



第3章

场效应管与特殊三极管基本应用电路

科技前沿——功率模块与功率集成电路

20 世纪 80 年代以来,信息电子技术与电力电子技术在各自发展的基础上相结合而产生了高频化、全控型、采用集成电路制造工艺的新型电力电子器件,从而将电力电子技术又带入了一个崭新时代。从这一时期开始,电力系统核心电路模块化趋势占技术主导思想,具有代表意义的器件是功率模块(power module)与功率集成电路(power integrated circuit, PIC)。

将多个功放器件封装在一个模块中,称为功率模块。它可缩小装置体积,降低成本,提高可靠性,而对工作频率高的电路,可大大减小线路电感,从而简化对保护和缓冲电路的要求。

将器件与逻辑、控制、保护、传感、检测、自诊断等信息电子电路制作在同一芯片上,称为功率集成电路。类似功率集成电路的还有许多名称,可看成是功率集成电路的分类,如:

高压集成电路(high voltage IC, HVIC)一般指横向高压器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成。

智能功率集成电路(smart power IC, SPIC)一般指纵向功率器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成。

智能功率模块(intelligent power module, IPM)则专指 IGBT 及其辅助器件与其保护和驱动电路的单片集成,也称智能 IGBT(intelligent IGBT)。

以前功率集成电路的开发和研究主要在中小功率应用场合。因为功率集成电路的主要技术难点为:高低压电路之间的绝缘问题以及温升和散热的处理。智能功率模块在一定程度上回避了上述两个难点,最近几年获得了迅速发展。

功率集成电路实现了电能和信息的集成,成为机电一体化的理想接口。

场效应管(field effect transistor,FET)是仅由多数载流子参与导电的半导体有源器件,它是一种由输入信号电压来控制其输出电流大小的半导体三极管,是电压控制器件。本章首先讨论场效应管分类、结构与工作原理,接着研究场效应管放大器的分析方法、设计应用方法及计算过程,最后探讨了特殊种类三极管的原理与使用方法。本章主要掌握:

- ① 了解半导体场效应管及其基本特性:场效应管结构与符号、场效应管的转移特性等;
- ② 了解场效应管的主要参数、分类及其选择使用方法。理解场效应管放大电路的电路构成、工作原理和电路中各元器件的作用;
- ③ 能判断放大电路中场效应管三种可能工作状态。能对场效应管放大电路进行分析和设计计算;
- ④ 能设计和装接场效应管基本放大电路,并能通过调试得到正确结果。能对电路中的故障现象进行分析判断并加以解决;
- ⑤ 理解特殊三极管工作原理与使用方法。

场效应管按照结构可以分为两大类:金属-氧化物-半导体 FET (metal-oxide-semiconductor FET,MOSFET)和结型 FET(junction FET,JFET)。

MOSFET 的发明早于双极型晶体管。1933 年美国博士 Julius Lilienfeld 获得了最早关于场效应管的三个专利,在这三个专利中指出了场效应管的物理结构,但是受当时制造实际半导体器件的技术条件制约,他没有制造出任何可实际工作的场效应管器件。直到 20 世纪 60 年代中期,才制造出世界上第一款取得工程上成功应用的场效应管器件。尽管当时它的运行速度比 BJT 要慢得多,但是它具有体积小和功耗低的特点,故易于大规模集成。微处理器和大容量存储器就是由它集成的。JFET 的开发先于 MOSFET,但是它的应用远不及 MOSFET,且只是应用于某些特殊场合,有逐渐被淘汰的趋势(原因之一是 JFET 的栅极电压和漏极电压的极性相反)。

3.1 结型场效应管

JFET 是利用半导体的电场效应进行工作的,也称为体内场效应器件。结型场效应管有两种结构形式,即 N 沟道结型场效应管和 P 沟道结型场效应管。

3.1.1 结型场效应管的结构及类型

JFET 的结构如图 3-1 所示。具体说来,是在一块 N 型半导体材料两边扩散高浓度的 P 型区(用 P^+ 表示),形成两个 PN 结。由两边高浓度 P 型区引出两个欧姆接触电极并连接在一起称为栅极 $g(G)$,在 N 型本体材料的两端各引出一个欧姆接触电极,分别称为源极 $s(S)$ 和漏极 $d(D)$ 。两个 PN 结中间的 N 型区域称为导电沟道。这种结构称为 N 型沟道 JFET。实际剖面图衬底和顶部都是 P^+ 型半导体,它们连接在一起(图中未画出),引出的电极称为栅极 g 。其与源极 s 和漏极 d 相连的 N^+ 区,是通过光刻和扩散等工艺来

完成的隐埋层,其作用是为漏极、源极提供低阻通路。三个电极 s、g、d 分别由不同的铝接触层引出。

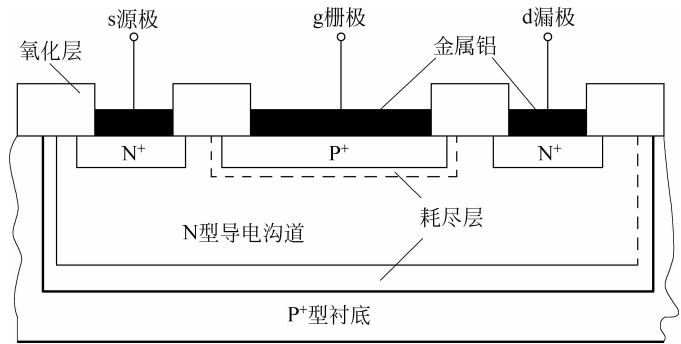


图 3-1 N 型沟道 JFET 实际剖面图

同样道理,将 P 型半导体和 N 型半导体互换,可以构成另一种结型场效应管,即 P 沟道 JFET。所以,结型场效应管有两种结构形式: N 型沟道结型场效应管和 P 型沟道结型场效应管。为了便于分析结型场效应管工作原理,画出其结构示意图,如图 3-2(a)和图 3-2(b)。图 3-2(c)和图 3-2(d)是结型场效应管的电路符号。

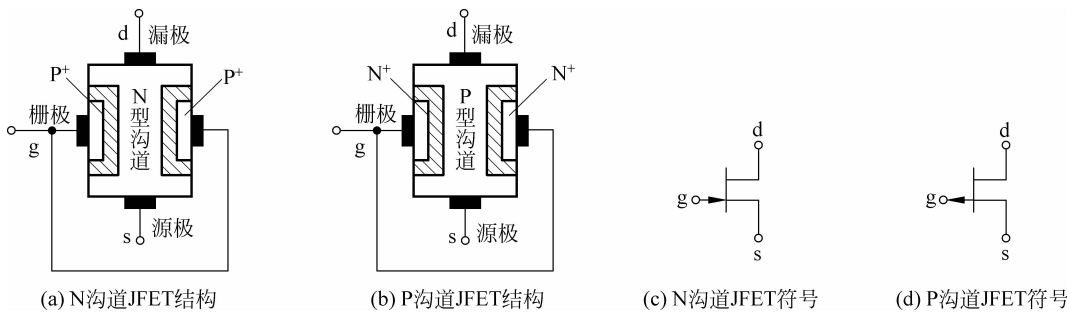


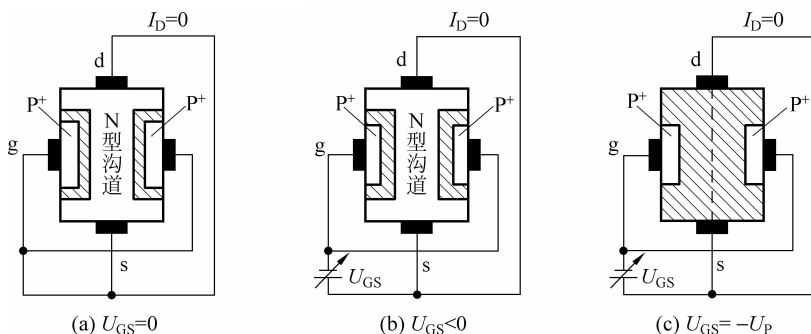
图 3-2 结型场效应管的结构示意图和符号

3.1.2 结型场效应管的工作原理

JFET 的主要工作原理是,在 D、S 间加上电压 U_{DS} ,则源极和漏极之间形成电流 I_D ,我们通过改变栅极和源极的反向电压 U_{GS} ,就可以改变两个 PN 结阻挡层(耗尽层)的宽度,这样就改变了沟道电阻,因此就改变了漏极电流 I_D 。

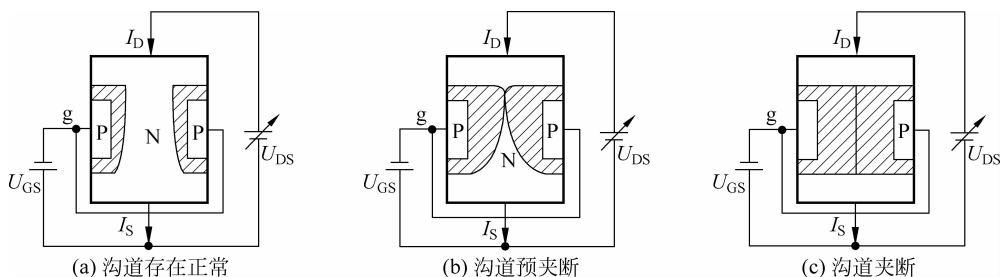
1. U_{GS} 对导电沟道的影响

假设 $U_{DS}=0$,当 U_{GS} 由零向负值增大时,PN 结的阻挡层加厚,沟道变厚,电阻增大。如图 3-3(a)和图 3-3(b)所示。若 U_{GS} 的负值(绝对值)再进一步增大,当 $U_{GS}=U_P$ 时两个 PN 结的阻挡层相遇,沟道消失,我们称为沟道被“夹断”了, U_P 称为夹断电压,亦作 $U_{GS(off)}$,此时 $I_D=0$,如图 3-3(c)所示。

图 3-3 当 $U_{DS}=0$ 时 U_{GS} 对导电沟道的影响示意图

2. I_D 与 U_{DS} 、 U_{GS} 之间的关系

假定栅、源电压 $|U_{GS}| < |U_P|$ ，例如 $U_{GS} = -1V$ ，而 $U_P = -4V$ ，当漏、源之间加上电压 $U_{DS} = 2V$ 时，沟道中将有电流 I_D 通过。此电流将沿着沟道的方向产生一个电压降，这样沟道上各点的电位就不同，因而沟道内各点的栅极之间的电位差也就各不相等。漏极顶端与栅极之间的反向电压最高，如 $U_{DG} = U_{DS} - U_{GS} = 2 - (-1) = 3V$ ，沿着沟道向下逐渐降低，使源极端沟道较宽，而靠近漏极端的沟道较窄，如图 3-4(a) 所示。此时，若增大 U_{DS} ，由于沟道电阻增大较慢，所以 I_D 随之增加。当 U_{DS} 进一步增加使栅、漏间电压 U_{GD} 等于 U_P 时，即 $U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} = U_P$ ，则在漏极附近，两个 PN 结的阻挡层相遇，如图 3-4(b) 所示，称为预夹断。如果继续升高 U_{DS} ，就会使夹断区向源极端方向发展，沟道增加。由于沟道电阻的增长速率与 U_{DS} 的增加速率基本相同，故这一期间 I_D 趋于恒定值，不随 U_{DS} 的增大而增大，此时，漏极电流的大小仅取决于 U_{GS} 的大小。 U_{GS} 越负，沟道电阻越大， I_D 便越小，直到 $U_{GS} = U_P$ ，沟道被完全夹断， $I_D \approx 0$ ，如图 3-4(c) 所示。

图 3-4 U_{DS} 对导电沟道和 I_D 的影响

3.1.3 结型场效应管的伏安特性

结型场效应管的伏安特性类似于晶体管伏安特性，研究 JFET 伏安特性也分输入特性与输出特性。

1. 输出特性曲线

输出特性是指栅源电压 u_{GS} 一定，漏极电流 i_D 与漏极电压 u_{DS} 之间的关系，即

$$i_D = f(u_{DS}) \big|_{u_{GS}=\text{常数}} \quad (3-1)$$

根据工作情况,输出特性可划分为4个区域,即:可变电阻区、恒流区、击穿区和截止区。如图3-5所示。

在可变电阻区内,栅源电压越负,输出特性越倾斜,漏源间的等效电阻越大。因此,在可变电阻区中,FET可看作一个受栅源电压控制的可变电阻。故得名为可变电阻区。

在恒流区(又称为饱和区),其物理过程已经描述。FET用作放大电路时,一般就工作在这个区域。因此,这个区又叫做线性放大区。

在击穿区的特点是,当漏源电压增至一定数值(例如图3-5中的 U_{DSS})后,由于加到沟道中耗尽层的电压太高,电场很强,致使栅漏间的PN结发生雪崩击穿,漏极电流迅速上升,故名击穿区。进入雪崩击穿后,管子不能正常工作,甚至很快烧毁。所以,FET不允许工作在这个区域。

当 $u_{GS} < U_P$ 时, $i_D = 0$ 。此区域为截止区。当管子做电子开关用时,相当于开关断开。

2. 转移特性

电流控制器件BJT的工作性能,是通过它的输入特性和输出特性及一些参数来反映的。FET是电压控制器件,它除了用输出特性及一些参数来描述其性能外,由于栅极输入端基本上没有电流,故讨论它的输入特性是没有意义的。

所谓转移特性是在 u_{DS} 一定时,漏极电流 i_D 与栅源电压 u_{GS} 之间的关系。即

$$i_D = f(u_{GS}) \big|_{u_{DS}=\text{常数}} \quad (3-2)$$

由于输出特性与转移特性都是反映FET工作的同一物理过程,所以转移特性可以直接从输出特性上用作图法求出。例如,在输出特性图3-5中,作 $u_{DS}=10V$ 的一条垂直线,此垂直线与各条输出特性曲线的交点分别为A、B、C、D,将这四个点相应的 i_D 及 u_{GS} 值画在 i_D - u_{GS} 的直角坐标系中,就可以得到 $u_{DS}=10V$ 时的转移特性曲线。改变 u_{DS} ,可以得到一族转移特性曲线。由于在饱和区漏极电流几乎不随着漏源电压而变化,所以当漏源电压大于一定值时,不同的漏源电压的转移特性很接近。在放大电路中,FET一般工作在饱和区,而且漏源电压总有一定数值(例如图3-6中大于4V),这时可以认为转移特性重合为一条直线,使得分析简单化。

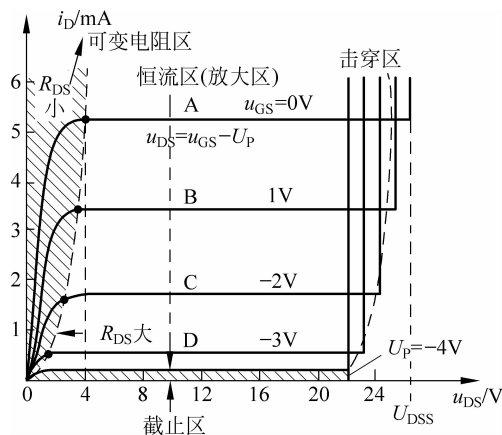


图 3-5 N 沟道 JFET 的输出特性

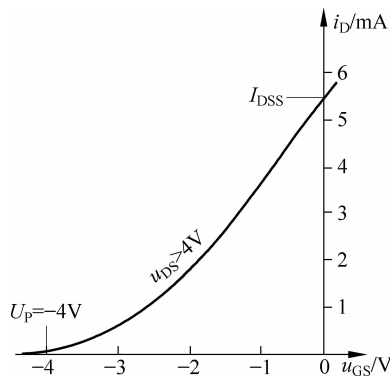


图 3-6 N 沟道 JFET 的转移特性

实验表明,在 $U_P \leq u_{GS} \leq 0$ 的范围内,漏极电流 i_D 与栅极电压 u_{GS} 的关系为

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P} \right)^2 \quad (U_P \leq u_{GS} \leq 0) \quad (3-3)$$

式中, I_{DSS} 是漏极饱和电流,在 3.2.3 节具体介绍。

3.2 绝缘栅场效应管

JFET 的直流输入电阻虽然一般可以达到 $10^6 \sim 10^9 \Omega$, 由于这个电阻本质上来说是 PN 结的反向电阻, PN 结反向偏置时总有一点反向电流存在, 这就限制了输入电阻的进一步提高。与 JFET 不同, 金属氧化物半导体场效应管 (metal-oxide-semiconductor type field effect transistor, MOSFET) 是利用半导体表面的电场效应进行的, 也称为表面场效应器件。由于它的栅极处于不导电(绝缘)状态, 所以又称为绝缘栅场效应管, 它的输入电阻大为提高, 最高可达到 $10^{15} \Omega$ 。MOSFET 管是 FET 的一种(另一种是 JFET), 可以被制造成增强型或耗尽型, P 沟道或 N 沟道, 因此 MOSFET 有 N 沟道和 P 沟道之分, 而且每一类又分为增强型和耗尽型两种, 共 4 种类型。增强型 MOSFET 在 $u_{GS}=0$ 时, 没有导电沟道存在。而耗尽型 MOSFET 在 $u_{GS}=0$ 时, 就有导电沟道存在。

但实际应用的只有增强型的 N 沟道 MOS 管和增强型的 P 沟道 MOS 管, 所以通常提到 NMOS, 或者 PMOS 指的就是这两种。

3.2.1 N 沟道增强型 MOS 管的结构

在一块掺杂浓度较低的 P 型硅衬底上, 制作两个高掺杂浓度的 N^+ 区, 并用金属铝引出两个电极, 分别作漏极 d 和源极 s。然后在半导体表面覆盖一层很薄的二氧化硅 (SiO_2) 绝缘层, 在漏-源极间的绝缘层上再装上一个铝电极, 作为栅极 g。在衬底上也引出一个电极 B, 这就构成了一个 N 沟道增强型 MOS 管。MOS 管的源极和衬底通常是接在一起的(大多数管子出厂前已连接好)。它的栅极与其他电极间是绝缘的。图 3-7 和图 3-8(a) 分别是它的结构示意图和代表符号。代表符号中的箭头方向表示由 P(衬底) 指向 N(沟道)。P 沟道增强型 MOS 管的箭头方向与上述相反, 如图 3-8(b) 所示。

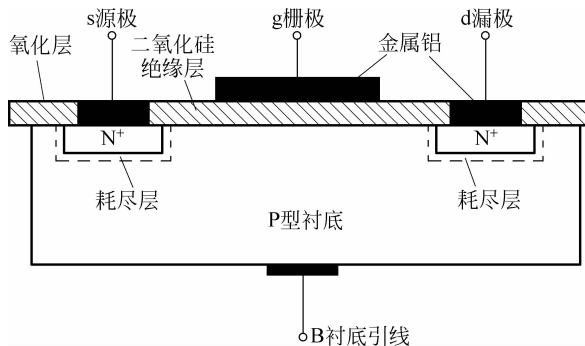


图 3-7 N 沟道增强型 MOS 管结构示意图

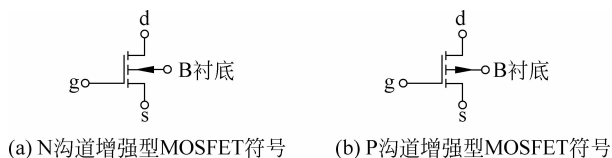
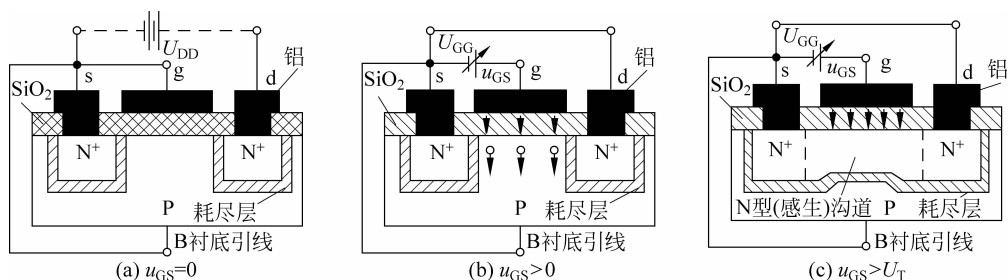


图 3-8 增强型 MOS 管结代表符号

(1) 接下来分析 N 沟道增强型 MOS 管的工作原理。首先讨论 u_{GS} 对 i_D 及沟道的控制作用。 $u_{GS}=0$ 的情况。如图 3-9(a), 增强型 MOS 管的漏极 d 和源极 s 之间有两个背靠背的 PN 结。当栅-源电压 $u_{GS}=0$ 时, 即使加上漏-源电压 u_{DS} , 而且不论 u_{DS} 的极性如何, 总有一个 PN 结处于反偏状态, 漏-源极间没有导电沟道, 所以这时漏极电流 $i_D \approx 0$ 。

图 3-9 N 沟道增强型 MOS 管 u_{GS} 对 i_D 及沟道的控制作用原理图

(2) $u_{GS}>0$ 的情况。若 $u_{GS}>0$, 则栅极和衬底之间的 SiO_2 绝缘层中便产生一个电场。电场方向是垂直于半导体表面的由栅极指向衬底的电场, 此电场能排斥空穴而吸引自由电子。排斥空穴使栅极附近的 P 型衬底中的空穴被排斥, 剩下不能移动的受主离子 (负离子) 形成耗尽层。吸引电子将 P 型衬底中的电子 (少子) 吸引到衬底表面。当 u_{GS} 数值较小, 吸引电子的能力不强时, 漏-源极之间仍无导电沟道出现, 如图 3-9(b) 所示。但是, 当 u_{GS} 增加时, 吸引到 P 衬底表面层的电子就增多, 当 u_{GS} 达到某一数值时, 这些电子在栅极附近的 P 衬底表面便形成一个 N 型薄层, 且与两个 N^+ 区相连通, 在漏-源极间形成 N 型导电沟道, 又因为其导电类型与 P 衬底相反, 故又称为反型层, 如图 3-9(c) 所示。 u_{GS} 越大, 作用于半导体表面的电场就越强, 吸引到 P 衬底表面的自由电子就越多, 导电沟道越厚, 沟道电阻越小。开始形成沟道时的栅-源极电压称为开启电压, 用 U_T 表示, 亦作 $U_{GS(th)}$ 。将 u_{GS} 对 i_D 及沟道的控制作用简要总结一下: N 沟道 MOS 管在 $u_{GS} < U_T$ 时, 不能形成导电沟道, 管子处于截止状态。只有当 $u_{GS} \geq U_T$ 时, 才有沟道形成。这种必须在 $u_{GS} \geq U_T$ 时才能形成导电沟道的 MOS 管, 称为增强型 MOS 管。沟道形成以后, 在漏-源极间加上正向电压 u_{DS} , 就有漏极电流产生。

接下来分析 u_{DS} 对 i_D 的影响。

如图 3-10(a) 所示, 当 $u_{GS} > U_T$ 且为一确定值时, 漏-源电压 u_{DS} 对导电沟道及电流 i_D 的影响与结型场效应管相似。

漏极电流 i_D 沿沟道产生的电压降使沟道内各点与栅极间的电压不再相等, 靠近源极一端的电压最大, 这里沟道最厚, 而漏极一端电压最小, 其值为 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS}$, 因而这里沟道最薄。但当 u_{DS} 较小 ($u_{DS} < u_{GS} - U_T$) 时, 它对沟道的影响不大, 这时只要 u_{GS} 一定, 沟

道电阻几乎也是一定的,所以 i_D 随 u_{DS} 近似呈线性变化。随着 u_{DS} 的增大,靠近漏极的沟道越来越薄,当 u_{DS} 增加到使 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} = U_T$ (或 $u_{DS} = u_{GS} - U_T$) 时,沟道在漏极一端出现预夹断,如图 3-10(b)所示。再继续增大 u_{DS} ,夹断点将向源极方向移动,如图 3-10(c)所示。由于 u_{DS} 的增加部分几乎全部降落在夹断区,故 i_D 几乎不随 u_{DS} 增大而增加,管子进入饱和区, i_D 几乎仅由 u_{GS} 决定。在饱和区内,增强型 MOS 管的电流方程如式(3-4)所示,其中 I_{DO} 为 $U_{GS} = 2U_T$ 时的 I_D 。

$$i_D = I_{DO} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_T} \right)^2 \quad (3-4)$$

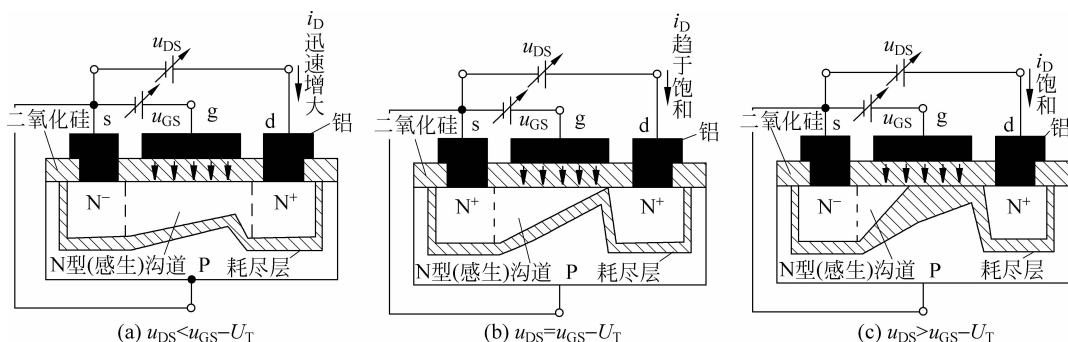


图 3-10 N 沟道增强型 MOS 管 u_{DS} 对 i_D 及沟道的控制作用原理图

3.2.2 耗尽型 MOS 管

本节以 N 沟道耗尽型 MOS 管为例讲授耗尽型 MOS 管的结构特点。P 沟道耗尽型 MOS 管与其关系对称不再赘述。

N 沟道耗尽型 MOS 管结构如图 3-11 所示,N 沟道耗尽型 MOS 管与 N 沟道增强型 MOS 管基本相似。耗尽型 MOS 管在 $u_{GS} = 0$ 时,漏-源极间已有导电沟道产生。增强型 MOS 管要在 $u_{GS} \geq U_T$ 时才出现导电沟道。具体的原因是由于制造 N 沟道耗尽型 MOS 管时,在 SiO_2 绝缘层中掺入了大量的碱金属正离子 Na^+ 或 K^+ (制造 P 沟道耗尽型 MOS 管时掺入负离子),如图 3-11 所示,因此即使 $u_{GS} = 0$ 时,在这些正离子产生的电场作用下,漏-源间的 P 型衬底表面也能感应生成 N 沟道(称为初始沟道),只要加上正向电压 u_{DS} ,就有电流 i_D 。

如果加上正的 u_{GS} ,栅极与 N 沟道间的电场将在沟道中吸引来更多的电子,沟道加宽,沟道电阻变小, i_D 增大。反之 u_{GS} 为负时,沟道中感应的电子减少,沟道变窄,沟道电阻变大, i_D 减小。当 u_{GS} 负向增加到某一数值时,导电沟道消失, i_D 趋于零,管子截止,故称为耗尽型。沟道消失时的栅-源电压称为夹断电压,仍用 U_P 表示。与 N 沟道结型场效应管相同,N 沟道耗尽型 MOS 管的夹断电压 U_P 也为负值,但是,前者只能在 $u_{GS} < 0$ 的情况下工作。而后者在 $u_{GS} = 0, u_{GS} > 0, U_P < u_{GS} < 0$ 的情况下均能实现对 i_D 的控制,而且仍能保持栅-源极间有很大的绝缘电阻,使栅极电流为零。这是耗尽型 MOS 管的一个重要特点。图 3-12(a)、图 3-12(b)分别是 N 沟道和 P 沟道耗尽型 MOS 管的代表符号。

在饱和区内,耗尽型 MOS 管的电流方程与结型场效应管的电流方程相同,即

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P}\right)^2 \quad \text{其中 } |u_{GS}| < |U_P| \quad (3-5)$$

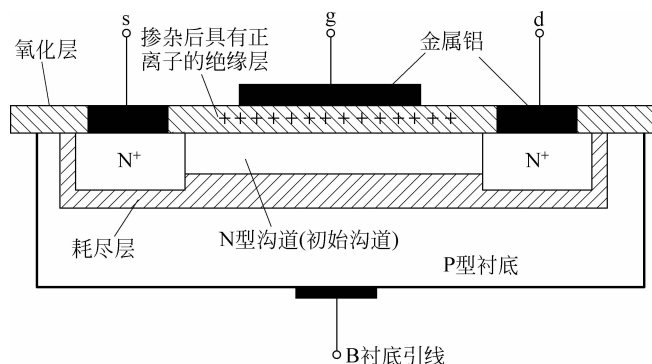


图 3-11 N 沟道耗尽型 MOS 管结构示意图



图 3-12 耗尽型 MOS 管结代表符号

3.2.3 场效应管的主要参数

场效应管的参数可以分成三部分：直流参数、交流参数和极限参数。

1. 直流参数

场效应管直流参数主要是保证其工作在合适的电路状态即可变电阻区、夹断区、恒流区。

1) 漏极饱和电流 I_{DSS}

I_{DSS} 是耗尽型和结型场效应管的一个重要参数,它的定义是当栅、源之间的电压 U_{GS} 等于零,而漏、源之间的电压 U_{DS} 大于夹断电压 U_P 时对应的漏极电流。

2) 夹断电压 U_P

U_P 是耗尽型和结型场效应管的重要参数,其定义为当 U_{DS} 一定时,使 I_D 减小到某一个微小电流(如 $1\mu A$, $50\mu A$)时所需的 U_{GS} 值。

3) 开启电压 U_T

U_T 是增强型场效应管的重要参数,它的定义是当 U_{DS} 一定时,漏极电流 I_D 达到某一数值(例如 $10\mu A$)时所需加的 U_{GS} 值。

4) 直流输入电阻 R_{GS}

R_{GS} 是栅、源之间所加电压与产生的栅极电流之比。由于栅极几乎不取电流,因此输

入电阻很高。结型为 $10^6 \Omega$ 以上, MOS 管可达 $10^{10} \Omega$ 以上。

2. 交流参数

场效应管交流参数也称为动态参数, 主要是研究场效应管交流性能时涉及的性能参数。

1) 低频跨导 g_m

g_m 是描述栅、源电压对漏极电流的控制作用。具体公式为

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{DS}=\text{常数}} \quad (3-6)$$

跨导 g_m 的单位是 mA/V 。跨导(又称为互导)反映了栅、源电压对漏极电流的控制能力, 它相当于转移特性上工作点的斜率。一般常见的单位为 ms 。它的值可由转移特性或输出特性求得, 同时如图 3-13 所示, 有

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = -\frac{2I_{DSS}}{U_P} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right) \quad (\text{当 } U_P \leq u_{GS} \leq 0 \text{ 时})$$

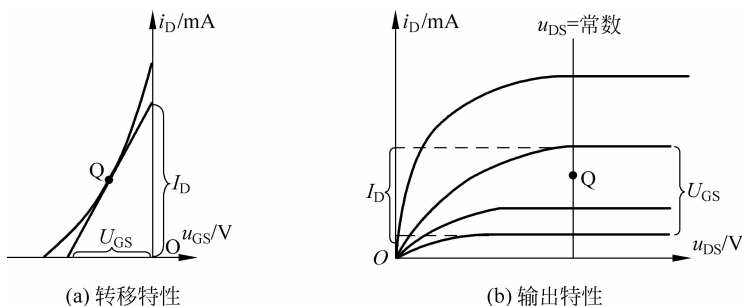


图 3-13 根据场效应管的特性曲线求 g_m 示意图

2) 极间电容

场效应管三个电极之间的电容, 包括 C_{GS} 、 C_{GD} 和 C_{DS} 。这些极间电容愈小, 则管子的高频性能愈好。一般为几个 pF 。

3) 输出电阻

输出电阻 r_d 说明了 u_{DS} 对 i_D 的影响, 是输出特性某一点上切线斜率的倒数。在饱和区(线性放大区), i_D 随 u_{DS} 改变很小, 因此 r_d 的数值很大, 一般在几十千欧到几百千欧之间。计算 r_d 表达式为

$$r_d = \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_{U_{GS}} \quad (3-7)$$

3. 极限参数

极限参数(the maximum parameter)是管子在工作状态不允许超过的参数。如果超越, 就会损坏管子。

1) 漏极最大允许耗散功率 P_{DM}

P_{DM} 与 I_D 、 U_{DS} 有如下关系

$$P_{DM} = I_D U_{DS} \quad (3-8)$$