

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

自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。

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。

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 ,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

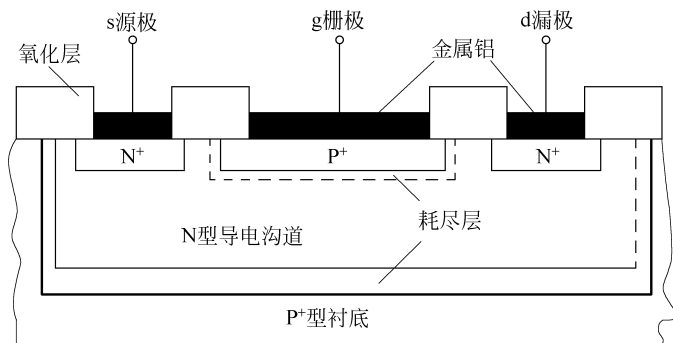


图 3-1 N 型沟道 JFET 实际剖面图

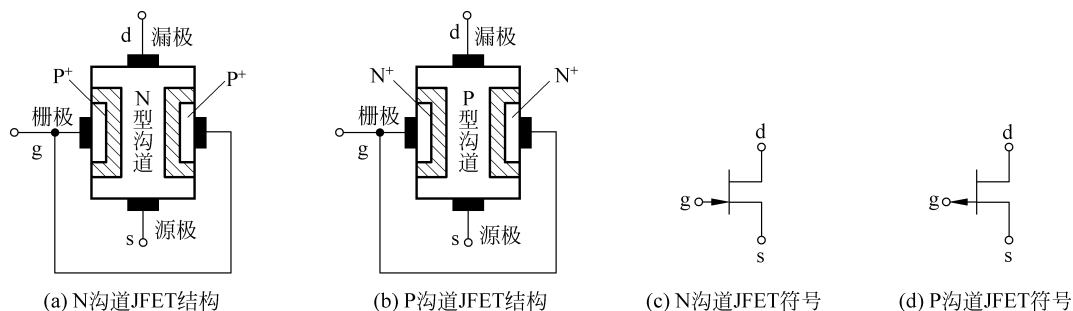
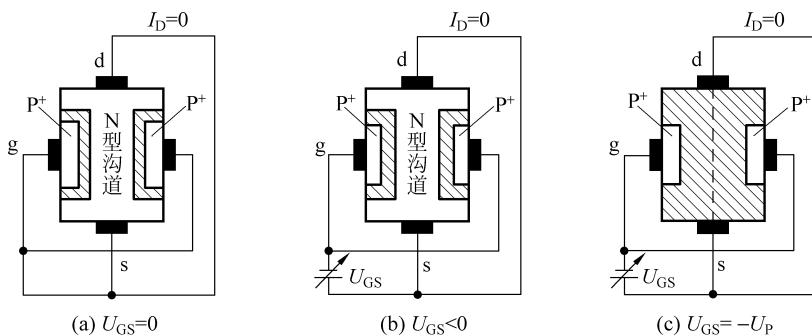


图 3-2 结型场效应管的结构示意图和符号

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, 沟道变窄, 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同。漏极顶端与

栅极之间的反向电压最高,如 $U_{DG}=U_{DS}-U_{GS}=2-(-1)=3\text{V}$,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,沟道夹断区增加。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。

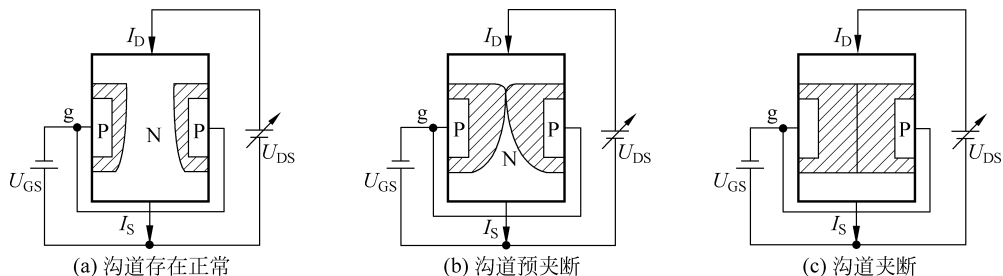


图 3-4 U_{DS} 对导电沟道和 I_D 的影响

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 伏安特性也分输出特性与转移特性。

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,这个区又叫作线性放大区。

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 不允许在这个区域工作。

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

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

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 $u_{DS}=10\text{V}$ 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 $u_{DS}=10\text{V}$ 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。

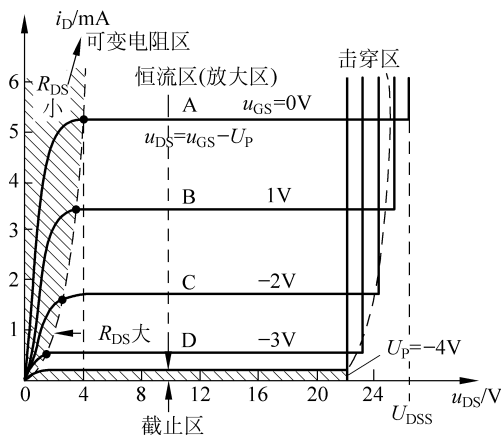


图 3-5 N 沟道 JFET 的输出特性

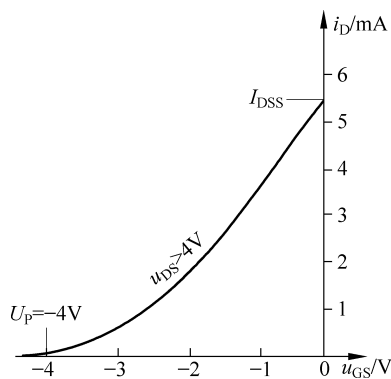


图 3-6 N 沟道 JFET 的转移特性

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 增强型 MOS 管

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。

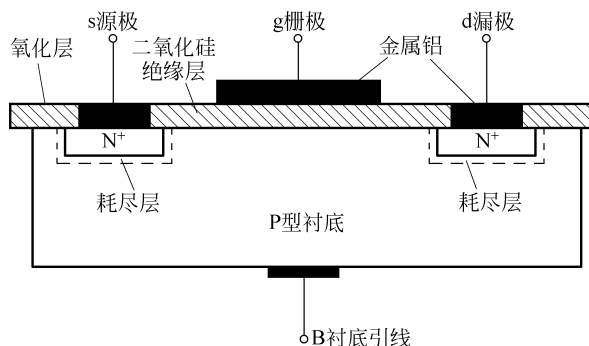


图 3-7 N 沟道增强型 MOS 管结构示意图

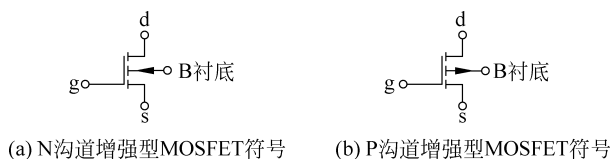
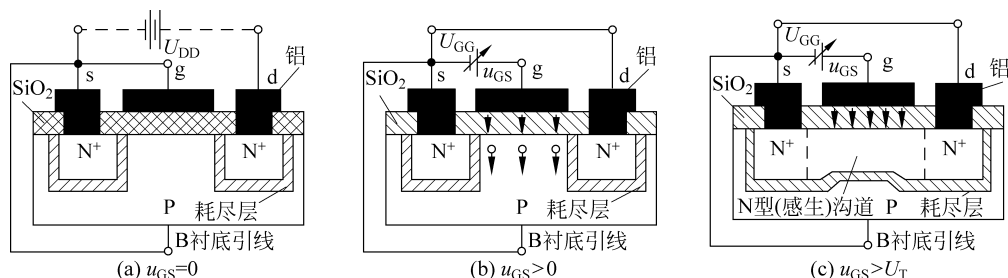


图 3-8 增强型 MOS 管结代表符号

(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 $i_D \approx 0$ 。

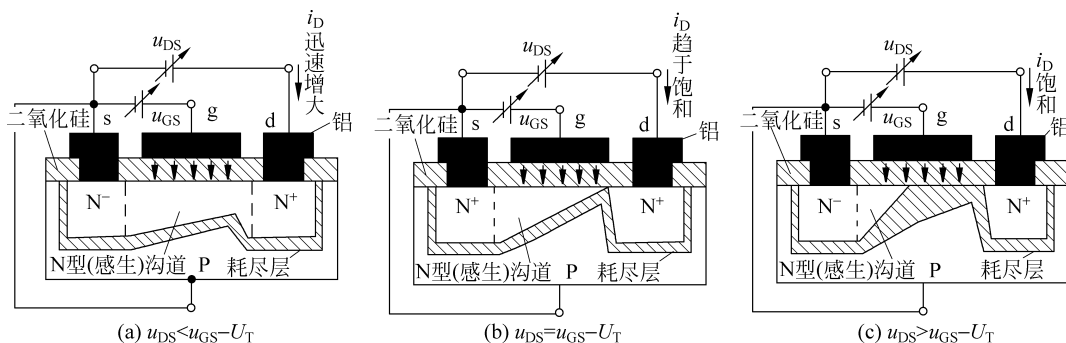
(2) $u_{GS} > 0$ 的情况。若 $u_{GS} > 0$, 则栅极和衬底之间的 SiO_2 绝缘层中便产生一个电场。电场方向是垂直于半导体表面的由栅极指向衬底的电场, 此电场能排斥空穴而吸引自由电子。排斥空穴使栅极附近的 P 型衬底中的空穴被排斥, 剩下不能移动的受主离子(负离子)形成耗尽层。吸引电子将 P 型衬底中的电子(少数)吸引到衬底表面。当 u_{GS} 数值较小, 吸引电子的能力不强时, 漏-源极之间仍无导电沟道出现, 如图 3-9(b)所示。但是, 当 u_{GS} 增加时, 吸引到 P 衬底表面层的电子就增多, 当 u_{GS} 达到某一数值时, 这些电子在栅极附近的 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

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

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。

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

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_{D0} 为 $u_{GS} = 2U_T$ 时的 I_D 。

$$i_D = I_{D0} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_T} \right)^2 \quad (3-4)$$

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 。

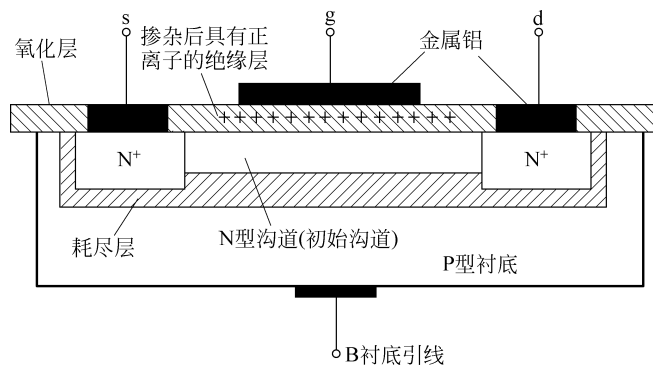


图 3-11 N 沟道耗尽型 MOS 管结构示意图

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。



图 3-12 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

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

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 $1\mu\text{A}$, $50\mu\text{A}$)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 $10\mu\text{A}$)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

$$g_{\text{m}} = \frac{\partial i_{\text{D}}}{\partial u_{\text{GS}}} \Big|_{U_{\text{DS}}=\text{常数}} \quad (3-6)$$

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

$$g_{\text{m}} = \frac{\partial i_{\text{D}}}{\partial u_{\text{GS}}} = -\frac{2I_{\text{DSS}}}{U_{\text{P}}} \left(1 - \frac{U_{\text{GS}}}{U_{\text{P}}}\right) \quad (\text{当 } U_{\text{P}} \leq u_{\text{GS}} \leq 0 \text{ 时})$$

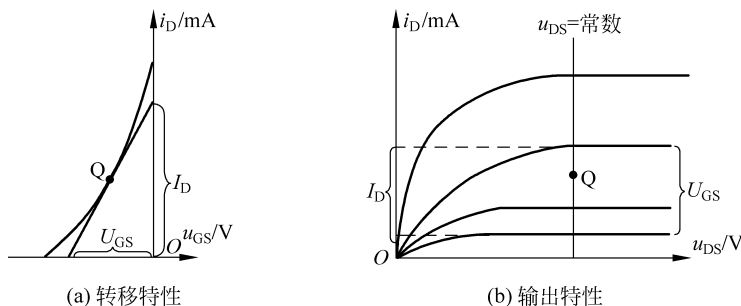


图 3-13 根据场效应管的特性曲线求 g_{m} 示意图

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。一般为几个皮法。

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。计算 r_d 表达式为

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

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。如果超过,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

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

这部分功率将转化为热能,使管子的温度升高。 P_{DM} 受场效应管允许的最高温升限制。

2) 漏-源间击穿电压 $U_{(BR)DS}$

在场效应管输出特性曲线上,当漏极电流 I_D 急剧上升产生雪崩击穿时的 U_{DS} 。工作时加在漏-源之间的电压不得超过此值。

3) 栅-源间击穿电压 $U_{(BR)GS}$

结型场效应管正常工作时,栅-源之间的 PN 结处于反向偏置状态,若 U_{GS} 超过栅-源间击穿电压 $U_{(BR)GS}$,PN 结将被击穿。

对于 MOS 场效应管,由于栅极与沟道之间有一层很薄的二氧化硅绝缘层,当 U_{GS} 过高时,可能将 SiO_2 绝缘层击穿,使栅极与衬底发生短路。这种击穿不同于 PN 结击穿,而是和电容器击穿的情况类似,属于破坏性击穿。

3.2.4 场效应管与晶体三极管的性能比较

场效应管与晶体三极管在不同应用场合性能有很大区别,具体而言有以下方面:

(1) 场效应管的源极 s、栅极 g、漏极 d 分别对应于晶体三极管的发射极 e、基极 b、集电极 c,它们的作用相似。

(2) 场效应管是电压控制电流器件,由 u_{GS} 控制 i_D ,其放大系数 g_m 一般较小,因此场效应管的放大能力较差;晶体三极管是电流控制电流器件,由 i_B (或 i_E)控制 i_C 。

(3) 场效应管栅极几乎不取电流;而晶体三极管工作时基极总要吸取一定的电流。因此场效应管的输入电阻比晶体三极管的输入电阻高。所以在要求高输入电阻放大电路(例如电压表的输入级)情形下,常选用场效应管放大电路。

(4) 场效应管只有多子参与导电;晶体三极管有多子和少子两种载流子参与导电,因少子浓度受温度、辐射等因素影响较大,所以场效应管比晶体三极管的温度稳定性好、抗辐射能力强。在环境条件(温度等)变化很大的情况下应选用场效应管。

(5) 场效应管在源极未与衬底连在一起时,源极和漏极可以互换使用,且特性变化不

大；而晶体三极管的集电极与发射极互换使用时，其特性差异很大， β 值将减小很多。

(6) 场效应管的噪声系数很小，在低噪声放大电路的输入级及要求信噪比较高的电路中要选用场效应管。

(7) 场效应管和晶体三极管均可组成各种放大电路和开关电路，但由于前者制造工艺简单，且具有耗电少，热稳定性好，工作电源电压范围宽等优点，因而被广泛用于大规模和超大规模集成电路中。

3.2.5 MOS 场效应晶体管使用注意事项

MOS 场效应晶体管由于输入阻抗高(包括 MOS 集成电路)，极易被静电击穿，使用时应注意以下规则：

(1) 从场效应管的结构上看，其源极和漏极是对称的，因此源极和漏极可以互换。但有些场效应管在制造时已将衬底引线与源极连在一起，这种场效应管源极和漏极就不能互换。

(2) 场效应管各极间电压极性应正确接入，结型场效应管的栅-源电压 u_{GS} 极性不能接反。

(3) 当 MOS 管的衬底引线单独引出时，应将其接到电路中的电位最低点(对 N 沟道 MOS 管而言)或电位最高点(对 P 沟道 MOS 管而言)，以保证沟道与衬底间的 PN 结处于反向偏置，使衬底与沟道及各电极隔离。

(4) MOS 管的栅极是绝缘的，感应电荷不易泄放，而且绝缘层很薄，极易击穿。所以栅极不能开路，MOS 器件出厂时通常装在黑色的导电泡沫塑料袋中，也可用细铜线把各个引脚连接在一起，将各电极短路。或用锡纸包装。

(5) 焊接时，电烙铁必须可靠接地，或者断电利用烙铁余热焊接，并注意对交流电场的屏蔽。MOS 器件焊接完成后再分开。

(6) 取出的 MOS 器件不能在塑料板上滑动，应用金属盘来盛放待用器件。

(7) MOS 器件各引脚的焊接顺序是漏极、源极、栅极。拆机时顺序相反。

(8) MOS 场效应晶体管的栅极在允许条件下，接入保护二极管。在检修电路时要注意检查保护二极管是否损坏。

3.3 场效应管放大电路

在由场效应管组成的放大电路中，场效应管必须工作在放大区，即必须采用合适的直流电流将其工作点(U_{DS} , I_D)设置于输出特性曲线的放大区，且保持稳定。

与晶体管放大电路相类似，场效应管放大电路有共源、共漏、共栅三种接法，它们的交流通路如图 3-14 所示。本节主要阐述场效应管放大电路静态工作点的设置方法及共源电路、共漏电路的动态分析(共栅接法应用极少)。

3.3.1 场效应管放大电路的直流偏置与静态分析

场效应管放大电路的直流偏置主要研究两种，一种自偏压电路；另一种分压式偏压电路。

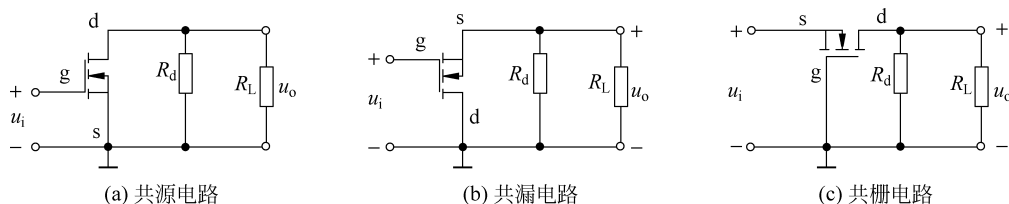


图 3-14 场效应管放大电路的三种接法

1. 自偏压电路

如图 3-15 所示,和 BJT 的射极偏置电路相似,图 3-15 中电容 C 对 R_s 起旁路作用,称为源极旁路电容。

通常在源极接入源极电阻,就可组成一个自偏压电路。考虑到如果采用耗尽型场效应管,即使在 $U_{GS}=0$ 时,也有漏极电流流过 R_s ,而栅极是经过 R_G 接地的,所以在静态时栅-源之间将有负栅压,即

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = 0 - I_{DQ}R_s = -I_{DQ}R_s \quad (3-9)$$

上式表明,在正的直流电源作用下,电路靠 R_s 上的电压使栅-源之间获得负电压,这种依靠自身获得负电压的方式成为自给偏压。再将式(3-9)代入结型场效应管电流方程,得到

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_P} \right)^2 = I_{DSS} \left(1 - \frac{-I_{DQ}R_s}{U_P} \right)^2 \quad (3-10)$$

由此求出 I_{DQ} ,将其代入式(3-9)中,可得栅-源间静态电压 U_{GSQ} 。根据电路的输出回路方程,可得到管压降

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ}(R_D + R_s) \quad (3-11)$$

增强型场效应管只有栅极、源极之间电压先达到某个开启电压 U_T 时才有漏极电流 I_D ,因此这类管子不能用如图 3-15 所示的自偏压电路。

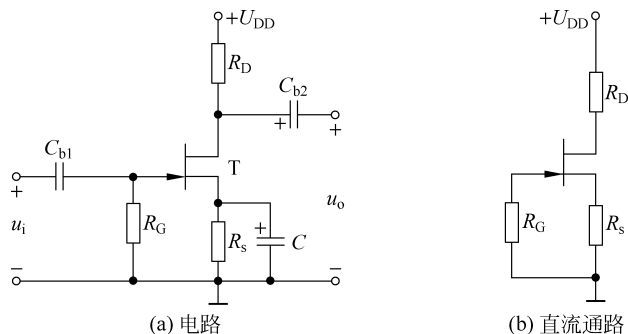


图 3-15 结型场效应管自偏压电路

2. 分压式偏压电路

虽然自偏压电路比较简单,但当静态工作点决定后, U_{GS} 和 I_D 就确定了,因而源极电阻选择的范围很小。分压式偏压电路是在图 3-15 的基础上加分压电阻后组成的,如图 3-16 所示。

漏极电源 U_{DD} 经过分压电阻 R_{G1} 和 R_{G2} 分压后,通过 R_{G3} 供给栅极

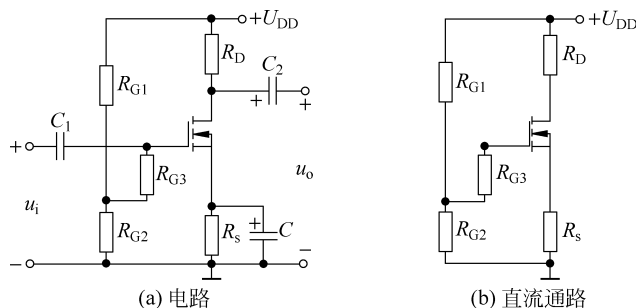


图 3-16 分压式偏压电路

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

同时漏极电流在源极电阻 R_s 上也产生压降 $U_s = I_D R_s$, 因此静态时加在场效应管上的栅源电压为

$$U_{GS} = U_G - U_s = U_{DD} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} - I_D R_s = - \left(I_D R_s - U_{DD} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) \quad (3-12)$$

这种偏压电路的另一个特点是适用于增强型场效应管电路。 I_{DQ} 与 U_{GSQ} 应符合 MOS 管的电流方程式(3-4), 即

$$I_{DQ} = I_{DO} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_T} \right)^2 \quad (3-13)$$

联立式(3-12)和式(3-13), 求解可得出 I_{DQ} 与 U_{GSQ} 。进而可得到管压降

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} (R_D + R_s) \quad (3-14)$$

3.3.2 场效应管放大电路的动态分析

当场效应管的直流偏置电路设置合适后, 加入交流信号, 此时就要进行场效应管的动态分析。通常需要放大的信号比较微弱, 即小信号, 并且此时场效应管工作在线性放大区, 那么同 BJT 一样, 可以用小信号模型来分析。

1. 场效应管小信号模型

在 3.3.1 节中, 已经讨论了场效应管的跨导 g_m 和输出电阻 r_d 。如果此时场效应管工作在线性放大区(也就是恒流区、饱和区), 那么场效应管的交流小信号线性模型如图 3-17 所示。

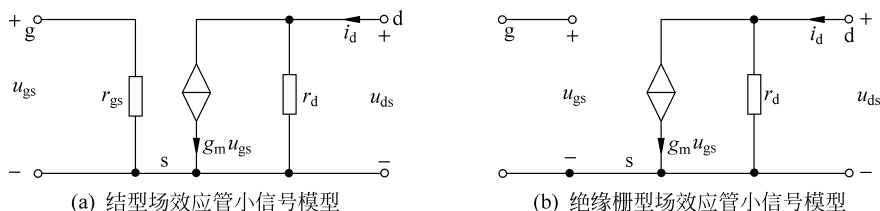


图 3-17 场效应管的小信号模型

由于结型场效应管的输入电阻比绝缘栅场效应管小, 所以结型场效应管的小信号模型保留了电阻 r_{gs} , 如图 3-17(a), 而绝缘栅场效应管输入电阻趋近于无穷大, 所以小信号模型中不再画输入电阻, 直接将栅-源之间开路处理, 如图 3-17(b) 所示。

根据场效应管的电流方程可以求出低频跨导 g_m 。对于结型场效应管

$$\begin{aligned} g_m &= \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}} \\ &= \frac{2I_{DSS}}{-U_P} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P} \right) \bigg|_{U_{DS}} \\ &= \frac{2\sqrt{I_{DSS}^2 \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P} \right)^2}}{-U_P} \bigg|_{U_{DS}} \\ &= -\frac{2}{U_P} \sqrt{I_{DSS} i_D} \end{aligned}$$

当小信号作用时,可以用 I_{DQ} 来近似 i_D ,所以

$$g_m \approx -\frac{2}{U_P} \sqrt{I_{DSS} I_{DQ}} \quad (3-15)$$

同理,对于增强型 MOS 管

$$g_m \approx \frac{2}{U_T} \sqrt{I_{DQ} I_{DQ}} \quad (3-16)$$

当场效应管用在高频或脉冲电路时,极间电容的影响不能忽略,此时场效应管需用高频模型如图 3-18 所示。

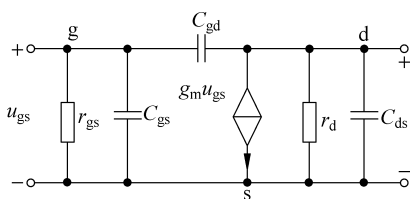


图 3-18 场效应管高频小信号模型

2. 应用小信号模型法分析场效应管放大电路

如图 3-19(a)所示的共源极电路,应用小信号模型进行分析,求出中频电压增益、输入电阻、输出电阻。中频小信号模型如图 3-17(b)所示,通常 r_d 的阻值在几百千欧姆的数量级,一般负载电阻比 r_d 小很多,故此时可以认为 r_d 开路。故最后画出共源放大电路的交流等效电路,如图 3-19(b)所示,此交流通路中的交流物理量用相量表示。

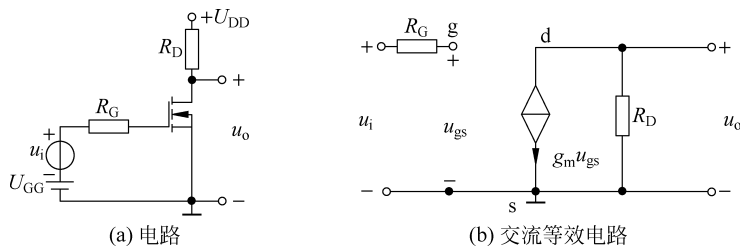


图 3-19 共源放大电路及交流等效电路

1) 中频电压增益

在图 3-19(b)中,可以分析出

$$u_i = u_{gs} \quad (3-17)$$

在图 3-19 中空载,所以输出电压等于场效应管压降,并且 R_D 的交流电流就是漏极交流电流,又因为交流通路中直流电源归零,所以 R_D 接地,根据以上分析可以得到

$$u_o = -i_d R_D = -g_m u_{gs} R_D \quad (3-18)$$

因此中频电压增益(放大倍数)

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -g_m R_D \quad (3-19)$$

2) 输入电阻、输出电阻

根据输入电阻、输出电阻的定义,它们分别为

$$R_i = \infty \quad (3-20)$$

$$R_o = R_D \quad (3-21)$$

例 3-1 如图 3-16, 已知 $U_{DD} = 15\text{V}$, $R_{G1} = 150\text{k}\Omega$, $R_{G2} = 300\text{k}\Omega$, $R_{G3} = 2\text{M}\Omega$, $R_D = 5\text{k}\Omega$, $R_s = 500\Omega$, $R_L = 5\text{k}\Omega$; MOS 管的 $U_T = 2\text{V}$, $I_{D0} = 2\text{mA}$ 。求解 Q 点、 $\dot{A}_u$ 、 R_i 、 R_o 。

解 场效应管放大器的分析同样遵循先静态后动态的原则。首先求解 Q 点。

$$\begin{cases} U_{GSQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \times U_{DD} - I_{DQ} R_s = \frac{150}{150 + 300} \times 15 - I_{DQ} \times 0.5 = 5 - 0.5 I_{DQ} \\ I_{DQ} = I_{D0} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_T} - 1 \right)^2 = 2 \left(\frac{U_{GSQ}}{2} - 1 \right)^2 \end{cases}$$

解得 U_{GSQ} 的两个解分别为 $+4\text{V}$ 和 -4V , 舍去负值, 得出合理解为

$$U_{GSQ} = 4\text{V}, \quad I_{DQ} = 2\text{mA}$$

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} (R_D + R_s) = 4\text{V}$$

接下来求解 $\dot{A}_u$ 、 R_i 、 R_o 。画出图 3-16 的交流等效电路, 如图 3-20 所示。为计算方便, 电路物理量用相量表示。

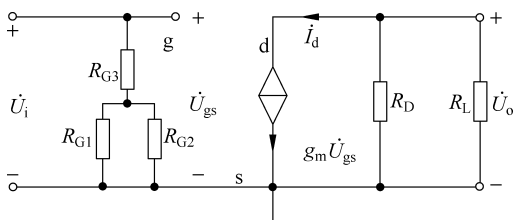


图 3-20 例 3-1 电路图

计算低频跨导, 有

$$g_m = \frac{2}{U_T} \sqrt{I_{D0} I_{DQ}} = \frac{2}{2} \sqrt{2 \times 2} \text{mA/V} = 2\text{mS}$$

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_d (R_D // R_L) = -g_m \dot{U}_{gs} (R_D // R_L)$$

由于

$$\dot{U}_{gs} = \dot{U}_i$$

根据电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的定义, 可得

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -g_m (R_D // R_L) = -2 \times \frac{1}{1/5 + 1/5} = -5$$

$$R_i = R_{G3} + R_{G1} // R_{G2} = \left(2 + \frac{1}{1/0.15 + 1/0.3} \right) \text{M}\Omega = 2.1\text{M}\Omega$$

$$R_o = R_D = 5\text{k}\Omega$$

解题结论 从此例可以看出, 场效应管共源极放大电路的输入电阻远大于共射极放大电路的输入电阻, 但是它的电压放大能力不如共射放大电路。

从此例还可以看出电阻 R_{G3} 的作用是增大输入电阻。

3. 共漏放大电路的动态分析

共漏放大电路又称为场效应管源极跟随器。

图 3-21(a)所示为共漏放大电路,图 3-21(b)为它的交流等效电路。其静态工作点可用下式估算,即

$$\begin{cases} I_{DQ} = I_{D0} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_T} - 1 \right)^2 \\ U_{GSQ} = U_{GG} - I_{DQ} R_s \\ U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} R_s \end{cases} \quad (3-22)$$

在图 3-21(b)所示电路中,当输入电压 $\dot{U}_i$ 作用时,栅-源之间产生动态电压 $\dot{U}_{gs}$,从而得到漏极电流 $\dot{I}_d$, $\dot{I}_d = g_m \dot{U}_{gs}$; $\dot{I}_d$ 在源极电阻 R_s 的压降就是输出电压,即

$$\dot{U}_o = \dot{I}_d R_s = g_m \dot{U}_{gs} R_s \quad (3-23)$$

输入电压为

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} + \dot{U}_o = \dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} R_s \quad (3-24)$$

所以电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s} \quad (3-25)$$

根据输入电阻的定义

$$R_i = \infty \quad (3-26)$$

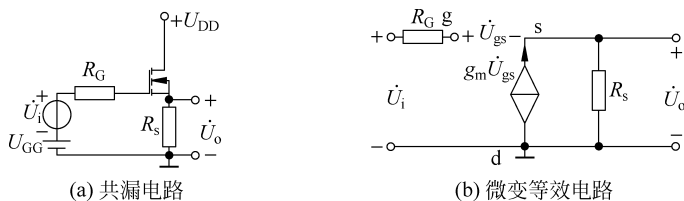


图 3-21 共漏放大电路及其微变等效电路

下面求解输出电阻。将输入端的电压源短路,在输出端加交流电压 $\dot{U}_o$,必然产生电流 $\dot{I}_o$,如图 3-22 所示,求出 $\dot{I}_o$,根据输出电阻等于输出电压 $\dot{U}_o$ 除以输出电流 $\dot{I}_o$,可得输出电阻。由图 3-22 可知, $\dot{I}_o$ 分为两个支路,一路流经 R_s ,其值是 $\dot{U}_o/R_s$; 另一路是 $\dot{U}_o$ 通过 R_g 加在栅-源之间,从而产生从源极流向漏极的电流 $\dot{I}_s$,其值为 $g_m \dot{U}_o$ 。所以有

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{U}_o}{R_s} + g_m \dot{U}_o$$

则输出电阻为

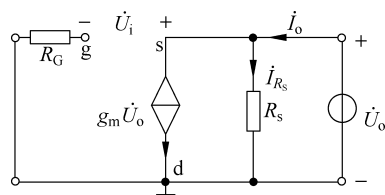


图 3-22 求解共漏放大电路的输出电阻

$$R_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = \frac{\dot{U}_o}{\frac{\dot{U}_o}{R_s} + g_m \dot{U}_o} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + g_m} = R_s // \frac{1}{g_m} \tag{3-27}$$

例 3-2 在图 3-21(a)所示电路中,静态工作点合适, $I_{DQ}=1\text{mA}$, $R_G=2\text{M}\Omega$, $R_s=3\text{k}\Omega$; 场效应管的开启电压 $U_T=4\text{V}$, $I_{D0}=1\text{mA}$ 。试求 A_u 、 R_i 、 R_o 。

解 首先求解 g_m 。

$$g_m = \frac{2}{U_T} \sqrt{I_{D0} I_{DQ}} = \frac{2}{4} \sqrt{4 \times 1} \text{ mA/V} = 1 \text{ ms}$$

根据式(3-25)~式(3-27)分别求解 A_u 、 R_i 、 R_o 。

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s} = \frac{1 \times 3}{1 + 1 \times 3} \approx 0.75$$

$$R_i = \infty$$

$$R_o = R_s // \frac{1}{g_m} = \frac{1}{1/3 + 1} \approx 0.75 \text{ k}\Omega$$

解题结论 从例 3-2 的分析可以看出,共漏放大电路的输入电阻远大于共集放大电路的输入电阻,其输出电阻也比共集电路的大,电压跟随器作用比共集电极电路差。

综上所述,场效应管放大电路的突出特点是输入电阻高,因此特别适用于对微弱信号处理的放大电路的输入级。

4. 场效应管三种基本放大电路组态的总结与比较

场效应管三种放大电路组态的特性的总结见表 3-1。

表 3-1 三种场效应管放大电路的特性

结 构	电压增益 ($ A_{us} $)	电流增益 (A_i)	输入电阻 R_i	输出电阻 R_o
共源极	>1	—	一般	一般
共漏极	≈ 1	—	一般	低
共栅极	>1	≈ 1	低	一般

注：表格中的“—”表示通常不研究。

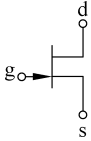
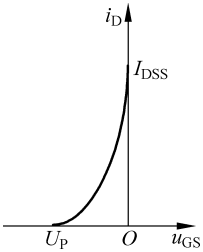
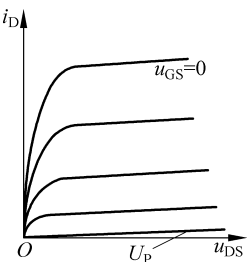
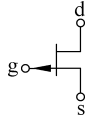
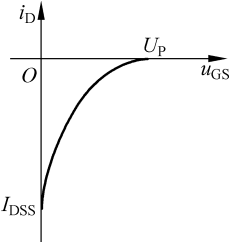
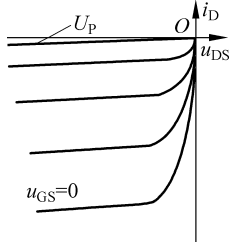
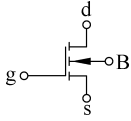
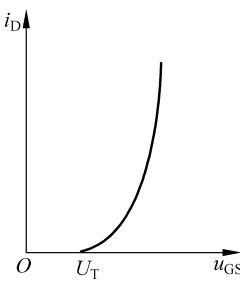
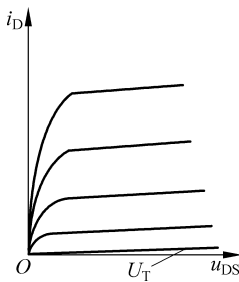
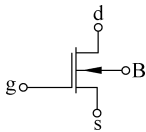
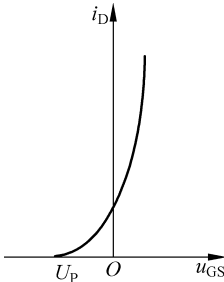
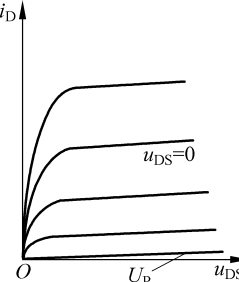
共源极放大电路的输出电压与输入电压反相,共漏极和共栅极放大电路的输出电压与输入电压同相。在一般情况下,共源极和共栅极电路的电压增益远大于 1,而共漏极放大电路的电压增益近似为 1,所以共漏极放大电路又被称为源极跟随器。

输入信号的频率较低时,共源极电路和共漏极电路从栅极看进去的输入电阻几乎为无穷大。然而对于分立元件的放大电路,其输入电阻是偏置电路的戴维南等效电阻。共栅极电路的输入电阻一般为几百欧姆。共漏极输出电阻为几百欧姆或更小。

共源极和共栅极电路的输出电阻主要取决于 R_D 。

场效应管的型号比较多,相应的转移特性曲线和输出特性曲线也各不相同,如表 3-2 所示。

表 3-2 各种场效应管的转移特性和输出特性曲线

分 类		符 号	转移特性曲线	输出特性曲线
结型场效应管	N 沟道			
	P 沟道			
绝缘栅型场效应管	N 沟道	增强型 		
	N 沟道	耗尽型 		

续表

分 类			符 号	转移特性曲线	输出特性曲线
绝缘栅型场效应管	P 沟道	增强型			
		耗尽型			

3.4 特殊场效应三极管与应用电路

随着电子科技日新月异的发展,三极管的种类越来越丰富。本节只介绍电子设计工程中最常见的几种类别。

3.4.1 绝缘栅双极型晶体管

绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor,IGBT)是由 MOSFET 和双极型晶体管复合而成的一种器件,其输入极为 MOSFET,输出极为 PNP 晶体管,它融合了这两种器件的优点,既具有 MOSFET 器件驱动功率小和开关速度快的优点,又具有双极型器件饱和压降低而容量大的优点,其频率特性介于 MOSFET 与功率晶体管之间,可正常工作于几十千赫的频率范围内,在现代电力电子技术中得到了越来越广泛的应用,在较高频率的大、中功率应用中占据了主导地位。

1. IGBT 原理及等效电路

IGBT 管的开通和关断是由栅极电压来控制的,IGBT 管的等效电路如图 3-23 所示。

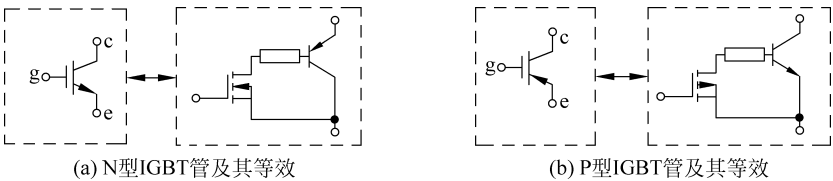


图 3-23 IGBT 管的等效电路

由图 3-23 可知,当栅极加正电压时,MOSFET 内形成沟道,并为 PNP 晶体管提供基极电流,从而使 IGBT 管导通,此时高耐压的 IGBT 管也具有低的导通态压降。在栅极上加负电压时,MOSFET 内的沟道消失,PNP 晶体管的基极电流被切断,IGBT 管即关断。IGBT 管与 MOSFET 一样也是电压控制型器件,在它的栅极、发射极间施加十几伏的直流电压,只有微安级的漏电流,基本上不消耗功率,显示了输入阻抗大的优点。IGBT 的电路符号目前仍然没有统一的画法,图 3-23(a)和图 3-23(b)为 IGBT 管最常见的电路符号。

若在 IGBT 的栅极和发射极之间加上驱动正电压,则 MOSFET 导通,这样 PNP 晶体管的集电极与基极之间成低阻状态而使得晶体管导通;若 IGBT 的栅极和发射极之间电压为 0V,则 MOS 截止,切断 PNP 晶体管基极电流的供给,使得晶体管截止。IGBT 与 MOSFET 一样也是电压控制型器件,在它的栅极-发射极间施加十几伏的直流电压,只有 μA 级的漏电流流过,基本上不消耗功率。

2. IGBT 的擎住效应和安全工作区

以 N 型 IGBT 管为例研究其安全工作区,画出其内部结构与等效电路如图 3-24 所示。

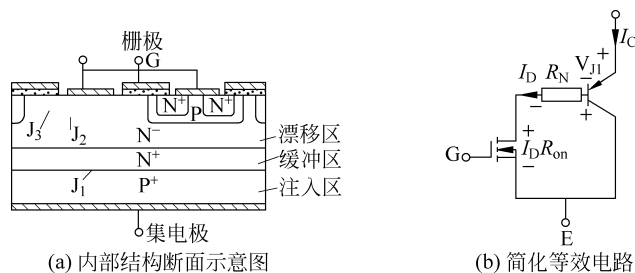


图 3-24 IGBT 的结构、简化等效电路

1) 结构特点

- (1) 寄生晶闸管: 由一个 $\text{N}^- \text{PN}^+$ 晶体管和作为主开关器件的 $\text{P}^+ \text{N}^- \text{P}$ 晶体管组成。
- (2) 正偏安全工作区(FBSOA): 最大集电极电流、最大集射极间电压和最大集电极功耗确定。
- (3) 反向偏置安全工作区(RBSOA): 最大集电极电流、最大集射极间电压和最大允许电压上升率 du_{CE}/dt 确定。

(4) 擎住效应或自锁效应: 沟道电阻上产生的压降,相当于对 J_3 结施加正偏压,一旦 J_3 开通,栅极就会失去对集电极电流的控制作用。电流失控,动态擎住效应比静态擎住效应所允许的集电极电流小。擎住效应曾限制 IGBT 电流容量提高,20 世纪 90 年代中后期逐渐解决,即将 IGBT 与反并联的快速二极管封装在一起,制成模块,成为逆导器件。

2) 使用注意事项

IGBT 管的栅极通过一层氧化膜与发射极实现电隔离。由于此氧化膜很薄,IGBT 管的 U_{GE} 的耐压值为 20V,在 IGBT 管加超出耐压值的电压时,会导致损坏的危险。此外,在栅极-发射极间开路时,若在集电极与发射极间加上电压,则随着集电极电位的变化,由于集电极有漏电流流过,栅极电位升高,集电极则有电流流过,这时,如果集电极与发射极间存在高电压,则有可能使 IGBT 管发热乃至损坏。在应用中,有时虽然保证了栅极驱动电压没有超过栅极最大额定电压,但栅极连线的寄生电感和栅极与集电极间的电容耦合,也会产生使氧

化层损坏的振荡电压,为此,通常采用双绞线来传送驱动信号,以减少寄生电感。在栅极连线中串联小电阻也可以抑制振荡电压。如果栅极回路不合适或者栅极回路完全不能工作时(栅极处于开路状态),若在主回路上加上电压,则 IGBT 管就会损坏,为防止这类损坏情况发生,应在栅极-发射极之间接一只 10kΩ 左右的电阻。

此外,由于 IGBT 管含有场效应管结构,对于静电就要十分注意。因此,在使用模块时,手持分装件时,请勿触摸驱动端子部分。当必须要触摸模块端子时,要先将人体或衣服上的静电放电后,再触摸。在用电材料连接 IGBT 管的驱动端子时,在配线未接好之前请先不要接上模块;尽量在底板良好接地的情况下操作,如焊接时,电烙铁要可靠接地。

3. IGBT 的应用

通过检测 IGBT 饱和压降实现短路保护。

IGBT 通常工作在逆变桥上,并处于开关工作状态,若设计不当,易发生短路现象。对 IGBT 器件的短路保护,常用的方法是通过检测 IGBT 的饱和压降 $U_{CE(sat)}$,配合驱动电路来实现,如图 3-25 所示。

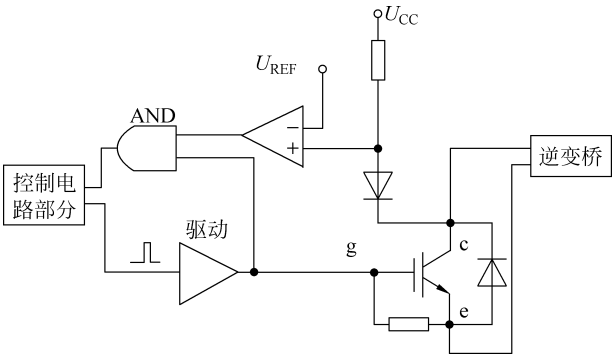


图 3-25 检测 IGBT 饱和压降实现短路保护电路图

其工作原理如下:当过电流或者短路发生时, $U_{CE(sat)} = I_C R_{CE(sat)}$,若 I_C 升高,则 $U_{CE(sat)}$ 升高。此时通过快恢复二极管检测的 $U_{CE(sat)} > U_{REF}$ (在比较器输入端设定的电压值),比较器输出为高电平(输入 AND(与门)输入端的一侧);若 U_G 增大时,检测线路 $U_{CE(sat)} \geq U_{REF}$ (有过电流时)情况发生,AND(与门)输出高电平,使保护电路动作,栅极驱动无驱动信号输出。通常保护电路必须在 $10\mu s$ 内关断 IGBT。如果在保护电路中,采用先降低栅电压实现器件软关断,可以减少 IGBT 的关断应力,甚至延长保护电路动作时间。

3.4.2 光电三极管及其应用电路

光电三极管工作原理是根据光照强度来控制集电极电流的大小,其功能可以等效为一个光电二极管与一个 BJT 相连,如图 3-26 所示。

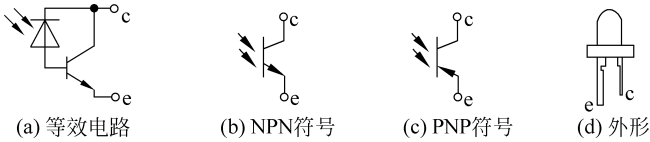


图 3-26 光电三极管等效电路、符号和外形

与晶体三极管相似,光电三极管也是具有两个 PN 结的半导体器件,所不同的是其基极受光信号的控制。由于光电三极管的基极即为光窗口,因此大多数光电三极管只有发射极 e 和集电极 c 两个管脚,基极无引出线。

光电三极管分为 NPN 型和 PNP 型两大类,如图 3-26(b)和图 3-26(c)所示。在有光照时,NPN 型光电三极管电流从集电极 c 流向发射极 e,PNP 型光电三极管电流从发射极 e 流向集电极 c。

光电三极管的特点是不仅能实现光电转换,而且同时还具有放大功能。光电三极管可以等效为光电二极管和普通三极管的组合元件,如图 3-26(a)所示。光电三极管基极与集电极间的 PN 结相当于一个光电二极管,在光照下产生的光电流又从基极进入三极管放大,因此光电三极管输出的光电流可达光电二极管的 β 倍。

光电三极管与普通三极管的输出特性曲线相似,只是将参变量基极电流 I_B 用入射光照度 E 取代,如图 3-27 所示。无光照时的集电极电流称为暗电流 I_{CEO} ,它比光电二极管的暗电流大两倍。暗电流受温度的影响很大,温度每上升 25°C , I_{CEO} 上升约 10 倍。

有光照时的集电极电流称为光电流。当管压降 u_{ce} 足够大时, i_c 几乎仅仅决定于入射光照度 E 。对于不同型号的光电三极管,当入射光照度 E 为 1000lx 时,光电流从小于 1mA 到几毫安不等。

使用光电三极管时,也应特别注意不同光电三极管给出的极限参数,不要超过极限参数。

如图 3-28 所示,是光电三极管在煤气熄火报警中的应用电路。 T_1 是光电三极管,与 T_2 、 T_3 等组成开关电路,控制着由 IC555 等组成的多谐振荡器电路。煤气火焰正旺时, T_1 导通, T_2 、 T_3 截止,IC555 不振荡,喇叭无声音。当火苗被溢出的水或者风熄灭后, T_1 失去炉火的光照, T_2 、 T_3 导通,IC555 的地被接通,开始工作,喇叭发出声音提醒相关人员赶快关闭煤气,避免发生煤气中毒的危险。其中 R_1 、 R_2 、 C 的具体取值,由下式确定

$$T = (R_1 + 2R_2)C \ln 2 \quad (3-28)$$

式中的 T 为输出振荡周期,其倒数为频率,把频率设置为人耳可以听见的范围。

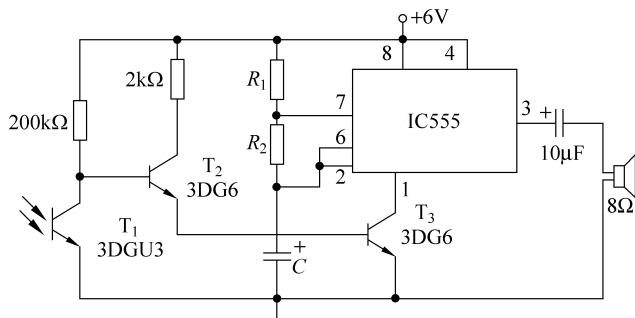


图 3-28 光电三极管煤气熄火报警电路

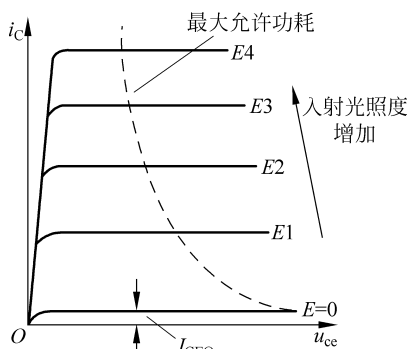


图 3-27 光电三极管的输出特性曲线

3.4.3 单结晶体管及其应用电路

根据 PN 结外加电压时的工作特点,还可以由 PN 结构成其他类型的三端器件。本节将介绍利用一个 PN 结构成的具有负阻特性的器件,即单结晶体管。

1. 单结晶体管的结构和等效电路

在一个低掺杂的 N 型硅棒上利用扩散工艺形成一个高掺杂 P 区,在 P 区与 N 区接触面形成 PN 结,就构成单结晶体管(unijunction transistor)。其结构示意图如图 3-29(a)所示,P 型半导体引出的电极为发射极 e; N 型半导体的两端引出两个电极,分别为基极 b_1 和 b_2 。单结晶体管因有两个基极,故也称为双基极晶体管。其符号如图 3-29(b)所示,即 N 型单结晶体管。如果将 P 型 N 型两种材料互换,那么形成 P 型单结晶体管如图 3-29(c)所示。本节所述的单结晶体管原理及应用均以 N 型单结晶体管为例。

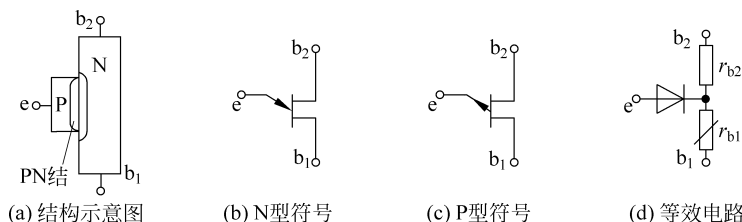


图 3-29 单结晶体管的结构示意图、符号和等效电路

单结晶体管的等效电路如图 3-29(d)所示,发射极所接 P 区与 N 区硅棒形成的 PN 结等效为二极管 D。N 型硅棒因掺杂浓度很低而呈现高电阻,二极管阴极与基极 b_1 之间的等效电阻为 r_{b1} ,二极管与基极 b_2 之间的等效电阻为 r_{b2} 。 r_{b1} 的阻值受 e- b_1 间电压的控制,所以等效为可变电阻。

2. 工作原理和特性曲线

单结晶体管的发射极电流 I_E 与 e- b_1 间电压 U_{EB1} 的关系曲线称为特性曲线。特性曲线的测试电路如图 3-30(a)所示,虚线框内为单结晶体管的等效电路。

当 b_2 - b_1 间加电源 U_{BB} ,且发射极开路时,A 点电位为

$$U_A = \frac{r_{b1}}{r_{b1} + r_{b2}} \times U_{BB} = \eta U_{BB} \quad (3-29)$$

式中 η 称为单结晶体管的分压比,其数值主要与管子的结构有关,一般在 0.5~0.9。基极 b_2 的电流为

$$I_{B2} = \frac{U_{BB}}{r_{b1} + r_{b2}} \quad (3-30)$$

当 e- b_1 间电压 U_{EB1} 为零时,PN 结承受反向电压,其值 $U_{EA} = -\eta U_{BB}$ 。发射极的电流 I_E 为二极管的反向电流,记作 I_{EO} 。若缓慢增大 U_{EB1} ,则 PN 结端电压 U_{EA} 随之增大;并由反向电压变成正向电压。若 U_{EB1} 继续增大,使 PN 结正向电压大于开启电压时,则 I_E 变为正向电流,从发射极 e 流向基极 b_1 。此时,空穴浓度很高的 P 区向电子浓度很低的硅棒的 A- b_1 区注入非平衡少数子;由于半导体材料的电阻与其载流子的浓度紧密相关,注入的载流子使 r_{b1} 减小;而且 r_{b1} 的减小,会使其压降减小,导致 PN 结正向电压增加, I_E 必然随之增

大,注入的载流子将更多,于是 r_{b1} 进一步减小;当 I_E 增大到一定程度时,二极管的导通电压将变化更多,于是 r_{b1} 进一步减小;当 I_E 增大到一定程度时,二极管的导通电压将变化不大,此时 U_{EB1} 将因 r_{b1} 的减小而减小,表现负阻特性。

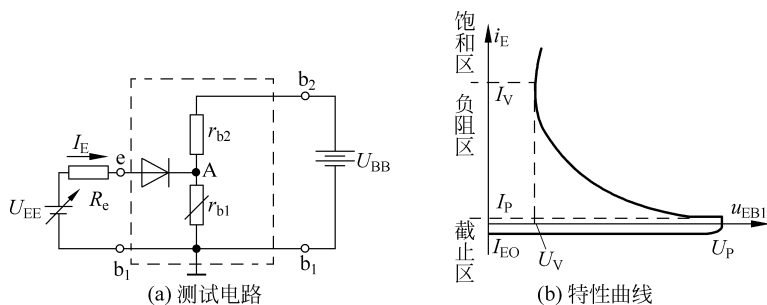


图 3-30 单结晶体管特性曲线的测试

所谓负阻特性,是指输入电压(即 U_{EB1})增大到某一数值后,输入电流(即发射极电流 I_E)愈大,输入端的等效电阻愈小的特性。

一旦单结晶体管进入负阻工作区域,输入电流 I_E 的增加只受输入回路外部电阻的限制,除非将输入回路开路或者将 I_E 减小到很小的数值,否则管子将始终保持导通状态。

单结晶体管的特性曲线如图 3-30(b)所示,当 $U_{EB1}=0$ 时, $I_E=I_{EO}$;当 U_{EB1} 增大至 U_P (峰点电压)时,PN 结开始正向导通, $U_P=U_A+U_{on}$, U_A 如式(3-29)所示, U_{on} 为 PN 结开启电压,此时 $I_E=I_P$ (峰点电流); $U_{EB1}=U_V$ (谷点电压), $I_E=I_V$ (谷点电流), U_V 取决于 PN 结的导通电压和 r_{b1} 的饱和电阻 r_s ;当 I_E 再增大,管子进入饱和区。单结晶体管的三个工作区域如图 3-30(b)所标注。

单结晶体管的负阻特性使其广泛应用于定时电路和振荡电路之中。

3. 应用举例

所谓振荡,是指在没有输入信号的情况下,电路输出一定频率、一定幅值的电压或者电流信号。图 3-31(a)所示为单结晶体管组成的振荡电路。

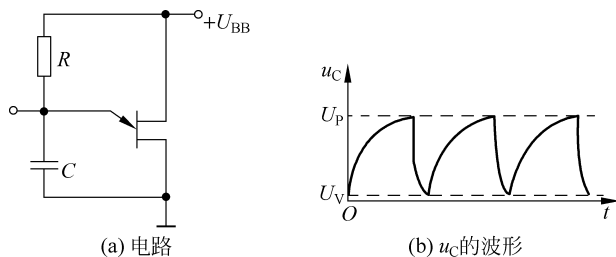


图 3-31 单结晶体管组成的振荡电路

在图 3-31(a)所示的电路中,当刚开始通电时,电容 C 上的电压为零,管子截止,电源 U_{BB} 通过电阻 R 对 C 充电,随时间增长电容电压 u_C (即 u_{EB1}) 逐渐增大;一旦 u_{EB1} 增大到峰点电压 U_P 后,管子进入负阻区,输入端等效电阻急剧减小,使 C 通过管子的输入回路迅速放电, u_E 随之迅速减小,一旦 u_{EB1} 减小到谷点电压 U_V 后,管子截止;电容又开始充电。上述过程循环往返,只有当断电时才会停止,因而产生振荡。由于充电时间常数远大于放电时

间常数,当稳定振荡时,电容上电压的波形如图 3-31(b)所示。

3.4.4 晶闸管及其应用电路

根据 PN 结外加电压时的工作特点,利用三个 PN 结构成的大功率可控整流器件,即晶体闸流管,简称晶闸管(thyristor)。也称为硅可控元件。多用于可控整流、逆变、调压等电路,也可作为无触点开关。

1. 结构和等效模型

由于晶闸管是大功率器件,一般均用在较高电压和较大电流的情况,常常需要安装散热片,故其外形都制造得便于安装和散热。常见的晶闸管外形有螺栓形和平板形,如图 3-32 所示。此外,其封装形式有金属外壳和塑料外壳等。

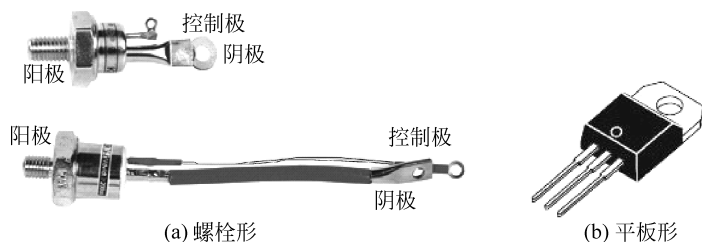


图 3-32 晶闸管的外形

晶闸管的内部结构示意图如图 3-33(a)所示,它由四层半导体材料组成,四层材料由 P 型半导体和 N 型半导体交替组成,分别为 P_1 、 N_1 、 P_2 和 N_2 ,它们的接触面形成三个 PN 结,分别为 J_1 、 J_2 和 J_3 ,故晶闸管也称为四层器件或 PNPN 器件。 P_1 区的引出线为阳极 A, N_2 区的引出线为阴极 C, P_2 区的引出线为控制极 G。为了更好地理解晶闸管的工作原理,常将其 N_1 和 P_2 两个区域分解成两个部分,使得 P_1 - N_1 - P_2 构成一只 PNP 型管, N_1 - P_2 - N_2 构成一只 NPN 型管,如图 3-33(b)所示;用晶体管的符号表示等效电路,如图 3-33(c)所示;晶闸管的符号如图 3-33(d)所示。

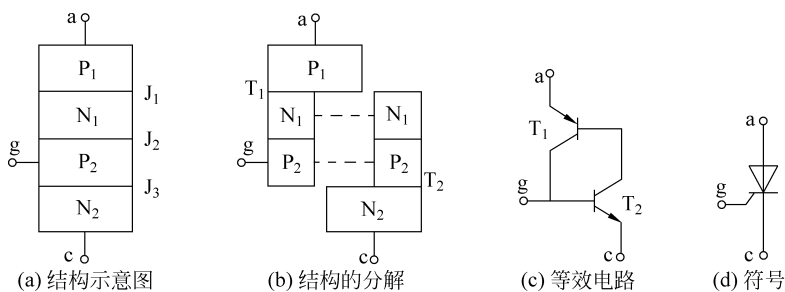


图 3-33 晶闸管的结构、等效电路和符号

2. 工作原理

当晶闸管的阳极 A 和阴极 C 之间加正向电压而控制极不加电压时, J_2 处于反向偏置,管子不导通,称为阻断状态。

当晶闸管的阳极 A 和阴极 C 之间加正向电压且控制极和阴极之间也加正向电压时,如图 3-34 所示, J_3 处于导通状态。若 T_2 管的基极电流为 I_{B2} , 则其集电极电流为 $\beta_2 I_{B2}$; T_1 管

的基极电流 I_{B1} 等于 T_2 管的集电极电流 $\beta_2 I_{B2}$, 因而 T_1 管的集电极电流 I_{C1} 为 $\beta_1 \beta_2 I_{B2}$; 该电流又作为 T_2 管的基极电流, 再一次进行上述放大过程, 形成正反馈。在很短的时间内 (一般不超过几微秒), 两只管子均进入饱和状态, 使晶闸管完全导通, 这个过程称为触发导通过程。晶闸管一旦导通后, 阳极和阴极之间的电压一般为 $0.6 \sim 1.2V$, 电源电压几乎全部加在负载电阻 R 上; 阳极电流 I_A 因型号不同变化范围为几十安至几千安。

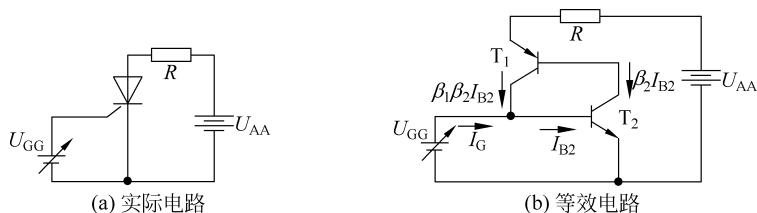


图 3-34 晶闸管的工作原理

晶闸管如何从导通变为阻断呢? 如果能够使阳极电流 I_A 减小到小于一定数值 I_H , 导致晶闸管不能维持正反馈过程, 管子将关断, 这种关断称为正向阻断, I_H 称为维持电流; 如果在阳极和阴极之间加反向电压, 晶闸管也将关断, 这种关断称为反相阻断。因此, 控制极只能通过加正向电压控制晶闸管从阻断状态变为导通状态; 而要使晶闸管从导通状态变为阻断状态, 则必须通过减小阳极电流或改变阳极-阴极电压极性的方法实现。

3. 晶闸管的伏安特性

以晶闸管的控制极电流 I_G 为参数变量, 阳极电流 i 与 A-C 间电压 u 的关系称为晶闸管的伏安特性, 即

$$i = f(u) |_{I_G} \quad (3-31)$$

图 3-35 所示为晶闸管的伏安特性曲线。

$u > 0$ 时的伏安特性称为正向特性。从图 3-35 所示的伏安特性曲线可知, 当 $I_G = 0$ 时,

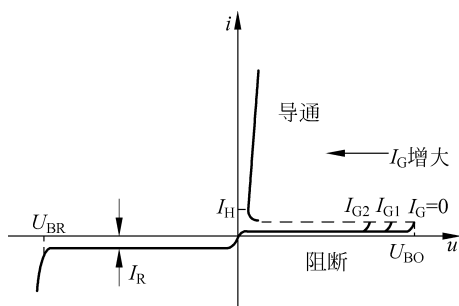


图 3-35 晶闸管的伏安特性曲线

u 逐渐增大, 在一定限度内, 由于 J_2 处于反向偏置, i 为很小的正向漏电流, 曲线与二极管的反向特性类似; 当 u 增大到一定数值后, 晶闸管导通, i 骤然增大, u 迅速下降, 曲线与二极管的方向特性类似; 电流的急剧增大容易造成晶闸管损坏。晶闸管正向临界导通时阳极-阴极电压 u 称为转折电压 U_{BO} 。正常工作时, 应在控制极和阴极间加触发电压, 因而 I_G 大于零; 而且 I_G 愈大, 转折电压愈小, 如图 3-35 所示。

$u < 0$ 时的伏安特性称为反向特性。从图 3-35 所示的伏安特性曲线可知, 晶闸管的反向特性与二极管的反向特性相似。当晶闸管的阳极和阴极之间加反向电压时, 由于 J_1 和 J_3 均处于反向偏置, 因而只有很小的反向电流 I_R ; 当反向电压增大到一定数值时, 反向电流骤然增大, 管子击穿。

4. 晶闸管的主要参数

(1) 额定正向平均电流 I_F : 在环境温度小于 40 摄氏度和标准散热条件下, 允许连续通过晶闸管阳极的工频 ($50Hz$) 正弦波半波电流的平均值。

(2) 维持电流 I_H : 在控制极开路且规定的环境温度下,晶闸管维持导通时的最小阳极电流。正向电流小于 I_H 时,管子自动阻断。

(3) 触发电压 U_G 和触发电流 I_G : 室温下,当 $u=6V$ 时使晶闸管从阻断到完全导通所需的最小控制极直流电压和电流。一般, U_G 为 $1\sim 5V$, I_G 为几十至几百毫安。

(4) 正向重复峰值电压 U_{DRM} : 控制极开路的条件下,允许重复作用在晶闸管上的最大正向电压。一般 $U_{DRM}=U_{BO}\times 80\%$, U_{BO} 是晶闸管在 I_G 为零时的转折电压。

(5) 反向重复峰值电压 U_{RRM} : 控制极开路的条件下,允许重复作用在晶闸管上的最大反向电压。一般 $U_{RRM}=U_{BO}\times 80\%$ 。

除以上参数外,还有正向平均电压、控制极反向电压等。

晶闸管具有体积小、重量轻、耐压值高、效率高、控制灵敏和使用寿命长等优点,半导体器件的应用从弱电领域,扩展到整流、逆变和调压等大功率电子电路中。

例 3-3 图 3-36(a) 所示为可控半波整流电路,已知输入电压 u_i 和晶闸管控制极的电压 u_G 波形如图 3-36(b) 所示;在阳极与阴极间电压适合的情况下, $u_G=U_H$ 时可以使管子导通;管子的导通管压降可以忽略不计。试定性画出负载电阻 R_L 上电压 u_o 的波形。

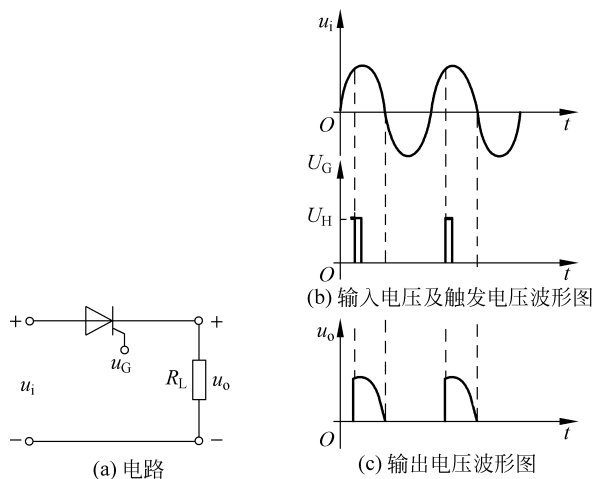


图 3-36 例 3-3 电路及波形图

解 当 $u_i < 0$ 时,不管 u_G 为 U_H 还是为 U_L ,晶闸管均处于截止状态。当 $u_i > 0$ 且 $u_G = U_H$ 时,在 u_G 的触发下,晶闸管导通。此时,即使 u_G 变为 U_L ,管子仍然维持导通状态。只有当 u_i 下降使阳极电流减小到很小时,管子才阻断;可以近似认为当 u_i 下降到零时,管子关断。若管子的导通管压降可忽略不计,在管子导通时, $u_o \approx u_i$ 。因此, u_o 的波形如图 3-36(c) 所示。

解题结论 晶闸管导通需要两个条件: ①有触发信号; ②满足正向导通电压条件。

本章小结

场效应管是利用改变外加电压产生的电场强度来控制其导电能力的半导体器件。它具有双极型三极管的体积小、重量轻、耗电少、寿命长等优点,还具有输入电阻高、热稳定性好、

抗辐射能力强、噪声低、制造工艺简单、便于集成等特点。在大规模及超大规模集成电路中得到了广泛的应用。

(1) 场效应管分类。按照结构的不同,场效应管分为结型和绝缘栅型两种类型,MOS管属于绝缘栅型。每一类型均有两种沟道,N沟道和P沟道,两者的主要区别在于电压的极性和电流的方向不同。MOS管又分为增强型和耗尽型两种形式。

(2) 场效应管工作原理。正确理解场效应管工作原理的关键在于掌握电压 u_{GS} 及 u_{DS} 对导电沟道和电流 i_D 的不同作用,并正确理解和掌握预夹断和夹断这两个状态的区别和条件。转移特性曲线和输出特性曲线描述了 u_{GS} 、 u_{DS} 和 i_D 三者之间的关系。与三极管相类似,场效应管有截止区(即夹断区)、恒流区(即放大区)和可变电阻区三个工作区域。在恒流区,可将 i_D 看成受电压 u_{DS} 控制的电流源。 g_m 、 U_P (或 U_T)、 I_{DSS} 、 I_{DM} 、 P_{DM} 、 $U_{(BR)DS}$ 和极间电容是场效应管的主要参数。

(3) 场效应管放大电路分析。在场效应管放大电路中,直流偏置电路常采用自偏压电路(仅适合于耗尽型场效应管)和分压式偏压电路。场效应管共源极及共漏极放大电路分别与晶体三极管共射极及共集电极放大电路相对应,但比晶体三极管放大电路输入电阻高、噪声系数低、电压放大倍数小。

(4) 特殊种类三极管原理与应用。特殊种类三极管主要指电力三极管 IGBT、晶闸管以及光电三极管。本章研究了它们的工作原理、应用场合。

习题

3.1 选择题。

1. 场效应管(单极型管)与晶体三极管(双极型管)相比,最突出的优点是可以组成_____输入电阻的放大电路。此外它还有噪声_____、温度稳定性_____、抗辐射能力_____等优于晶体三极管的特点。

A. 高 B. 低 C. 好 D. 强

2. 不定项选择题:开启电压 U_T 是_____的参数。夹断电压 U_P 是_____的参数。

A. 增强型 MOS 管 B. 结型场效应管 C. 耗尽型 MOS 管

3.2 填空题。

1. 场效应管有_____、_____和_____三个工作区。放大作用时,工作在_____。

2. 单结晶体管有_____个 PN 结,晶闸管有_____个 PN 结。

3.3 判断下列说法的正误,在相应的括号内画 T 表示正确,画 F 表示错误。

1. 场效应管仅靠一种载流子导电。 ()

2. 结型场效应管工作在恒流区时,其 u_{GS} 小于零。 ()

3. 场效应管是由电压即电场来控制电流的器件。 ()

4. 增强型 MOS 管工作在恒流区时,其 u_{GS} 大于零。 ()

5. $u_{GS}=0$ 时,耗尽型 MOS 管能够工作在恒流区。 ()

6. 低频跨导 g_m 是一个常数。 ()

3.4 试判断题图 3-37 所示的场效应管放大电路能否进行正常放大,并说明理由。

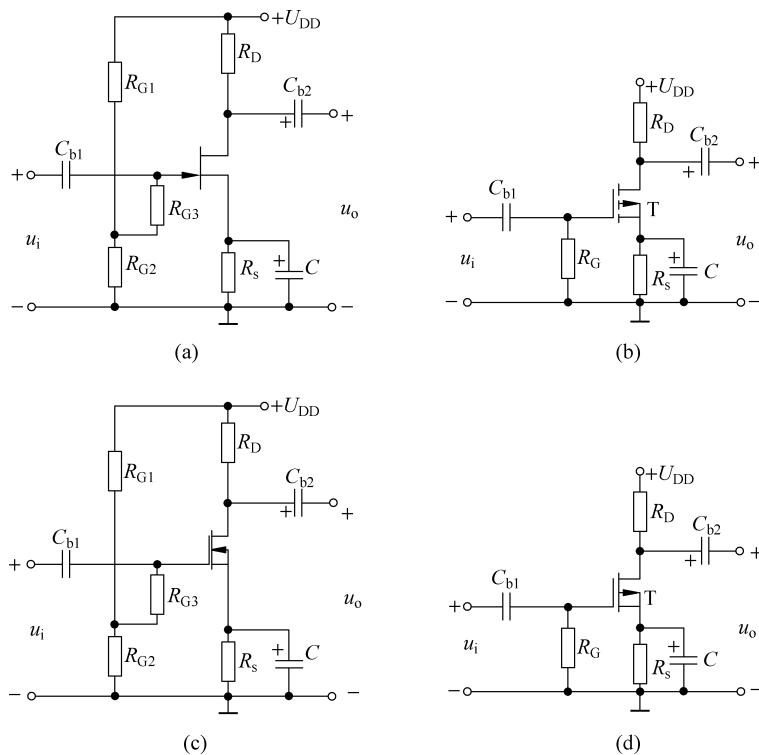


图 3-37 题 3.4 图

3.5 设图 3-38 中的 MOSFET 的 $|U_T|$ 、 $|U_P|$ 均为 1V, 问它们各工作在什么区?

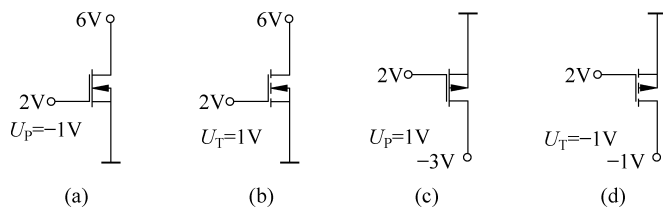


图 3-38 题 3.5 图

3.6 电路如图 3-39(a)所示, 图 3-39(b)是器件转移特性曲线, 求解电路的 Q 点、电压增益、输入电阻、输出电阻。

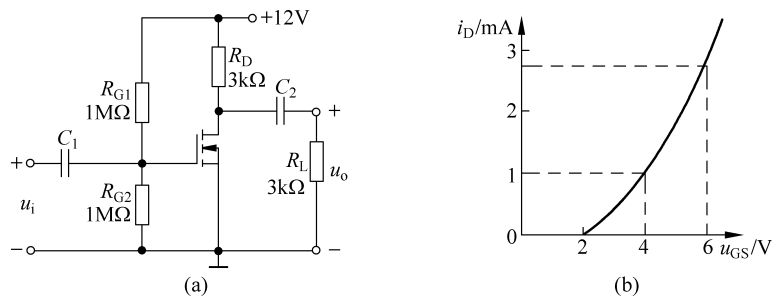


图 3-39 题 3.6 图

3.7 如图 3-40 所示,设场效应管的 g_m 、 r_d 很大;BJT 的电流放大系数为 β ,输入电阻为 r_{be} 。试说明 T_1 、 T_2 各属什么组态,求电路的电压增益、输入电阻、输出电阻。

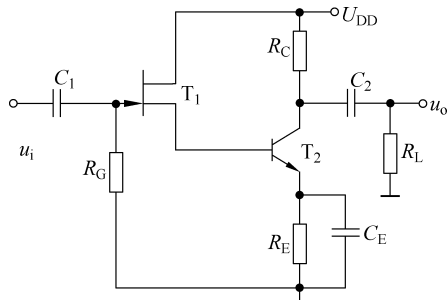


图 3-40 题 3.7 图

3.8 在图 3-41 所示的四种电路中, R_G 均为 $100\text{k}\Omega$, R_D 均为 $3.3\text{k}\Omega$, $V_{DD}=10\text{V}$, $V_{GG}=2\text{V}$ 。又已知: T_1 的 $I_{DSS}=3\text{mA}$ 、 $U_{GS(off)}=-5\text{V}$; T_2 的 $I_{DSS}=-6\text{mA}$ 、 $U_{GS(off)}=4\text{V}$; T_3 的 $U_{GS(th)}=3\text{V}$; T_4 的 $I_{DSS}=-2\text{mA}$ 、 $U_{GS(off)}=2\text{V}$ 。试分析各电路中的场效应管工作于放大区、截止区、可变电阻区中的哪个工作区?

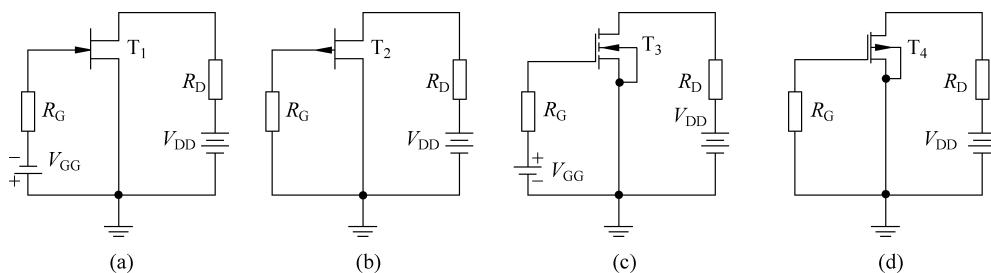


图 3-41 题 3.8 图

3.9 电路如图 3-42 所示。已知 $U_{DD}=30\text{V}$, $R_{G1}=R_{G2}=1\text{M}\Omega$, $R_D=10\text{k}\Omega$,管子的 $U_{GS(th)}=3\text{V}$,且当 $U_{GS}=5\text{V}$ 时 I_D 为 0.8mA 。试求管子的 U_{GSQ} 、 I_{DQ} 、 U_{DSQ} 。

3.10 电路如图 3-43 所示。设场效应管的跨导为 g_m , r_{ds} 的影响必须考虑,各电容器的电容量均足够大。试求该电路输出电阻 R_o 的表达式。

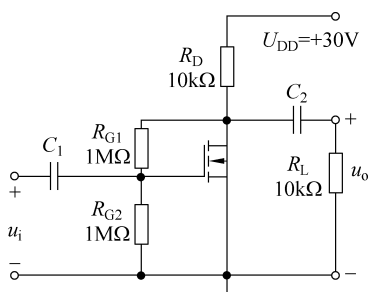


图 3-42 题 3.9 图

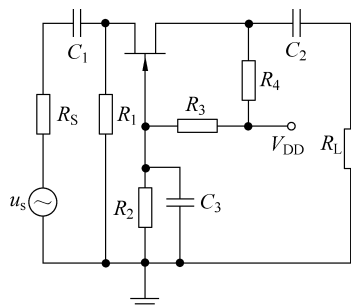


图 3-43 题 3.10 图