



场效应半导体器件

上海无线电十四厂 上海科学技术大学 编

上海人民出版社

73.73244
115

场效应半导体器件

上海无线电十四厂 编
上海科学技术大学

上海人民广播电台

内 容 提 要

本书详细地叙述了 MOS 场效应半导体器件的工作原理、生产工艺以及典型应用,并对 MOS 场效应集成电路作了较为具体的介绍,最后在附录内对结型场效应半导体器件作了简要的说明。

本书内容力求简明、详细、具体、实用。可供从事场效应半导体器件生产和使用的同志参考。

场 效 应 半 导 体 器 件

上海无线电十四厂
上海科学技术大学 编

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海群众印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 7.75 字数 189,000

1972年8月第1版 1974年6月第2次印刷

印数 13,001—25,000

统一书号: 15171·76 定价: 0.52 元

毛主席语录

认识从实践始，
经过实践得到了理论
的认识， 还须再回到
实践去。

打破洋框框， 走
自己工业发展道路。

前 言

为了适应电子工业发展的需要,遵照伟大领袖毛主席关于“要认真总结经验”的教导,我们编写了《场效应半导体器件》一书。

场效应半导体器件是近年来迅速发展起来的一种新型半导体器件。由于它具有输入阻抗高、噪声低、抗辐射能力强等优点,它的应用正在日趋广泛。

本书较为系统地介绍了以 MOS 为典型的表面型场效应器件的工作原理、设计制作工艺及其应用,同时对 MOS 集成电路也作了较为详细的叙述,但对场效应器件的另一大类——结型场效应管,本书仅在附录中简要地讨论了一下。

编写本书是采用厂、校结合的形式,由工人、干部和科技人员以及学校的教师组成编写小组。在编写过程中,广泛征求了有关生产单位的意见,对本书质量的提高帮助很大。在此,我们谨表示衷心的感谢。

由于我们的政治思想水平和业务水平都不高,书中肯定存有不少谬误之处,敬请读者指正。

上海无线电十四厂《场效应半导体器件》编写组
上海科学技术大学

本书所用符号表

符 号	意 义	符 号	意 义
A_v	电压增益	N	光的干涉条纹数
BV_{DS}	最大漏源耐压	N_B	硅中某杂质的体内浓度
BV_{GS}	最大栅源耐压	N_F	噪声系数
C_{GS}	栅源输入电容	N_P	磷硅玻璃中磷的浓度
C_{GD}	栅漏反馈电容	$N_{(x)}$	杂质在硅中某一深度的浓度
C_{GO}	沟道电容	N_S	杂质扩散的表面浓度
C_{DS}	漏源输出电容	n_{ox}	二氧化硅的折射率
C_G	栅极电容	P_{DM}	场效应管的最大耗散功率
D	杂质(如磷、硼)在半导体(如硅等)中的扩散系数	Q_{SS}	栅极二氧化硅中的正电荷密度
E	电场强度	Q_B	基片材料中的体电荷密度
E_{ox}	栅极氧化层击穿时的临界电场强度	Q	杂质在硅中的总数
F	噪声指数	R_D	漏极串联电阻
f	工作频率	R_S	源极串联电阻或源极负反馈电阻
f_T	沟道截止频率	R_{GS}	栅源直流输入阻抗
f_{max}	最高的沟道截止频率	R_g	栅极输入端噪声源电阻或偏置电阻
g_m	场效应管的跨导	R_L	负载电阻
g_{mo}	低频时场效应管的跨导	S_i/N_i	输入讯噪功率比
I_{DS}	漏源电流	S_o/N_o	输出讯噪功率比
I_{DSS}	零栅压下的漏源饱和电流	t_{ox}	栅极二氧化硅厚度
L	沟道长度	t_{df}	下降时间延迟
l_s	源扩散区的环境	t_{dr}	上升时间延迟
l_D	漏扩散区的环境	$\bar{v}$	载流子的漂移速度
l_{GS}	栅金属与源扩散区的交迭长度	v_{max}	载流子的最大漂移速度
l_{GD}	栅金属与漏扩散区的交迭长度		

符 号	意 义
V_{DS}	漏源电压
V_{GS}	栅源电压
V_{DD}, V_{SS}	电源电压
V_P	夹断电压
V_T	开启电压
W	沟道宽度
W/L	沟道宽长比
x_j	扩散 PN 结的结深
χ_P	磷硅玻璃中磷的极化率
τ	载流子从源到漏所需的 渡越时间

符 号	意 义
μ	载流子的迁移率
μ_N	电子的迁移率
μ_P	空穴的迁移率
ϵ_{ox}	二氧化硅的介电常数
ϵ_{Si}	硅的介电常数
ω	角频率
ρ	材料电阻率
ρ_S	源漏扩散区的薄层电 阻
$\bar{\rho}$	平均薄层电阻率
λ	光的波长

目 录

第一章	一种新型的半导体器件——场效应管	1
第二章	MOS 场效应管的工作原理	4
2.1	MOS 场效应管的简单介绍	4
2.2	半导体基础知识	6
2.2.1	金属、半导体、绝缘体	6
2.2.2	N 型半导体和 P 型半导体	7
2.2.3	半导体中的电流	10
2.2.4	PN 结	12
2.2.5	半导体的表面场效应	17
2.2.6	MOS 场效应管的工作原理	18
2.2.7	MOS 场效应管的四种类型	21
第三章	MOS 场效应管的特性与参数	24
3.1	MOS 场效应管的特性	24
3.1.1	MOS 场效应管的输出特性	24
3.1.2	MOS 场效应管的转移特性	32
3.1.3	四种 MOS 场效应管特性的比较	33
3.2	MOS 场效应管的参数	37
3.2.1	MOS 场效应管的基本参数	37
3.2.2	MOS 场效应管的频率参数	46
3.2.3	MOS 场效应管的极限参数	49
3.3	MOS 场效应管的温度稳定性	53
第四章	MOS 场效应管的设计原理	56
4.1	MOS 场效应管设计的一般原则	56
4.1.1	材料的选取	56
4.1.2	栅极二氧化硅层厚度的确定	61
4.1.3	沟道宽长比的考虑	62

4.1.4	结构图形的设计	66
4.2	3DO1型 MOS 场效应管的设计示例	71
第五章	MOS 场效应管的制造	77
5.1	<i>N</i> 沟道耗尽型 MOS 场效应管的制造	79
5.1.1	硅片的制备——切片、磨片和抛光	79
5.1.2	氧化	83
5.1.3	磷处理	91
5.1.4	光刻	92
5.1.5	扩散	101
5.1.6	蒸发与合金	116
5.1.7	装配——划片、选片、焊接、热压内引线与封帽	119
5.1.8	管芯的检查	122
5.1.9	老化和总测	129
5.2	<i>N</i> 沟道增强型 MOS 场效应管	131
5.3	<i>P</i> 沟道增强型 MOS 场效应管	134
第六章	提高 MOS 场效应管性能的途径	138
6.1	改善 MOS 场效应管稳定性的措施	138
6.1.1	采用“清洁工艺”制作 MOS 场效应管	139
6.1.2	磷处理使 MOS 场效应管的稳定性得以改善	140
6.1.3	MNS 和 MNOS 场效应器件	142
6.1.4	改善绝缘栅场效应器件稳定性的其他措施	146
6.2	抗辐射 MOS 场效应管简介	147
6.2.1	辐射的类型及其对半导体的影响	147
6.2.2	辐射对 MOS 场效应器件的影响及抗辐射 MOS 场 效应器件	149
6.3	提高 MOS 场效应器件频率特性的几种新工艺	152
6.3.1	提高 MOS 场效应管频率特性的一般考虑	152
6.3.2	硅栅工艺	156
6.3.3	离子注入工艺	160
6.3.4	扩散自排列工艺	163
第七章	MOS 场效应管的应用	167
7.1	MOS 场效应管在电路应用中的优缺点	168

7.1.1	MOS 场效应管具有高的直流输入阻抗	168
7.1.2	MOS 场效应管具有多种的类型	169
7.1.3	MOS 场效应管具有低的噪声特性	169
7.1.4	MOS 场效应管具有强的抗辐射能力	170
7.1.5	MOS 场效应管的缺点	171
7.2	MOS 场效应管的等效电路	173
7.3	MOS 场效应管偏置工作点的选择	175
7.4	MOS 场效应管的应用	178
7.4.1	阻容耦合放大器	178
7.4.2	调谐放大器	180
7.4.3	MOS 场效应管在其他线性放大方面的应用	182
7.4.4	振荡与混频方面的应用	186
第八章	MOS 场效应集成电路	191
8.1	MOS 场效应集成电路概述	191
8.2	MOS 倒相器	196
8.2.1	P 沟道倒相器	196
8.2.2	互补倒相器	204
8.3	MOS 门电路	206
8.4	MOS 触发器	210
8.5	MOS 动态式逻辑电路	214
8.6	MOS 存储器	219
8.6.1	MOS 存储单元	219
8.6.2	MOS 存储器	221
8.6.3	MOS 存储器的特性与参数	223
附 录	结型场效应管	227
一、	结型场效应管的工作原理和特性参数	227
二、	结型场效应管的设计	231
三、	结型场效应管的制造	234

第一章

一种新型的半导体器件——场效应管

早在三、四十年以前,就曾经有人提出过:是否能够制造出一种新型的半导体器件,其外形、结构等均仍保持半导体器件小型、可靠、有效的特点,而其工作方式却与电子管的工作原理相仿。由于当时生产技术的限制,这个设想没有能实现。

随着半导体器件生产技术的发展,人们在生产实践中总结了经验,分析了半导体器件的各种内部矛盾,经过大量的试验,在1952年第一次成功地制造出了具有场效应特性的半导体器件,但当时还是一种体内场效应器件。大约又经过了十年左右的时间,随着平面工艺的出现和发展,终于在1962年试制成功了具有表面场效应特性的MOS场效应半导体器件。MOS场效应器件就是我们本书要介绍的内容。

场效应半导体器件是一个总称,它常用缩写符号“FET”来表示。我们根据其结构(主要是指栅极的结构)和制造工艺,一般可以分为下面三大类:

一、绝缘栅场效应管

绝缘栅场效应管常用符号“IGFET”来表示。顾名思义,其栅极具有绝缘层结构,这种结构是由金属-绝缘体-半导体三层材料紧密相依而构成的,通常,用“MIS”来表示。因此,绝缘栅场效应管往往又有“金属-绝缘体-半导体场效应管”之称,并用“MISFET”来表示。应当指出,以二氧化硅作为栅极绝缘层的“金属-氧化物-半导体场效应管”是目前最为流行的一种绝缘栅场效应管。所以,严格地说,这种器件的全称叫做“金属-氧化物-半导体绝缘栅场效应管”,但往往简称为“MOS”场效应管。

当然,绝缘栅场效应管并不限于“MOS”场效应管一种,如果改变栅极绝缘层的材料,就可以构成其他类型的绝缘栅场效应管。例如,栅极绝缘材料是氮化硅(Si_3N_4)或氧化铝(Al_2O_3)的,则由它们所构成的绝缘栅场效应管分别称为“MNS”和“MAS”场效应管。此外,还可以由两种不同的材料构成多层结构的栅极绝缘层,例如:由二氧化硅和氮化硅构成栅极绝缘层的场效应管,这种器件则称为“MNOS”场效应管。

二、薄膜场效应管

薄膜场效应管,其结构和工作原理与绝缘栅场效应管是十分相仿的。其差别只是它的结构、材料与其制作工艺和绝缘栅场效应管不同罢了。这种场效应管通常是采用真空蒸发技术,将硫化镉(CdS)之类的半导体材料以薄膜的形式淀积在绝缘基片上(如玻璃),然后再在半导体薄膜上蒸发具有适当厚度的如一氧化硅(SiO)之类的绝缘层,最后蒸上金(Au)之类的金属以作欧姆接触电极。

薄膜场效应管,由于其性能较难控制,稳定性较差,因而很少有人生产。但是,随着薄膜集成电路的发展,这种结构的场效应管将会被重视。

另外,我们还要指出,薄膜场效应管和以 MOS 场效应管为代表的绝缘栅场效应管,由于它们的导电过程系发生在半导体表面的薄层内,因而从导电机构的角度来看,它们均属于“表面场效应器件”,目前,一般所说的表面场效应器件在大多数场合下,是指 MOS 场效应管。

三、结型栅场效应管

结型栅场效应管,其栅极的控制作用系通过反向偏置的 PN 结来实现的。它的作用原理和 MOS 场效应管不甚相同,但其特性在很多方面是和 MOS 场效应管相同的。这种场效应管往往叫做结型场效应管,常用“JFET”来表示。

相对“表面场效应器件”而言,结型场效应管的导电过程系发

生在半导体材料的体内。因而,常把结型场效应管称为“体内场效应器件”。

那么,场效应半导体器件究竟有哪些特点呢?

1. 场效应管具有普通晶体管所具有的特点,如体积小,重量轻,无需灯丝加热电源,机械性能牢靠等。

2. 场效应管的特性与五极真空管相似,就是说,它也是一种电压控制器件(即通过输入电压的调节来控制其输出电流),而普通晶体管则是一种电流控制器件。

3. 场效应管的直流输入阻抗很高,这是它最重要的特点之一。一般其直流输入阻抗可达 $10^9 \sim 10^{15}$ 欧姆,而普通双极晶体管的输入电阻仅在 1 千欧姆左右。因而,在某些需要高直流输入阻抗的场合,就需用场效应管。

4. 由于场效应管的类型多、偏置电压的极性灵活、动态范围大、其各级间可以采用直接耦合的形式,因而在电路设计中有较大的灵活性。

5. 噪声低,这是场效应管的又一显著特点。这一特点对于某些要求高灵敏、低噪声的应用场合,如检测各种微弱信号的仪器、仪表、医疗器械等采用场效应管就非常适合。

6. 热稳定性好。因为场效应器件是一种多数载流子导电的器件。它可以有正的、负的以及正、负交叉的零温度系数的工作点。因此在设计电路时,只要使管子偏置在零温度系数工作点的附近,就可以使电路的工作状态稳定下来。

7. 抗辐射能力强。它可以保证在核辐射和宇宙射线的辐射下,电子装备仍可正常工作。

8. 制造工艺简单。场效应管所需的制造工艺步骤比普通双极晶体管要少得多,因而,制造成本可以降低而合格率可以相应提高。

由于场效应管具有上述特点,因而在短短的几年里,发展迅速,应用日益广泛。

第二章

MOS 场效应管的工作原理

伟大领袖毛主席教导我们：“感觉只解决现象问题，理论才解决本质问题。”“认识从实践始，经过实践得到了理论的认识，还须再回到实践去。”毛主席的教导充分地阐明了理论的重要性以及理论对实践的依赖关系。在生产 MOS 场效应管的长期实践中，广大工人和革命技术人员积累了极其丰富的实践经验。遵照毛主席的伟大教导，我们应当把这些丰富的经验概括上升为理论的认识，并且运用这些理论更好地指导生产实践，同时，在实践的过程中，应用“去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里”的方法，使理论日益完善。从这一章起，我们就要由浅入深地讨论 MOS 场效应管的有关内容。本章主要介绍 MOS 场效应管的工作原理以及为了解 MOS 场效应管所必备的一些半导体基础知识。

2.1 MOS 场效应管的简单介绍

MOS 场效应管是一种电压控制器件，其工作原理系基于半导体表面的电场效应。图 2-1 是 3DO1 型 MOS 场效应管的外形，它是一种 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管，图 2-2 则是它的结构剖视图及其表示符号。MOS 场效应管按其导电类型与工作方式划分，有好几种类型（将在本章的最后叙述），但其基本原理是相同的。这里，我们仅以 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管为例来说明。

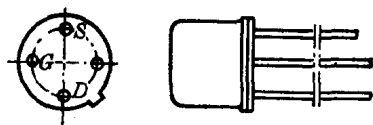


图 2-1 3DO1 型 MOS 场效应管的外形

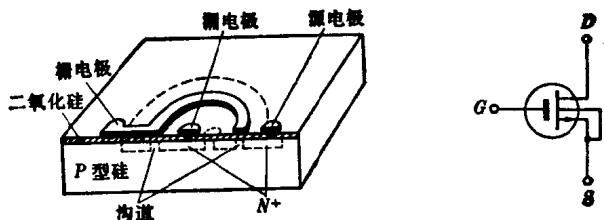


图 2-2 3DO1 型 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管
结构示意图及其符号

3DO1 型 N 沟道 MOS 场效应管是在 P 型硅单晶片 (电阻率为几~几十欧姆·厘米) 上扩散两个相距很近的 (约为 $12\sim 15$ 微米) 的 N^+ 环形区 (N^+ 区的薄层电阻约为 $2\sim 5$ 欧姆/□), 这二个 N^+ 区分别称为源 (用 S 表示) 和漏 (用 D 表示), 它们的金属引出电极则分别称为源极和漏极。在硅表面上生长一层约为 1600 埃左右的二氧化硅绝缘层, 并在这二个区之间的绝缘层上覆以金属电极, 称为栅极 (用 G 表示)。

MOS 场效应管这种新型的半导体器件, 究竟具有什么特殊性能呢?

在第一章, 我们已介绍过, MOS 场效应管具有输入阻抗高, 噪声低, 动态工作范围大, 电路设计较为灵活, 抗辐射能力强等特点。图 2-3 所示的是在 JT-1 型晶体管特性图示器上看到的 MOS 场效应管的电压-电流特性曲线。由图可见: 随着加在栅、源之间电压 V_{GS} 的增大, 漏、源之间的电流

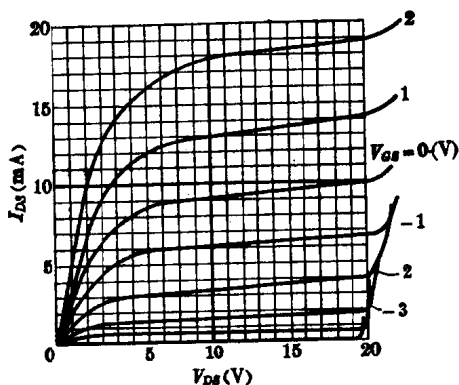


图 2-3 N 沟道耗尽型 MOS 场
效应管的电压-电流特性曲线

I_{DS} 将不断上升, 即栅极电压对漏极电流起着控制的作用。另外, 还可以看出, MOS 场效应管和五极真空管的输出特性是极其相仿的。这一点也是 MOS 场效应管之所以受人重视的原因。

那末, MOS 场效应管的输入电压是如何控制它的输出电流的呢? 遵循毛主席关于“我们看事情必须要看它的实质, 而把它的现象只看作入门的向导, 一进了门就要抓住它的实质, 这才是可靠的科学的分析方法”的伟大教导, 为了弄清楚 MOS 场效应管的工作原理, 下面我们就简单地介绍一下有关的半导体基础知识, 这些知识对于了解 MOS 场效应管都是必备的。

2.2 半导体基础知识

2.2.1 金属、半导体、绝缘体

我们知道, 各种晶体管都是用半导体材料制成的, 那末, 究竟半导体材料与其他材料有什么不同呢?

大家都知道, 如果你手拿着金属棒(如铜、铁、铝等)去接触通电的裸露电线时, 就会触电, 其原因是电流会通过金属棒传到人体上。但是, 当你拿一根干燥的木棒或戴上橡皮手套后再去接触电线时, 就不会再触电了, 其原因是木棒、橡皮不能通过电流, 因此, 电线上的电流就不会传到人体上。

自然界的物体, 我们按照其导电能力的强弱可分为三大类。容易导电的物体, 如: 金、银、铜、铁、锡、铝等金属及其合金都属于导体。一些不容易导电的物体, 象: 云母、胶木、橡皮、塑料等都属于绝缘体。但是, 还有一些物体, 如已被大家所熟知的锗、硅、砷化镓以及某些金属的氧化物、硫化物等, 它们的导电能力比绝缘体要强些, 可是比导体又差得远, 我们把这类物体称作半导体。

一般, 物体的导电能力是用“电阻率”来衡量的。所谓电阻率, 就是长度为 1 厘米、截面积为 1 平方厘米的物体所具有的电阻值,

常用符号 ρ 来表示, 它的单位是欧姆·厘米 ($\Omega \cdot \text{cm}$)。有时, 也往往用电导率来表示物体导电能力的大小。电导率为电阻率的倒数, 常用符号 σ 表示, 它的单位是 (欧姆·厘米) $^{-1}$ [$(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$]。电阻率越小, 则电导率越大, 表示物体的导电能力越强; 反之, 导电能力就越差。一般, 导体的电阻率为 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ (欧姆·厘米), 半导体的电阻率约为 $10^{-3} \sim 10^8$ (欧姆·厘米), 绝缘体的电阻率约为 $10^8 \sim 10^{20}$ (欧姆·厘米)。

半导体电阻率的大小与导体、绝缘体不同, 这只是一种表现的性质, 实际上, 半导体还具有其他一些特性, 如: 半导体的电阻率与温度的关系很密切, 当温度接近绝对零度的时候, 半导体的电阻率非常大, 表现出接近绝缘体的特性, 而当温度升高时, 它的导电能力就迅速增大。人们利用这种性质做成了自动化控制用的各种热敏元件; 又如半导体的电阻率还会随光照而减小, 人们利用半导体电阻率随光照而减小的性质便制成了光敏电阻等光电器件; 再如纯净的半导体, 其导电性能比较差, 但如果加入适当的“杂质”(如磷、硼等), 半导体的导电能力就会非常显著地增加, 即半导体的电阻率将随杂质的增多而下降。半导体中所含杂质对其导电性质的显著作用, 实际上就是制造各种各样半导体器件(包括 MOS 场效应管)的基础。

对于半导体, 正是由于它具有这些不同于金属与绝缘体的重要特性, 因此, 引起了人们广泛的重视, 并在科学技术的各个领域得到了广泛的应用, 显示出其特殊的优点与旺盛的生命力。

2.2.2 N 型半导体和 P 型半导体

从上节介绍的半导体的特性中, 我们知道, 如果在纯净的半导体中加入适当的杂质就可改变半导体的导电能力, 这是什么原因呢? 半导体又是怎样导电的呢? 为了搞清楚这些问题, 就需要从半导体的原子结构讲起。世界上一切物质都是由原子构成, 原子