

微电子技术

半导体集成电路技术

【半导体】 见第一卷中的“半导体”。

【晶体管】 见第一卷中的“晶体管”。

【双极（型）晶体管】 电子和空穴两种类型载流子对导电都起作用的晶体管。它是电流控制器件。基本结构有 PNP、NPN 两种类型；由三层半导体构成，中间一层叫基区（B），基区宽度应比少数载流子复合长度还小，另两层叫发射区（E）和集电区（C），各自的引出电极分别叫做基极、发射极、集电极。发射区与基区之间形成发射结，集电区与基区之间形成集电结。在共发射极电路中，当发射结加正向偏压，注入电流 I_{eb} ，集电结加反向偏压时，则晶体管处于放大状态，集电极可获得很大的输出电流 I_{CO} ，约为 βI_{eb} ， β 为共发射极电流放大系数，一般在 10—200 之间，这就是晶体管的放大作用。一般可得到很强的电流、电压及功率放大能力。结型晶体管理论是 1949 年肖克莱提出的。1951 年制成合金结晶体

管,1954 年制成第一只硅晶体管,1956 年制成扩散型晶体管,1958 年制成平面型晶体管,从而为集成电路的出现准备了条件。至今,作为最主要的分立器件,双极晶体管仍广泛应用于各种装置的电子线路中。同时也是构成各种双极型集成电路、高速逻辑电路的基础元件。

【场效应晶体管】按半导体场效应原理设计和工作的晶体管,简称 FET。它是电压控制器件。由于这种晶体管只有一种极性的(多数)载流子参与导电作用,故又称作单极晶体管。半导体场效应应有三类:表面场效应,PN 结场效应,肖特基结界面场效应。利用这三种场效应制成的晶体管,分别叫做绝缘栅场效应晶体管(简称 IGFET),结栅场效应晶体管(JFET),肖特基势垒栅场效应晶体管(MESFET)。金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)是 IGFET 最典型、最重要的特例。三种场效应晶体管都有一个沟道,即空间导电层,都有三个电极,即栅极、源极、漏极,后两电极可以互换。场效应概念是远在 1925 年由美国 J.E. 里林菲德首先提出的。1935 年 O. 海尔实验观察到场效应现象。1938 年德国 W. 肖特基等提出金属半导体接触整流理论。1939 年肖克莱根据肖特基结理论提出肖特基结场效应晶体管的设想,1952 年他又提出结型场效应晶体管的设想。随着表面态理论的发展,直到 1958 年法国特斯纳(Teszner)才制成第一只结型场效应晶体管,1962 年美国霍夫斯坦(Hofstein)和海曼(Heiman)第一次制成金属氧化物半导体场效应晶体管,1966 年美国 C. 米德制成肖特基势垒栅场效应晶体管。至此,建立了场效应管这一“家族”。与双极晶体管相比,场效应晶体管的特点是:输入阻抗大,噪声低,功耗小,频率高,抗辐照能力强,工艺简单,电路应用灵活等。因

此，它们具有重要的应用价值和发展潜力，特别是 MOSFET 和 MESFET，是构成、发展大规模超大规模集成电路、超高速集成电路以及光电子集成等的基础元件。

【平面（型）晶体管】利用二氧化硅膜的掩蔽、绝缘作用和相应的硅平面工艺制作的晶体管。包括氧化、光刻、扩散等在内，制作硅平面晶体管的整套工艺技术，称作硅平面工艺。采用硅平面工艺，免去了台面结构，使器件的三个电极都在同一面上，芯片外观呈一平整表面，故名。其优点是：保护 PN 结不受外界玷污，大大减小漏电流，降低噪声，提高了稳定性可靠性，特别是成为制作集成电路及大规模超大规模集成电路的技术基础。1958 年美国斯普赖克电气公司霍尔尼研制成功平面晶体管。同时，美国仙童半导体公司 R. N. 诺伊斯研制成功第一块单片集成电路。从此，开始了蓬勃发展的微电子技术革命。中国是 1963 年研制成功硅平面工艺和平面晶体管的。

【金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）】以金属氧化物半导体（MOS）电容结构为基础，利用表面场效应工作的晶体管，简称 MOSFET。所谓表面场效应，系指在半导体表面上施加垂直于表面的电场，改变外加电场的方向和大小，可以控制表面层中多数载流子的类型及密度，从而控制其沟道导电能力的现象。利用这种表面场效应工作的晶体管，统称为绝缘栅场效应晶体管，简称 IGFET 或 MISFET。若其中绝缘层是氧化物层，便称作金属氧化物半导体场效应晶体管 MOSFET。1959 年提出 MOS 结构，1962 年制成功 MOSFET。比起双极晶体管来，它工艺简单，输入阻抗大，功耗很低，芯片面积小，集成密度高，存储单元设计由

8 管、6 管、4 管乃至单管组成，成为发展小中大乃至超大规模集成电路最主要的基础元件结构。中国于 1966 年研制成功 MOSFET。MOS 器件种类较多，有 N 沟道 MOS (NMOS)、P 沟道 MOS (PMOS)、互补 MOS (CMOS)；增强型 MOS、耗尽型 MOS；双扩散 MOS (DMOS) 或扩散自对准 MOS (DSAMOS)；V 形槽 MOS (VMOS)、U 形槽 MOS (UMOS)；CMOS/SOS、HMOS、ZMOS 等。

【肖特基势垒栅场效应晶体管 (MESFET)】 利用肖特基结界面效应工作的晶体管，简称 MESFET。所谓肖特基结界面效应，系指在金属半导体肖特基接触上，其外加反向电压的大小改变时，可以改变肖特基势垒下沟道的厚度和电阻，从而控制其沟道导电能力的现象。肖特基势垒栅场效应晶体管有单栅管和双栅管两种结构形式。双栅管利用第二栅的屏蔽功能，以减小输出端对输入端的反馈作用。1938 年德国 W. 肖特基和美国、苏联科学家几乎同时提出金属半导体接触的整流理论，后人称之为肖特基结理论。1939 年肖克莱基于此理论提出肖特基结场效应晶体管的设想，但迟迟未能实现。只是在半导体表面态问题渐次弄清后，直到 1966 年才由美国 C. 米德制成功肖特基势垒栅场效应晶体管 (MESFET)。这种 MESFET 结构特别适合于难以形成绝缘层的 III - V 族半导体及超晶格半导体的器件设计，在发展新型的超高速微波器件及超高速集成电路技术上，显露出它潜在的巨大优越性。

【半导体集成电路】 采用硅平面工艺，兼用厚、薄膜工艺，将有源元件（二极管、晶体管等）、无源元件（电阻、电容等）及其互连线都制作在同一芯片或基片上，构成具有所设计功能的数字或模

拟电路。这种“单片集成电路”的设想是 G. W. A. Dummer 于 1952 年首先提出的。1958 年研制出硅平面晶体管工艺（简称硅平面工艺）和硅平面晶体管，同年美国德克萨斯仪器公司研制成功第一块混合组装的锗固体电路——相移振荡器，次年又宣布制成触发器固体电路。1959 年美国仙童公司 R. N. 诺伊斯研制成功第一块单片集成电路，1960 年宣布他们的首批单片集成电路产品——电阻晶体管逻辑电路系列。1962 年研制成功 MOS 场效应晶体管。从而，开始了一个迅猛发展的以集成电路为核心的微电子学时代。从分立元件到集成电路，是半导体电子技术的一大飞跃。与散装电路相比，集成电路大大减小了体积、重量，减少了引出线焊点数目，从而显著提高了电路可靠性，延长其装置寿命，降低了成本，也大大改善了性能，为整机集成化和微电子技术的发展提供了基础。集成电路品种繁多，主要分为双极型和 MOS 型集成电路两大类。按其集成规模、功能、工艺等细分，有：小规模、中规模、大规模及超大规模集成电路；数字集成电路，模拟集成电路，逻辑集成电路；线性、非线性集成电路；微波集成电路，超高速集成电路；薄膜集成电路，厚膜集成电路，混合集成电路；以及三维集成电路等。

【双极（型）集成电路】以 NPN 或 PNP 型双极晶体管为基础元件构成的单片集成电路。比起 MOS 电路来，双极集成电路问世较早，发展初期在产品市场上一度占着主导地位。只是当 MOS 器件的表面问题获得突破性解决后，由于 MOS 更适宜于高密度集成，其市场优势才被 MOS 电路取而代之。但在高速、超高速电路应用上，由于工作速度快，双极型集成电路仍占着重要地位。双极集成电路种类虽多，但不少品种系发展改型中的过渡性产品。广泛

应用的，大致可分为饱和型、抗饱和型及非饱和型逻辑等几大类，如 TTL、STTL、ECL、及 I^2L 等。中国于 1964 年研制成功双极集成电路，1978 年又宣布研制成功中国学者独创的新型双极集成电路——多元逻辑电路（简称 DYL）。

【MOS（型）集成电路（MOSIC）】以金属氧化物半导体场效应晶体管为基础元件构成的集成电路。当前主要是以硅为衬底材料的硅 MOS 集成电路，而以蓝宝石等材料为基片的 CMOS/SOS 电路也发展极快。与双极电路相比，MOS 电路具有工艺结构简单、功耗低、输入阻抗大、可双向工作，以及适于大规模集成等一系列优点，故自 60 年代中期表面态问题取得突破性进展以来，获得了长足的发展，于 1968 年制出 MOS 大规模集成电路，1971 年制成 MOS 微处理器，1978 年制成 64K DRAM 超大规模集成电路。80 年代突破 1 微米、亚微米线宽精细加工工艺之后，更突飞猛进地达到 16 兆 DRAM（1986）、256 兆 DRAM（1990）水平，促使微电子学进入一个崭新的时代。MOS 电路种类很多，大体上分为 PMOS、NMOS 和 CMOS 三大类。按照结构、工艺、特性细分，有：增强型、耗尽型 MOS 电路；铝栅、硅栅、高熔点金属栅或金属硅化物栅 MOS 电路；双扩散 MOS（DMOS），V 型槽、U 型槽 MOS（VMOS、UMOS）电路；CMOS/SOS，高性能 MOS（HMOS）电路等等。

【门电路】在数字信息传送通道中，对电脉冲信息起特定的开关作用的电子线路。它是逻辑电路的基本单元，可以有一个或多个输入端，却只有一个输出端。通过门电路，将加至这些输入端的脉冲信息值（“0”或“1”）进行确定的组合，从输出端则可以取出

一定的脉冲信息值（“0”或“1”），该值与脉冲加至输入端的时间无关，所以，门电路也称作“组合逻辑电路”。门电路种类有：“与”门，“或”门，“非”门；“与非”门，“或非”门，“与或非”门；“异或”门，禁止门，符合门等等。各种门电路的逻辑功能，可用各自的“真值表”加以表示。其中“非”门也称作“反相器”，“异或”门也称作“非符合”门。

【触发器】具有两种相反的稳定状态，能按如下的逻辑功能进行工作的电子线路。其逻辑功能是：只要接通电源，两个输出端即出现相异的输出状态；一旦输入端加上触发信号，输出端状态立即反转；当取消触发信号时，触发器仍保持其原输出状态不变，直到有另一种输入状态接入时为止。触发器有一个或两个输入端，和两个输出端，是一种双稳态电路，具有记忆信息的功能，为数字电路的基本电路之一。一般由多个门电路构成，电路形式可以是双极型，也可以是 MOS 型的。其种类较多，常见的有：复位置位触发器（R—S 触发器）、D 型触发器、T 型触发器、J—K 触发器等。由它可以构成诸如计数器、寄存器、存储器等计算机部件。

【晶体管—晶体管逻辑电路(TTL)】 输入级和输出级都由晶体管组成，可以完成“与非”逻辑功能的单元门电路，简称为 TTL。其输入级采用多发射极晶体管，由多发射极实现“与”逻辑；输出级为两只串联的晶体管，一只通导，另一只则截止，输出极性反相，实现“非”逻辑。其逻辑关系是：当输入为 A、B、C 时，则输出 $X=A \cdot B \cdot C$ 。TTL 电路问世于 1962 年，后经几次大的改型，最新一代 TTL 电路，其输出管采用肖特基势垒二极管箝位，构成新的抗饱和型 TTL，简称为 STTL。STTL 具有高速、超高

速优点，开关时间快达 1 毫微秒（ns，纳秒）级。缺点是电路比较复杂，不适于超大规模集成。TTL 和 STTL 都是最常用的双极型集成电路形式。

【发射极耦合逻辑电路（ECL）】 电路结构类似于差分放大器，可完成“或/或非”逻辑功能的发射极电流耦合放大电路。它由电流开关、基标电压及射极输出电路三部分组成；工作在截止与放大两种工作状态，所以又称作电流开关逻辑（CML）门电路。这种电路可以将几个门的输出端连在一起，实现“线或”逻辑，应用十分灵活。其优点是：内部脉冲干扰比 TTL 门小得多，传输延迟小，开关速度很快。缺点是：逻辑摆幅小，抗干扰能力差，功耗较大。

【集成注入逻辑电路（I²L）】 由实行内部连接的两种极性的双极晶体管组成，可完成逻辑“非”功能的电子逻辑电路，简称 IIL 或 I²L。其基本逻辑单元由一个横向 PNP 晶体管和具有多个集电极的纵向 NPN 晶体管所组成，横向 PNP 管的集电极也用作纵向 NPN 管的基极，所以也叫做合并晶体管逻辑。它将各单元电路的输出端并接在一起，用“线与”的方法来实现一定的逻辑功能。I²L 工艺与普通双极工艺相容。其优点是：电路工艺简单，电路没有电阻，集成度高，功耗极低，特别适于大规模集成。缺点是：逻辑摆幅小，抗干扰能力差，开关速度较慢。I²L 是双极电路很有发展潜力的电路形式，广泛应用于高密度低功耗存储器、微处理机及定制逻辑集成电路等方面。

【N 沟 MOS 集成电路（NMOSIC）】 以 N 型沟道 MOS 器件为基

础元件构成的集成电路。N 沟 MOS 器件工作的多数载流子是电子,电子的有效质量比空穴的小,而迁移率则比空穴高,故 NMOS 电路的工作速度比较快。由于表面态的原故, NMOS 制作工艺难度较大,难以制出增强型器件,直到 70 年代初,其工艺才趋于成熟。NMOS 早已成为发展大规模、超大规模集成电路最主要的器件结构。

【P 沟 MOS 集成电路 (PMOSIC)】 以 P 型沟道 MOS 器件为基础元件构成的集成电路。MOS 器件的早期产品多为 PMOS。PMOS 工作的多数载流子是空穴,由于空穴的有效质量较大,迁移率较低,跨导较小,阈值电压较高,故 PMOS 电路的速度较慢。但其工艺较简易,价格便宜,尤其随着 CMOS 电路的发展,PMOS 仍不失为 MOS 电路的基本器件结构之一。

【互补 MOS 集成电路 (CMOSIC)】 由 N 沟和 P 沟 MOS 场效应管对连接而成的互补式集成电路。其中 N 沟 MOS 器件为倒相器, P 沟 MOS 器件为负载管,以推挽方式工作;反之亦可。当这种 CMOS 电路工作时,一个晶体管截止,则另一个晶体管通导。因而可以增大输出幅度,提高抗干扰能力,并大大降低其功耗,克服单沟道 MOS 电路负载能力低和需用两种电源的缺点。其问题有:制作工艺复杂,电路元件数较多,集成度比 N MOS 低很多。CMOS 与 N MOS 电路相结合,在同一芯片上实现兼容的高性能 CMOS 电路,可以兼得高集成度及低功耗,是当前超大规模集成电路发展的重要方向。CMOS 技术是 1963 年由 Wanlass 和 Sah 首先提出的。

【高性能 MOS 电路 (HMOS)】 依照器件结构尺寸等比例缩小原则, 将尺寸适当缩小, 相应提高电路性能 (如: 时延—功耗乘积值) 及集成度, 按这种设计方向发展的新型 MOS 集成电路, 简称为 H MOS。当发展到超大规模集成阶段, 器件特征尺寸减至亚微米级时, 则会受到种种因素的限制, 比如: 接触电阻非成比例缩小, 芯片散热, α 粒子及宇宙射线辐射等多种次级效应, 以及 VLSI 物理极限、工艺极限、材料极限、电路极限、经济极限等诸多因素的限制。

【SOS (蓝宝石上外延硅)】 蓝宝石基片上外延硅, 以制作 C MOS/SOS 抗辐照高速集成电路的技术。在蓝宝石等绝缘衬底上制作 C MOS 电路, 不必制作隔离阱和沟道截止环, 器件的 PN 结及寄生电容可以做得很小。这种结构的优点是功耗低、速度快、抗辐照能力强, 具有重要军用价值, 是当前发展特种大规模集成电路的重要方向。但 SOS 成本高, 少子寿命较短, 不适于制作双极型器件和电荷耦合器件。

【SOI (绝缘体上半导体)】 在层间绝缘膜或半导体膜上, 重复地生长半导体单晶膜或绝缘膜的技术, 简言之, 即绝缘膜上生长半导体膜的技术。它是以绝缘体取代蓝宝石衬底, 以期替代成本昂贵的 SOS 的一种新技术, 是有希望制作三维集成电路的基础技术。制备 SOI 结构的工艺方法, 目前主要有: 能量束 (激光束、电子束加工) 退火技术, 双异质外延技术, 高能离子注入 (形成埋层绝缘层) 法, 横方向固相生长技术, 及 “几何” 外延技术等。

【小规模集成电路 (SSI)】 集成度少于 10 个门电路或少于 100 个

元件的集成电路，简写作 SSI。一般指门电路、触发器、单级放大器之类。

【中规模集成电路 (MSI)】 集成度介于 10—100 个门电路，或集成元件数在 100—1000 个元件之间的集成电路，简称为 MSI。一般指计数器、寄存器、运算器、放大器等部件。

【大规模集成电路 (LSI)】 集成度介于 100~10000 个门电路，或集成元件数介于 1000—100,000 个元件之间的集成电路，简称为 LSI。大规模集成电路不是以门电路或单级放大器为集成制作对象，也不是小功能部件，而是以大部件、分机、或整机子系统等硬件为集成对象。一般以“K(千)位”为记述单位，此 LSI 为 1K—100K 集成规模，或者说为 1K—64K 位集成度。

【超大规模集成电路 (VLSI, ULSI)】 集成度达 1 万个门电路以上，或集成元件数达 10 万 (100K，或说 64K) 个元件以上的大规模集成电路，简写作 VLSI 或 ULSI。超大规模集成电路已具有整机的功能。其发展分为三个阶段：1986 年前，单片集成达 10 万—50 万个元件；1986—1990 年，单片集成达 50 万—几千万个元件，其中单片上有 60 万个元件的 256K 位随机存储器，已是生产能力很强的产品，并且逾 100 万、1600 万位的随机存储器，也相继问世；1990 年以后，单片集成达几千万—10 亿个元件。预计 256MRAM 不久将有产品面世。

【数字集成电路】 以“开”、“关”两种稳态，或者以高、低电平来对应于二进制数字量“1”和“0”，并可进行数字的逻辑运算、存

储、传输、和转换的半导体集成电路。它是数字计算机的基础硬件单元。一般说，它有两种基本电路形式，即门电路及触发器电路。将这两种基本电路加以适当组合，原则上可以构成各种类型的数字电路功能块，如计数器、存储器、移位寄存器等等。半导体数字集成电路按其器件结构分为双极型和 MOS 型两大类。发展初期，其单元电路主要为“与非门”、“或非门”等门电路形式；集成度达中规模时，则以集成触发器、计数器等为主要单元；进入大规模集成时，便以移位寄存器、单片存储器、单片微处理器等子系统为基本单元；超大规模集成电路则已具有整机的功能了。

【模拟集成电路】凡以放大器电路为基础单元、由若干完成特定功能的单元电路来组成的所有非数字电路。按其线性关系情况，模拟集成电路分为线性集成电路和非线性集成电路两类。构成它们的基本单元电路包括有：差动放大器，电流源，电压源，电流电平移位电路，双端—单端转换电路，以及输出级电路等。由这些单元电路可以构成形式更复杂、功能更齐全、性能新颖的各种模拟集成电路块。

【线性集成电路】输出信号与输入信号之间呈线性关系的模拟集成电路。与分立元件电路相比，在同一芯片上制作的元件参数值之间，由于它们的相对误差小，匹配良好，对温度等环境因素变化的跟踪性能一致性较好等优点，故这种线性集成电路具有远优于分立元件电路的性能。1966 年，第一个高性能通用运算器问世，由于它运用灵活、体积小、性能好，促进了电子学的发展。线性集成电路品种繁多，一般有通用电路与专用电路之别。前者有：运算放大器，电压比较器，集成功率放大器，集成稳压器，集成时

基电路，以及数—模转换器，模—数转换器等；后者有：控制与测量电路，电话通信电路，电视机电路，音响电路等。

【非线性集成电路】输出信号与输入信号之间既不呈线性关系，又不是开关性质的模拟集成电路。属于这类电路的有：积分微分器，对数放大器，丙类功率放大器，整流器，检波器，调制器等集成电路。

【薄膜集成电路】采用薄膜工艺及半导体集成工艺，在绝缘基片及半导体芯片上制作无源元件、有源元件及互连线，以集成组装构成具有确定功能的电路。所谓薄膜，系指膜厚在几百至几千埃的导体或介质膜。制备薄膜的工艺方法主要有真空蒸发、溅射、和化学汽相淀积等。薄膜有源元件至今尚不成熟，故此类电路多般采用混合电路形式。所用的绝缘基片，多般是玻璃质或被釉陶瓷质，廉价的被釉氧化铝基片也颇为流行。

【厚膜集成电路】采用厚膜工艺在绝缘基片上制作无源元件和互连线，再集成组装以二极管、晶体管等有源元件或者半导体集成电路芯片，以构成具有确定功能的集成电路。所谓厚膜，系指厚度为几个至几十、上百微米的导电膜、电阻膜、及介质膜。其制作工艺主要是电镀、丝网烧印、喷涂等工艺。这种厚膜集成电路主要应用于大电流、大功率、及低成本的消费类电器电路方面。

【混合集成电路】利用半导体集成工艺和厚、薄膜工艺制成有源元件、无源元件及互连线等部件，再组装在同一绝缘基片上所构成的集成电路。这种电路形式较多地应用于标准单片集成电路以外

的某些特种功能和用途的电路，如大电流、高电压、大功率、耐高温、高精度及微波等集成电路，主要有模拟电路、微波电路和专用电路等，它们是构成各类现代电子装置及设备所必不可少的重要部件。其种类繁多，主要包括有薄膜混合集成电路、厚膜混合集成电路、集中参数及分布参数微波混合集成电路等。

【逻辑集成电路】能完成逻辑变换与运算功能的数字集成电路。它一般分为双极型逻辑电路和 MOS 型逻辑电路两大类。按其结构、功能特征，细分有：非饱和型、饱和型、抗饱和型逻辑电路；ECL，TTL，STTL， I^2L ；单沟道 MOS 逻辑电路，CMOS 逻辑电路；多元逻辑，多值逻辑，连续逻辑，模糊逻辑等类型的集成电路。

【多元逻辑电路（DYL）】以线性“与或”门为主要基本单元构成的、兼有逻辑和线性双重功能的极高速双极逻辑电路，简称 DYL。它是我国学者 70 年代独创的新型逻辑电路。DYL 的问世改变了逻辑电路只处理数字信号的传统概念，它能同时输入和处理数字信号和模拟信号，以较其他逻辑电路更少的电路元件来完成同样的功能。它的核心器件结构是工作在非饱和区、兼有大、小 β NPN 管的多发射极晶体管。DYL 电路具有工艺简单、速度快、集成度高、自隔离，并与 TTL、MOS 电路工艺兼容且电平匹配，逻辑摆幅介于 TTL 与 ECL 之间，驱动能力强等一系列优点，对发展多值逻辑、连续逻辑、模糊逻辑和神经网络等系统有着独特的应用前景。

【多值逻辑与连续逻辑】有两个以上的确定逻辑值的数理逻辑，称作多值逻辑。当逻辑值个数很多以致实际难以区分时，或者说趋

于无穷多个值时,则称作连续逻辑。三值逻辑可取逻辑值 0、1、2;四值逻辑可取逻辑值 0、1、2、3;等等。在同样一个时钟周期内,二值逻辑只能表示两个信息状态。从原理上说,如用多值逻辑来进行并行处理信息,必定会大大提高处理速度。1920 年波兰学者 J. 卢卡西维奇首先提出三值逻辑概念,1921 年美国学者 E. L. 波斯特提出了多值逻辑系统的设想。但在电路实现时,碰到了重重困难,早期多值逻辑的硬件实现,期望于多稳态的固态器件,却迟迟难以成功,只是在晶体管、MOS、及 CCD 问世之后,70 年代才有所发展。中国学者发明的“多元逻辑电路”,乃为多值逻辑、连续逻辑的硬件发展提供了一个有效的途径。

【模糊逻辑】表征模糊变量及其函数的变换和计算规律的一种数理逻辑。它是模糊数学的一个重要分支,模糊命题也是一种符号逻辑。在模糊逻辑中,一个模糊命题的取值已不是单纯的“真”和“假”,而是真假的程度如何,即其真值本身也是模糊的,可以用闭区间 $[0, 1]$ 的一个实数值来表示。模糊逻辑公式的运算规则为摩根软代数。现在,模糊逻辑已应用于模式识别、情报检索、神经元模型、程序模拟、似然推理和工业控制等领域,模糊芯片或器件已用于家用电器、自动化仪表和工业自动控制等方面。

【电荷耦合器件(CCD)】利用电极列阵外加时钟脉冲电压,在 MOS 结构的半导体表面形成不对称势阱,藉以存储和转移信号电荷,使之沿表面定向传输,可完成动态移位寄存器功能的半导体表面器件,简称 CCD。它是美国贝尔实验室 W. S. 博伊尔和 G. E. 史密斯于 1970 年发明的。中国于 1975 年研制出 CCD 移位寄存器。CCD 制造工艺实质上就是 MOS 工艺。它不同于 MOS 器件,更不

同于双极型器件，是一种完全新型的半导体表面器件。由于它多功能的重要应用，被公认为是 70 年代以来出现的最重要的半导体器件。CCD 种类很多，一般分为表面沟道 CCD (SCCD) 和埋沟 CCD (BCCD) 两大类，细分有：二相、三相、四相 CCD；线阵、面阵列 CCD；交叠栅、电阻海栅、及离子注入势垒型 CCD，等等。CCD 本身就是一种延迟线和动态移位寄存器，且兼有数字功能和模拟功能。它以信号电荷包作为信号，而不同于其他大多数半导体器件均以电流或电压作为信号。CCD 最重要的性能参数是电荷转移效率，此外，还有信号处理能力、存储时间、暗电流、噪声及功耗等。由于 CCD 具有结构简单、集成度高、功耗低、以及兼有感光、自扫描、延迟线等多功能之类优点，在图象传感、信号处理、及存储器等诸方面均有重要应用。广泛用于遥感、遥测、天文气象、航天、雷达、通信、电视摄象、以及计算机等许多技术领域。

【表面沟道 CCD (SCCD)】 CCD 中存储和转移信号电荷的势阱位于半导体——氧化层界面处的电荷耦合器件，简称为 SCCD。早期的 CCD 结构多属 SCCD。它以少数载流子为信号电荷。信号电荷包的转移和传输主要靠扩散作用，且受表面、界面态的影响较大。其电荷转移效率较低，工作时钟频率不高，一般高至几兆赫；但信号电荷包容量较大，制作工艺较简单。

【埋沟 CCD (BCCD)】 CCD 中存储和转移信号电荷的势阱或沟道位于离开半导体表面一定距离的体内的电荷耦合器件，又称为体沟道 CCD，简称为 BCCD。与之相类似的还有蠕动式 CCD (简称 PCCD)。它们都以多数载流子为信号电荷，信号电荷的转移和传

输主要靠漂移场作用。其电荷转移效率很高，工作速度快，时钟频率可高达几十、上百兆赫。但其信号电荷包容量较小，制作工艺较难。它是 1972 年由 D. 康首先设想提出的，并发展成为大多数实用、高性能 CCD 器件的主要结构形式。

【CCD 摄象器件】具有透明电极及感光性能，可以完成光电图象转换功能的电荷耦合器件。CCD 问世三年后，美国仙童公司便首推出实用的 CCD 摄象器件。其结构一般分为线阵、面阵两大类，线阵有单线型和双线型，面阵 CCD 摄象器主要有帧传输方式和隔行传输方式。主要种类有：电视 CCD 摄象器，微光 CCD 摄象器，红外 CCD 摄象器，及夜视 CCD 摄象器等。CCD 摄象器件具有不同于其他摄象器件的许多优点：自扫描功能，分辨率高，动态范围大，便于集成化、全固态化等。故广泛应用于遥感遥测、航天技术、天文气象、地质资源考察、工业监测、临床医学、以及军事装备等各个方面。

【半导体存储器】采用半导体集成电路工艺制作的，可以接收、存储和取出数据信息的半导体电子器件。它是电子计算机的基本部件之一。按其功能的不同，可分为随机存储器、只读存储器和串行存储器等类型。按结构、工艺的不同，则分为 MOS 型存储器、双极型存储器及 CCD 存储器等。比起磁性存储器来，半导体存储器具有运算速度快、容量大、体积小、重量轻、成本低等优点，获得飞快的发展和普遍应用，推动着一代又一代新型电子计算机的发展。

【只读存储器（ROM）】存储信息可以永久保留，但信息只能从中

读取，而不能加以改写的存储器，简称 ROM。ROM 的存储内容在制作过程中即已固定编入，不能用计算机指令再加以改写。ROM 种类按存储单元结构、制作工艺不同，可分为：掩模式 ROM，可编程序 ROM，可擦可编程 ROM，电可擦可编程 ROM；TTL ROM，ECL ROM，NMOS ROM，CMOS ROM，等等。它们的工作速度、功耗水平、抗干扰能力等性能情况，均具有与同种工艺制作的逻辑门电路相类似的属性。实际应用中，NMOS ROM 最普及，占主导地位；CMOS ROM 随着工艺的改进，可进一步提高工作速度和输出驱动能力，电平可以与 TTL、NMOS 相兼容，故可望大大发展。

【可编程序只读存储器（PROM）】封装好后还可编程序的，用户一般能写入一次程序，而后则只能进行只读操作的半导体只读存储器，简称为 PROM。

【可擦可编程序只读存储器（EPROM）】其存储信息可以采用适当光源（如紫外光）加以擦除，内容则可以按需要任意多次地加以更改的可编程序只读存储器，简写作 EPROM。

【电可擦可编程序只读存储器（EEPROM）】可以采用电信号进行擦除与重写的可编程序只读存储器，简写为 EEPROM。

【随机存取存储器（RAM）】可以随时写入和读取信息，而且存、取信息的时间与上一次存、取信息的地址无关的半导体存储器。也称为读写存储器，简写为 RAM。RAM 分为静态、动态 RAM 两大类。动态 RAM 又发展出一种“集成动态 RAM”，其基本结构

是动态 RAM 加上刷新控制单元,使动态 RAM 的刷新工作不需外加专用的动态 RAM 控制器,而可以在芯片内自动完成。按其性能、制造工艺,RAM 又可细分为:挥发性 RAM,非挥发性 RAM;TTL RAM,ECL RAM,CMOS RAM,NMOS RAM 等种类。

【静态随机存取存储器 (SRAM)】只要电源不断电,其存储信息就可以长久保持,而不需周期性刷新的随机存取存储器,简称为 SRAM。其存储单元的核心部分是双稳电路,一般由六管或四管组成。存储器结构主要分四部分,即存储单元阵列、地址缓冲译码器、读写电路、及读写控制电路。

【动态随机存取存储器 (DRAM)】利用电容电荷来存储信息,而且必须周期性地加以刷新(即重写),否则信息就会丢失的随机存取存储器,简称为 DRAM。DRAM 的核心电路是存储单元和读出放大器。一般结构应包括有地址缓冲器,行译码器,列译码器,存储单元阵列,读出放大器,数据输入输出电路,读、写控制电路,时钟发生电路,以及衬底偏置电压产生电路等几个部分。

【定制集成电路】根据用户特定要求而专门设计制作的专用集成电路。它是相对于通用的标准电路而言的。定制集成电路分为全定制和半定制集成电路两类。全定制集成电路系指完全按照用户预期的功能和技术指标而专门设计制作的集成电路。其优点是性能理想,集成度极高,芯片小,适于大批量生产;缺点是制作周期长,成本较高,不易更改。半定制集成电路系指先制作成标准的“半成品式”功能单元,而后随时按照用户需要,再进行后工序设计加工,将半成品功能单元进行适当互连而构成符合用户要求的

集成电路。其优缺点正好与前者相反。这种“半成品”的设计制作方法有：(1) 母片法，又叫门阵列法；(2) 单元电路库设计法，又叫“积木块式设计法”；(3) 利用可编程序逻辑阵列法。

【数据转换器】在数据采集及控制系统中，用以实现数字信号和模拟信号相互转换的信号转换电路或装置。数据转换器有两类：数/模转换器和模/数转换器。它们是数据采集系统的核心部件，是沟通模拟部件与数字部件之间的桥梁及接口。所谓数/模转换器，是指将输入的数字信号转换成相应的模拟信号（电压或者电流等）输出的接口电路，简称为 D/A 转换器或 DAC，它相当于一个数字控制的电位计，其功能是输出一个与模拟基准电压成比例的模拟电压，该比例取决于数字输入，以数控功能取代机械控制。所谓模/数转换器，是指将输入的模拟信号转换成相应的数字信号输出的接口电路，简称为 A/D 转换器或 ADC，它相当于一个“编码”器件，其功能是把一个模拟输入信号转换成一组位长为 N 的数字输出信号，数字输出可以是并行输出，也可以是串行输出。D/A 转换器的类型有比例式、R/2R 梯形网络式、展缩式等；A/D 转换器的类型较多，有双斜率式、逐次逼近式、跟踪式、展缩式、比较器阶梯网络式、模拟电平检测器式、电压/频率转换式等。在当今的信息时代，广泛应用计算机技术的各种信息的采集、处理、检测、通信和自动控制等技术，都离不开这种信息转换技术，离不开这些数据转换器。

【GaAs 集成电路】以 GaAs 为基片材料、GaAs MESFET 为基础元件构成的集成电路。与常用的硅材料相比，由于 GaAs 具有一系列优异的性质：迁移率高，肖特基势垒特性好，电阻率高，禁带

宽度大,工作温度高,抗辐照能力强等,故 GaAs MESFET 远优于 Si MESFET,成为构成超高速集成电路的主要器件结构。第一块单片 GaAs 高速集成电路是 1974 年问世的,由 Hewlett Packard 公司 R. V. Tuyl 和 C. A. Tech 首先研制成功,它是一个以 GaAs MESFET 为有源器件的超高速“与或非门”电路。在此之前,1967 年 Turner 等制成 GaAs FET,1971 年他又制成了栅长 1 微米的 GaAs MESFET。从而,为 GaAs 集成电路的问世打下了基础。

GaAs 集成电路的器件结构有:耗尽型、增强型 MESFET,以及尚未成熟的 MISS 结构(金属—绝缘体—AlGaAs—GaAs 结构)。GaAs 集成电路的主要电路形式有:缓冲 FET 逻辑(BFL),肖特基二极管 FET 逻辑(SDFL)和直接耦合 FET 逻辑(DCFL)。BFL 的速度快,但功耗大,需双电源,单元器件数多,集成难度大。DCFL 的功耗低,单元器件数少,适于大规模集成,但工艺难度较大,需制作增强型 GaAs MESFET。SDFL 单元由耗尽型 GaAs MESFET 和肖特基二极管组成,即保持了 BFL 速度快的优点,又大大降低了功耗。GaAs 集成工艺按其发展演变有四种:外延台面工艺,平面离子注入隔离工艺,选择离子注入隔离工艺,及 80 年代发展的自对准离子注入工艺。工艺的关键在于栅材料的选择,应尽量选用与 GaAs 具有优良的肖特基势垒特性、可经受离子注入退火处理而又保持良好的高温热稳定性的低阻栅材料,通常选用难溶金属硅化物。随着微电子技术向着越来越高的数据处理速度发展,GaAs 高速集成电路随着工艺的不断改进,将在超高速、超大规模集成方面,比 Si 器件电路具有愈加显著的优势。

【三维（立体）集成电路】在各个半导体器件层之间利用绝缘层进行层间隔离，并通过在绝缘层上开孔、布线来形成连接点，以实现相应设计的纵向连接，由此而构成的多层结构半导体集成整块电路。SOI 技术是目前制作这种三维集成电路的主要工艺手段。其各个半导体器件层可以是同一种材料，也可以是不同种的材料。传统的集成电路都是平面式的，随着集成度的提高，传统平面加工工艺面临着种种障碍，如光衍射效应，寄生效应，散热问题，高能粒子辐照软误差，芯片内部布线局限等等，促使人们探索新的集成电路结构形式——立体集成电路。这种三维集成电路的优点是：集成度高，速度快，功能多。原则上，有可能将不同材料制作的传感器、发光器件、超高速器件、数据处理器、大容量存储器、驱动器、以及电源等全都集成在一块芯片内。东京工业大学古川实验室成为当前世界上 SOI 和立体集成电路最先进的研究中心。日本东芝公司某研究中心采用电子束加工法和 SOI 结构，已制成一种多功能三维集成电路的完整的光图象处理系统。

【硅平面工艺】利用二氧化硅层的掩蔽、绝缘作用而形成的包括氧化、光刻、扩散、隔离、外延、及金属化等在内的，制作硅平面晶体管和集成电路的一整套工艺技术。也简称平面工艺。1958 年美国仙童半导体公司 R. N. 诺伊斯发明硅平面工艺。同年制成功平面晶体管。随着硅平面工艺的不断改进和完善，1959 年诺伊斯在平面工艺基础上又研制成功第一块单片集成电路。中国是 1963 年研制成硅平面工艺和平面晶体管的。硅平面工艺是发展集成电路以及大规模超大规模集成电路的工艺基础，随着微米、亚微米级微细加工技术的不断发展，促使它们的集成度以每年或每两年翻一番的速度向上提高。

【离子注入工艺】利用离子注入装置,将具有足够高能量的离化抛射原子引入靶表面以内区域,对靶材料表面进行预定掺杂的技术。自 60 年代以来,离子注入工艺应用很广,是制作半导体器件和集成电路的主要掺杂手段之一。能量范围多在 3—500Kev,离子注入深度几乎正比于离子能量,约在表面以下 100—10000 埃。其主要优点是:与退火技术相结合,可以精确控制注入杂质原子数、浓度及深度剖面分布;也可利用光致抗蚀剂、氧化物、氮化物、多晶硅等作掩模,在真空中进行干式选择性掺杂。在超大规模集成电路中,典型应用有:控制 MOS 器件阈值,CMOS 器件电阻、N 阱、P 阱的掺杂,双极晶体管的基区掺杂和空间电荷区纵向尺寸的控制,MOS 器件自对准源、漏的形成,肖特基势垒的调节,双极晶体管埋层、发射区及高电导薄层电阻的制作等。还利以发展吸杂、隔离、材料改性等多种新的应用。

【干法刻蚀工艺】利用低压气体放电形成的等离子体,以极高的保真度将光刻形成的抗蚀剂图形刻蚀转换到芯片上的技术,又叫做等离子体辅助刻蚀,简称干刻蚀。它是相对于传统的湿法化学腐蚀而言的。由于干刻蚀具有很强的各向异性腐蚀能力,也就是说当腐蚀穿一层材料时,其垂直腐蚀速率远大于横向腐蚀速率,从而保证高分辨率图形的转换,刻蚀出高精细高保真度的芯片图形。平常所说的等离子体辅助腐蚀包括溅射腐蚀,反应离子束腐蚀,反应溅射腐蚀,等离子体腐蚀,以及离子束铣蚀等多种干法腐蚀技术,总称等离子刻蚀。这些方法之间的差别在于放电条件的特殊性、气体类型、以及装置的不同。它们的共同点就是“放电”,即通过低压 (10^{-4} — 10^{+1} 托) 放电,产生离子、电子、中子所组成的

部分离化气体。等离子体刻蚀也会引起辐射损伤、系统杂质玷污、反应聚合物淀积等副作用。通过对干刻蚀过程中的气体成分、气体压强、芯片温度、等离子体工作频率等诸多工艺参数的精确控制,可以获得所需的腐蚀速率、选择性、重复性和各向异性等工艺特性,制作出所需的芯片图案。

【电子束曝光技术】采用电子束曝光系统刻蚀亚微米级几何图形的集成电路芯片的技术。一般分辨率小于 0.5 微米,层间套刻对准度为 ± 0.2 微米。其分辨率极限优于 0.1 微米。由于刻蚀过程中存在所谓临近效应,限制了最小线宽的图形设计精度。所谓临近效应,系指由于电子束的散射作用,使一个刻蚀图素之内的曝光剂量受到邻近图素曝光的影响。另外,电子束刻蚀的大园片加工吞吐量较低;高精度电子束曝光必须配备以高精度干法刻蚀工艺。至今,它仍是刻蚀亚微米级线条图形和超大规模集成电路的主要工艺技术。

【X 射线曝光技术】利用波长为 4—50 埃的 X 射线曝光系统进行非接触式曝光,完成图形影象复印的集成电路芯片刻蚀技术。它可以克服普通光学刻蚀技术的衍射效应,也不存在电子束刻蚀的临近效应。分辨率优于 0.5 微米,对准度达 ± 0.5 微米,分辨率极限 ≤ 0.1 微米。是同时可获得亚微米级高分辨率和高的大园片加工吞吐量的最佳刻蚀技术。但存在掩模制作困难的问题。

【聚焦离子束技术】利用聚焦离子束装置,可取代高分辨率曝光和干法刻蚀双重功能,对芯片一次性同时完成二维量子尺寸加工和图形掺杂的精细加工技术。由于离子质量比电子的大得多,散射

比电子弱得多，故不存在临近效应，可以获得比电子束更高的分辨率。同时，离子束可以用作聚焦束直接对抗蚀剂膜描绘图形。实际上，聚合物通过注入离子可以用作负型抗蚀剂，在合适的等离子体中经反应离子腐蚀之后，抗蚀剂已注入离子区域形成非挥发性化合物，留下，未注入区则被腐蚀掉，这样来完成精细加工。问题是这种直接描绘的速度慢，经济实用上没有吸引力。200Kev 氢离子束曝光的极限分辨率可达 0.1—0.2 微米。若采用隧道穿透效应法，离子束曝光的分辨率极限不难达到 0.1 微米或更小些，其侧向分辨率可达 400 埃。原子尺寸级细聚焦离子束技术是新近发展的一种颇有应用前景的高技术。

【VLSI 电子学物理效应】研究和开展超大规模集成电路(VLSI)材料、器件、电路和工艺中所发现和依据的种种物理现象和效应。主要的有：空间电荷效应，表面电场效应，调制掺杂效应，小尺寸量子效应（或短沟道效应），热载流子效应，弹道效应，及约瑟夫逊效应等等。它们既是研究 VLSI 电子学和微电子技术的物理基础，也是为 VLSI 电子学和微电子技术的发展开辟新的前景所必须探讨的一些已知或未知物理现象的客观规律。

空间电荷效应：当半导体内局域之间存在电势不等时，该系统将通过局域之间交换载流子，使之达到电势相等、趋于热平衡而产生空间电荷区的现象。它是构成半导体 PN 结理论和结型器件的物理基础。

表面电场效应：当垂直于半导体表面外加一电压时，一旦电压发生变化，半导体表面的电荷分布与电场亦随之发生变化的现象。它是 MOS 和 MIS 器件结构和工作原理的物理基础。

调制掺杂效应：在突变异质结中，通过宽、窄带隙半导体的

选择掺杂，即只在宽带隙半导体中掺杂，窄带隙半导体中不掺杂，由于两者中的电子亲和力不同，致使未掺杂窄带隙半导体一侧附近产生窄势阱，将掺杂宽带隙半导体中的载流子陷入其中，形成所谓二维电子（或空穴）气，产生电荷转移效应。它是二维电子器件或 HEMT 的物理基础。

小尺寸量子效应或短沟道效应：在 VLSI 的发展中，集成电路按等比例缩小，而且器件的最小尺寸进入亚微米级时，所相应产生的一系列特殊效应。它们包括有：载流子速度饱和效应，高功耗密度效应，高电流密度效应，迁移率下降效应，自锁效应，热电子效应，源漏寄生电阻效应，反型层厚度效应，漏感应势垒效应，亚阈值效应，电荷分配效应等。

热载流子效应：强电场（小于发生碰撞电离的临界电场）作用下，电子由电场作用所获得的能量，不能在每次散射中耗散掉而随电场作用时间相累增，致使电子系统因一新的散射机制而达到一新的稳定态，从而使电子能量比平衡态时高，亦即强电场下电子系统温度高于晶格温度的现象。它是短沟道效应的现象之一，是设计热电子晶体管的物理基础。

弹道效应：在低温下的高迁移率半导体中，电子飞越小尺寸器件的渡越时间短于两次相邻碰撞之间的平均自由时间，电子以近乎弹道的方式在器件内运动，也就是说，电子在小尺寸器件内的整个飞行过程中不发生任何碰撞事件的输运现象。它是设计弹道（电子）晶体管的物理基础。

约瑟夫逊效应：它是弱耦合超导体中产生的一种物理效应，亦即在超导体—绝缘体—超导体（SIS）结构中，绝缘体足够薄时，即使两超导体之间不存在电势差，处于超导态下的超导体内载流子（电子对）也会以隧道方式由这一超导体流向另一超导体的现象。

这是英国物理学家约瑟夫逊从理论上于 1962 年首先提出的,1963 年得到安德森 (P. W. Anderson) 和罗威尔 (J. M. Rowell) 的实验证实。它是超导电子器件和超导 VLSI 电子学的物理基础。

【VLSI 电子学的基本极限】在超大规模集成电路发展过程中,提高集成度、工作速度、逻辑功能、降低功耗所遇到的基本物理限制和工程限制。主要包括:工艺极限,材料极限,物理极限,器件极限,电路极限,及经济极限等。工艺极限指与材料性质、器件参数、微细加工技术相关的极限,特别是亚微米、纳米级加工技术所带来的各种工艺极限。材料极限指由各种微电子材料的物理性质所决定的限制。各种固态材料本身往往兼有电、磁、光、声、热等各类物理效应,综合利用这些效应,并研究发展超晶格微结构为代表的新一代半导体及超导体等新型材料,从而使材料极限又有了新的突破。物理极限指基于自然界遵循的且无法逾越的物理原理和定律而导致的种种极限。如速度极限,能量极限,量子极限,热力学极限,及噪声极限等,它们与具体器件结构无关,但却限制着器件的性能和几何尺寸。器件极限,包含理论极限与实际极限两种。理论上,如 GaAs、InP,比 Si 的迁移率高约 2—20 倍;实际上,由于刻蚀等微细加工限制,这种理论极限难以达到。当线条加工精度细达 0.1 微米以下时,现有理论的有些基本概念将不再适用,而许多原来认为可以忽略不计的次级效应,则上升为一级效应,必须加以考虑,比如:短沟道、窄沟道效应等。电路复杂性极限,指芯片设计中的重复单元超量、电路复杂性骤增所引起的问题,涉及到可靠性、测试手段和冗余度等相关的限制。经济极限主要指 VLSI 芯片的价格与成本方面的限制。由于 VLSI 必得投入巨额的人力、物力,带来成本回收率风险问题,所以它

与市场直接相关，是 VLSI 总成本的反映。

【硅谷】位于美国旧金山海湾南端，微电子工业的发祥地。它原系距旧金山商业繁华区大约 50 英里的一片地势平坦的沼泽地，圣克拉拉山谷平地。由于集成电路、微电子工业飞速发展源于该地区，许多集成电路公司的总部和数十家电子、计算机公司集中于该地区，且以发明、研制和生产各种以硅为基础材料的硅器件、硅集成电路直到超大规模集成电路、微机、电脑等闻名于世，故名。约定俗成，世界其他有些国家，也将集中研制、生产硅器件、硅集成电路等的微电子工业中心地带，沿用称之为 $\times\times\times\times$ 的“硅谷”。

人工改性半导体技术

【超晶格微结构】利用现代超薄层生长技术，按照人工剪裁能带结构的设计，将两种或两种以上组分或掺杂不同、薄层厚度达原子尺度的单晶膜，周期性地交替叠合在一起的多层结构半导体。由于它完全是人工设计和控制的，是自然界中原本不存在、性质全新的，故又称作“人工改性半导体”，涉及到它的有关材料、器件、工艺制造及应用技术，通称为“人工改性半导体技术”。“超晶格”概念是 1969 年由美国 IBM 公司日本科学家江崎（Esaki）和华裔科学家朱肇祥首先提出的，但未能实现。1972 年华裔科学家

张立纲利用分子束外延技术 (MBE) 予以实验实现。至今, 超晶格微结构材料的种类已不下数十种, 成为近 20 多年来迅猛发展起来的举世瞩目的新一代半导体。它们一般归为三大类, 即组分超晶格、掺杂超晶格和应变层超晶格。超晶格微结构的最基本特征是: 其中电子和空穴的运动由通常体材料的三维运动转变成低维 (二维、一维、及零维) 运动。由此而产生出一系列新奇、独特的物理效应和现象, 并利用以开发出结构新颖、性能优异的新型光电子、超高速、微波及智能器件, 应用这些器件开拓出新一代的计算机、光计算机、光通信、及超高速大容量信息处理系统等现代科学技术。

【能带工程】按照预想的目标来设计和制作所需能带剪裁结构及物理性质的超晶格微结构的技术。实现能带工程的途径大致有两类: 一是通过改变组分和掺杂, 实现能带剪裁图形, 这样制得的属组分超晶格和掺杂超晶格; 一是通过应变层结构克服晶格失配, 以实现能带剪裁图形, 制得应变层超晶格。有时两者兼而用之, 制得复型超晶格。从这个意义上说, 能带剪裁设计已成为一个工程问题, 故名。

【能带阶跃】两种组分不同的半导体在异质结界面处的导带底 E_C 及价带顶 E_V 的能量差 ΔE_C 及 ΔE_V , 分别称作导带阶跃 ΔE_C ($\Delta E_C = E_C^2 - E_C^1$) 及价带阶跃 ΔE_V ($\Delta E_V = E_V^2 - E_V^1$)。一般说, 导带阶跃和价带阶跃也等于异质结中两种能隙不同的半导体的电子及空穴亲和势之差。由于空间电荷效应, 它们使异质结界面附近产生渐变性能带弯曲, 并决定着电子和空穴势阱的深度。导带阶跃和价带阶跃两者的大小、符号、及由之决定的能隙差 ΔE_g ($\Delta E_g = |\Delta E_C$

$|+|\Delta E_v|)$ ，三者是确定异质结超晶格（即组分超晶格）类型及性质的基本要素。因此，它们是表征异质结材料、特别是超晶格的特征与性质的重要参量。亦译称为能带不连续性或能带偏移，及导带（价带）不连续性或导带（价带）偏移。

【组分超晶格】由两种能带结构不同的半导体超薄膜周期性交替叠合而成的超晶格微结构，又称异质结超晶格。其特性在很大程度上取决于该异质结界面处的能带阶跃特征。根据其能带阶跃大小和符号的不同，将组合超晶格分为三种类型：（1）Ⅰ型超晶格，又叫跨立型，其主要特征是两种半导体的能隙完全交叠，导带阶跃 ΔE_c 与价带阶跃 ΔE_v 反号，如 GaAs/AlGaAs、InP/InGaAs (P)、GaSb/AlSb、GaAs/GaP 等。它们是研究最早、最广泛的超晶格材料，当前超晶格量子阱器件的研究主要集中于这一类；（2）Ⅱ型，或ⅡA型、ⅡB型超晶格，又叫错开型、破隙型，其能隙部分交叠或完全分开， ΔE_c 与 ΔE_v 同号，如 InAs/GaSb、InGaAs/GaSbAs、InP/AlInP 等，这类超晶格由于能带的交叠，使材料的导电性在一定条件下会从半导体过渡到半金属；（3）Ⅲ型超晶格，又叫零隙型，为零能隙材料，如 HgTe/CdTe 等，是用作两个红外大气窗口（3—5 微米，8—14 微米）远红外探测器的好材料。

【掺杂超晶格】由同一种半导体材料的 N 型及 P 型掺杂超薄层周期性地交替构成的超晶格。实际上在 N 层与 p 层之间均夹有本征 i 层，故又称为 nipi 结构。其优点是不存在容易产生缺陷的异质结界面。它的独特性质在于电子和空穴势阱在空间上是分离的，在外界条件（或光照或注入）作用下，其有效能隙、载流子浓度、复

合寿命等均可在较大范围内调制。因而使这种材料的电导率、吸收系数、折射率、发光光谱及增益等性质均可随光照或外场而改变，可用以制作新型的光探测器、可调光源、光调制器、光放大和光双稳等器件，是令人十分感兴趣的材料。原则上，任何半导体材料都可以构成这种掺杂超晶格。将掺杂超晶格与组合超晶格按不同的方式组合在一起，还可设计制备出能带结构更复杂、性能更独特的掺杂组分超晶格。

【复型超晶格】由晶格常数差别不大、而能隙相差较大的三种不同半导体超薄层材料组成的周期性多层结构。这是江崎等首先提出的。它的能带结构兼有Ⅰ型和Ⅱ型两类超晶格的特点，通过它们不同的组合，可以得到不同的量子态和不同的光、电学特性，成为一种电学可控制的介质。如：AlSb（晶格常数 $a_0 = 6.136\text{\AA}$ ， $E_g = 1.6\text{eV}$ ），GaSb（ $a_0 = 6.095\text{\AA}$ ， $E_g = 0.68\text{eV}$ ），InAs（ $a_0 = 6.058\text{\AA}$ ， $E_g = 0.36\text{eV}$ ），分别以 A，B，C 代表，则可组合成 ABCABC、ABAC、ACBC 等多种复型超晶格材料。

【应变层超晶格】由晶格常数差别较大、而其层厚小于产生失配位错临界值的两种（或两种以上）超薄层材料交替组成的超晶格结构。其特点是：只要晶格失配的各层厚度小于产生失配位错的临界值，则其层间的晶格失配可由晶格的弹性应变来调节，使超晶格界面上不出现失配位错，且晶格常数趋于相等。这样，那些晶格失配大到 7% 的材料，也可以制出高质量的超晶格。从而大大拓宽了超晶格组分材料的选择范围，为设计创造各种特殊结构的新型超晶格开拓了广阔的道路。由于应变层超晶格各层存在应力应变，其应变大小可通过层厚和合金组合来调节改变，因而应变层

超晶格的量子化能级、有效能隙、以及它们的光、电特性都可通过应力、层厚、及合金组分而加以改变。所以，这种超晶格除了具有许多有用的特殊性质外，也是唯一与硅材料、硅集成技术工艺相兼容的异质结超晶格材料，发展潜力令人瞩目。如 Ge-Si、GaAs/Si、InGaAs/GaAs 等应变层超晶格，均已成功地制作出高质量、高性能的光电子及超高速器件。

【短周期超晶格】层厚仅为几个原子层的超晶格结构。如 $(\text{GaAs})_m/(\text{AlAs})_n$ 超晶格 ($m, n < 10$, 分别表示组成 GaAs 及 AlAs 的分子层数), 特别是 $m, n = 1$ 的超晶格完全是 GaAs 和 AlAs 分子新的周期排列, 其晶体结构、能带结构和物理性能与通常的 GaAs/AlGaAs 超晶格有很大的差别, 这在物理研究和实际应用上很有意义。

【量子阱、量子线、量子点】在超晶格微结构中, 其载流子运动在一个空间方向上受到限制, 而在垂直于该方向的二维平面内仍可作自由运动, 这种微结构称作“量子阱”。若载流子运动在二个空间方向上都受到限制, 只在垂直于该二维平面的方向上才可作自由运动, 这种微结构称作“量子线”。若载流子运动在三个空间方向都受限制, 只能在原子尺度 (几十、几百埃) 的小空间内运动, 这种结构便称作“量子点”, 又称“量子盒”或“量子箱”。它们的能量态密度都不同于体材料的 (抛物线状), 比如: 量子阱中载流子的能量态密度呈台阶形态密度; 量子线的呈锯齿形态密度; 量子点的呈 δ 函数分布。同时, 它们也表现出不同于三维系统的相应的新的物理性质及量子尺寸效应, 即低维 (二维、一维、零维) 系统的电子态、载流子输运特性、以及诸如量子霍尔效应、电子局

域化效应、共振隧穿效应、光谱兰移效应等等，并由此而开拓出一系列新型的光电子、超高速及微波器件。这是器件有源结构尺寸缩小至原子尺度的一种合乎逻辑的结果。

【半导体超薄层材料生长技术】能交替重复地生长出层厚达原子层量级、层数可达几十、上百层的高纯完整单晶薄膜的多层微结构半导体的生长技术。传统的半导体薄膜生长技术，如汽相外延、液相外延等，其层厚的控制精度极限只能达 0.1—0.2 微米，难以用来制备超晶格材料。只是在 70 年代初，美国贝尔实验室华裔科学家卓以和等发展了分子束外延 (MBE) 技术后，才得以实验实现。当前，可以制备超晶格材料的超薄层生长技术有：分子束外延 (MBE)、金属有机化合物化学汽相淀积 (MOCVD)、化学束外延 (CBE)、原子层外延 (ALE) 等技术。

【分子束外延 (MBE)】基于真空蒸发原理而发展起来的、超高真空条件下生长超薄层材料的精控蒸发技术，简称 MBE。MBE 是 70 年代初贝尔实验室华裔科学家卓以和等创立发展的。MBE 设备主要由超高真空生长系统、材料生长过程控制系统和监测分析仪器等三大部分组成。由于 MBE 具有生长速率慢、生长温度低、扩散效应小等特点，因而可以精确控制外延层厚度、组分和掺杂分布，并使外延层表面及界面达原子级的平整度。新近发现和发展的 RHEED (高能电子衍射仪) 强度振荡技术，可以实现单原子层厚度的监控生长，这是 MBE 技术的重要改进和发展。最早实验实现超晶格设想的就是采用了这种 MBE 技术。

【金属有机化合物化学汽相淀积 (MOCVD)】以金属有机化合物和

氢化物为主要源材料，利用热化学反应由汽相进行薄膜晶体生长的超薄层制备技术，简称 MOCVD。MOCVD 设备主要包括四大部分，即气体源及其输运控制系统，反应室及衬底高频感应加热系统，尾气处理与排放系统，及安全监测系统。与 MBE 相比，MOCVD 的主要优点是采用气态源，生长速率快，有利于大面积生长和批量生产。但其生长材料质量及精度尚不如 MBE，特别是所用的气体源材料有毒、易燃，要特别注意安全。利用 MOCVD 在硅上生长 III—V 族化合物是目前世界竞相研究的热点。

【化学束外延 (CBE)】基于并结合 MBE 和 MOCVD 两者的主要优点而新发展的以气态源取代固态源的类 MBE 技术，简称为 CBE。依照所使用的气态源的不同，CBE 还可区分为气态源分子束外延 (GSMBE) 和金属有机分子束外延 (MOMBE) 技术。CBE 设备的基本特征仍属 MBE 类型，但其源材料及其输运控制系统是 MOCVD 的气态源系统。若只是用 AsH_3 、 PH_3 等 V 族元素的氢化物取代固态 V 族元素 As、P 等作源材料，则称作气态源分子束外延，简称 GSMBE。若只是用 III 族金属有机化合物 (如 TMGa 、 TMIIn 等) 取代 III 族元素 Ga、In 等作为源材料，则称为金属有机分子束外延，简称 MOMBE。CBE 除兼有 MBE 和 MOCVD 两者的优点外，它还可以生长 MBE 难以控制生长而应用却十分重要的磷化物超晶格材料，能消除 MBE 材料中常出现的由固态 Ga 源引起的椭圆形缺陷，而且材料均匀性较好。所以，对于超薄层材料生长技术，应强调 MBE、MOCVD、及兼具两者之长的 CBE 技术。

【原子层外延 (ALE)】使参与反应的气态源交替地分别以脉冲方

式射向衬底，进行单原子层或单分子层生长的超薄层外延生长技术，简称 ALE。其外延生长过程是：首先使气态源 AB 到达衬底表面，在适当的温度和流量下，在表面形成 AB 单分子层的吸附；第二步是净化反应室，将多余的或物理吸附的 AB 分子抽走，以防止 AB 和下一步进来的 CD 混合；第三步引入 CD，与化学吸附在衬底表面的 AB 发生化学反应，在表面生成一层固态分子层 AD；再一步将过量的 CD 和反应物抽走。这四步构成 ALE 的一个循环，重复这样的循环反应则形成一层一层的外延生长，直达设定的厚度，其厚度取决于淀积的周期数和晶格常数。各种生长参数，如束流强度、入射时间、束流均匀性及稳定性等，它们对 ALE 生长过程的影响都不大。因此，比起别的方法，ALE 法可以获得更为平整的原子级界面和表面，晶格完整性更良好，均匀性、重复性更好。迄今，用 ALE 方法已生长成功多种 III—V、II—VI 族化合物超晶格和 IV 族 Si—Ge—Si 超晶格等。

【高电子迁移率晶体管 (HEMT)】利用调制掺杂突变异质结界面存在的、电子迁移率极高的二维电子气来工作的超高速微波场效应晶体管，简称 HEMT，又名“二维电子气场效应晶体管”。由于采用了调制掺杂工艺，故又称作调制掺杂场效应晶体管。在调制掺杂突变异质结界面中，电子将从掺杂的 N 型宽带半导体转移到亲和力较大的未掺杂的窄带半导体中，且因异质结势垒的限制而使电子局限在平行于界面又位于界面附近的二维平面薄层内作自由运动，在垂直于该平面的方向，则受势垒限制而处于非常窄的势阱之内，将这样的电子系统称之为“二维电子气”。在 MOS 结构、半导体异质结、以及超晶格微结构中，都会存在这种二维电子气，若半导体是 P 型，载流子反型，则形成完全相类似、但反

型的“二维空穴气”。在调制掺杂异质结构中的二维电子气，它最突出的特征在于它们与其离化施主母体在空间上是分开的，大大减少了离化杂质的散射作用，所以可以获得非常高的电子迁移率，比一般体材料的迁移率要高达几个数量级。所以 HEMT 具有优异的超高速和微波性能，在超高速、超大规模集成电路中有重要应用。若与超导约瑟夫逊效应、超导近临效应相结合，可发展成为超高速与低功耗相结合的新型二维电子气超导场效应晶体管，兼有优异的光、电、磁、热特性，在光计算技术中将有重要应用。HEMT 的工作原理与硅 MOSFET 大体相同，其结构设计则类似于 GaAs MESFET。典型的 HEMT 结构为半绝缘 GaAs 衬底层/未掺杂 GaAs 沟道层/未掺杂 GaAlAs 隔离薄层/ N^+ -GaAlAs 层/ N^+ -GaAs 顶层，栅极制作在 N^+ -GaAlAs 层上，在栅极两侧的 N^+ -GaAs 顶层上制作源、漏极，源、漏区是对称式结构，具有互换性。常见的 HEMT 器件结构有：肖特基势垒栅结构，绝缘栅结构，PN 结型栅，倒置结构，双异质结构，超晶格结构，多沟道结构，脉冲掺杂结构，以及作互补器件用的 P 沟道高空穴迁移率晶体管 (HHMT) 等。HEMT 器件结构设计和参数选取的原则，都旨在提高其二维电子气密度及电子迁移率，兼而获得高增益、高跨导、低功耗，并尽量消除阈值电压的光照漂移及电流—电压特性的失真现象。

【超晶格 HEMT】 利用超晶格结构替代典型 HEMT 中的 N^+ -GaAlAs 而制成的新型 HEMT。典型的 HEMT 中，由于掺 Si 的 N^+ -GaAlAs 层内存在着深能级 DX 中心，它是普通 N 型施主与某种未知缺陷（如 As 空位）所构成的复合体。低温下，HEMT 阈值电压 V_p 随光照漂移，以及电流—电压特性失真，都可能与该

DX 中心有关；加之， N^+ -GaAlAs 层的掺杂上限浓度低，离化能大，表面缺陷多，都不利于获得高二维电子气密度。当以超晶格替代 N^+ -GaAlAs 层后，实验表明：低温下，不论有无光照，其二维电子气密度基本不变；且抑制了阈值电压 V_p 漂移，基本消除电流—电压特性失真现象；同时，超晶格层 N-GaAs 掺杂上限浓度高，杂质离化率大，掺杂重复性好。所以，超晶格 HEMT 可以获得更高的二维电子气密度和电子迁移率。

【热电子晶体管】利用量子阱结构中的热电子效应制成的晶体管。所谓热电子效应，是指在强电场作用下，半导体中的载流子可获得很大的能量（注意：此强电场仍小于发生碰撞电离的临界场），且在每次散射之后仍剩余相当的能量，并逐渐累加增大，由此导致电子平均能量随电场增强最终都转移到较高的能谷，趋于高于晶格温度的新的稳定态，也就是说电子系统达到高于晶格温度的一个较高温度状态，这种现象叫做热载流子效应，或热电子效应。其结果，使电子系统在新的散射机制作用下，漂移速度和迁移率降低，产生负微分迁移率现象。将这种强电场作用下温度高于晶格温度的电子系统，叫做热电子，或热载流子。对于亚微米加工制得的超高频和高频器件，尤其是 GaAs 器件和超晶格量子阱结构，由于较强的电场作用和很快的瞬态响应，使得热载流子效应（或热电子效应）在这些器件和结构中有较大的影响，表征出很重要的突出的特征。将量子阱结构应用到异质结双极晶体管（HBT）结构中，便可构成热电子晶体管，已利用它制出门延迟仅 1.9ps /门的超高速环形振荡器等。

【弹道晶体管】利用量子阱结构中的弹道电子效应，将量子阱结构

应用到异质结双极晶体管结构中所构成的超高速器件。所谓弹道电子效应（又简称弹道效应），是指低温下的高迁移率半导体中，其电子飞越小尺寸器件结构的渡越时间小于两次碰撞之间的平均自由时间，或者说，载流子的平均自由程大于器件的尺寸长度，在这种条件下，电子在器件内的运动近乎弹道式的，即电子在器件内的整个飞行过程中不发生碰撞事件，这种输运现象叫做弹道电子效应。1985 年贝尔实验室宣布研究成功弹道晶体管，电子渡越时间仅为 0.03ps ，是当时世界上速度最快的晶体管。由于弹道晶体管具有非常短的渡越时间，故具有建立超高速、低功耗集成电路的潜力。

【共振隧穿晶体管】利用超晶格量子阱的共振隧穿效应，将量子阱结构加到异质结双极晶体管（HBT）的基区上所构成的负阻高速器件，简称为 RBT。所谓共振隧穿效应，是指在超晶格量子阱结构中，载流子有一定的穿透势垒的几率，而当载流子能量与阱内量子化能级一致时，其穿透率达极大，这种现象叫做共振隧穿效应。当发生共振隧穿现象时，其电流—电压曲线上出现电流峰值，若再加大外加电压，则隧穿几率减小，且电流下降，即出现负阻特性，或者说产生负阻效应。利用这种负阻效应可以做成多种高频、超高速负阻器件。应用共振隧穿晶体管可以作成振荡器、放大器、开关及超高速、超高频晶体管。

【量子阱激光器】以量子阱结构作为有源区的半导体异质结激光器。其结构特征是，在普通双异质结激光器的 N—型光限制层与 P—型光限制层之间夹入一不故意掺杂的量子阱有源层。由于在量子阱内，载流子能量的量子化，态密度呈类阶梯形分布，使量

子阱激光器具有一系列的优越特性，如极低的阈值电流密度和阈值电流，弱的阈值电流温度依赖性（或者说特征温度 T_0 高，良好的阈值电流温度稳定性），优异的偏振性能，波长可调等。所以，是公认的理想激光器，可广泛应用于光盘、光印刷、激光光泵、及光通信等技术领域，特别是，从光互连应用着眼，应以发展极低阈值、高速率、面发光量子阱激光器为主要研究方向。

【量子阱光探测器】以超晶格量子阱材料做成的雪崩光电二极管所构成的光电探测器。低噪声、高增益的雪崩光电二极管，要求其电子和空穴的离化率之比 α/β 必须尽量大。普通的硅雪崩光电二极管，其 α/β 约有 20，但只适用于波长小于 $1.06\mu\text{m}$ 光波范围。采用 III—V 族化合物半导体，由于它们的 α/β 近乎 1，彼此相差太小，故严重影响器件噪声特性。当用 III—V 族超晶格量子阱结构制成雪崩光电二极管时，由于电子势阱比空穴势阱深得多，当电子和空穴在外场作用下通过异质结界面时，电子与空穴各自突然增加的能量相差非常大，也就是说，电子因获得很大能量而形成雪崩倍增，空穴则因获得的能量很小而致其离化率基本不变，从而使其二者的离化率之比 α/β 大大增加，类似于光电倍增管。这就为制作波长范围不同于硅雪崩器件的、噪声低、增益高的超晶格雪崩光电二极管和光电探测器提供了物理基础。利用各种类型的超晶格量子阱材料，可以制备出波长覆盖范围很宽、性能优异的光电探测器件。从而，使超高灵敏度、高性能光接收机将变成现实，进一步促进光通信、光制导技术的发展。

【量子阱光双稳器件】利用多量子阱材料的室温激子的非线性光学效应构成的室温光双稳开关器件。由于多量子阱材料中二维激子

束缚能要比体材料中的三维激子的高 3—4 个量级,所以,量子阱中室温下有激子存在,并具有显著的激子效应,即当入射光能量与激子能量相当时,会出现很强的激子共振吸收,光吸收系数很大 ($\sim 10^4 \text{cm}^{-1}$),自由激子离化时间非常短 (ps 量级,约 0.3 皮秒),低的光功率下,激子共振吸收会很快达到饱和,呈现出很强的饱和与吸收的非线性光学效应。利用量子阱材料这种激子离化时间短和光学非线性系数大的特点,可以制作室温工作的低功耗超高速非线性光学器件。例如,将量子阱材料作为非线性介质,在其两面镀以高反射膜,形成法布里腔,便可构成一种光控制的光双稳器件。其原理是:若增加光强,折射率随之改变,当达到与法布里腔共振时,则会由原来的低光场、低透射状态转变为高光场、高透射状态,由此构成光双稳开关器件。其响应时间小于微微秒 (ps),开关能量仅为 10^{-12} 焦耳。现已研制出 100×100 光双稳开关阵列器件。

【量子阱自电光效应器件 (SEED)】利用反向偏置的 PIN 多量子阱结构 (由多量子阱构成 I 区) 的探测与调制性能,并将两种作用结合起来所构成的光双稳态器件,简称 SEED。它可以同时当作调制器和探测器使用。在量子阱材料中,由于激子束缚在很窄的阱内,很小的偏置电压就可以在阱内建立起很高的电场强度,改变电场可以十分灵敏地调制入射光的强度、相位和波长。可用来制作低功耗、高灵敏的电光调制器、解调器和光双稳开关等。其特点是功耗很低、开关能量小、易于阵列集成化。在光通信、光信息处理、及光计算等技术方面有着重要的应用。美国贝尔实验室 1990 年宣布:他们采用对称模式工作的 SEED (简称为 S—SEED) 作为完成逻辑运算和存储功能的关键元件,研制成功世界第一台光

信息处理机。这对于光计算机研究无疑是一个突破性进展。

微波电子器件

【微波电子器件】用来构成微波放大器、振荡器的关键性电子器件。它分为微波电真空器件和微波半导体器件两大类。这是两类属于两种性质和结构截然不同的微波电子器件。微波电真空器，即电子管，其体积大、功耗大、制作工艺复杂、成本高、辅助装置也大、难于小型化集成化；但具有频率高、输出功率大、效率和增益均高、频带宽、耐高低温、抗核辐射能力强、性能稳定可靠等优点。微波半导体器件，包括各种微波晶体管和二极管，其体积小，重量轻，耐冲击振动，宜大批量生产，成本低，工作电压低，易于小型化集成化；缺点是频率、功率有限，稳定性和抗辐照性能差。所以在微波技术的发展过程中，两者互相竞争而又各具优势。近年来，真空器件和微电子微细加工技术相结合又产生了新的真空微电子器件。采用“尖端放电效应”冷电子发射及极间距离极小电极的真空微电子器件，既兼顾了半导体器件体积小、功耗低的优点，又发挥了真空器件电子速度快的优点，是一种很有前途的微波器件。

【微波电子管】基于电子与波相互作用的微波电真空器件，简称微波管。它们是在普通电子管基础上发展起来的，其共同的特点是

采用热电子发射，电子与电磁场的相互作用产生电子群聚并与微波发生能量交换，形成微波放大和振荡。微波管按电子与场相互作用的特点可分为线性束管（O 型管）和正交场管（M 型管）。在线性束管中，直流磁场与直流电场平行，且仅用来聚焦电子注。双腔速调管是最重要的线性束管，其次有反射速调管，螺旋线行波管，耦合腔行波管，前向波放大器，返波放大器。在正交场管中，直流磁场与直流电场彼此垂直。磁控管是最古老的但仍是最重要的正交场管，其他有前向波交叉场放大器、代码管，M 型返波振荡器。此外，在毫米波，亚毫米波段，还出现了利用新原理工作的微波管，其中回旋管和奥罗管是两种最有代表性的新型器件。

【回旋管】以电子回旋谐振受激辐射互作用原理（电子回旋谐振脉塞）为基础发展起来的新型毫米波器件。1958 年澳大利亚天文学家特韦斯首先提出了电子回旋谐振受激辐射的互作用原理，与此同时，苏联学者卡帕洛夫也独立提出了考虑到相对论效应的螺旋电子注与电磁场互作用的新概念，1965 年美国学者赫希菲尔德做了较完整的回旋波实验。在截面缓变的波导中，利用螺旋电子注和接近截止频率的电磁波发生互作用的后向波谐振脉塞，称为回旋管。最简单的是回旋单腔管，其他还有回旋速调管，回旋行波管，回旋返波管、回旋磁控管等，即凡是普通微波管具有的品种，都有相应的回旋管。目前已制成了 1 兆瓦级的 45 吉赫和 100 吉赫的回旋管。

【奥罗管】以史密斯—帕塞尔效应为基础发展起来的新型毫米波器件，称为绕射辐射器件，简称奥罗管，又称“来达管”。所谓史密斯—帕塞尔效应是指电子注沿光栅运动时产生电磁波绕射辐射的

现象。电子绕射幅射电磁波，如果再用准光学腔将这种辐射反馈到电子注中，则电子注在纵向高频场作用下产生群聚。奥罗管采用准光学谐振腔作为谐振系统，具有一系列优点，即：谐振腔尺寸不再受与波长共度原则的限制；利用常规的电子注就能在毫米波，亚毫米波提供起振和工作所需的电流；工作频率在宽频带内连续可调等。因此，奥罗管是一种极有前途的宽频带中、小功率毫米波器件。目前在 4 毫米下输出 10 瓦，在 0.85 毫米下输出数十毫瓦。

【微波二极管】工作于微波波段的各种半导体二极管的总称。微波二极管种类多，用途广，在微波半导体器件中占有重要的位置。微波二极管按器件的特性类型分为：具有非线性电阻的变阻管，如点接触二极管，反向二极管和大部分肖特基势垒二极管；具有非线性电抗的变容管；如变容二极管及阶跃恢复二极管；可控阻抗的 P—I—N 二极管；负阻二极管，如隧道二极管，碰撞电离雪崩渡越时间二极管，体效应负阻二极管。按器件的结构分为：点接触；P—N 结；肖特基势垒；金属绝缘体半导体（MIS）或金属—氧化物—半导体（MOS）二极管等。这些二极管在不同微波电路中（例如检波、放大、振荡、调制、上变频和下变频）各有其特殊的用途。

【P—I—N 二极管】重掺杂 P 型层和 N 型层之间有一层宽间隔本征层（I 层）的半导体二极管。当二极管反向偏置时，这个 I 层有很高的电阻率；但当二极管正向偏置时，由于 P 区和 N 区的运动载流子注入到 I 层，电阻率急剧下降，其阻值与正向电流有关。这类二极管在微波波段内是一种准线性阻抗，其值由直流或低频偏

压来控制,故又称可控阻抗二极管。由于 P—I—N 管可控功率大,损耗小,所以是一种很重要的微波控制元件,在微波开关、微波保护装置、微波功率调制器及控制信号幅度用的可变损耗器中被广泛的使用。

【变容二极管】作为可变电抗电路元件使用的半导体二极管。二极管结电容接近一个理想的非线性电抗元件,非线性电容可以采用 P—N 结或肖特基结形成。这种非线性特性可以产生三种本质上不同的效应:其一,通过外加电压改变电抗,用作微波信号的调谐、开关或调制,如常见的频率电调谐器;其次,利用非线性特性产生外加微波信号的谐波,制成固体微波源;第三,用两个频率不同的微波信号进行参量放大,或将其中一个信号上变频,典型应用是低噪声参量放大器。相应地,变容二极管也分为电调谐变容管、功率变容管及参放变容管。表征变容管质量的重要参数是它的优值,及截止频率 f_{cv} , 品质因素 Q_v 。为了提高变容管性能,应尽量降低它的串联电阻,尽量减小寄生参量和反向漏电流。

【阶跃恢复二极管】利用少数载流子储存及快速恢复特性的 P—N 结二极管,又称急变二极管。在某些应用中,注入电荷的贮存电容(又称扩散电容)也很重要。电荷贮存电容的先决条件是结在正向偏压能注入少数载流子,亦即空穴从 p 区向 n 区注入,或电子沿相反方向注入。另一个要求是注入的电荷在反向偏压的半周期内可能恢复。当设计了最佳的杂质分布后,这个恢复时间可以做得很小。可以把快速过渡期看作是一个含有丰富谐波的开关瞬态,从而提供在概念上与普通变容二极管工作方式不同的倍频方式。在高次倍频场合,只要求电路简单,不要求最大输出功率时,

使用阶跃恢复管倍频器。

【隧道二极管】利用隧道效应的势垒负阻二极管。它也是一种 PN 结器件,只是 P 区和 N 区具有极高的杂质浓度,而且 P 区到 N 区的过渡是突变的。略加正偏压,结的一边电子就因有量子隧道效应穿过势垒到达另一边,在正向偏压的某一部分出现负阻;而在相当小的反向电压时,就有很大电流。工作于负阻区的隧道二极管通常称为江崎二极管,可按有源器件当放大器和振荡器使用;利用大的反向电流及零偏压点附近的非线性特性工作的称为反向二极管,可作为变频器、检波器等无源器件使用。隧道二极管利用多数载流子的隧道效应工作的,从本质上讲,它是一种极高速器件,又是一种低功耗器件。此外,这种器件还具有低噪声的优点。但是,由于它是两端负阻器件,它的负阻频带又很宽,因而就存在不稳定性现象的危险性,还有,饱和功率电平也低。

【雪崩二极管】利用半导体 PN 结中雪崩倍增效应和载流子渡越时间效应产生负阻特性的二极管。这一器件的理论是美国 W. P. 里德于 1958 年提出的,故又称里德二极管。雪崩振荡器有二种不同的工作模式,一是崩越 (IMPATT) 模式,即碰撞电离雪崩渡越时间工作模式,另一是俘越 (TRAPATT) 模式,即俘获等离子体雪崩触发渡越工作模式。里德二极管是崩越模式工作的,基本上是一种 $N^+-P-I-P^+$ 结构,碰撞电离载流子漂移的渡越时间效应在微波频率上产生负阻,因而一个直流电压就能产生微波振荡。这种模式的典型直流—射频变换效率为 5—10%,硅二极管的工作频率高达 100 吉赫。俘越模式首先由德洛赫等人报道的。典型的振荡器是 N^+-P-P^+ 或 P^+-N-N^+ 结构。碰撞电离产生的电子和空

穴所带电荷对电场分布是有影响的。故在崩越模式下，大量的电子和空穴在低场区被俘获，形成一个“等离子体”。故称俘越模式。高场雪崩带俘获等离子体并在二极管上传播，从而产生微波振荡。它是一种高效率微波发生器，典型的转换效率为 20—60%，但噪声系数较高，工作频率上限在毫米波段以下。

【体效应二极管】利用电子转移效应，具有负微分电导特性的半导体无结器件，又称耿氏二极管。1961 年，英国 B. K. 里德利，T. B. 沃特金斯首先描述了获得负微分迁移率这种新方法。1962 年，K. 希尔萨姆发展了从高迁移率能带转移到低迁移率能带获得负微分迁移率的理论。1963 年，IBM 公司的 J. B. 耿从 N 型 GaAs 与 N 型 InP 薄圆片样品中发现了耿氏效应，即行进中的空间电荷不稳定畴周期性成核和消失而引起的电流振荡现象，这种现象本质上起源于负微分迁移率。体效应二极管是用 GaAs、InP、CdTe 等材料制作的，已制成了实用的连续波工作和脉冲工作的固体微波源。最高频率几十吉赫，最高脉冲功率达几百瓦，连续波功率几百毫瓦。体效应二极管的优点是器件制作工艺简单，使用方便；它的缺点是频率高于 10 吉赫时效率较低，频率调谐范围小，频率与温度依赖关系大，噪声也大。

【微波晶体管】工作于微波波段各类晶体管的总称。一般分为微波双极晶体管和微波场效应晶体管两大类。微波双极晶体管，简称微波晶体管，通常都是 NPN 型平面结构硅三极管。为了提高工作频率，在设计时要使基极电阻、集电极电容和信号延时三个参数最小。其典型封装形式有同轴型结构及带状线型结构。微波场效应晶体管的电流只由一种类型的载流子来实现，所以又称单极晶

体管。最常见的微波场效应管是 GaAs 金属—半导体场效应晶体管 (MESFET), 又叫肖特基势垒场效应晶体管。单极场效应晶体管较之双极结形晶体管有下列优点: 输入阻抗高, 可达几个兆欧; 除电流增益外, 还可有电压增益; 效率比双极型高; 噪声系数低; 工作频率可达 X 波段。近年来, 由于 III—V 族化合物半导体, 超晶格半导体等新型材料的出现, 以及超薄层生长、微细加工等一系列新器件工艺技术的发展, 出现了很多新型器件, 其中最重要的有异质结双极晶体管 (HBT)、高电子迁移率场效应晶体管 (HEMT)、赝配高电子迁移率场效应晶体管 (PHEMT)、磷化铟绝缘栅场效应晶体管 (InP MISFET)。

【微波场效应晶体管】工作在微波波段的各种场效应晶体管。如同低频场效应管一样, 微波场效应管也有金属半导体场效应管 (MESFET) 又称肖特基势垒栅场效应管、结型场效应管 (JFET) 和金属绝缘栅场效应管 (MISFET) 三种。它与低频场效应管的主要差别在于: (1) 栅极物理结构多用金属—半导体接触 (MES), 而不用金属—氧化物—半导体接触 (MOS); (2) 材料用砷化镓 (GaAs), 而不用硅 (Si); (3) 导电机构用电子导电 (N 型), 而不用空穴导电 (P 型)。微波场效应晶体管的特征简明地可用符号表示为 N-GaAs MESFET, 它除了单栅结构外, 还有双栅结构。双栅结构有更高的增益和更小的反馈电容, 改变它的第二栅的直流电压, 可以在很宽范围内改变增益, 因此构成可控增益放大器。微波场效应管可以构成低噪声放大器、大功率放大器、振荡器、可变增益放大器、混频器、限幅器、鉴频器、脉冲再生器、激光通信用调制器、高速模/数与数/模变换器和高速逻辑电路。同时它也是微波集成电路的重要器件。因此, 微波场效应晶体管对

于微波系统的固态化、小型化、集成化、低功耗和高可靠等作出重大的贡献。

【参量器件】以非线性电抗（电感或电容）或时变电抗工作的器件。参量一词来源于“参量激励”术语，参量激励细分为参量放大与参量振荡。目前，参量放大器中最理想的器件是变容二极管。与微波电子管、晶体三极管不同，参量二极管具有电抗性属性，因而只产生极小量的热噪声。参量放大器的另一特性是采用交变的能量源。参量放大器除信号外，需一个类似于本振信号的泵源，还有一个频率为这两个信号频率之和或差的空闲电路。根据这三个信号频率的关系，参量放大器有四种工作方式：（1）参量上变频器：其特点是输出频率等于信号频率与泵频之和。（2）参量下变频器：集中频率必须等于泵频和输出频率之和。（3）负阻参量放大器：当工作低于振荡阈值时，器件起一个双向负阻参量放大器作用。（4）简并式参量放大器：信号频率等于空闲频率的负阻放大器。究竟采用何种类型的参量放大器取决于微波系统的要求。上变频器是一种单向稳定器件，具有宽的带宽和低的增益。负阻放大器是一种固有的双向不稳定器件，具有窄的带宽和高的增益。简并式参量放大器是一种结构简单的放大器。在系统应用中，如不能采用上变频器，可选择配合环行器的负阻参量放大器。当要求低噪声系数时，选择简并式参量放大器。由于参量放大器制造复杂，生产费用昂贵，因而在空载雷达系统的微波工程应用中，趋向于用场效应晶体管放大器替代参量放大器。

电子传感器

【传感器】将被测对象的某种物理量、化学量、生物量等非电信息，按一定规律转换成相应的电信息，完成信息转换和采集功能的器件。一般说，传感器由敏感元件、转换元件和处理电路三部分组成，敏感元件是核心部件。传感器种类繁多，分类说法不一，至今尚无统一的规定。一般分为结构型传感器与物性型传感器两大类。这里着重介绍后者。传感器也分为物理量传感器、化学量传感器、生物量传感器等几大类。物理量传感器的检测对象有力、光、色、声、磁、热、射线等。化学量传感器的检测对象是各种离子、气体及液体分子、高分子等。生物量传感器的检测对象有酶、葡萄糖、青霉素、尿素、蛋白质、以及复杂的细胞、微生物等生物化学物质。传感器必须由对外界条件变化敏感的材料做成，这种材料包括有半导体、金属、绝缘体、磁性材料、强电介质、以及超导体等。其中以半导体敏感性质最齐全，也用得最多。在当今信息时代，人们习惯把计算机比作人的大脑——“电脑”，传感器就是为之提供“视、听、嗅、味、触觉”等各种信息的“电五官”。在近代工农业生产、生物医学、环境科学、科学研究、以及军事技术等各个领域，传感器技术已起着越来越重要的关键作用。衡量传感器性能好坏的主要指标有：灵敏度、响应速度、选择性、稳定性、寿命、可靠性、耐极端环境能力等。当前传感器技术发展的主要趋势是传感器的集成化、固态化、多功能化、图

象化、及智能化。

【半导体传感器】利用半导体性质易受外界条件影响的种种特性和效应制成的，可以完成相应物理量、化学量、生物量信息转换功能的传感器的统称。由于半导体材料本身，或其 PN 结，或者带有相应敏感膜栅的 MOS 场效应管结构，都可以具有力敏、压敏、光敏、色敏、磁敏、温敏、湿敏、气敏、离子敏、生物敏、或辐照敏等种种敏感特性和效应，利以构成相应的敏感器件或敏感场效应晶体管（简称为敏感 FET）。所以，在传感器使用的多种材料中，半导体是敏感性质最突出、最齐全，也是用得最多的功能材料。它的主要特点是灵敏度高、响应速度快、功耗低、功能多、易于集成化和智能化。所以应用很广，发展极快，潜力最大。但也存在着一些问题，主要是：具有多感性，选择性差，稳定性未完全解决，能耐恶劣环境等。这正是当前传感器技术亟待深入解决的重要课题。但随着传感器技术的不断发展和超大规模集成电路技术的提高，半导体传感器技术必将步入一个高性能化的崭新阶段。

【力学量传感器】利用许多材料对力学物理量的敏感效应，完成力学量信息转换功能的传感器。这些效应主要有：金属等弹性体的弹性形变效应，金属、半导体的压阻效应，压电材料的压电效应及表面弹性波延迟效应，强磁性体的磁致伸缩效应，等等。利以检测各种力学量（力、力矩、压力、应力、质量等）、几何学量（位移、形变、尺寸、距离等）、运动学量（速度、加速度、角速度等），构成各种力学量传感器，如力传感器、压力传感器、质量传感器、流量传感器、流速传感器、振动传感器等等。它们广泛应用于航空航天、工业自动控制、地质考察、生物医学、军用民

用装备等各个方面。

【温敏（热敏）传感器】利用许多物质的性质均与温度密切相关的现象和温敏效应制成的,可完成热学量信息转换功能的传感器。众所周知,物质的许多特性几乎都与温度有关,如:热膨胀、电阻值、电容值、热电动势、磁性、光学性质、弹性、热噪声等等,它们各自具有不同特征的温度效应,利以制得各种可实际应用的温度计和温度传感器,比如:玻璃温度计,热电偶,热敏电阻,石英振子超声温度计,双金属温度传感器,辐射温度计,NQR 温度计,热噪声温度计,晶体管温度传感器等。它们与人们的生活、生产息息相关,从超低温、室温、高温、至超高温,范围宽,对象广,广泛应用于家用电器、医疗卫生、产业部门、科研、以及军事等各个领域。

【离子敏传感器】利用被测溶液与离子敏感膜之间发生反应时引起相应电位变化的原理制得的,可以完成离子活度转换功能的传感器。它通常分为玻璃电极、比较电极、离子电极、及离子敏场效应晶体管等几大类。它们各自的敏感机构、反应过程、和响应机理虽有不同,但前三类较为相似。它们大致都是:利用试料溶液与基准溶液或敏感膜之间发生反应而产生电动势,测出该电动势大小,则可得出被测离子的活度。所谓离子的活度,系指溶液中真正参加化学反应(或离子交换作用)的离子的有效浓度。玻璃电极,也称作 PH 传感器,按照它的液络部结构形式,分为针孔形、陶瓷管形、套筒形等类型。比较电极有补给型、无补给型之分,也改进为复合电极结构。离子电极,也叫离子选择电极,简称 ISE,分为玻璃膜、固态膜、液膜、及隔膜型离子电极等几类,以固态

膜型离子传感器在应用中居多。离子敏场效应晶体管又简称为 ISFET，它是用离子敏感膜取代 MOSFET 的金属栅电极所构成的，对被测离子具有选择性敏感效应，即通过粘接在绝缘层栅上的离子敏感膜与待测溶液中特定离子响应，在相界面上产生电位变化，以此来直接调制 ISFET 的沟道电流，从而检测出相应离子的活度。它分为涂丝（或涂层）、无机绝缘栅、固态膜、高分子 PVC 液膜、及生物膜型 ISFET 等几种类型。由于它们是综合了离子电极术和微电子技术的特点制作的，故具有响应快、输出阻抗低、体积小、重量轻、易于集成化、多功能化等优点。这些离子敏传感器广泛应用于生物医学、化工、轻工产业、科研等各个方面。

【生物敏传感器】将生物功能膜的特异性反应机理与 ISFET 的电化学转换原理相结合制成的，可完成生物量信息转换功能的传感器。已研制有：各种酶传感器、免疫传感器、微生物传感器等。酶传感器是研究最早的。酶是一种蛋白质；酶生物体功能膜由含酶的有机薄膜或凝胶所形成，由于膜内酶的催化作用，使生物体液中待测的各种有机物或无机物分子，分解为 ISFET 能够响应的离子；酶的催化作用具有特异专一性，使酶 FET 有非常强的选择性，可以检测出生物体液内酶反应基质之类低分子物质，如氨基酸、葡萄糖、青霉素、尿素等的含量。人们认为：这种酶敏感膜是很有前途的一种生物功能膜。酶传感器已达实用阶段。免疫传感器是在 PH-ISFET 绝缘层栅表面覆盖一层固定有抗原或抗体的生物体功能膜构成的。抗原和抗体都是蛋白质；抗体与外来的抗原相结合形成复合物，将外来抗原清除，此即所谓免疫反应，它具有很高的特异性；由于抗原抗体反应，引起固定化抗原或抗体的生物体功能膜表面电荷状态发生变化，由此而产生感应性膜电位差，

利以检测出诸如蛋白质、淀粉之类高分子有机物质。这些高分子有机物质是酶传感器难以检测出来的。免疫传感器分为标记及非标记免疫传感器两类，已研制有：梅素免疫敏感器，血型敏感器，免疫球蛋白酶免疫传感器，胰岛素酶免疫敏感器，及癌免疫敏感器等。微生物传感器的主要组成是固定化微生物膜和 $H^+ - ISFET$ ，或 NH_3 、 CO_2 、 O_2 等气敏电极。微生物是能维持生命活动的独立的细胞，有好气性与嫌气性之分；微生物传感器也相应分为呼吸测定型微生物敏感器及电极活性物质测定型微生物敏感器两大类。已研制有：致突性物质（致癌物质）敏感器，精氨酸敏感器，烟酸（维生素）敏感器，BOD 敏感器（BOD：河水及废水的污染指标）等。酶与微生物的机能是复杂的，这些机能大部分尚未搞清楚，有待于深入研究。这些生物敏传感器已步入食品、发酵工业、环境科学、生物医学等应用领域。

【嗅觉与味觉传感器】基于感觉器官脂质膜对气、味响应的生物化学机理而制成的，对气味物质、有味物质分子能定量识别的传感器，亦通称“人造鼻”、“人造舌”。这种嗅觉传感器和味觉传感器都属于生物化学传感器。嗅觉和味觉属于人、动物的化学感受，即要有刺激物分子与感觉器官直接接触，才能有感觉。由于嗅觉、味觉机制的复杂性，长期以来对它的研究一直处于困难之中，只是在 1987 年以后，对嗅觉、味觉的生物化学机理的研究取得了突破性进展，证实了嗅觉与味觉过程中感觉器官的脂质膜对气味物质及有味物质分子的响应过程，在此基础上研制出嗅觉传感器与味觉传感器。常用的器件形式是在几个石英振子或几个声表面波器件上分别覆盖上不同化学成分的脂质膜，这引起膜对每种气味或有味物质分子的吸着量不同，产生不同的振荡频率下降（或频率

延迟), 根据响应量的大小, 可以进行定量识别, 由此可用计算机进行图象识别。这种嗅觉与味觉传感器具有人的嗅觉、味觉的特点, 在室温下即可响应, 响应速度快; 仅对气味物或有味物有响应, 对无味物不响应; 响应有浓度依赖性, 与人和动物的嗅觉、味觉阈值有相关性等。曾一度有过的所谓“人造鼻”、“人造舌”, 系利用原有的气体传感器或离子传感器对有味气体或有味物的响应, 往往需要配以加温等条件, 且对无气味物(如 H_2 、 CO 等) 也响应, 所以, 这种传感器只能称之为气味传感器, 而并不具有嗅觉、味觉的特色。嗅觉传感器与味觉传感器虽在某些国家已被声称商品化, 但实际上还仍处于研制阶段, 有待深入探索。这类传感器将广泛应用于环境科学、医学、食品、化妆品、毒气报警、及宇航事业等各个领域。

【辐照敏传感器】利用荷电粒子、中性粒子射线或束流直接或间接引起物质原子的电离及激发过程, 产生电流、发光、或电子——空穴对等的现象制得的, 可完成辐照信息转换功能的传感器。它们的结构形式有: 电离箱、计数管、闪烁器、法拉第盒、半导体结型等, 有的还配以光电倍增管或二次电子倍增管等, 以获取脉冲方式或直流方式的相应输出电信号。它们检测的射线种类较多, 有高能(数十万电子伏以上) 荷电粒子射线, 如 α 射线、 β 射线、质子射线、重电荷粒子射线等; 不带电荷的粒子射线, 如中子射线、电磁波, 即 γ 射线、 X 射线等; 以及低能(数十至数万电子伏) 离子流等。前者叫射线传感器, 后者称离子传感器。(注意: 后者, 与常说的“离子敏传感器”或离子敏感器件, 是完全两回事, 不要混为一谈。) 它们有: 气体电离检测器, 闪烁型检测器, 半导体放射线检测器等。半导体放射线检测器分为扩散结型、表

面势垒型、锂漂移型、及场效应晶体管型等类型，它们一般不适于高能粒子的检测。离子传感器普遍使用“法拉第盒”，用以测量荷电粒子流动的电流值，或者使用二次电子倍增管，把离子转换成电子加以放大，再测量其电子流。这些检测器已经在实际中得到应用。

【压力传感器】将静压、动压、绝对压力、负压、真空压力、压差等各种压力转换成相应电信号输出的部件。压力传感器的种类较多，有应变式、压阻式、压力式、差动式、平衡式等多种。

【压电式传感器】利用某些物质电介质（如石英晶体、压电陶瓷等）的压电效应，实现非电量检测的传感装置。在大多数场合下，压电式传感器的测量对象是力，以及那些能转换为力的某些物理量，如应力、压力、加速度等。另外也可用作流量的测量及气体的监测，其应用已日益扩大。

【固态压阻式传感器】也称扩散型压阻式传感器，它是在半导体材料的基片上用集成电路工艺制成电阻桥路、直接作为传感元件（有的甚至连某些测量电路也集成在一起）。这种半导体基片是承受压力的弹性元件，又是将压力转换为电信号的转换元件，具有感压及完成力→电转换的双重功能。固态压阻式传感器的主要特点是灵敏度高（其灵敏系数约比金属应变片大 50—100 倍）、分辨能力强、结构简单、体积小、频率响应好、耐冲击、耐振动、不受安装倾斜的影响。自 70 年代起这种传感方式的发展已十分迅速。

【电阻应变式传感器】能够将试件上应变（力、压力、扭矩等）的变化转换为电阻值变化的传感器，转换的基本原理是压阻效应。这种传感器不但可以用来测量应力和应变，还可以用来测量各种静态和动态的力学量，如力、压力、扭矩、加速度等物理量。电阻应变传感器有张丝式和应变片式两种：张丝式是将应变电阻丝（张丝）直接张紧固定在支架上，随着被测参数的变化，张丝将产生伸缩应变，其电阻值将随应变的大小而不同。应变片式传感器也称粘贴式传感器，是利用粘接剂将电阻应变片粘贴在试件表面，并随试件一起受力变形，从而使应变片的电阻值产生相应的变化。通过适当的测量电路，上述电阻值的变化可转换成相应的电压或电流的变化电信号，这就实现了对被测试件的检测，还应指出，电阻应变有金属电阻应变片和半导体应变片两种。半导体应变片的优点是灵敏度高、体积小、横向效应小、蠕变和机械滞后也小、频率响应范围很宽；缺点是特性曲线的非线性大、温度稳定性差，因此在使用时必须进行非线性补偿和温度补偿。

【压电效应】分正压电效应和反压电效应，是某些物质的一种基本属性。如石英晶体、压电陶瓷等一些电介质物质，若在一定方向上受到机械压力或张力时，会产生电极化现象，即能在表面上产生电荷，当外力去掉后，物体表面的电荷即消失，这种机械能转换为电能的现象，称为正压电效应。相反，若在电介质物体的极化方向上施加电场，这物体将会产生机械形变（压缩或伸张的弹性形变），这种由电能转换为机械能的现象称为反（逆）压电效应。具有压电效应的元件称为压电元件。压电元件在交变电场的作用下，会产生机械振动，压电陶瓷蜂鸣器就是利用这个原理发声的。

【硅光电池】利用半导体的光生伏特效应制成的、能将可见光、近红外光等光能转换成电能输出的光电器件。常用的光电池有：
(1) 硅光敏电池，可作光学测量、光电转换中的探测器件。(2) 硅紫蓝光电池，主要用于照相机、彩色扩印机、曝光表等测光装置中。(3) 锗红外光电探测管，主要作用于红外激光的探测、温度测量及红外光电转换等场合。光电池对光的响应速度较低，大多作为能量变换器应用。

【光电耦合器】简称光耦合器，又称光子耦合器、光去耦器、光电隔离器。它由光源（如发光二极管）及光电传感器组成，是一种实现电—光—电转换的半导体器件。输入信号（如 5V、12V 脉冲）控制光源发光，光直接传到光电传感器，光电传感器将光信号转换成电信号输出。由于光电耦合器输入、输出端之间在电性能上是隔离的，所以在电源电压间的匹配、长线传输中的抗干扰、电路之间的隔离都用到它。光电耦合器在微电流传输时，导通压降很小，与运算放大器等配合可以作为单向或双向开关。光电耦合器的产品类别一般是以受光部分采用的光敏器件来区分，例如采用光敏二极管的叫做光敏二极管型，采用光敏三极管的叫做光敏三极管型，还有达林顿型、双向光耦合器等。

【光电传感器】以光电器件为检测元件，将光信号转换为电信号的部件。这种传感器主要由光辐射源、光学通路、光电器件以及测量电路等组成。被测量的非电量以一定方式转换成光的辐射，经光学通路送到光电器件（如光敏管等），由它转换成相应的电信号输出，以便进行测量或发出控制信号。光电传感器的主要特点是响应快、精度高、非接触测量、便于实现自动控制。常用的光电

器件有光敏电阻、光电池、光敏二极管、光敏三极管、光电管、光电倍增管等多种。

【光敏传感器】利用半导体光量子效应（光电导效应、光电子发射效应、光电磁效应等）、完成光、色、图象等光学信息变换功能的传感器。凡禁带宽度或杂质离化能合适的半导体，都具有光敏性质，适于相应不同光波波长范围的应用，如：锗适于可见光，硅适于可见光长波段及近红外光， HgCdTe 处于远红外，非晶硅在 400—700 毫微米波段，与人眼的视觉十分相近。已研制成的光敏传感器有：各种光探测器、红外探测器、色敏传感器、CCD 摄象器、MOS 型图象传感器、红外摄象机等等。光敏传感器的主要性能有：光波波长、光灵敏度、响应速度、图象清晰度等。广泛应用于遥感遥测、航天技术、天文气象、自动监测、生物医学、及军事技术等各个领域。

【磁敏传感器】应用电磁感应定律、及磁场作用引起物质电性质变化的磁敏效应制作的，可完成磁信号转换功能的传感器。这些效应有：霍尔效应、磁阻效应、电磁效应、热磁效应、磁致伸缩效应、约瑟夫逊效应等。传感器有：霍尔元件、磁霍尔元件集成电路、磁电阻元件、磁二极管、磁敏晶体管、磁性体磁传感器等。主要制作材料有半导体、磁性体、超导体、及金属等，特别是迁移率大的 III—V 族化合物半导体，潜力很大。磁敏传感器有着古老的历史传统，指南针即其代表。它们多半并非用于测量磁场，而是更广泛地用于力学物理量的传感技术上。

【霍尔式传感器】利用霍尔元件及有电路及装置配合而组成的一种

传感部件。根据霍尔元件的作用原理，霍尔式传感器的原理与应用大致可分为三大类：（1）应用霍尔电势与磁场成正比的特性。利用这种特性，可对磁量以及可转换为磁量的电量、机械量及其他非电量进行测量与控制，如压力、压差、液位、流量、加速度、机械振动、磁场、转速、电流等的电量与非电量；（2）应用霍尔效应的乘法作用。其本质是两输入电流的相乘，利用相乘特性可以对功率进行测量，对频率进行变换，实现信号的调制与解调，也可以制成多种运算电路与装置；（3）应用霍尔元件的非互易性。可构成回转器、隔离器和环行器等。霍尔式传感器已被广泛应用在各个领域。

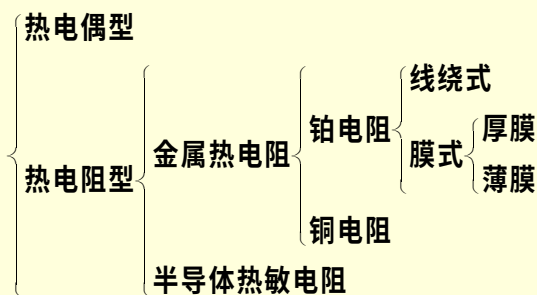
【气敏传感器】能将天然气、煤气、液化石油气、氢气、烷类气体、煤油气、乙炔、一氧化碳等气体的成份、浓度等信息转换成相应电信号输出的传感器。所用的转换元件是一种半导体电阻元件，也称气敏电阻，其阻值随环境空气的成分及浓度变化而变化。在氢敏器件中，还采用新型氢敏钨栅场效应半导体器件。气敏传感器广泛应用于对易燃、易爆、有毒、有害气体的检测、检漏、监控、报警等。半导体气敏电阻的特点是灵敏度高、结构简单、使用方便、价格低廉。

【气动传感器】将被测参量转换成相应气体压力或流量的传感装置。这种传感器一般由气源装置、气动传感装置、气动放大器及显示器等组成。其主要特点是工作可靠、灵敏度和精确度都很高、便于实现非接触测量、且抗振动、抗辐射、抗电磁干扰、耐腐蚀等。主要缺点是响应时间较长（约为 0.1—1 秒），不适用于检测、监控快速变化的参数，另外还需要有压缩空气及其稳压、净化系

统，故设备复杂、成本较高。

【电化学传感器】利用电化学原理，将被测的化学量转换为电信号输出的传感装置。这种传感器可以在复杂的被测物质中迅速、灵敏、定量地测出离子或中性分子的浓度。因此在化学、医药、食品、发酵等工业生产及生物医学领域中得到广泛应用。电化学传感器按其作用原理可分为电位型、电导型及电流型三种类型，其核心组成是一个内部充有电解质的化学电池。

【热电传感器】又称温度传感器，基于某些物理效应，将温度变化转换为电信号输出的部件。常见的热电传感器可分为热电偶和热电阻两大类型：



利用感温元件（热敏元件）的热电势或电阻值随温度变化的单值函数关系，即可直接对温度、或间接对流速、流量、浓度、气体的导热系数等其他非电量进行测量、监控。热电偶和热电阻温度传感器的优点是测量范围大、精度高、便于传送和自动记录、结构简单、互换性好、使用方便。

【半导体致冷器件】利用帕尔效应，通过半导体材料直接将电能转换成热能而实现致冷致热的一种半导体器件。这种器件有致冷端

(工作端) 和散热端 (通常与散热器相连)。一级致冷单元的温差可达 $50—60^{\circ}\text{C}$, 二级致冷单元的温差为 $70—75^{\circ}\text{C}$, 三级致冷单元的温差约 $85—90^{\circ}\text{C}$ 。半导体致冷器的直流供电电压通常为几伏至 10 几伏, 直流电流约 10 安至几十安培, 这种致冷器的特点是体积小、重量轻、无污染、无噪声, 缺点是致冷效率低、热容量小。

【湿敏传感器】利用吸湿性物质的电气及机械性能随其吸湿或脱湿过程而变化的原理制成的, 可完成湿度信息转换与监测功能的传感器。通常分为电气式、物理式、机械式湿度传感器及微波湿度传感器等几种类型, 细分有: 电阻式湿度传感器, 登莫式湿度传感器, 浸渍式湿度传感器; 毛发湿度计, 干湿球湿度计, 氯化锂湿度计, 碳膜湿度传感器, 硒蒸发膜湿度传感器, 磁胶体湿度传感器, 镍铁氧体湿度传感器, 氧化锡和氧化钛湿度传感器, 以及陶瓷湿度传感器; 微波湿度传感器等。它们的制作工艺一般是: 在电绝缘物里浸渍吸湿性物质, 或者在绝缘基片表面通过蒸发或涂覆等方法制作一层金属、半导体、高分子薄膜, 或者粉状颗粒质层, 以形成湿敏元件部份。由于各种材料在水汽中的性质变化, 涉及到比较复杂的物理化学过程, 有些问题至今尚未弄清, 因而也尚未制出很理想的湿敏传感器。例如: 各种湿敏元件不同程度地存在着诸如滞后现象、响应慢、稳定性差、互换性不理想等问题; 传统湿度计不易与现代电子技术相配合。60 年代以来, 研究开发了半导体湿敏传感技术。实际证明, 半导体湿敏器件是一类很有生命力的湿敏传感器件。但随着现代生产、科研的发展, 仍期待研究、设计出寿命更长、性能更稳定耐用的湿敏传感器新产品。

【电容式传感器】利用电容变换元件将被测参数转换成电容量变化

的一种传感器。这种传感器的变换元件实质上就是一个单极电容器,其容量的变化正比于两极板的面积及极板间介质的介电常数,反比于两极板间的距离。只要改变这三个参量中的任意一个,电容量就会改变。电容传感器可分为变间隙式、变面积式、变介电常数式三种类型。目前,这类传感器已成功地应用于液位、物位、压力、压差、温度、位移、厚度、振动、加速度、荷重等多种参数的检测。电容传感器易于实现非接触测量,与适当的检测电路配合,可获得很高的检测灵敏度。

【电感传感器】基于磁感应原理、利用线圈自感或互感系数的变化来实现电量测量的一种装置。这种传感器有自感式和互感式两种类型。通常说的电感传感器指的是自感式传感器,对于匝数一定的电感线圈、其自感系数是随着磁阻的变化而变化的,磁阻的变化可由被测参数来控制。电感传感器的主要特点是结构简单、工作可靠、测量力小、精度高、分辨率高(可达 $0.1\mu\text{m}$)、输出功率较大等。主要缺点是频带响应较低,不适宜作快态测量。

【数字式传感器】能够将被测模拟量转换为数字信号输出的电路与装置。目前,能够直接输出数字信号的传感器并不多。通常将某些传感器与专门技术装置相结合制成能直接显示数字输出的传感装置,如光栅传感器,磁栅传感器、感应同步器等就是此类传感器。还有一种是将被测模拟量转换成频率变化输出,并以数字形式来显示,如正弦式传感器,这种传感器的特点是测量精度和灵敏度均较高、且结构简单、工作可靠、因而在力和压力的测量中有着广泛的应用,也可用来测量扭矩等其他物理量。

【超声探头】装有超声波发射器和接收器的超声检测探头。发射器能将超声频率的交流电压、电流加在压电晶片上，利用晶体的电致伸缩效应，带动周围介质运动，从而向介质发射超声波。接收器能接收超声信号，利用晶片的压电效应转换成电信号。实际系统中的探头，由于石英晶片具有正、反压电效应，所以收、发共用一块晶片。

【红外探测器】能将红外辐射量的变化转换为电信号输出的部件。按物理效应的不同，红外探测器可分为热敏和光敏两大类型：

(1) 光敏红外探测器，其主要部件是半导体器件，也可以是电真空器件，如光电管、光电倍增管等，其重要性能是噪声低、响应速度快。半导体型光敏器件又可分为光电导型（基于光电导效应）、光生伏特型（基于光生伏特效应）、光电磁型（基于某些材料的光电磁效应）、红外场效应型、红外多元阵列型等多种探测器；

(2) 热敏红外探测器是用热敏电阻作敏感元件的探测器，其特点是具有宽广的、比较平坦的光谱响应（能扩展至整个红外区域），缺点是响应速度较低、响应时间较长。

【光纤传感器】基于光信号受被测对象调制的原理，以光作为敏感信息的载体，用光纤作为传递敏感信息的媒质所构成的传感器。它与以电为基础的传统传感器有本质的区别，是由光发送器、光纤或非光纤的敏感元件、光接收器、光纤以及信号处理系统所组成的。具有光纤及光学检测所特有的优点，如：(1) 良好的电绝缘性；(2) 抗电磁干扰；(3) 对电磁场及速度场的非侵入性；(4) 高灵敏度；(5) 传输损耗小；(6) 易与遥测技术相结合，实现远距离监控等。因此，特别适用于高压供电、大电流大容量电机、强

磁场噪声、强辐射与核辐射、易燃易爆等特殊系统及恶劣环境中应用，应用领域极广，对被测对象的物理、化学及生物等信息参量的连续监控，都可以采用光纤传感器。所以，是 70 年代中期以来发展迅速的传感器技术之一，也是光纤和光通信技术发展的必然产物。至今光纤传感器已有百余种，根据传感器中光纤的作用及被测对象对光信号调制的特点，可以将它们区分为功能型（或全光纤型）、非功能型（或传光型）、拾光型光纤传感器，及强度调制型、偏振调制型、频率调制型、相位调制型光纤传感器等几大类型。常见的有如：光纤陀螺，光纤水听器，光纤激光多普勒速度计，辐射式光纤温度传感器，以及光纤速度、流量、位移、压力、振动、气体传感器等等。

【微机器】利用先进的微细加工技术、纳米技术及集成电路技术、集成传感器技术，将微小动力源、微型感测器、微小控制电路、微机系统等集成于一体（硅集成块），具有某种完整的机——电功能和活动部分的微型装置。又称作微机械，或促动器，或能够移动物体的微器件，还有一流行说法称之为“微动力学”。至今，尚无定名。微机器有别于硅集成块的突出特征是具有活动部分，可移动物体。1989 年美国加州大学和贝尔实验室研制成功两台能自由运动的微型装置，即能在空气喷流推动下转动的微型齿轮。一年后，加州小组又制成功一台微型电动机，只是运转了 60 秒钟就烧毁了，但却开始了微机器日新月异的新局面，此后，各种微型电动机、微型泵、微型阀、微式加速度计、……相继问世。而最引人注目的是美国康奈尔大学诺埃·麦克唐纳等研制成功一种蠕虫大小的微型扫描隧道显微镜（STM），他们把所有部件（包括弹簧、动力和齿轮）统统塞进一丁点儿大小的硅片。两年后，斯坦福大

学卡尔文·奎特等将一整台 STM 安置在 4 毫米直径的硅集成块上, 这台微型 STM 的针尖是一根双头硅神经, 针尖重不及十亿分之一克。麦克唐纳认为: 微型 STM 不但能探测原子, 而且能用以探测加速度、光和声。并设想: 未来的一种集成块, 通过一系列微型 STM, 使之能听、能闻、能品尝味和能触知。在商业上, 微机器已开始上市, 如: 美国加州卢卡斯新传感器公司制成的血压传感器, 比盐粒大不了多少, 用它能在手术过程中在心脏内监测人的血压; 瑞士德比生物技术公司研制成功直径仅 1 毫米的微型泵, 用来向病人体内注射药物等等。虽然目前美、日、西欧等竞相投入巨资, 开展对微机器的研制, 但当前仍只处在发展的初期阶段。科学家们预计: 到 2010 年后, 微机器将达到实用化水平。

【传感器变送器】由传感器及其测量、补偿线路所组成的, 对传感器信号可以进行放大、非线性补偿、温度零漂及温度灵敏度补偿、蠕变补偿等, 使之转换为标准电信号输出的装置。其测量、补偿线路有如: 稳幅激励信号源, 检测电路, 滤波放大器等。这种变送器应具有稳定度高、波形失真小、温度漂移小、负载能力强、综合精度高、电路成本低、使用方便、能长期稳定运行等特点。可以同时带多只传感器工作, 并与相应的显示仪器、检测装置等可配套使用, 以实现对被测量的自动检测和自动控制。一般说, 有多少传感器品种, 也就有多少传感器变送器品种。它们广泛应用于需用传感器的各个领域。

【传感器接口电路】将传感器输出电信号变换成可以直接与微机接口的标准电压信号的整个电路装置。传感器的输出信号多是模拟电压信号或电流信号, 有时也有开关信号或脉冲信号, 它们往往

比较弱,且常伴有噪声或突发性干扰脉冲,还有零漂移现象等,故务必采用相应的实用电路、转换器、实用接口系统等信号预处理技术,将传感器输出信号进行放大、滤波、线性化、减小漂移、抑制干扰、温度补偿以及电流——电压变换或频率——电压变换等,以求将传感器的被测非电量真实地、精确地、及时地输入计算机,进行信号处理,从而实现计算机自动测试、自动控制及智能化,由此而大大拓宽计算机尤其是微机的应用范围。所以,传感器接口电路是实现传感器技术与计算机技术相结合必不可少的关键环节。一般说,接口电路主要包括有:数据变换系统的集成模拟多路开关、采样保持放大器、集成数模转换器及模数转换器,接口电路和模拟信号处理用的集成运算放大器、集成仪用放大器、可编程增益放大器、集成隔离放大器、可编程低通滤波器及微分控制低通滤波器等。

【传感器技术的集成化、多功能化、智能化】随着半导体传感器及微电子技术的不断发展,特别是跨入超大规模集成化的今天,为传感器技术的集成化、固态化、多功能化、图象化、及智能化提供了有力的设计、工艺基础。传感器的集成化,系指基于半导体集成电路技术,可以将敏感元件、转换元件、信息处理电路、以及电源部分都制作在同一芯片上。已制出集成压力传感器、集成温度传感器、集成 ISFET 等。固态化,实质上也是半导体化。物性型传感器也称为固态传感器,一般分半导体、电介质、强磁性体三类,而半导体是最主要的敏感功能材料。多功能化,系相对于单一功能而言。多功能传感器乃具有多种非电物理量、化学量、生物量或者某种量的多个参量信息的检测功能。已有:半导体温湿敏传感器,多功能气体传感器,及可测出体液中各种不同离子

的多功能 ISFET, 等等。图象化, 系指传感器的应用不只限于空间某一点的物理量的检测, 而可以扩展到一维、二维、三维空间的测量。已研制有: CCD 图像传感器, MOS 型及 CID 型图像传感器、全息摄像技术等。智能化, 系指将传感器与微型计算机一体化、兼有信号检测和处理功能的智能传感器。它是将敏感元件、转换电路、信号处理、驱动电路等外围电路, 以及微机芯片全部集成在同一基片上, 使之具有信号处理、自诊断、自校正、自动调整零点及量程、远距离通信等多方面的功能, 微型计算机只当作一个内部元件。这种智能传感器又称作灵巧传感器。传感器的集成化、多功能化、智能化是当前传感器技术发展的重要趋向。

人工神经网络

【脑神经元】脑组织的基本单元。人脑是由大约 10^{11} 个神经元组成的巨系统。从生物控制与信息处理的角度看, 神经元由细胞体、轴突、树突和突触组成。轴突是细胞体内向外伸出的最长的一条分支, 即神经纤维。它相当于细胞的输出电缆, 其端部的许多神经末梢为信号输出端子, 用于传出神经冲动。树突指细胞体内向外伸出的其他许多较短的分支, 它相当于细胞的输入端, 接受来自四面八方的传入神经冲动。突触是指神经元与神经元之间通过轴突(输出)与树突(输入)相互联结的接口, 亦即一个神经元的众多输出端神经末梢与其他神经元的众多输入端相接触的交界

面。每个细胞约有 10^3 — 10^4 个突触。突触有两种类型：兴奋型与抑制型，神经元的细胞膜内外之间有电位差，大约为 20—100 毫伏，称为膜电位。膜外为正，膜内为负。神经冲动传递方式的不同，会使突触的传递作用或增强或减弱，即神经元之间的联结是柔性的，亦即结构可塑性。

【脑神经元的功能】脑神经元对输入神经冲动的响应特性。神经元对于不同时间通过同一突触传入的神经冲动，或对于同一时间通过不同突触传入的神经冲动，具有整合功能；传入冲动经过时空整合，使细胞膜电位升高，超过被称作动作电位的阈值（约为 40 毫伏）时，细胞进入兴奋状态，产生神经冲动，由轴突输出；反之，当整合结果使膜电位下降至低于动作电位的阈值时，细胞进入抑制状态，无神经冲动输出；神经纤维传递的电脉冲为等幅、恒宽、编码（约 60—100 毫伏）的离散脉冲信号，在突触接口处进行“数/模”转换，通过神经介质以量子化学方式实现电脉冲—神经化学物质—膜电位的变换过程，形成细胞膜的连续变化的电位信号；神经冲动沿神经纤维传导的速度在 1—150 米/秒之间；突触对神经冲动的传递具有时延，在相邻的二次冲动之间需要一个时间间隔（不应期）；由于结构可塑性，突触的传递作用有增强、减弱和饱和，细胞有相应的学习功能、遗忘或疲劳（饱和）效应。总之，脑神经元并不是简单的双稳态逻辑元件，而是超级的微型生物信息处理机/或控制机。

【人工神经元】人工神经网络的基本处理单元。它是脑神经元的某种抽象、简化和模拟。它一般是一个多输入/单输出或多输入/多输出的非线性元件。在超大规模集成实现中，一个神经元由一个

电子器件如 MOS 晶体管担任；在光电实现中，一个神经元由一个光双稳器件或一个发光管和一个探测器件对构成。

【神经元的互连】反映人工神经元之间的相互关联及其强度的联接结构。它是人工神经网络的基本组成部分。神经网络的信息存贮在互连上，互连权重值可由神经网络学习训练算法求得或修改。在电学神经网络中，它由各种互连引线完成；在光学神经网络中，则由光互连实现。

【人工神经网络】以工程技术手段模拟人脑神经网络的结构与功能特征的一类技术系统。人工神经网络用大量的神经元——由电子元件或光学元件构成的非线性并行处理器——来模拟众多的脑神经元，用处理器间错综而灵活的联结关系来模拟人脑神经元间的突触行为。但它并非人脑神经系统的真实描写，而只是其简化、抽象和模拟。它是一种大规模并行的非线性动力学系统，具有许多引人注目的特点：有高速运算的能力，存贮方式具有联想的特征，有很强的自适应、自学习和自组织的潜力。它比传统的数字计算机有更强的信息处理能力。在传统的数字计算机中，计算与存贮是完全独立的两个部分，计算之前要从存贮器件取出待处理的数据，然后再进行计算，最后又将计算结果放入存贮器中。这样，存贮器与运算器之间的通道构成了计算机的瓶颈，从而大大限制了它的计算能力，在人工神经网络中，信息的存贮与处理（计算）是合而为一的。信息的存贮体现在神经元互连的分布上，并以大规模并行分布方式处理。人工神经网络系统的研究是 50 年代末 60 年代初开始的，70 年代处于低潮。1982 年美国物理学家霍普菲尔德提出了 HNN 模型，推动了神经网络的研究。超大规模集成

(VLSI)技术,生物技术,超导技术和光学技术等领域的迅速发展,为人工神经网络的硬件实现提供了技术可能性。目前,人工神经网络仍缺乏统一完整的理论模型,硬件实现处于取得技术突破的前夜。研究人工神经网络的根本目的在于探索人脑加工、贮存和搜索信息的机理,进而探索将此原理应用于各种人工智能的可能性。神经网络的问世标志着认知科学、计算机科学及人工智能的发展将处于一个新的转折点,它的应用与发展不仅会推动神经动力学本身的发展,而且将会为学习识别和计算提供新的途径,有可能给信息科学带来革命性的变化,进而产生新一代的生产工具,形成一个新的产业。这就是为什么有人说“神经科学的研究,其意义超过了当年对原子弹的研究”。

【MP 模型】美国心理学家麦克卡洛奇和数学家皮特斯 1943 年共同提出的形式神经元的数学模型。这开创了神经科学的理论研究,对脑模型、自动机和人工智能研究有重大影响。它的基本内容是:假设有 N 个神经元互连,每个神经元的活性状态取“0”或“1”,分别代表抑制与兴奋;神经元 i 的状态 S_i 受其他所有神经元的制约。若神经元 i 与神经元 j 之间连接强度用互连权值 W_{ij} 表示,则神经元 j 对神经元 i 的实际影响为 $W_{ij}S_j$,再把所有神经元 ($j=1, 2, 3, \dots, N$) 对神经元 i 的影响之和减去神经元 i 的阈值 θ_i ,就是神经元 i 的状态 S_i 的原始值。若原始值大于或等于零,则神经元 i 的状态 S_i 取值为“1”(兴奋);若原始值小于零,则神经元 i 的状态 S_i 取值为“0”(抑制)。以后建立的延时 MP 模型考虑了突触时延的影响,改进的 MP 模型又进一步考虑了权重系数 W_{ij} 随时延的变化,会增大或减小。

【希伯（Hebb）学习规则】改变神经元之间连接强度即互连权值的规则。神经网络的学习过程就是调整 W_{ij} 的过程。按照希伯学习规则，调整 W_{ij} 的原则是：若神经元 i 和神经元 j 同时处于兴奋状态，则它们之间的连接应当加强，即 W_{ij} 应增大。这一规则与“条件反射”学说一致，并已得到神经细胞学说的证实。

【神经元的串行工作方式】在任一时刻只有一个神经元（随机地或确定地选择）改变状态，其余所有的神经元的状态保持不变的工作方式。

【神经元的并行工作方式】在任一时刻有一部分神经元改变状态，而其余神经元保持状态不变的工作方式。若所有神经元都改变状态，则称为全并行工作方式。

【神经网络系统的稳定性】人工神经网络系统的状态运动最终趋向某一平衡态的性质。研究人工神经网络系统的稳定性，理论上讲有两种办法。一种办法是直接求解系统方程。对人工神经网络这样一个大规模非线性系统而言，这是十分困难或甚至是不可能的。另一种办法是给出系统稳定性的信息。具体做法是引入一个广义能量函数即莱普诺夫函数，研究该函数及其导数的符号，进而确定系统稳定性的信息。如果系统是渐近稳定的，那么随着系统的运动，其贮存的能量是随时间增长而衰减，直至趋于平衡状态而使能量趋于极小值。但莱普诺夫函数一般不是唯一的，因此它和能量的概念又是不完全相同的。

【神经网络系统的稳定态】神经网络在稳定时的状态，又称系统的

吸引子。从 $t=0$ 起, 如果存在某一时刻 t , 从此之后神经网络不再改变状态, 则称此网络是稳定的。从广义能量函数角度讲, 系统收敛到稳定态的过程就是网络能量函数趋近最小值的过程。由于能量函数可能有多个极值, 因此可有局部最优解和全局最优解, 即局部稳定态和全局稳定态。

【一阶关联神经网络】神经元之间的连接是线性相关的一类人工神经网络。各神经元是一一对应相关, 互连矩阵是二维矩阵。

【高阶关联神经网络】神经元之间的连接是非线性的一类人工神经网络。对 q 阶关联而言, 神经元与其他神经元之间是 q 对 1 相关, 互连矩阵为 $q+1$ 维矩阵。

【多层网络】在输入和输出层间加上一层或多层隐单元构成的网络。隐单元层可独立完成某种作用, 也可与输入层或其他隐单元层一起完成某种作用。

【前馈神经网络】又称前向神经网络。注重系统学习功能, 不注重系统动力学行为, 不包含神经元输出对输入的大量反馈的一类神经网络。属于前馈神经网络的有感知器, BP 网络 and 自适应线性元件等。它们结构简单, 通过非线性处理单元的复合, 产生复杂的非线性处理能力。

【线性阈值单元】前馈神经网络中最基本的计算单元。它有 N 个输入, 一个输出。输出取值为 1 或 -1 。这是一个非线性处理单元。单个线性阈值单元可以实现带权乘积求和取阈功能。可以通过学

习算法求得具体的权值。任何布尔函数可用三层（即只有两层计算单元）前馈神经网络实现。

【感知器】由线性阈值元件组成的具有单层计算单元的一种人工神经网络。它由美国学者罗森布莱特在 1987 年提出。当其输入的加权和大于或等于阈值时输出为 1，否则为 -1。这个模型与 MP 模型不同之处是假定神经元间的耦合程度可变，即可以学习训练。用输入样本的希望输出和实际输出的差来修正权值（加比例因子）。这个模型在神经网络研究中有重要的意义和地位，提出了自组织、自适应思想。对它能够解决的问题，有一个收敛的算法。感知器学习算法是至今存在的众多算法中最清楚的一个。二层感知器可解决异或问题，三层感知器可识别任一凸多边形或无界的凸区域，更多层的网络可识别更复杂的图形。

【BP 网络（反向传播算法）】学习过程包含误差反向传播、逐层修改权值的一种多层神经网络。网络包括输入节点层、输出节点层，以及一层或多层隐节点层。输入信号先向前传播到隐节点，经过作用函数后，隐节点的输出信息传播到输出节点，最后给出输出结果。学习过程包括上述的正向传播过程，如果在输出层得不到期望的输出，则转入反向传播过程，将误差信号沿原来的连接通路返回，通过修改各层神经元的权值，使误差信号达到最小。BP 模型把一组样本的输入/输出问题变为一个非线性优化问题，使用的算法是优化计算中最普通的误差梯度下降法。用迭代法求解权值相应于学习记忆问题。加入隐节点后，使优化问题的可调参数增加，因而可得到更精确的解。BP 算法是 1985 年提出的，它是一个很有效的算法，是神经网络的重要模型之一。BP 网络是迄今

为止最普通的网络，可用于语言综合、自适应控制等。存在的问题是学习算法的收敛速度很慢；网络运行仍是单向传播，没有反馈；隐节点个数的选取缺乏理论指导，而是凭经验；新加入一个样本会影响已学完的样本，而且要求刻画每个样本的特征个数必须相同。

【自适应线性元件】权系数可以训练学习的连续时间线性神经网络。1961 年美国威特罗教授提出主要用于自适应系统等连续可调过程。自适应线性神经元实际上是自适应阈值逻辑元件。其输入信号的各分量由一组系数加权，内积产生模拟输出，经阈值器件产生数字输出。希望响应是一特殊信号，可用来训练神经元。在训练过程中，希望响应（期望输出）和模拟输出的差（误差）反馈到神经元，常用误差平方和最小法（LMS 算法）或称威特罗—霍夫 δ 规则进行权系数的学习训练。网络的输入输出是二进制值 1 和 -1，而不是 0 和 1，权值可连续调节，可正可负。用多个自适应线性元件和逻辑“与”门器件可构成多自适应线性神经网络（MADALINES）。

【反馈神经网络】含有神经元输出反馈通路修改权系数的一类神经网络。它是反馈动力学系统，比前馈神经网络有更强的计算能力。全局稳定性是它研究系统的主要着眼点。反馈神经网络的一个重要特点是它具有稳定态，即系统的吸引子。属于这类网络的有霍普菲尔德模型，双向联想记忆网络等。

【霍普菲尔德模型】霍普菲尔德 1982 年提出的、每个神经元都接受其他神经元的信息作为输入，又把产生的输出传播到其他神经

元的一种反馈神经网络。每个神经元都有一个阈值。神经元 i 在 $t+1$ 时刻的状态由它在 t 时刻的状态与其余所有神经元的相互关联作用（通过权系数）之和与神经元 i 的阈值相比确定。若大于或等于阈值，神经元 i 的状态为 1，否则为 -1 。神经元的功能是一种取阈操作，而信息存贮在神经元之间的互连上。当外部激发置定了某些神经元的状态（开或关），与由这个模型描述格式确定的互连状态进行某种操作（例如矩阵与矢量相乘），最后各神经元的状态趋于某一种存贮图案，它与外部输入的整个特征最接近，又是互连矩阵所包含的网络特征状态之一。这种模型的优点是：可以用非常简单而且相同的逻辑元件（神经元）执行有效的整体运算；不要求并行计算的各元件间的同步；使大容量并行结构的同時分布处理成为可能；对局部不完整不敏感等。

【联想记忆 (CAM)】 能从神经网络的一个输入状态自动趋于网络存贮的一组稳定状态中的某一个状态的功能。如把系统的稳定态作为记忆，则神经元状态由初态向稳定态运动的过程就是寻找记忆的过程。如初始状态是某一个记忆状态的部分信息，那么状态运动的过程就是由部分信息找出全部信息的过程。选择不同的权系数，网络就有不同的一组稳定态。假设联想存贮的一组状态 M ，若网络的初态就是 M 中的一个状态，则网络状态不变；若初态不在 M 中，网络应达到的稳定态就应该是 M 中一个与初态差别最小（在海明距离意义上是最近）的状态。如在学习过程中已存入 M 个样本，使用时，若输入为 M 中某一个学习样本加上偏差，如代表噪声，图形与文字的缺损和畸变等，要求输出 M 中的相应样本，即使之复原，这称为自联想存贮；假如预先规定两组样本中有一定的对应关系，（如照片—姓名），使用时输入一种样本（如

缺损的照片), 输出另一相应样本(姓名), 则称为异联想记忆。联想记忆的关键问题是如何通过学习找到合适的权系数矩阵。

【双向联想记忆 (BAM)】对于一对联想存贮矢量 (A, B) , 既能前向搜索从输入矢量 A 回忆相关矢量 B 、又能反向搜索从输入矢量 B 回忆相关矢量 A 的一类联想存贮神经网络。这里矢量 A 、 B 都是双极性矢量, 即它们的每个分量都只能取值 1 或 -1 。这是以霍普菲尔德的记忆理论为基础的异联想存贮器, 其运行方式是反复的矩阵运算, 直到得到一个固定的状态止。

【神经认知机】基于“连接最大值检出”算法的一种自组织神经网络。由日本学者福岛邦彦 (Fukushima) 提出。算法模型认为, 从神经元 x 到神经元 y 的突触连接, 只有在神经元 x 处于激活的情况下才被强化; 如果神经元 x 的近旁存在比 x 更强的激活神经元 x' , 则从 x 至 y 的突触连接就不进行强化。突触连接的强化应符合“最大值检出假说”。在某一小区内存在的神经元集合中, 只有输出最大的神经元才发生输入突触的强化, 当某一个神经元受到损伤时, 其邻近的其他神经元会取而代之, 起到自动修复的作用。这种网络不便于电子电路化, 但便于计算机模拟, 常用于结构化的字符识别, 视觉及听觉信息处理系统。

【自组织神经网络】基于自适应共振理论 (ART) 的可以自动地向环境学习, 不要教师的一类神经网络。它由美国格罗斯贝格和卡彭特提出, 是一两层网络, 下层为输入节点, 上层为输出节点, 记从上至下的连接权值为 T_{ij} , 从下至上的记为 B_{ij} 。ART 的学习算法为: 先给定 T_{ij} 的初值为 1 , B_{ij} 的初值为 $1/(N+1)$, N 为输

入节点数，并设置表示两个样本相距多大才被认为是匹配的警戒线；给定一新的样本输入；计算它们对输出节点的影响，即求 B_{ij} 与输入的内积和或称为匹配度；求出最大匹配度，并进行警戒线检验；如不合要求，则修正权值，重新对该样本计算，直至满足要求。这是一种快速学习算法，并且是边学习边运行。输出节点中每次最多只有一个为 1。每个输出节点可以看成一类相近样本的代表。一个输入节点从上至下的所有权值对应于一个模式，当输入样本距某一个这样的模式较近时，代表它的输出节点才响应。警戒线小，模式的类别少，否则类别多。ART 的主要优点是可完成实时学习，可适应非平稳的环境；对已学习过的对象具有稳定的快速识别能力，又能迅速适应未学习的新对象等。ART 主要用于模式识别，如雷达、声纳的信号识别等。

【分维神经网络】包含许多子网络、信息存贮在子模式上的一种神经网络。分维神经网络由 N 个神经元构成，可分成 L 个不相连的子网络，每个子网络由 K 个神经元构成， $K \times L = N$ 。每一个子网络内是全连接的，即每个神经元与所有其他神经元相连，子网络间也是全连接的。整个分维神经网络的结构比较简单。在分维神经网络中，以子网络—子模式以及网络—子模式排列的形式存贮和回忆信息。相邻子网络层间的连接增加了网络的稳定性和纠错能力。分维神经网络有可能扩展神经网络的存贮能力，并有重要的潜在的信息处理能力。它是适于 VLSI 实现的神经网络模型之一。

【随机神经网络】基于模拟退火 (SA) 算法的一类神经网络。SA 算法是一种根据蒙德卡罗迭代求解法的启发式随机搜索算法。SA

算法用于解决组合优化问题的出发点，是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题的相似性。对固体物质进行退火处理时，通常先将它加温熔化，使其中的粒子可自由运动，然后随着温度的逐渐下降，粒子也逐渐形成低能量的晶格，若在凝结点附近使温度下降得足够慢，则固体物质一定会形成最低能量的基态。组合优化问题就是在解空间中寻找目标函数的最小解。具体算法是，先假定一初始温度和初始解；然后降温一点，以新的温度和当前解调用梅特罗波立斯抽样算法，即按某一规定方式随机扰动产生一个新解。计算其内能，若内能下降，把新解作为下一个当前解；若内能上升，则按概率确定新解是否为下一个当前解。若否，继续扰动，直至产生下一个当前解，再后再继续降温，直到退火过程结束，产生最优解。SA 算法是一种通用的随机搜索算法，可用于解决众多的优化问题，并广泛应用于其他领域，如 VLSI 设计，图像识别等。

【玻尔兹曼机】欣顿等人 1985 年用统计物理学的概念和方法，在节点状态变化中引入了概率及隐节点，用模拟退火算法进行学习，保证系统趋于全局稳定的一种神经网络。玻尔兹曼机是一多层网络，包括输入、输出层和隐层。与感知器相比，具有如下特点：网络没有明显的层次，隐单元之间存在相互结合关系，网络以概率方式工作。它除了可以解决约束组合优化问题外，还可通过学习，模拟外界所给出的概率分布，实现联想记忆。

【自组织特征映射神经网络】不同区域的神经元功能不同的一种人工神经网络。1980 年由科霍能提出。他认为一个神经网络接受外界输入模式时分为不同的区域，各区域的神经元对输入有不同的

响应特征。各神经元的连接权值有一定的分布，最邻近的神经元互相激励，而较远的神经元则相互抑制，更远一些则又具有较弱的激励作用。神经元向量会自动调节，直到与输入向量的某一最大分量方向相重合为止。这是一种具有侧向联想能力的神经网络，其输出节点是二维阵列分布，每个输入节点与输出节点之间由可变权值联接。

【反向流动神经网络（CPN）】组合科霍能学习算法和格罗斯贝格学习算法而成的一种映射神经网络。由美国赫之·尼爱尔森教授提出。CPN 包括三层神经元：输入层接收输入矢量，科霍能层通过权阵列 W 连到输入层和输出端，输出层（格罗斯贝格层）通过权阵列 K 连到科霍能层和输出端。其训练分为两步：第一步用训练矢量 x 和科霍能学习算法，调节权阵列 W ，使第三层中的一个神经元集合或一给定神经元被激活，这是无教师学习过程；第二步用格罗斯贝格算法训练第一、二层连接的权值，输入矢量为 x ，希望输出响应为 y 。这是有教师学习过程。相应 CPN 算法也分为两步：第一步加入输入矢量 x ，求出第一层中每一权向量与 x 的点积，找出点乘最大的神经元；第二步求第二层中每一神经元的输出。CPN 的优点是快速训练。它可用作图像压缩、统计最优化和概率密度函数分析。

【基于现代数字计算机技术的神经网络】在现代数字计算机硬件和软件技术基础上发展的神经网络系统。它们具有两个特点：每个神经元不再对应于一个实际的物理处理单元，而是对应于一个虚拟的处理单元，在运算过程中才落实到某一物理处理器（对应于大量虚拟处理元）；一个神经网络计算机不只是模拟一种特定的神

神经网络模型，而是可以通过编程实现多种神经网络模型。神经网络的硬件支持系统可以是：现有各种结构的计算机，或在现有计算机上加入神经网络加速板构成工作站，或神经网络计算机并行处理器阵列。神经网络软件可分为两类：应用神经网络模型求解具体问题的专用软件包，和为研究、教学而设计的神经网络模型库。

【VLSI 神经芯片】用超大规模集成技术实现的一类神经网络芯片，又称电子神经芯片。这是一种系统集成芯片。其关键是：神经网络模型应考虑到工艺可靠性和限制，通常是采用矩阵形式，高度并行和高度规则的模块化结构；网络应容易分割成几个适合在一块芯片上集成的较小的网络；神经元应紧凑排列，使一块芯片上集成足够多的单元，形成具有复杂特性的大网络；工艺上能解决神经元之间复杂的连接问题；在功能上可把某些传感功能集成于一个系统中。用硅技术实现神经元和互连等基本单元可以分为数字集成和模拟集成。数字集成可使用软件工具进行快速可靠的复合设计，可利用现成的工艺线制作线条宽度很小的电路，达到很高的集成度。模拟集成电路结构简单，而且器件本身的非线性和寄生效应可加以利用，实现复杂的功能，这种结构适合神经网络中高度并行信号的转移操作，但设计周期长，工艺难度大，精度低。神经网络中输入信号的加权和最大量的计算工作。最重要的单元电路是互连元件。以二进制方式存贮连接权重的办法有：电阻网络，权重固定，但集成度最高；MOS 晶体管；静态数字存贮单元（触发器）；三晶体管动态单元等。而以模拟方式存贮多值或连续的连接权重的办法有：电容器，CCD，MNOS 和浮栅技术等。按照学习规则对连接权重进行修改（自适应），是今后要研究

的问题。VLSI 技术，目前最流行的是 CMOS 工艺，还有 CMOS 和双极的混合工艺 (BiCMOS)，CCD 工艺，EEPROM 工艺。为解决更大规模集成，有圆片规模集成 (WSI) 和三维集成等新技术。

【光子神经芯片】用光学或光电混合方法实现的人工神经网络芯片。电学实现人工神经网络面临布线疙瘩问题。这是 VLSI 实现的主要限制因素。光学实现，由于光线的天生平行性和密集性，可以避免布线问题。简单的光子神经网络按光源与光探测器的位置可区分为透射式和反射式两种。透射式是光源和光探测器处于互连掩膜版（或空间光调制器、或全息元件）两侧的结构，反射式则指这两种光电器件处互连掩膜版一侧的结构。目前报导较多的是透射式光子神经网络。使用最多的是霍普菲尔德模型。光源采用发光二极管阵列，光探测器采用硅探测器阵列或化合物半导体探测器阵列；网络的记忆元件（互连）用光学掩膜版或空间光调制器来实现带权求和；取阈反馈则由电子线路来完成。日本已研制出 32 个神经元的三层光子神经芯片模块，三层分别是面发射发光二极管阵列、互连掩膜阵列和探测器阵列，可完成 32 个矢量与 32×32 元素的矩阵的相乘。光电集成把光学大规模互连和平行的特点与电学的灵活性，高增益和决策能力（非线性处理）结合起来。在半导体芯片上或其他材料上形成微细光学元件和光学膜的光集成技术，与半导体光电集成技术一起，为小型化固体化大规模光子神经芯片的实现提供了可能途径。

【神经网络计算机】能模拟人脑神经信息处理功能，通过并行分布处理和自组织方式，由大量基本处理单元和互连线构成的计算机系统。神经计算机的实现可以用全硬件方式或软件模拟方式实现。

全硬件实现是指物理上的处理器和通信通道与神经元和连接相对应。每一种神经元和连接都有与之对应的物理器件。软件模拟是利用现有的计算机，配置模拟神经网络计算的软件或在通用数字计算机上插入神经网络加速板形成神经计算机工作站，全硬件实现优点是处理速度快，可满足实时性要求，缺点是各处理单元之间的连接方式比较难以改变，缺乏通用性、灵活性和可编程性，往往在专用神经网络计算机中采用。采用连接权值可变的硬件结构，可构成部分通用的神经网络计算机。软件模拟神经计算机一般模拟速度太慢，训练学习时间太长，因而处理效率不高。神经网络计算机按用途分通用和专用两类。通用神经计算机可以支持一类神经网络模型，有商用协处理板和并行处理机阵列。专用神经计算机是采用专门神经网络实现一种功能的神经计算机，按其实现方式可分为硅处理机，光处理机和分子处理机。

【神经网络专家系统】基于神经网络信息处理原理的专家系统。利用神经网络的学习功能、联想记忆功能、分布式并行信息处理功能可解决专家系统中的知识表示、获取和并行推理。神经网络专家系统的基本结构包括下列模块：自动知识获取模块，研究如何获取专家知识；知识库，用于存放从专家那里获取的专家知识；推理机制模块，提出使用知识去解决问题的方法；解释模块，用于说明专家系统是根据什么推理思路作出决策的；I/O 系统，是用户界面，提出问题并获得结果。它可以用超大规模集成电路技术实现，其目标是提高专家系统的智能水平，实时处理能力及其鲁棒性。神经网络专家系统模拟人的形象思维，与传统人工智能的关系是互为补充的关系，它的发展与应用对人工智能、计算机科学和信息科学有可能带来历史性的突破。

超 导 技 术

【完全导电性】超导体温度减小到临界温度时，电阻突然跃变到零（电阻率低于 10^{-24} 欧姆厘米）的特性。纯净的常导体材料，随温度降低其阻值慢慢趋向于一个极值，即剩余电阻。最纯净的铜的剩余电阻率为 10^{-9} 欧姆厘米数量级。

【完全抗磁性】磁场不能进入处于超导态的超导体体内，样品体内磁通为零的特性。当外加磁场施加在处于超导态的超导体上时，表面感生一个无损耗的超导电流，超导电流产生的磁场方向正好与外加磁场相反，因而超导体内部的磁场互相抵消，净磁通密度为零。由此，超导体内部电流密度也一定为零，也就是电流不能由超导金属体内穿过，而只能在它表面上流动。

【穿透深度】一种表示外磁场透入超导体内的长度特征参量。实际上，抗磁超导电流在一薄层表面（约 10^{-5} 厘米数量级）内流动，这也就是外加磁场的磁通量能透入的深度。穿透深度与材料纯度有关，材料不纯时穿透深度增大；它还随温度增高而增大，当温度高于转变温度的 0.8 倍左右时，穿透深度迅速增加。穿透深度越小，抗磁性越强。样品厚度远大于穿透深度时，这种样品越接近完全抗磁性。

【超导热力学】从热力学基本原理出发,把超导体在常导态与超导态之间相互转变看作是一种相变,会吸收或放出热量的理论。这个理论认为,超导态是一种热力学平衡态,在给定外界条件下,它的状态是唯一确定的,与达到这一状态的具体过程无关;超导态的熵小于常导态的熵,即超导态比常导态有更高的有序度;当温度接近临界温度时,超导态和常导态间的熵差消失,即相变时没有潜热;在略低于临界温度时,超导态的比热大于常导态的比热。

【二流体模型】把超导体的公有电子分成常导电子和超导电子两种载流子,解释超导态的完全导电性、常导态和超导态之间相互转变的理论模型。其主要内容是:超导体内的两种电子占据同一体积,在空间互相渗透,彼此独立运动;超导电子的浓度随温度增加而减少,常导电子浓度随温度增加而增加;常导电子受晶格散射,对熵有贡献,电阻不为零,超导电子凝聚在某一能量最低状态,不受晶格散射,对熵无贡献,电阻为零;超导体处超导态后,超导电子构成的电流无阻通过,常导电子构成的电流有阻,对整个超导体而言,还是无阻的。

【超导电动力学】以电动力学的麦克斯韦方程和连续性方程作为基本出发点,把超导体看作非弹性介质而形成的理论。建立的方程即伦敦方程。处于超导态的超导体中的常导电子仍遵循欧姆定律;而超导电子的运动不受阻尼,在电场作用下不断加速。超导电子是两两结合在一起的电子对,一个电子对的有效电荷和有效质量是单个电子的两倍。这个理论能解释完全导电性和完全抗磁性,按照伦敦方程,从超导体表面到体内,磁场和屏蔽电流都指数式地下降。表征衰减距离的尺度叫做伦敦穿透深度,约为 $17\sim 100$ 纳

米不等。超导体内超过这个深度的范围里，不存在屏蔽电流和磁场。伦敦方程主要方面是正确的，但理论与实验之间仍存在着巨大差别。

【超导宏观唯象理论】为处理磁场空间不均匀分布时的超导电现象，把二级相变理论用于伦敦方程而形成的宏观理论。1950年，金兹堡—朗道在分析伦敦理论解释某些超导电现象（如超导薄膜的临界磁场和界面能）遇到困难时指出，在磁场的作用下，超导体的超导电子密度不仅是温度的函数，而且也是空间坐标和磁场的函数。但伦敦方程中超导电子密度只与温度有关，为此金兹堡和朗道把朗道的二级相变理论用于超导电性的研究，得到金兹堡—朗道方程。它不仅可以用于解释磁场不均匀的超导电现象，而且对于常导相、超导相的边界问题也很有效，还可用于解释磁通量子化。

【磁通量子化】一个超导环内的磁通量是磁通量子的整数倍。在温度高于临界温度时，在一个超导环外加一外磁场，外磁场的磁力穿入环体内和环孔内。把温度降到临界温度以下，再去掉外磁场，由于园环处超导态，超导电流的磁场抵消了原来环域中的磁场，使园环体内的磁感应强度为零，但园环内感应的超导电流不消失，因此园环孔中仍保留了一部分磁通量，称为冻结磁通。冻结磁通只能是磁通量子的整数倍，即磁力线是分立的，一根一根的。园环加磁场后，超导环孔内的磁通量始终是量子化的。1961年这个结论由实验证实。磁通量子化是超导宏观量子效应的一个重要例证。

【超导宏观量子理论】研究超导体在宏观尺度范围出现的量子效应

的理论。它是由巴丁、库柏和施里弗等人合作提出的，又称 BCS 理论。其基本内容是：超导态是一种高度有序、长程相干的状态，所有粒子的行为几乎是完全相同的；大量粒子的整体运动，就如同其中一个粒子的运动一样；一个粒子的运动是量子化的，因而这些大量粒子的运动就会表现出一个粒子那样的宏观量子效应来。依据这个理论，超导体中的电子和声子相互作用，形成了库柏电子对（或超导电子对）。在常导态下，电子形成费米球分布；在超导态时，费米球内部的低能电子与常导态中的电子一样，但费米面附近的电子由于吸引力的作用，按相反的动量和自旋两两结合成一对对的电子。这些电子对与晶格之间无能量交换，要拆开一个电子对，必须给予一定的能量，小于这一能量，电子对拆不开，这就是基态和激发态之间的能隙。能隙是温度的函数，在 $T=0\text{K}$ 时最大，在 $T \geq T_c$ （临界温度）时能隙降至零，超导体转变为常导态。在超导态中，单个电子的速度各不相同，但每个电子对的速度为零，即总动量为零。在速度空间中，所有电子对都凝结在零动量上。穿过超导环的磁通量是量子化的。从超导宏观量子理论可导出超导宏观唯象理论中的伦敦方程和金兹堡—朗道方程。这两种理论有质的区别。前者能揭示物质运动的本质，解释各种现象，而后者只能描述各种现象，不能揭示本质。BCS 理论的提出是超导研究史上的一个重大突破，它使近 20 年来超导电性的基础研究和应用研究都出现了完全崭新的面貌。

【约瑟夫逊效应】两块超导体弱耦合时，隧道电流与电子对相位有关的现象。这是约瑟夫逊 1962 年在理论上预示，1963 年实验上得到证实的。这种效应又称超导电子对隧道效应，它是一种量子位相的关联效应，是构成超导电子器件最基本的物理效应。超导体

—绝缘体或半导体—超导体结构中绝缘体或半导体层很薄时，形成弱耦合，加直流电压或交流电压会出现不同的效应。直流约瑟夫逊效应的基本特点是：当通过隧道结的电流小于某一临界值时，在结上没有电位降却有电流，而当通过隧道结的电流超过这临界值时，结上才产生电位降，伏安特性曲线跳回到正常电子隧道结的伏安曲线上，而超导隧道结电流密度 $j = j_0 \sin \varphi$ ，此处 φ 为两个超导体之间电子对的相位差， j_0 为两个超导体间临界电流。交流约瑟夫逊效应的主要表现是：当在隧道结两端加上直流电压（超导电流大于临界电流），在结区产生了射频电流振荡；在隧道结上同时加上直流电压和射频电压之后，将产生通过结的直流电流，在结受到微波辐射场照射时，改变施加在结上的电压，通过结区的直流电流在某些分立的直流电压下会突然增大，伏安特性上会出现一系列电流阶梯；如在隧道结上施加直流电压和静磁场，伏安特性亦存在一系列台阶。

【超导量子干涉现象（效应）】通过单个约瑟夫逊结的最大超导电流随外加磁场的变化，如同光线通过狭缝在空间产生衍射图案一样的相长或相消现象。两个约瑟夫逊结的闭合超导环中，电子对波加在一个结上的任何扰动都会立即传递到另外一个结上。当外加磁场为某一特定值时，干涉波具有相同的相位，产生相长性相互作用，使流过超导量子干涉器件的电流达到最大值；而当磁场为另一特定值时，会出现相互抵消的相互作用，使超导电流为零。

【超导材料】具有超导电性的一类物质。按其组成可以分为合金系（包括元素）超导体和化合物系超导体。合金系材料临界磁场和临界电流比较低，但塑性好，可被加工成细线、带状和具有各种截

面形状的复合导体。化合物系材料临界磁场和临界电流比较高,但一般很脆,必须采用特殊的制作方法。超导元素的临界温度较低。现已知道约有半数金属元素是超导体,如铌(Nb)是转变温度最高(9.3K)的金属元素。合金和金属化合物在高一点的温度下仍是超导的,如铌三锗(Nb_3Ge)的转变温度为23K。按超导体结构形状可分为超导线材、带材和超导薄膜。超导线材带材主要用于产生强磁场和传输电力;超导薄膜主要用于超导器件和超导集成电路。

【高温超导材料】超导临界温度超过25K的一类超导材料。必须采用低温技术才能获得超导电性,是超导体应用受到限制的一个主要因素。各国科学家一直在努力寻找室温或更高温的超导材料。目前氧化物超导体的临界温度已提高到130K上下,碳60的临界温度已达44K。

【临界温度】在电流和磁场强度保持足够低时,超导体电阻突然变为零的温度。每一种超导材料都有一定的临界温度。在常压下具有超导电性的元素有27个。到目前为止,临界温度最高的是元素铌,临界温度为9.5K。超导合金和化合物的临界温度较高。1989年已制成临界温度130K上下的氧化物超导材料。

【转变温度】超导体从超导态转变为常导态的最高温度。当电流和磁场强度足够低时,转变温度等于临界温度;否则,转变温度低于临界温度。由于实际材料的不均匀性,转变温度会展宽成一个小范围。

【临界电流】使超导体从超导态转变为常导态的最小电流。对第Ⅰ类超导体，这种转变是由于电流产生的磁场超过临界磁场而引起的。例如，半径为 R 的超导线材，通过电流 I 时，超导体的表面磁场为 $I/2\pi R$ ；电流足够大，会使表面磁场超过临界磁场，而破坏线材的超导态。对第Ⅱ类超导体，这种转变是由于洛伦兹力超过缺陷对磁通的钉扎力而引起的。

【临界磁场】使临界温度 T_c 以下的超导体从超导态转变为正常态的最小外加磁场。对第Ⅰ类超导体，这是一个确定值。对第Ⅱ类超导体，从常导态到超导态的转变不是突然的，经历先表面后体内，从局部到整体的过程。相应就有表面、上和下三个临界磁场。表面临界磁场是指超导体表面可能形成超导电性成核的最高磁场强度；上临界磁场是指超导体体内可能出现超导态成核的最高磁场强度；下临界磁场是指超导体开始明显偏离抗磁性，因而磁通可以穿透进入样品内部时的磁场强度。

【第Ⅰ类超导体】在超导态同时呈现完全抗磁性和完全导电性的一类超导体。大多数纯元素金属超导体是这类超导体，外磁场进入超导体内的长度较短。铝、镓、铟、铅、铋、锡等等都是第Ⅰ类超导体。

【第Ⅱ类超导体】在临界温度下，在小电流和低磁场情况呈现明显的完全导电性，而不呈现完全抗磁性的一类超导体。大多数合金和金属间化合物超导体是第Ⅱ类超导体，外磁场透入超导体的深度较大。如金属铌、锆、钒，及超导合金铌三锡、钛二铌、钼三铌等等都是第Ⅱ类超导体。

【超导电子器件和电路】基于超导电性的一类电子器件和集成电路。超导电子器件和电路与半导体电子器件和电路相比，有无可比拟的优点：（1）响应时间极快，低至皮秒以下，比半导体器件和电路快 1—2 个数量级；（2）集成度极高，单个约瑟夫逊结可望达到比生命细胞稍大一点，比半导体器件高 4—5 个数量级；（3）功耗极低，单个器件为 1 微瓦左右，比半导体器件低 3—4 个数量级；（4）能耗极小，每个门为 10^{-15} — 10^{-17} 焦耳，比半导体门低 3—5 个数量级；（5）工作电压极低，约为 3—10 毫伏，比半导体器件低 3 个数量级；（6）传输线损耗极低，性能匹配十分有利；（7）极高可靠性。超导器件和电路在某些方面还具有半导体器件和电路无法完成的功能。超导器件和电路是解决集成度、功耗和速度三者矛盾的优值方案。

【超导二极管】又称超导隧道结二极管。建立在约瑟夫逊隧道效应和准粒子注入隧道效应基础上的二极管。通常，它由两个超导体通过一种使它们形成弱连接的中间层组合而成。这种弱连接可以由超导体，或常导体，或半导体，或绝缘体形成。连接方式可以是层状，颈状或点状。最有发展前途的是：超导肖特基势垒二极管，超导体—绝缘体—常导体结二极管，超导体—绝缘体—超导体超导结二极管（SIS），超导体—常导体—超导体超导结二极管，和超导体—半导体—超导体超导结二极管（SS_eS）。其中 SIS 超导二极管是超导集成电路最基本的单元器件。

【超导量子干涉器件】由一个闭合超导环连接的两个或两个以上的约瑟夫逊结构成的一种新型超导微电子器件。其工作原理是依据

超导量子干涉现象，即通过器件的电流会随外加磁场变化出现相长或相消作用。其基本特点是对外加磁场特别敏感。按照结构主要有单结型、双结型和多结型等，亦有层状、点状干涉结等多种方式。单结器件在谐振电路中能够把信号放大，而且深低温工作大大减小了谐振回路的噪声。双结器件主要用于超导存贮器，包括存贮单元，驱动器，译码器和双向电流源等。三结器件结电容小，磁场灵敏度高，器件增益大，速度快，已成为超导数字电子学的基本器件。超导量子干涉器件可构成超导数字逻辑电路和超导存贮器，超导前置放大器，超导信号发生器，超导模数转换器等。它也可构成陈列器件，既能保持器件的原有功能，又能形成较大的功率和较小的阻抗。

【超导结型晶体管】由两个或多个约瑟夫逊结构成的晶体管。可以采用薄膜法、微桥弱耦合法或二者相结合的方法来制备。超导结型晶体管加适当偏置可以构成共发射极、共基极组态等超导放大器。它的放大作用可以这样理解：在超导临界温度以下绝对零度以上时，超导体处的超导态是一种电子对和准粒子共存的状态，它们在一定条件下可以互相转换；如果在超导晶体管的发射结上加一个偏压，其值大于能隙后就可以拆散超导电子对，并使准粒子通过隧道效应注入到中间层（基区），在中间层中出现复杂的拆散电子对和复合准粒子的过程，在适当条件下，这种过程导致准粒子的增加，在集电结上再加上小于能隙的偏压，从而得到电流放大。

【超导场效应晶体管】以电场对作为衬底的超导体或半导体的作用为工作基础的一类晶体管。存在两种超导场效应晶体管：其一当

加正电场以后，在超导体薄层表面上造成一个电子密度增大的区域，从而使超导临界温度增大；另一种超导体需要加负电场才能达到同样的结果。按所用衬底不同，又可分为超导体耦合的场效应晶体管和半导体（硅，化合物及合金）耦合的场效应晶体管。

【超导磁通量子器件】工作原理依据磁通量子运动的一类超导器件。又称分布型超导二极管，或超导传输线器件。把约瑟夫逊结沿一个方向拉长，沿另一个方向压短，使之成为条状或带状而构成这种器件。在器件内部，磁通量子是信息的传递者。通常有超导磁通量子模拟器件和数字器件。

【二维电子气超导场效应管】由沟道区二维电子气耦合的超导场效应晶体管。在超低温和强磁场等特定条件下，二维电子气的霍尔电阻成为量子化的数值，而且仅仅与基本物理常数有关。实验上，在 N 沟道硅 MOS 场效应晶体管的反型层，在 1.5K 超低温和 10 特斯拉的强磁场下霍尔电阻随栅压变化显示出量子化的阶梯；在 4.2K 和 4 特斯拉时，在 GaAs/AlGaAs 异质结场效应晶体管中也观察到霍尔电阻随磁场变化时出现阶梯。二维电子气金属—氧化物—化合物或合金超导体约瑟夫逊结场效应晶体管是超大规模集成电路中有发展前途的低功耗、超高速器件。

【超导计量器件与系统】基于超导量子干涉器件加上适当的转换器，用于计量或基准的一类器件和系统。1964 年发明了直流干涉器件，以此为基础的磁强计，磁场梯度计，电流计及电压表相继问世。60 年代后期，射频量子干涉器件发明。随后基于射频干涉器件的磁强计、电压表、磁场梯度计、磁化率计研制成功，并获

得广泛应用。70 年代初,电压基准监视系统研制成功,导致以射频干涉器件作为检流计的电压比较仪和电流比较仪诞生,用于电压基准系统的监视精度提高了一个数量级。近年来,人们在测量射频电压、电流、功率及衰减以及精确测量频率、光速、统一时间和长度基准方面进行了尝试和探索。

【超导微波器件系统】基于约瑟夫逊器件作为微波混频、中频检波和参量放大的一类器件系统。约瑟夫逊器件在极其宽广的频段上保持低噪声、高灵敏度和反应速度快等特性,可以复盖从直流、音频、微波直至远红外的频率范围。1975 年,有人提出一种全超导化的超外差接收机方案,主要由三部分组成:一个用超导体与半导体构成肖特基势垒结二极管,用来把输入信号变成中频信号;一组约瑟夫逊结参放,用来把中频信号变频获得增益,再用超导肖特基二极管变回到中频,提供一低噪声中频放大器;一个是电压控制的约瑟夫逊结与某一稳定的参考源 n 次谐波锁定,组成毫米波本机振荡器,省去了高稳定度的毫米波源。

【超导电子计算机】基于平叠式约瑟夫逊隧道结逻辑和超导量子干涉器件逻辑的计算机基本门、触发器电路,单磁通量子存贮单元,超导非破坏性读出随机存贮器,以及低温超导配电网络部件,通过芯片——小板——大板——整机四级全硅系统的微型组装技术构成的电子计算机。门延迟时间 100 皮秒的计算机中,任意两点之间的距离不应超过 15 厘米。因此,一个超高速计算机的体积应限制在 $15 \times 15 \times 15$ 立方厘米的范围里。超导计算机能够紧凑地容纳在此体积内,而且没有功率耗散问题,在低温下工作,可使用电阻性负载,噪声低,信号传输无衰减,传输线可以做得很窄很

薄，有利于集成密度和多层结构平面化。对于军事应用，超导微处理机及其阵列机可能具有特殊的价值。一种微处理机包括 4000 个逻辑门，32K 位组存贮器，而体积只有 25 立方厘米，周期时间仅为 2.5 纳秒，功耗为 150 毫瓦。用这种微处理机构成大小不同的阵列机，供搜索雷达、机载预警雷达、潜艇声纳、海底监视和电子支持测量等军事用途使用。