态特性分析	(291)

第四节	三个以上 RTD 串联构成的电路	(308)
第五节	SD/RITD 流水线逻辑门电路	(328)
第六节	RTD/HEMT A/D 转换器电路	(341)
第七节	RTD/HFET 新型 MOBILE 柔性逻辑电路和 逻辑加法器设计.....	(352)
第八节	RTD 多峰负阻特性在数字电路中的应用 ...	(366)

第一章 新概念晶体管

第一节 晶体管的新概念

1.1.1 引言

人们知道，电子器件最重要的作用就像一个可控的阀门，犹如一个自来水龙头控制水的流动。当今最重要的固态电子器件——晶体管（Transistor）就是一种能够采用一个弱的信号去控制一个很强的电流或者电压的三端固态器件。在电子电路中，人们首先采用电子管作为可控的阀门。其缺点是体积大、功耗大、寿命短。虽然能够满足许多电子电路的需要，却有许多缺点。同电子管相比，晶体管具有电子管无可比拟的优点，不仅体积小，而且功耗低、寿命长。它兼有放大、振荡、混频和开关等功能。譬如，它能够将小的电输入信号改变为大的电输出信号，能够将很弱的信号放大，变成很强的信号；或采用晶体管放大器，通过天线接收在空中的很弱的无线电信号，放大到人的耳朵能够听得到。虽然，晶体管只是一种小小的固态电子器件，但是无论是在现代的模拟电路，还是数字电路中，却常常具有无可替代的作用。

1947年12月23日，晶体管的三位发明人（图1.1）William Shockley, John Bardeen 和 Walter Brattain 在美国新泽西州的贝尔实验室成功地发明了晶体管（图1.2）。在整个发明中，Shockley 同他后来聘用的助手 Bardeen 和 Brattain 相比，发挥了更主要的作用。他历经十几年，一直从事该器件的理论研究工



图 1.1 晶体管的三位发明人^[1]



图 1.2 第一只晶体管的照片^[2]

作。Bardeen 和 Brattain 的创造性贡献是“点接触”晶体管，随后，Shockley 设计了新型的更优越的“双极”晶体管，并取而代之。

尽管晶体管婴儿有些“丑陋”，却标志着一个崭新时代的开端。一旦问世，备受青睐，半个多世纪以来的晶体管发展奇迹已经令人耳目一新，已表明晶体管的作用比其他电子元器件不可比拟的。晶体管的发明不仅给计算机带来了一个的崭新时代，而且开辟了一个全新的 IT 时代。

更值得指出的是，今天，微电子器件的加工尺寸已进入纳米级，人们开始更加关注量子限制器件的研究；用于制造晶体管的材料已从无机物拓展到有机物；晶体管的工作原理不仅涉及到电子的电荷，而且涉及到电子的旋转状态。因此，新的学科不断出现，譬如自旋电子学等，晶体管的新概念也在不断出现。

1. 1. 2 晶体管概念

1. 1. 2. 1 传统的晶体管

传统的晶体管工作原理是采用势垒控制电荷的流动。两种最常用的势垒是 PN 结（如在双极晶体管中）和静电耗尽层（如在单极晶体管的金属—半导体场效应晶体管，或称肖特基势垒场效应晶体管和金属—氧化物—半导体场效应晶体管）。传统的晶体管采用传统的半导体材料主要包括：元素半导体锗、硅等，化合物半导体砷化镓、磷化铟等。现在，人们正在以极大的兴趣研究第三代半导体，即宽带隙（宽禁带）半导体，如碳化硅、氮化镓和金刚石等。

（1）双极晶体管（Bipolar transistor）。其电荷的流动涉及多数载流子（如电子）和少数载流子（如空穴）。通常，晶体管结构包括硅、锗或者某些化合物等的三层半导体材料，每一层材料都含有掺杂的杂质，形成特有的、带正电的或负电的电特性，带正电的为“P”层，带负电的为“N”层，一般的晶体管则是由 NPN 或者 PNP 构成，是具有发射极、基极和集电极的三端器件。双极晶体管家族还包括 HBT（Hetero Bipolar Transistor）等。

（2）场效应晶体管 FET（Field-Effect Transistor），又称单极晶体管，属于多数载流子器件，电荷的流动仅仅涉及多数载流子（如场效应晶体管 n 沟道中的电子），是具有源极、漏极和栅极的三端的器件。场效应晶体管 FET 家族包括：MOSFET，MESFET，JFET，HFET，HEMT 和 PHEMT 等。

1.1.2.2 柔性晶体管 (Flexible transistor)

柔性晶体管不像传统的、具有刚性结构的晶体管，而是能够将其封装成可卷曲、绕曲和弯曲的，能够用于可卷式的显示屏。1999 年 10 月，IBM 宣称开发出一种很薄、柔性和便宜的晶体管，并能够喷涂在塑料上^[3]。IBM 的材料科学家 Cherie Kagan 在《科学》杂志中描述，将具有电气性能的无机半导体材料和可以在室温下生产的有机材料相结合。研究人员采用一种有机材料，即苯乙烯氨 (phenethylammonium) 的化合组分，和一种无机材料锡碘化物，并将两种分开的材料层结合起来，形成一层比头发丝的直径还薄的涂层。柔性晶体管将能够在显示器中取代无定形硅的应用。在其应用前景中包括，可装在口袋中的卷式计算机等。另外，还有一种可以制造在纤维上的有机晶体管问世，它意味着人类正朝着实现电子纺织物的方向迈出重要的第一步^[4]。

1.1.2.3 单原子晶体管 (SAT, Single-Atom Transistor)

美国 Cornell 大学发明了可能是迄今最小的单原子晶体管 (SAT, Single-Atom Transistor)，其尺寸仅有 1.3 nm，而当今的硅晶体管尺寸一般都大于 100 nm。研究人员将单个钴原子放在一个由有机物烷基链形成的包围中，将其嵌入一根金丝的、并由电徙动产生的裂缝中，构成晶体管。然后观察到其在增加电压后的一组实验现象。他们采用单个钴原子作为开关，该 SAT 采用离子注入技术，在两个金属电极之间，或者线状物上面注入“设计的分子”，形成一个电路。当将电压加在晶体管上，电子流经过分子中的单个钴原子，电子从一个电极到另一个电极是跳跃式的开和关，如图 1.3 所示。

1.1.2.4 单电子晶体管 (SET, Single-Electron Transistor)

1985 年，莫斯科大学的 Dmitri Averin 和 Konstantin Likharev 等提出一种新的三端器件的设想，称为单电子隧穿 (SET) 晶体管，两年后，美国贝尔实验室的 Theodore Fulton

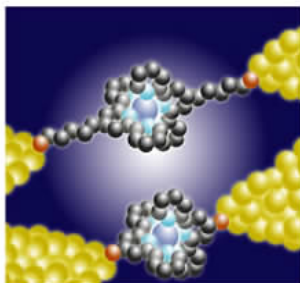


图 1.3 单原子晶体管^[5]

和 Gerald Dolan 制造和展示了这种器件^[6]。

目前，大多数人讲的 SET 则指的是单电子晶体管（SET，Single-Electron Transistor）。单电子晶体管（SET）可以看成是一个单电子盒子，它包括两个供电子进出的分开的结，如图 1.4 所

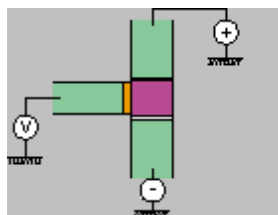


图 1.4 单电子晶体管（SET）的工作原理图^[7]

示。也可看成为一个场效应晶体管，其沟道是由两个隧道结构构成的金属孤岛。它由量子点组成，通过隧道结，与一个电子源和一个分离的电子漏连接，电子的注入由栅电极控制。通过栅电极的偏压 V 控制，改变孤岛中电子的位能，满足孤岛中的电子数目所需的势能。对于 SET 而言，充电能 U 起主导作用，即，将一

电子从源移入孤岛时必须拥有 $U = q^2/2C$ （其中 q 为电子电荷， C 为孤岛对周围部分的电容）的能量，克服孤岛内电荷对它的作用才有可能。如果电子不具备这个能量 U ，导电过程就不可能发生，这种现象称为库仑阻塞效应。SET 是依靠隧道效应和库仑阻塞效应的竞争来获得单个电子的控制转移的纳电子器件。能够将电子一个一个地从源极转移到漏极的三端开关器件。

SET 包括两个版本，即所谓“金属的”和“半导电的”两个版本的器件原理均利用绝缘的隧道势垒来隔离导电的电极。在 Fulton and Dolan 制造的金属的原型版本中，采用铝薄膜作为金属材料制造所有的电极。首先，透过掩模板蒸发淀积金属铝，形成源电极、漏电极和栅电极；其次，在真空室中加入氧气，在淀积的铝金属表面生成一层薄的天然氧化物，形成隧道结；最后，再蒸发淀积第二层铝金属，旋转实验样品，形成孤岛。在半导体版本中，获得源电极、漏电极和孤岛的方法是切割（cutting）位于两层半导体，譬如，GaAlAs 和 GaAs 之间的二维电子气区，并由顶层半导体的电极图形限制其导电区。若将一定的负电压加在这些电极上，电极下面的耗尽区则变得很窄，在源、孤岛和漏之间出现隧穿效应，并可将孤岛状的电极作为栅电极。在这个 SET 的半导体版本中，通常将孤岛做成量子点，其中的电子受到三维的限制。

从 1985 年以来，人们对单电子晶体管（SET）的研究一直很活跃。譬如，如图 1.5 和图 1.6^[8] 所示的单电子晶体管（SET）。这些器件以一个分子或者原子作为功能单位，其工作原理的基础是量子效应。这些器件的尺寸很小，只有几个纳米尺度，或者称为纳米粒子。由于在电子之间具有互相排斥的库仑力，若要增加一个电子必须具有相应的能量。获得能量的方法是在栅电极上加上电压，相当于将势能降为零，因此，电子就可从分离的源电极跳跃到漏电极。然而，由于库仑排斥力，不能同时

有第二个电子的跳跃。在第二个电子进入以前，第一个电子必须离开，才能进入漏电极，形成一个一个的电子运动，这就是众所周知的单电子量子隧穿效应。

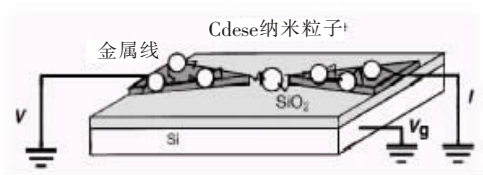


图 1.5 单电子晶体管的示意图

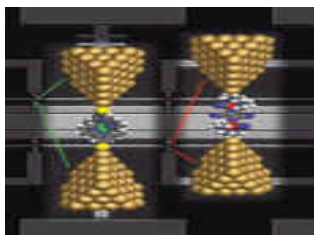


图 1.6 单电子晶体管

单电子晶体管在两根金线之间有镉硒（Cdse）纳米粒子。

这种新颖的超高速的单电子晶体管将促进具有超级功能、超小型化（只有图钉般大小）的“量子”计算机的发展。然而，距离将原子的或者分子的晶体管装配在实用化的、高密度的和高速的逻辑电路中的梦想，尚有很长的历程。目前的单电子晶体管仍不能与硅的晶体管匹敌。但是，无论在科学上作为研究纳米领域的电子运动，还是在开发化学应用技术上制造单分子的电子器件，单电子晶体管都是有意义的。

1.1.2.5 单自旋晶体管(SST, Single-Spin Transistor)

自旋电子学 (spintronics) 是指在器件和电路中，同时考虑

电子的电荷及其自旋而产生的各种物理现象。可以通过一种单自旋控制电路来控制其最终的自旋粒子控制过程。也有人称为纳米自旋电子学（nanospintronics），是一门关于电子自旋的崭露头角的学科名称，描述原子和电子“自旋”的物理性质。

1993 年，首次提出“自旋晶体管”（spin transistor）的概念^[9]。这种晶体管利用目前多数载流子和少数载流子的晶体管概念，惟一的区别是其具有自旋磁场力矩的方向性。在大多数半导体器件中，其载流子自旋类型的相对比例变化总是相等的。然而，如果将铁磁体材料用作载流子源，则可将载流子自旋类型的比例故意偏向到一个方向。只要在基极和集电极之间插入一层具有低的矫顽（磁）性的顺磁材料，就能够通过外加磁场施加对晶体管的影响，犹如一个可变的磁阀门，可以调节器件从发射极流出的电子流。若在集电极的表面上生长另外一层铁磁体材料，也能够对电子的自旋产生影响。

在上述自旋晶体管中，只有具有正的自旋极化作用的电子才能够成功地通过器件，可见，其晶体管特性呈现出磁性调谐的特点。这样，就获得了通过外磁场控制具有放大和开关特性的器件。

在早期的自旋晶体管中，将铁磁体材料和顺磁金属直接掺杂到硅基区的材料结构层中，在界面形成金属硅化物，导致器件性能退化。因为，大部分去极化效应影响了自旋极化的电荷载流子通过界面的流动，严重地降低器件的磁性灵敏度。

牛津大学物理系的研究人员改进了自旋晶体管，极大地降低了其在界面的去极化效应，提高了器件的一致性和灵敏度。其主要的工作原理还是应用常规的晶体管工作原理，不同之处是其具有依赖于周围环境磁场强度的电流输出特性。此外，通过调整制造工艺中的参数，可以在较宽的范围内，调整器件的磁场灵敏度，为了某些特殊要求，允许将器件的磁场强度进行调整。器件

不仅具有常规的晶体管的优点（譬如，大的放大倍数），也可以根据局域的磁场改变器件的电流增益。该技术适用于具有可变磁场，或者定位传感器（position sensors）和非挥发性存储器芯片。

加拿大微结构科学院的物理学家提出的 SST 原型是由量子点和自旋极化引线组成。量子点是人造的原子，由于静电势能的原因，原子中的电子被限制停留在原子中。若将量子点耗尽，填入电子，产生一个“氢”量子点（有一个携带电子），或者“氦”（有第二个携带电子）或者“铁”（有第四个携带电子）。在晶体管中的电子自旋不是随机的，而是取决于电子混合体中的电子数量和外加的磁场，最重要的是量子点与自旋极化电子源的连接。电子流的流入，或流出反映出其自旋电子的增加，或者减少，这一判据犹如栅电极控制流进量子点电流的大或者小。这时，人们能够“读”量子点的自旋性质，也应该能够通过加入一个电子，或者调谐磁场实现“写”的功能（即，改变可控量子点的状态）。在将来固态量子计算中，这种将单电荷和单自旋的控制结合在一起的新颖概念将会发挥作用，量子运算单位——量子位（qubit）将可能由专门制备的自旋态组成^[10]。

据报道，美国加州大学的有关研究人员正在研究各种半导体结构中电子的、光子的电子磁变换实验和原子核自旋实验^[11]。他们主要致力于研究在固态中量子信息处理的物理学。

1.1.2.6 量子力学晶体管 (QMT, Quantum Mechanical Transistor)

量子力学晶体管 (QMT) 的工作原理相当于一个没有合上开关，却已发亮的电灯泡，即由于隧道效应，电子隧穿通过势垒，而根据经典的物理学，则是难于穿透的。隧穿过程的发生时间很短，说到“隧道”，人们可能想到涵洞或者高速公路，而物理学家采用它来描述一种物理效应的现象。在这种效应中的粒

子，譬如：电子，在能带图中发生了异常的现象，它隧穿通过势垒，没有驱动却跨越过一个不可逾越的高峰，出现在能带图中的新位置上。这种原子领域中的效应只能采用量子力学原理来解释。虽然，这种器件还不能提供市场，但是它已是真正的器件，不是仅仅停留在理论上。这类器件的例子之一是双电子层隧穿晶体管（DELTT，Double Electron Layer Tunneling Transistor）。该器件的照片如图 1.7 所示。

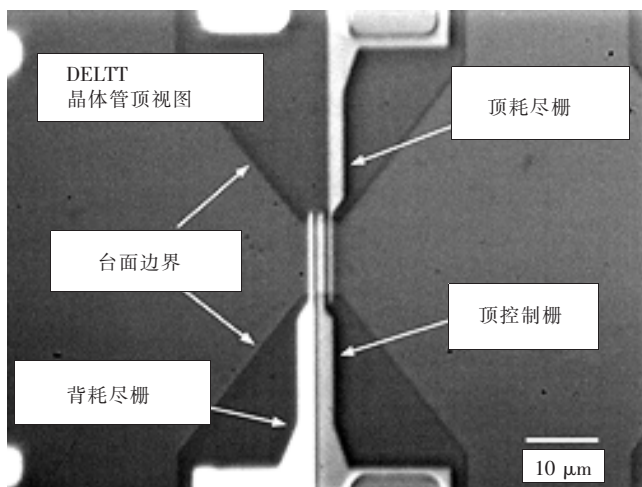


图 1.7 双电子层隧穿晶体管 (DELTT) 的照片^[12]

其材料结构包括两层非常薄的外延的电子层($0.25\ \mu\text{m}$)，可让光线透过。正面和背面的两个耗尽栅极可分别与两个电子层连接，而正面的控制栅电极控制其开和关。这种高速器件具有简单的隧穿效应，其运算速度达到每秒万亿次，比当今晶体管的运算速度高出十倍以上。这种器件运算速度非常快，功耗极低，只有几十毫伏微安，而目前使用的晶体管则需要几毫安、伏的数量级。它具有显著的优点，能够明显改善计算机的速度和传感器的

精确性。将来的应用领域包括：卫星、导弹，以及化学的、生物的和光学的探测器等。

1.1.2.7 谐振隧穿晶体管 (RTT, Resonant Tunneling Transistor)

所有晶体管工作原理的基础都是利用势垒高度去控制器件的电子从一端流向另一端。但是，在器件的设计中，必须保证基区的势垒宽度远大于电子的波长尺寸（约 10 nm），否则电子将隧穿通过势垒（图 1.8）。势垒宽度越窄，漏泄电子越多，最后，

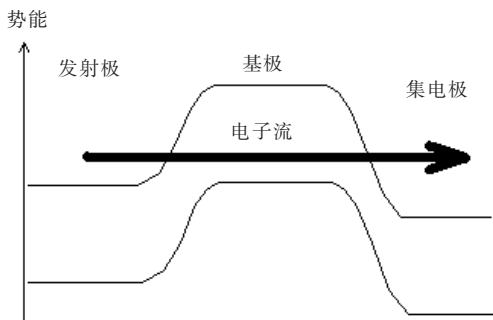


图 1.8 电子隧穿的能带图^[13]

晶体管丧失了器件的开关性能。然而，某些纳电子器件，尤其是谐振隧穿器件却要利用隧穿的这种量子力学效应，例如：谐振隧穿二极管 (RTD)，或者谐振隧穿晶体管 (RTT)。RTD 包括：发射区、集电区和一个双隧穿的势垒（即包括一个 5~10 nm 的窄的量子阱），其材料结构的核心是必须包括双势垒和单势阱。RTT 则是具有类似于谐振隧穿二极管的电流—电压特性（具有一个以上的峰—谷值）的晶体管，峰—谷值的多少取决于晶体管的材料结构。目前，人们已经研究出若干种 RTT，比如，谐振

隧穿热电子晶体管 (Resonant Tunnelling Hot-Electron Transistor, 或者称 RHET) 就是其中之一, 在其基极和集电极之间包含一个 RTD。

谐振隧穿二极管 (RTD) 和三极管 (RTT) 是研究得最早、最深入、比较成熟的一种固体纳米电子器件。与常规的双极和场效应器件相比, 其特点是: (1) 高频高速工作: 由于隧穿是载流子输运的最快机制之一, 极小的 RTD 尺度则决定了器件具有非常快的工作速度和非常高的工作频率, 比如, 其最短的开关时间为 1.5 ps, RTD 的峰谷间的转换频率可达 1.5~2.5 THz; (2) 低工作电压和低功耗: 典型的工作电压为 0.2~0.5 V, 一般的工作电流为毫安量级, 用 RTD 做成的 SRAM 功耗为 50 nW/单元; (3) 负阻、双稳态和自锁特性: 负阻为 RTD 和 RTT 的基本特性, 由 RTD 构成的反相器具有双稳态特性; (4) 完成一定的逻辑功能, 只需要很少的 RTD 器件, 比如, 构成异或 (XOR) 门, 对 TTL 需 33 个器件, 对 CMOS 需 16 个, 对 ECL 需 11 个, 而对 RTD 只需 4 个器件。

谐振隧穿器件的这些显著特点: 超小型化、超高频、超高速、低功耗, 电路简单, 节省元件, 也是实用化程度较高的纳米电子器件, 在超小型和超高速的计算机系统中的应用前景十分广阔。

1.1.2.8 薄膜晶体管 (TFT, Thin-Film Transistor)

长期以来, 工业界就有一个目标, 在塑料上生长硅材料, 在透明的塑料上实现制造高性能的薄膜晶体管 (TFT) 的目标。实现这个目标的困难往往在于制作 TFT 的加工工艺的高温融化了塑料。韩国汉城国立大学的研究者描述了如何在可接受的 150 °C 以下在塑料上制作硅 TFT。他们采用准分子激光器退化, 采用专用的 ICP 气相淀积工艺。该 TFT 呈现出很高的电子迁移率 $141 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。将多晶硅 (poly-Si) 薄膜晶体管 (TFT) 技术