

信息与电子工程导论

Introduction to Information Science and Electronic Engineering

3.2 晶体管和集成电路

章献民 主编

浙江大学出版社

2023年9月

知识图谱

- 2.1 时域和频域
- 2.2 模拟和数字
- 2.3 编码和调制
- 2.4 电磁场与波

2 信号与数据

场与波

信号

数据

信息

1 信息与信息技术概述

- 1.1 信息
- 1.2 信息科学技术概述
- 1.3 知识图谱

3 电子器件与电路

- 3.1 电路模型和基本定律
- 3.2 晶体管和集成电路
- 3.3 集成运算放大器

器件

电路

处理器

计算机

网络

4 逻辑与数字系统

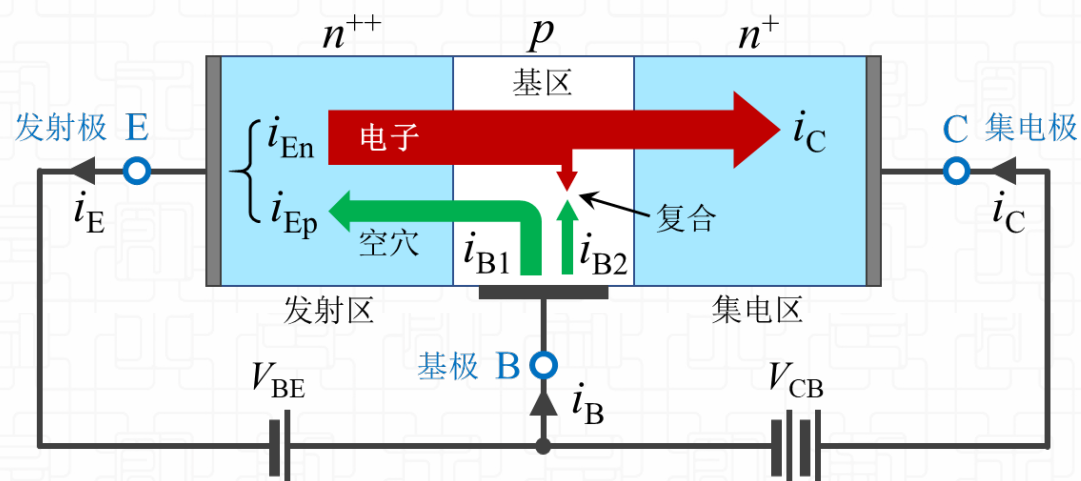
- 4.1 数字逻辑和电路
- 4.2 组合逻辑和时序逻辑
- 4.3 微处理器和计算机系统
- 4.4 嵌入式系统
- 4.5 EDA技术

5 互联与计算

- 5.1 通信与网络
- 5.2 物联与数联
- 5.3 计算与智能

内容提要

- ❖ 半导体和PN结
- ❖ 双极型晶体管
- ❖ 场效应晶体管
- ❖ 集成电路



电子学的发展史

❖ 真空管时期：

- 1946年：以真空管组成第一部电脑。
- 真空管缺点：可靠度不佳、灯丝易断，体积大，产生热量大。

❖ 晶体管时期：

- 晶体管特点：体积小、重量轻、低功率、性能优，可靠性高。

❖ 集成电路时期：

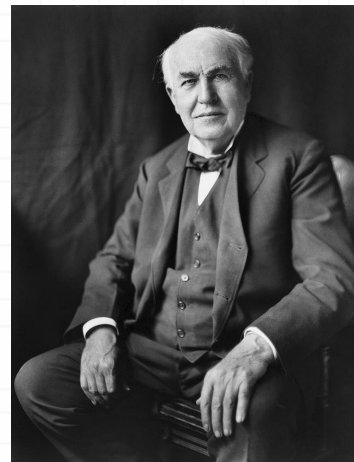
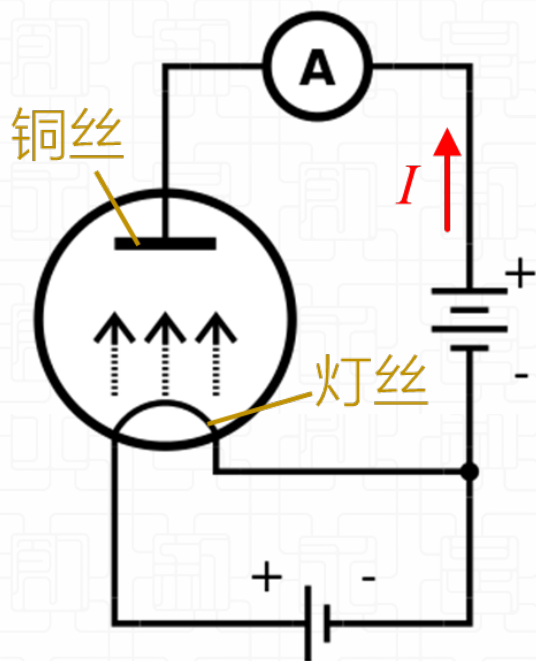
- 集成电路简称IC：在微小的晶片上，制造出电晶体、二极管、电阻等元件。
- 集成电路的优点：体积与重量大幅度减少；低功率消耗；温度稳定佳，可靠性增加；可高速工作；元件容量大。

❖ 微处理器时期：

- 由于超大规模集成电路（VLSI）技术进步，产品大多以微处理器方式控制，所以VLSI时期又称为微处理器时期。

爱迪生效应

- ❖ 1883年，美国发明家爱迪生为寻找电灯泡最佳灯丝材料，做了一项小小的实验。
- ❖ 在灯泡内另行封入一根铜丝，期望可以阻止碳丝蒸发，延长灯泡寿命。



Thomas Alva Edison
Feb 11, 1847—Oct 18, 1931

- ❖ 实验结果非他所想，但他发现，没有连接在电路里的铜丝，却因接收到碳丝发射的热电子而产生了微弱的电流。
- ❖ 爱迪生并没有重视这个现象，只是把它记录在案，申报了一个未找到任何用途的专利。

真空二极电子管

- ❖ 英国电气工程师**弗莱明**在马可尼电报公司工作时，一直在寻求一种可靠的检波手段。
- ❖ 在真空灯泡里装上碳丝和铜板，分别充当阴极和阳极，则灯泡里的电子就能实现**单向流动**，实现一个有效检测微弱电报信号的检波器。
- ❖ 1904年弗莱明研制出一种能够充当交流电整流和无线电检波的特殊“灯泡”，他把这项发明称为“**热离子阀**”。
- ❖ 但是早期由于其性能很不稳定，直到高真空电子管发明后，它才获得普遍应用。

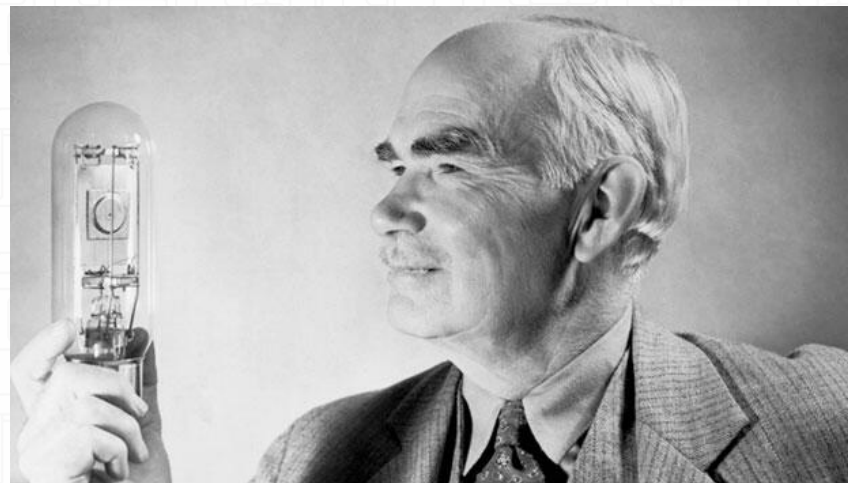
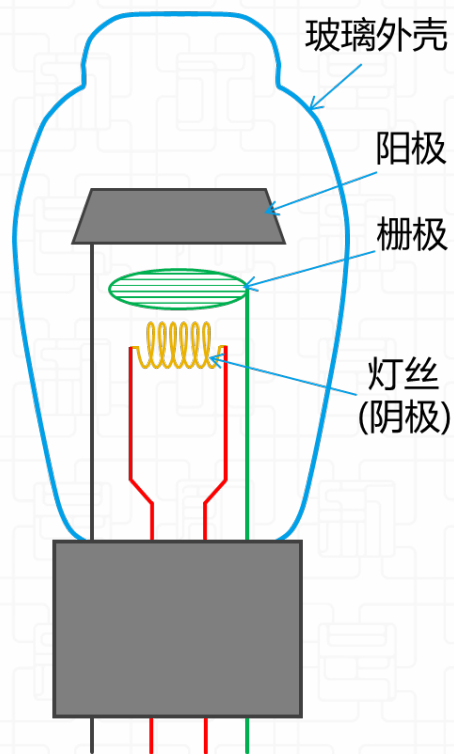


John Ambrose Fleming
Nov 29, 1849—Apr 18, 1945



在电灯泡中加一金属板

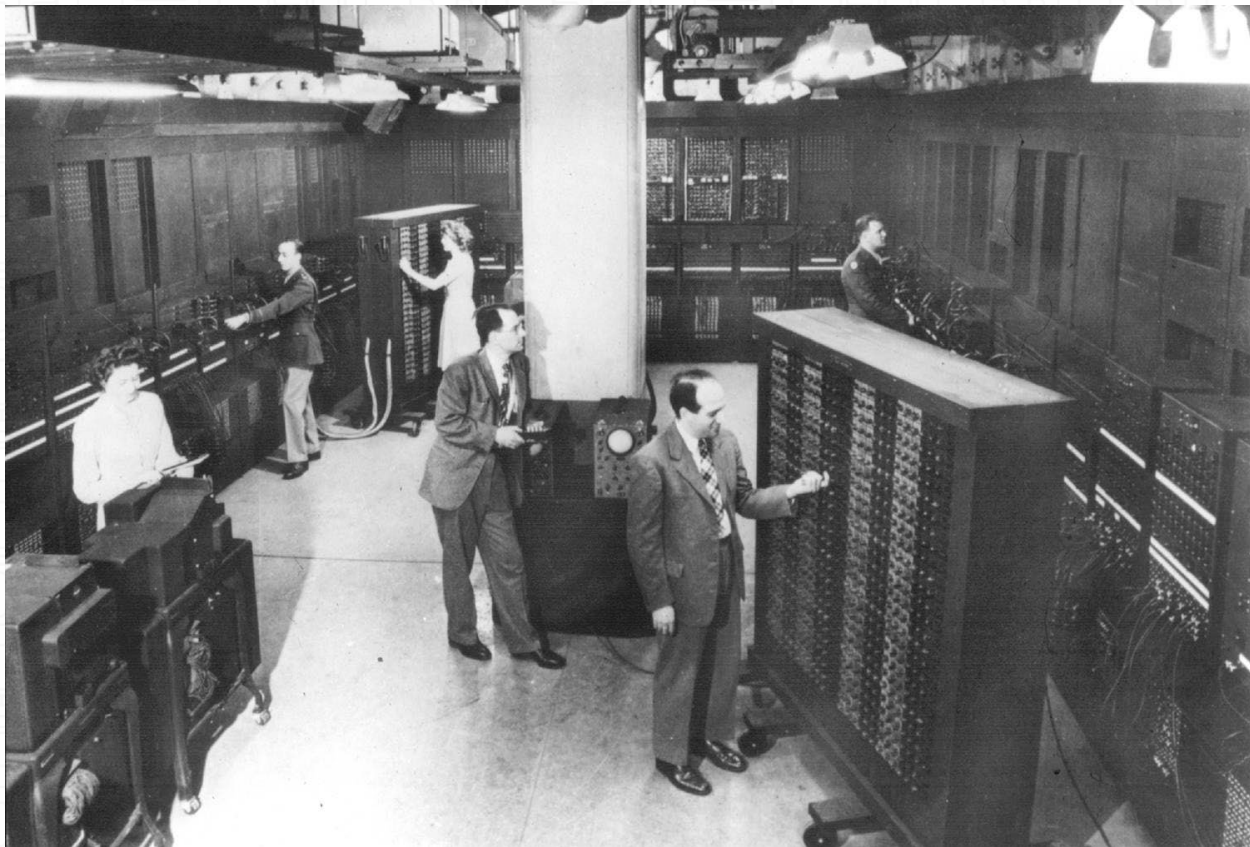
电子管



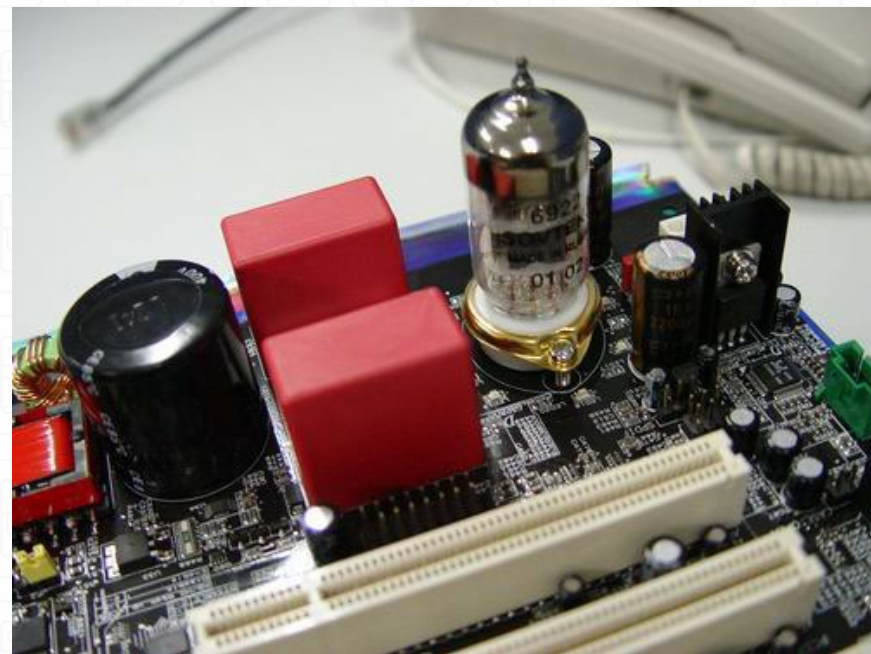
Lee de Forest
Aug 26, 1873—Jun 30, 1961

- ❖ 1906年，美国发明家**福雷斯特**发明了**真空三极电子管**。
- ❖ 电子学发展史上的**第一个里程碑**。
- ❖ 只要栅极有微弱电流通过，就可在屏极上获得较大的电流，而且波形与栅极电流完全一致。

ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer)



- ❖ 1946 年，世界第一台通用计算机，包含 20000 只真空管。
- ❖ 占地 170 多平方米，重量约 30 吨，耗电 100 千瓦。



2006年，为纪念电子管发明100周年制作的电子管、晶体管、集成电路混装PC主板。

中国第一只电子管

- ❖ 1936年秋，**单宗肃**用进口的材料和零件，组装成功了30型直热式放大电子管，这是中国人第一次用自己的双手组装的电子管。
- ❖ 抗战期间，单宗肃领导的研制组，成功组装了3Ca3型通讯电子管，为国民政府大后方的战时通讯解了燃眉之急。
- ❖ 1949年8月，单宗肃在南京筹建第一家电子管厂。12月，866A型真空电子管研制成功。
- ❖ 电影《英雄儿女》中**王成**身背的报话机，就用了南京电工厂生产的2E22型电子管。

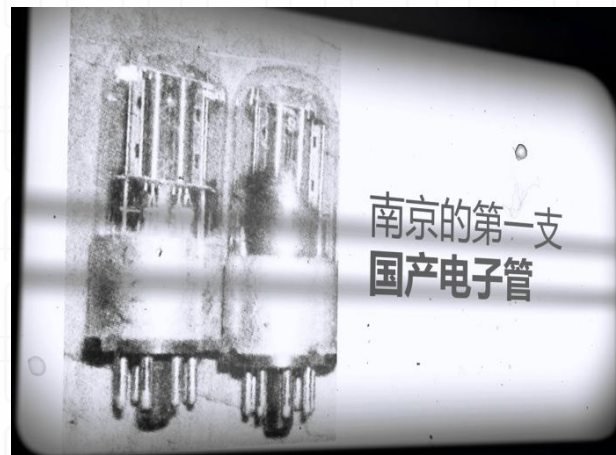


单宗肃

Jul 1910—Aug 2, 1990



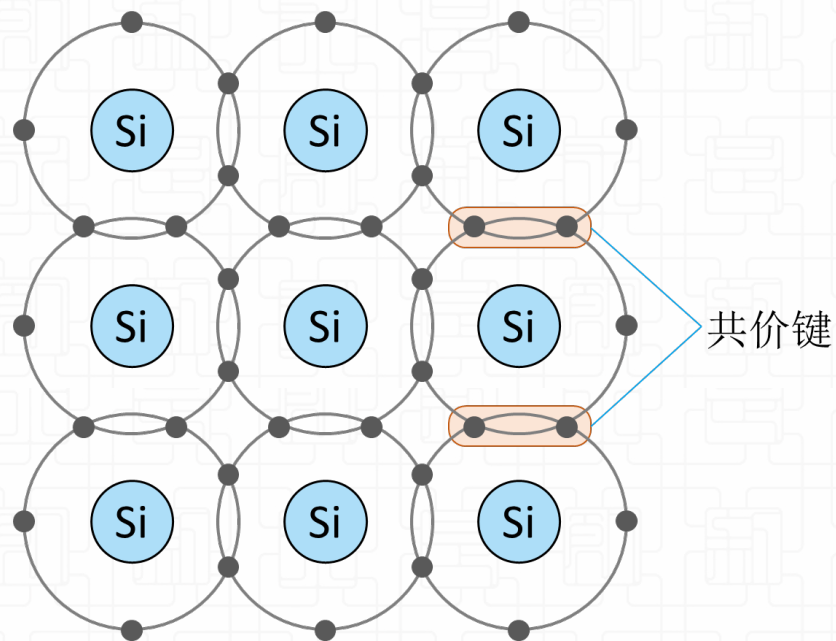
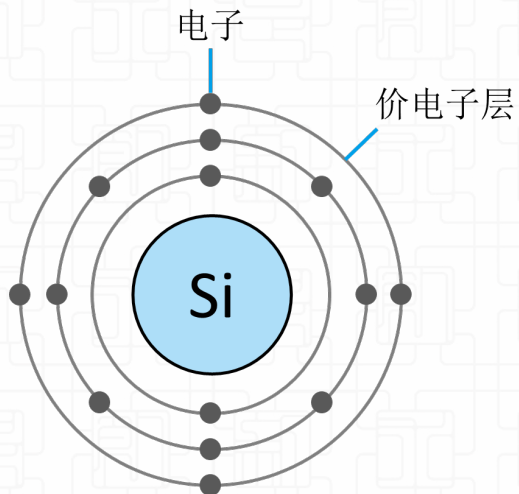
为了胜利，向我开炮！



导体、绝缘体、半导体

- ❖ 完纯导体: $\sigma \rightarrow \infty$
- ❖ 良导体: σ 很大, 铜的电导率 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$
- ❖ 完纯介质: $\sigma = 0$
- ❖ 绝缘体: σ 很小, 酚醛塑胶的电导率 10^{-9} S/m
- ❖ 半导体: 电导率介于良导体和绝缘体之间, 硅、锗、砷化镓就是常用的半导体材料。
- ❖ 纯净硅的电导率: $\sigma = 12 \text{ S/m}$

半导体



半导体

元素半导体

Si, Ge

化合物半导体

II-VI族

ZnS, ZnSe

III-V族

GaAs, InP

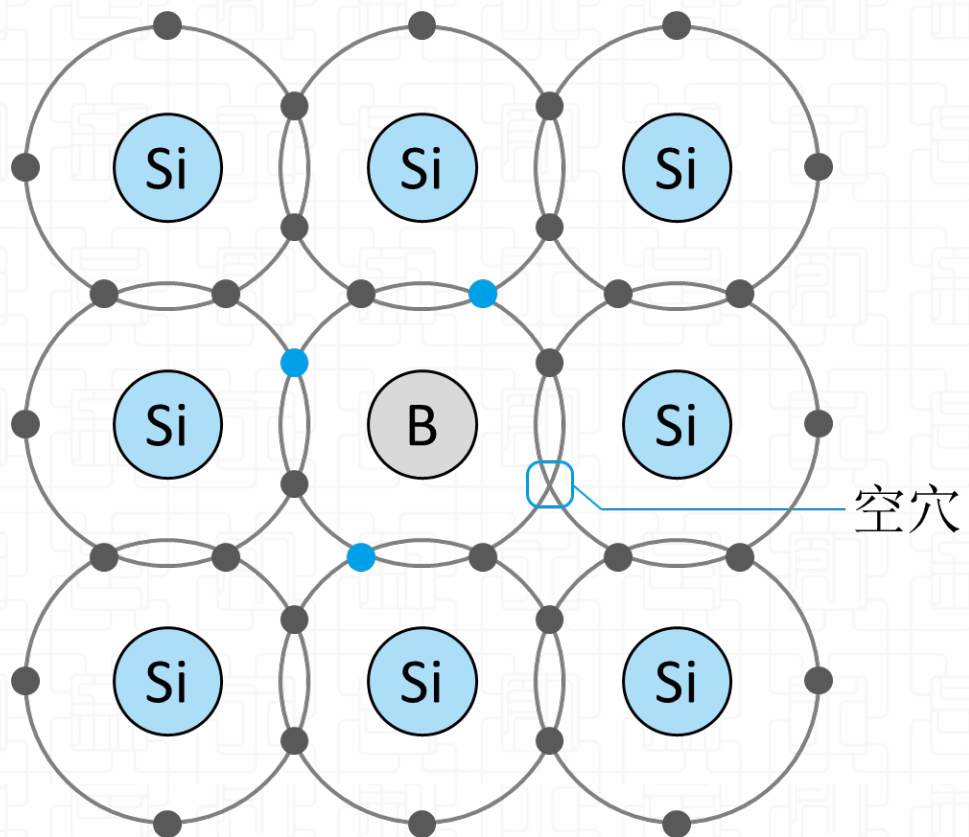
IV-IV族

SiC, SiGe

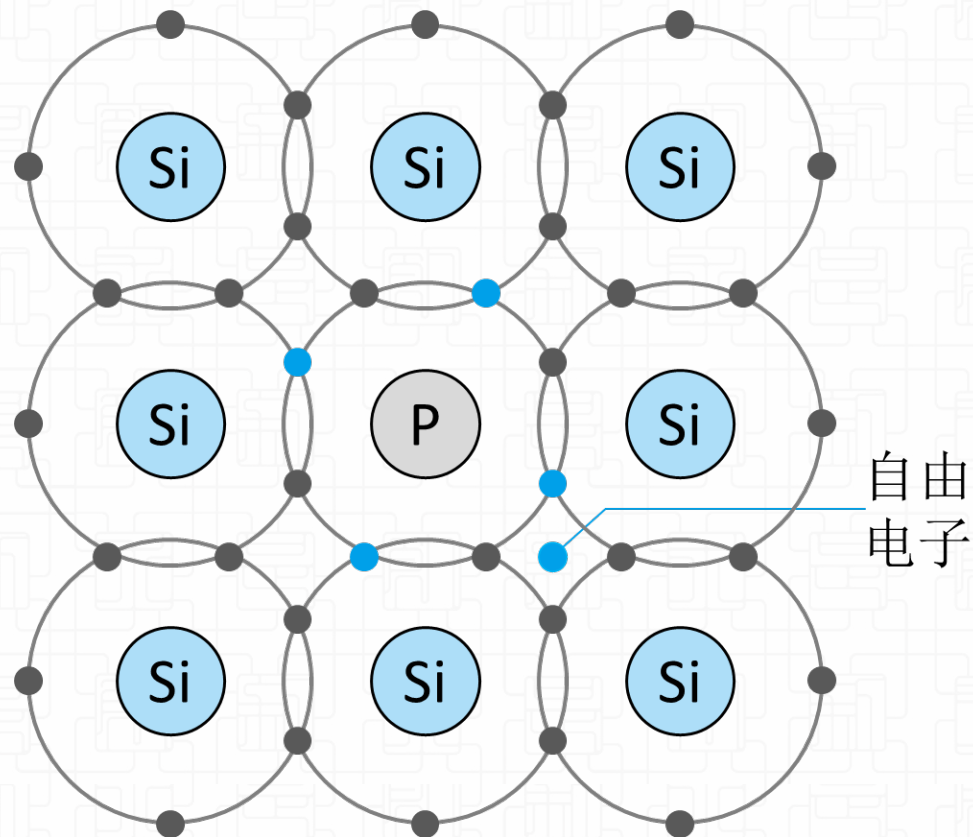
❖ 本征半导体

- intrinsic semiconductor
- 完全不含杂质且无晶格缺陷的纯净半导体称为本征半导体。
- 实际半导体不能绝对地纯净，本征半导体一般是指导电主要由材料的本征激发决定的纯净半导体。

掺杂半导体



P型半导体

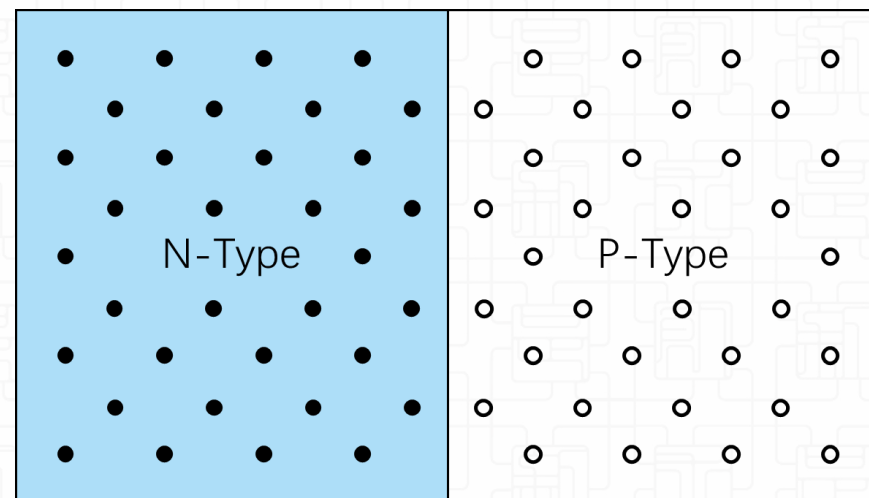


N型半导体

PN结

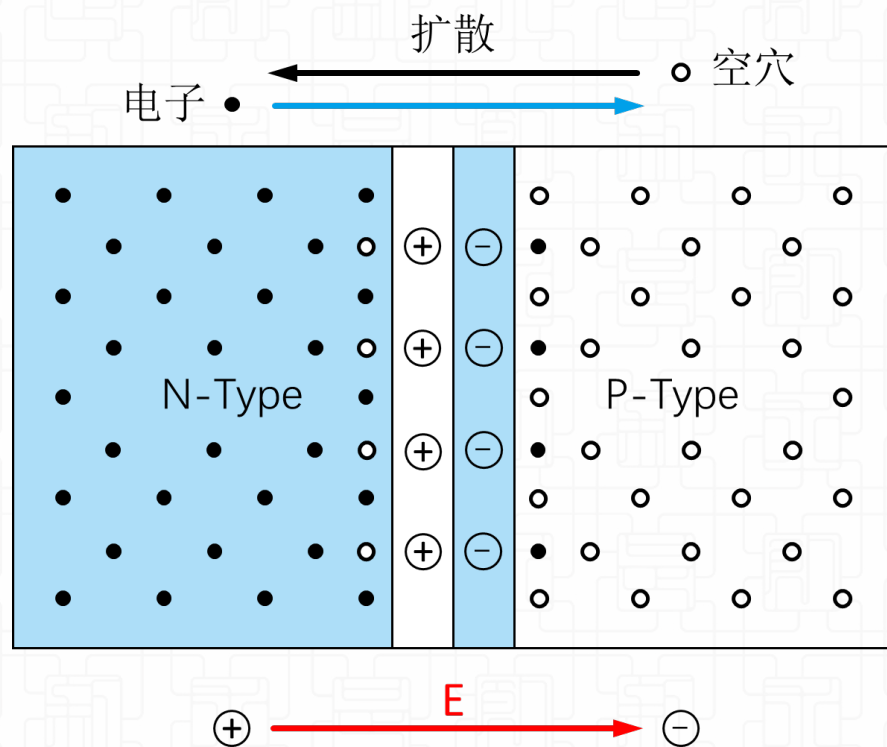


Russell Shoemaker Ohl
Jan 30, 1898—Mar 20, 1987

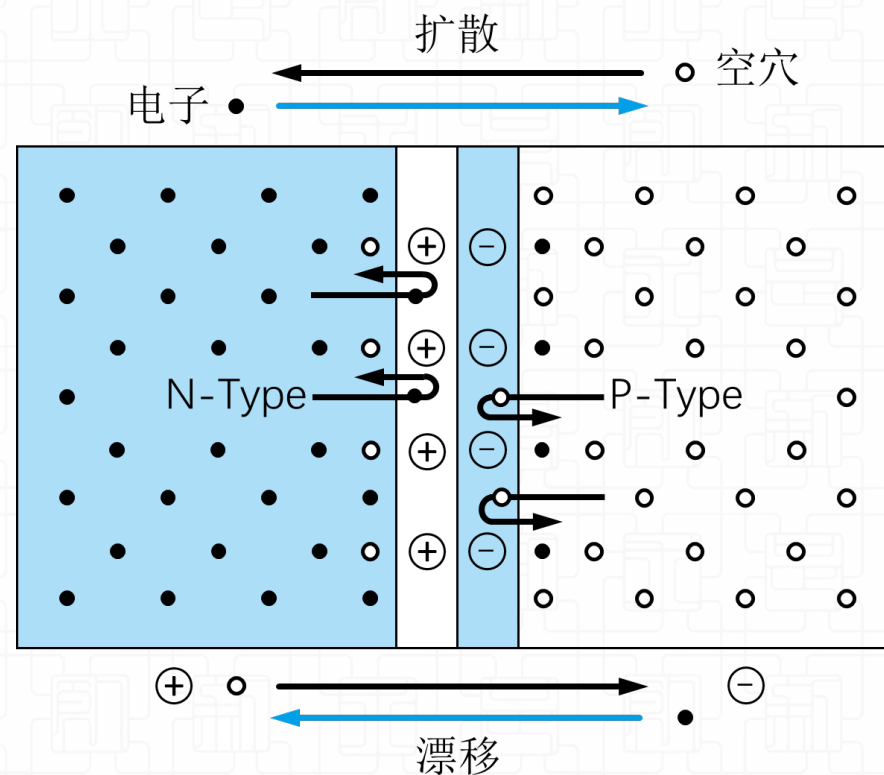


❖ 1939年，贝尔实验室的奥尔发现了掺杂不均匀的半导体材料会出现单向导电性，并由此发现了PN结。

PN结形成过程

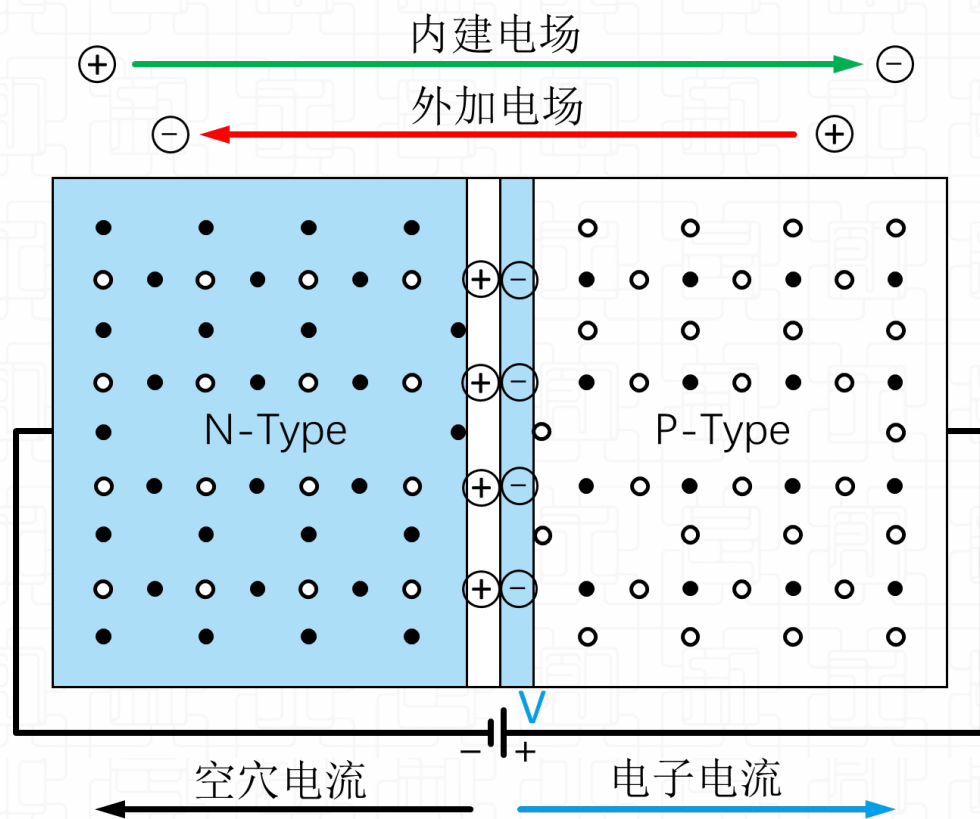


多子扩散

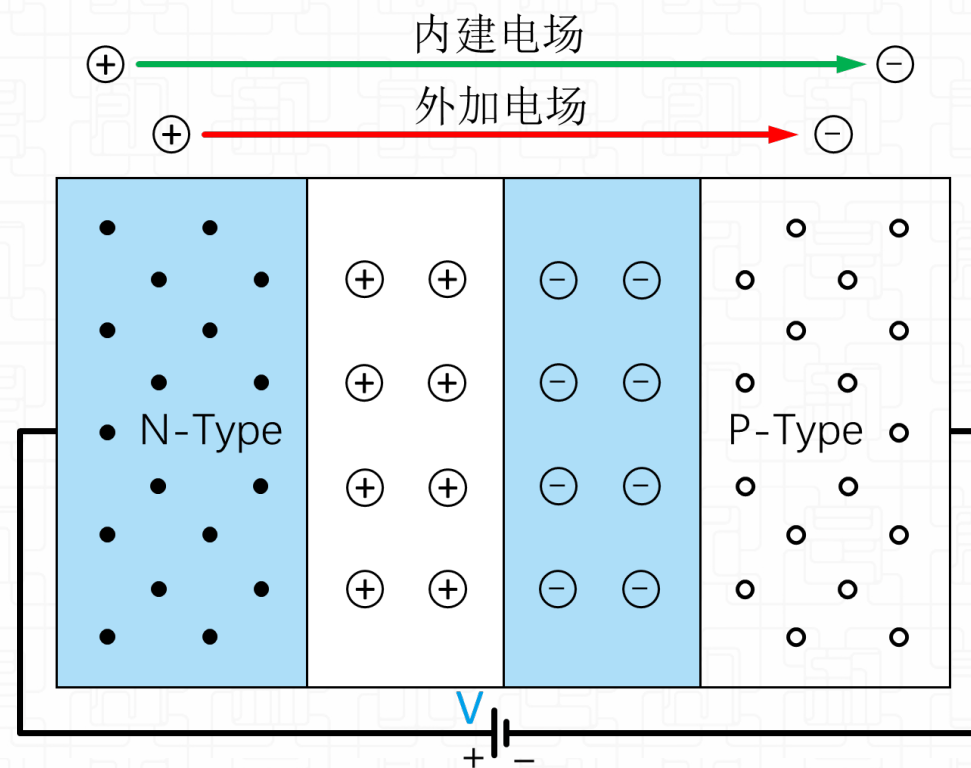


漂移运动与扩散运动趋平衡

PN结偏置

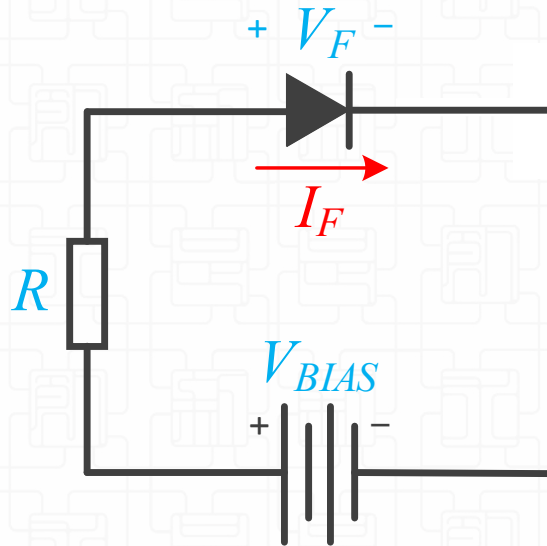
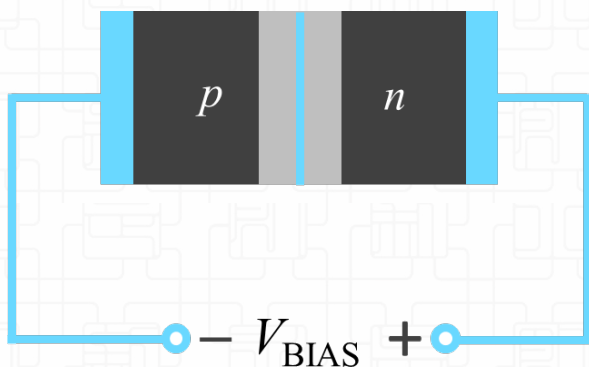
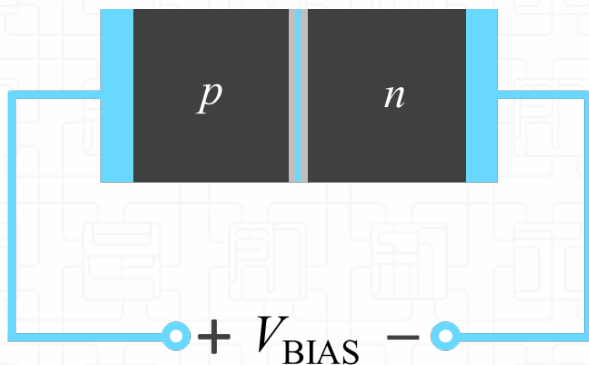


正向偏置



反向偏置

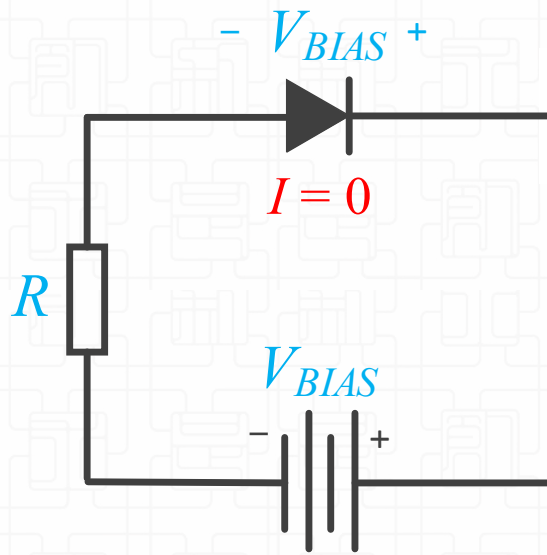
二极管偏置



Forward bias
Current flows

❖ 正向偏置

- 锗PN结, $>0.3\text{ V}$
- 硅PN结, $>0.7\text{ V}$
- 耗尽层变薄

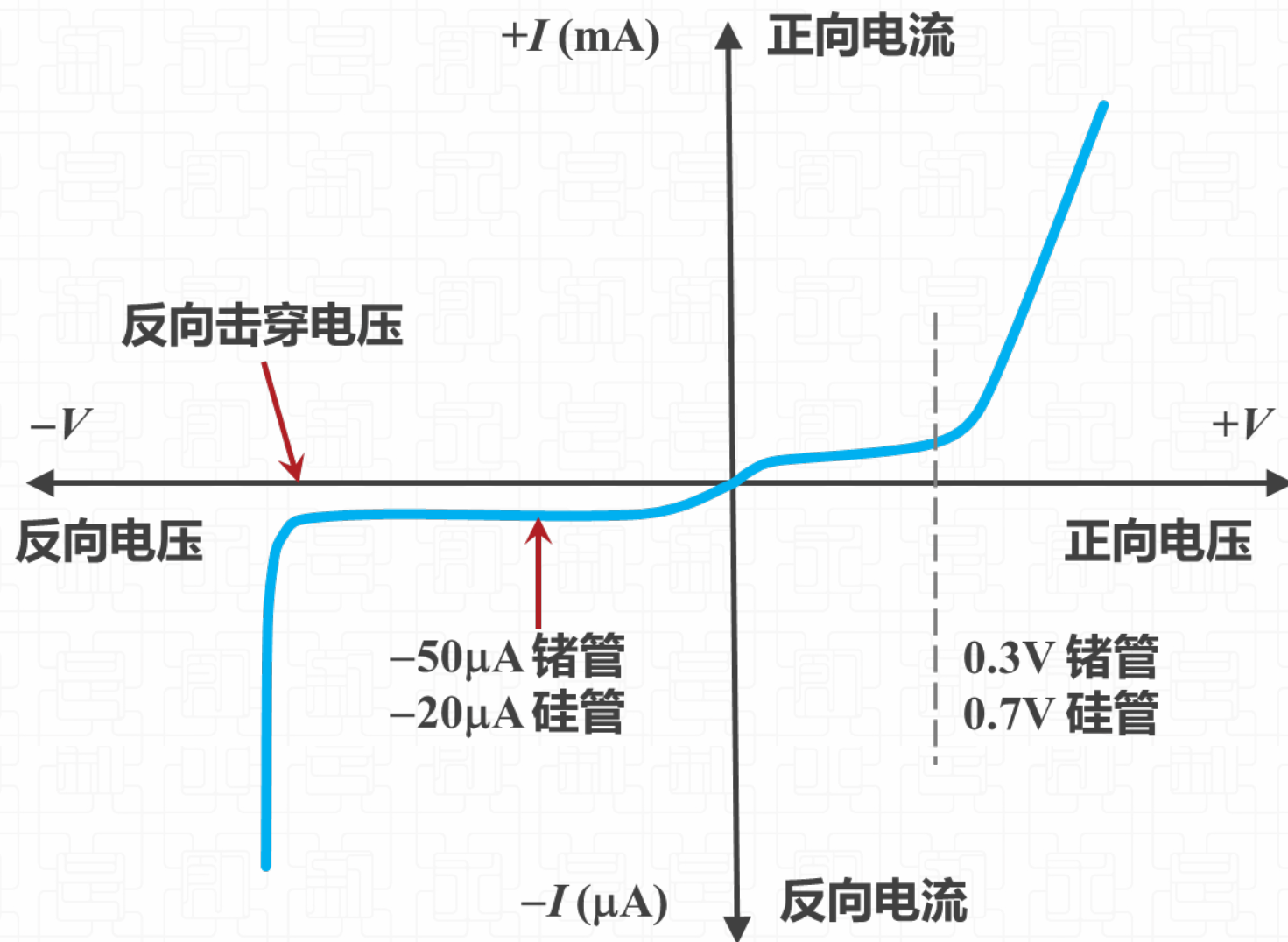


Reverse Bias
No current flows

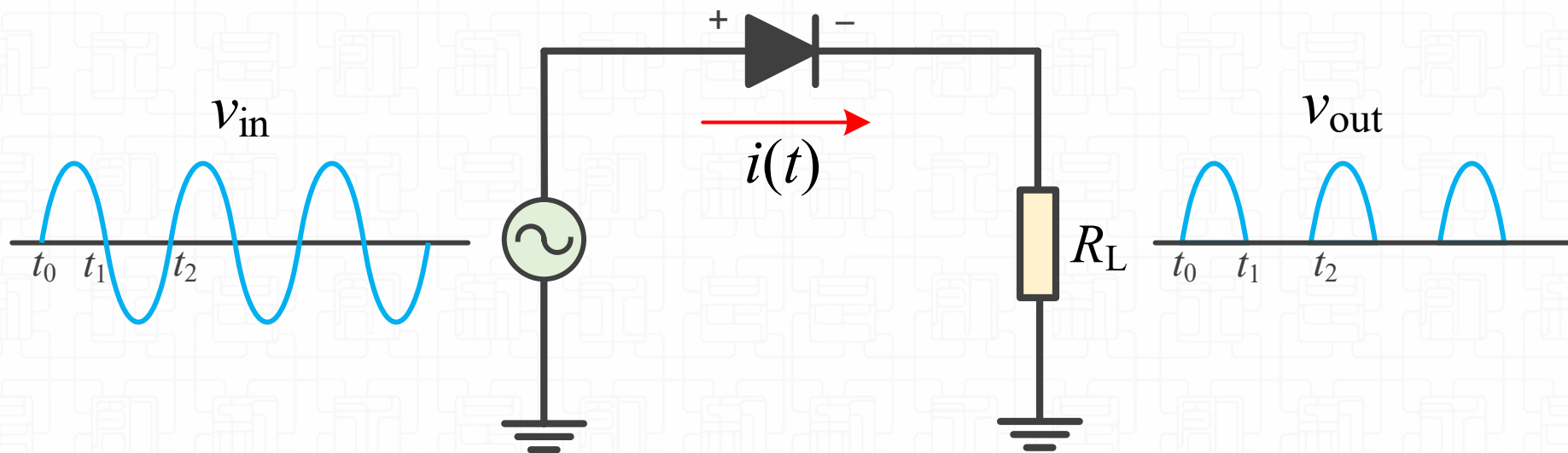
❖ 反向偏置

- 偏置电压必须小于击穿电压

二极管特性



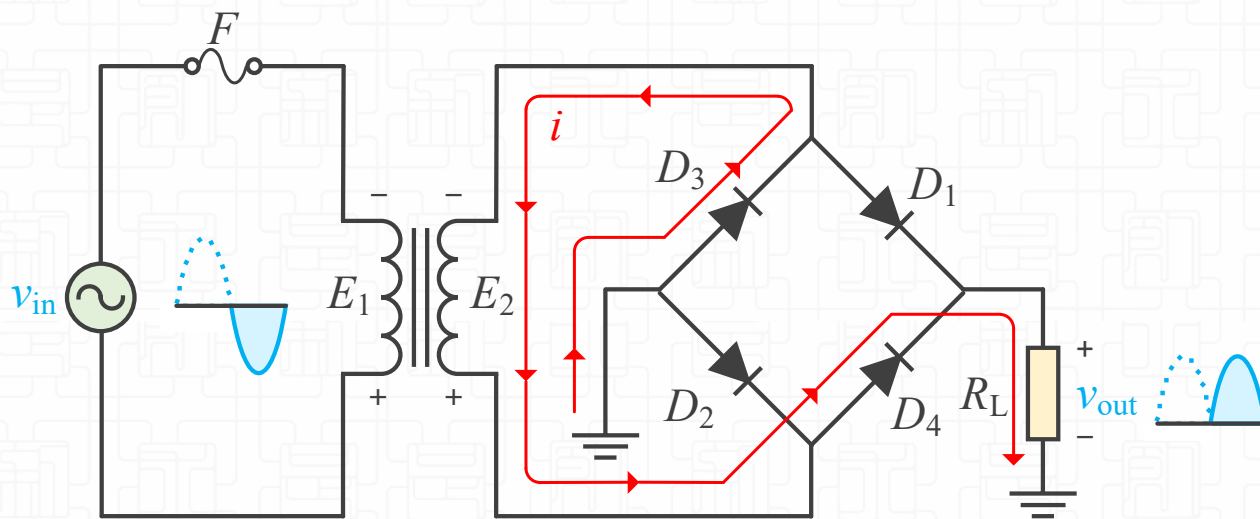
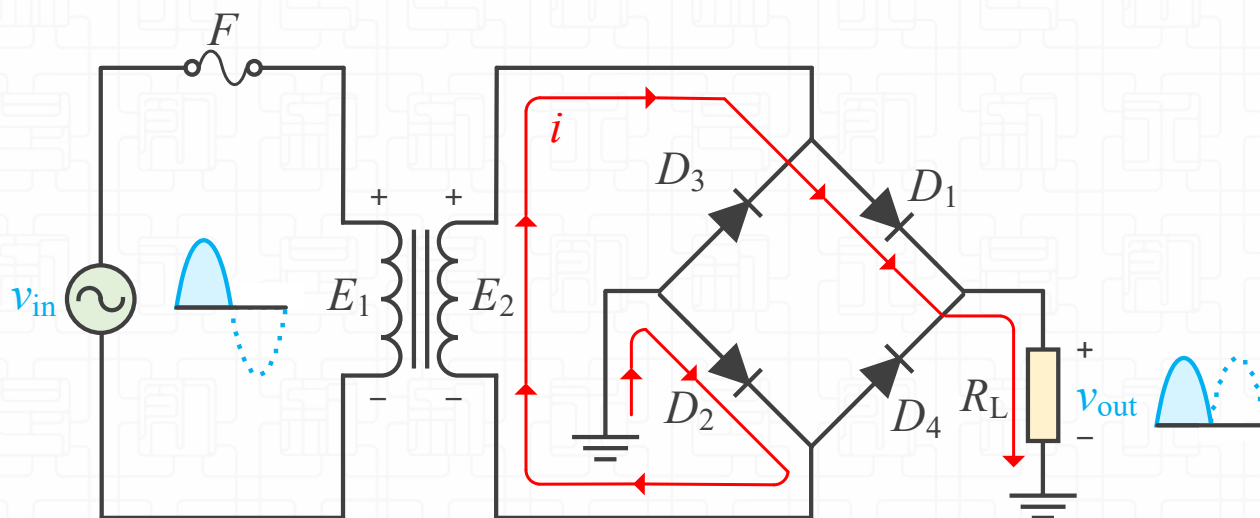
半波整流



- ❖ 半波整流利用二极管单向导通特性，在输入为标准正弦波的情况下，输出获得正弦波的正半周，负半周则损失掉。
- ❖ 正半周期导通，负半周期截止

全波桥式整流

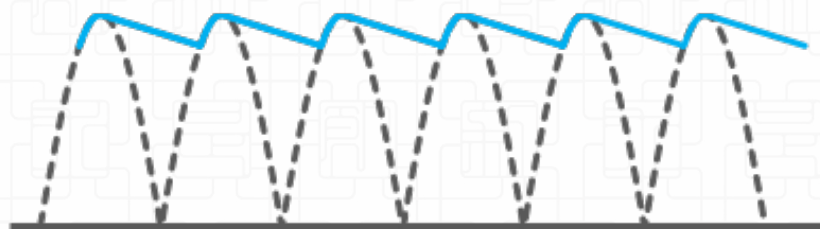
- ❖ 它采用四个二极管排列，使得电流在同一方向上的流量通过负载在每个周期的一半。



滤波



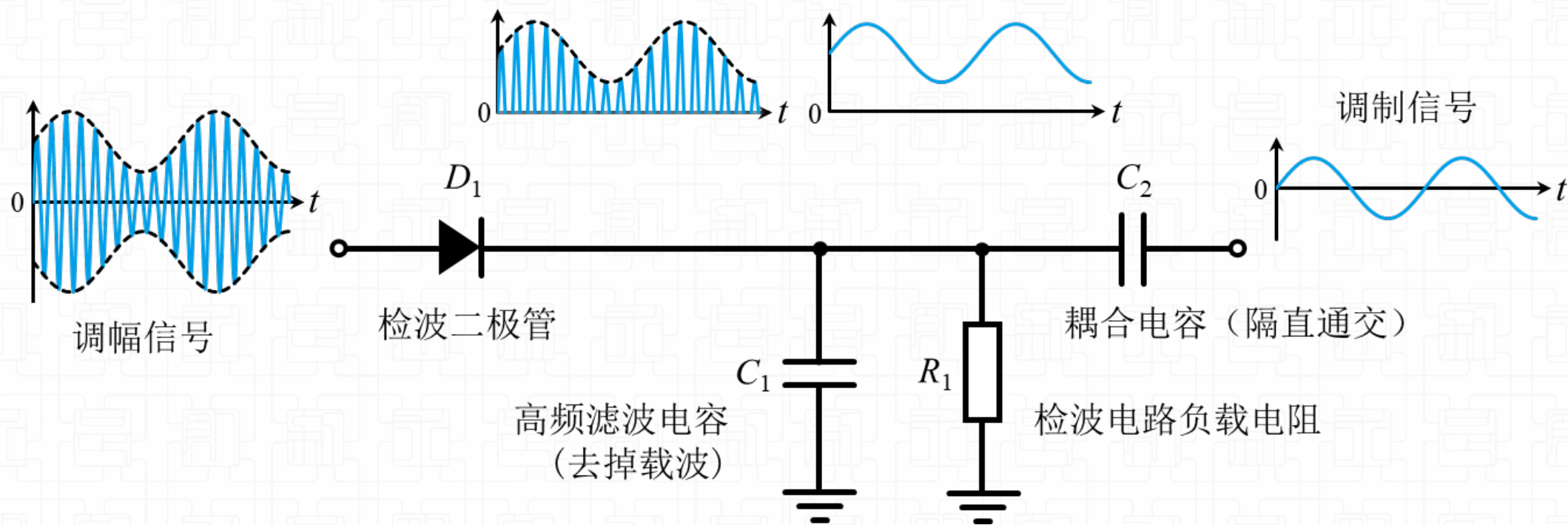
半波整流滤波



全波整流滤波

❖ 稳压是消除纹波和保持输出电压到一个特定值的最后一步。通常情况下，稳压是由一块集成电路完成。针对不同电压和电流需求，有许多不同型号。

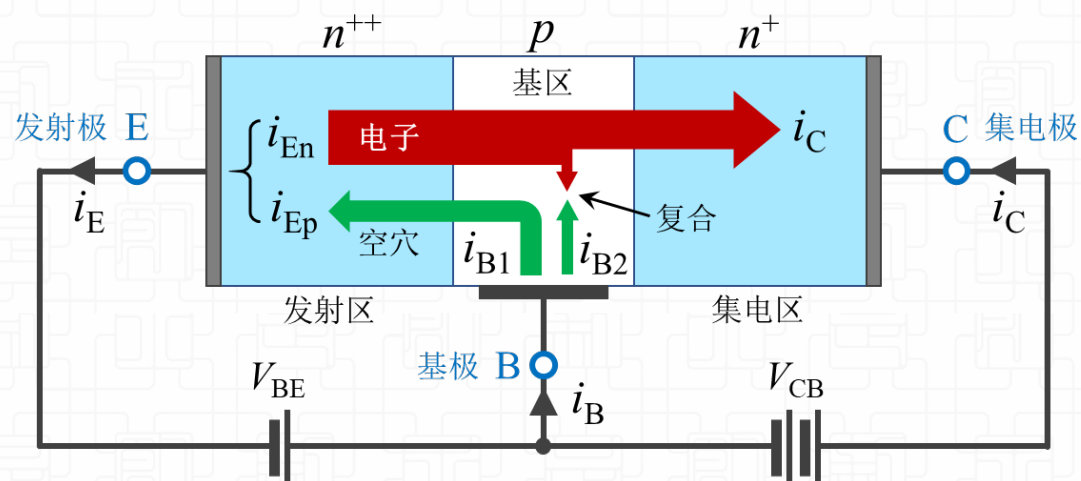
检波、解调



- ❖ 广义的**检波** (detection) 通常称为**解调**，是调制的逆过程，即从已调波提取调制信号的过程。
- ❖ 狭义的检波是指从**调幅波的包络**提取调制信号的过程，也称为**包络检波或幅度检波**。

内容提要

- ❖ 半导体和PN结
- ❖ 双极型晶体管
- ❖ 场效应晶体管
- ❖ 集成电路



晶体管的发明

- ❖ 1946年，贝尔实验室决定开展半导体的研究。
- ❖ 肖克莱专长于理论研究，巴丁是运用基础理论解决实际问题的大师，而布拉顿则是善于巧妙地进行各种实验的能手。
- ❖ 1947年12月研制出点接触型晶体管。
- ❖ 1950年4月制成第一个结型晶体管。
- ❖ 三人共同获得了1956年度诺贝尔物理学奖。
- ❖ 晶体管的发明是电子技术史上具有划时代意义的伟大事件，开创了固体电子技术时代。



William Bradford Shockley (L)
Feb 13, 1910—Aug 12, 1989

John Bardeen (M)
May 30, 1908—Jan 30, 1991

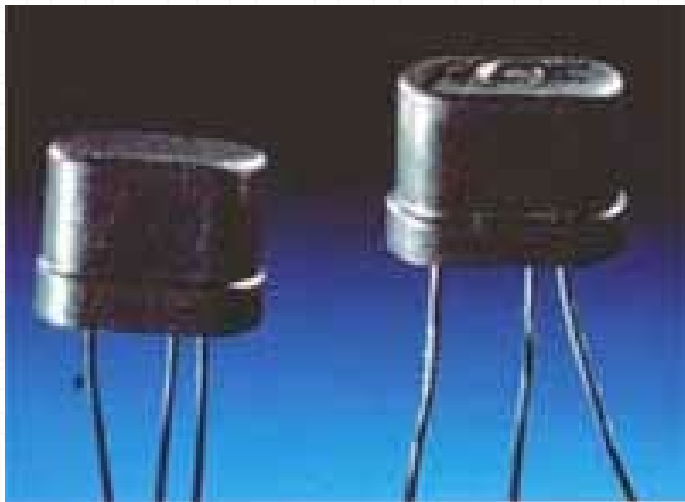
Walter Houser Brattain (R)
Feb 10, 1902—Oct 13, 1987



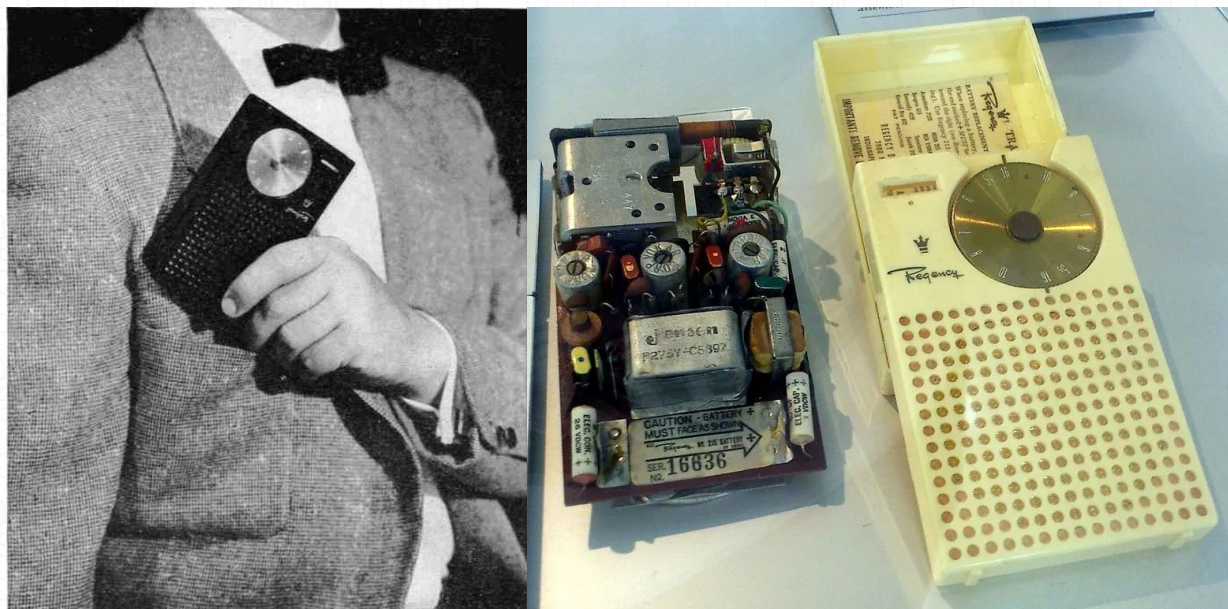
A replica of the first working transistor

硅晶体管

❖ Texas Instruments in 1954



The first commercially produced silicon transistor, developed by Texas Instruments in the early 1950s.



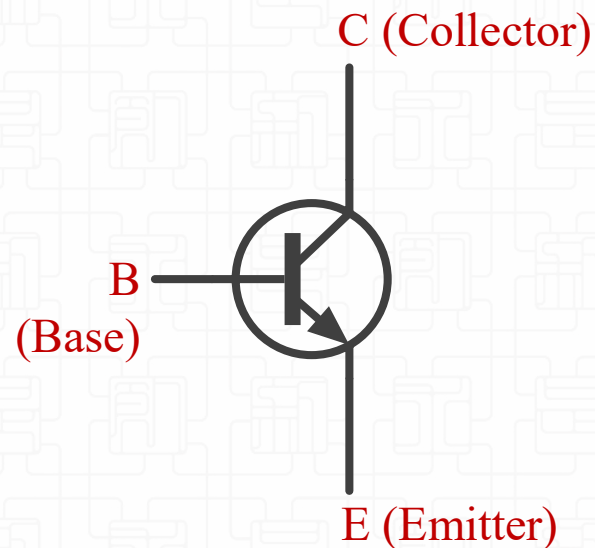
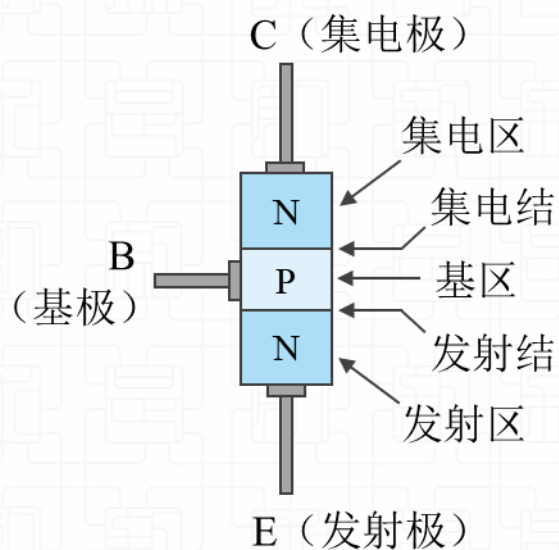
世界上第一台晶体管收音机Regency TR1 (1954)
售价49.95美元 (约相当于今天1000美元)

中国第一只晶体管

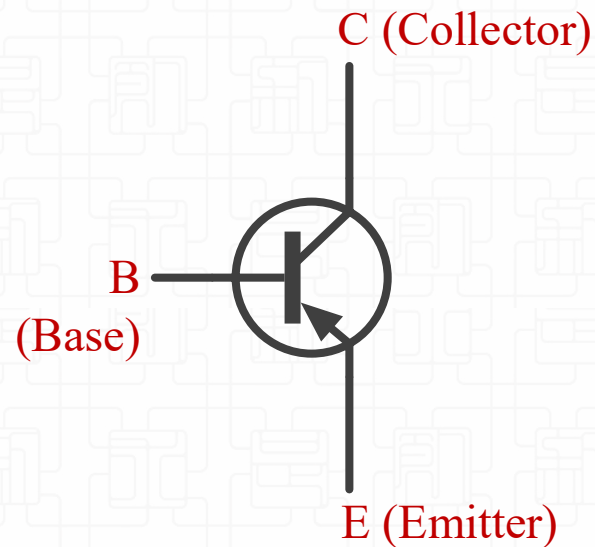
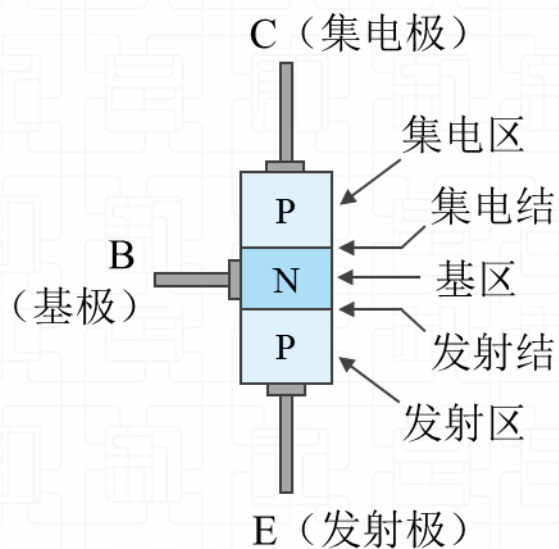
- ❖ 1956年，在全国“十二年科学技术远景规划”中，提出了四项“紧急措施”，其中之一即在我国立即开始最先进的半导体科学技术的研究。
- ❖ 北京大学接收了联合五校（北京大学、复旦大学、东北人民大学、厦门大学和南京大学）的师生，共同担当起培养半导体专业人才的任务。
- ❖ 中国科学院应用物理研究所组织全国有关科研院所及大专院校的科技人员，集中到北京进行半导体设备、半导体材料、半导体器件和半导体测试的科研攻关。
- ❖ 1956年11月，研制出了锗合金结晶体管。中国第一只晶体管诞生。

双极型晶体管（三极管）

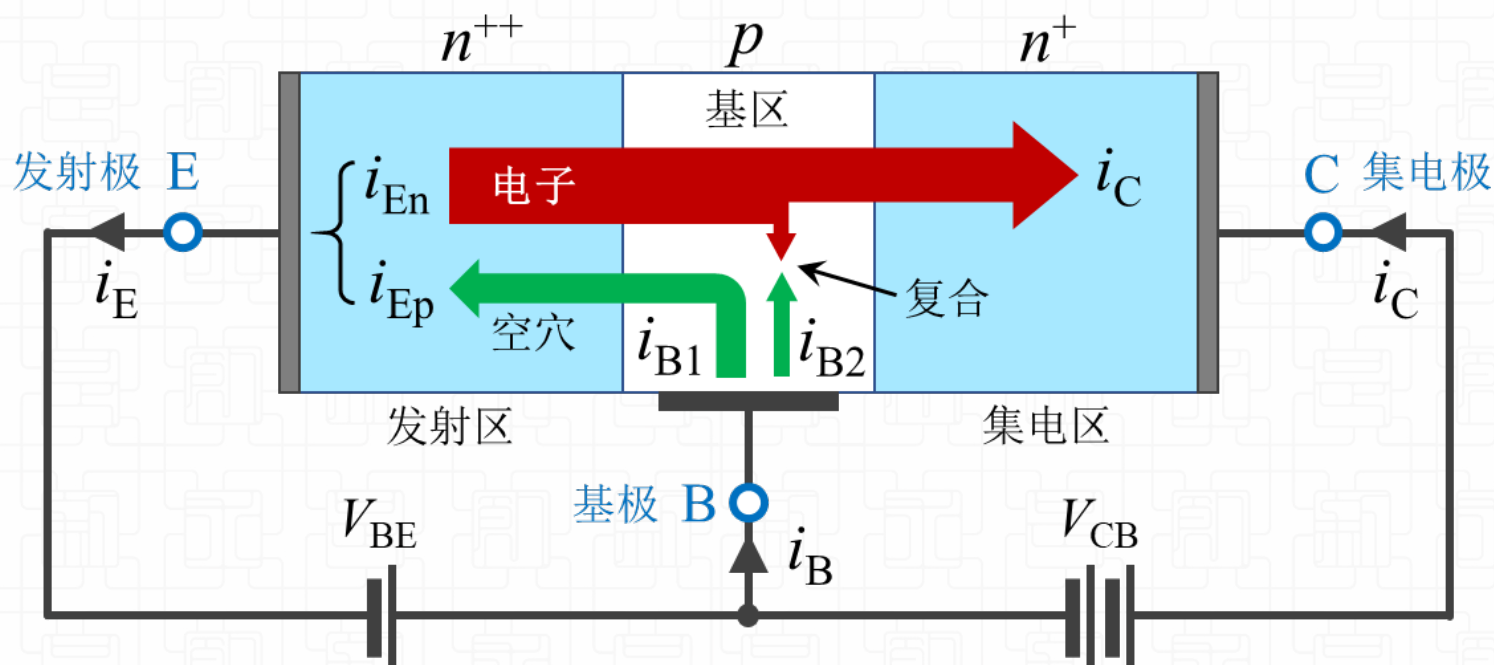
NPN



PNP

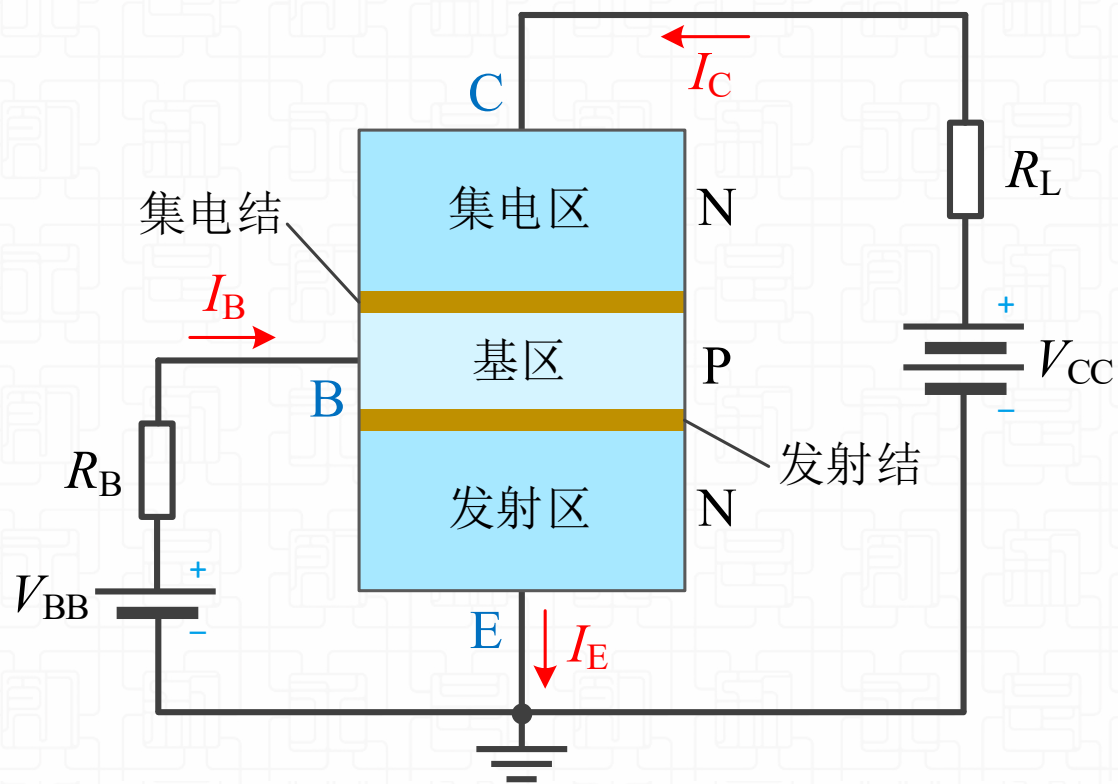


NPN双极型晶体管工作原理



❖ 只要从基极注入不到发射极电流 **1%** 的电流，对应地就有约 **99%** 发射极电流的电子到达集电极形成集电极电流 i_C

三极管共发射极接法



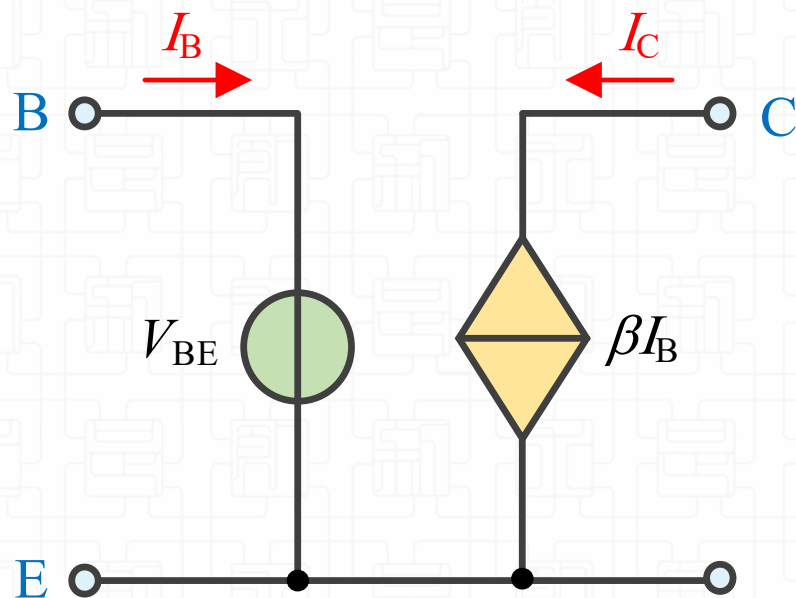
I_B : 基极电流

V_{BE} : 基极—发射极电压

I_E : 发射极电流

V_{CB} : 集电极—基极电压

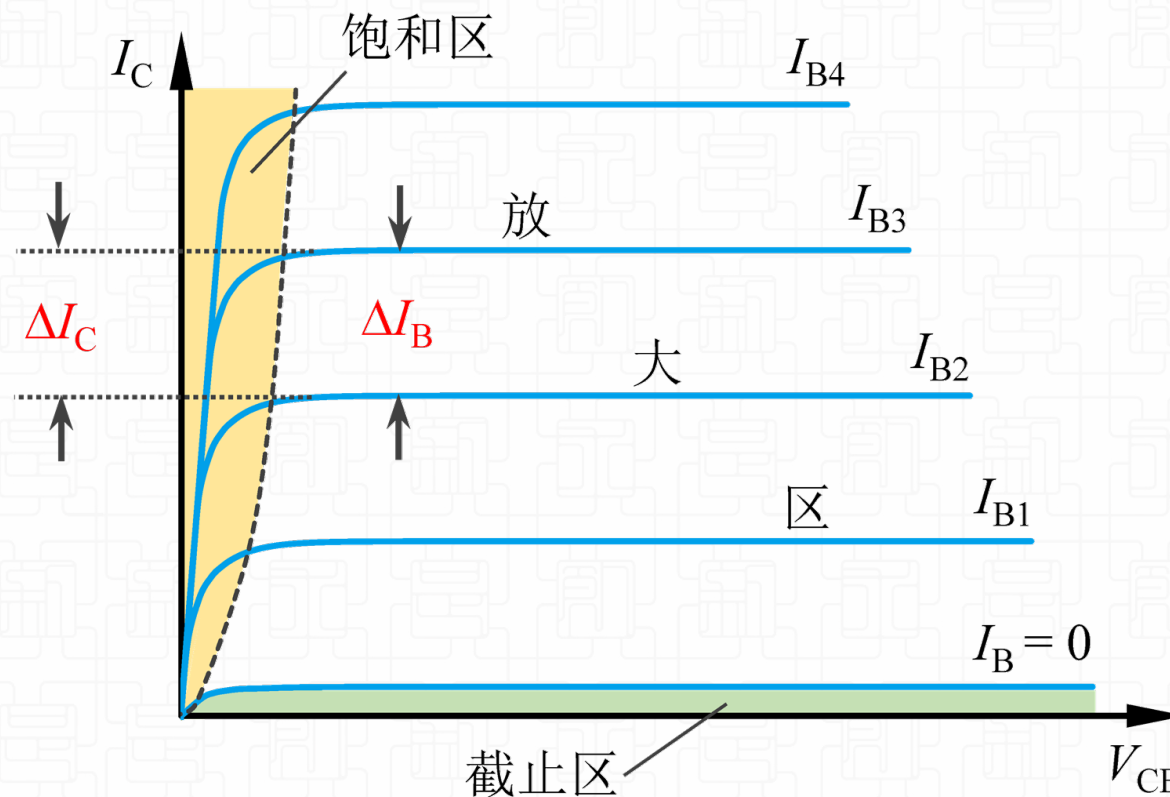
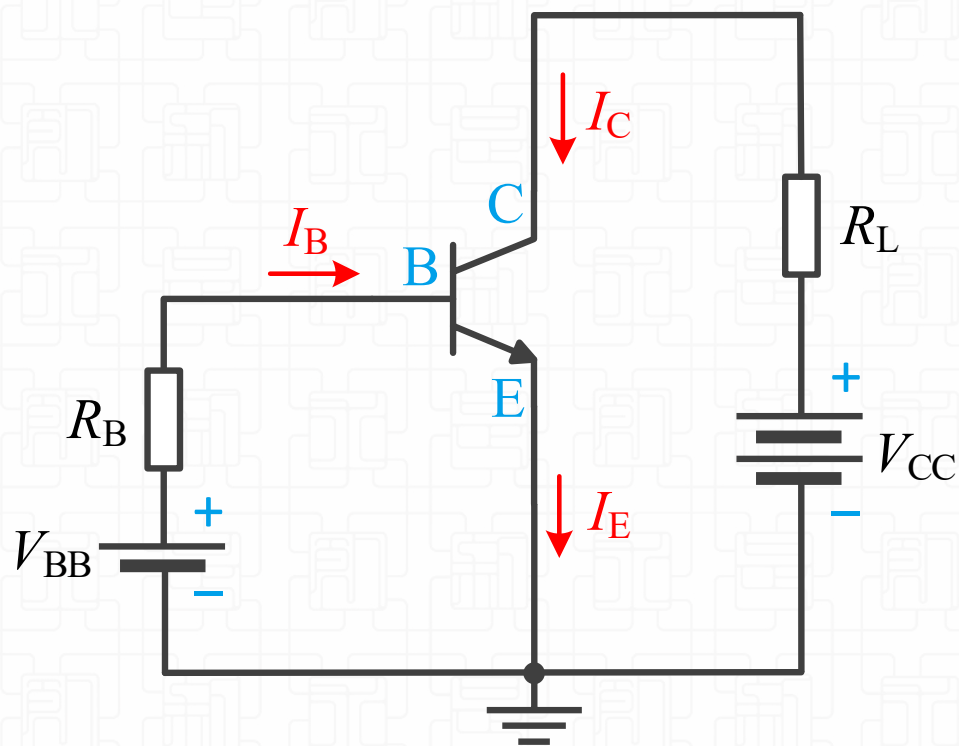
电流放大系数 $\beta = \frac{I_C}{I_B}$



I_C : 集电极电流

V_{CE} : 集电极—发射极电压

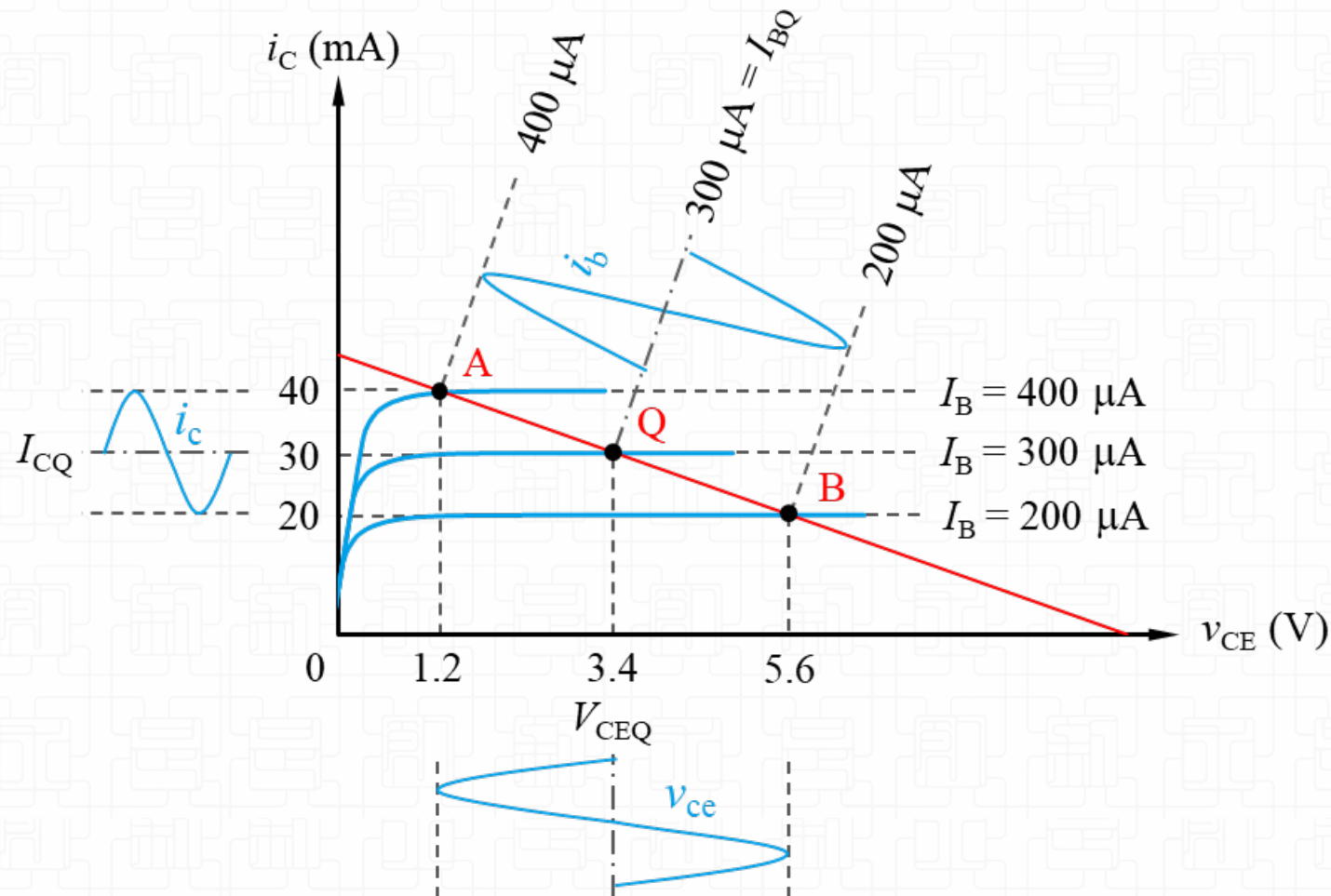
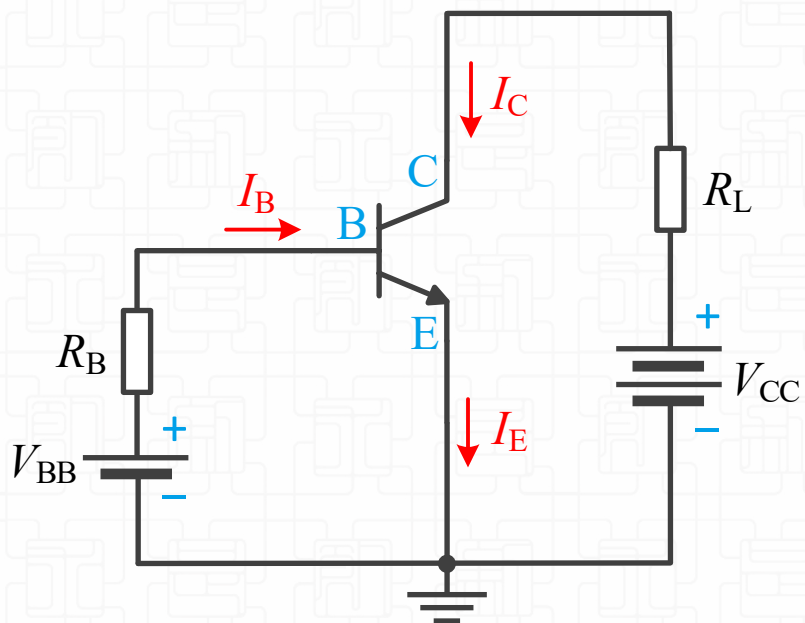
三极管输出特性



直流电流放大系数 $\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B}$

交流电流放大系数 $\beta_{AC} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

例：静态工作点计算



$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - 0.7 \text{ V}}{R_B} = \frac{3.7 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 300 \mu A$$

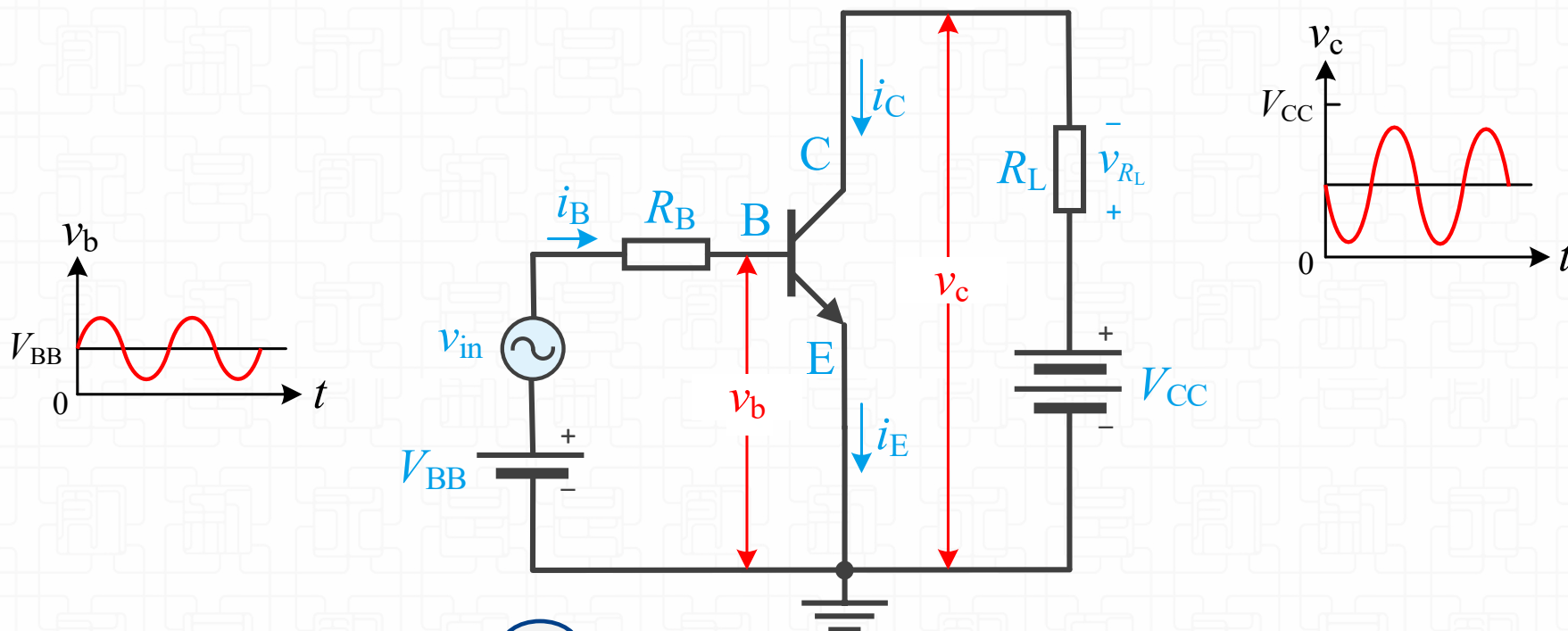
$$I_{CQ} = \beta_{DC} I_{BQ} = 100 \times 300 \mu A = 30 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 10 \text{ V} - (30 \text{ mA})(220 \Omega) = 3.4 \text{ V}$$

NPN晶体管交流放大电路

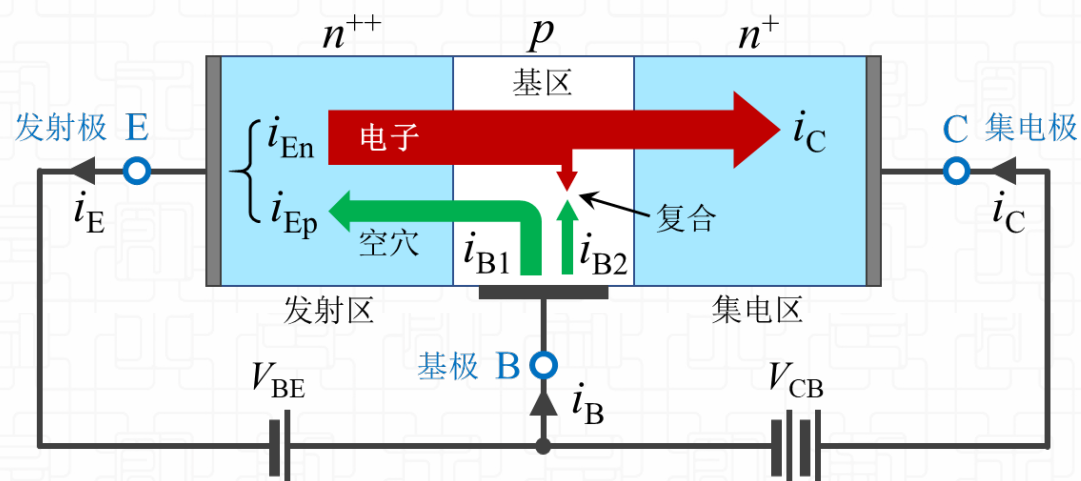
- ❖ 交流电流放大和直流电流放大所依据的物理过程是相同的，因而可以认为直流、交流两种情况下，电流放大系数接近或相等。
- ❖ 基极电流小的变化会导致集电极电流较大的变化。一个相对较小的交流信号得到放大。

$$\begin{aligned} i_B &= I_B + i_b \\ i_C &= I_C + i_c \end{aligned}$$



内容提要

- ❖ 半导体和PN结
- ❖ 双极型晶体管
- ❖ 场效应晶体管
- ❖ 集成电路

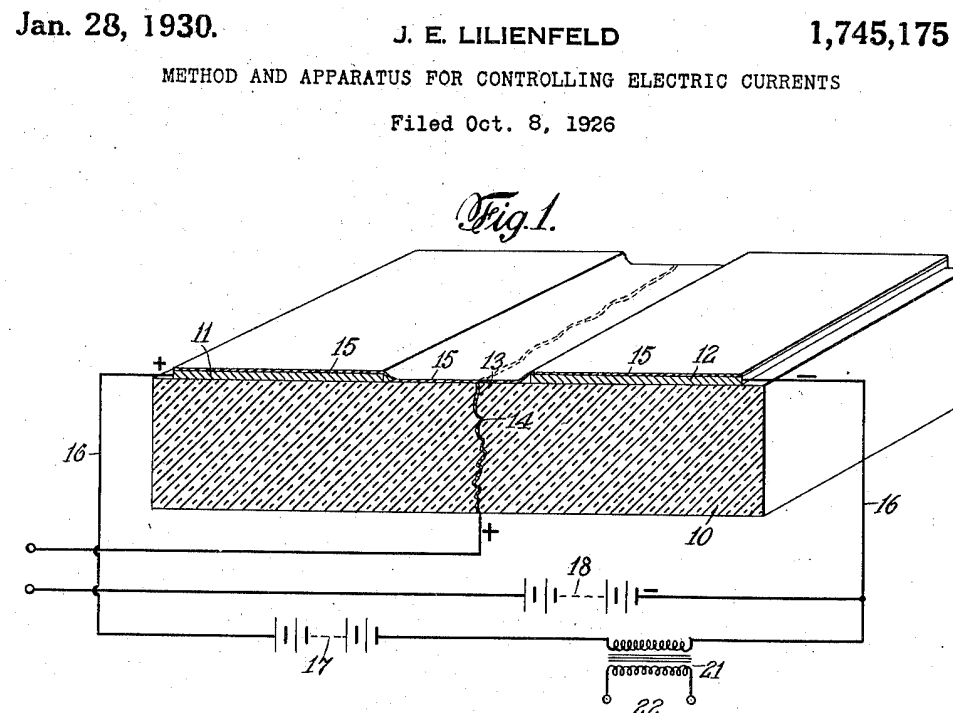


场效应半导体器件概念提出

- ❖ 1926年，波兰裔美国物理学家和发明家利莲费尔德申请了一项专利“控制电流的方法和装置”，描述了一种基于硫化铜半导体材料的三电极结构（类似于现在的场效应晶体管）。
- ❖ 但是，限于当时的技术水平，制造晶体管的材料达不到足够的纯度，而使其无法制造出来。



Julius Edgar Lilienfeld
Apr 18, 1882—Aug 28, 1963



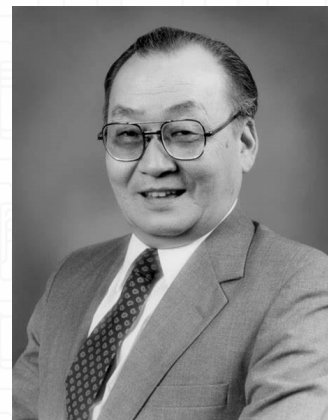
场效应晶体管 (FET)

- ❖ **双极型晶体管**，晶体管中的电荷流动主要是由于载流子在PN结处的扩散作用和漂移运动，同时涉及**电子和空穴**两种载流子的流动，因此它被称为**双极型**。
- ❖ **场效应晶体管**是另一种晶体管，它的工作方式是沟道中的多数载流子在电场作用下由源极向漏极作漂移运动，形成了漏极电流。只涉及到一种载流子的漂移作用，所以也叫**单极型**晶体管。

The first MOSFET
(1959)



Mohamed M. Atalla
Aug 04, 1924—Dec 30, 2009



Dawon Kahng (江大原)
May 04, 1931—May 13, 1992

FET

❖ 可分为三大类

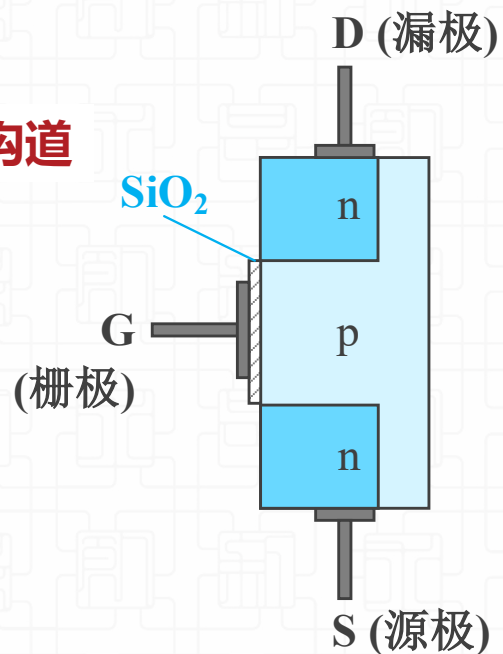
- 结型场效应晶体管 (Junction type Field Effect Transistor, JFET)
- 金属半导体场效应晶体管 (Metal Semiconductor Field Effect Transistor, MESFET)
- 金属氧化物半导体场效应晶体管 (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, **MOSFET**, 或更简称为MOS)。

❖ MOSFET 应用最广

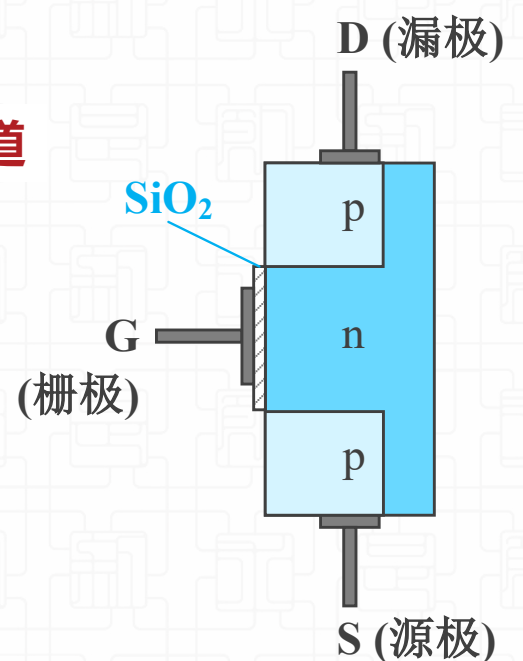
- 如果起导电作用的是电子, 称为 N 沟道 MOSFET, 简称为 NMOS;
- 如果起导电作用的是空穴, 称为 P 沟道 MOSFET, 简称为 PMOS。
- NMOS 和 PMOS 又有增强型和耗尽型之分。

MOSFET

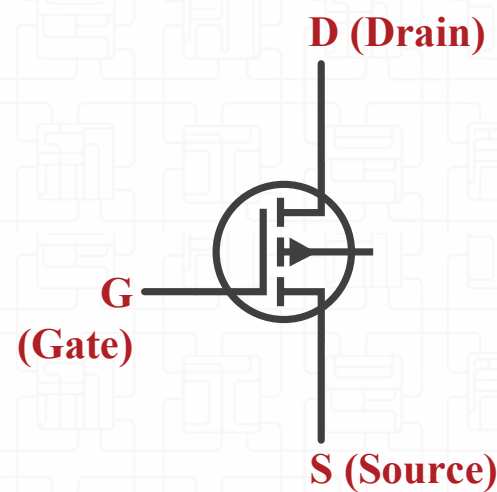
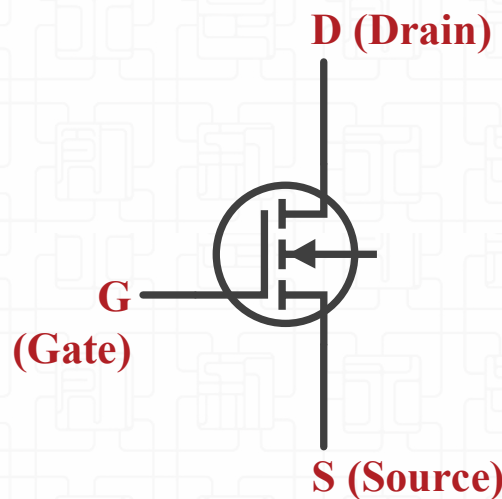
N 沟道



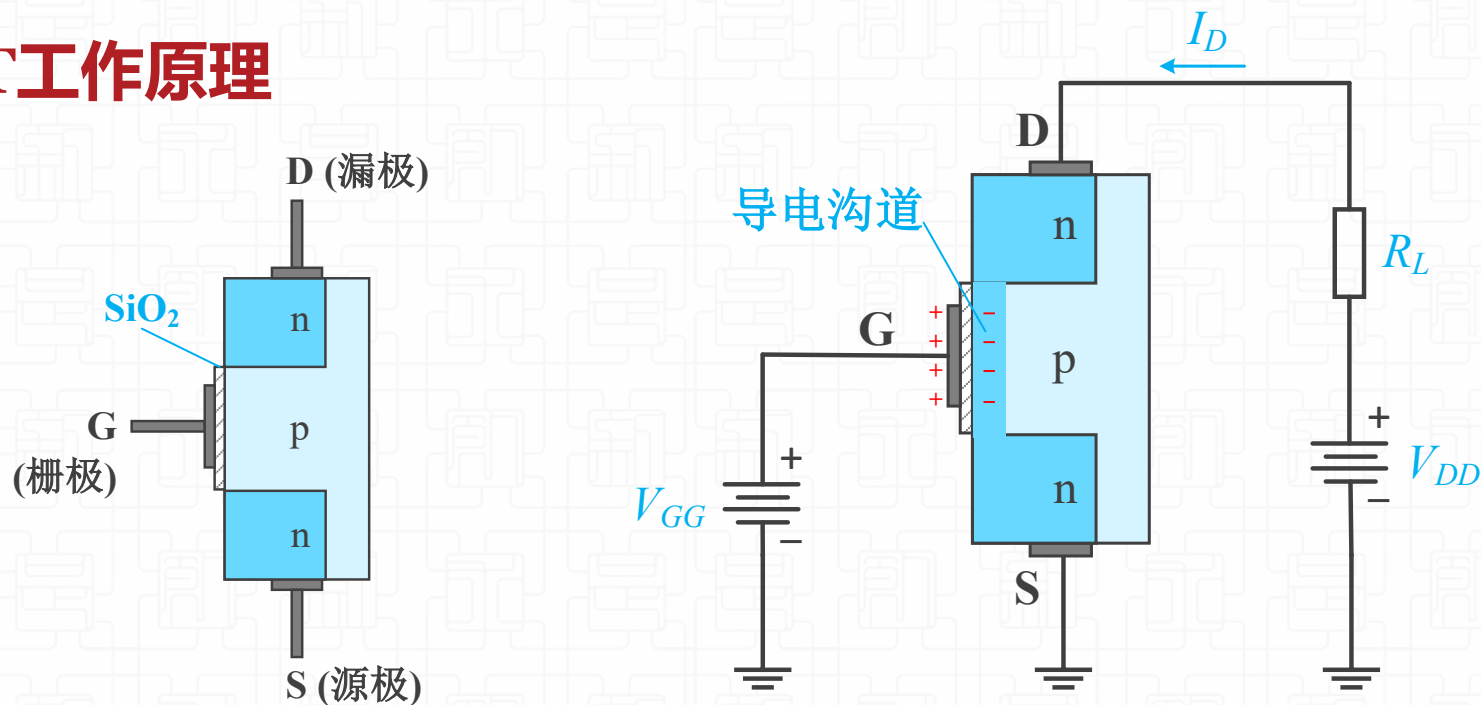
P 沟道



电路符号



增强型MOSFET工作原理



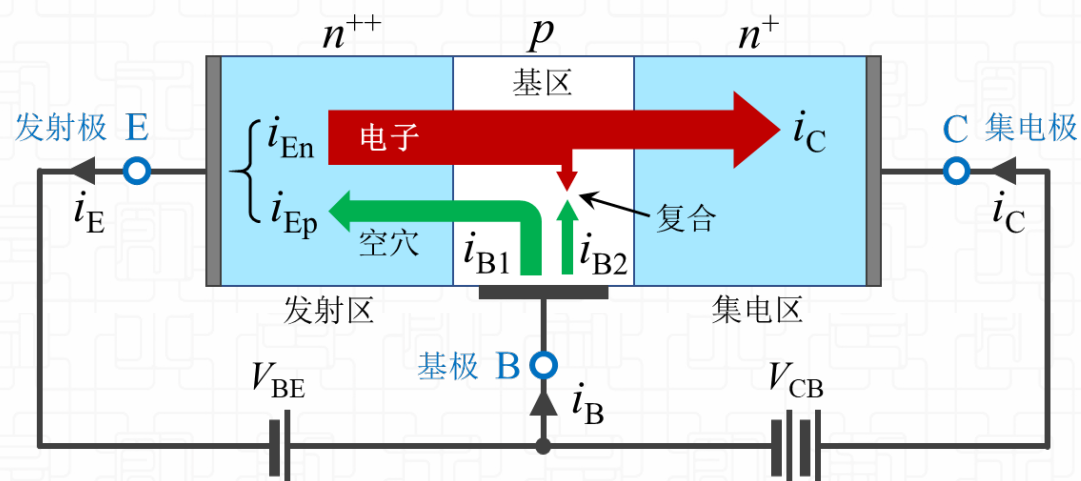
- ❖ 栅极G没加电压时，源极S与漏极D之间不会有电流，FET处截止状态。
- ❖ 当一个电压加在栅极上时，由于电场的作用，源极和漏极的载流子（电子或空穴）被吸引出来而涌向栅极，但由于氧化膜的阻挡，使得载流子聚集在漏源极间的半导体中，从而形成电流，使源极和漏极之间导通。
- ❖ 我们也可以想像为漏源极之间为一条沟，栅极电压的建立相当于为它们之间搭了一座桥梁，该桥的大小由栅压的大小决定。

场效应晶体管 (FET)

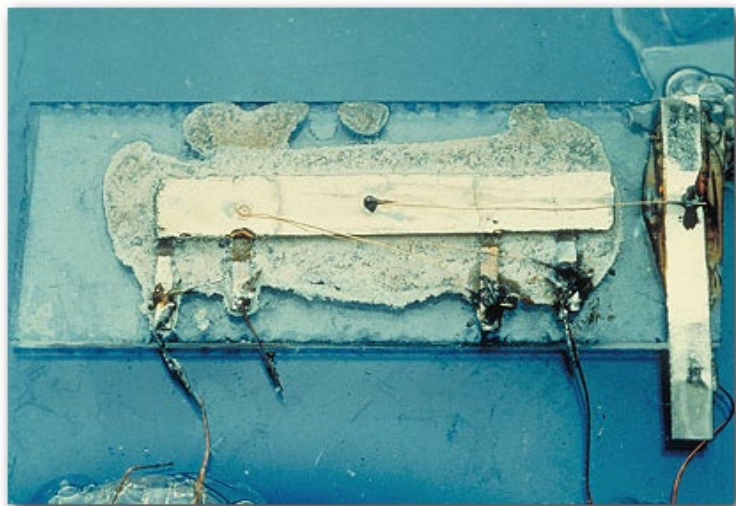
- ❖ FET是电压控制器件，通过栅源电压 V_{GS} 来控制漏极电流 I_D
- ❖ FET的控制输入端电流极小，输入电阻 ($10^7 \sim 10^{12}\Omega$) 很大
- ❖ 利用多数载流子导电，因此温度稳定性较好
- ❖ 组成的放大电路的电压放大系数要小于三极管放大电路
- ❖ 场效应管的抗辐射能力强
- ❖ 由于它不存在杂乱运动的电子扩散引起的散粒噪声，所以噪声低
- ❖ 双极型晶体管是由输入端（基极）的**电流来控制输出端**（集电极）的电流，属于**电流控制电子流元件**。而场效应晶体管是由加在输入端（栅极）的**电压来控制输出端**（漏极）的电流，属于**电压控制电流元件**。

内容提要

- ❖ 半导体和PN结
- ❖ 双极型晶体管
- ❖ 场效应晶体管
- ❖ 集成电路



集成电路的发明



Jack Kilby

Nov 08, 1923—Jun 20, 2005

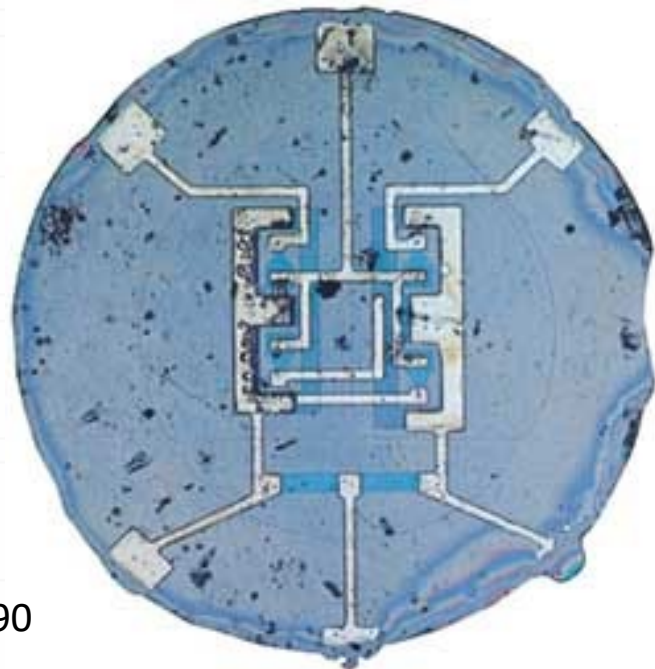


- ❖ 1958年9月12日，美国德州仪器公司的青年工程师**杰克·基尔比**（Jack Kilby），成功地将包括锗晶体管在内的五个元器件集成在一起，基于锗材料制作了一个叫做相移振荡器的简易集成电路。
- ❖ 2000年，集成电路问世42年以后，基尔比获诺贝尔物理学奖。

硅平面集成电路工艺

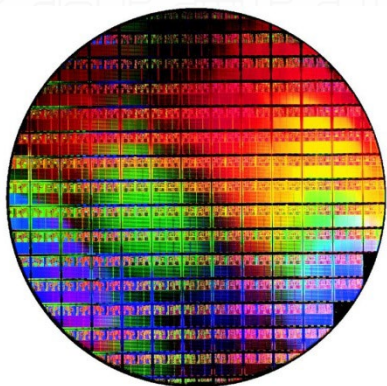


Robert Noyce
Dec 12, 1927—Jun 03, 1990

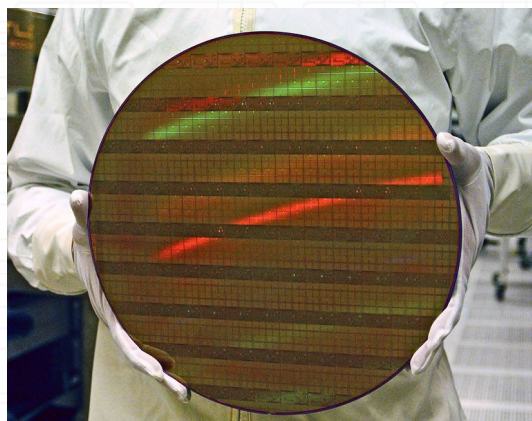


- ❖ 1959年7月，美国仙童半导体公司（Fairchild）的**罗伯特·诺伊斯**，研究出一种利用二氧化硅屏蔽的扩散技术和PN结隔离技术，基于硅平面工艺发明了世界上第一块硅集成电路。
- ❖ 诺伊斯还共同创办了两家硅谷最伟大的公司：一个是曾经有半导体行业“黄埔军校”之称的-仙童公司，一个是当今世界上最大设计和生产半导体的科技引擎英特尔公司。

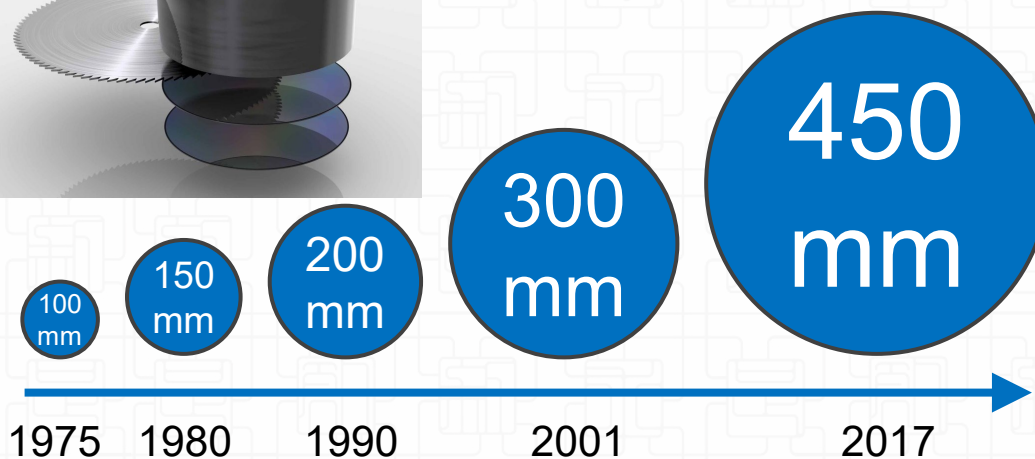
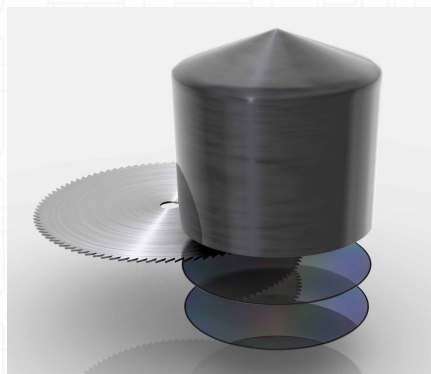
硅圆片



90nm 200mm晶圆片



45nm 300mm晶圆片

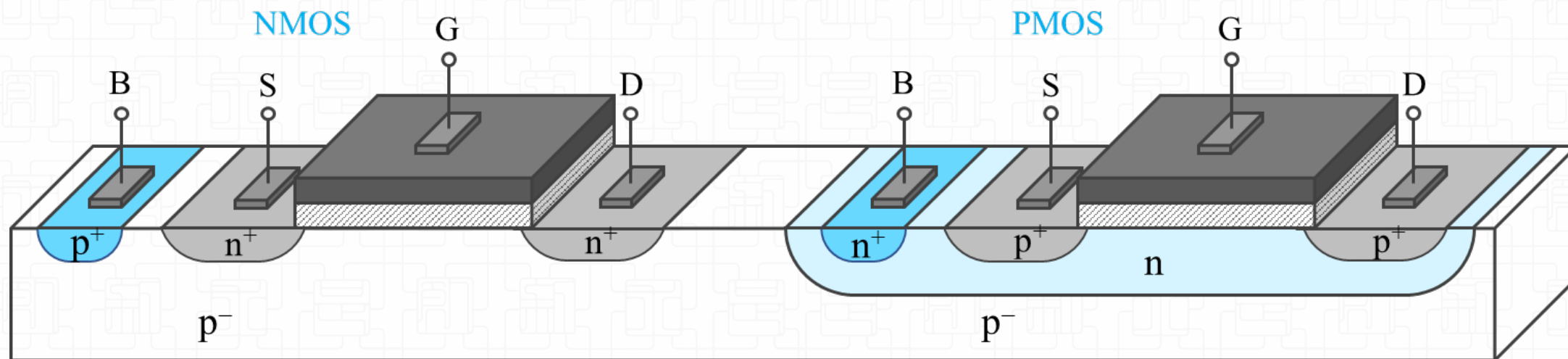


450mm(18英寸)、300mm(12英寸)、200mm(8英寸) 晶圆片

MOS场效应

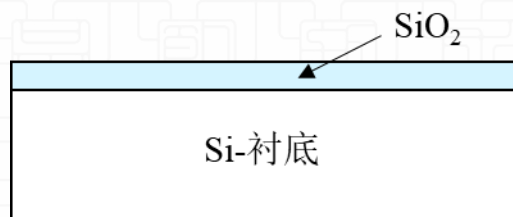
- ❖ CMOS 是 Complementary Metal Oxide Semiconductor (**互补金属氧化物半导体**) 的缩写。
- ❖ CMOS 技术是指制造大规模集成电路芯片用的一种技术。
- ❖ CMOS 集成电路是指基于 CMOS 技术制造的集成电路
- ❖ MOSFET金属氧化物半导体场效应晶体管是 CMOS集成电路基础
- ❖ MOS晶体管工作的基础是场效应原理

N阱CMOS工艺

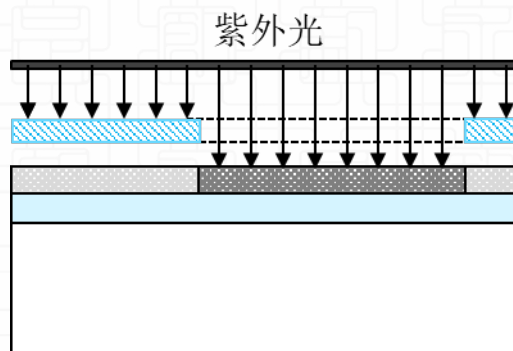


- ❖ 根据NMOS与PMOS这两类晶体管的结构，NMOS晶体管适合基于P型的衬底材料加工，而PMOS晶体管适合基于N型的衬底材料加工。
- ❖ CMOS工艺可以将NMOS晶体管和PMOS晶体管同时制作在同一衬底上，是现代制造大规模集成电路芯片的主流技术。

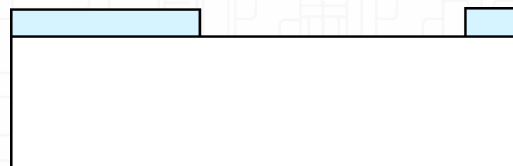
制造工艺



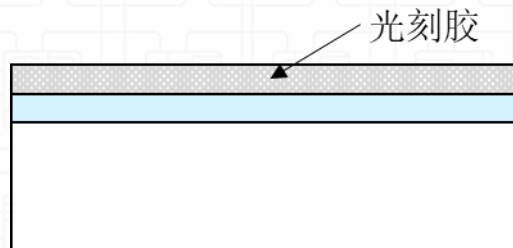
生长一层 SiO_2



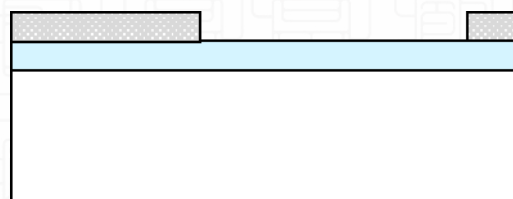
曝光



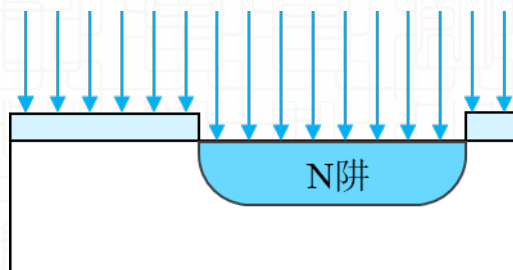
去胶



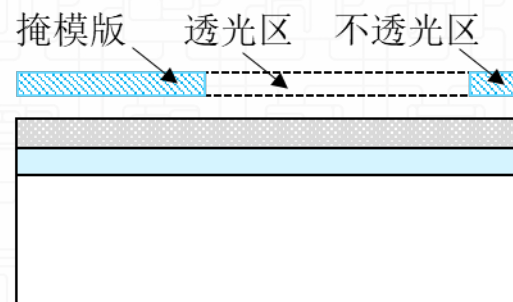
涂胶



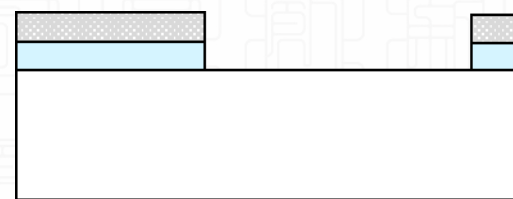
显影、坚膜



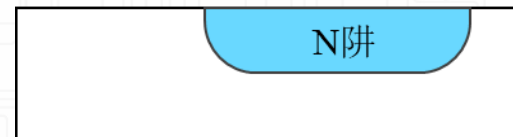
掺杂 (高温扩散或离子注入)



掩模对准



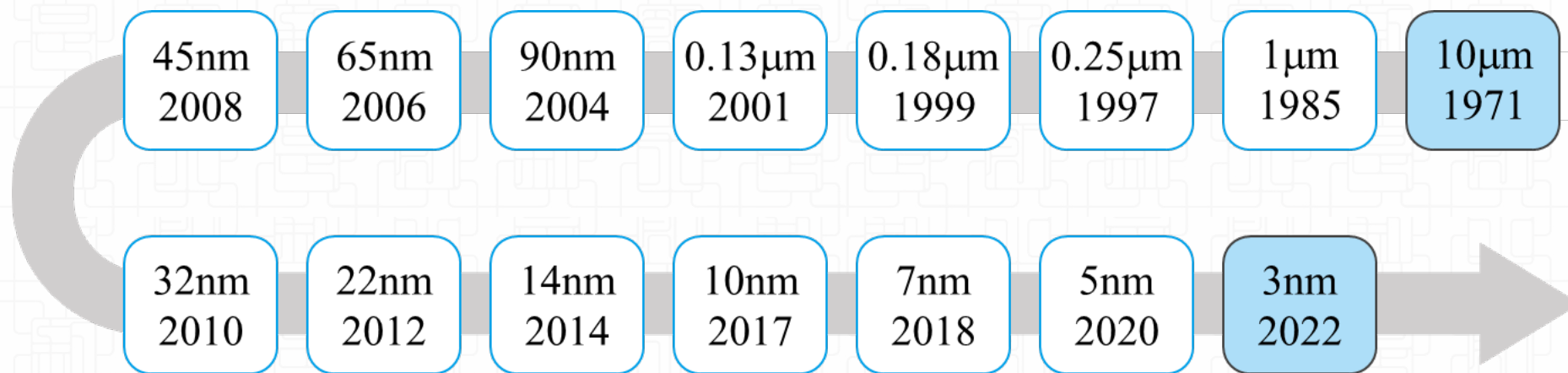
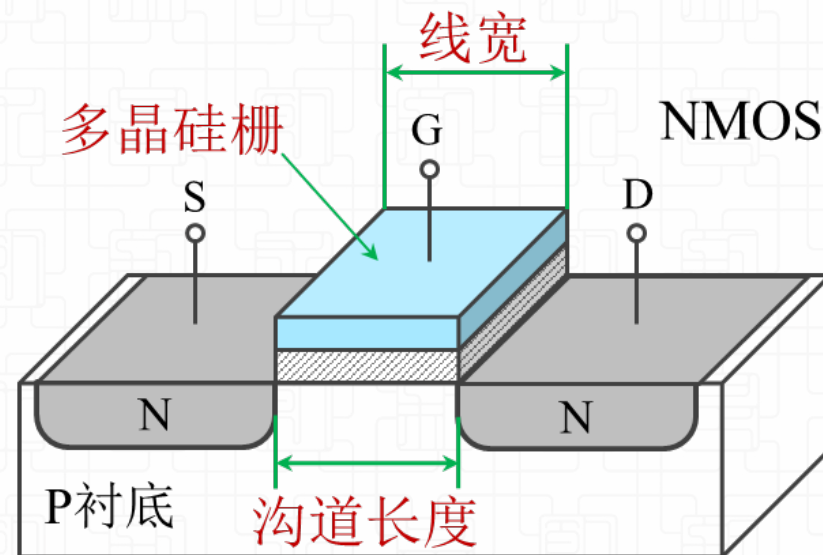
刻蚀图形



去除氧化膜

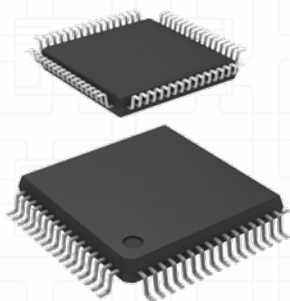
特征尺寸

- ❖ 特征尺寸定义为器件中指半导体器件中的最小尺寸。
- ❖ 在CMOS工艺中，特征尺寸典型代表为“栅”的宽度，也即MOS器件的沟道长度。

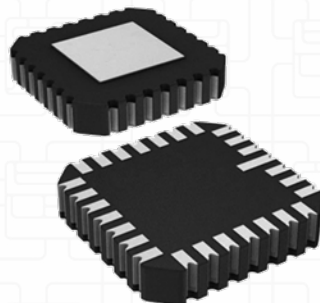


IC封装

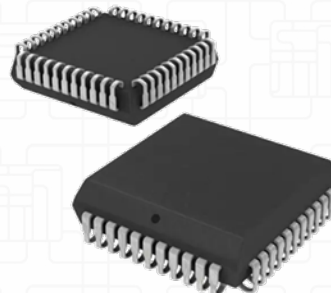
QFP封装



LCCC封装



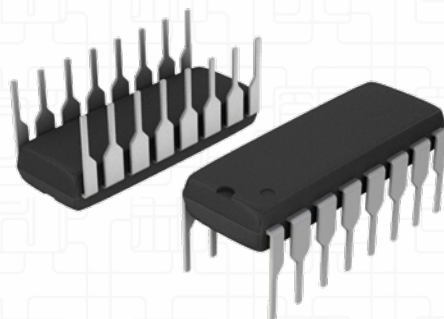
PLCC封装



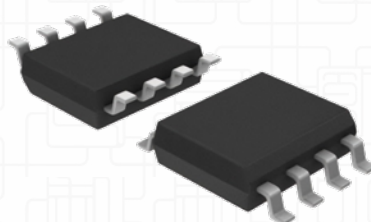
BGA封装



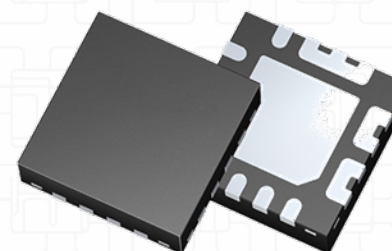
DIP封装



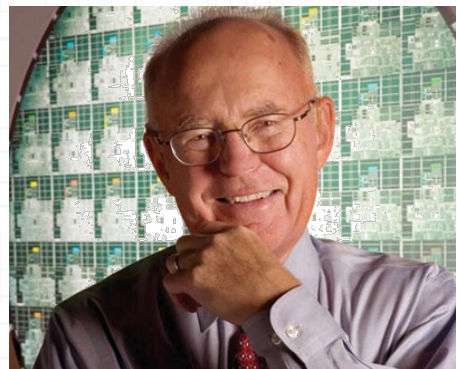
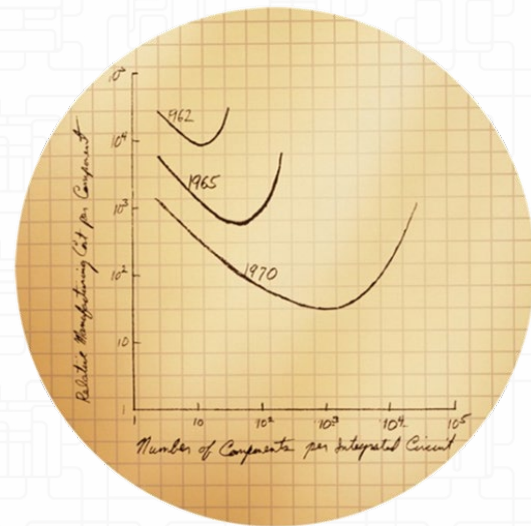
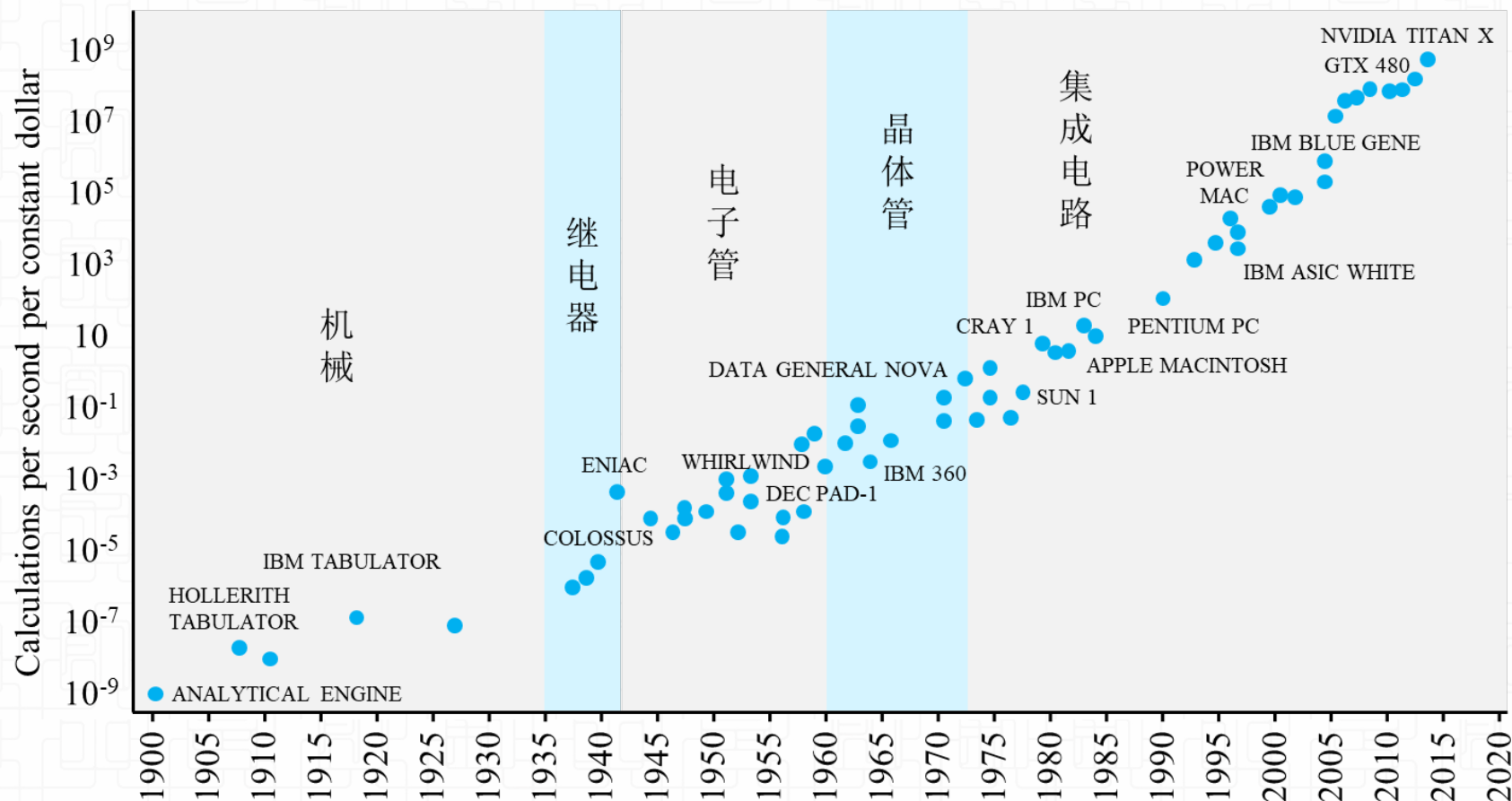
SO封装



PQFN封装



摩尔定律

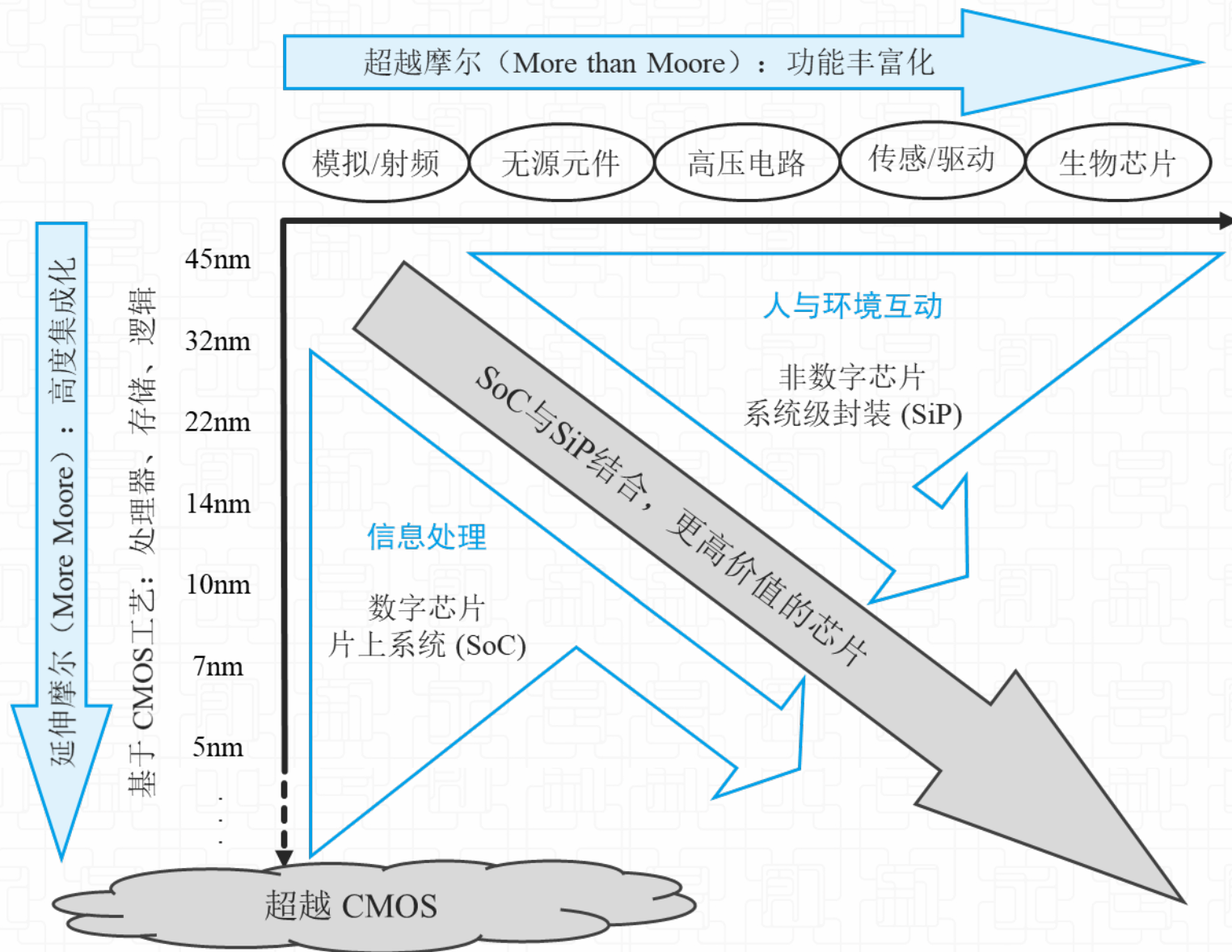


Gordon Moore

Jan 03, 1929—Mar 24, 2023

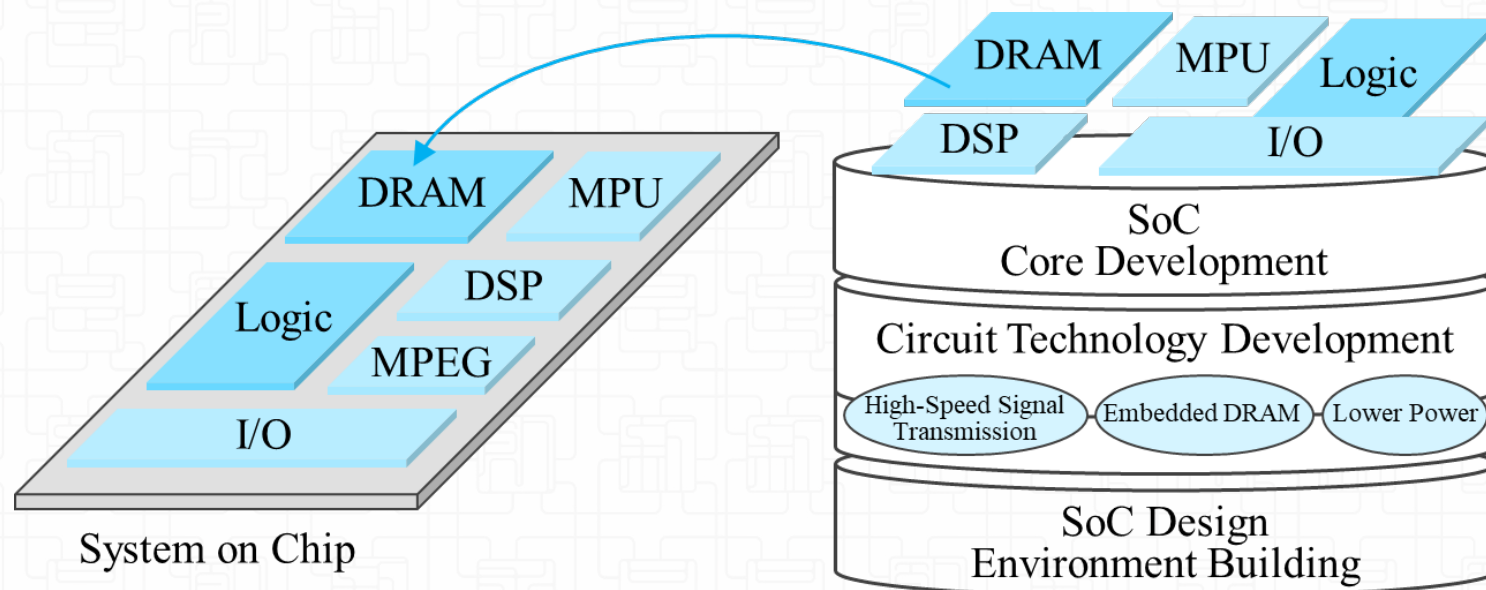
❖ 由Intel创始人之一——戈登·摩尔于1965年提出。

技术发展



SoC (System on Chip), 片上系统

❖ 集成电路 (IC) 向集成系统 (IS) 转变

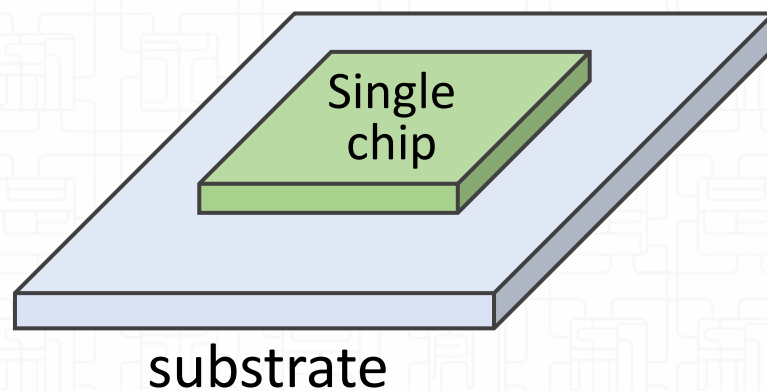


❖ 半导体工艺技术的系统集成；软件系统和硬件系统的集成

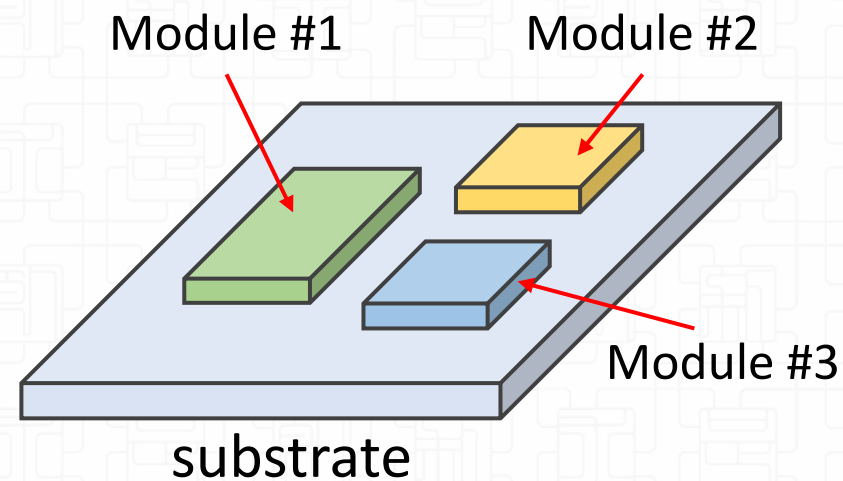
❖ 优势：降低耗电量，减少体积，增加系统功能，提高速度，节省成本

SiP (System in Package), 系统级封装

- ❖ 与SoC互补
- ❖ 混合集成
- ❖ 设计灵活
- ❖ 周期短
- ❖ 成本低



SoC



SiP

The End.



中国大学MOOC

章献民

zhangxm@zju.edu.cn