

* 3.3 场效晶体管放大器

图 3.3.1 所示为另一种能够进行电信号放大的半导体器件——场效晶体管。场效晶体管仅依靠半导体中的多子实现导电，故又称为单极型晶体管。图 3.3.1 所示的场效晶体管

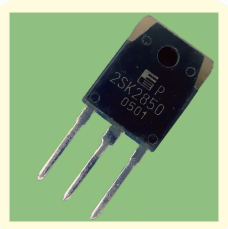


图 3.3.1 场效晶体管实物

从外形上来看与三极管非常相似，也有三个引脚：漏极（D）、源极（S）、栅极（G），分别对应于三极管的集电极（c）、发射极（e）和基极（b）。大功率的场效晶体管通常是铁壳或是带散热片的。

与三极管不同的是，场效晶体管是利用电压控制电流大小的放大器件，称为电压控制器件。场效晶体管因其输入阻抗高、噪声低、热稳定性好、功耗低及制造工艺简单等优点，被广泛应用于各种放大电路、数字电路中，尤其适合大规模集成电路。

根据结构和工作原理的不同，场效晶体管分为绝缘栅型和结型两大类。

3.3.1 绝缘栅型场效晶体管

绝缘栅型场效晶体管分为增强型和耗尽型两类，各类又有 P 沟道和 N 沟道两种。下面以 N 沟道为例，介绍绝缘栅型场效晶体管。

一、结构与符号

图 3.3.2 所示的 N 沟道绝缘栅型场效晶体管是在一块低掺杂的 P 型硅片上，通过扩散工艺形成两个相距很近的高掺杂 N^+ 型区，分别作为漏极 D 和源极 S，在两个 N^+ 型区之间硅片表面上有一层很薄的二氧化硅绝缘层，使两个 N^+ 型区隔绝，在绝缘层上面引出一个金属电极即为栅极 G。因此栅极与其他电极之间是绝缘的，故输入电阻很高。

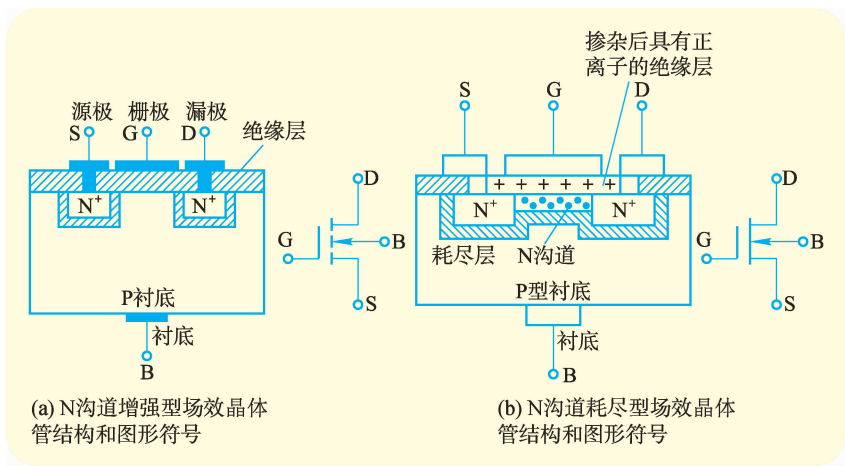


图 3.3.2 N 沟道绝缘栅型场效晶体管的结构和图形符号



由于该类场效晶体管的栅极和其他电极及硅片之间是绝缘的，故称为绝缘栅型场效晶体管，或称金属-氧化物-半导体场效晶体管，简称 MOS 管。

如果在制造 MOS 管时，在 SiO_2 绝缘层中掺入大量正离子，这种 MOS 管称为耗尽型 MOS 管，如图 3.3.2 (b) 所示。而图 3.3.2 (a) 所示 MOS 管称为增强型 MOS 管。

图 3.3.2 中的图形符号是 N 沟道绝缘栅型场效晶体管的图形符号。其中漏、源极之间用虚线表示增强型，实线则表示耗尽型；从衬底基片上引出的一个电极，称为衬底电极 B（在分立元件中，常将 B 与源极 S 相连，而在集成电路中，B 与 S 一般不相连），衬底 B 箭头指向管内表示衬底是 P 型半导体（箭头仍然表示 P 区到 N 区的电流方向），即 N 沟道型，反之，则为 P 沟道型。

二、N 沟道增强型场效晶体管的特性曲线

场效晶体管的特性可以通过转移特性曲线和输出特性曲线来描述。图 3.3.3 所示为 N 沟道增强型场效晶体管特性曲线。

1. 转移特性曲线

图 3.3.3 (a) 所示的 N 沟道增强型场效晶体管转移特性曲线是指在 U_{DS} 一定的情况下，漏极电流 i_{D} 与栅源电压 u_{GS} 之间的关系曲线。

从图中可以看出，栅极没有外加电压，即 $u_{\text{GS}} = 0$ 时，源、漏极之间不会有电流流过， $i_{\text{D}} = 0$ ，此时场效晶体管处于截止状态。

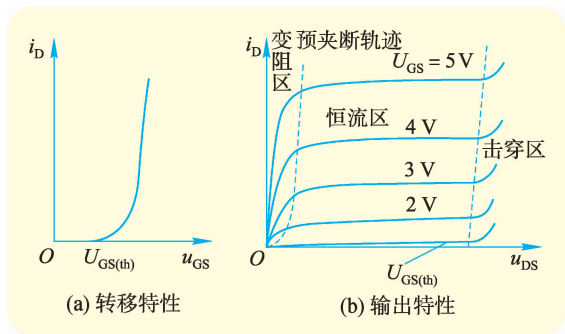


图 3.3.3 N 沟道增强型场效晶体管特性曲线

当有一个正电压加到 N 沟道增强型场效晶体管的栅极，即 $u_{\text{GS}} > U_{\text{GS(th)}}$ 时，在两个 N^+ 型区之间产生了一个导电沟道（相当于架了一座桥梁），使源极和漏极之间导通，从而形成电流 i_{D} 。 u_{GS} 越大，导电沟道越宽，沟道电阻越小， i_{D} 也就越大。

2. 输出特性曲线

图 3.3.3 (b) 所示的 N 沟道增强型场效晶体管输出特性曲线是指 U_{GS} 一定的情况下，漏极电流 i_{D} 与栅源电压 u_{DS} 之间的关系曲线。根据场效晶体管的工作状态，可将输出特性曲线分为三个区域。

(1) 变阻区 变阻区是漏源电压较小、曲线族上升的区域。在该区域，漏极电流 i_{D} 随漏源电压 u_{DS} 增加而急剧上升。

(2) 恒流区 在恒流区内，漏极电流 i_{D} 几乎不随漏源电压 u_{DS} 变化而变化，但 i_{D} 随栅源电压 U_{GS} 增加而增大，所以，该区域又称为放大区。

(3) 击穿区 随着漏源电压 u_{DS} 的增大，场效晶体管内的 PN 结被击穿， i_{D} 突然加大，则管子进入击穿区，在该区域，管子将被损坏。

总之， u_{DS} 使导电沟道变得不等宽， u_{GS} 改变了沟道的宽度，所以在一定的 u_{DS} 的情况下，改变 U_{GS} 的大小，就可控制 i_{D} 的大小。

三、N 沟道耗尽型场效晶体管特性曲线

N 沟道耗尽型场效晶体管特性曲线如图 3.3.4 所示，其输出特性曲线也可分为变阻区、恒流区和击穿区。

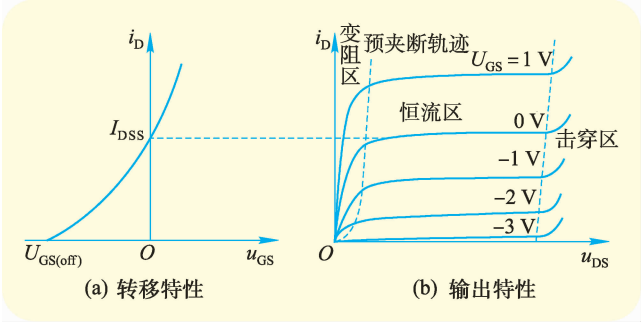


图 3.3.4 N 沟道耗尽型场效晶体管特性曲线

由恒流区的转移特性曲线可知，在 $u_{GS} = 0$ 时， $i_D = I_{DSS}$ ；随着 u_{GS} 减小， i_D 也减小，当 $u_{GS} = U_{GS(off)}$ 时， $i_D \approx 0$ ；当 $u_{GS} > 0$ 时， $i_D > I_{DSS}$ 。

3.3.2 结型场效晶体管

结型场效晶体管是一种利用耗尽层宽度改变导电沟道的宽窄来控制漏极电流大小的器件，也可分为 N 沟道和 P 沟道两种。下面以 N 沟道为例，介绍结型场效晶体管。

一、结构和符号

图 3.3.5 (a) 所示的 N 沟道结型场效晶体管是在 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。P 区为栅极 G，N 型硅的一端是漏极 D，另一端是源极 S。图 3.3.5 (b) 所示的图形符号中，箭头的方向表示栅结正偏时栅极电流的方向。

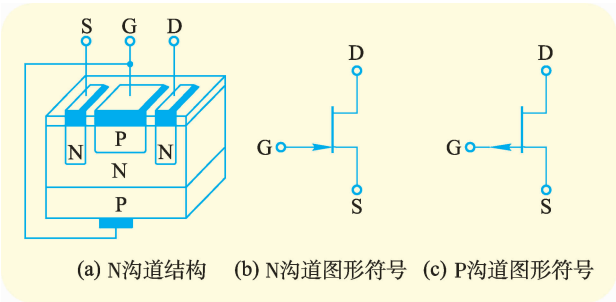


图 3.3.5 结型场效晶体管

如果在 P 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 P 型沟道，则所得的管子称为 P 沟道结型场效晶体管，其图形符号如图 3.3.5 (c) 所示。

二、N 沟道结型场效晶体管特性曲线

N 沟道结型场效晶体管特性曲线如图 3.3.6 所示。

1. 转移特性曲线

从图 3.3.6 (a) 所示的 N 沟道结型场效晶体管转移特性曲线上可以看出，N 沟道结



型场效晶体管正常工作时, 栅、源极之间所加电压为负电压, 即 $u_{GS} \leq 0$ 。

$u_{GS} = 0$ 时的漏极电流为漏极饱和电流 I_{DSS} 。随着 u_{GS} 从零向负值变化, 漏极电流 i_D 逐渐减小, 直到 $i_D = 0$ 时, 此时所对应的 u_{GS} 称为夹断电压 $U_{GS(off)}$, 这时, 管子处于截止状态。

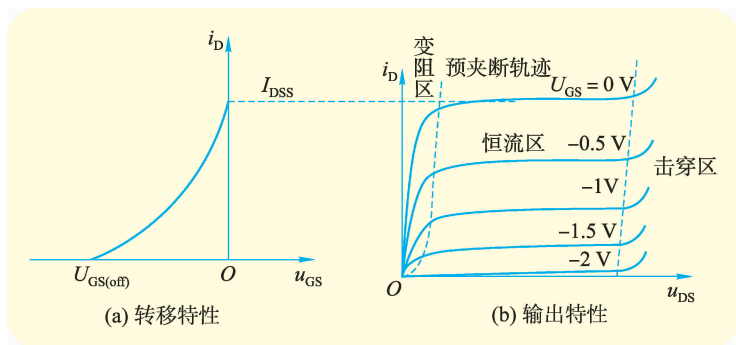


图 3.3.6 N 沟道结型场效晶体管特性曲线

2. 输出特性曲线

图 3.3.6 (b) 所示是 N 沟道结型场效晶体管输出特性曲线, 它也可分成变阻区、恒流区和击穿区, 三个区域的含义与绝缘栅型场效晶体管相同。

三、结型场效晶体管的检测

1. 引脚排列

场效晶体管引脚排列位置依其品种、型号及功能的不同而异。大功率管子从左至右其引脚排列基本是 G、D、S。

2. 检测

万用表置于 $R \times 1 \text{ k}$ 电阻挡, 任选两电极, 分别测出它们之间的正、反向电阻。若正、反向电阻值相等 (约几千欧), 则该两极为漏极 D 和源极 S, 余下的则为栅极。



应用拓展

场效晶体管使用注意事项

(1) 结型场效晶体管的栅源电压不能接反, 可以在开路状态下保存, 而绝缘栅型场效晶体管在不使用时, 由于它的输入电阻非常高, 需将各电极短路, 以免外电场作用而使管子损坏。

(2) 焊接时, 电烙铁外壳必须装有外接地线, 以防止由于电烙铁带电而损坏管子。对于少量焊接, 也可以将电烙铁烧热后拔下插头或切断电源后焊接。特别在焊接绝缘栅型场效晶体管时, 要按源极→漏极→栅极的先后顺序焊接, 并且要断电焊接。

(3) 结型场效晶体管可用万用表电阻挡定性地检查管子的质量 (检查各 PN 结的正、反向电阻及漏、源极之间的电阻值), 而绝缘栅型场效晶体管不能用万用表检查, 必须用测试仪, 并且要在接入测试仪后才能去掉各电极短路线。测量完毕取下管子时, 则应先短路再取下, 关键在于避免栅极悬空。

3.3.3 场效晶体管放大电路

场效晶体管放大电路根据输入与输出的公共端不同,分为共源、共栅、共漏三种放大电路的形式。

和三极管一样,场效晶体管放大电路必须由偏置电路提供合适的静态工作点,使管子工作在放大区。

一、自偏压放大电路

图 3.3.7 所示为由耗尽型绝缘栅型场效晶体管构成的自偏压共源放大电路。电路从栅极输入信号,漏极输出信号,源极是信号输入与输出的公共端。

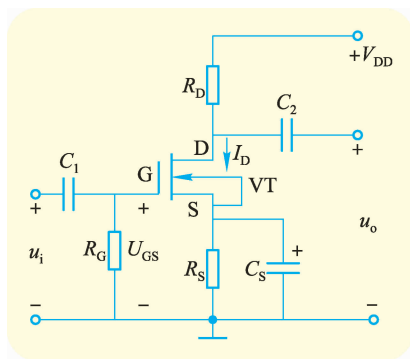


图 3.3.7 自偏压共源放大电路

为了使共源放大电路实现不失真放大,与共射放大电路一样,它也需要有一个合适的静态工作点,即合适的偏置电压(栅源电压 U_{GS})。

在图 3.3.7 所示电路中仅用下偏置电阻,省略了上偏置电阻。而耗尽型 MOS 管在 $U_{GS}=0$ 时,也有漏极电流 I_D 流过 R_S ,这样,在 R_S 上产生源极电位 $U_S = I_D R_S$ 。由于栅极基本不取用, $U_G \approx 0$, $U_{GS} = U_G - U_S = -I_D R_S$,该压降为栅、源极间提供负栅压,使管子工作在放大区。

可见,这种栅偏压是依靠场效晶体管自身电流 I_D 产生,故称为自偏压电路。



岗位知识积累

由于增强型 MOS 管只有在 $U_{GS} \geq U_{GS(th)}$ 时才有导电沟道,当 $U_{GS}=0$ 时,即使加上直流电源电压也不会产生 I_D ,也就没有偏压,故自偏压电路不能用于增强型 MOS 管放大电路。

二、分压式自偏压放大电路

图 3.3.8 所示的分压式自偏压放大电路是在自偏压电路的基础上加分压电阻后组成的。 R_{G1} 、 R_{G2} 为分压电阻, R_{G3} 采用高阻值电阻,由于 $I_G=0$, $I_G R_{G3}=0$,故静态栅极电位为

$$U_G = \frac{V_{DD} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$$

源极电位 $U_S = I_D R_S$, 栅极偏置电压为

$$U_{GS} = U_G - U_S = \frac{V_{DD} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} - I_D R_S$$

由上式可见,只要适当选取 R_{G1} 、 R_{G2} 和 R_S 的值,就可得到正、负和零的偏置电压,所以,这种偏置电路适用于各种类型的场效晶体管。

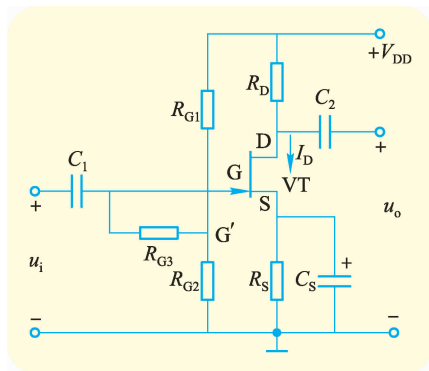


图 3.3.8 分压式自偏压放大电路