

JIEXINGCHANGXIAOYING JINGTIGUAN
DIANLU SHEJI YU YINGYONG

结型场效应 晶体管电路 设计 与应用

陈光增 林吉申 编著

福建科学技术出版社

福建省图书馆图书阅览室

前 言

结型场效应晶体管具有输入阻抗高、噪声低、动态范围大、频率特性好、电路设计灵活等许多优良特性，是一种比较理想的半导体器件，利用它能够实现普通双极型晶体管所无法构成的一些电路。即使在集成电路飞速发展的今天（具有上述独特性能）的结型场效应晶体管，再如能和集成电路加以配合使用，将可以更进一步提高电路某些性能。所以，结型场效应晶体管在家用电器、仪器仪表、医用仪器、通讯设备、自动控制、传感器技术等许多领域中获得非常广泛的应用。

目前，有关晶体管电路技术的书籍很多，但在国内还缺乏比较全面、系统地介绍结型场效应晶体管电路及其应用的书籍，而这正是读者迫切需要的。本书从实用的角度出发，叙述了结型场效应晶体管的原理和特性；系统地介绍了它在直流放大电路、低频电路、高频电路、调制和解调电路以及其他特殊电路中的应用；讨论了典型电路的设计方法，提供了许多有实用价值的应用电路和资料。旨在帮助电子技术人员深入认识结型场效应晶体管所具有的各种特性，并在电路设计中充分加以利用，使电路性能提高。

结型场效应晶体管除了上述优点外，还因其热稳定性好，不易烧坏，电路简单，性能优异，因此，对于电子爱好者实验制作是很适用的。为了满足这方面的需要，在本书第七章专门介绍了结型场效应晶体管使用的基本知识和简易制

作电路，供读者实践时参考。

书中虽然主要讨论结型场效应晶体管，但是应用电路原理也适用于MOS场效应晶体管。本书可供从事电子技术和仪器仪表工作的技术人员、工人阅读，也可供大、中专院校有关专业师生及广大电子爱好者阅读和参考。

本书第一、三、四、六章由林吉申编著，第二、五、七章及附录由陈光增编著。在编写过程中，承蒙福州大学郭定琪老师对全书做了仔细的审核，高级工程师林浩同志审定了全部书稿，叶顺能同志为本书描绘了插图。在此，一并表示衷心地感谢。

由于我们水平有限，加之时间较仓促，书中缺点和错误一定不少，恳请读者批评指正。

编著者

一九八六年

目 录

第一章 结型场效应管的原理和特性	1
第一节 结型场效应管的结构和种类.....	2
第二节 结型场效应管的工作原理.....	5
第三节 结型场效应管的特性曲线.....	10
第四节 结型场效应管的参数.....	15
第五节 偏置电路的设计.....	22
第六节 基本放大电路及其特性.....	35
第二章 低频电路	52
第一节 阻容耦合放大电路的增益和频率特性.....	52
第二节 噪声和失真系数.....	59
第三节 低频放大电路的设计.....	74
第四节 低噪声放大电路设计实例.....	79
第五节 超高输入阻抗电路.....	87
第六节 高保真均衡放大器.....	90
第七节 音调控制电路.....	97
第八节 纵型场效应管和功率放大器.....	101
第三章 直流放大电路	106
第一节 直流放大电路的类型、要求.....	106
第二节 主要参数的温度特性及零温度系数工作点.....	108
第三节 单端式直流放大电路.....	114
第四节 单端式直流放大电路设计实例.....	118
第五节 差动式直流放大电路.....	122

第六节	差动放大电路的设计实例	133
第七节	应用实例	135
第四章	调制式直流放大电路	145
第一节	结型场效应管的开关特性	147
第二节	调制器和解调器	151
第三节	调制器的尖峰电压	163
第四节	抑制尖峰电压的调制器	168
第五节	调制式直流放大电路实例	170
第六节	双通道调制式直流放大电路	174
第五章	高频电路	183
第一节	场效应管的高频参数和等效电路	185
第二节	高频放大电路的增益和稳定性	190
第三节	高频放大电路的设计考虑	197
第四节	高频场效应管的选用	204
第五节	高频放大电路设计实例	208
第六节	混频器	218
第七节	调频调谐器	223
第六章	特殊电路及其应用	227
第一节	电压控制电阻电路	227
第二节	模拟开关电路及应用	243
第三节	定时电路	258
第四节	恒流电路及其应用	265
第五节	配合集成电路使用的电路	285
第六节	有源滤波器电路	293
第七章	场效应管的简易测试和实验制作电路	300
第一节	采用结型场效应管的优越性和使用注意事项	300
第二节	用万用表检测结型场效应管	303

第三节	场效应管收音机.....	306
第四节	场效应管电唱机.....	310
第五节	定时器.....	311
第六节	无稳态多谐振荡器的闪光电路.....	315
第七节	场效应管伏欧表.....	316
第八节	场效应管Q表.....	318

附录

一、常用结型场效应管用途一览表.....	324
二、常用结型场效应管型号特征一览表.....	325
三、常用中外结型场效应管的主要技术参数与代换对照表...	326
四、倍数和分数的符号.....	336
五、实用电平表示.....	336

第一章 结型场效应管的原理和特性

场效应晶体管 (Field Effect Transistor) 简称为场效应管，通常用缩写词FET表示。(本书均用简称)。顾名思义，场效应管是利用电场效应的原理来进行工作的一种半导体器件。早在本世纪三十年代就有人提出场效应管的基本原理和模型的设想，但限于早期半导体工艺不够成熟，未能实现。直到二十世纪五十年代末随着晶体管制造技术的进步，特别是硅平面工艺的出现，各种类型场效应管才陆续问世，六十年代进入实用阶段。十几年来随着场效应管的新器件研制和工艺水平的提高，场效应管在电子学领域已获得广泛的应用，成为十分重要的半导体器件之一。

场效应管按其结构和制造工艺一般可以分为两大类：结型场效应管，通常用英文缩写词“JFET”表示；绝缘栅场效应管，通常用缩写词“IGFET”表示。此类中又以二氧化硅为栅介质的“金属——二氧化硅——半导体”场效应管最为流行，它用缩写词“MOS FET”表示。这两类场效应管工作原理相同，结构各异，性能大同小异。所以，本书虽然介绍结型场效应管，但基本内容也适用于MOS场效应管。此外，正如后面要讲到的那样，场效应管是电压控制器件，是靠单一的多数载流子工作的，所以又称为“单极型晶体管”，而普通晶体管是电流控制器件，是靠多数载流子及少数载流子两种类型载流子参加工作的，所以又称为“双极型晶体管”。

为了区别起见，在本书中把普通的双极型晶体管简称为晶体管，这点请读者注意。

第一节 结型场效应管的结构和种类

本节我们将对结型场效应管的内部结构进行讨论，进而了解其工作原理，熟悉其电气性能，以便将管子有效且可靠地运用在各种电路上。

一、结构

目前大量生产和使用的结型场效应管是采用外延扩散法工艺制造的，它的结构剖面图，见图1—1。进一步简化，可

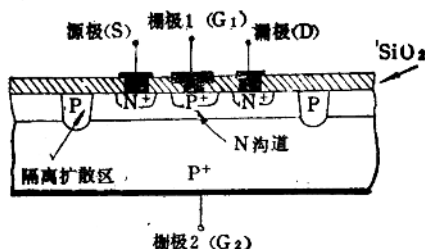


图1—1 N沟道结型场效应晶体管结构示意图

以画成如图1—2所示的工作原理图。从图1—1可见，结型场效应管主要由如下四部分组成：

源极——载流子由此电极注入，是电流的发源电极，用符号S (Source) 表示。

漏极——载流子由此电极流出，是电流的漏泄电极，用符号D (Drain) 表示。

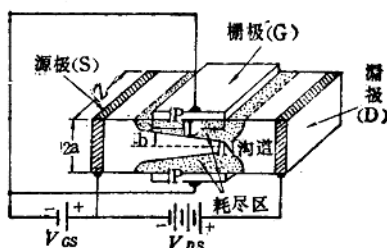


图1—2 简化结型场效应管理论模型和工作原理图

沟道—源、漏间的载流子通路，是沟通电流的通道。

栅结、栅极—沟道两侧的两个PN结及其电极。根据加在此电极上的电压来调节源漏之间沟道的大小，进而控制电流流动，此PN结及电极起着好象控制人走动的栅栏作用，所以称之为“栅结”和“栅极”，并用符号G (Gate) 表示。

可是要指出，源极和漏极对于沟道都是非整流的欧姆电极，一般是完全一样的对称结构，所以源、漏可以互换使用。

和大家熟悉的电子管、晶体管相比，上述的源极S 相当于电子管的阴极K 或者晶体管的发射极E；漏极D 相当于电子管的屏极A 或者晶体管的集电极C；栅极G 相当于电子管的栅极G 或者晶体管的基极B。

二、分类

正象晶体管有PNP和NPN两种类型一样，根据沟道区的半导体材料是N型还是P型，结型场效应管也可分为N沟道结型场效应管和P沟道结型场效应管。它们的电路符号分别见图1—3(a)、(b)、(c)和(d)、(e)、(f)。和其他类型的晶体

管一样，箭头从P型指向N型。N沟道结型场效应管和P沟道结型场效应管不同之处，仅在箭头指向不同，即通过栅极箭头的方向指明该管在结构上的特点。我国的习惯画法是(a)，(d)；日本工业标准规格(JIS)中采用(b)、(e)的表示法，把栅端的箭头偏向源一方。图1—1和图1—2的管子就是N沟道结型场效应管(本书若没有特别说明，结型场效应管均指N沟道结型场效应管)。

根据栅极数目不同，场效应管又分为单栅和双栅两种。其中双栅的，就是从管内两个PN结分别引出两个栅电极，成为栅极 G_1 、 G_2 ，构成了四端的器件，所以一般叫做场效应四极管(Tetrode-Connected FET)。这样可以根据需要从 G_1 或 G_2 灵活输入控制信号，其电路符号如图1—3(g)~(l)所示。

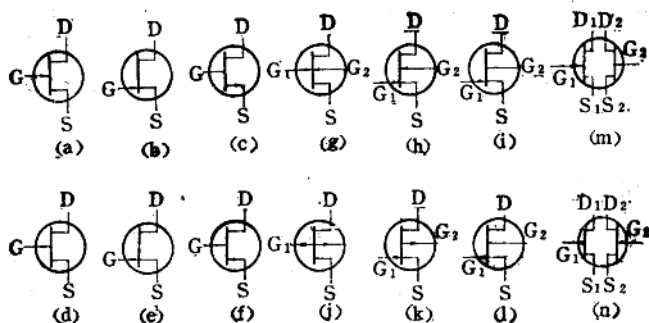


图1—3 电路符号

若按照一个管壳内管子个数不同，又可以分为单管和对管。对管是把两个性能相同或极为接近的管子制作在一起，并使二者的电性能保持互相独立。此管又称为孪生管，它很

适用于差动式电路。其电路符号见图1—3 (m)(n)。

从封装形式上看,结型场效应管又可分为金属封装、塑料封装和陶瓷封装三种。它们的外型及管脚排列如图1—4所示。图中(a)为金属型外形, (b)~(e)为管脚排列;

(b)为3DJ2~8的管脚排列; (c)为3DJ9; (d)为双栅的4DJ2的管脚排列; (e)为对管6DJ6~6DJ8的管脚排列, 括号内为3DJ5、3DJ15、3DJ45等管脚排列; (f)为塑封型外形; (g)为陶瓷环氧型外形。

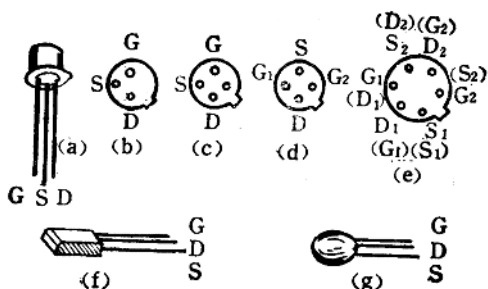


图1—4 结型场效应管管脚排列和外形

第二节 结型场效应管的工作原理

为了理解结型场效应管的工作原理及其特性,必须先了解作为器件基础的“耗尽区”。

一、耗尽区

我们知道在同一块半导体中,用某种工艺使一面掺入受主杂质成为P型半导体区,使另一面掺入施主杂质成为N型

半导体区。这样在两种类型的半导体界面处，由于载流子浓度两侧不一样，载流子分别向对方扩散，P型区一侧的多数载流子——空穴向对方（N区）扩散留下不可动的受主杂质离子，形成带负电荷的空间电荷区，而在N型区一侧，则由于其多数载流子——电子向对方（P区）扩散留下不可动的施主杂质离子，形成带正电荷的空间电荷区。此空间电荷区的电场阻止双方多数载流子继续扩散，当达到平衡时就在界面两侧形成了一定宽度的空间电荷区，即所谓“PN结”，如图1—5（a）。空间电荷区中载流子（电子、空穴）基本上耗尽，其性能类似于绝缘体，所以又被称为耗尽区。

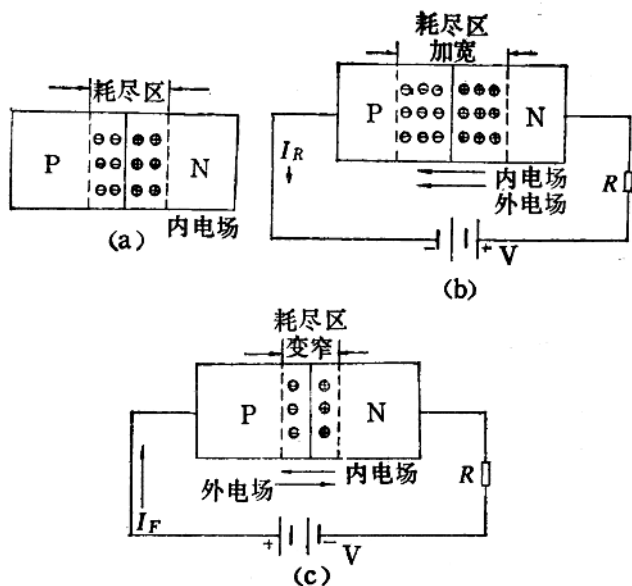


图1—5 PN结耗尽区随外加电压变化情况

处在交界面附近的PN结中离化杂质原子的极性相反,但数量相同。当N、P区的掺杂浓度一样时,则交界面两边的耗尽区宽度相等。若P区掺杂浓度大于N区,为了使两边包含相同数量的杂质离子,则伸入N区的耗尽区要宽些。相反地,若N区掺杂浓度大,则伸入P区的耗尽区要宽些。

现来分析PN结两边施加外部电压的情况。当加反向电压(即外部电压负极加在P区,正极加在N区),外加电压的电场几乎全部叠加在耗尽区上,相应地耗尽区必须增加结面两侧的离子层,以抵消此外加电场,所以加反向电压时耗尽区必然向N型区和P型区扩展,如图1—5(b)所示。同时若N型区和P型区的杂质浓度不同,则主要向杂质浓度小的区域扩展。并且反向电压越大,耗尽区就越宽。这时PN结呈现很大的电阻,PN结处于截止状态,流过极小的反向电流 I_R 。

当PN结加正向电压(即外部电压正极接P区,负极接N区),同理耗尽区变窄,PN结呈现很小的电阻,处于导通状态,流过很大的正向电流 I_F ,如图1—5(c)所示。

结型场效应管正是根据耗尽区的宽度随着PN结外加电压的变化而改变的性质巧妙地工作。

二、工作原理

结型场效应管接上图1—2所示的电源。

首先考虑栅极—源极短接,即栅、源电压 $V_{GS}=0$ 的情况。漏、源间加上电压 V_{DS} ,如图1—6(a)所示漏、源间电流 I_D (称漏极电流)在沟道中沿着平行于栅—沟道PN结(即栅结)结面从漏极D流向源极S。由于沟道有一定电阻,漏极电流 I_D 沿着沟道产生电压降。 I_D 引起的电压降给栅—沟道PN结加上一反向偏置,并且沿着沟道方向的不同位置(因电

压降不同)，使反向偏置电压越靠近漏极越大。由于设计制造管子时就已经使沟道的杂质浓度远小于栅区，所以栅—沟道PN结的耗尽区主要是在沟道范围内，并且越靠近漏极的地方越宽，使沟道导电部分呈“楔形”。

漏、源电压 V_{DS} 从低逐渐升高，当 V_{DS} 还小于某一电压值时，栅PN结的耗尽区宽度比沟道宽度还小得多，结型场效应管只作为“体电阻”工作。从而使漏极电流 I_D 随着漏源电压 V_{DS} 成正比增加，但是随着 V_{DS} 的升高， I_D 增加，沿着沟道的电压降亦增加，结果栅PN结反向偏置电压增大，耗尽区的靠近漏极一端逐渐互相靠近，由于沟道导电部分宽度变窄，其等效直流电阻增大，使漏极电流 I_D 增加逐渐缓慢。当 V_{DS} 电压值进一步上升，耗尽区先端靠近的范围就沿着源极方向延伸，此时 I_D 几乎不再随着 V_{DS} 增大，而是趋于饱和值。即结型场效应管进入饱和状态。称这时的漏极电流 I_D 为饱和电流。图1—6（b）表示了 $V_{GS}=0$ ，漏极电流 I_D 随漏、源电压 V_{DS} 变化的情况。

如果，栅、源间接上外加反向偏置电压，即 $V_{GS}<0$ ，如图1—6（c）所示。由于栅PN结的耗尽区更加展宽，沟道更加缩窄，所以随着栅、源反向电压 V_{GS} 增加，在比较小的漏、源电压 V_{DS} 管子就开始进入上述的饱和状态，并且饱和电流值也减小。当 V_{GS} 进一步变负时，耗尽区更进一步变宽，以至沟道两侧的耗尽区完全缝合，沟道被夹断消失了，这时 I_D 趋于零。图1—6（d）表示了结型场效应管当 V_{GS} 变化时， I_D 与 V_{DS} 的关系。

假如，在栅极回路中接上信号电压，当信号电压是负值，则使栅PN结上反向偏压增加，耗尽区展宽，沟道电阻增加，漏极电流减小，当信号电压为正值时，则使反向偏压

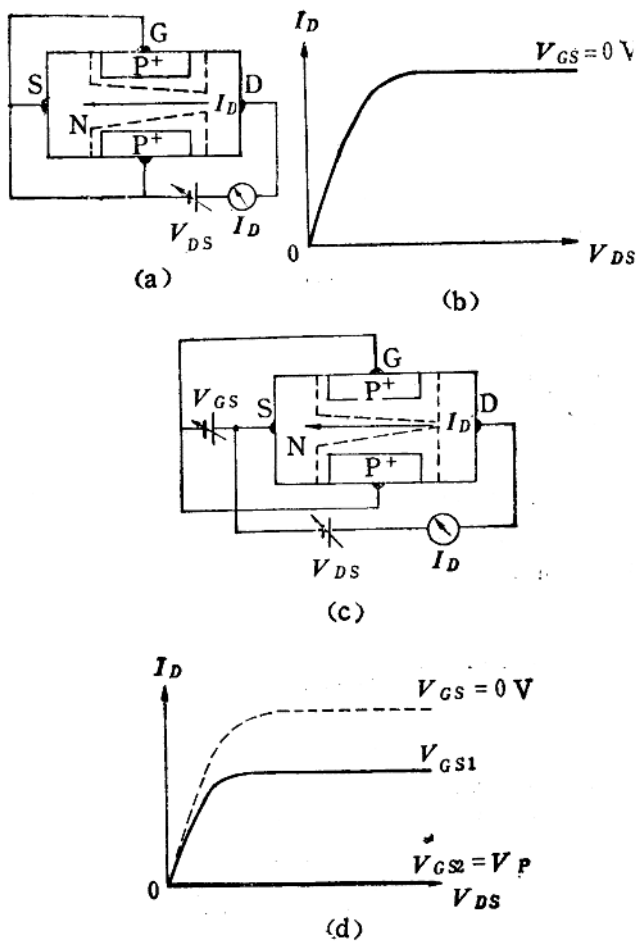


图1—6 在不同电压组合下耗尽区变化情况及伏安特性曲线

减小，耗尽区缩窄，沟道电阻减小，漏极电流增加。

综上所述，无论是漏、源电压 V_{DS} 的变化，还是栅、源 V_{GS} 电压的变化都是通过改变耗尽区的宽度改变沟道的几何形状，从而改变其沟道电阻来达到控制漏极电流 I_D 的目的，这就是结型场效应管的基本工作原理。显然，场效应器件也正是由于它是通过改变垂直于导电沟道的电场强度来控制沟道的导电能力，调制通过沟道的电流这一“电场效应”原理而得名的。从上面所说，也可以看到它的漏极电流是由半导体中多数载流子所输运，而少数载流子实际上是没有作用。在N沟道结型场效应管中为多数载流子——电子参加导电，在P沟道结型场效应管中则为多数载流子——空穴参加导电，所以场效应管又称为单极型晶体管，而普通晶体管又称为双极型晶体管。

上面说明，虽然是N沟道结型场效应管的情况，但对于P沟道结型场效应管除供电电压的极性相反之外，其工作原理完全相同。

第三节 结型场效应管的特性曲线

如同晶体管一样，场效应管的特性也可以用特性曲线、解析式以及参数等三种方式来描述。

说明场效应管的静态特性，常用输出特性和转移特性两种曲线。图1—7(a)的右半边和左半边分别为结型场效应管的典型输出特性和转移特性曲线。为了便于与其他有源器件比较，图1—7(b)、(c)、(d)。分别给出晶体管、真空三极管、真空五极管的典型静态特性曲线。

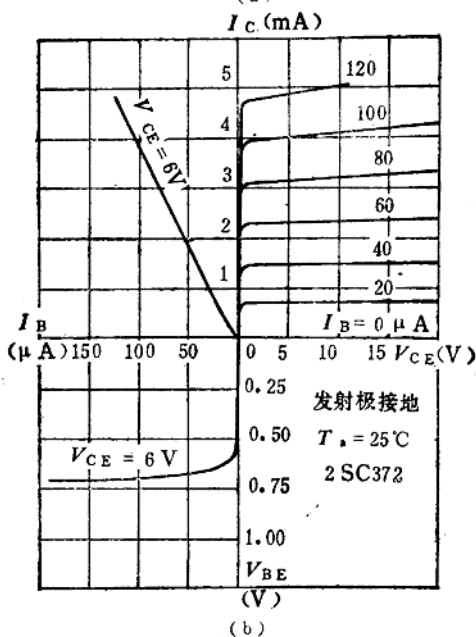
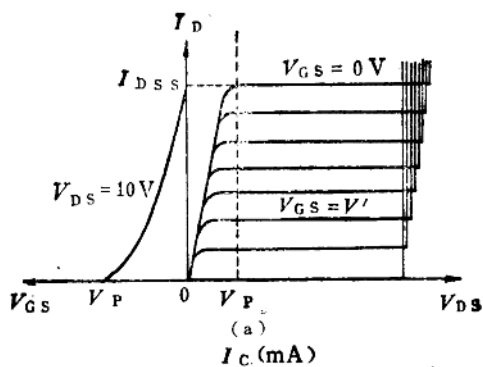


图1-7 结型场效应晶体管、晶体管、真空三极管、真空五极管的静态特性