



高 等 学 校 规 划 教 材
工 科 电 子 类

功率 MOSFET 的应用

卢豫曾

东南大学出版社

功率 MOSFET 的应用

卢豫曾

东南大学出版社

（南京）

内容提要

本书是由电子工业部电子材料与固体器件教材编审委员会半导体物理与器件编审小组评选审定、推荐出版的全国第四轮统编教材。

全书共7章,第1章阐明功率MOS器件的基本特性及其工作原理;第2章阐述功率MOS应用方面的基础知识;其后6章分别介绍功率MOS在音频功放、高频电路、电源、开关电路、微机及其它方面的应用。全书着重基本概念的阐述,避免繁杂的数学推导,各章还提供了较丰富的实用电路。

本书除用于高校教材或教学参考书外,对从事功率MOS应用开发的科技工作者,均有一定的参考价值。

责任编辑 张 克

责任校对 刘娟娟

功率 MOSFET 的应用

卢豫曾

东南大学出版社出版发行

南京四牌楼2号 邮编 210018

江苏省新华书店经销、南京邮电学院印刷厂印刷

开本: 850×1168 毫米 1/32 8.125 字数: 210 千

1995年12月第1版 1996年3月第1次印刷

印数: 1—3000 册

ISBN 7—81050—098-8/TN·11

定价: 14 元

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和

不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部电子类专业教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由电子材料与固体器件教材编审委员会半导体物理与器件编审小组征稿并推荐出版。责任编委为唐茂成教授。

本教材由电子科技大学卢豫曾担任主编,东南大学茅盘松教授担任主审。

功率 MOS 是一种新型的电力电子器件,它集双极晶体管与电子管的优点于一体,具有现行双极型电力电子器件(如 SCR, GTR, GTO 等)所没有的许多优点。它的推广应用将引起电力电子学的深刻变革。专家们预言,新型电力电子器件和功率集成电路的发展和推广应用,将导致“第二次电子革命”,引起了国内外学术界和工业界的高度重视。为了满足教学需要,特编写本教材。

本课程的参考学时数为 40 学时,其主要内容为:在简要阐述功率 MOS 器件基本原理和特性的基础上,介绍了该器件的应用基础知识及其在音频、高频、电源、开关电路、微机等领域中的应用。内容着重基本概念的阐述,避免繁杂的数学推导。书中还提供了较多的实用电路。

参加本教材审阅工作的还有中国华晶电子集团公司总工程师许居衍教授,他为本书提出了许多宝贵意见。此外,电子科技大学微电子所的方健同志负责编写了本书 2 至 6 章的习题,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

1 功率 MOS 器件

- 1.1 半导体功率器件发展概述 (1)
- 1.2 功率 MOS 器件的发展概述 (2)
- 1.3 功率 MOS 器件的优点 (7)
- 1.4 功率 MOS 器件的工作原理 (13)
- 1.5 功率 MOS 器件的主要参数 (17)
- 1.6 功率 MOS 器件的参数检测 (30)
- 1.7 功率 MOS 器件的制造工艺 (33)
- 习 题 (36)

2 功率 MOS 器件的应用基础

- 2.1 功率 MOS 器件的基本电路 (38)
- 2.2 功率 MOS 器件的串联与并联电路 (45)
- 2.3 功率 MOS 器件的栅驱动 (63)
- 2.4 功率 MOS 器件的抗瞬变能力 (74)
- 2.5 功率 MOS 器件的安全使用方法 (83)
- 习 题 (92)

3 功率 MOS 音频功放电路

- 3.1 基本偏置电路及工作点设计 (94)
- 3.2 功率 MOS 的基本放大电路 (97)
- 3.3 功率 MOS 音频功率放大器 (99)
- 3.4 D 类和 G 类音频功率放大器 (108)
- 习 题 (115)

4 功率 MOS 高频电路	
4.1 功率 MOS 高频等效电路	(116)
4.2 功率 MOS 高频功放电路	(119)
4.3 功率 MOS 高频振荡电路	(129)
习 题	(137)
5 功率 MOS 电源电路	
5.1 功率 MOS 线性稳压电源	(139)
5.2 功率 MOS 开关稳压电源	(146)
5.3 功率 MOS 恒流源	(175)
5.4 功率 MOS 逆变器	(180)
习 题	(195)
6 功率 MOS 开关电路	
6.1 基本电路形式	(197)
6.2 电感负载	(200)
6.3 实用电路举例	(201)
习 题	(210)
7 微机及其它应用电路	
7.1 功率 MOS 接口电路	(211)
7.2 功率 MOS 模拟开关	(225)
7.3 照明与汽车应用电路	(235)
7.4 保护、功率控制、马达驱动和感应加热电路	(241)
习 题	(247)
参考文献	(249)

1 功率 MOS 器件

1.1 半导体功率器件的发展概述

半导体器件一直是沿着提高器件工作频率和提高器件功率处理能力这两个方向发展的。每一种器件在频率和功率兼顾时都存在着某种限制。为了突破这种限制,人们不断探索新的器件工作原理、新的器件结构,以不断解决在提高器件频率和功率过程中的矛盾。如晶闸管虽然其功率控制容量可以达到 1MW 以上,但其工作频率较低,一般限制在 10kHz 以内。为了突破这一限制,后来发展了大功率双极型晶体管(GTR)。现在,达林顿大功率双极型晶体管的功率控制容量虽比晶闸管低一个数量级(0.1MW),但其工作频率却提高了两个数量级(1MHz),因此总的来看是前进了一步。

功率双极型晶体管工作频率要进一步提高,则受到其基区和集电区中少子存储效应的限制。为了突破这一限制,人们在探索、开发多子功率器件——功率 MOS 器件。目前,功率 MOS 器件的功率控制容量比功率双极型晶体管约低一个数量级(约 0.01 MW),但其工作频率却提高了两个数量级(约 100MHz)。因此,从器件的频率和功率兼顾来看,功率 MOS 器件的出现,使半导体器件的发展又前进了一步。

现代功率 MOS 器件的发展基本上是在保持和发挥其自身优点的基础上,沿着努力提高器件的处理功率——提高器件的工作电压和增大器件的工作电流的方向发展。由此,派生出了各种结构

的功率 MOS 器件—— LDMOS、VVMOS、VDMOS 及其进一步发展: IGT、MCT 等功率半导体器件。图 1.1 示出了几种重要功率半导体器件在功率与频率方面的发展水平及器件的发展方向。

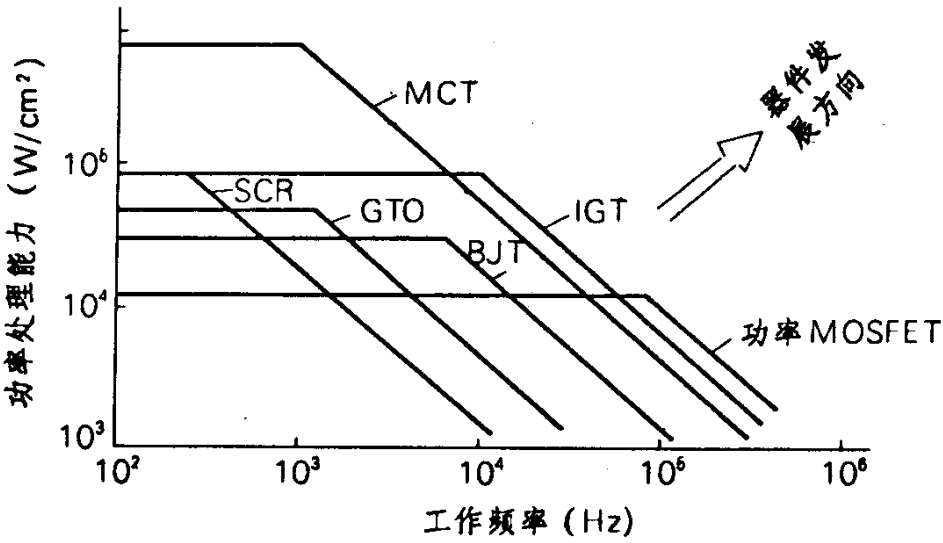


图 1.1 功率半导体器件的发展水平及方向

1.2 功率 MOS 器件的发展概况

早期的 MOS 器件如图 1.2 所示。它是在低浓度的衬底上再制作高浓度的源、漏(扩散区)。这种结构的 MOS 器件,当增加漏源电压 V_{DS} 时,耗尽区主要向低浓度的衬底沟道区扩展,当耗尽区扩展到源区时,器件便产生穿通。因此,要提高该器件的工作电压,除了要选用高阻衬底材料外,在结构上就要增加沟道长度 L (否则很易穿通)。但从晶体管原理知道,该器件的漏电流 I_D 与沟道的宽长比 (Z/L) 成正比

$$I_D \propto Z/L \quad (1.1)$$

可见,增加 L 必然会减少器件的工作电流。因此,这种 MOS 器件结构不可能做成高压大电流的功率器件。

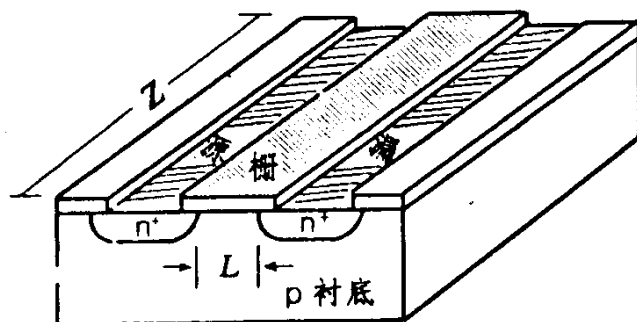


图 1.2 早期 MOS 器件结构

为了解决上述矛盾,1971 年 Y. Tarui 等人提出了图 1.3 所示的新结构。比较图 1.2 和图 1.3 可知,新结构与早期 MOS 器件结构的区别主要有两点:一是在沟道与漏之间增加了一个相当长的 n^- 漂移区。由于该漂移区的掺杂浓度比 p 型沟道区低,当漏源电压 V_{DS} 增加时,耗尽区主要向该区延伸,所以只要适当选取漂移区的长度和它与 p 型沟道区的电阻率,就可使该器件承受较高的 V_{DS} 而不会产生击穿或穿通。二是器件的沟道长度 L 由两次扩散的结深来控制,故可以做得很小,且不受光刻精度的限制。因此,只要设法增大沟道宽度 Z ,电流也可以做得上去。这种器件由于是横向导电并采用了双扩散技术制造,故称为横向双扩散 MOS,简称 LDMOS。

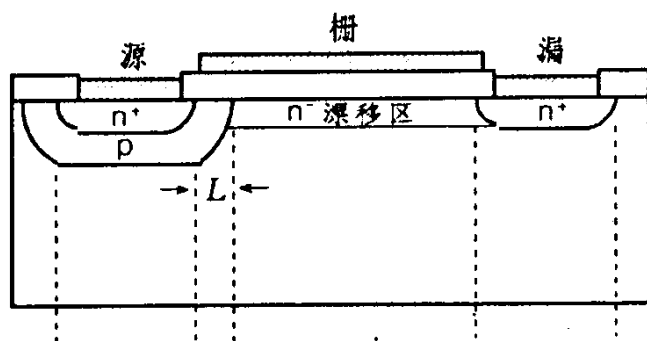


图 1.3 LDMOS 结构示意图

LDMOS 虽然较好地解决了提高电压和增大电流之间的矛

盾,但由于该器件是横向导电,管芯占用的硅片面积很大,硅片表面的利用率低。为了克服这一缺点,1978 年出现了垂直导电的功率 MOS,其结构如图 1.4 所示。比较图 1.3 和图 1.4 可知,垂直 MOS 与横向 MOS 的最大区别是将漏区、漂移区和沟道区从硅片表面分别转移到硅片的底部和体内。而且每个槽对应应有两条沟道。因此管芯占用的硅片面积大大缩小,硅片表面的利用效率得到了很大的提高,器件的处理功率又提高到一个新的台阶。上述器件由于是垂直导电并采用 V 形槽(图 1.4(a))和 U 形槽(图 1.4(b))结构,故称为 VVMOS 和 VUMOS。

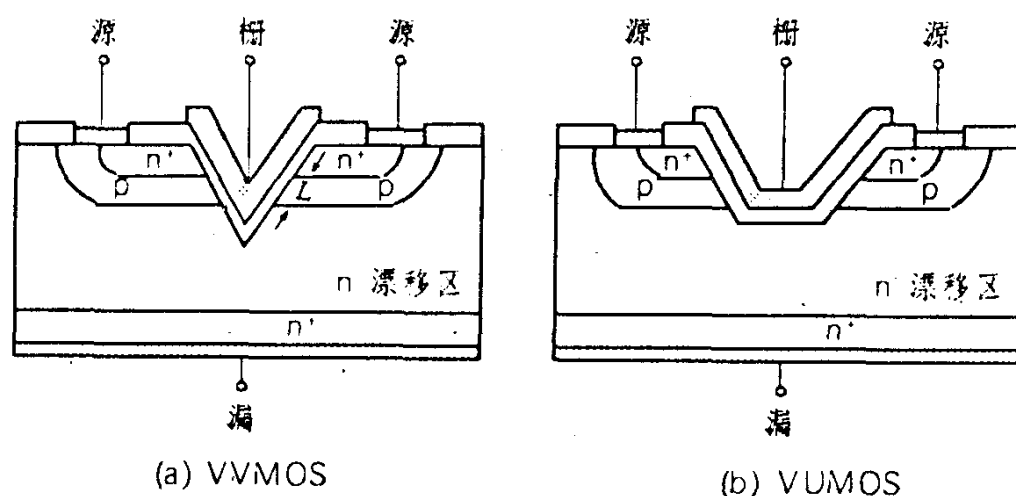


图 1.4 VVMOS 和 VUMOS 结构示意图

VVMOS 和 VUMOS 虽然解决了硅片表面利用效率低的问题,但由于该器件采用了槽(V 形的或 U 形的)结构,槽的腐蚀在工艺上不大容易控制,而且该器件的栅氧化层暴露,易受离子沾污,造成阈值电压不稳,可靠性下降。为了克服这一缺点,1979 年又出现了一种不需要腐蚀 V 槽或 U 槽并且不暴露栅氧化层的垂直导电功率 MOS,其结构如图 1.5 所示。该器件的多晶硅栅被埋藏在源极金属的下面,源极电流穿过水平沟道,经过栅极下面的积累层再垂直地流过 n^- 漂移区,最后到达漏极。该器件也是采用两次扩散技术制造,故称为垂直双扩散 MOS,简称 VDMOS。VD-

MOS 的制造工艺与现在高度发展的超大规模集成电路(VLSI)工艺相容,因此发展很快,并且逐渐成为功率 MOS 器件的主流。

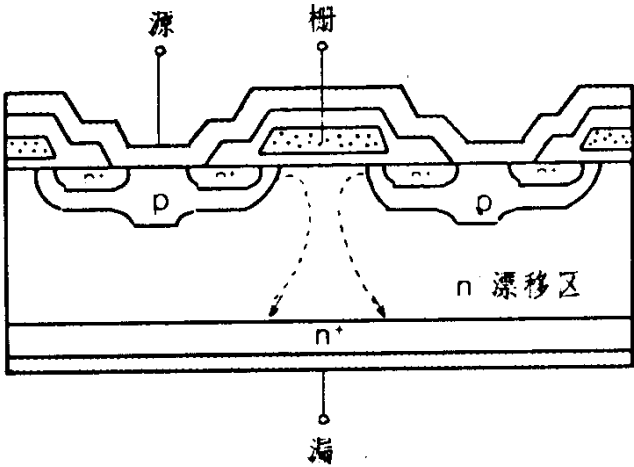


图 1.5 VDMOS 结构示意图

VDMOS 虽然克服了 VVMOS 和 VUMOS 的缺点,使器件的耐压水平、可靠性和制造工艺都前进了一步,但其导通电阻仍然比较高。要降低该器件的导通电阻,就要减少图 1.5 中 n^- 漂移区的厚度和电阻率,但这样做又会使器件的耐压降低,导通电阻与耐压之间的矛盾成为功率 MOS 器件进一步发展的主要矛盾。为了解决这一矛盾,人们在 MOS 器件中又引入了双极晶体管,目的是想利用注入载流子的电导调制效应来降低器件的导通电阻。其结构如图 1.6 所示,称为绝缘栅晶体管,简称 IGT 或 IGBT。由比较图 1.5 和图 1.6 可知,IGT 与 VDMOS 的不同只是将 n^+ 衬底换成了 p^+ 衬底,但却形成了一个 MOS 栅控的 p^+nnpn 四层可控硅结构,其等效电路如图 1.6(b)所示。这里的寄生可控硅效应可通过短路发射结来消除。IGT 进入导通态时,由于 p^+ 衬底向 n^- 漂移区注入了少数载流子,使 n^- 漂移区产生强烈的电导调制效应,使导通电阻大大降低,并且受 n^- 漂移区的电阻率和厚度影响很小。故器件的阻断电压的提高可通过适当增加漂移区的电阻率和厚度来达到,而不会明显增加其导通电阻。所以 IGT 的出现使器件的功率处理

能力又上了一个新的台阶。

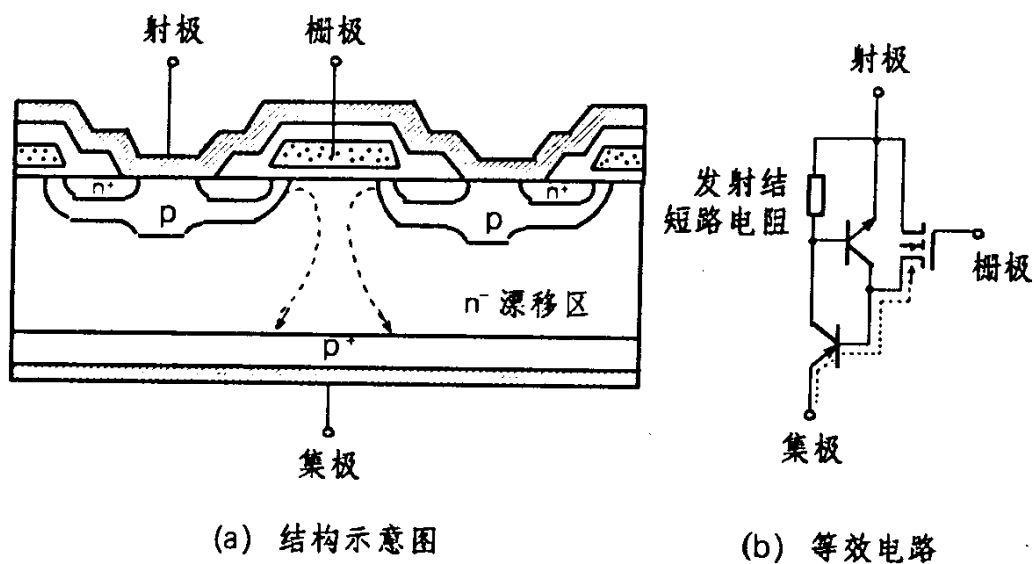


图 1.6 IGT 结构及其等效电路

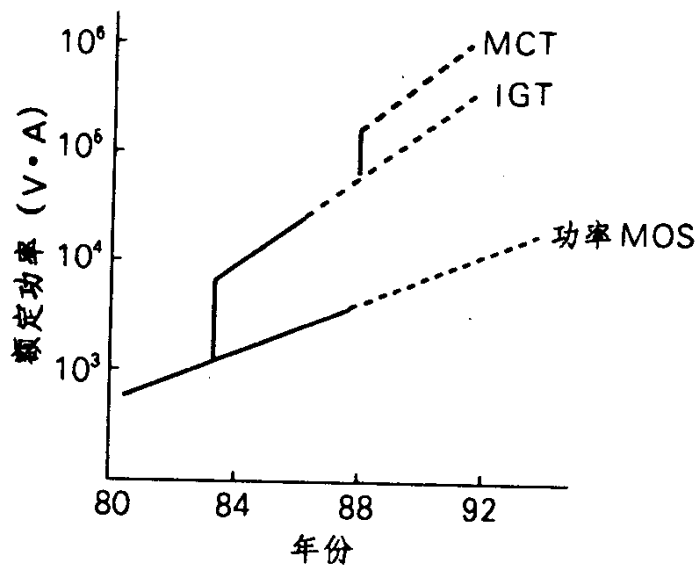


图 1.7 功率 MOS、IGT、MCT 功率处理能力的逐年增长情况

功率 MOS 与双极晶体管的结合,产生了 IGT,使器件的导通电阻大大降低,而输入功率仍很小,给使用者带来了方便。为了进一步降低导通电阻,增大工作电流,产生了功率 MOS 与晶闸管的结合器件——MOS 控制晶闸管,简称 MCT。MCT 的额定功率估计比 IGT 又可增大 3 倍,使器件的功率处理能力再上一个台阶。

图 1.7(见上页)给出了功率 MOS、IGT 和 MCT 三种器件功率处理能力的逐年增长情况。

1.3 功率 MOS 器件的优点

从上节介绍的各种功率 MOS 器件结构中可知,这种功率半导体器件集 MOS 晶体管和双极晶体管的优点于一体,具有晶闸管和功率双极晶体管所没有的一系列优点,在实际应用中占有越来越重要的地位。本节将具体介绍功率 MOS 器件的这些优点。

1) 开关速度高、开关损耗小,是一种可以工作于高频的高速功率器件。

从上节介绍的各种功率 MOS 器件结构可知,该器件的漏源电流 I_{DS} 都是流过沟道区的多数载流子电流,即该器件是依靠多数载流子导电的多子器件,不存在少数存储延迟时间效应。其开关时间主要由栅源电容 C_{GS} 的充放电时间决定,而功率 MOS 的 C_{GS} 一般很小(几 pF), C_{GS} 的充放电时间很短,所以功率 MOS 的开关时间很短,一般在几 ns 至数十 ns(低压器件为 10ns 数量级,高压器件为 100ns 数量级)。不象功率双极晶体管那样,由于存在少数载流子的存储效应,器件开关时,存在着有源区少数载流子的注入和抽取现象。所以其开关速度比功率 MOS 慢得多,通常要慢一个数量级。因此,功率 MOS 是一种比较理想的可工作于高频的功率开关器件,用它制作高频开关,可大大减少电抗元件的损耗,减轻重量,缩小体积。

2) 漏电流为负温度系数,热稳定性好,安全工作区宽,有自镇

流作用。

从器件物理知道,流过功率 MOS 沟道区的多子电流 I_{DS} ,与沟道区中的多子电荷 Q 和沟道区中的多子漂移速度 v 成正比,即

$$I_{DS} \propto Q \cdot v \quad (1.2)$$

式中的 Q 与栅源电压 V_{GS} 有关,

$$Q = -C_{OX}(V_{GS} - V_{th} - V) \quad (1.3)$$

其中的 C_{OX} 是栅氧化层 MOS 电容, V_{th} 为阈值电压, V 是由 V_{DS} 在沟道某处建立起的电位。式(1.2)中的多子漂移速度 v 则取决于多子在沟道中的迁移率 μ 以及沟道区中的电场强度 E , 即

$$v = \mu \cdot E \quad (1.4)$$

将式(1.3)和(1.4)代入式(1.2)得

$$I_{DS} \propto v C_{OX}(V_{GS} - V_{th} - V) \quad (1.5)$$

$$= \mu \cdot E C_{OX}(V_{GS} - V_{th} - V) \quad (1.6)$$

所以

$$\frac{\partial I_{DS}}{\partial T} \propto \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (1.7)$$

即漏电流的温度系数取决于多子在沟道中迁移率 μ 的温度系数。

大家知道,当器件的温度 T 升高时,原子的热运动加剧;与载流子——多子的碰撞几率增加,载流子在沟道区中的迁移率 μ 减小。即多子迁移率温度系数是负的。根据式(1.7),功率 MOS 漏电流的温度系数也是负的,如图 1.8 所示。

由于功率 MOS 器件电流的温度系数是负的,这使得该器件具有功率双极型器件所没有的下列两个突出优点:

(1) 避免了二次击穿现象,安全工作区宽。

我们知道,功率双极型器件的电流温度系数是正的,因此当其中某局部地区温度升高时,流过该处的电流将增大,电流增大反过来又使该处温度更高,温度更高又使电流更大。因此,在该处就会出现热电之间的恶性循环,使该处出现温度很高的热点和电流的高度集中,导致器件的毁坏,即产生热击穿和二次击穿。二次击穿

现象的存在,大大限制了功率双极型器件的安全工作区。

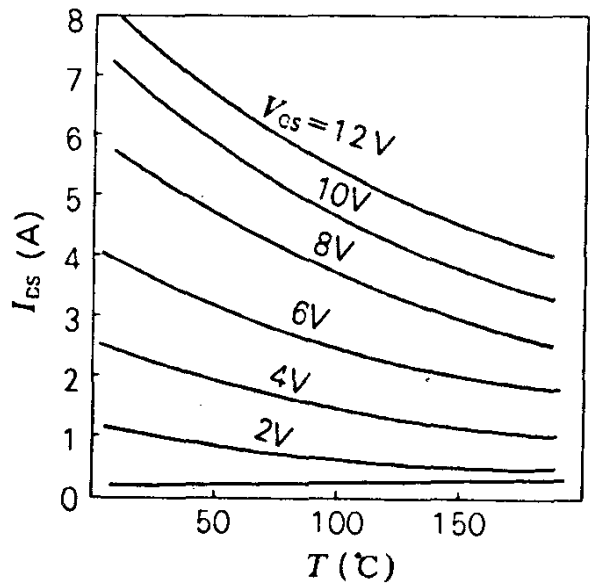


图 1.8 功率 MOS 器件的漏电流随温度的变化

当功率 MOS 器件的局部地区温度升高时,由于其电流温度系数是负的,流过该处的电流将减小,流过该处的电流减小使该处产生的焦耳热也减小,因此该处的温度将下降,即功率 MOS 避免了热电间的恶性循环及由此导致的局部热点和电流的集中现象。因而,从根本上避免了二次击穿现象,使器件的安全工作区扩宽,可靠性提高。图 1.9 给出了特性参数接近的功率 MOS 器件和功率双极型器件的安全工作区比较。

(2) 要增加电流容量时,可简单地将多个功率 MOS 直接并联。无需像功率双极型器件那样要使用平衡各并联器件电流的均流(限流)电阻,也不用任何温度补偿网路。功率 MOS 器件本身有电流自动调节功能,有自动均流和均温作用。比如,由于某种原因,使得流过某个器件的电流增大时,则该器件产生的焦耳热也增多,温度升高加快,致使流过该器件的电流自动减小。结果实现了各并联器件的自动均流和均温。