

板级射频电路开发



第八讲 半导体与晶体管

主讲：汪 朋

QQ: 3180564167

01

半导体

02

二极管原理

03

双极晶体管BJT原理

04

场效应管FET原理

05

晶体管射频电路

Part

1

半导体

晶体管原理

半导体

半导体

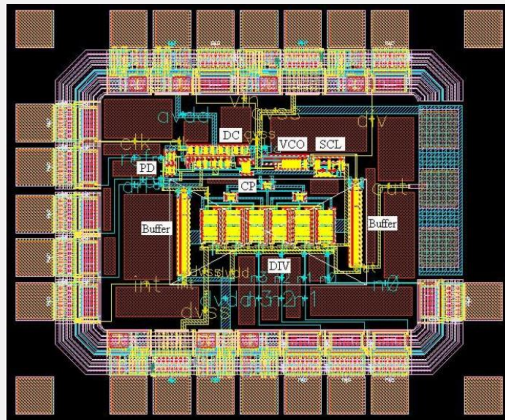
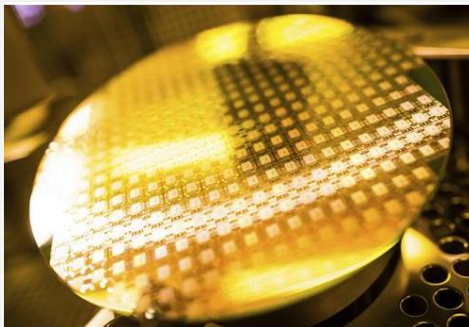
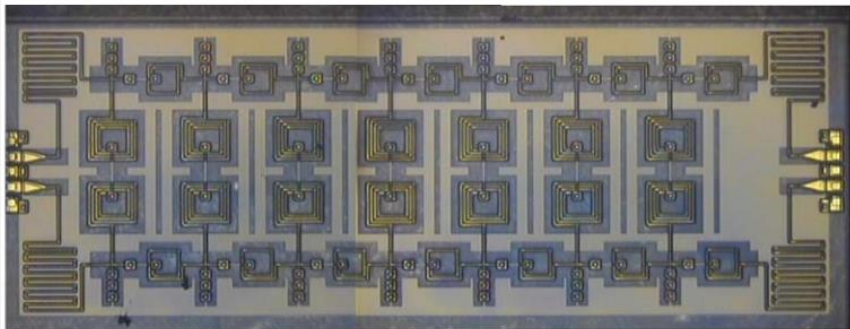
处于导体和绝缘体之间的一种介质，可以在不同条件下表现出导电和不导电的特性；

本征半导体

纯净的半导体，不含杂质，其紧靠本征激发载流子，导电性较差；

非本征半导体

掺杂杂质的半导体介质，主要有N型半导体和P型半导体。



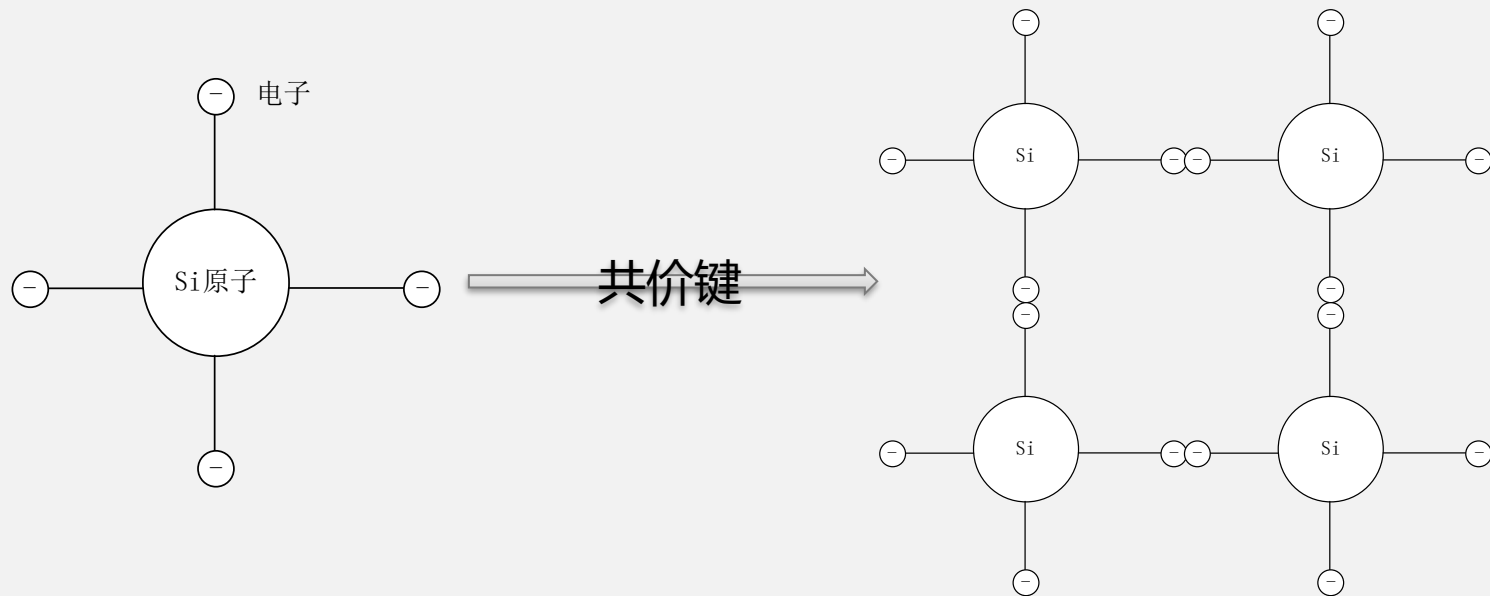
晶体管原理

N型半导体

在本征半导体中掺入+5价元素(P, Sb等)的半导体。

N型半导体的微观原理：

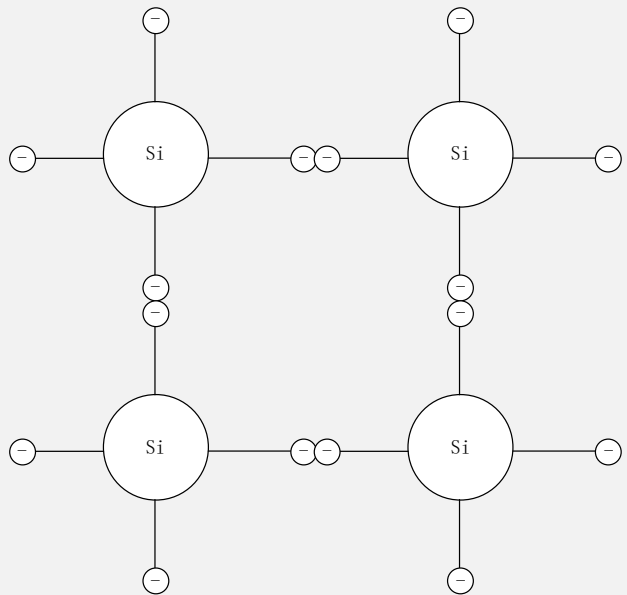
以本征半导体硅Si为例分析



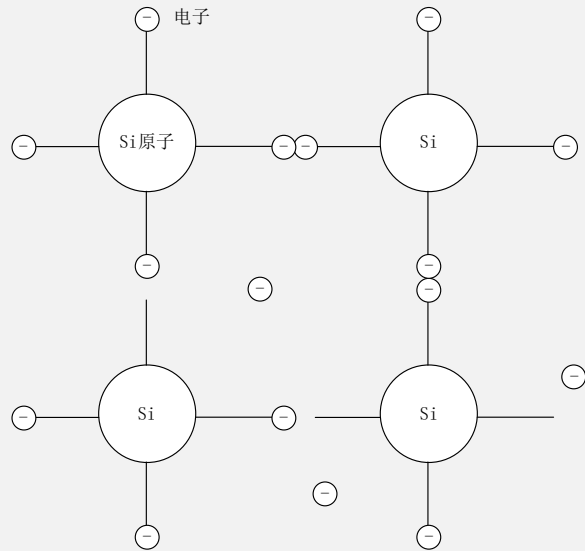
晶体管原理

半导体导体原理

全部硅原子的共价键通电后，电子会吸收部分能量形成自由态，移动的电子形成电流

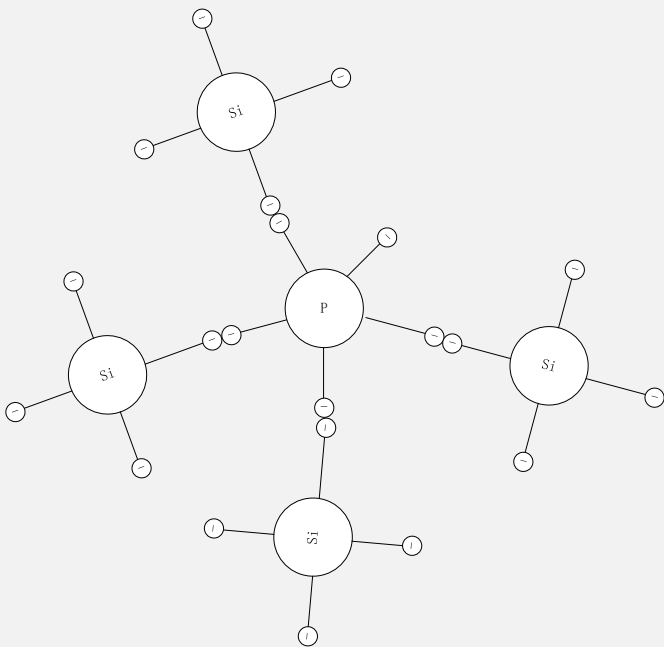


通电



N掺杂

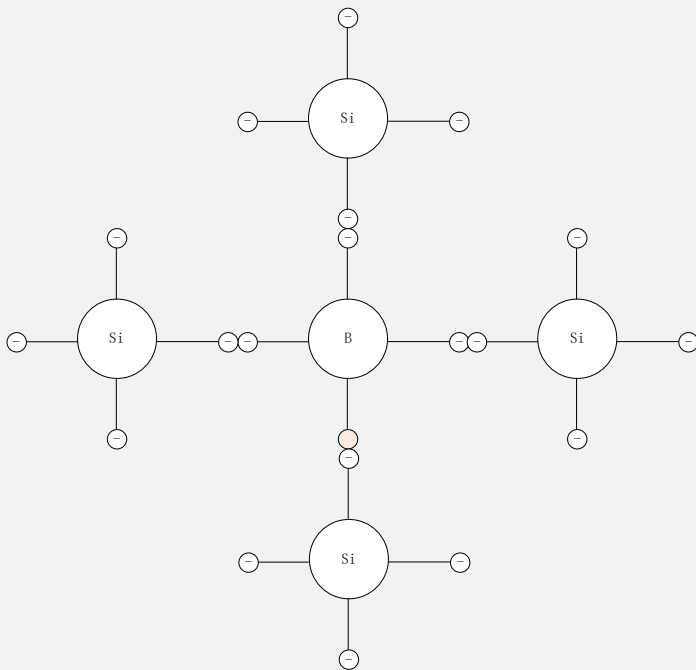
在纯硅的共价键中注入价电子为5的磷等元素，N掺杂将使半导体中多出一个电子，且始终处于自由态。



P型半导体

P掺杂

在纯硅的五价键中注入价电子为3的硼等元素，由于B的价电子数为3，因此其一个手臂上会多出一个空穴，其相邻的电子可以随时移动将这个空穴补上，因此便形成了空穴的位运动。



Part

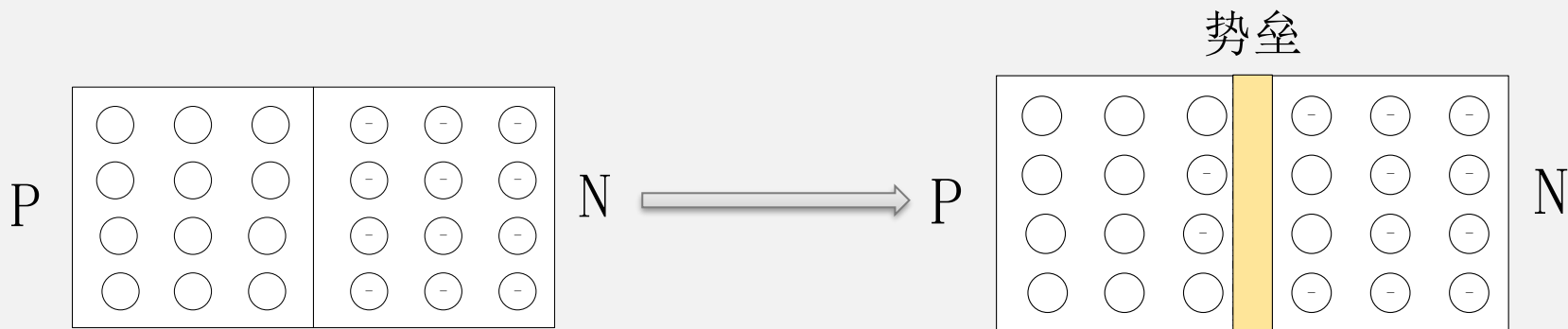
2

二极管微观原理

晶体管原理

二极管原理

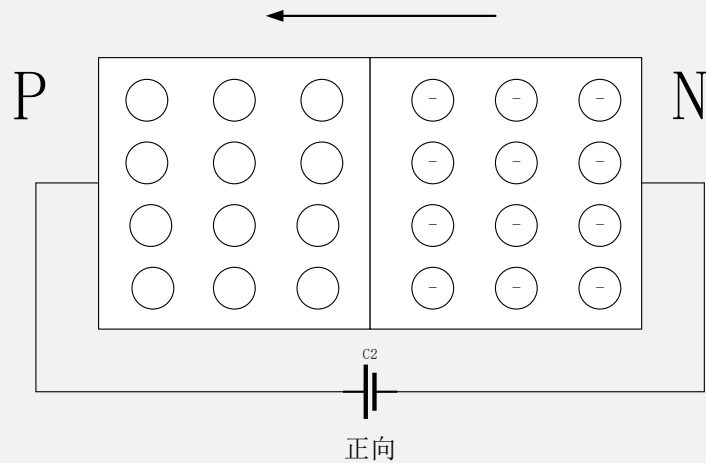
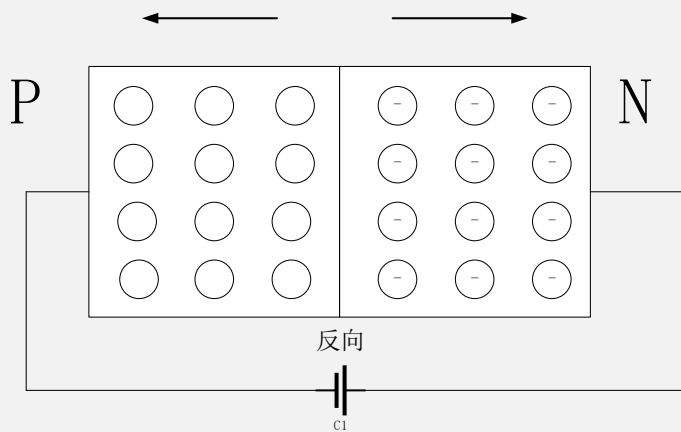
二极管自然状态



晶体管原理

二极管原理

二极管通电状态



Part

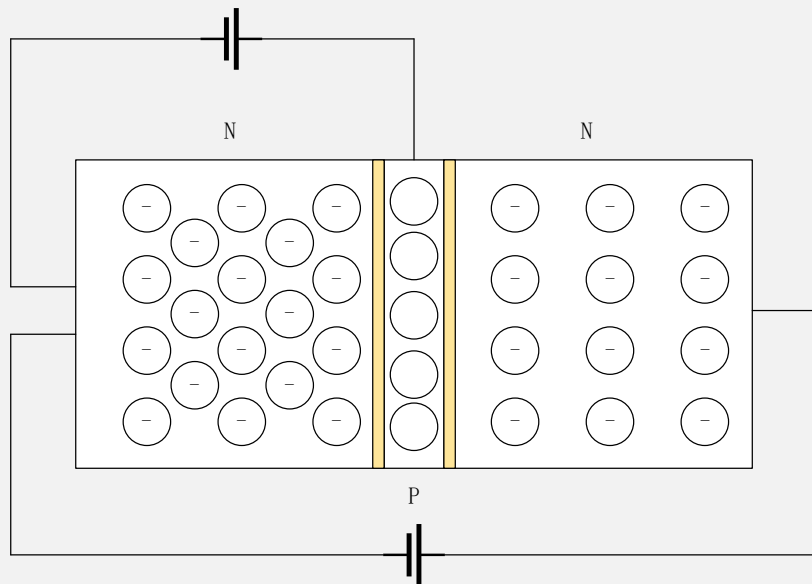
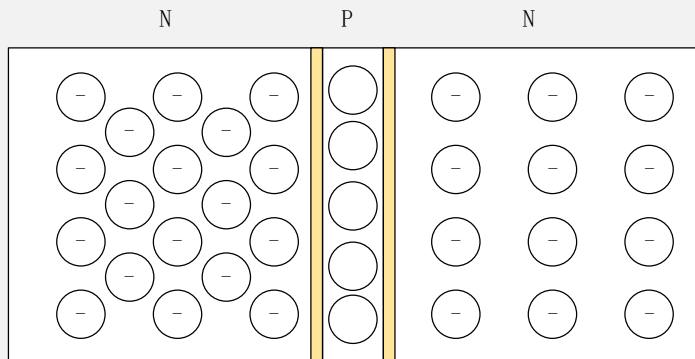
3

三极管BJT微观原理

晶体管原理

BJT原理

NPN三极管原理



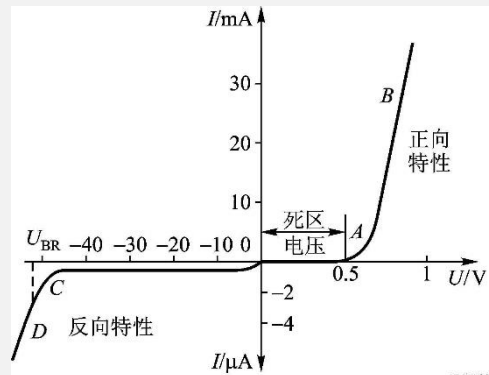
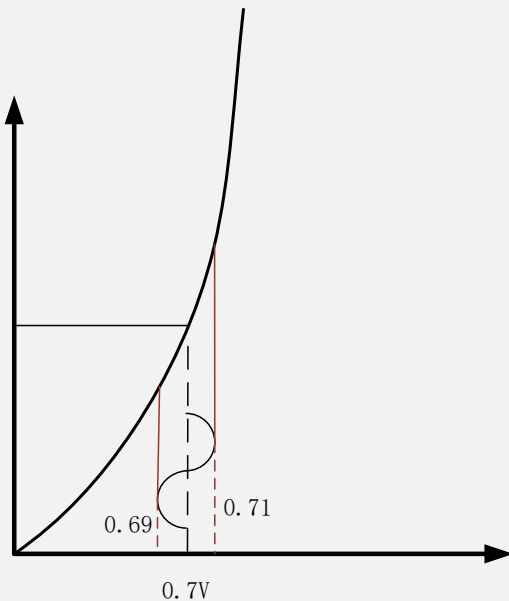
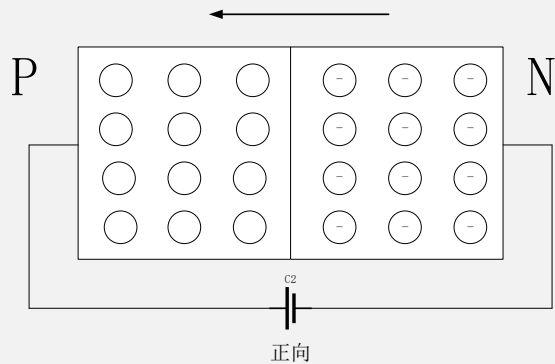
晶体管原理

BJT原理

NPN三极管实现信号放大的原理

二极管电流和电压的关系

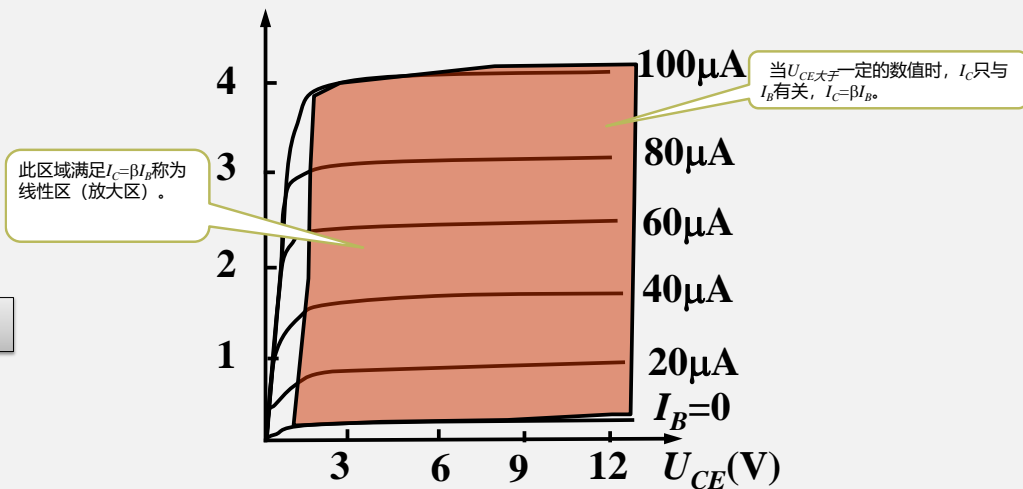
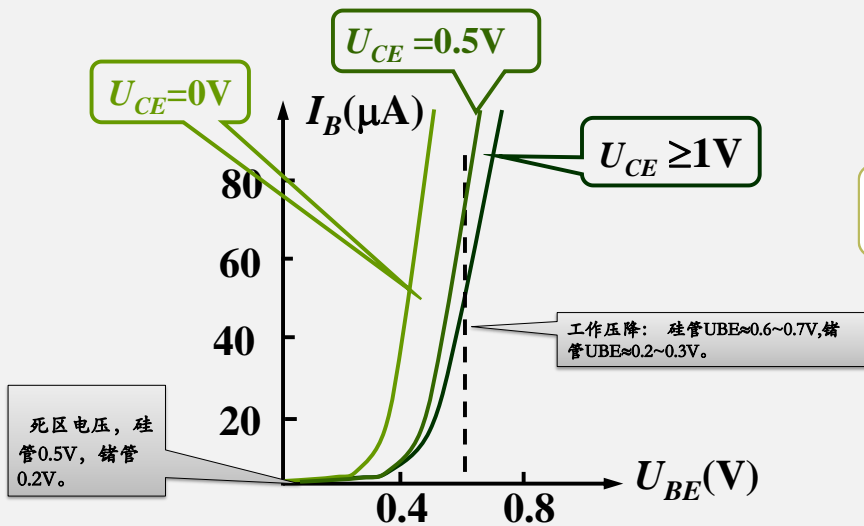
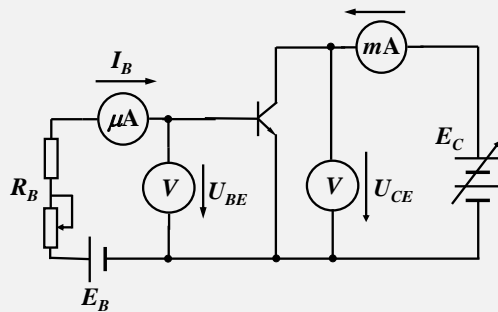
假如在正向施加0.01V的交流信号，正向偏置电压为0.7V



晶体管原理

BJT原理

NPN三极管实现信号放大的原理



晶体管原理

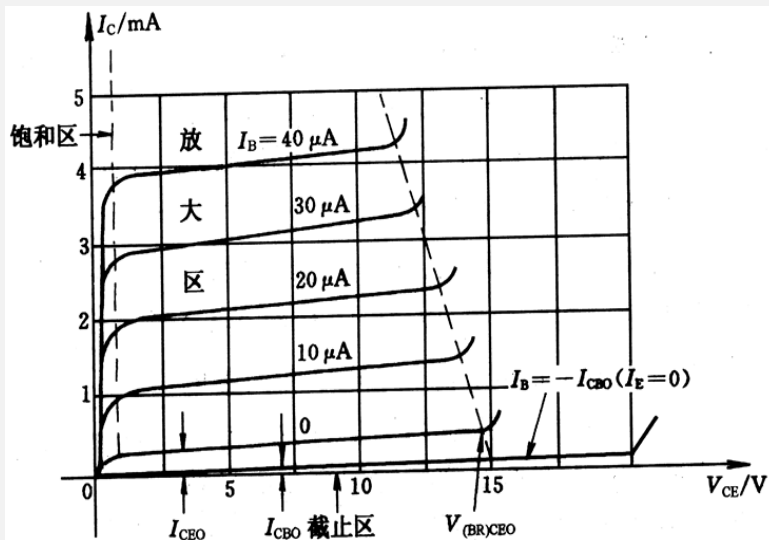
BJT原理

NPN三极管输出伏安特性曲线

放大区：发射结正偏，集电结反偏，即： $I_c = \beta I_b$ ，且 $\Delta I_c = \beta \Delta I_b$;

饱和区：发射结正偏，集电结正偏，即： $U_{ce} < U_{be}$ ， $\beta I_b > I_c$ ， $U_{ce} \approx 0.3V$

截止区： $U_{be} < \text{死区电压}$ ， $I_b = 0$ ， $I_c = I_{ce} \approx 0$

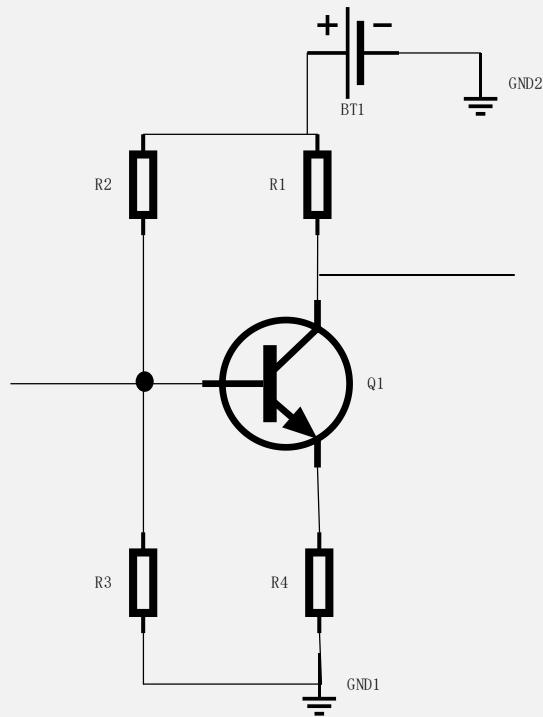
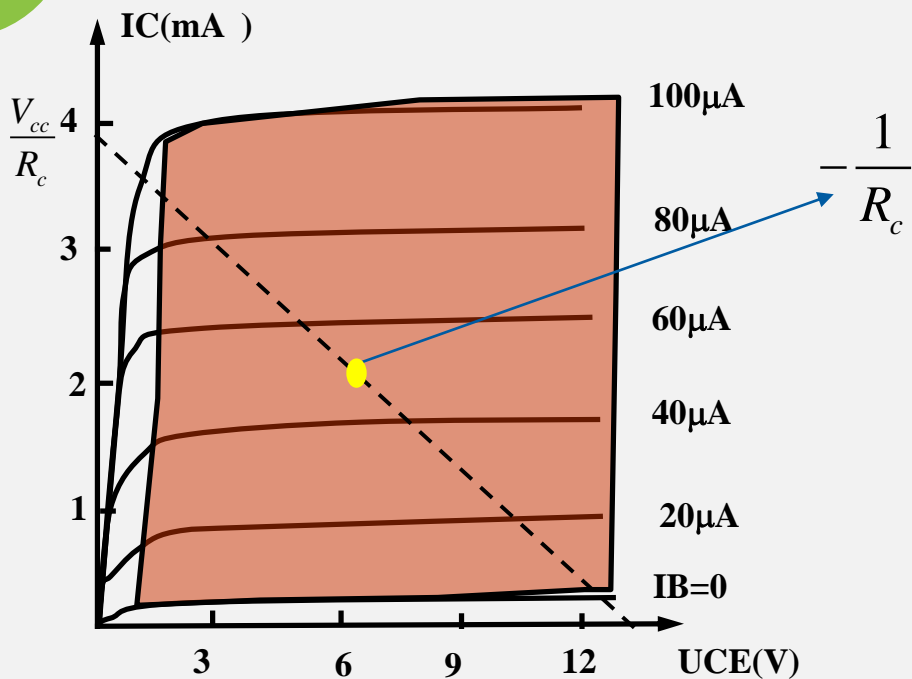


晶体管原理

BJT原理

静态工作点

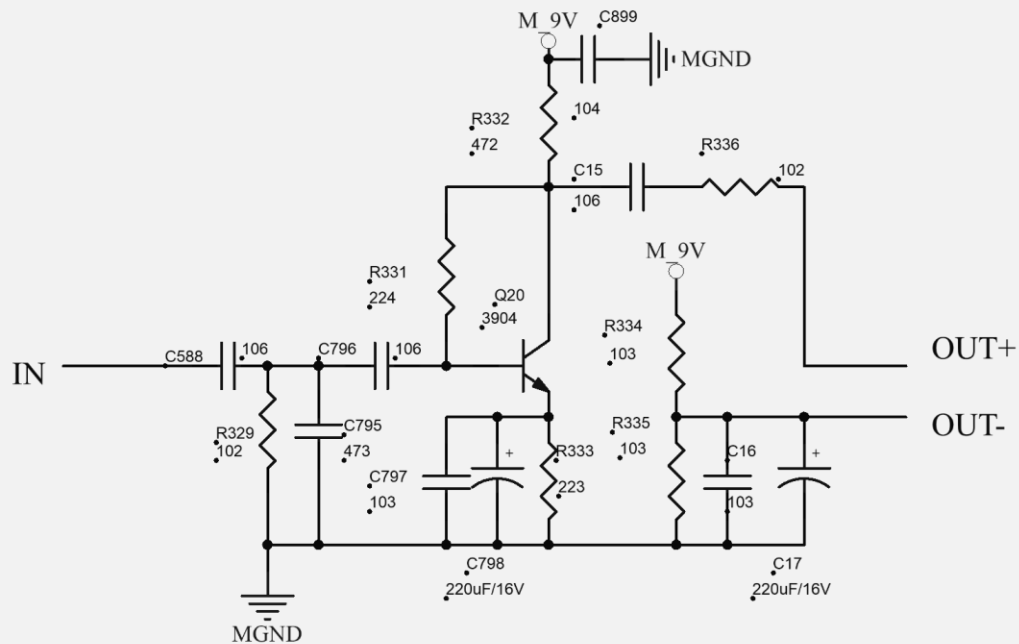
确定放大电路的电压和电流的静态值，选取合适的静态工作点可以防止电路产生非线性失真。



晶体管原理

BJT原理

应用电路



Part

4

场效应管微观原理

场效应管和三极管

[1] 三极管通过电流的大小控制输出，输入要消耗功率。场效应管是通过输入电压控制输出，不消耗功率；

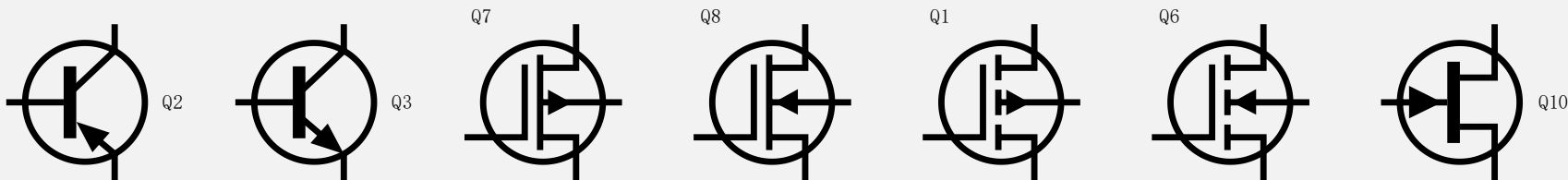
[2] 场效应管的优点

微观上只有一种载流子运动，输入电阻高、噪声小、功耗低、没有二次击穿现象、安全工作区域宽、受温度和辐射影响小。

[3] 场效应管类型

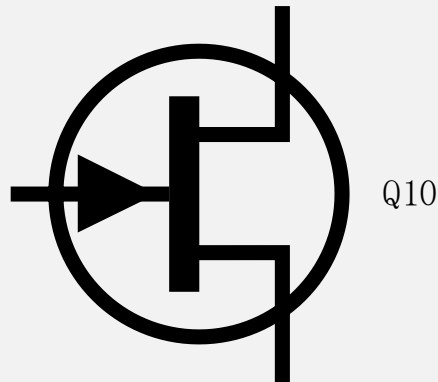
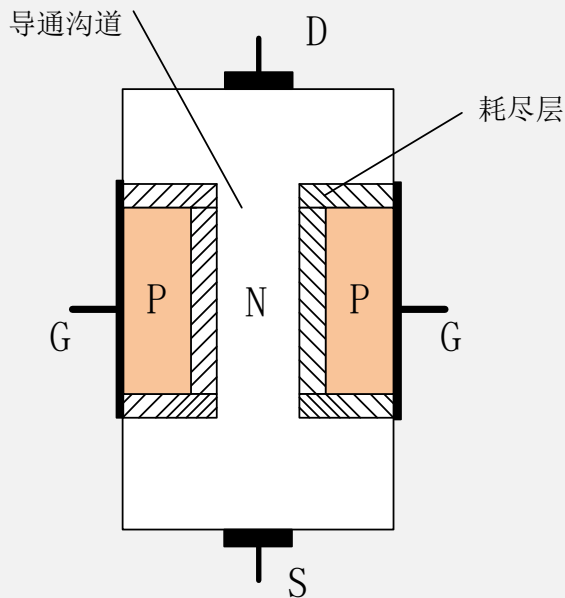
N沟道耗尽型和增强型，P沟道耗尽型和增强型

耗尽型原理：导通沟道从有到无的控制；增强型原理：导通沟道从无到有的控制。



耗尽型JFET

N沟道结型场效应管(JFET)的结构如图，它是在N型半导体硅片的两侧各制造一个PN结，形成两个PN结夹着一个N型沟道的结构。两个P区连接在一起为栅极G，N型硅的一端是漏极D，另一端是源极S。



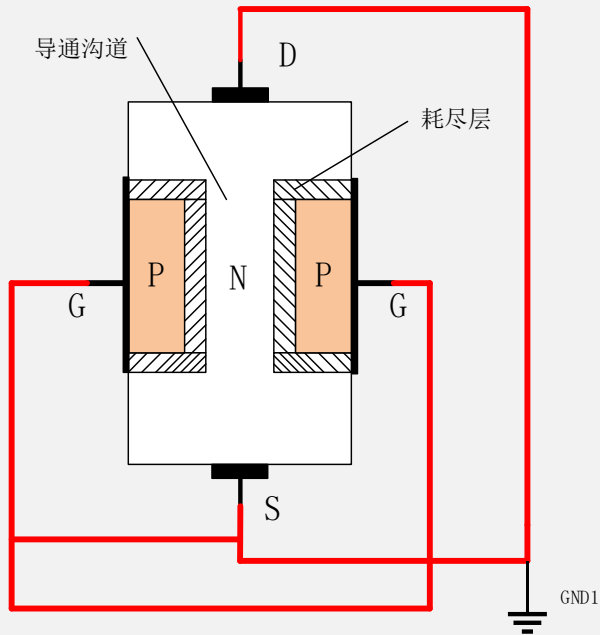
晶体管原理

JFET

耗尽型N沟道JFET原理

[1] 耗尽型N沟道JFET的导通沟道是客观存在的，可以通过在GS增加负电压控制导通通道的大小，导通通道的大小控制DS的电流大小；

当 $U_{GS}=0$ ，导通通道最宽，此时在 $U_{DS}\neq 0$ 时， I_{DS} 最大。



晶体管原理

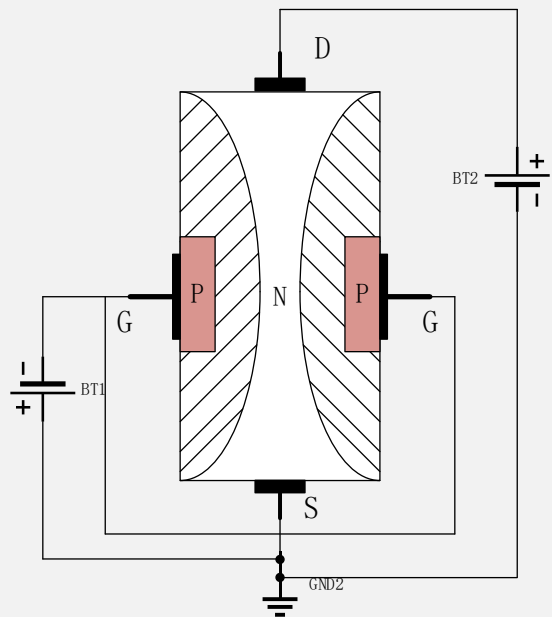
JFET

耗尽型N沟道JFET原理

栅极-源极电压的影响

在 U_{GS} 增加负电压后，PN结耗尽层变宽，N导电沟道变窄，如果继续加大负电压，导电沟道将逐渐消失。

使导电沟道刚刚消失的临界电压 U_{GS} 成为夹断电压 $U_{GS(off)}$ 。



晶体管原理

JFET

耗尽型N沟道JFET原理

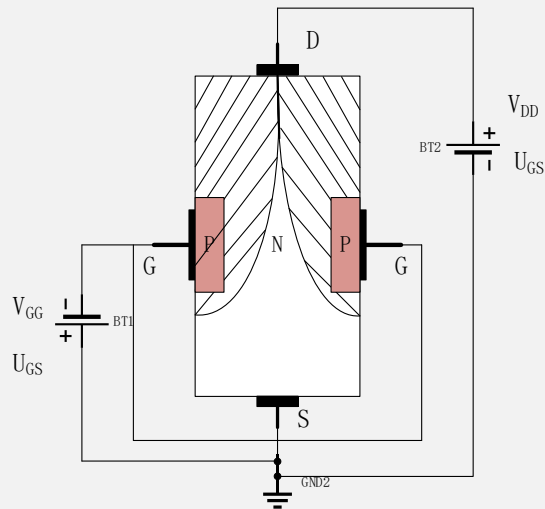
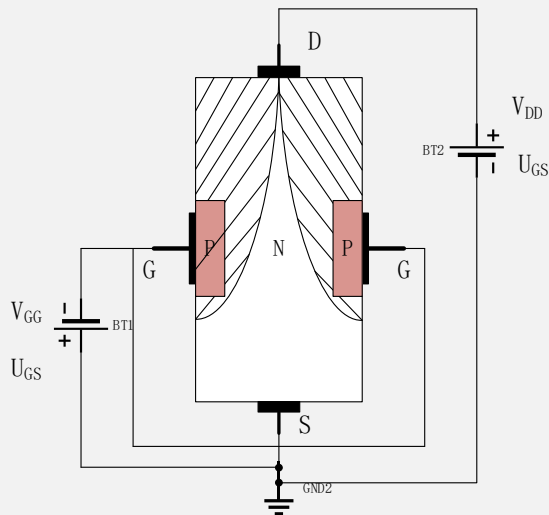
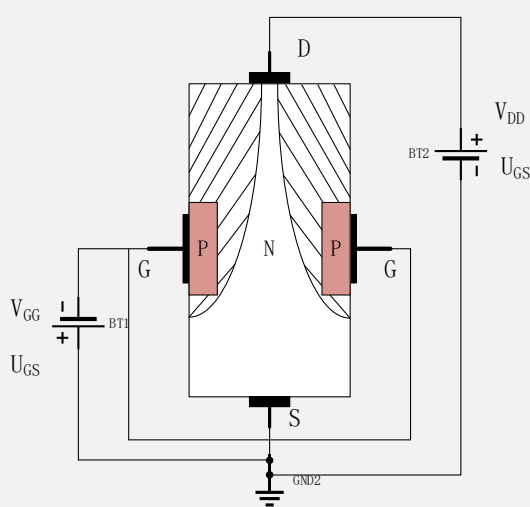
漏源电压 U_{DS} 对漏极电流 I_D 的影响

[1] $U_{GD} = V_{GG} - V_{DD}$, 若 $U_{GD} > U_{GS(off)}$, 如果 $U_{GS} > U_{GS(off)}$, 且 $U_{GS(off)}$ 恒定, 则 V_{DD} 增加时, I_D 增加;

[2] 如果 $U_{GD} = U_{GS(off)}$, 沟道处于预夹断;

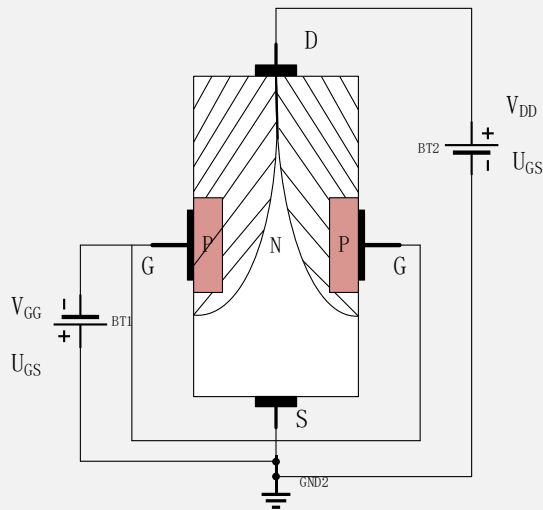
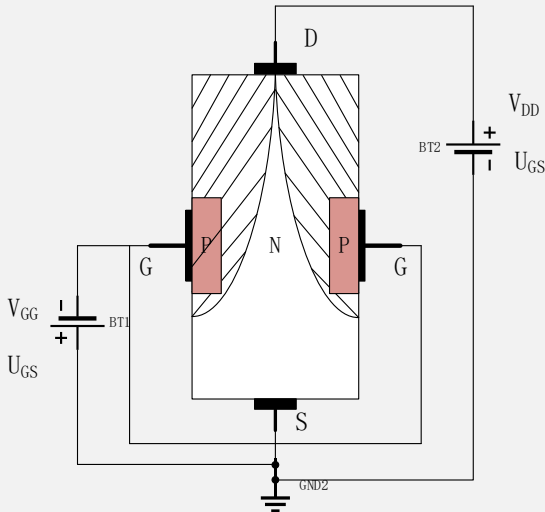
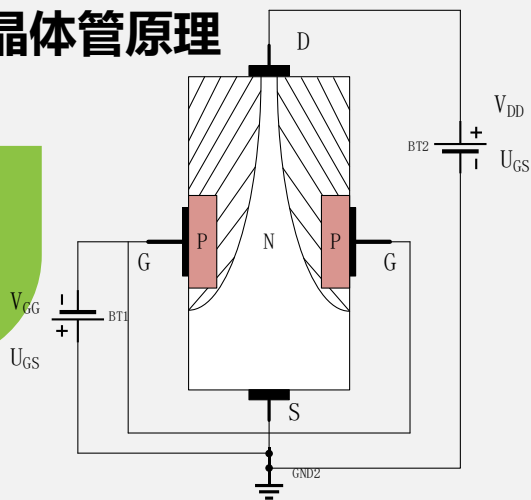
[3] 如果 $U_{GD} < U_{GS(off)}$, 则预夹断区域变长, 电子运动的阻力增加;

此状态下, I_D 将保持恒定。



晶体管原理

JFET



总结: [1] 沟道的大小受到 U_{GS} 和 U_{DS} 的影响;

[2] 沟道内的电流是否阻断只受 U_{GS} 的影响, 当 $U_{GS} < U_{off}$ 时, 沟道彻底阻断, 此时再无电流通过, $I_D = 0$;

[3] 只要 $U_{GS} > U_{off}$, 那么都不会完全阻断, 此时增加 U_{DS} 不会导致沟道阻断, 始终有电流可以通过;

[4] $U_{GS} - U_{DS} < U_{off}$, 只要确保 $U_{GS} > U_{off}$, 那么此时沟道到达电流饱和状态, 处于恒定, 不再受电压 U_{DS} 的影响,

耗尽型N沟道JFET原理

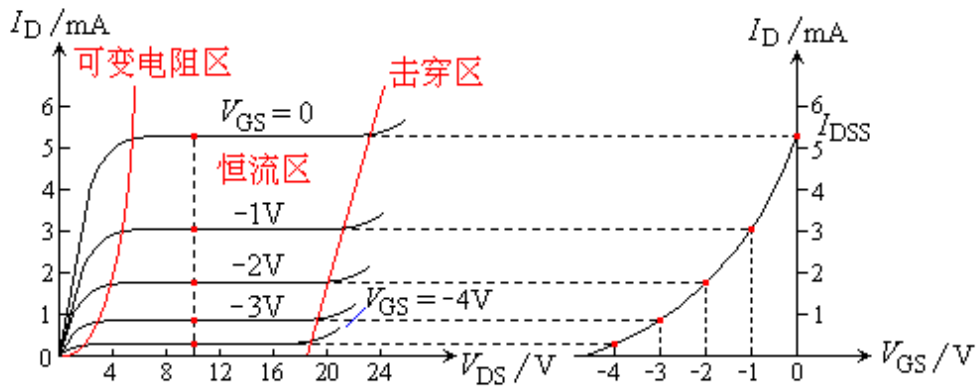
场效应三极管的特性曲线有两条，一是转移特性曲线，二是输出特性曲线。

[1] 输出特性分成可变电阻区（线性区）、恒流区（饱和区）和夹断区。

$$i_D = f(u_{DS}) \quad U_{GS} = \text{常数}$$

[2] 转移特性曲线

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

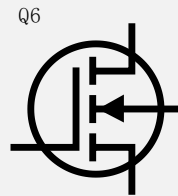
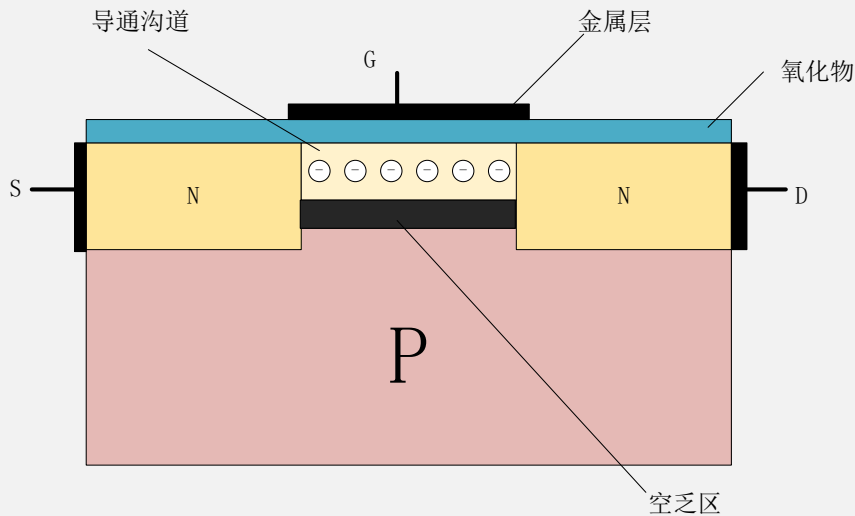
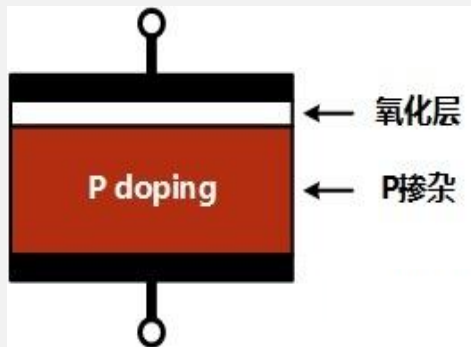


晶体管原理

MOSFET

MOSFET全称Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor，即金属氧化物半导体场效应晶体管；

相对于JFET，MOSFET增加了一个氧化物绝缘体，因此可以获得较大的输入阻抗，且 U_{GS} 的电压可以大于0，MOSFET可以用于V波段，U波段以上的频段，但相对于JFET而言，MOSFET自身的噪声更大。

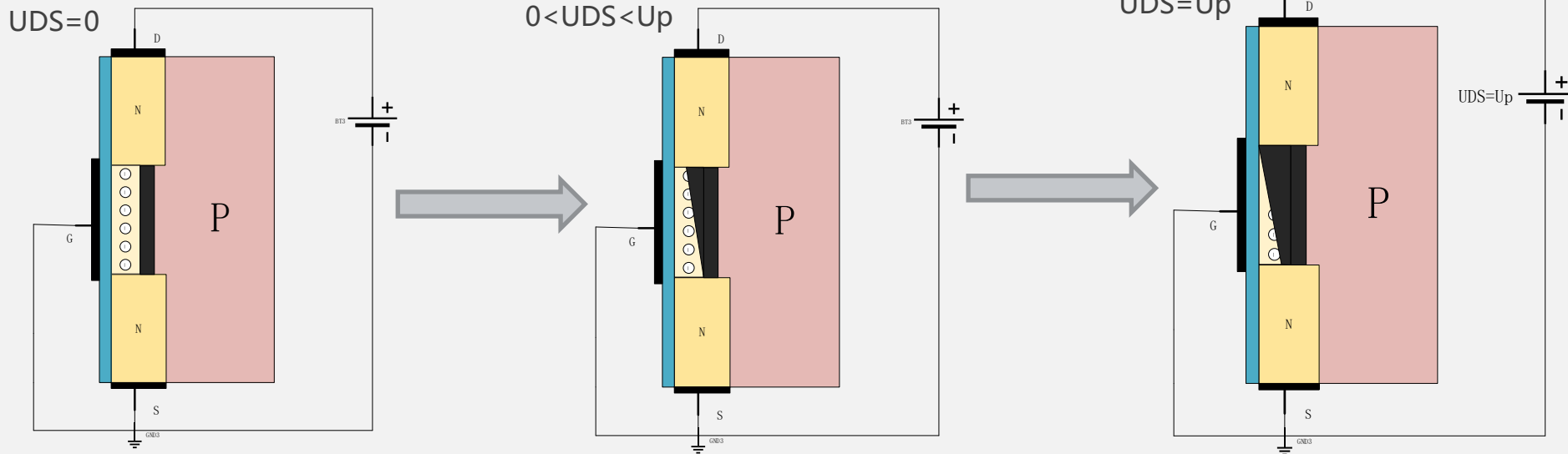


晶体管原理

MOSFET

耗尽型MOSFET工作原理

当 $U_{GS}=0$ 时，随着 U_{DS} 的增加，导电通道逐渐变窄，当 $U_{DS}=U_p$ (夹止电压)，通电沟道处于预夹断状态，此时 I_{DS} 达到了最大值，此时继续增加 U_{DS} ， I_{DS} 仍保持不变。

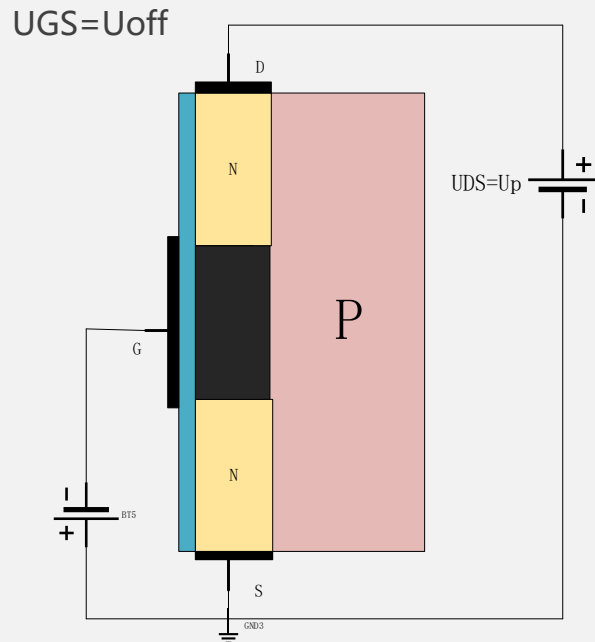
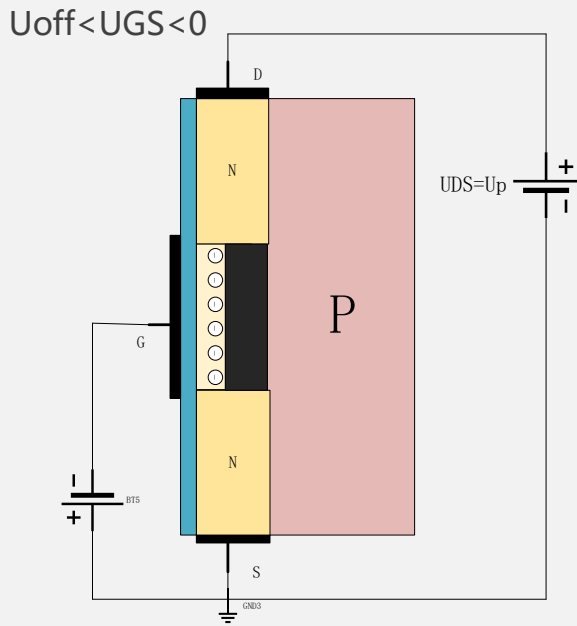
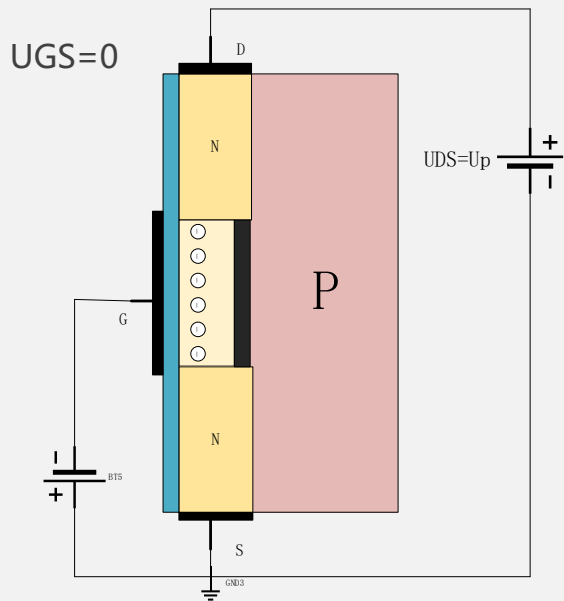


晶体管原理

MOSFET

耗尽型MOSFET工作原理

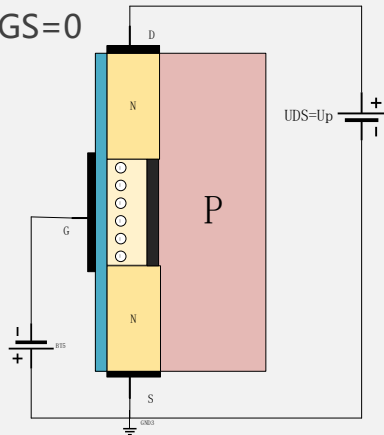
当 $U_{GS} < 0$ 时，随着 U_{GS} 的降低，导电通道逐渐变窄，当 $U_{GS} = U_{(off)}$ ，通电沟道关闭，此时 $I_{DS} = 0$



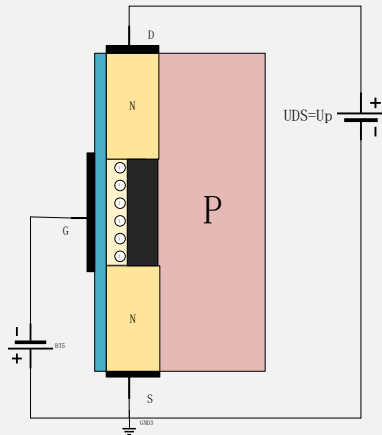
晶体管原理

MOSFET

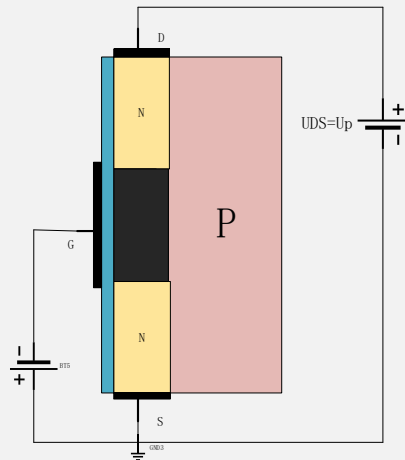
$$U_{GS}=0$$



$$U_{off} < U_{GS} < 0$$



$$U_{GS} = U_{off}$$



总结：

[1] 导通通道完全关闭有 U_{GS} 控制，当 $U_{GS} < U_{off}$ ，通断关闭，此时没有电流可以通过， $I_{DS} = 0$ ；

[2] 当 $U_{GS} > U_{off}$ ，通道是打开的，此时电流 I_D 的大小受 U_{DS} 控制，

但是 I_D 的不会无限增加，当 $U_{DS} = U_p$ 时，通道处于预夹断状态，此时电流值 I_D 进入恒定，不再受 U_{DS} 的影响；

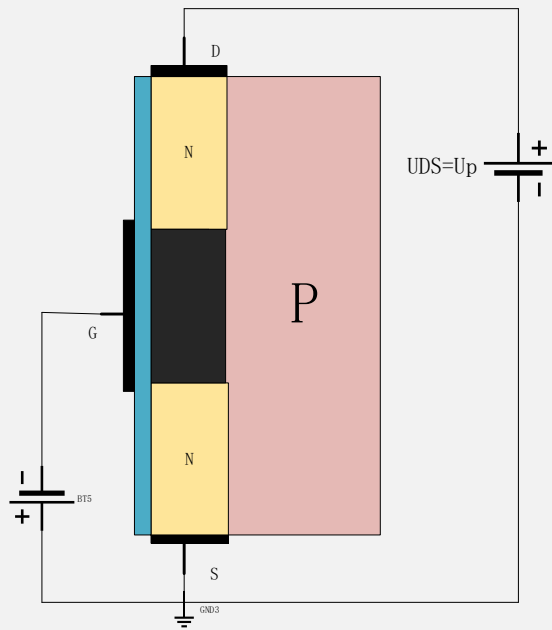
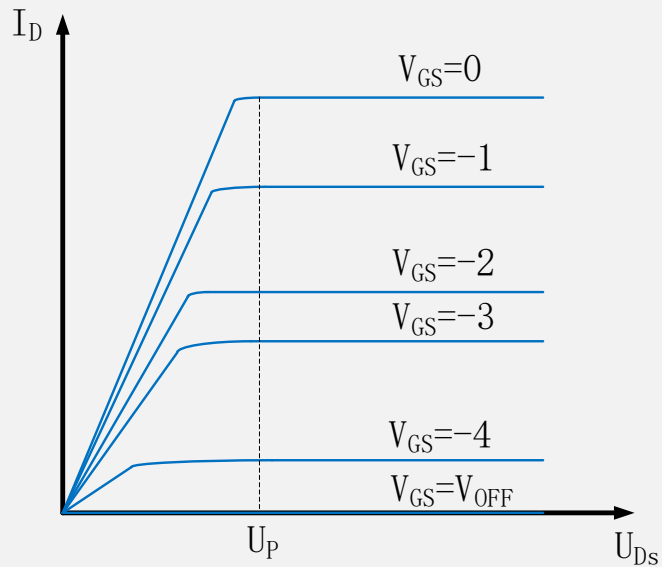
[3] U_{DS} 和 U_{GS} 是相互独立，二者共同影响电流 I_D 的大小，但： U_{GS} 越小， U_{DS} 对应的夹止电压 U_p 就越低，也就是说， U_{GS} 越小，随着 U_{DS} 的增加，越快进入恒流区。

说明：

只要 $U_{GS} > U_{off}$ ，通道内就有电压通过。

$U_{GS} < U_{off}$ 对应的通过关闭和 $U_{DS} = U_p$ 对应的预夹断状态不一样的。

耗尽型MOSFET伏安特性曲线

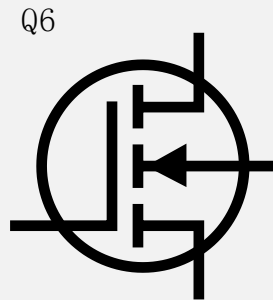
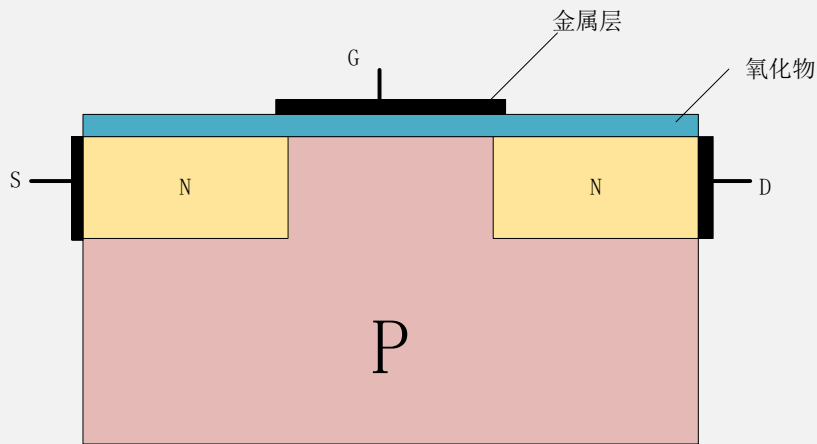


晶体管原理

MOSFET

增强型MOSFET工作原理

增强型MOSFET默认状态下不存在导通通道，需要通过栅极的电压进行控制，使形成导通通道。



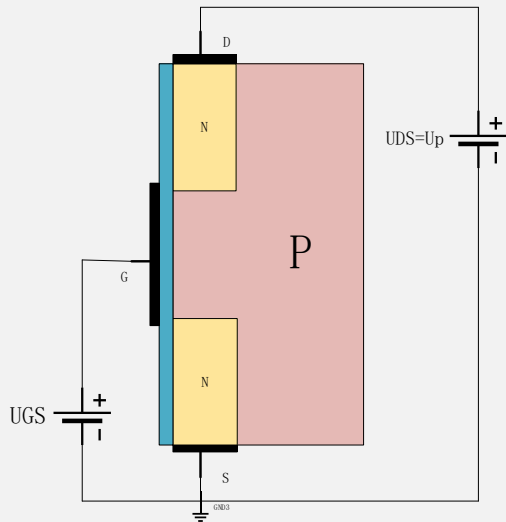
晶体管原理

MOSFET

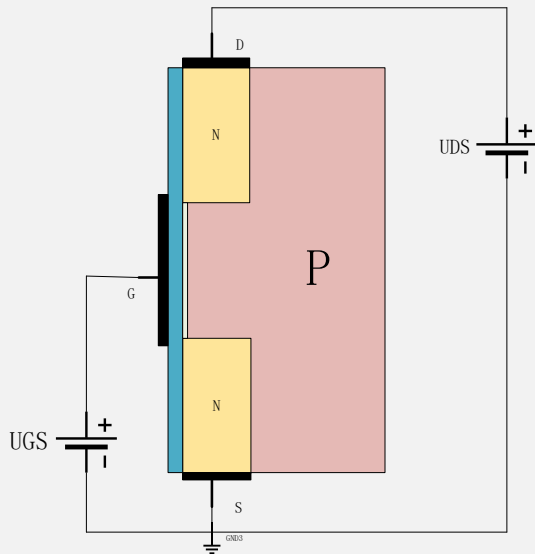
增强型MOSFET通道产生方法

当 $U_{DS}=0$ 时，在栅极和源极施加正电压，当电压值 $U_{GS}>U_t$ (阈值电压)时，逐渐形成导通通道

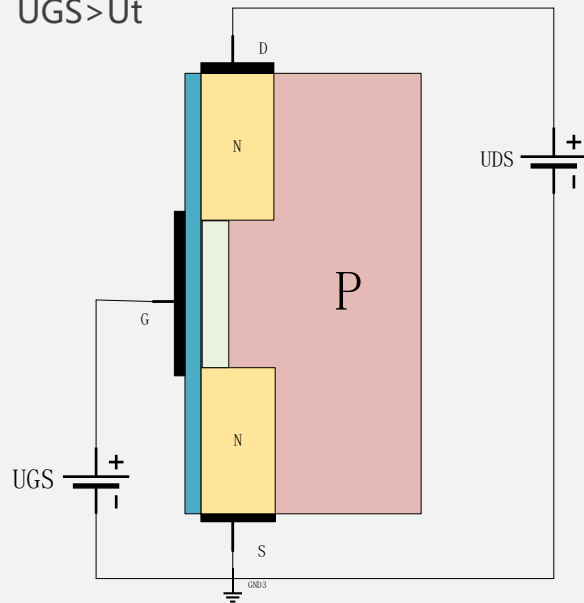
$U_{GS} < U_t$



$U_{GS} = U_t$



$U_{GS} > U_t$



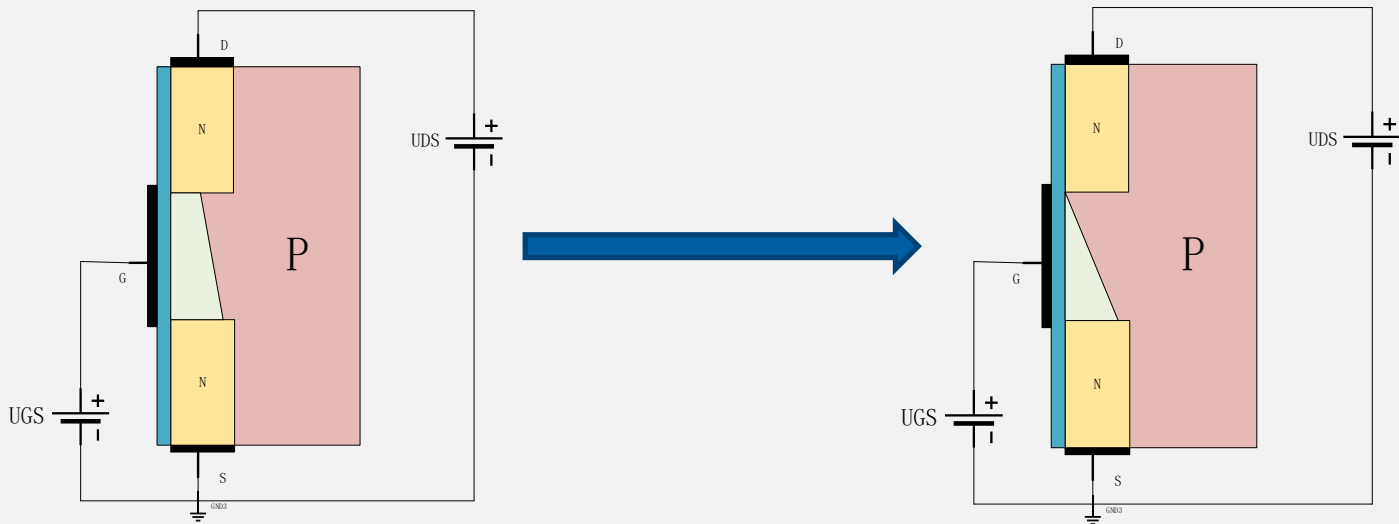
晶体管原理

MOSFET

增强型MOSFET通道产生方法

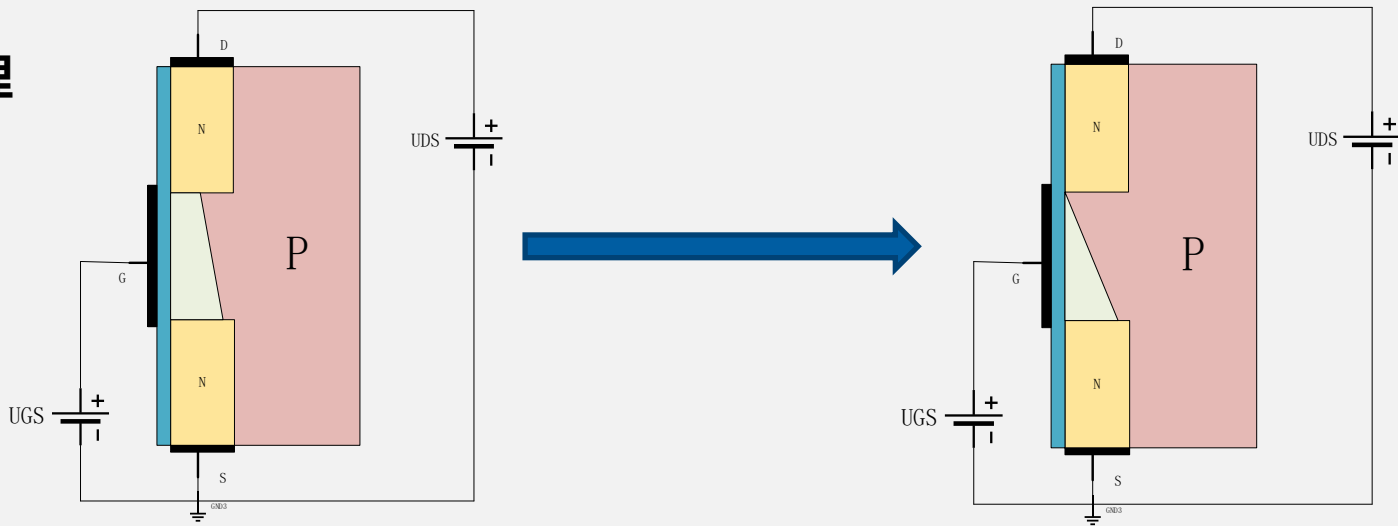
当 $U_{DS} > 0$ 时，在栅极和源极施加正电压，当电压值 $U_{GS} > U_t$ (阈值电压)时，导通通道将受到 U_{DS} 和 U_{GS} 的共同影响，主要由栅极金属到沟道的电场强度影响。

当 U_{GS} 为大于 U_t 的恒定值，随着 U_{DS} 的增大，沟道会由于电场的不均匀(G极金属到沟道的电势差)的影响，沟道在D极会进入临界，此时电流 I_D 达到最大值，继续增加 U_{DS} ， I_D 保持稳定，MOSFET进入饱和状态。



晶体管原理

MOSFET



总结:

[1] 导通通道是由 U_{GS} 的电压控制的, $U_{GS} > U_t$ 时, 开始产生通道, D和S导通;

[2] U_{DS} 能够控制沟道宽度的前提是, 必须先要有 U_{GS} 控制产生通道以后, 因为 U_{DS} 控制通道的方式是将沟道由宽到窄进行控制, 因此得现有沟道;

[3] 当 U_{DS} 逐渐增加时, 沟道会慢慢进入预夹断状态, 此时对应的 U_{DS} 的值就为夹止电压 U_p , 从此时开始, 电流 I_{DS} 将保持恒定, 不再受 U_{DS} 的影响

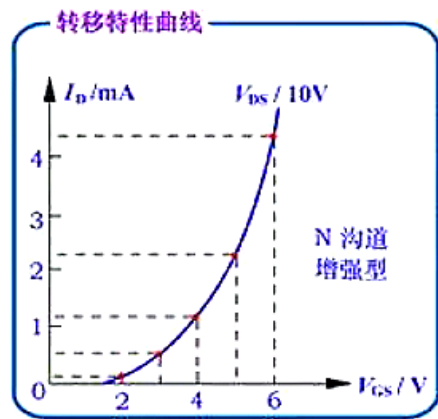
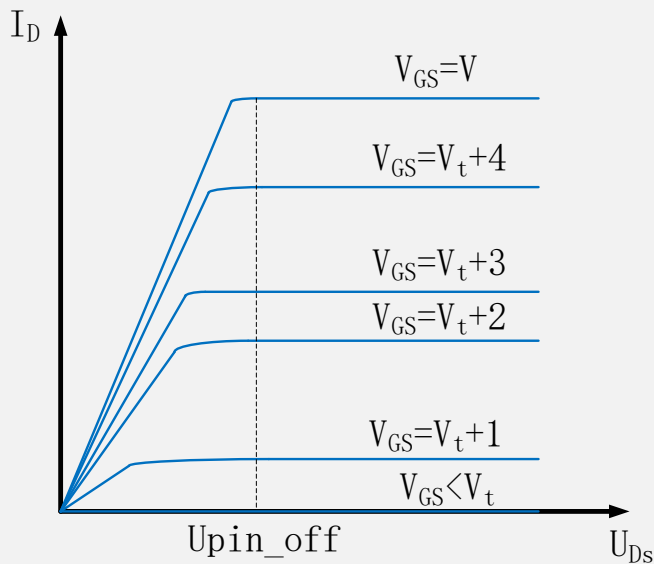
晶体管原理

MOSFET

增强型MOSFET伏安特性曲线

当 $U_{DS} > 0$ 时，在栅极和源极施加正电压，当电压值 $U_{GS} > U_t$ (阈值电压)时，导通通道将受到 U_{DS} 和 U_{GS} 的共同影响，主要由栅极金属到沟道的电场强度影响。

当 U_{GS} 为大于 U_t 的恒定值，随着 U_{DS} 的增大，沟道会由于电场的不均匀(G极金属到沟道的电势差)的影响，沟道在D极会进入临界，此时电流 I_D 达到最大值，继续增加 U_{DS} ， I_D 保持稳定，MOSFET进入饱和状态。



Part


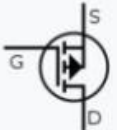


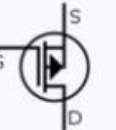
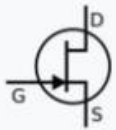
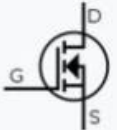

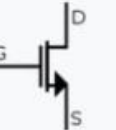
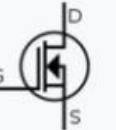
5

晶体管应用电路

晶体管原理

应用电路

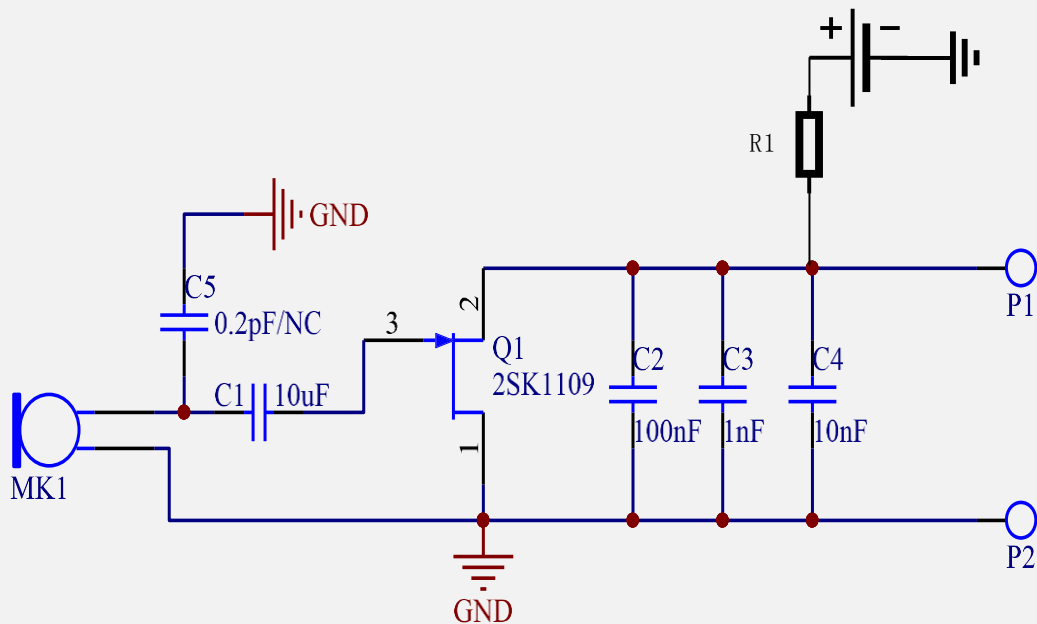
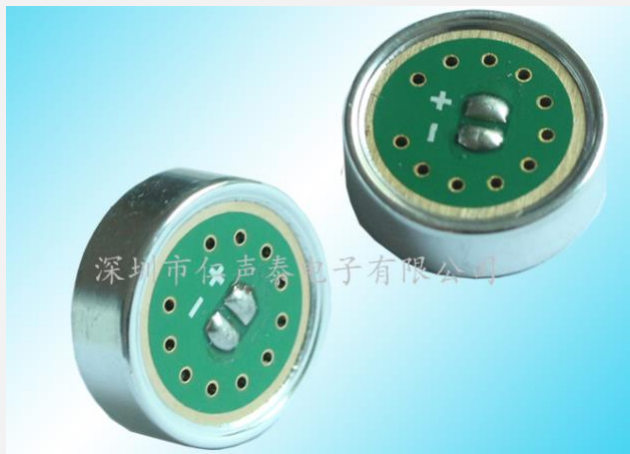
晶体管原理图符号

P-channel					
N-channel					
	JFET	MOSFET enh.	MOSFET enh. (no bulk)		MOSFET dep.

晶体管原理

应用电路

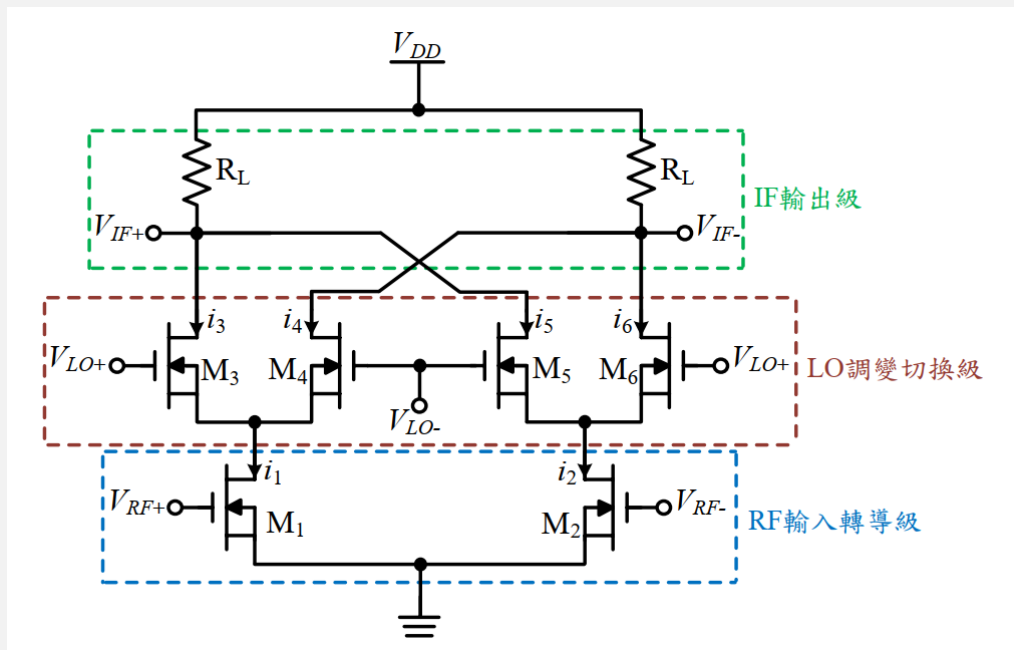
咪头音频内置放大器



晶体管原理

应用电路

混频器应用





THANK YOU !!