

结型场效应晶体管

原理与应用

国防工业出版社

結 型 場 效 应 晶 体 管

原 理 与 应 用

[美] P. E. 托 德 著

上海无线电十四厂 译

國防工業出版社

1970

内 容 简 介

结型场效应晶体管，是一种新颖的半导体器件。它既有
一般晶体管的优点，又有真空管的电学特性。它与金属-氧
化物-半导体场效应器件相比，还有其优异的性能。目前这
种器件已广泛应用于各种电子设备中。

本书共有十四章，叙述结型场效应晶体管的基本原理、
参数及其测量。并详细介绍了结型场效应晶体管在交流放大
器、直流放大器、有源滤波器、源极跟随器、斩波器、电压
可调电阻、定时电路、振荡器等方面应用的设计原理及设计
实例。每章还附有习题。

本书虽然是讨论结型场效应晶体管，但其多数电路和应
用原理也适用于金属-氧化物-半导体场效应晶体管。

本书可供电子工业战线上的广大工人、革命干部和革命
科技人员参考。

本书系根据1968年美国出版的 Junction Field-Effect
Transistors (Carl David Todd, P. E. 著) 一书译出。

结型场效应晶体管

原 理 与 应 用

上海无线电十四厂 译

国外电子技术编辑部 校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张 7⁵/8 190千字

1970年9月第一版 1970年9月第一次印刷

统一书号：15034·1217 定价：1.00元

毛 主 席 语 录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我們的方針要放在什么基点上？放在自己力量的基点上，叫做自力更生。

我們不能走世界各国技术发展的老路，跟在別人后面一步一步地爬行。我們必須打破常規，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期內，把我国建設成为一个社会主义的現代化的強国。

毛 主 席 语 录

打破洋框框，走自己工业发展道路。

我国人民应该有一个远大的规划，要在几十年内，努力改变我国在经济上和科学文化上的落后状况，迅速达到世界上的先进水平。

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的經驗，我们需要的是这样一种态度。

前 言

在毛主席无产阶级革命路线的指引下，我国人民以豪迈的跃进步伐跨入了伟大的七十年代。当前一个工农业生产大跃进的新高潮已经出现，形势大好。电子工业战线也是一派欣欣向荣的革命景象，一个大破电子工业“神秘论”、“特殊论”，走我国自己发展电子工业道路的群众运动，已经在全国轰轰烈烈地展开。

伟大领袖毛主席教导我们：“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。”“中国应当对于人类有较大的贡献。”我国电子工业战线上的广大工人、革命干部和革命技术人员，正以无比高昂的战斗姿态，为实现毛主席的伟大教导，为在我国进行一次人类历史上新的工业革命而辛勤地劳动着！

遵循伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，为适应电子工业蓬勃发展的需要，我们翻译了《结型场效应晶体管原理与应用》一书，供广大工人、革命干部和革命技术人员参考。

结型场效应晶体管，是一种依 $p-n$ 结反向偏置而调制沟道电导的电压控制器件。它既有一般固体器件的重量轻、体积小、耗电省、寿命长等优点，又有输入阻抗高、级间可以直接耦合等五极真空管的电学特性。它与以金属-氧化物-半导体场效应晶体管为代表的表面型场效应晶体管相比，还具有噪声低、工作稳定和抗辐射能力强等一系列极为重要的优点，因而它是一种比较理想的半导体器件。

遵照毛主席“对于外国文化，……应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化”的伟大教导，我们对原书内容作了部分删节。希望革命同志们以毛泽东思想为武器，根据我国

具体情况，批判地吸收对我们有益的东西。

本书译稿承国外电子技术编辑部校阅，在此表示谢意。

最后，应当指出，对原书中的一些错误，虽经我们作了校正和删节，但由于我们毛泽东思想学得不够，业务水平有限，所以不妥之处甚至错误在所难免，希望革命同志们批评指正。

上海无线电十四厂革命委员会

一九七〇年七月

目 录

第一章 场效应基本原理	9
1 基础理论	9
2 实际的场效应晶体管	14
3 场效应晶体管特性	16
4 场效应晶体管的主要特点	18
5 场效应晶体管的应用	20
6 金属-氧化物-半导体场效应晶体管	21
第二章 场效应晶体管参数及其测量	27
1 通用符号	27
2 特性曲线	29
3 直流参数	38
4 小信号交流参数	43
5 R_{fs} 测量	46
第三章 交流放大器	59
1 偏置问题	59
2 基本的交流放大器	64
3 外加反馈	67
4 对场效应晶体管参数变化的敏感度	68
5 失真	68
6 自动增益控制	70
7 最大入端电阻的获得	72
8 低噪声放大器	73
9 实用的放大器	74
第四章 场效应晶体管有源滤波器	78
1 开环应用	78
2 反馈的安排	85
3 测试结果	87
4 无电抗的滤波器	89
第五章 直流放大器	94
1 温度对场效应晶体管直流参数的影响	94

2	简单的直流放大器	98
3	场效应晶体管差动放大器	101
4	场效应晶体管和双极晶体管的组合	102
5	静电计型的电路	104
6	模拟存储电路	106
第六章 场效应晶体管源极跟随器		110
1	交流分析	110
2	偏置	112
3	入端阻抗的提高	117
4	直流源极跟随器	119
5	选择合适的场效应晶体管	122
第七章 场效应晶体管和双极晶体管组合的跟随器电路		126
1	接有一级放大器的场效应晶体管源极跟随器	126
2	复合跟随器	129
3	入端电容的降低	136
4	直流放大器	138
第八章 场效应晶体管电压可调电阻		141
1	理论概述	141
2	非对称的电压可调电阻	142
3	对称的电压可调电阻	146
4	电压可调电阻的应用	148
第九章 斩波器开关		153
1	场效应晶体管开关	153
2	斩波器的型式	155
3	误差来源	160
4	瞬态尖峰信号	165
5	斩波放大器	169
6	斩波器的其他应用	170
7	小结	172
第十章 场效应晶体管定时电路		175
1	基本定时电路	176
2	场效应晶体管混合型单稳态电路	178
3	非稳态定时电路	181
4	时延电路	184
第十一章 射频应用		190
1	射频电路对场效应晶体管的要求	190

2	中和的共源极放大器	192
3	共栅极放大器	192
4	共源共栅放大器	193
5	场效应四极管	195
6	混频电路	196
7	射频振荡电路	196
第十二章 负阻电路		199
1	稳流型负阻电路	199
2	稳压型负阻电路	202
3	负阻场效应晶体管	206
第十三章 光敏场效应晶体管		216
1	p-n 结光敏二极管	216
2	光敏场效应晶体管的特性	218
3	基本光敏场效应晶体管的工作原理	220
4	光敏场效应晶体管的应用	221
第十四章 场效应晶体管特种电路		229
1	数字电路	229
2	振荡器	233
3	场效应晶体管的并联特性	234
4	稳流器	236

第 一 章

場效应基本原理

任何器件，我们对它理解得愈深刻，就愈能充分利用其特性，同时也能克服因器件本身的缺点而在设计中所造成的困难。实际上，真空管、普通结型晶体管和場效应晶体管（FET）[●]都是这样，然而，对于电路设计者说来，場效应晶体管却是一种比较新颖的器件。

本章的目的就是给制造和应用場效应晶体管的有关人员提供必备的基础知识，以便能够更加充分地利用場效应晶体管的特性，以及更好地了解该器件在工作时的性状。本书在叙述中没有繁冗的理论分析和数学推导。

1 基 础 理 論

每个反向偏置的 $p-n$ 结中，耗尽层的产生及其控制就是場效应晶体管的基本工作机理。

1) 耗尽层的实质

首先，讨论如图 1-1 (a) 所示的最简单 $p-n$ 结，该结由一个 p 区和一个 n 区组成。 n 区的原子具有可导电的过剩电子，而 p 区则具有过剩的空穴，它也可以产生电流。

如图 1-1 (b) 所示，把反向电压加到 $p-n$ 结上并使之稳定，结果就有微小的电流流动而使过剩的电子和空穴重新排列。带正电的空穴向电源的负端移动，带负电的电子则向电源的正端移动。结果，就在 $p-n$ 结交界面附近形成了大部分载流子均被移走的区

● 系Field-Effect-Transistor的缩写。——译者

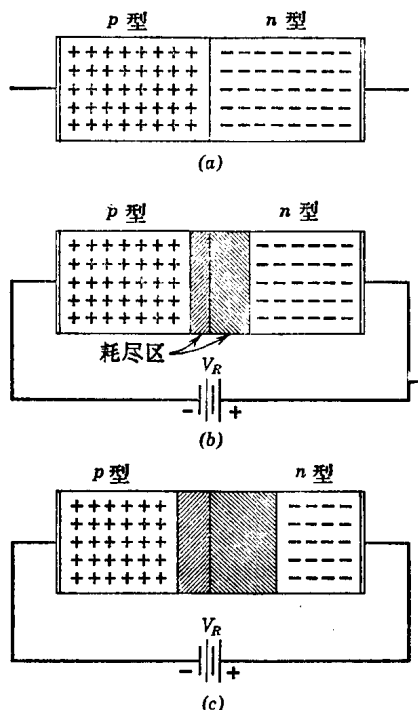


图1-1 用以说明产生耗尽区的简化二极管

(a) 无偏压的情况; (b) 施加反向偏压的情况;
(c) 偏压增大的情况。

p-n 结上所加的反向电压愈大, 耗尽区就愈向半导体材料的体内延伸。图 1-1(c) 示出增加电源电压所得到的结果。

2) 简化的场效应晶体管结构

未把耗尽层的基本原理应用于场效应晶体管之前, 让我们先讨论一根两端均为欧姆接触, 即非整流接触的 n 型半导体材料棒, 如图 1-2(a) 所示。与任何其他材料一样, 在两个端电极之间半导体棒总有一定的电阻 R 。 R 是材料电阻率 ρ 、样品长度 L 、宽度 W 和厚度 T 的函数, 其关系式为:

$$R = \frac{\rho L}{WT} \quad (1-1)$$

域。实际上, 结两边的 p 区和 n 区都是如此, 被移走载流子的 p-n 结近邻区域称为“耗尽区”。

在达到稳定状态所需的很短时间之后, 实际上有微小的电流流动, 所以电子从 n 区移动的同时, 必有等量的空穴从 p 区移动。因此, 耗尽区离开结而向外延伸的距离就为载流子相对浓度的函数。对于图 1-1 所示的那种情况, 假定 p 区每立方厘米中所具有的空穴多于在 n 区每立方厘米中的电子数, 即为了使 n 区的电子数等于 p 区的较小体积中所具有的空穴数, 耗尽区必然要向 n 区多延伸一些。

因此，只要改变上式右边四个变数中的任何一个或者多个，就可以改变半导体棒的电阻，从而改变其电流 I_1 。

现在，假定在半导体棒的上面制作一个薄层 p 型区，如图 1-2 (b) 所示。要达到这个目的，可以采用合金、扩散或者外延生长的方法。结果两区之间就形成了 p - n 结。如上节所述，施加在 p 和 n 材料之间的反向电压将产生两个耗尽区。

图 1-2 (a) 棒中的电流主要是由 n 型材料中的过剩电子产生的。假如把这些电子（多数载流子）的浓度减小，则材料的电阻率就要升高。实际上，用耗尽区移去过剩电子会使材料变成非导电的。

暂且忽视 p 区的存在，可以看到，加在半导体棒端电极之间的电压会产生电流，因而沿棒的长度上就存在着电位梯度。相对于左端（接地）而言，愈往右端电压愈正。若把 p 区也接地，则 p - n 结上就存在着非均匀的反向偏压，而 p 区右端的反向偏压为最大值。

如前所述，反向偏置的 p - n 结在 p 和 n 材料的两边都存在耗尽区，而耗尽区内，其多数载流子被移走，并且反向偏压愈大，耗尽区就愈向材料内部扩展。

棒长度上的电压降所产生的反向偏压同样会产生这种耗尽

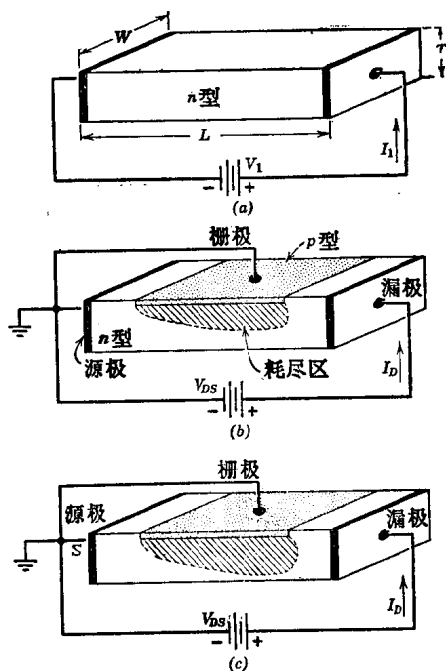


图1-2 以简单的结构来说明场效应原理

(a) 半导体棒；(b) 棒上加一个栅极；

(c) 电压增大的情况。

区。如果 p 型材料的电阻率比棒本身的 n 型材料小得多，则延伸到 n 材料内的耗尽区比延伸到 p 材料内的耗尽区要大得多。为了简明起见，略去图 1-2 中 p 材料内的耗尽区。

从图中可以看到，棒中耗尽区的形状似乎像一个从左到右逐渐增大的楔形。由于耗尽区内材料的电阻率显著地升高，因而从 p 区的左端向右端移动时，半导体棒中导电部分的有效厚度愈来愈小。

综上所述，半导体棒的总电阻，因有效厚度的变小而增大。如图 1-2(c) 所示，若进一步增高棒端之间的电压，耗尽区就继而向棒内扩张，从而，其电阻进一步增大。若连续不断地增高棒的端电压，则必然会达到一种极限情况，即耗尽区扩张延伸到棒的整个通道而使导电的有效厚度几乎减到零。进而再增高电源电压耗尽区可扩张到所有的地方，而使电流完全关断或者叫夹断。然而，这种情况是不可能实现的，因为电流一旦减小，电压降也随之减小，从而缩小其耗尽区，此时电流又复而流动。实际的情况是电流会达到最大值并且进而增高端电压，也不会使电流再发生变化。

应当指出，耗尽区的延伸取决于 p - n 结上的电压，所以可以把 p 区接上负电压（相对于左端而言）使耗尽区进一步扩张。这样，在棒电压较低的情况下就可以使夹断发生，同时其极限电流也会降低。因此，可改变 p 区的偏压来控制棒电流。如果电压足够高，即使棒上没有 IR 压降也可以发生夹断，此时，流经棒的电流实际上降到零。

由于 p 区的控制作用而称之为“栅极”。棒的左端为多数载流子的源头，因而取名为“源极”。右端是“漏极”，因为电子是在这里泄漏出去的，棒中的导电通路就称为“沟道”。

如果栅极-沟道二极管持有反向偏压的话，栅极电流甚微，因而控制功率也十分小。但是漏极-源极通道却可以导通相当大的电流。因为它的电流增益很大，而电压增益也是相当大的，所以，

这是一种功率增益很大的基本器件。

如果在图 1-2 的棒顶和棒底两侧都制作 p 型区，则耗尽区就从两个方向朝内扩张，若漏极-源极电压较低而其电流也较小时，就能较快地发生夹断作用；从其他方面来看它的特性，附加的栅极面积也会使器件在栅压较低时发生夹断。在某些应用中，如像混频、自动增益控制等等，希望有两个隔开的栅极区，以适应两个控制输入端的需要。

3) 基本类型

正像有 $p-n-p$ 和 $n-p-n$ 两种结型晶体管一样，场效应晶体管也有两种极性类型，这取决于场效应晶体管的结构和材料。通常，场效应晶体管系根据沟道所属的半导体导电类型来区分。因此，不但会有前节所述的 n 沟道场效应晶体管，而且也会有 p 沟道的场效应晶体管，只要用 p 型半导体作为沟道材料，就可制得 p 沟道的场效应晶体管。

一般， n 沟道场效应晶体管工作时，其漏极电压为正，而栅

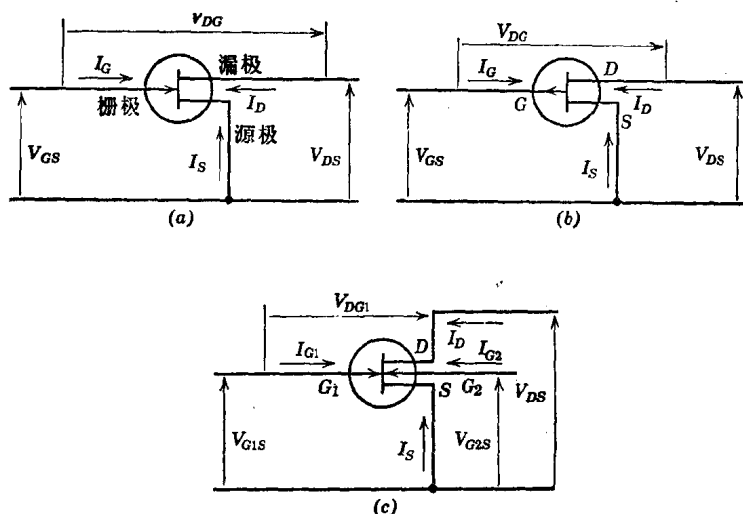


图1-3 用来说明极性习惯用法的各种类型场效应晶体管的图解符号

(a) n 沟道场效应晶体管；(b) p 沟道场效应晶体管；

(c) n 沟道双栅极场效应晶体管。

极电压为负（两者均相对于源极而言）， p 沟道场效应晶体管的电压极性则恰恰相反。不过，为了标准化起见，不问其场效应晶体管的类型如何，应当遵守关于电压和电流极性的习惯用法。这种习惯用法为图 1-3 中场效应晶体管的图解符号所示。必须注意的是，如果电流或电压的极性与习惯所定的极性相反，其数值需带一个“负”号。依此规定， n 沟道场效应晶体管以通常的方式工作时，其 $V_{DS} = +10$ 伏、 $V_{GS} = -2$ 伏时， I_D 为 $+1$ 毫安；而 p 沟道的场效应晶体管在同样条件下工作时，其有关极性应为 $V_{DS} = -10$ 伏、 $V_{GS} = +2$ 伏时， $I_D = -1$ 毫安。

2 实际的场效应晶体管

前面介绍的场效应晶体管基本结构，虽然对讨论其工作原理有所帮助，但是制造这种结构既不当也不很现实。现在就来讨论制造场效应晶体管可利用的几种方法。

1) 合金法

采用合金法制作栅极区是一种切实可行的技术。这种工艺可以制造电压较高的器件，因为在半导体棒结构的两侧只需要有一个高压二极管就行了。合金型场效应晶体管所遇到的困难与一般合金型的结型晶体管是类同的。比方说：要控制小的几何尺寸和获得低的电容就显得困难，但高阻抗电路（这种电路使用场效应晶体管是最好的）就希望得到低电容。

在许多应用中，要使反向偏置的栅极-沟道 $P-n$ 结漏泄电流减小到足以忽略的地步也有困难。

制作环形场效应晶体管可以采用合金法，这种场效应晶体管的栅极环绕在整个小硅棒或小锑棒的周围，但是，即使是一般高频所用的合金型场效应晶体管，其尺寸也是很小的，因而它就变得脆弱，而难于封装。

2) 单扩散法

为制作晶体管而发展起来的扩散工艺，可以简易地用于制作