

# 半导体家族 (二)

韩郑生

(中国科学院微电子研究所 100029)

## 4. 半导体器件家族

半导体器件同样是种类繁多、神通广大、各显其能，其族谱如图 15 所示。

在半导体器件中贡献最突出的当属双极晶体管 (BJT) 和金属 - 氧化物 - 半导体场效应晶体管 (MOS-FET)。他们既可以以分立器件的形式单独成为产品实用，也可以作为构成集成电路的基本器件。

### 4.1 分立器件

半导体分立器件包括具有整流作用的二极管 (Diode)，可作为开关或线性放大应用的 BJT、MOSFET、结型场效应晶体管 (JFET)、垂直双扩散场效应晶体管 (VDMOSFET)，以及主要作为开关应用的晶闸管 (Thyristor)、绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 等。

#### 4.1.1 双极晶体管

双极晶体管是 1948 年由巴丁 (J. Bardeen)、布莱

顿 (W. Brattain) 和肖克利 (W. Shockley) 在贝尔实验室研制成功的，为此他们在 1956 年获得了诺贝尔物理奖，图 16 所示为 3 人工作的照片，图 17 所示为他们研制的第一个锗晶体管。

双极晶体管的结构与符号如图 18 所示，分为 NPN 型和 PNP 型两种，它是由两个背对背的 pn 结组成，对应发射极 (E)、基极 (B) 和集电极 (C) 三个电极，所以又俗称为三极管。其共射极转换特性曲线如图 19 所示，根据不同的偏置，它可以分为放大区、截止区和饱和区。放大区对应于可用一个较小的基极电流控制产生一个被放大的集电极电流。模拟集成电路通常工作在这个范围。数字集成电路工作则是以开关的形式在饱和区与截止区之间跳转。在早期双极晶体管是集成电路的主要器件。图 20 是一个分立 NPN 双极晶体管剖面图，其发射极 E 和基极 B 是从正面引出，而集电极 C 是从背面引出。但是在集成电路中，双极晶体管的 3 个电极都必须从正面引出。

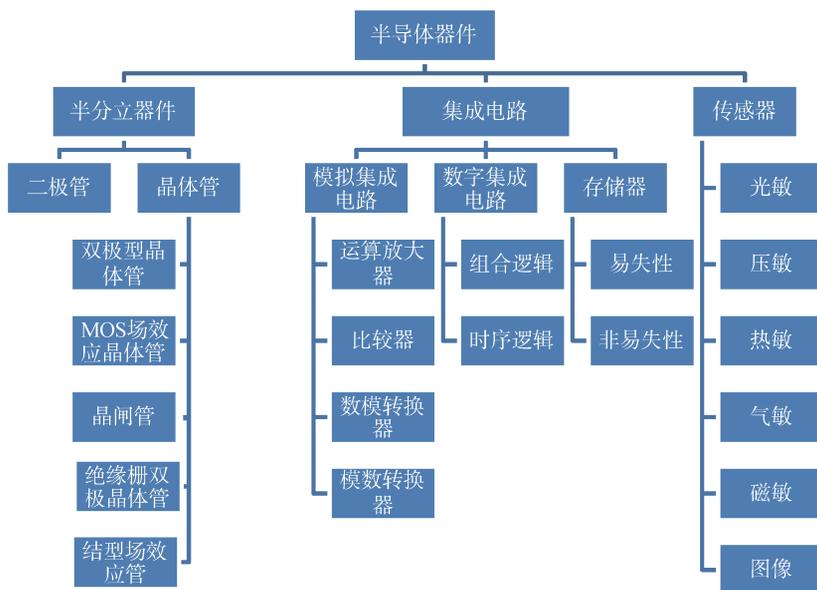


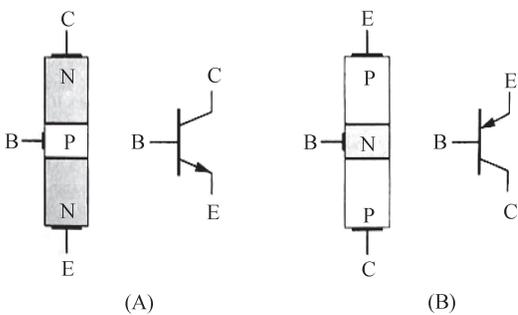
图 15 半导体器件家族



图 16 巴丁、肖克利和布莱顿



图 17 第一个半导体晶体管



NPN 型结构、符号 PNP 型结构、符号

图 18 双极晶体管

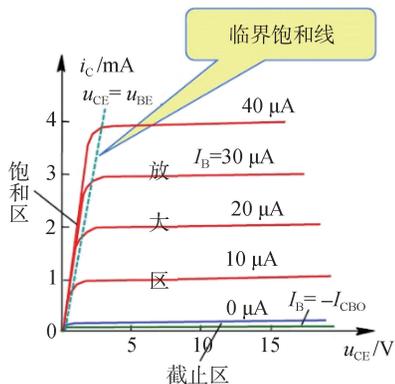


图 19 NPN 型双极晶体管特性

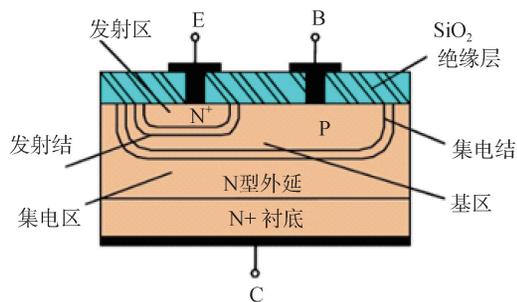


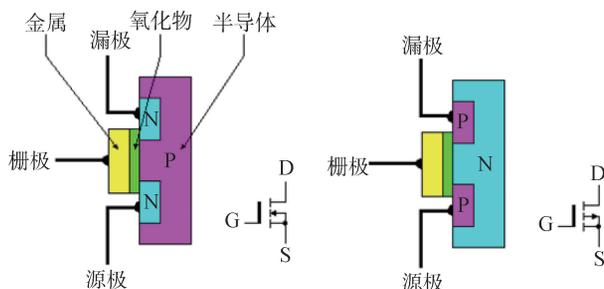
图 20 NPN 双极晶体管剖面

### 4.1.2 MOSFET

1960 年大原 (D. Kahng) 和阿塔拉 (M. Atalla) 在贝尔实验室研制出 MOSFET。MOSFET 分为 N 沟 MOSFET 和 P 沟 MOSFET，其结构与符号如图 21 所示。图 22 所示为一个 NMOSFET 特性曲线。根据不同的偏置，它同样可以分为放大区、截止区和饱和区。放大区对应于可用一个较小的栅极电压控制产生一个被放大的漏极电流。模拟集成电路通常工作在这个范围。数字集成电路工作则是以开关的形式在饱和区与截止区之间跳转。

### 4.1.3 半导体功率器件

我们可以将支持电子系统工作的电源部分比作



NMOSFET 结构、符号 PMOSFET 结构、符号

图 21 MOSFET

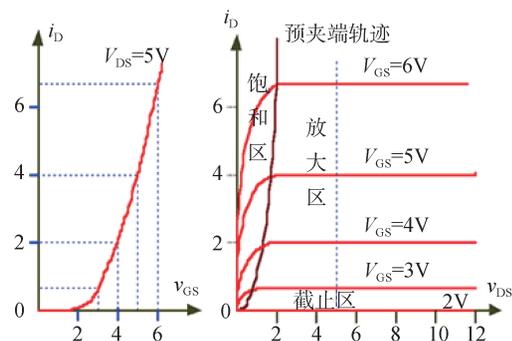


图 22 NMOSFET 特性曲线

“心脏”，这部分的核心乃是半导体功率器件，有时又称为电力电子器件，如 Thyristor、巨型晶体管 (GTR)、VDMOSFET、IGBT 等。功率半导体器件已广泛应用于电网、动力机车、工业控制、家电等领域。

(1) 晶体闸流管

晶体闸流管简称晶闸管，又被称做可控硅整流器，以前被简称为可控硅；1957年美国通用电气 (GE) 公司开发出世界上第一款晶闸管产品，并于 1958 年将其商业化；晶闸管是 PNPN 四层半导体结构，它有三个极：阳极，阴极和控制极；晶闸管具有硅整流器件的特性，能在高电压、大电流条件下工作，且其工作过程可以控制、被广泛应用于可控整流、交流调压、无触点电子开关、逆变及变频等电子电路中。

(2) VDMOSFET

VDMOSFET 是一种理想的功率器件，VDMOS 主要应用于电机调速、逆变器、不间断电源、电子开关、高保真音响、汽车电器和电子镇流器等。其特征是接近无限大的静态输入阻抗特性，非常快的开关时间，导通电阻正温度系数，近似常数的跨导，高  $dV/dt$ 。

其制造过程是先在重掺杂 N+ 衬底上生长一层 N 型外延层，由 P 型基区与 N+ 源区的两次横向扩散结深之差形成沟道，这两个区域在离子注入过程中都是通过栅自对准工艺注入各自的掺杂杂质，其剖面如图 23 所示。

(3) IGBT

IGBT 是由 BJT 和 MOSFET 组成的复合全控型电压驱动式功率半导体器件。与 VDMOS 不同的是在背

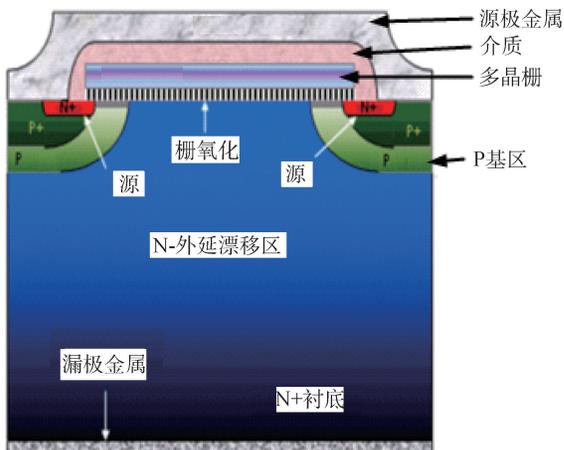


图 23 VDMOS 器件剖面图

面增加了一层 P+ 衬底层，如图 24 所示。与以前的各种电力电子器件相比，IGBT 具有以下特点：高输入阻抗，可采用通用低成本的驱动线路；高速开关特性；导通状态低损耗。IGBT 兼有 MOSFET 的高输入阻抗和巨型晶体管的低导通压降两方面的优点。IGBT 综合了以上两种器件的优点，驱动功率小而饱和压降低，是一种适合于中、大功率应用的电力电子器件，IGBT 在综合性能方面占有明显优势，非常适合应用于直流电压为 600V 及以上的变流系统如交流电机、变频器、开关电源、照明电路、牵引传动等领域，图 25 是 IGBT 的应用谱系。目前硅基 IGBT 最高额定电压可达 6500V、最大额定电流可达 750A，是半导体器件家族的大力士。

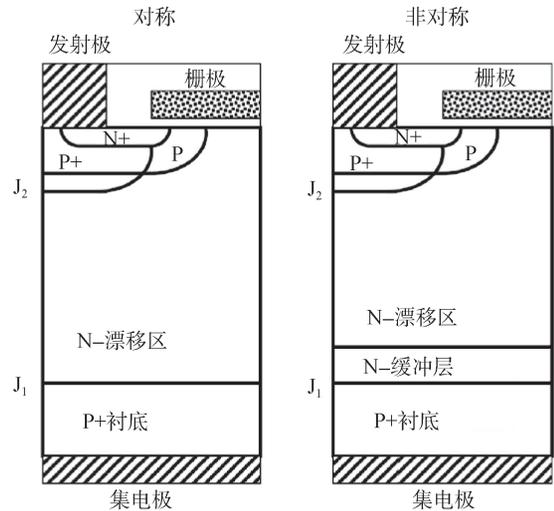


图 24 两种 IGBT 器件剖面图

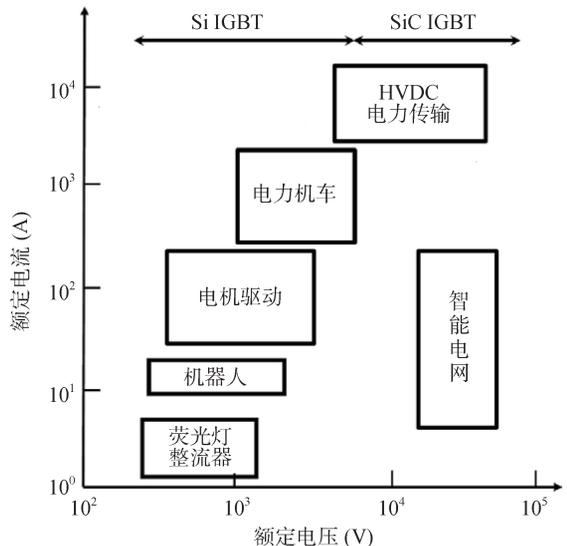


图 25 绝缘栅双极晶体管的应用谱系

## 4.2 集成电路

1958年，美国德州仪器(TI)公司的基尔比(J. Kilby)发明了集成电路方法。1959年2月6日，基尔比向美国专利局申报专利，这种由半导体元件构成的微型固体组合件，被命名为“集成电路”(IC)。基尔比由此获得2000年诺贝尔物理学奖，图26是基尔比，图27是他发明的第一个集成电路。美国仙童(Fairchild)公司的诺依斯(R. Noyce)和他的研发团队则解决了大规模集成电路生产的关键技术问题，即平面工艺技术。



图26 基尔比(J. Kilby)

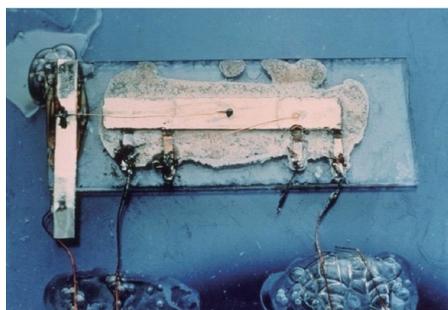


图27 第一个集成电路

1963年万利斯(F. Wanless)在仙童公司(Fairchild)研制出Si基CMOS集成电路。CMOS图28所示为一个硅栅CMOS的电路图、版图(顶视图)、剖面图，实际上它就是一个反相器，逻辑上可实现“非”的功能，所以也可以称为“非门”。CMOS电路以静态功耗低、抗干扰性强、其尺寸可遵循按比例缩小(Scaling down)规律等优势在集成电路中占据统治地位。

1965年4月美国英特尔(Intel)公司的摩尔(G. Moore)博士发表著名的论文“Cramming more components onto integrated circuits”，预言集成电路上能被集成的晶体管数目，将会以每24个月翻一番的速度稳定增长，并在今后数十年内保持着这种势头。摩尔

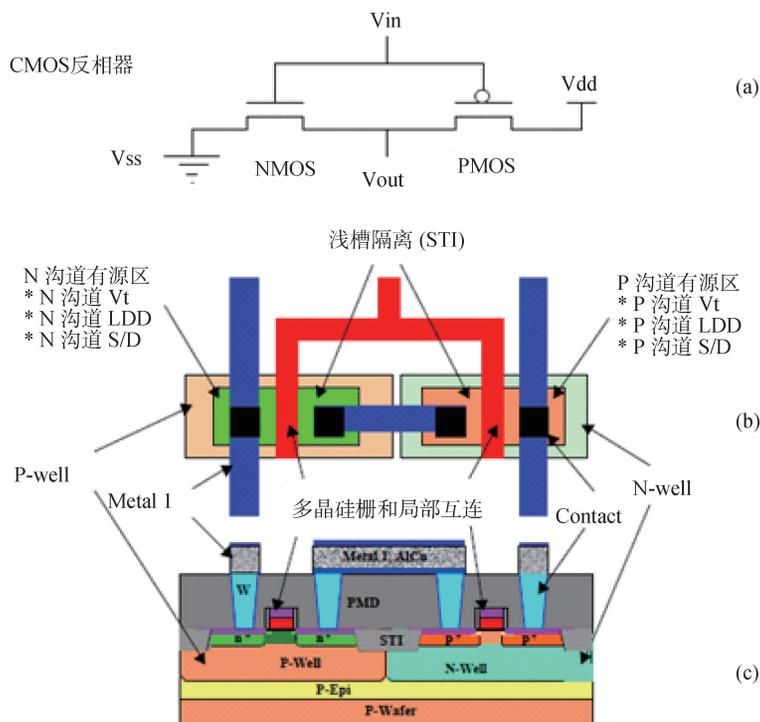


图28 CMOS反相器(a)电路图(b)版图(c)剖面图

的这个预言，因集成电路芯片后来的发展得以证实，并在较长时期保持着有效性，被人誉为“摩尔定律”。图 29 是摩尔先生的照片，图 30 是摩尔著名论文中的预测曲线。

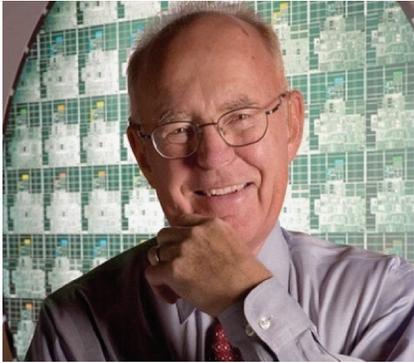


图 29 摩尔先生 (G. Moore)

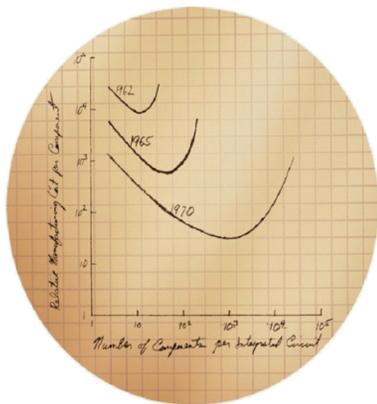


图 30 摩尔论文中的预测曲线

集成电路发展过程中，曾按每个芯片上集成的器件数来划分，如表 1 所示。后来大概是表示规模的形容词都用完了，就不再按此法划下去了。但是每个芯片上集成的器件数并没有停止增加。目前集成度是每个芯片有百亿个器件的量级。

表 1 半导体的电路集成

电路集成	半导体产业周期	每个芯片元件数
没有集成 (分离元件)	1960 年之前	1
小规模集成电路 (SSI)	20 世纪 60 年代前期	2 至 50
中规模集成电路 (MSI)	20 世纪 60 年代到 70 年代前期	20 至 5,000
大规模集成电路 (LSI)	20 世纪 70 年代前期到 70 年代后期	5,000 至 100,000
超大规模集成电路 (VLSI)	20 世纪 70 年代后期到 80 年代后期	100,000 至 1,000,000
甚大规模集成电路 (ULSI)	20 世纪 70 年代后期	大于 1,000,000

集成电路晶圆直径也经历了由小到大的过程，表 2 是按公制计所发生的变化。图 31 所示是按英制计晶圆尺寸变化情况，图中 1.5'、2'、3'、4'、5'、6'、8'、12' 表示晶圆直径分别是 1.5 英寸、2 英寸、3 英寸、4 英寸、5 英寸、6 英寸、8 英寸、12 英寸其实二者有一一对应关系，只是不同人习惯的叫法不同。例如，4 英寸对应 100mm。

表 2 集成电路晶圆直径发展与年份的关系

1965	1975	1981	1987	1992	2000	年
50	100	125	150	200	300	mm

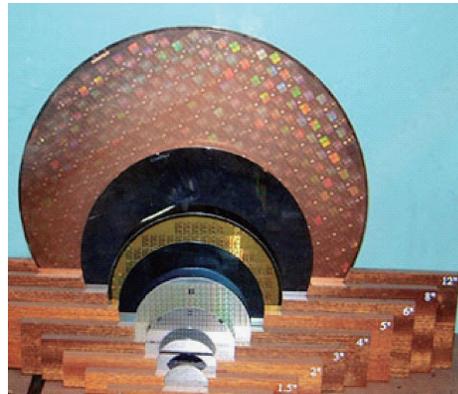


图 31 集成电路晶圆尺寸的变化

工业革命的蒸汽机、机械和电气设备取代了人类的许多体力劳动，极大地提高了劳动效率。以电子计算机为代表的信息时代，电子系统接替了人类的许多脑力劳动，使计算能力得到了巨大的提高。计算机的核心是中央处理器 (CPU) 和存储器等，犹如人类的大脑，所以计算机还有一个俗称“电脑”。

#### 4.2.1 微处理器

20 世纪 70 年代微处理器 (Microprocessor) 诞生，其核心部分是中央处理器 (CPU)。1971 年 11 月 15 日，英特尔 (Intel) 公司的工程师霍夫 (M. Hoff) 发明了世界上第一个商用微处理器 MCS-4，其 CPU 电路 4004 如图 32 所示，它是信息技术领域的一个重要里程碑。这款 4 位微处理器虽然只有 45 条指令，每秒也只能执行 5 万条指令，运行速度只有 108KHz，甚至比不上 1946 年世界第一台电子计算机 ENIAC。但它的集成度却要高很多，采用 2 英寸晶圆， $10\mu\text{m}$  的工艺制成，集成晶体管 2300 只，一块 4004 的重量还不到一盎司。

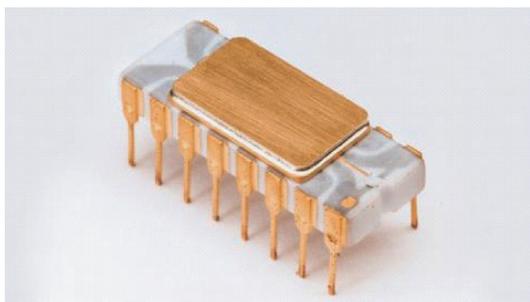


图 32 Intel 的微处理器—4004<sup>[6]</sup>

这一突破性的发明最先应用于 Basicom 计算器，为个人计算机的智能嵌入铺平了道路。

2015 年 8 月 5 日又发布了 Intel Skylake，如图 33 所示。它是 Intel 第六代微处理器架构，采用 12 英寸晶圆，14 nm 制程，是 Intel Haswell 微架构及其制程改进版 Intel Broadwell 微架构的继任者。



图 33 Intel Skylake 产品

#### 4.2.2 存储器

您听说过“千年虫”吗？“千年虫”问题的根源始于 20 世纪 60 年代。当时计算机存储器的成本很高，如果用四位数字表示年份，就要多占用存储空间，就会使成本增加，因此为了节省存储空间，计算机系统的编程人员采用两位数字表示年份。随着计算机技术的迅猛发展，虽然后来存储器的价格降低了，但在计算机系统中使用两位数字来表示年份的做法却由于思维上的惯性势力而被沿袭下来，年复一年，直到新世纪即将来临之际，大家才突然意识到用两位数字表示年份将无法正确辨识公元 2000 年及其以后的年份。1997 年，信息界开始拉起了“千年虫”警钟，并很快引起了全球关注。世界各地投入大量人力物力逐个行业，逐个系统地测试，据说统计耗资 6000 亿美元，是人类有史以来最昂贵的救灾行动。

现在我们处在运算、大数据的时代，再不会去考虑怎么节省几位存取位的问题了。

半导体存储器已经繁衍成一个庞大家族，如图 34 所示。半导体存储器按功能分有①只读存储器 (ROM)：存储的内容是固定不变的，只能读出而不能写入的半导体存储器。②随机读写存储器 (RAM)：既能读出又能写入的半导体存储器。

按信息保存性分有①非永久记忆的存储器：断电后信息即消失的存储器，又称为易失性存储器。②永久记忆性存储器 (NVM)：断电后仍能保存信息的存储器，又称为非易失性存储器。

ROM 有固定掩模编程 (ROM)，可编程 (PROM)，紫外光擦除可编程 (EPROM)，电可擦除的可编程 (EEPROM)，闪速存储器 (Flash Memory) 5 种。

存储器 (Memory) 是现代信息技术中用于保存信息的记忆器件。计算机中全部信息，包括输入的原始数据、计算机程序、中间运行结果和最终运行结果都保存在存储器中。它根据控制器指定的位置存入和取出信息。存储器的主要功能是存储程序和各种数据，并能在计算机运行过程中高速、自动地完成程序或数据的存取。它采用具有两种稳定状态的物理器件来存储信息。在计算机中采用只有两个数码“0”和“1”的二进制来表示数据。记忆元件的两种稳定状态分别表示为“0”和“1”。日常使用的十进制数必须转换

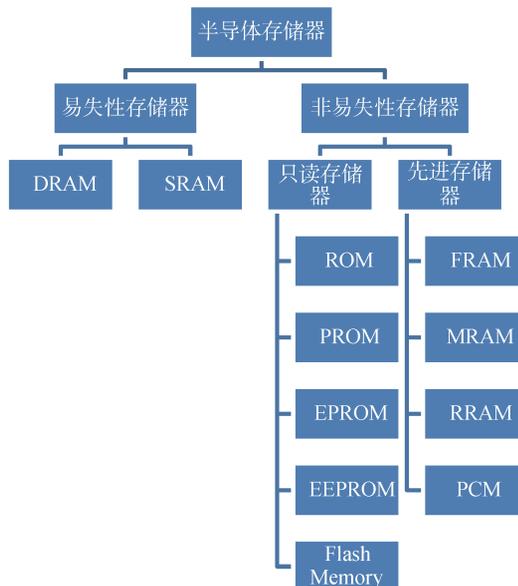


图 34 存储器家族

成等值的二进制数才能存入存储器中。计算机中处理的各种字符，例如英文字母、运算符号等，也要转换成二进制代码才能存储和操作。

半导体存储器电路主要由存储单元阵列、地址译码、读写控制电路及输入/输出(I/O)接口几部分构成，如图 35 所示。

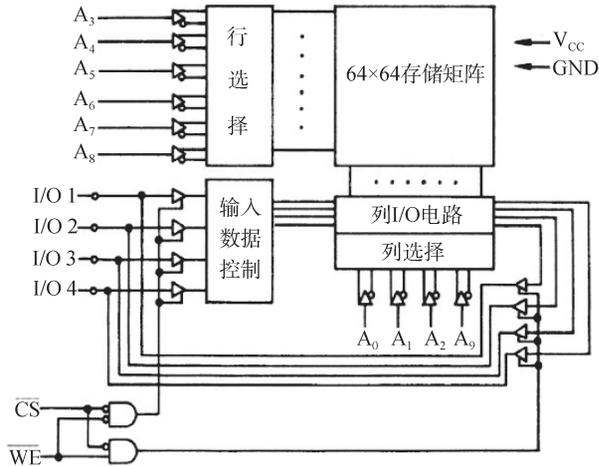


图 35 Intel 公司的 SRAM 2114

静态随机存取存储器 (SRAM) 是一种以双稳态电路作为存储单元，如图 36 所示，具有静止存取功能的存储器，不需要刷新电路即能保存它内部存储的数据。SRAM 具有读取速度快、功耗较小的优势，通常作为计算机的内存。

动态随机存取存储器 (DRAM) 使用电容存储，每隔一段时间，要刷新充电一次，否则内部的数据即会消失。其存储单元的电路如图 37 所示，DRAM 具有存储密度高的优势。

由于篇幅关系，以上仅列举了集成电路中两类代表性的产品。

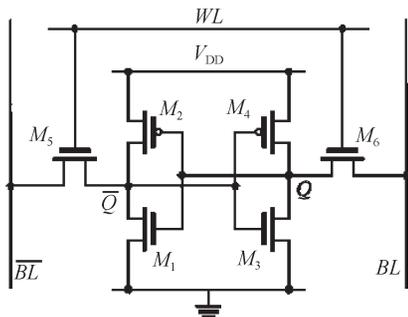


图 36 SRAM 存储单元电路

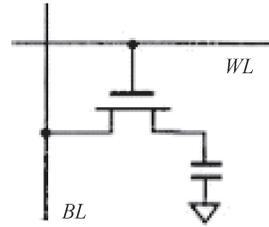


图 37 DRAM 存储单元电路

### 4.3 传感器

有了大脑和心脏，怎样和外界进行交互作用呢？输入设备有键盘、鼠标、扫描仪等。输出设备有屏幕、打印机等。以及现在兼备输入输出功能的触摸屏。这显然和我们人类活动还不太一样。

那么该各种传感器粉墨登场了。各种温度、压力、视觉、音频传感器就可以完成我们的耳、鼻、喉、眼、舌、皮肤等。谁来做呢？各种半导体传感器首当其冲，它们以重量轻、体积小、易与半导体集成电路组合在一个系统中，甚至以系统级封装 (SiP) 形式封装一个模块中或以系统级芯片 (SoC) 的形式集成一个芯片上。

电荷耦合器件 (CCD)、CMOS 图像传感器就是半导体家族中千里眼和照妖镜，如图 38 所示。CCD 能够把光学影像转化为电信号。CCD 上植入的微小光敏物质称作像素 (Pixel)。一块 CCD 上包含的像素数越多，其提供的画面分辨率也就越高。CCD 的作用就像胶片一样，但它是把光信号转换成电荷信号。CCD 上有许多排列整齐的光电二极管，能感应光线，并将光信号转变成电信号，经外部采样放大及模数转换电路转换成数字图像信号。装在卫星上的这些传感器可以在万里之外遥望我们的地球，实现高分辨率的实时对地观测。其分辨率可小于 1m。CCD 广泛应用在数码摄影、天文学，尤其是光学遥测技术、光学与频谱望远镜和高速摄影技术。CCD 在摄像机、数码相机和扫描仪中应用广泛，只不过摄像机中使用的是点阵 CCD，即包括 x、y 两个方向用于摄取平面图像，而扫描仪中使用的是线性 CCD，它只有 x 一个方向，y 方向扫描由扫描仪的机械装置来完成。

CMOS 图像传感器是一种典型的固体成像传感器，如图 39 所示，与 CCD 有着共同的历史渊源。CMOS 图像传感器通常由像敏单元阵列、行驱动器、

列驱动器、时序控制逻辑、模数转换器 (ADC)、数据总线输出接口、控制接口等几部分组成,这几部分通常都被集成在同一块硅片上。其工作过程一般可分为复位、光电转换、积分、读出几部分。CMOS 图像传感器具有以下几个优点: ①随机窗口读取能力, 随机窗口读取操作是 CMOS 图像传感器在功能上优于 CCD 的一个方面。此外, CMOS 图像传感器的高集成特性使其很容易实现同时开多个跟踪窗口的功能。②抗辐射能力。总的来说, CMOS 图像传感器潜在的抗辐射性能相对于 CCD 性能有显著增强。③系统复杂程度和可靠性, 采用 CMOS 图像传感器可以大大地简化系统硬件结构。④非破坏性数据读出方式。⑤优化的曝光控制, 值得注意的是, 由于在像元结构中集成了多个功能晶体管的原因, CMOS 图像传感器也存在着若干缺点, 主要是噪声和填充率两个指标。鉴于 CMOS 图像传感器相对优越的性能, 使得 CMOS 图像传感器在各个领域得到了广泛的应用。

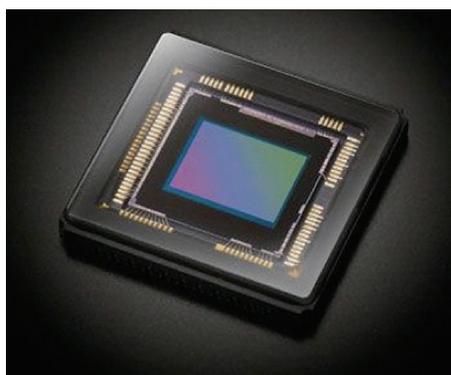


图 39 一款 CMOS 图像传感器

X 射线、红外传感器可以进行材料探伤、夜视观察, 具有火眼金睛高强本领。

### 5. 半导体技术家族

半导体技术是现代电子工业和计算机工业的基础, 也是第三次产业革命的技术基础。

以硅基 CMOS 半导体集成电路制造为代表的半导体技术, 一般分为晶圆制备、光掩模版制备、晶圆前部工序、晶圆测试 (俗称中测)、装配封装 (俗称后部工序)、成品测试、可靠性试验, 如图 40 所示。而晶圆前部工序又可细分为氧化、光刻、刻蚀、薄膜生长、掺杂、金属化、平台化、检测等工艺模块, 如图 41 所示。

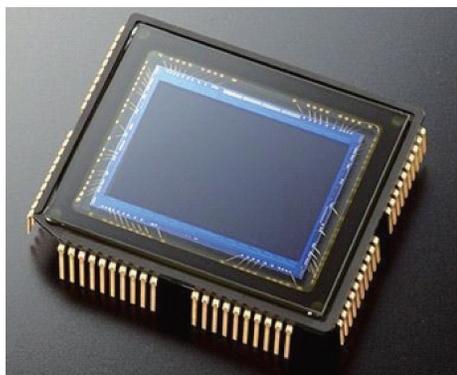


图 38 一款面阵 CCD



图 40 半导体制造技术

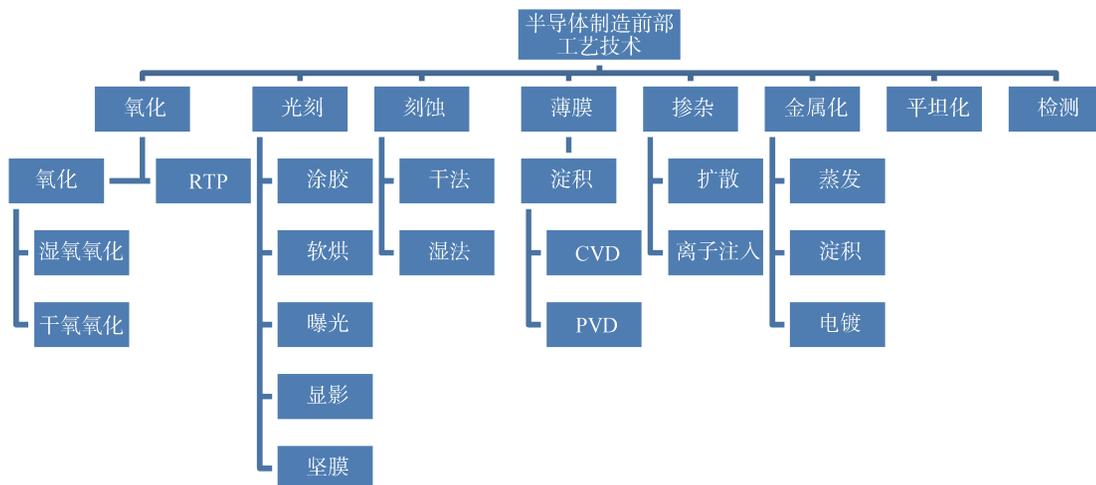


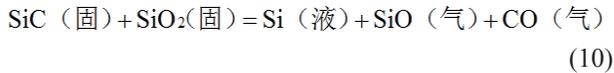
图 41 半导体制造前部工艺技术

铜大马士革互连工艺替代铝金属化后，这部分又分为前端工序和后端工序，即金属化淀积之前的工艺步骤为前端工序，其后为后端工序。

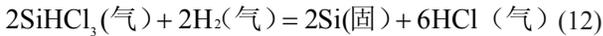
### 5.1 晶圆制备

半导体材料早期是锗材料，但是锗在地壳中的含量约为 0.0007%，是地壳中最分散的元素之一，几乎没有比较集中的锗矿。

而 Si 在地球上存量丰富，地壳中的含量约为 25%。热稳定性好，熔点 1412℃，SiO<sub>2</sub> 是绝好的介质材料，生成容易，SiO<sub>2</sub> 可作为扩散掺杂的掩蔽膜 Si 与 SiO<sub>2</sub> 热胀系数相近，硅的结构可以通过加入少许其他元素而改变其导电性。掺杂是通过加入某种元素到纯硅中以显著增加半导体导电性的过程。室温下纯硅的电阻率 ( $\rho$ ) 约为  $2.5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 。如果每一百万个硅原子中有一个硅原子被一个砷原子取代， $\rho \approx 0.2 \Omega \cdot \text{cm}$ 。 $\rho/\rho_i \approx 1250000$ 。纯硅 (Si) 是从自然界中的石英矿石 (SiO<sub>2</sub>) 中提取出来的，其对应的化学反应如下：



98%



99.9999999%

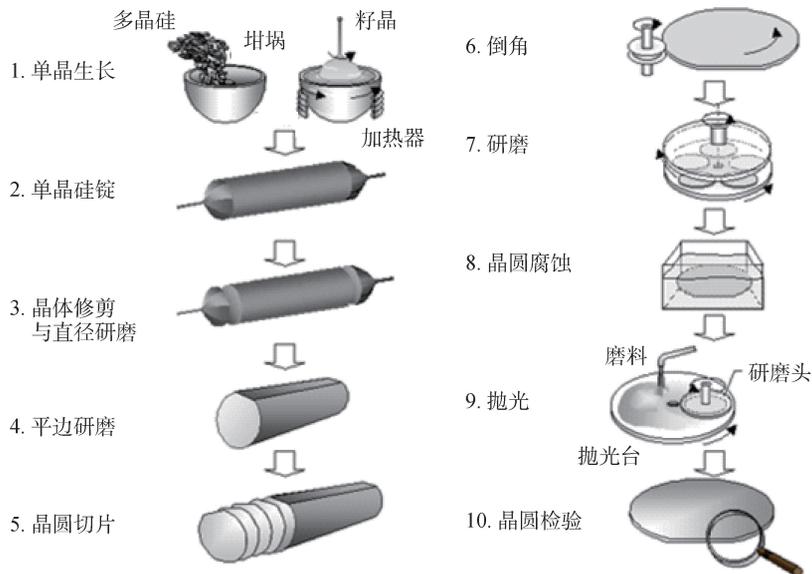


图 44 硅锭整形处理示意图<sup>[7]</sup>

最常用的是切克劳斯基 (Czochralski) 法，简称 CZ 法是把熔化了了的半导体级硅液体变为有正确晶向而且被掺杂成 n 型或 p 型的固体硅锭，如图 42 所示。图 43 是拉制出的直径 300mm 和 400mm 的硅锭。

晶圆制备过程如图 44 所示，①多晶原料放置在

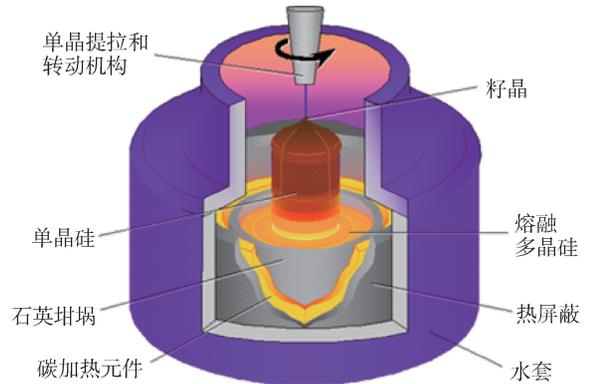


图 42 CZ 法拉单晶示意图<sup>[5]</sup>



图 43 直径 300mm 和 400mm 的硅锭

耐高温的坩埚中、由籽晶与熔融的多晶硅液面接触进行拉制生长；②拉制成单晶硅锭；接下来就是要进行整形处理；③去掉两端、径向研磨；④定位边或定位槽研磨；再往后的步骤是：⑤切片；⑥磨片和倒角；⑦研磨；⑧腐蚀；⑨抛光、清洗；⑩检验；最后是包装。

硅晶圆材料的主要参数指标有：①物理尺寸；②平整度；③微粗糙度；④氧含量；⑤晶体缺陷；⑥颗粒；⑦体电阻率。

## 5.2 光掩模版制备

在半导体制造的整个流程中，其中一部分就是将版图数据转移到光掩模版上。光掩模版除了应用于芯片制造外，还广泛地应用于液晶显示器 (LCD)、印制电路板 (PCB) 等方面。常见的光掩模版有四种，铬版、干版、凸版、液体凸版。主要分两个组成部分，基板和透光材料。基板通常是高纯度、低反射率、低热膨胀系数的石英玻璃。铬版的不透光层是通过溅射的方法镀在玻璃下方厚约  $0.1\mu\text{m}$  的铬层。铬的硬度比玻璃略小，虽不易受损但有可能被玻璃所伤害。应用于芯片制造的光掩模为铬版。干版涂附的乳胶，硬度小且易吸附灰尘，不过干版还有包膜和超微颗粒干版，其中后者可以应用于芯片制造。

在制版时，采用激光步进光刻机 (Stepper) 或电子束直写光刻机对涂覆在光掩模版基材上的光刻胶进行曝光，接下来进行显影、后烘、刻蚀铬层、去胶清洗。

光掩模版有原版 (Reticle Mask)、母版 (Master Mask) 和工作版 (Working Mask) 之分，对应早期接触接近式或  $1:1$  的投影扫描式，要通过原版用步进机重复将比例缩小到 Master Mask 上，应用到晶圆曝光中的为 Working Mask，它由 Master Mask 复制过来。而对于分布重复 (Stepper & Repeater) 或分布扫描 (Stepper & Scanner) 的光刻机光刻，就可以直接用 Reticle mask。图 45 是掩模版实例。

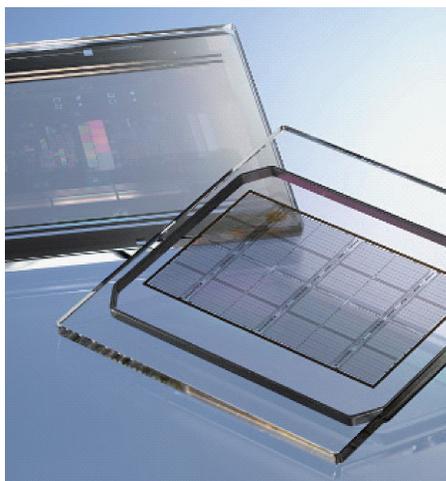


图 45 掩模版

⑤ B.Jayant Baliga. 功率半导体器件基础：电子工业出版社，2013 年

⑥ <http://www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-story-of-intel-4004.html>

⑦ 《Semiconductor Manufacturing Technology - Instructor's Manual》Michael Quirk, Julian Sera, Prentice Hall.

## 科苑快讯

### 一氧化碳解毒剂

最近首次发现了一氧化碳解毒剂。美国宾夕法尼亚州匹兹堡大学 (University of Pittsburgh) 的王玲 (Ling Wang 音译)、徐琴姿 (Qinzi Xu 音译) 与合作者将小鼠置于含有 3% 一氧化碳的环境中长达 4.5 分钟，这足以将大部分人杀死。在给予改良后的脑红蛋白 (脑红蛋白在大脑和视网膜中能够通过结合氧气和一氧化氮来保护细胞) 后小鼠恢复了健康，这些通过基因工

程改良后的脑红蛋白与一氧化碳紧密结合，结合能力比血红蛋白高出 500 倍。美国食品与药品管理局 (US Food and Drug Administration) 已承诺将加快对该药的审查工作。

(高凌云编译自 2017 年 1 月 13 日《欧洲核子中心快报》)