

数字电路

Digital Circuits and System

李文明

liwenming@ict.ac.cn

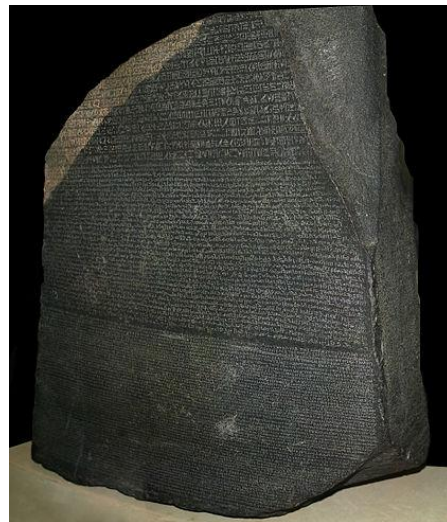


门电路1-信息编码的物理实现

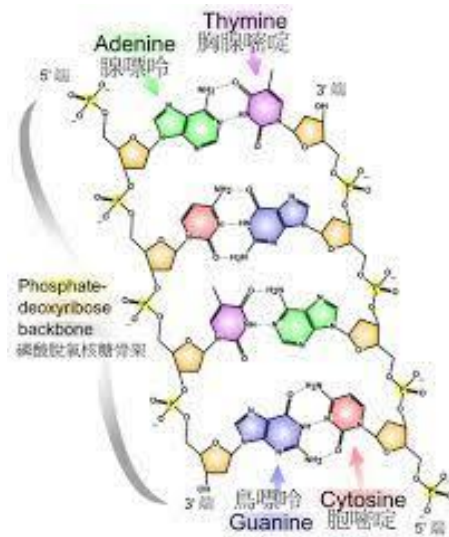


信息编码物理实现

- 第1讲介绍了信息的编码，如何物理上实现编码？
这些编码从哪来？
- 如果我们要设计一个机器来操控这些信息编码，
物理上如何实现？
- 如何“制造”一个好的“bit”？
 - 小，便宜（如果需要很多编码）
 - 稳定（可靠，可重复）
 - 容易并能高速操控（访问、变换、组合、传输、存储）



rostta石刻



DNA

数字信号

定义：数字信号是表示数字量的信号，数字量实在时间和数值上都是**离散**的

- 时间上离散：只在某些时刻有定义
- 数值上离散：变量只能是有限集合的一个值，常用0、1二进制数表示
- 数字信号的位数
 - 1位二进制表示 **2** 种状态；
 - n位二进制表示 **2^n** 种状态,取 $2^n \geq N$

0和1不表示数值的大小，没有数值的概念，仅表示两种截然不同的逻辑状态

使用电信号特征实现编码

- 电信号的特征包括：电压、电流、相位、频率
- 本课程采用“电压”来实现对信息的编码
- 依据应用场景，可以选择其他特征实现对信息的编码，以获得最佳效果，如无线通信常采用相位和频率来编码
- 使用电压实现编码的好处：
 - 容易产生、检测
 - 具有丰富的知识积累
 - 在稳定状态，具有潜在的低（零）功耗
- 使用电压实现编码的不足：
 - 容易受到环境干扰，出错
 - 需要直流（DC）耦合，稳定性、功耗
 - R&C效应，会使电路速度变慢



使用电压实现对信息的编码

- 对图像的每个像素点 (x,y) 进行编码，即用电压值代表像素点的信息

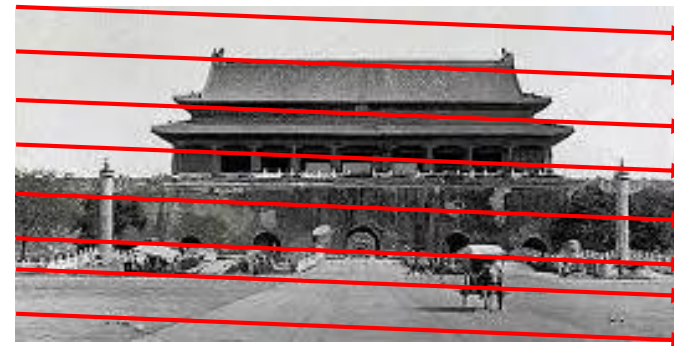
0 伏 (V)	黑
1 伏 (V)	白
0.37 伏 (V)	37% 灰



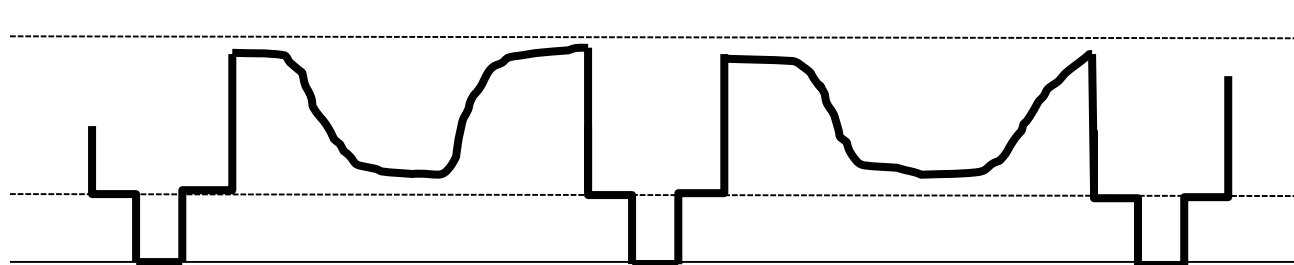
- 每个点的信息量是多少？
- 假设我们可以可靠地分辨 $1/2^N$ 伏，那么，在 $0V \sim 1V$ 之间的电压值可以表示 $N \text{ bits}$ 信息
- 现实情况下， N 是多少？

使用电压对图像信息编码

- 图像表示方法
 - 采用预先约定的栅格和时间间隔，对图像中的点扫面
 - 从而生成电压波形



PAL TV 信号



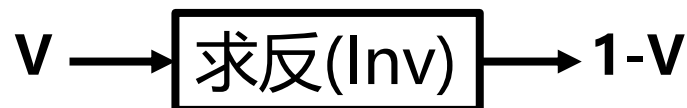
白

黑

同步

模拟信号

信息处理 = 计算

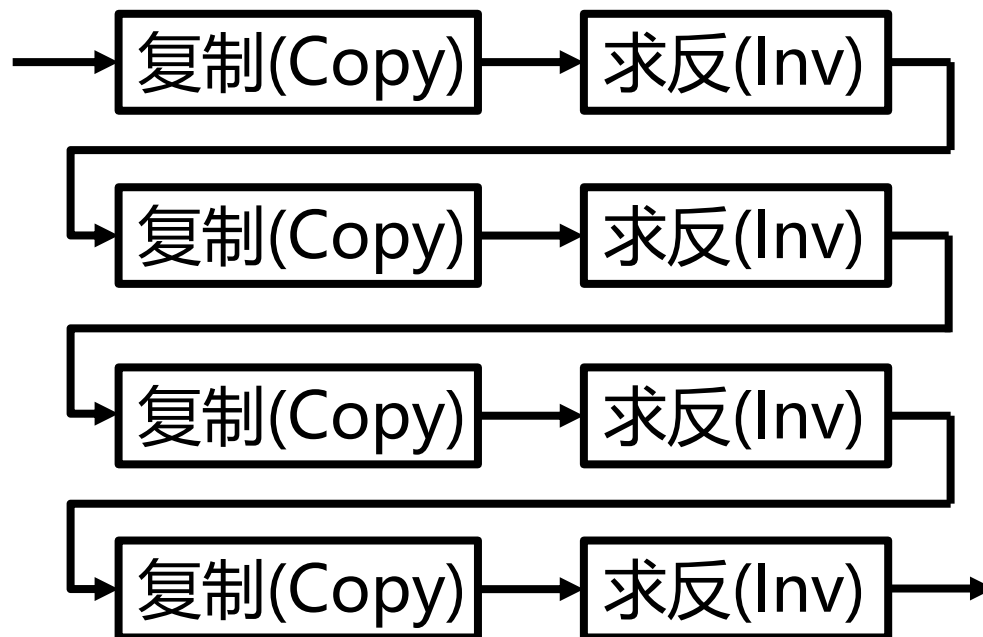


- 设计处理模块（复制、求反、...）的好处
 - 预先设计好的功能：构造复杂系统时，只依赖于模块的行为，无需模拟工程师参与
 - 用功能模块构建的复杂系统，其行为可预期，就像搭积木
 - 系统行为有保证，模块工作正常，则系统工作正常

由处理单元构造系统



输入图像



输出图像

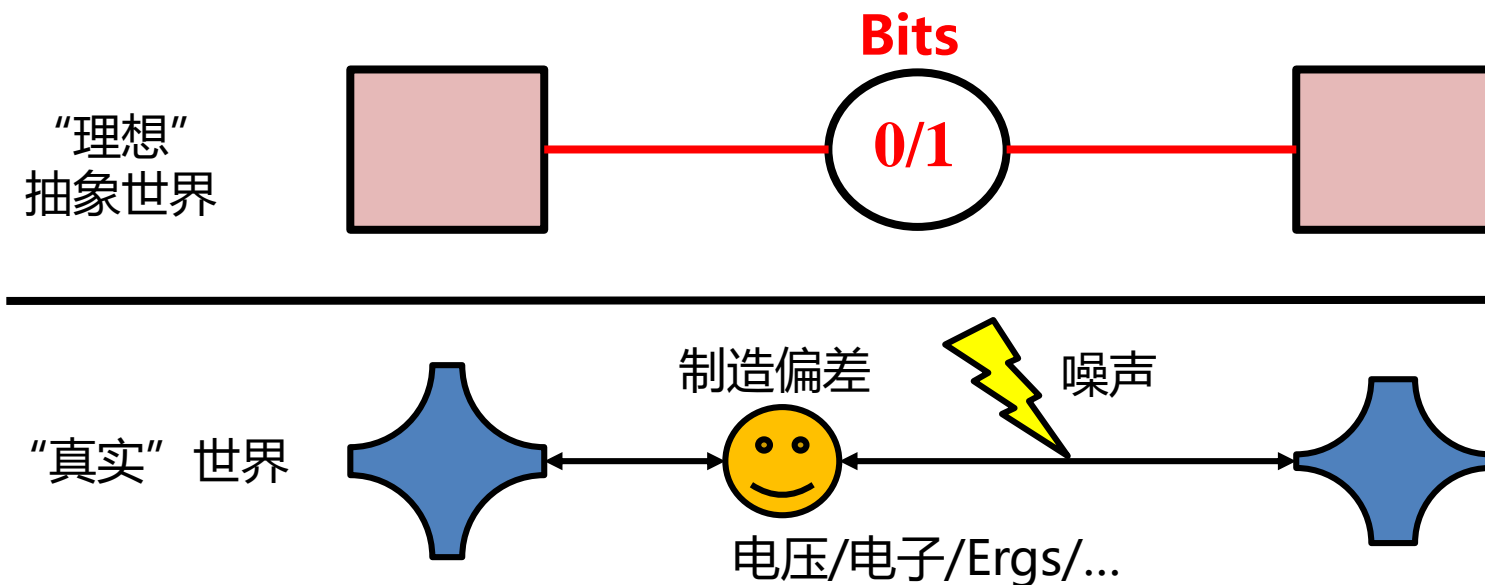
- 理论上，输出的图像应该与输入的图像完全相同
- 但现实是：输出图像会失真，变模糊
- ?

系统为什么不能正常工作？

- 为什么理论与实现结果不匹配？
 - 复制模块工作不正确
 - 求反模块工作不正确
 - 理论不完美
 - 实现方式不完美
 - 系统结构不好
- 答案是：所有上述可能
 - 噪声和不精确不可避免
 - 我们不能可靠地重新生成无限信息
 - 如果希望可靠地处理信息，系统设计必须要能够容忍一定量的错误



数字抽象(Digital Abstraction)



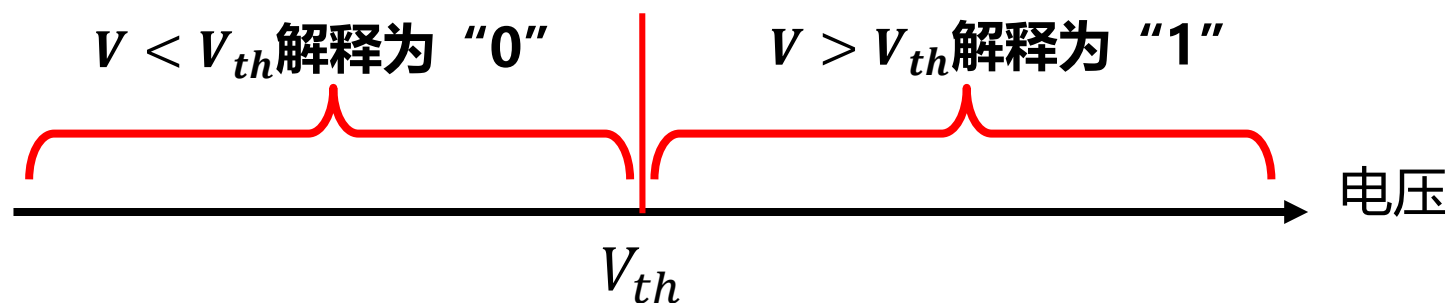
- 需要牢记:
 - 现实世界是模拟的而不是数字的
 - 需要采用工程的方法来简化处理过程，并且使最终结果看起来很像
 - 必须使用物理现象，来实现数字设计

使用“电压”来表示“数字”

- 编码1 bit 信息: 2 个值 “0” , “1”
- 数字系统中的每个部件和连线, 都采用相同的约定

方法1:

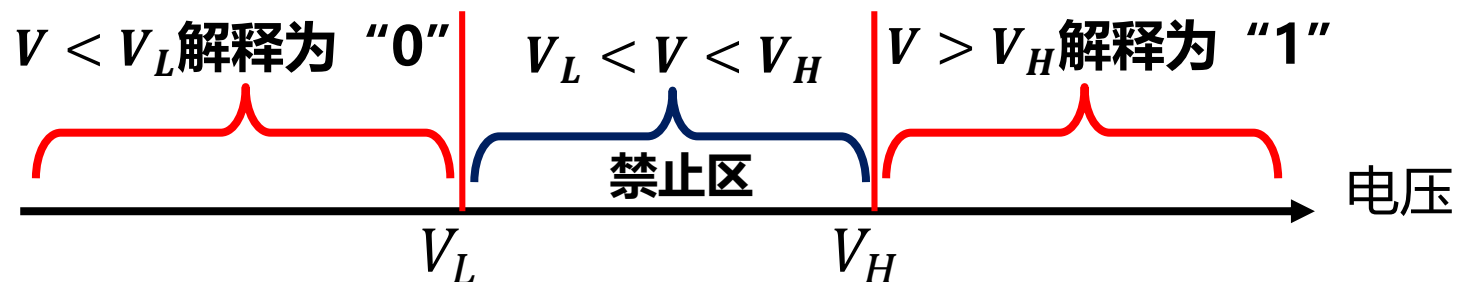
设定1个阈值
电压 V_{th}



在 V_{th} 附近, 很难分辨, 是应该解释成 “1” 或 “0”

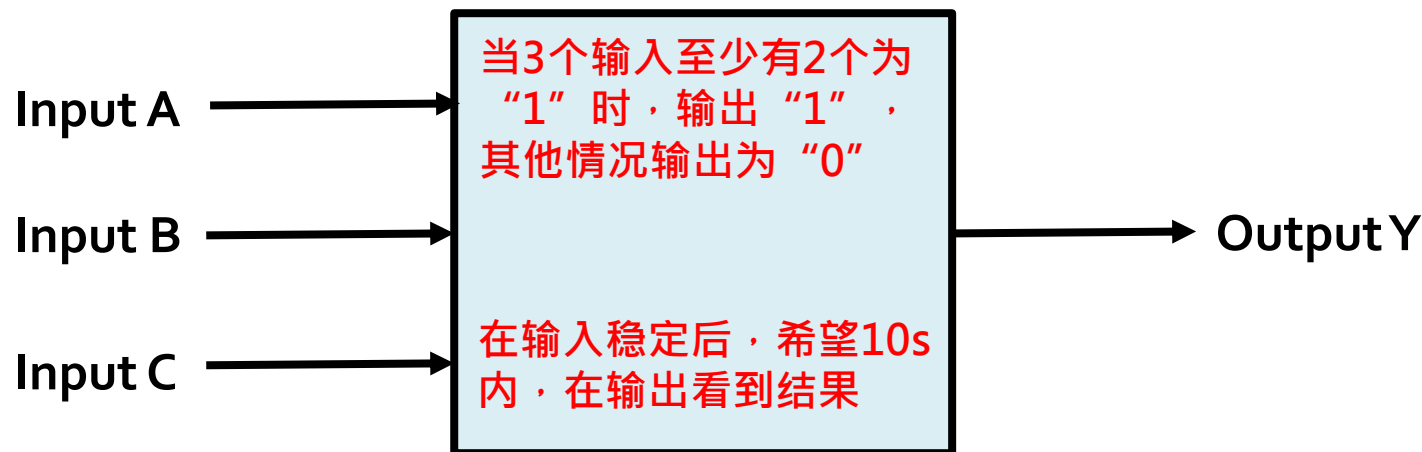
方法2:

设定2个阈值
电压 V_L 和 V_H



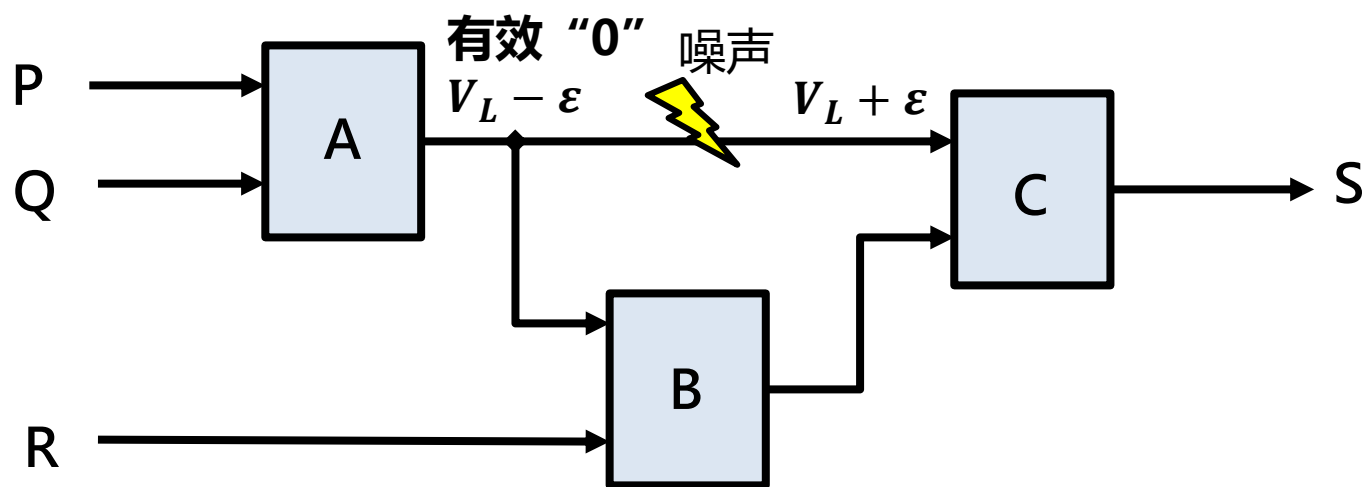
数字处理单元

- 基本组合逻辑处理单元定义
 - 1个或多个数字输入端
 - 1个或多个数字输出端
 - 详细定义的功能规范：输出端与输入端所有取值可能组合的逻辑关系
 - 时序规范：传输延迟时间 t_{PD} (Propagation Delay)，处理单元从输入任意组合稳定开始，计算获得输出结果所需要的时间



组合逻辑系统

- 一组互连的处理单元构成组合逻辑系统
 - 每个处理单元都是组合逻辑
 - 处理单元的输入只连接一个输出，或者直接连接成“0”、“1”
 - 电路中不存在反馈环

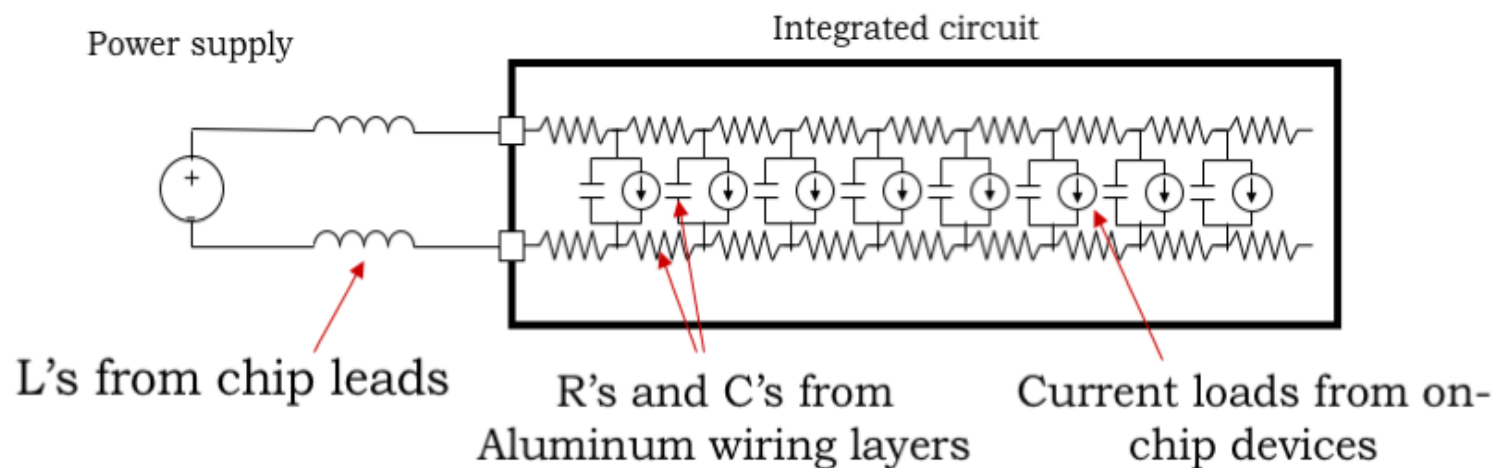


电路的数字输入?
数字输出?
功能?
传输时间?

需要调整“1”与“0”之间的阈值电压，保证在有噪声的情况下，仍能正确判断出输入值

噪声的来源

- 寄生电阻、电感、电容
 - IR Drop, $L (dI/dt)$, LC震荡电流



- 器件不精确
 - 制造偏差、允许的误差
- 环境效果
 - 外部电磁 (EM) 场干扰、温度变化、压力、湿度, ...
- ...

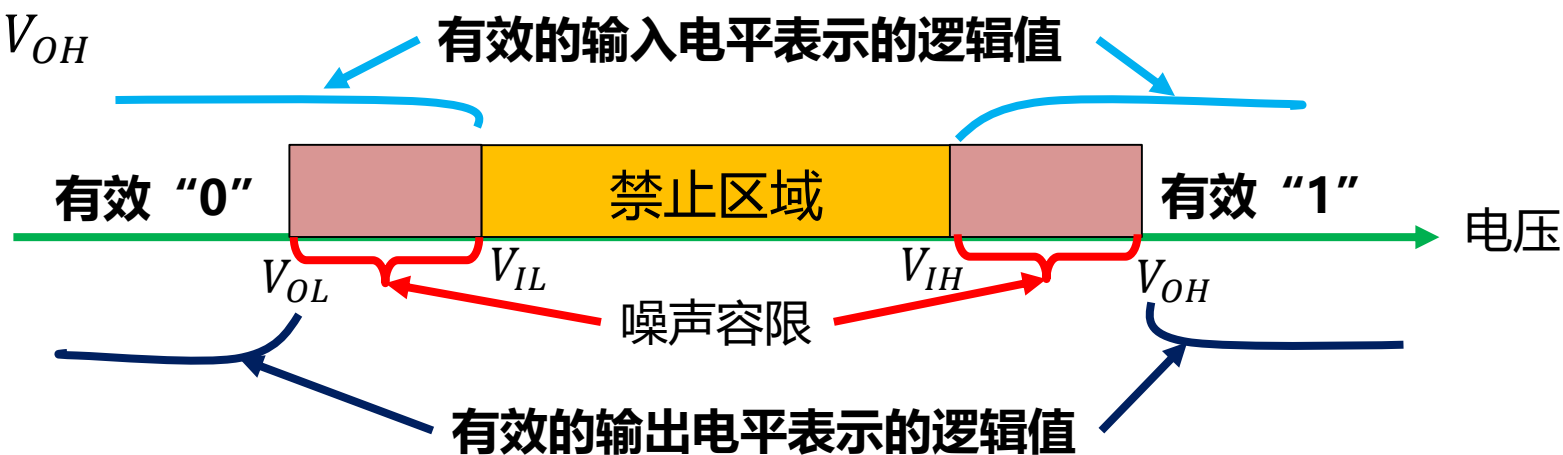
噪声容限(Noise Margins)设计

- 单独定义电路输入和输出的逻辑电平规范

- 数字输出: “0” $< V_{OL}$, “1” $> V_{OH}$

- 数字输入: “0” $< V_{IL}$, “1” $> V_{IH}$

- $V_{OL} < V_{IL} < V_{IH} < V_{OH}$



- 逻辑器件的输入端允许输入逻辑电平具有一定的噪声容限，输出端提供可靠的输出逻辑电平

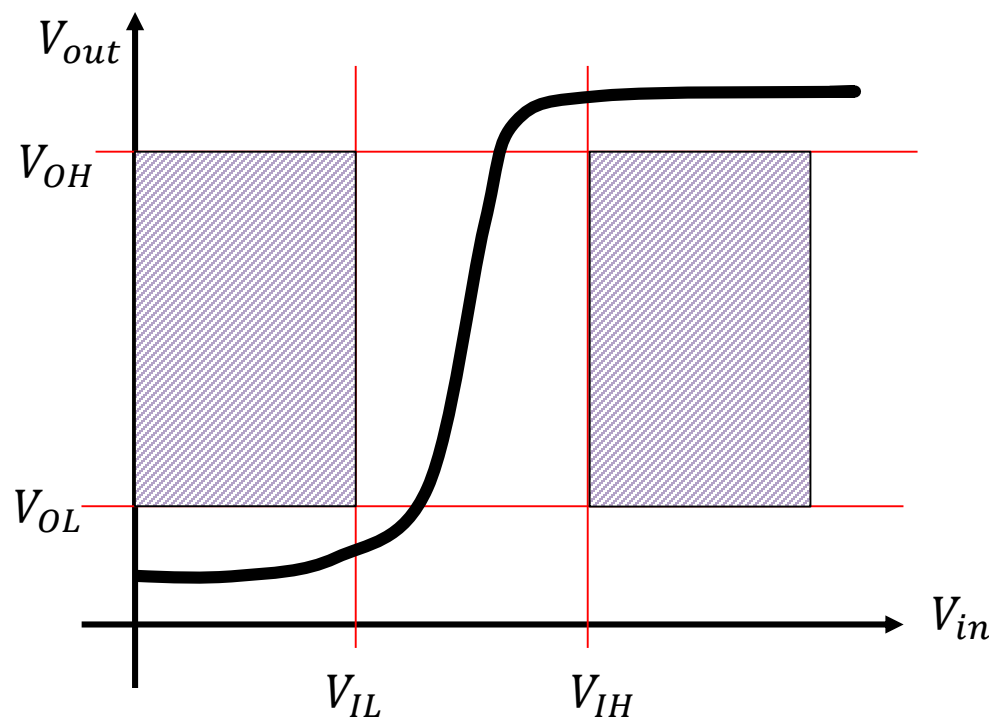
缓冲器(Buffer)

- 最简单的组合逻辑器件



- 电压转移特性(VTC)

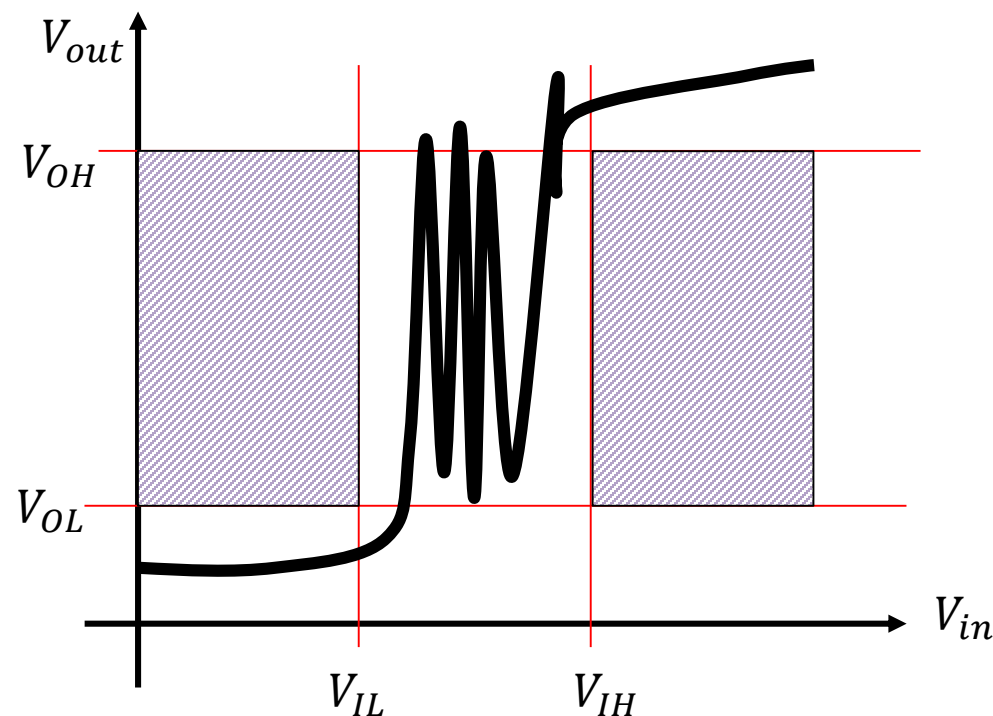
- 画出了输出电压 V_{out} 与输入电压 V_{in} 之间的关系曲线, 该曲线是在稳定状态下测量得到的
- 该曲线不能表明器件的动态特性, 即不能表示器件的工作速度等动态参数



- 静态约束要求器件的输出不能出现在图中阴影部分 (禁止区域), 这些区域对应有效的输入, 但无效的输

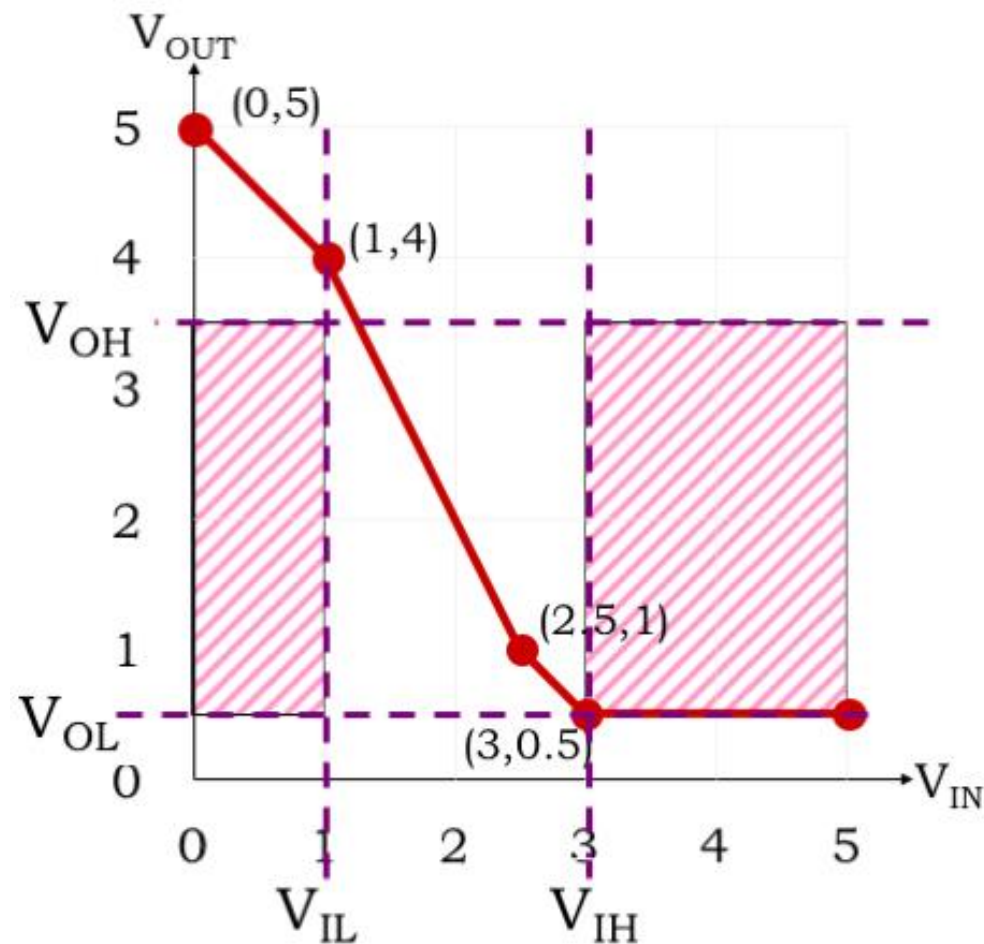
电压转移特性(Voltage Transfer Characteristic)

- 当 $V_{IL} < V_{IN} < V_{IH}$ 时, VCT的曲线可能不确定
- 曲线中间白色区域的高度大于其宽度, 意味着:
 - $(V_{IH} - V_{IL}) < (V_{OH} - V_{OL})$
 - 组合逻辑单元的增益大于1, 并且是非线性的



组合逻辑反相器

- 假设器件的电压传输特性测得如图，是否可以找到一个规范定义，确定其具备反相器功能？
- 为使器件能输出正确逻辑电平， V_{OL} 不能高于0.5V，设 $V_{OL} = 0.5V$
- V_{IH} 应该足够高，以产生正确的 V_{OL} ，设 $V_{IH} = 3V$
- 找到噪声容限 N ，并计算：
$$\begin{cases} V_{OH} = V_{IH} + N \\ V_{IL} = V_{OL} + N \end{cases}$$
- 检查，当 $V_{IN} \leq V_{IH}$ 时， $V_{out} \geq V_{OH}$
- 假设： $N=0.5V$
- $V_{OL} = 0.5V, V_{IL} = 1V, V_{IH} = 3V, V_{OH} = 3.5V$ ，器件具备组合逻辑反相器功能



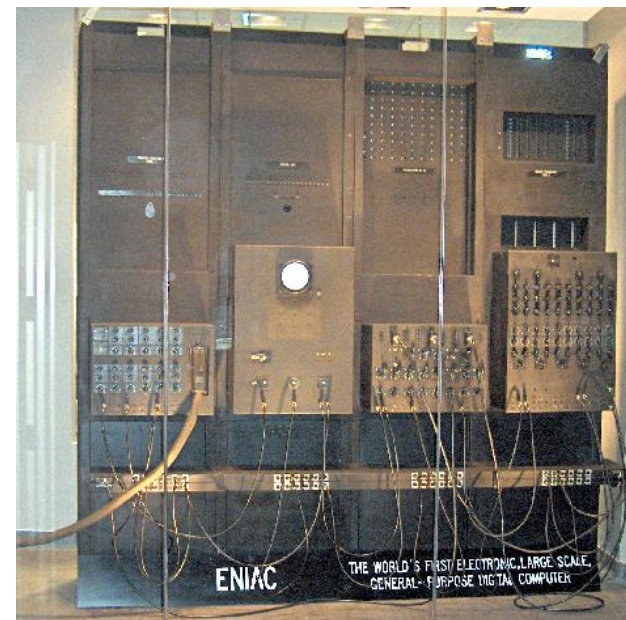
数字电路的特点

- 晶体管处于开关工作状态，抗干扰能力强、精度高
- 通用性强，结构简单、容易制造
- 便于集成及系列化生产
- 具有“逻辑思维”能力
 - 输入的数字信号进行各种算术运算和逻辑运算、逻辑判断，故又称为数字逻辑电路



数字技术的发展-电子管时代

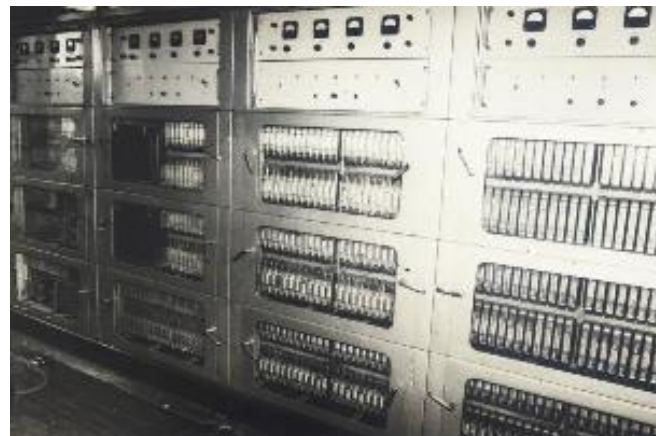
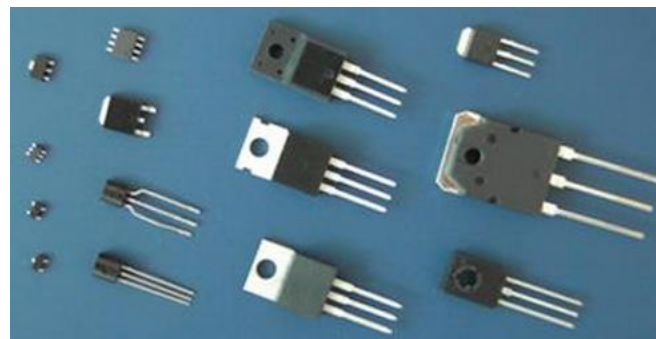
- 20世纪40年代电子计算机中的应用，此时以电子管（真空管）作为基本器件
- 电话交换和数字通讯方面也有应用



图片来源wikipedia

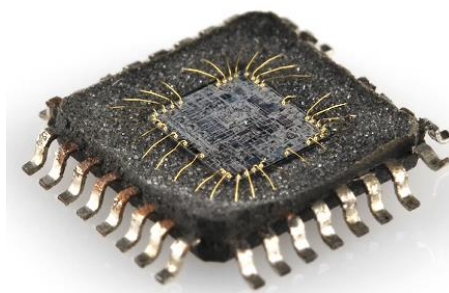
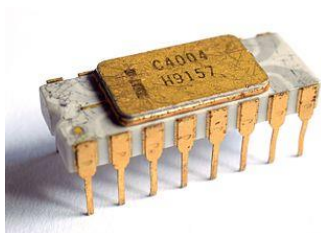
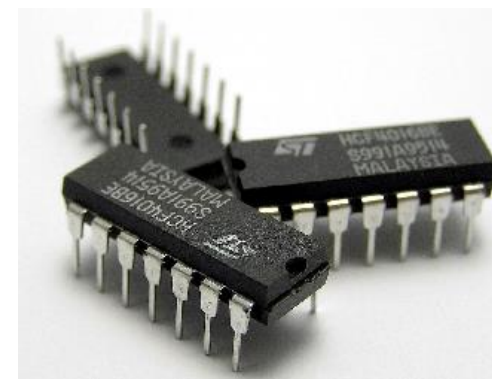
数字技术的发展-晶体管时代

- 1947年12月，美国贝尔实验室的肖克利、巴丁和布拉顿组成的研究小组，研制出一种点接触型的锗晶体管
- 20世纪60年代晶体管的出现，使得数字技术有一个飞跃发展，除了计算机、通讯领域应用外，在其它如测量领域得到应用



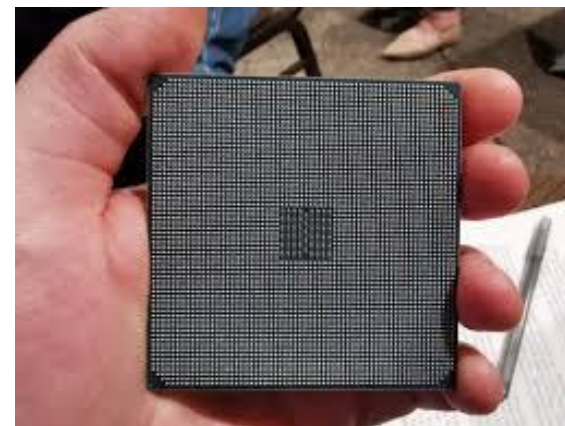
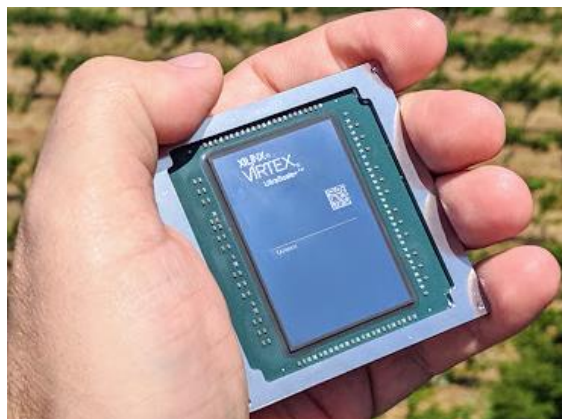
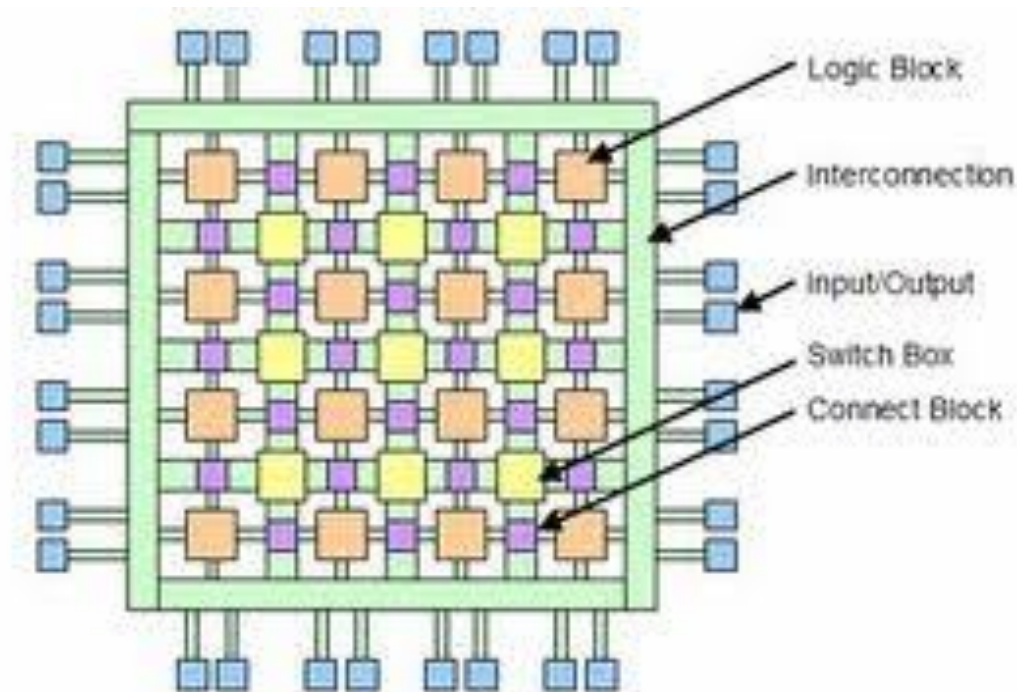
数字技术发展-集成电路时代

- Jack Kilby在TI公司于1958年发明基于锗材料的集成电路，1959年获得专利，2000年获诺贝尔物理奖
- Robert Noyce,
 - 1957年 Fairchild co-Founder，1959年发明基于硅材料的集成电路，1961~1965 NASA是最大客户
 - 1968年 Intel co-Founder



数字技术的发展-可编程逻辑

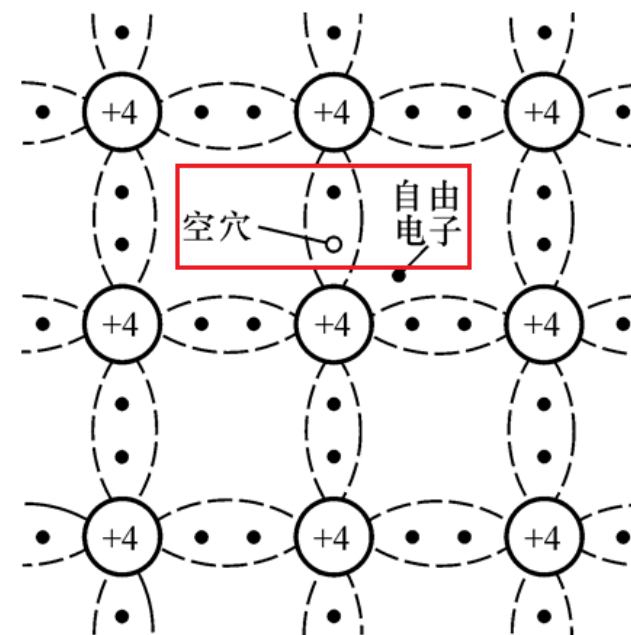
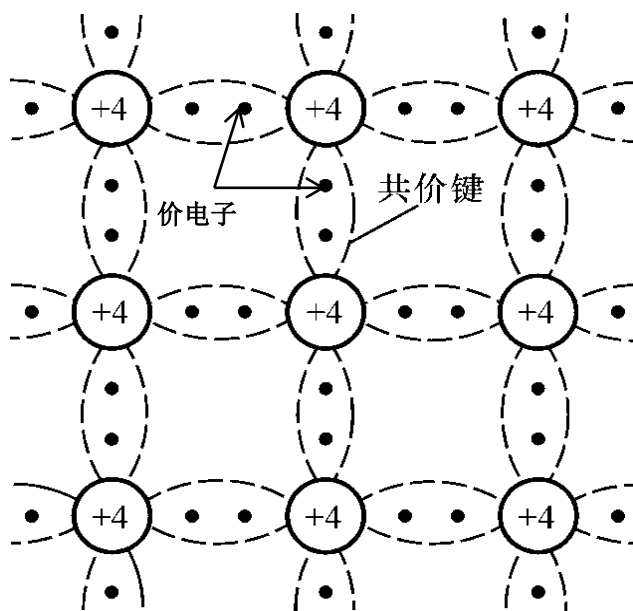
- 硬件描述语言
 - VHDL、Verilog
 - System C
 - Chisel (Constructing Hardware In a Scala Embedded Language)
- 可编程器件
 - PROM
 - PAL/GAL
 - CPLD
 - FPGA



半导体概念

- 半导体 (semiconductor)
 - 常温下导电性能介于导体 (conductor) 与绝缘体 (insulator) 之间的材料
 - 本征半导体
 - 不含杂质且无晶格缺陷的半导体，如硅、锗

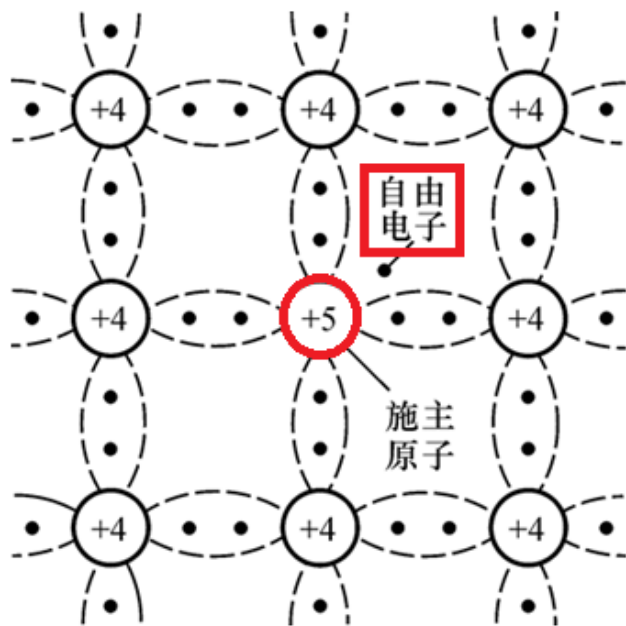
- Si原子核是+4价，最外层有4个电子（价电子）
- 在能量激发下，电子会挣脱束缚，成为自由电子
- 电子和空穴两种载流子成对出现
- 本征半导体电阻率较大，实际应用不多



杂质半导体

- **N型半导体** (Negative)

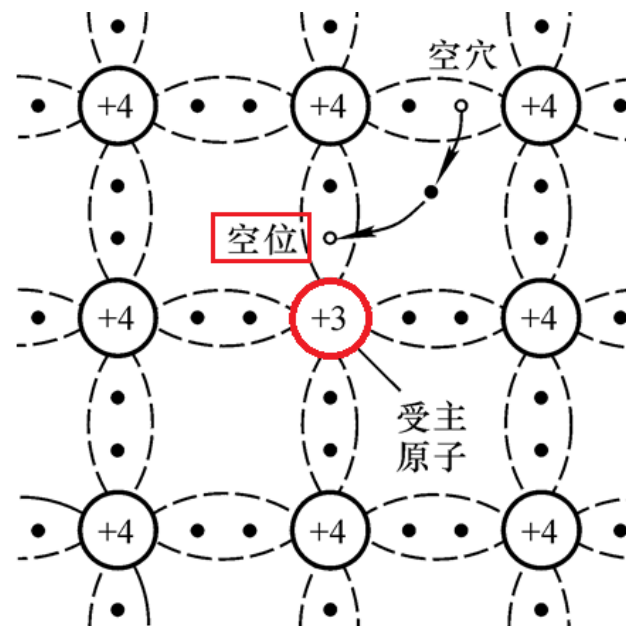
- 电子型导电
- 如四价元素锗或硅晶体中掺入五价元素磷、砷、锑等杂质原子



电子 (多子) , 空穴 (少子)

- **P型半导体** (Positive)

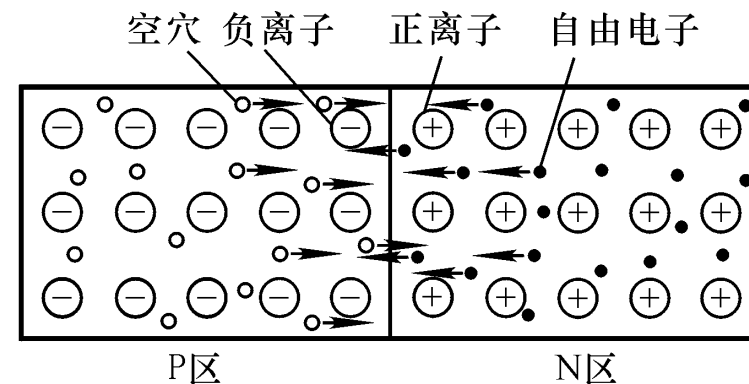
- 空穴型导电
- 如四价元素锗或硅晶体中掺入微量**三**价元素**硼**、**铝**、**镓**等杂质原子



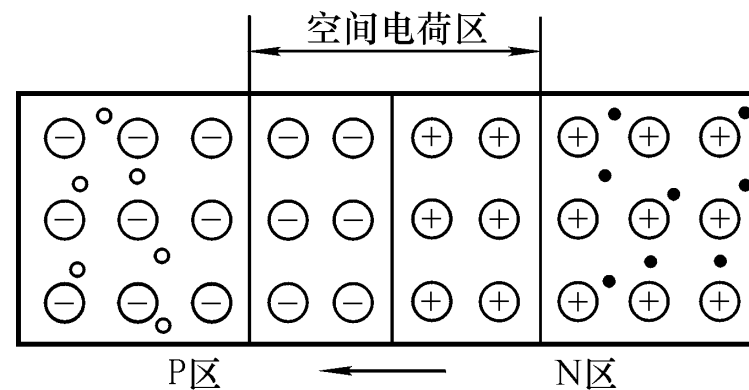
空穴 (多子) , 电子 (少子)

PN结

- P型半导体与N型半导体相互接触时, 交界区域称为PN结
- 多子扩散形成扩散电流
- 少子漂移形成漂移电流
- 空间电荷区 (U_{bo})
- 内建电场 (N指向P)



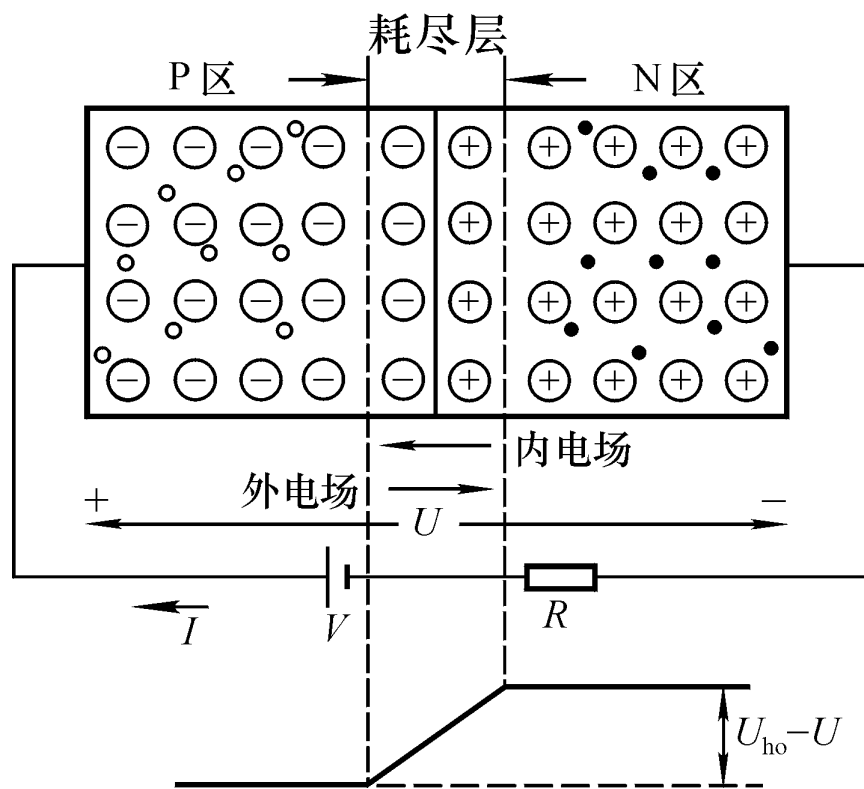
(a)



(b)

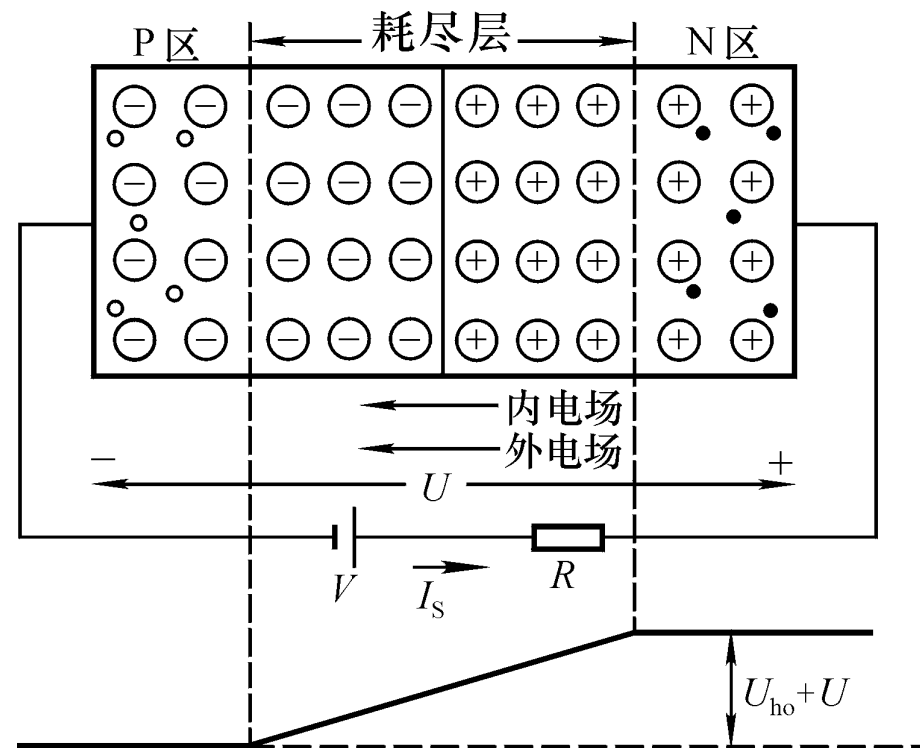
PN结单向导电性

- PN结加不同方向电压，会引起内部电场变化：**单向导电特性**



加正向电压，PN结变窄，导通

$$I_s = I_{\text{扩散}} - I_{\text{漂移}} = I_{\text{扩散}}$$

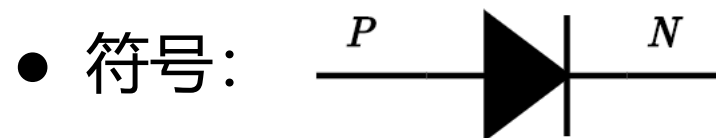


加反向电压，PN结变宽，截止

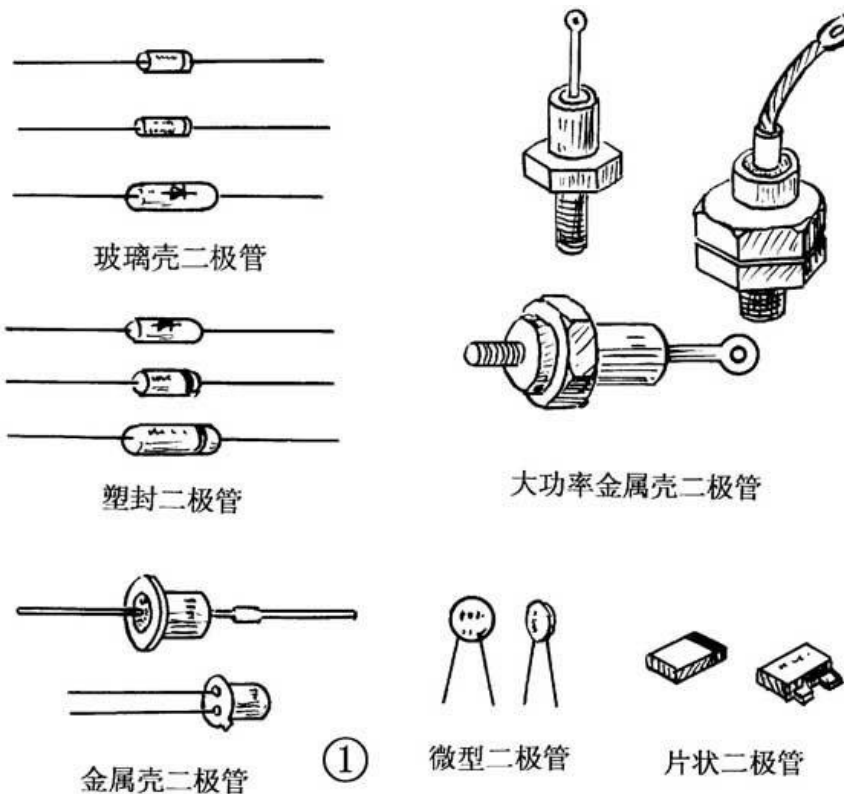
$$I_s = I_{\text{漂移}} - I_{\text{扩散}} = I_{\text{漂移}}$$

半导体二极管

- 将PN结封装，引出两个电极，就构成了二极管

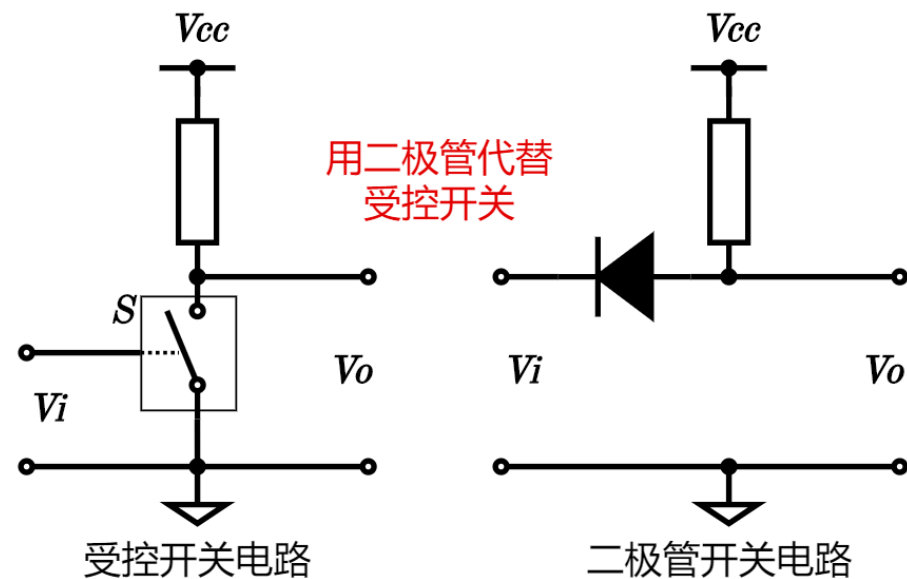


- 具有单向导电性
- 可以做开关使用



二极管开关特性

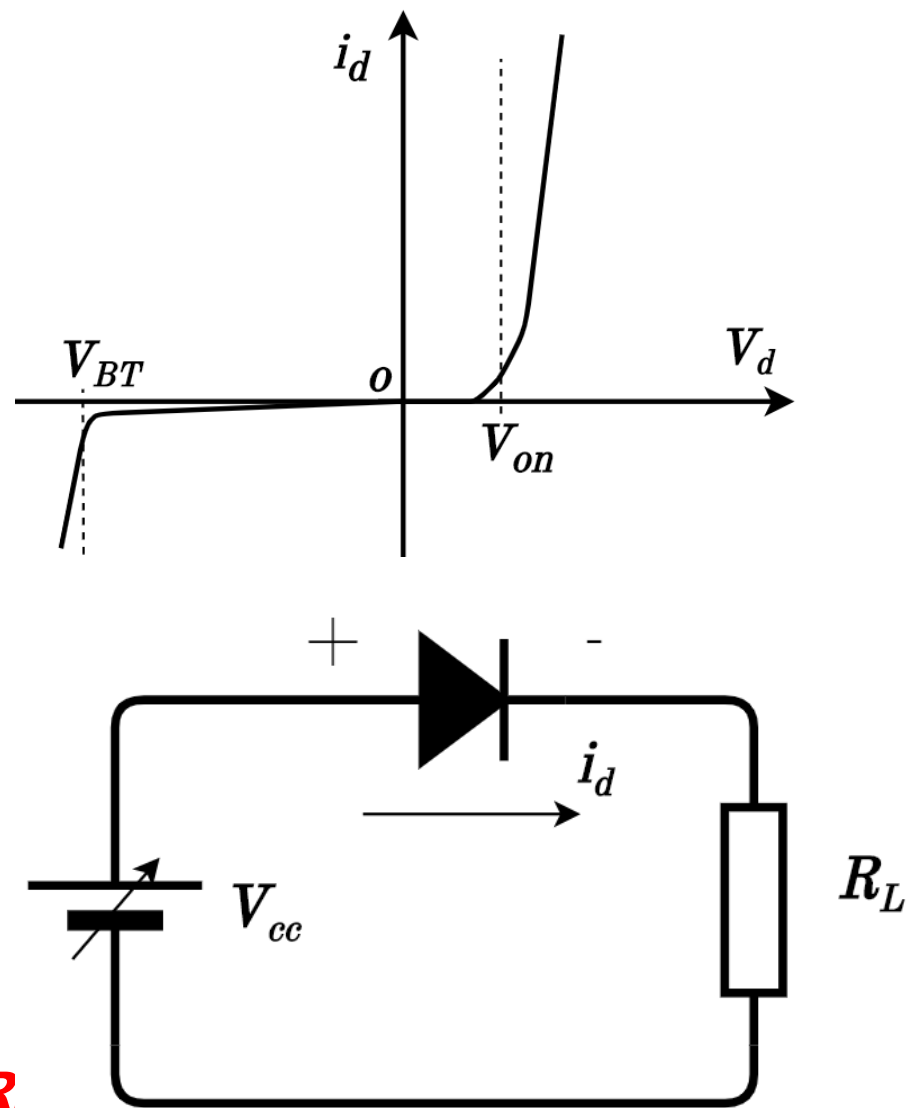
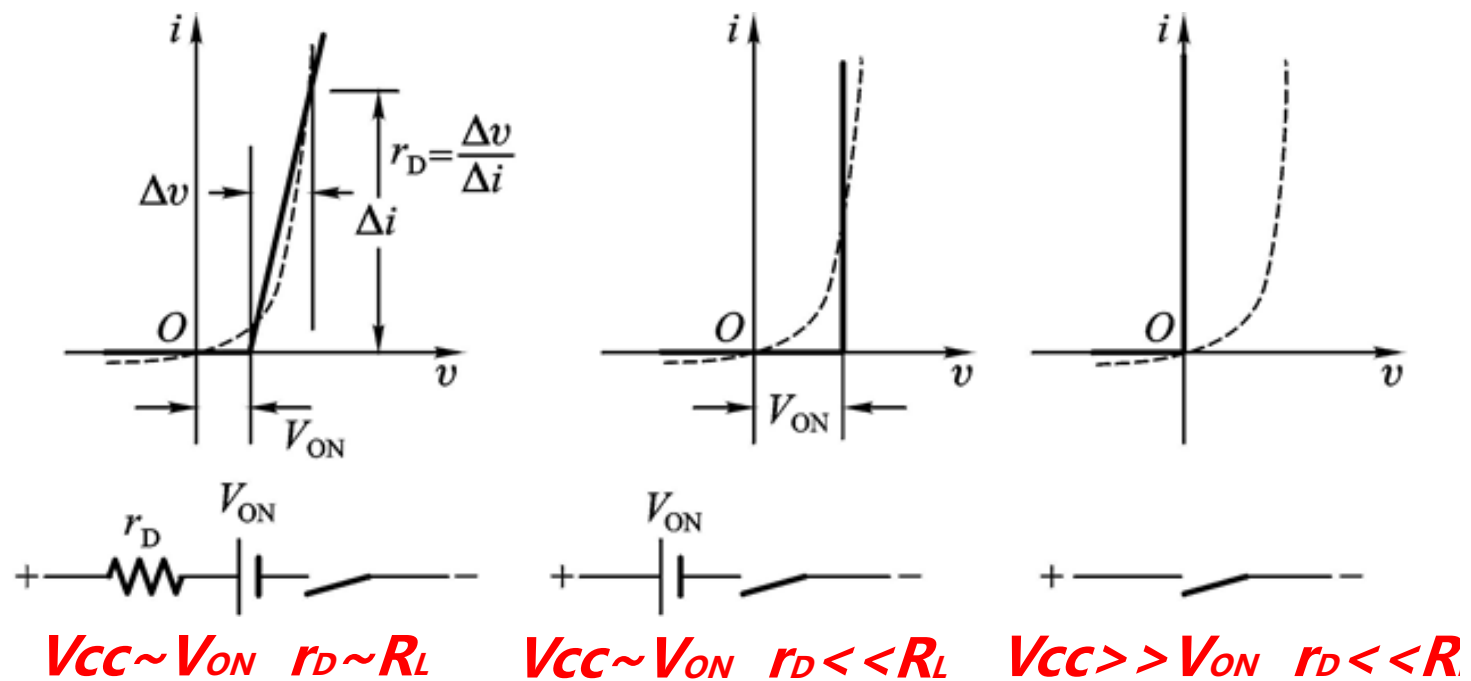
- 假定输入信号
 - 高电平 $V_{IH} = V_{CC}$,
 - 低电平 $V_{IL} = 0$
- D为理想元件
 - $V_I = V_{IH} = V_{CC}$ 时, D截止, $V_O = V_{OH} = V_{CC}$
 - $V_I = V_{IL} = 0$ 时, D导通, $V_O = V_{OL} = 0$



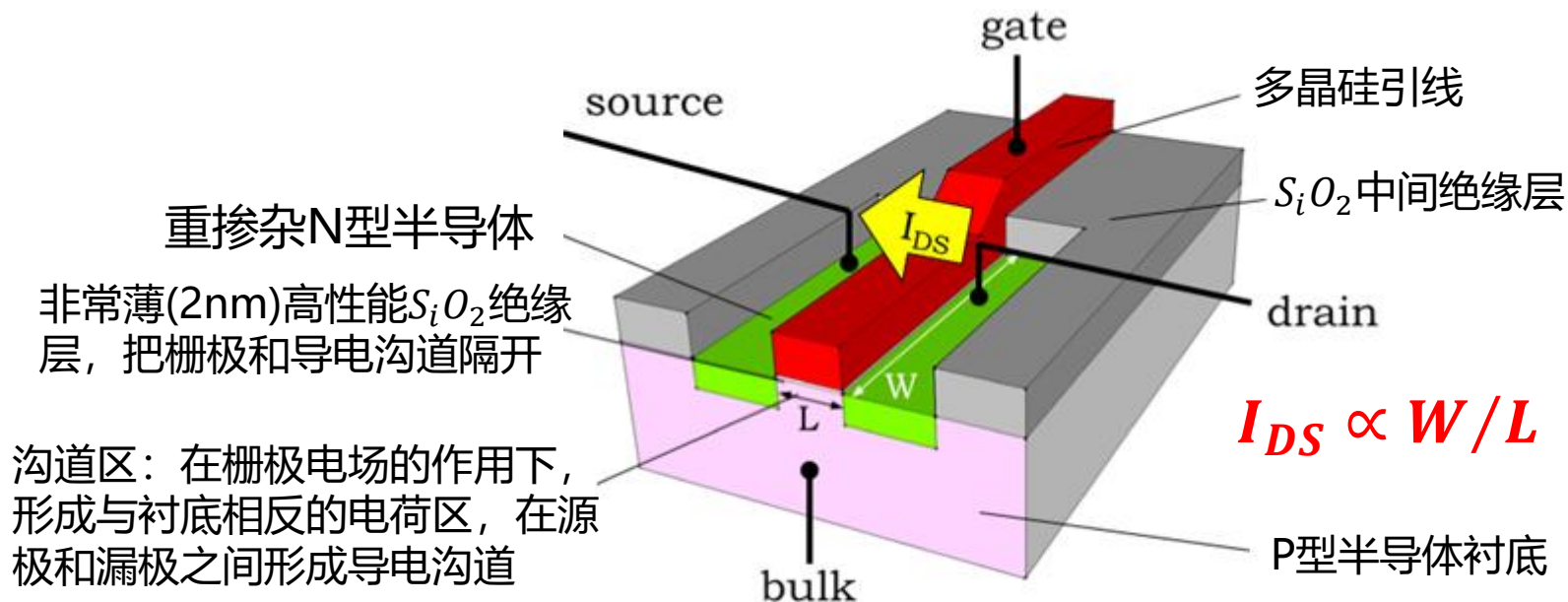
- 即可以用输入电压 V_I 的高低电平控制二极管的开关状态, 并在输出端得到相应的高低电平

二极管特性曲线

- **特性曲线**：描述二极管电压-电流关系的曲线
- 反向电阻不是无穷大，正向电阻也不是0
- 电压和电流之间**是非线性关系，分段线性**

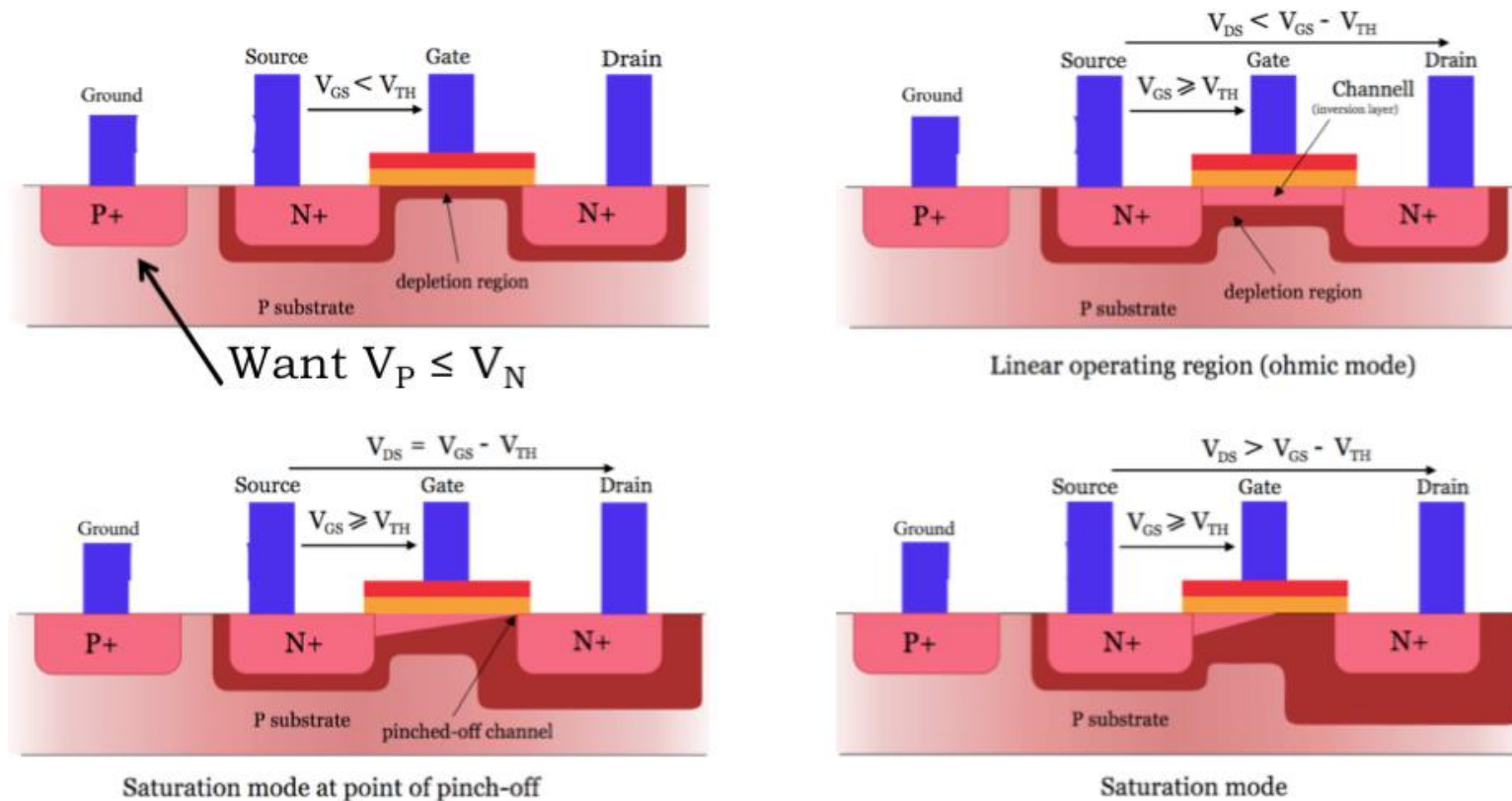


N沟道MOSFET物理结构



- MOSFETs(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors)是一种4端电压控制开关
- 4个引出端分别是: 栅极(Gate), 源极(Source), 漏极(Drain), 衬底(Bulk)
 - 当栅极电压足够大, 从而在D→S间形成导电沟道时, DS间有电流, 相当于开关闭合
 - 反之, DS间电阻无限大, 相当于开关打开

N沟道MOSFET的电特性



Olivier Deleage and Peter Scott (CC BY-SA 3.0)

- FET有4个电极(G,D,S,B)，导电沟道的导电特性会随着外加电压而变化
- 变化的电阻具备作为开关使用的条件

MOS管的开关特性

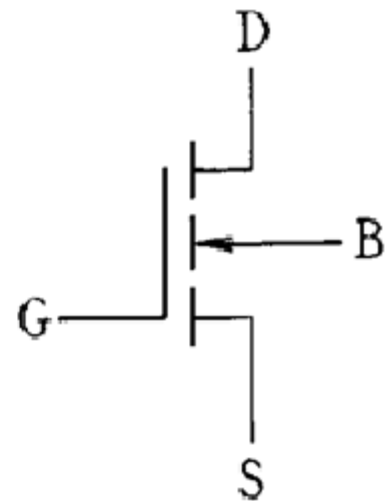
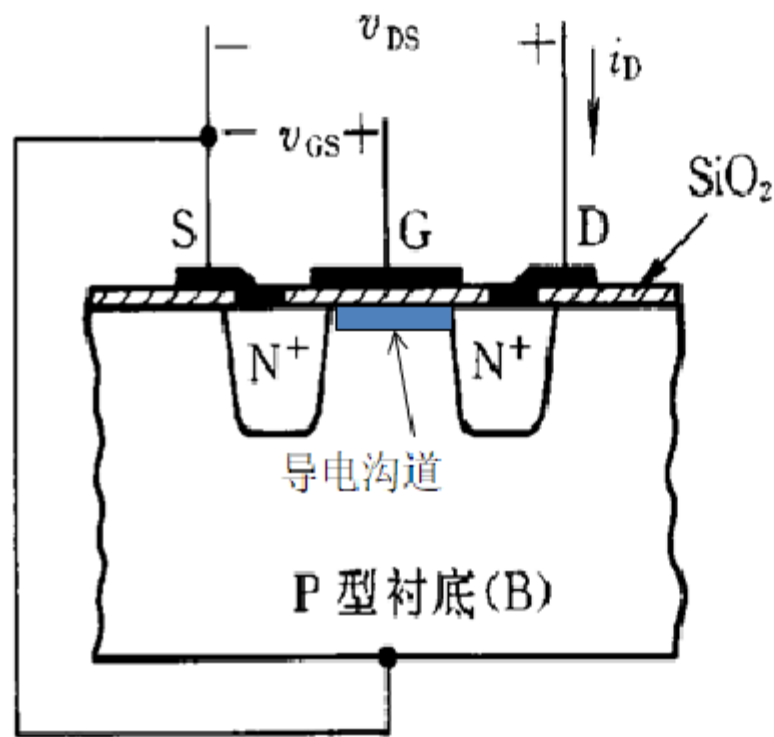
- 工作原理

- 以N沟道增强型MOS管为例

- $V_{DS} \neq 0$, $V_{GS} = 0$ 时, $D - S$ 不导通, $i_D = 0$, $R_{OFF} > 10^9 \Omega$

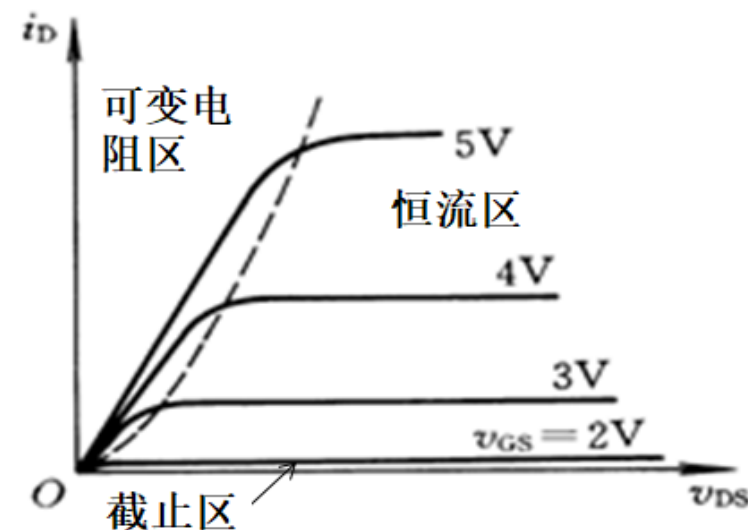
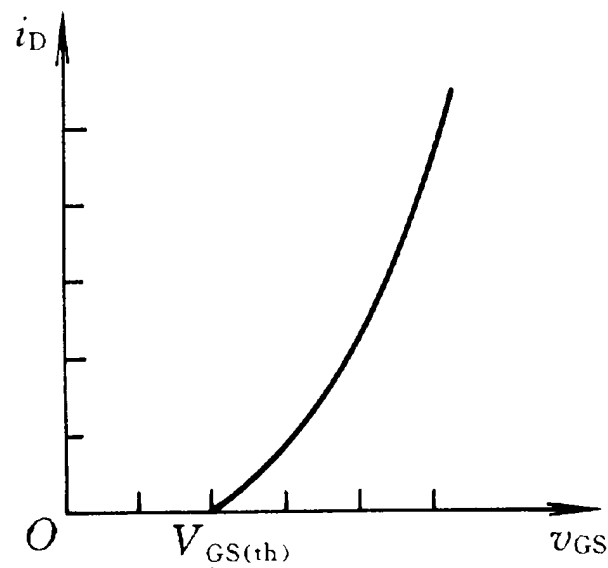
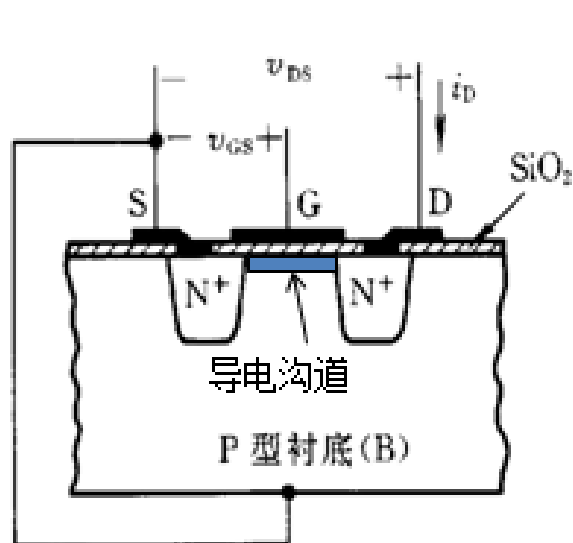
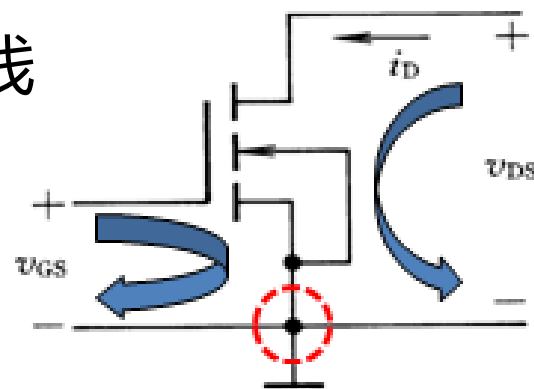
- $V_{GS} \neq 0$, $V_{GS} > V_{GS(th)}$ 时, $D - S$ 导通, $i_D \neq 0$, $R_{ON} < 1k\Omega$

- $V_{GS(th)}$ 为MOS管的开启电压



MOS管的特性曲线

- 输入特性：电流为0，电阻为无穷大，看进去有一个输入电容 C_i
- 转移特性曲线：输入电压控制输出电流的关系曲线
- 输出特性：输出电压与输出电流间的关系曲线
 - 不同 V_{GS} 对应不同的输出特性曲线
 - 输出特性曲线是一系列曲线族



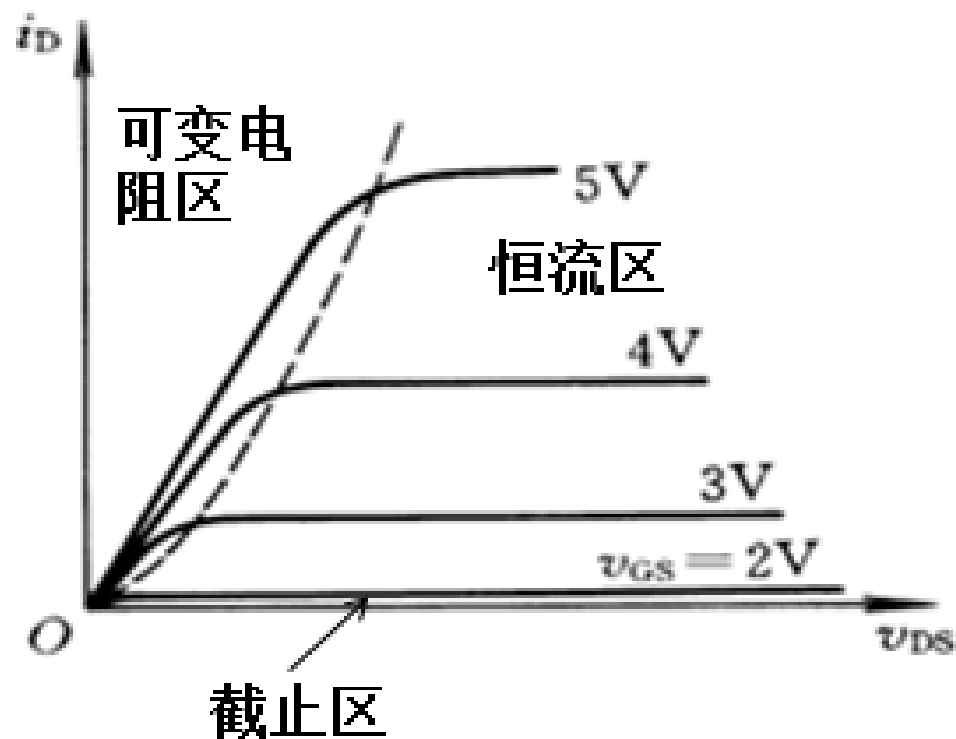
MOS管的输出特性曲线

- 漏极特性曲线

- **截止区**: $V_{GS} < V_{GS(th)}$, $i_D = 0$, $R_{OFF} > 10^9 \Omega$
- **恒流区**: i_D 基本上由 V_{GS} 决定, 与 V_{DS} 关系不大
- **可变电阻区**: V_{DS} 较低 (近似为0), V_{GS} 一定时, 这个电阻受 V_{GS} 控制、可变。在 $V_{GS} \gg V_{GS(th)}$ 下, $R_{ON} \propto 1/V_{GS}$

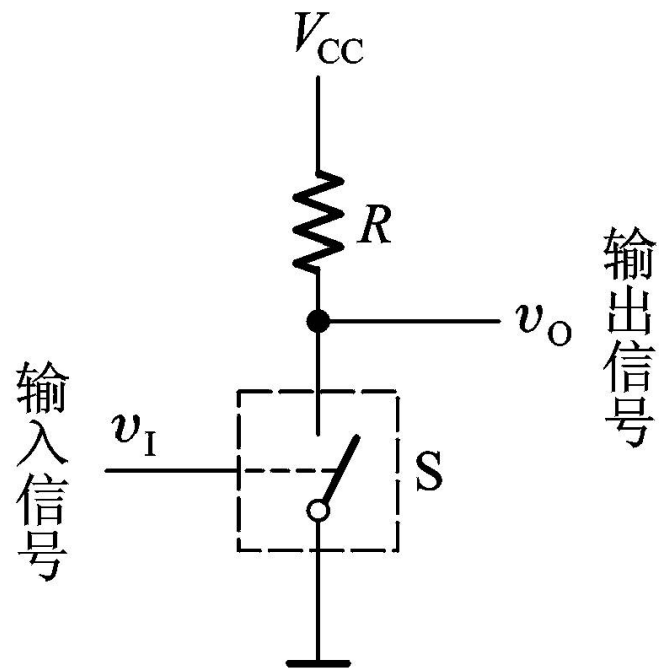
$$i_D = I_{DS} \left(\frac{V_{GS}}{V_{GS(th)}} - 1 \right)^2, \text{ 当 } V_{GS} \gg V_{GS(th)} \text{ 下, } i_D \propto V_{GS}^2$$

$$V_{DS}/i_D \approx \text{常数 (电阻)}$$



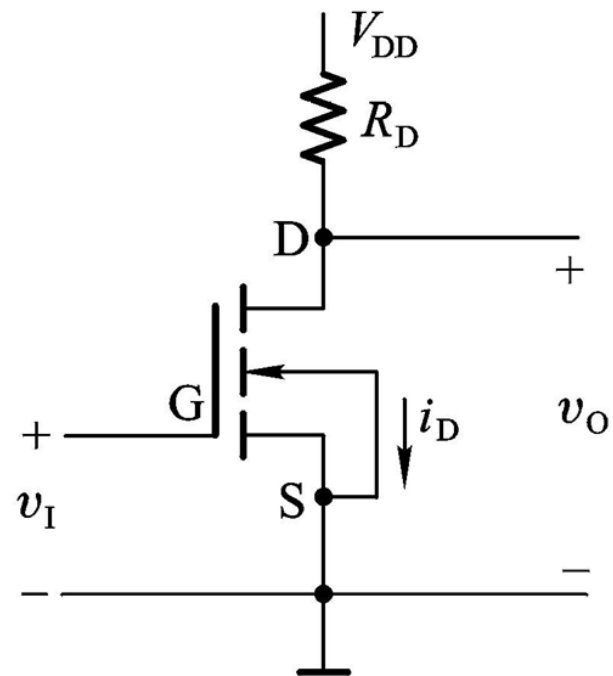
MOS管开关电路 (1)

- 用MOS管代替开关



单开关电路

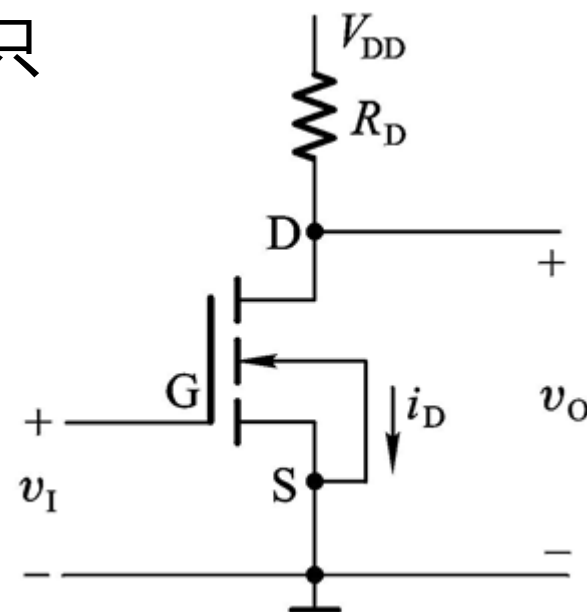
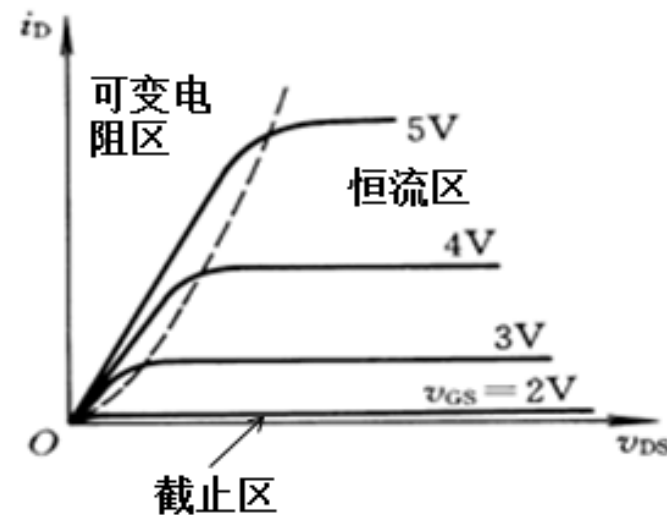
将开关用
MOS管代替



MOS管的基本开关电路

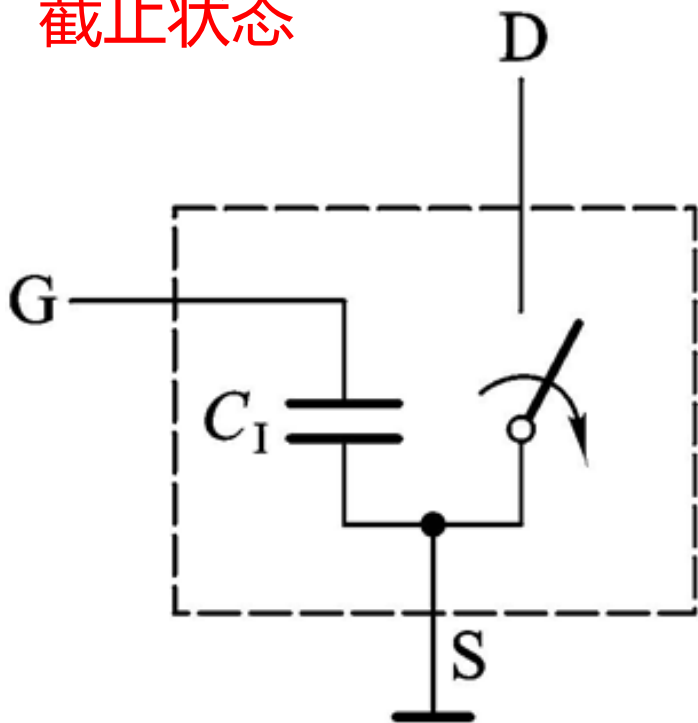
MOS管开关电路 (2)

- 当 $v_I = v_{GS} < V_{GS(th)}$ 时, MOS管工作在截止区。只要 $R_D \ll R_{OFF}$, 输出端即为高电平 V_{OH} , 且 $V_{OH} \approx V_{DD}$ 。MOS管的D-S间相当于一个断开的开关
- 当 $v_I > V_{GS(th)}$ 时, 并且 v_{DS} 较高的情况下, MOS管工作在恒流区。 $v_I \uparrow, i_D \uparrow, v_O \downarrow$ 。这时电路工作在放大状态
- 当 v_I 继续升高时, MOS管的导通内阻 R_{ON} 变得很小。只要 $R_D \gg R_{ON}$, 则输出端将为低电平 V_{OL} , 且 $V_{OL} \approx 0$ 。MOS管的D-S间相当于一个闭合的开关
- 只要电路参数 (R_D) 选择得合理, 就可以做到
 - ✓ 输入低电平时MOS管截止, 输出高电平;
 - ✓ 输入高电平时MOS管导通, 输出低电平

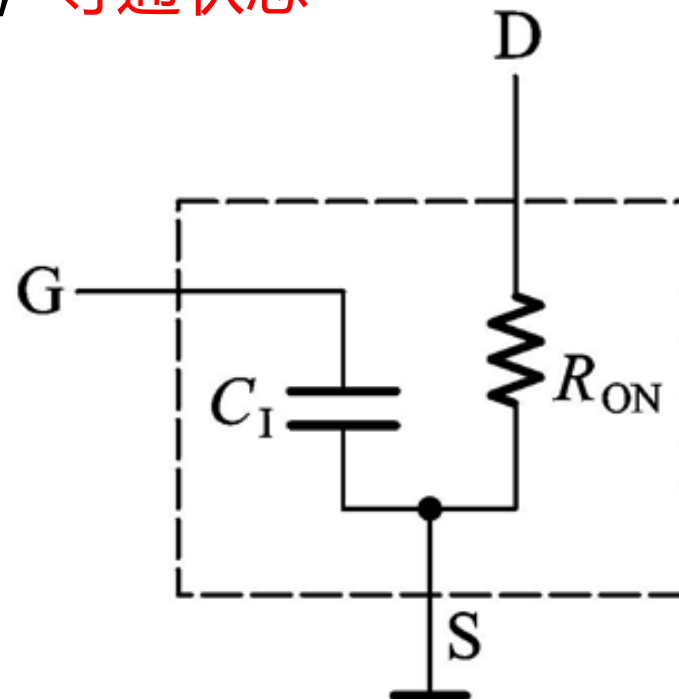


MOS管的开关等效电路

- 当 $v_I = v_{GS} < V_{GS(th)}$ 时, MOS管工作在截止区。只要 $R_D \ll R_{OFF}$, 输出端即为高电平 V_{OH} , 且 $V_{OH} \approx V_{DD}$ 。MOS管的D-S间相当于一个断开的开关, **截止状态**

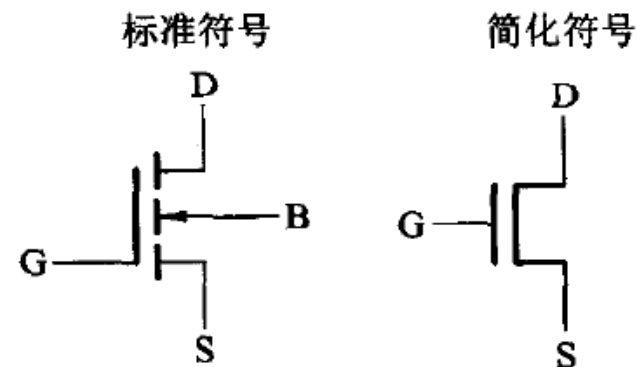
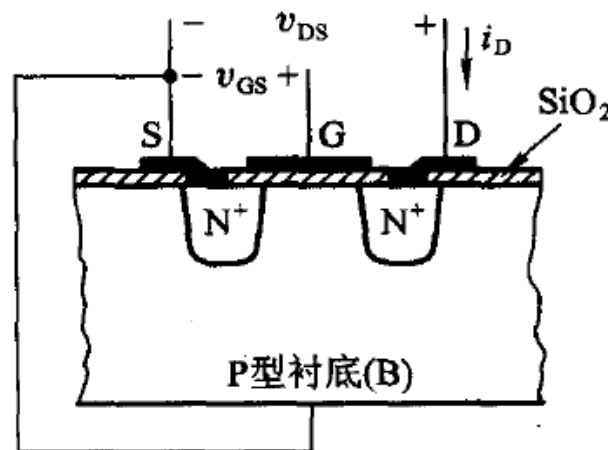


- 当 v_I 升高时, MOS管的导通内阻 R_{ON} 变得很小。只要 $R_D \gg R_{ON}$, 则输出端将为低电平 V_{OL} , 且 $V_{OL} \approx 0$ 。MOS管的D-S间相当于一个闭合的开关, **导通状态**

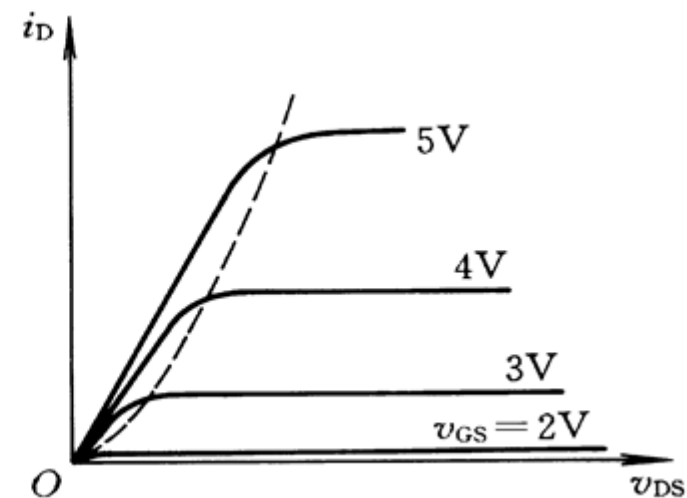
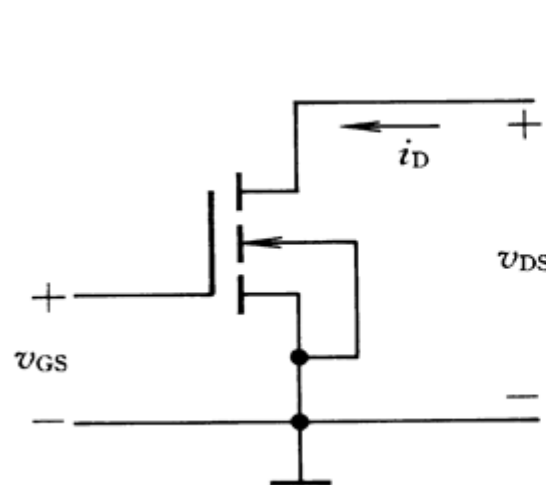


N沟道增强型MOS管

N沟道增强型MOS管
的结构与符号



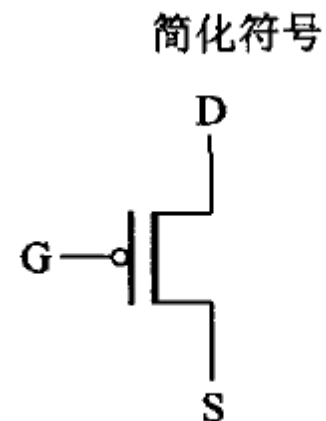
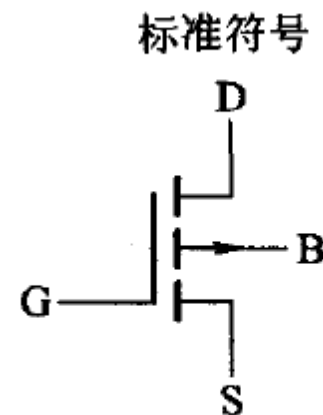
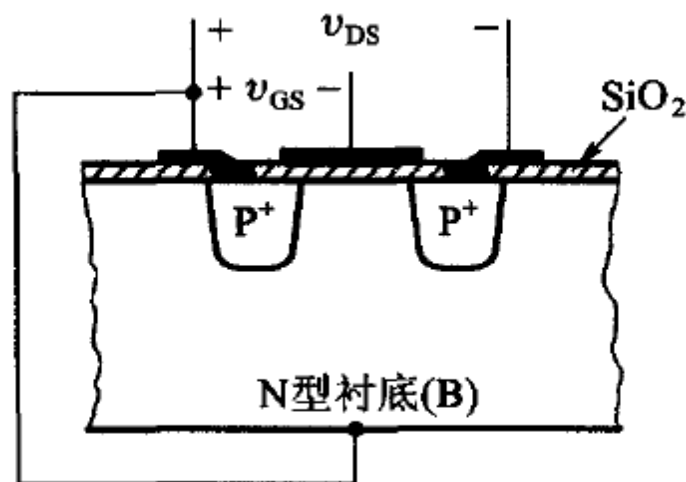
N沟道增强型MOS管
共源极电路和输出特性曲线



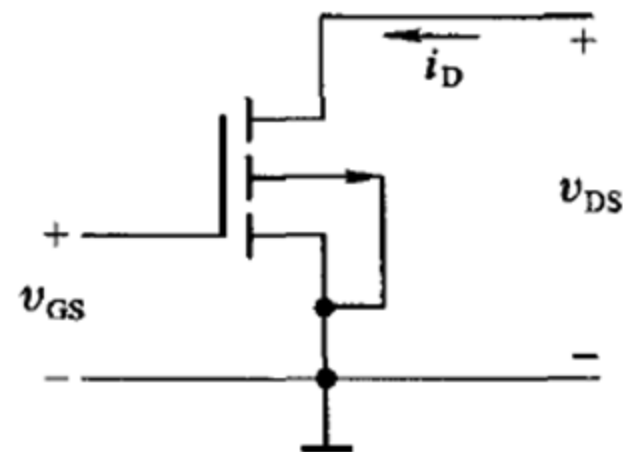
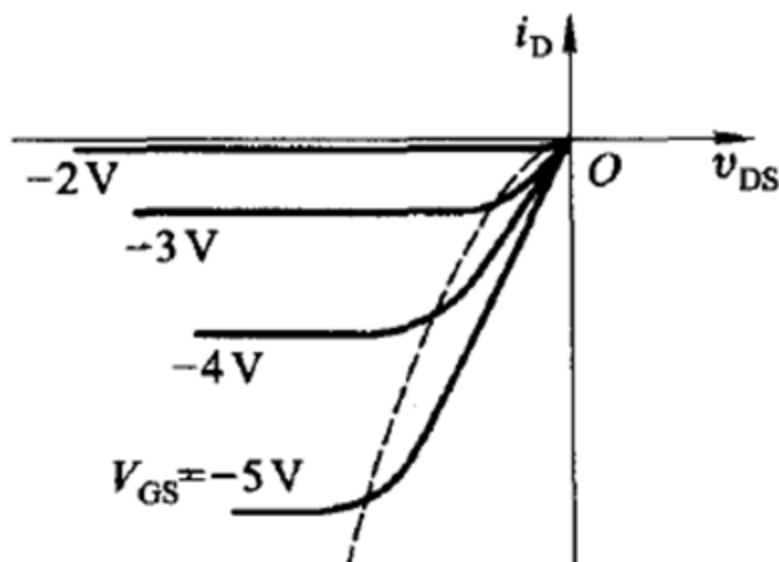
P沟道增强型MOS管

- $V_{GS} = V_G - V_S < 0$
- $V_{DS} = V_D - V_S < 0$

P沟道增强型MOS管的结构与符号



P沟道增强型MOS管的漏极特性



小结

- 采用电压来编码信息
- “数字” 编码
 - 有效的电压值表示 “0” 和 “1”
 - 禁止区消除不确定的 “0” 和 “1” ， 反过来也一样
 - 信号有效性的概念
- 噪声
 - 需要容忍现实情况的变化：噪声
 - 关键方法：相比输入，对输出定义更加严格的电压规范
 - 器件必须具有增益，并且是非线性的
- 组合逻辑器件
 - 每个逻辑族都具备简单的积木式模块
 - 可预测的组合功能特性，部件工作正确，则系统工作正确
 - 静态约束
 - 数字输入输出，保留输入电压噪声容限
 - 完备的功能规范
 - 在有限的时间内，有效的输入产生有效的输出
- PN结具有单向导电性
 - MOS管是理想的电压控制开关，适合制作逻辑器件，进而构成数字系统



问题和建议?

