

新型 电力电子器件

聂代祚 编著

兵器工业出版社

7K34
N15

373369

新型电力电子器件

聂代祚 编著



兵器工业出版社

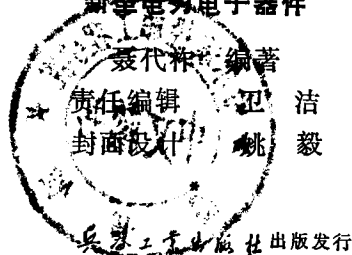
(京)新登字049号

27918/04
内 容 简 介

本书主要介绍结型栅场效应晶体管、静电感应晶体管(晶闸管)、功率MOS场效应晶体管、MOS双极型复合器件、MOS控制晶闸管以及功率集成电路等,它们都具有独特的电性能,如输出功率大,输入阻抗高、开关速度快、工作频率高、电流增益大、热稳定性好等,而且体积小,集成度高,可用于空间技术的功率源、直流输电、高频调速、开关电源、广播功率放大器等广大领域。

本书主要供电力电子器件及设备的设计、制造、使用部门参考,大专院校有关专业的师生及培训班可作为参考教材。

新型电力电子器件



兵器工业出版社出版发行
(北京市海淀区车道沟10号)

各地新华书店经销

建华印刷厂印装

开本: 787×1092 1/32 印张: 10.4375 字数: 235千字

1994年3月第1版 1994年3月第1次印刷

印数: 1—1900 定价: 10.50元

ISBN 7-80038-715-1/TM·35

目 录

绪 论

第一章 结型场效应晶体管12

第一节 概述12

第二节 JFET的工作原理16

第三节 JFET器件的物理分析22

第四节 截止频率41

参考文献45

第二章 静电感应晶体管46

第一节 SIT的基本结构及特点46

第二节 SIT的基本工作原理53

第三节 SIT的特性59

第四节 双极型静电感应晶体管75

参考文献79

第三章 静电感应晶闸管83

第一节 器件的基本结构及特性83

第二节 SITH的工作原理94

第三节 静态特性99

第四节 动态特性117

第五节 高温特性131

第六节 常关型SITH135

参考文献137

第四章 功率MOS场效应晶体管141

第一节 功率MOSFET的基本结构141

第二节 MOS结构的性质149

第三节	功率MOSFET的工作原理与特性	164
第四节	频率特性	184
第五节	功率MOS的开关特性	191
第六节	功率MOSFET的极限参数	200
	参考文献	219
第五章	绝缘栅晶体管	223
第一节	基本结构与特性	223
第二节	工作原理与器件物理分析	230
第三节	频率特性	254
第四节	高温特性	259
第五节	设计考虑及制造技术	262
	参考文献	270
第六章	MOS控制晶闸管	273
第一节	概述	273
第二节	MOS控制晶闸管的工作原理	283
	参考文献	294
第七章	功率肖特基势垒二极管	296
第一节	肖特基势垒二极管的基本结构和整流机制	296
第二节	功率肖特基二极管的电流-电压特性	302
第三节	Power SBD的制备工艺	313
第四节	砷化镓功率肖特基二极管	320
第五节	特种功率肖特基势垒二极管	323
	参考文献	329

绪 论

一、传统电力半导体器件的发展

1948年结型晶体管的发明为今天的半导体电力（功率）电子学的发展奠定了基础。1956年霍尔（R.N.Hall）等提出了PNPN开关晶体管的概念，并于1957年由美国GE公司制造成功商售连续工作电流为25A，阻断电压为300V的硅可控整流器（SCR）。从此，半导体由弱电跨入强电领域。此后，由于平面工艺技术的出现，半导体向两大分支发展：一支是以晶体管或其他半导体器件组成愈来愈小的集成电路，为适应微型化的发展，形成以半导体集成电路为主体的新兴学科——微电子学；另一分支则是以晶闸管为主体的电力（功率）半导体分立器件，向愈来愈大的功率方向发展，为解决电力电子与控制技术的应用问题，形成了以静态功率变换与电子控制为主要内容的新兴学科——电力电子学。电力半导体器件也在发展中形成了独立分支。

1961年以后，相继研制出了门极可关断晶闸管（GTO）、双向交流开关（Triac）和光触发晶闸管。70年代初，又出现了300A、400V的双极型功率晶体管和达林顿晶体管（GTR）。从此，传统的电力半导体器件便由功率整流管、双极型功率晶体管和晶闸管三大类组成。70年代后期开发的垂直功率MOSFET，是半导体的一项重大突破。这种新型功率器件，不仅全部保留了MOSFET的优点，而且还具有高耐压、大电流处理能力和快的开关速度，使MOS器件跨入到大功率领域。由于分立功率VDMOSFET已进

入实用阶段，这样，在80年代初，分立的电力半导体器件便由双极型（整流管、功率晶体管及晶闸管三大类）和单极型晶体管组成。图0-1给出了传统电力半导体器件的分类及主要品种的国内、外水平。图中括号内为国内水平。

60年代初期，我国已开始研制整流管、晶闸管。最早从事电力器件研制开发的是西安整流器研究所，30年来研制出

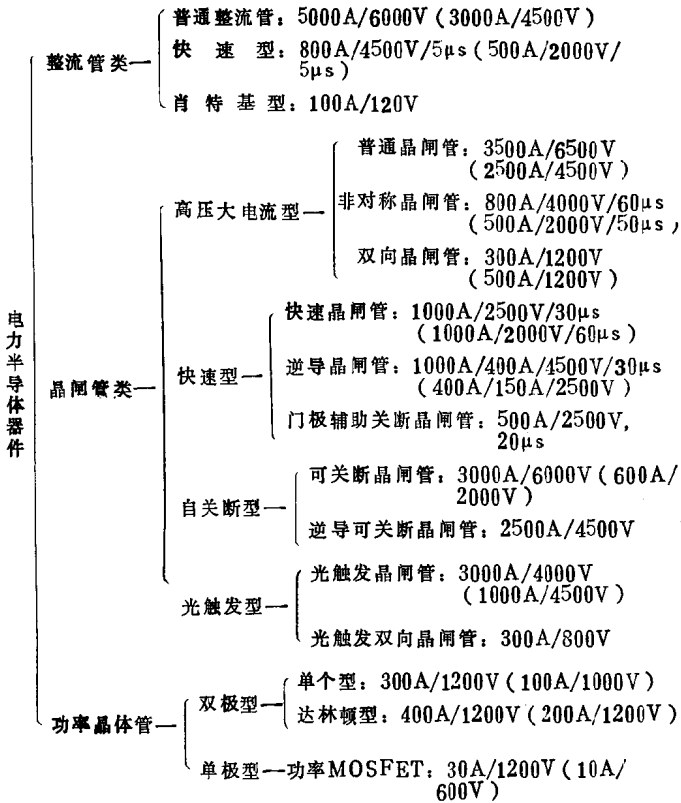


图 0-1 电力半导体器件分类及主要品种

了大量新器件，开发了许多新技术，它同北京变压器厂、椿树整流器厂、西安电力整流器厂和北京整流器厂及上海整流器厂等许多研究所、工厂一起使我国电力半导体器件发展到相当规模和具有较高水平，并推动了电力电子技术的发展和学科的形成。尽管80年代以来，新型电力电子器件日新月异地发展，但传统电力半导体器件使用的量很大，面较广，仍然是主流，今后需要做的仍是在提高器件电流、电压及功率容量的同时，努力提高工作频率和产品质量，使电力器件的应用进入新的领域。

二、现代电力半导体器件简介

由于技术进步和应用面不断拓宽的需要，电力半导体器件正向大容量-高频化方向发展，若仅通过对传统器件的改进，在许多方面已不能满足当代的需求，必须要有新的突破。另一方面，随着功率场效应器件的发展，在超大规模集成电路上发展起来的精细加工技术正引入电力半导体领域，数微米精细图形的分立功率VDMOS器件已商品化，精细加工技术为新型器件的开发与实用化奠定了基础。MOS-双极型复合器件，就是利用MOS技术的精细加工发挥单极型器件与双极型器件各自的优点，制造出的更加理想的功率半导体器件。

MOS集成和精细加工技术在半导体领域的应用，不仅开发了功率VDMOS器件、MOS-双极型复合器件，而且也成功地开发了高压集成电路(HVIC)和智能功率集成器件，进而形成新一代电力半导体器件，称之为现代电力半导体器件。根据80年代新型电力器件的发展，现代电力半导体器件可以概括为图0-2所示的几类。由图0-2可以看出，现代电力半导体器件可归纳为四大类：(1)结型栅场效应器件；

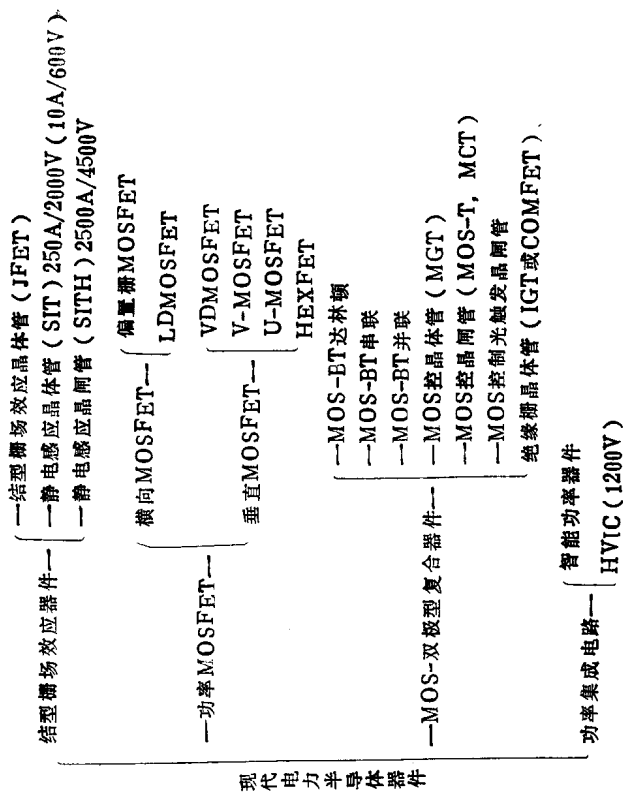


图 0-2 现代电力半导体器件分类

(2) 功率MOS场效应晶体管；(3) MOS-双极型复合器件；(4) 功率集成电路。概括地说，现代电力半导体器件，或者说，新型电力电子器件主要是指功率场效应器件、功率集成器件和高压集成电路。

本书介绍的新型电力电子器件主要是指具有自关断能力、电压控制的单极型和混合载流子型为主的功率集成自关断器件，至于电流控制型的功率集成器件门极可关断晶闸管(GTO)和电力晶体管(GTR)，在功能上既能控制导通、又能控制关断、也都称为“自关断器件”；在结构上是几十、几百或几千个具有相同功能单胞的并联集成，所以，GTO、GTR都属于新型电力电子器件之列，但这两种器件在传统器件中作了大量介绍，故本书就不将它们列入新器件进行讨论了。

(一) 功率场效应器件

通常把半导体导电能力随电场而变化的现象称为“场效应”。场效应晶体管就是输入于栅极的电压通过电场的作用来调制沟道电流的器件。根据功率集成场效应器件调制沟道电流及关断机制的不同，可分为下列三类。

第一类：靠栅电压改变调制沟道导电截面积，这类器件主要包括JFET等。

第二类：靠电场来改变基区中耗尽层的宽度，即栅电压调制沟道势垒高度以控制电流通道的夹断、开通，使器件关或开，这类器件包括静电感应晶体管(SIT)和静电感应晶闸管(SITH)等。

第三类：靠栅电压来改变沟道的导电类型，使器件开或关。这类器件包括功率MOSFET以及绝缘栅晶体管(IGT)和MOS控制晶闸管(MCT)等。

场效应器件都具有一些独特的电性，可以概括为如图0-3所示。

1. 结型栅场效应器件

这类器件是通过栅压改变沟道势垒高度来调制沟道电流的，主要是SIT和SITH两种器件。它们基本上都采用表面栅（门）和隐埋栅（门）极结构。

静电感应晶体管（SIT）呈现类似电子三极管的非饱和 $I-U$ 输出特性，具有输出功率大、输入阻抗高、开关特性好等优点。1986年日本已研制出平面栅结构SIT，日本自动纺织机械制作所利用此技术制造出200A、1000V常关型功率SIT，并用于升降叉车的DC/AC电机调速。这种器件的主要应用领域是开关电源、超声波发生器、广播功率放大器、空间技术使用功率源等。

静电感应晶闸管（SITH）是利用电场效应来控制器件的导电能力的，所以又称为场控晶闸管。它具有高速、高压大电流等优点，是用于高频电力电子技术的理想器件。

从结构上看，SITH分为单栅（门）和双栅（门）两种。单栅（门）又分平面栅、台阶栅和隐埋栅三种结构。目前又开发了DDT型、非对称型、光触发型等结构。

SITH发展很快，平面栅SITH结构已能达到200A、1200V；台阶栅结构达到100A、2500V；埋栅SITH结构已达到300A、2500V。目前最高水平达到2500A、4500V，工作频率为100kHz。

SITH已开始进入实用化阶段，主要应用于高压直流输电、大电流开关设备、马达驱动、变频调速、开关电源、不间断电源……等。

2. 功率MOS场效应晶体管

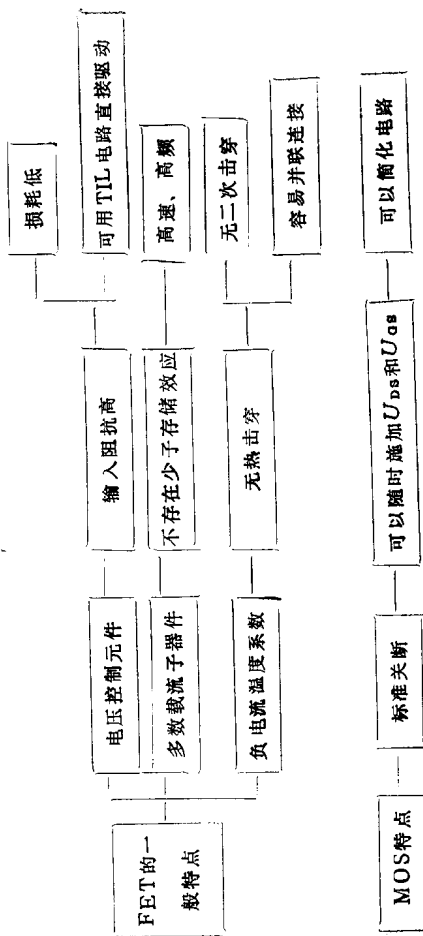


图 0-3 场效应晶体管的特点

自从70年代中期出现垂直导电的双扩散MOS结构后，功率MOS得到迅速发展，出现了许多新结构。这种器件的工作频率高，开关速度快，电流增益大，热稳定性好。在开关稳压电源方面，用作主开关功率器件，可使工作频率达到200~400kHz，在变换器中作功率变换器件；在高频加热、超声波加工等设备中作主功率振荡、放大器件；在计算机中应用，可作为控制信号和执行部件之间的接口，在其他多方面还有众多应用。功率VDMOS扩大了电力半导体器件的应用范围，有着广阔的发展前景。

VDMOS器件本身正在向高压、大电流、高工作频率和高开关速度等方面发展，但人们更大的兴趣集中在研究发展MOSFET与双极型功率器件集成的复合器件，以期发挥其各自的优点，制造出更为理想的器件。

（二）MOS-双极型复合器件

双极型电力器件（晶体管、晶闸管等）利用了电导调制效应而具有高电压和大电流特性，而MOSFET具有输入阻抗高、快速特性好等优点。于是在突破原有设计思想的局限性后，对双极型器件的“大功率特性”和MOSFET的“小的控制功率”及“高的开关速度”的优点加以发挥，开发了兼备双极型器件和MOS器件优点的更理想的电力集成器件，MOS-双极复合器件。

这类器件主要包括IGT、MCT等，它们是当前电力集成器件的主要发展方向。

1. 绝缘门极晶体管（IGT）

IGT的结构与VDMOS十分相似，只是将VDMOS的N⁺衬底用P⁺衬底代替了。这种器件具有功率晶体管(GTR)的高电流密度、低饱和电压和功率MOSFET的高输入阻抗、

高速特性。在MOS-双极型复合器件中，IGT最为成熟，自1982年问世以来，研制、生产和应用都获得飞跃的发展。生产水平达到100A/500V，50A/1000V，研制水平达到75A/2500V。1987年IEDM报道了日本用硅片直接键合技术试制成功100A/1800V的IGT。

目前，正在开发进一步改进IGT通态电压与开关特性的产品，以实现更低损耗和更高的开关速度。在80年代末，IGT开始向智能功率模块方向发展，已经过二代，正向第三代迈进。第一代具有功率器件控制电路的接口电路、过电流和过热保护电路；第二代除具有第一代的功能外，还具有上下支路的信号分配电路、电路用的电原；第三代除具有第二代功能外，还具有PWM控制电路、过载保护电路、过压保护电路。可见，第三代IGT智能功率模块已具备逆变器的基本功能，使电力电子装置的设计大为简化，为新一代变流器的发展创造了有利条件。

2. MOS控制晶闸管（MCT）

MCT是MOSFET与晶闸管的最佳组合。MCT具有高电压大电流、低通态电压高电流密度、高输入阻抗低驱动功率、高开关速度等优点。该器件的关断是采用集成到基区的MOSFET，使发射极-基极短路而实现的。

GE公司已有100A、1000V的MCT产品，但这种器件仍处于研制阶段，正在展开MCT机理分析和结构改进。180年代末90年代初，已取得了一定的效果。美国、德国等都投入相当力量来开发这种器件，预计将会有较大发展。

（三）功率集成电路

MOS技术在半导体功率领域的应用，不仅开发了分立的MOS功率器件，同时也开发了功率集成电路。在功能

上，功率集成电路是指功率在1W以上，具有逻辑、控制、保护、传感、检测、自诊断等功能的集成电路；在结构上是具有不同功能单元（包括功率单元在内）的集成。

功率集成电路主要有两大类：一类是高压集成电路（HVIC），它是横向高压器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成；另一类是智能功率集成电路（SPIC），它是纵向功率器件与逻辑或模拟控制电路以及传感器、保护电路的单片集成。不论是哪一种功率集成电路，其电路设计中所采用的功率器件有双极型，如GTR、SCR等；单极型，如MOSFET等；也有混合型，如IGT等。控制电路多采用MOS技术。

对功率集成电路的研究与开发，主要着眼于电视机、音响和洗衣机等家用电器；计算机、复印机等办公设备；汽车、飞机等交通工具；大面积荧光显示屏和机器人中的电力变换和高压大电流控制。其工作电压和工作电流一般在50~1200V和1~100A之间。

功率集成电路是模拟集成技术、数字集成技术和功率技术的集成，预期它的发展将给电子学以深远影响。

三、电力半导体器件的发展趋势

70年代使用的是传统的电力半导体器件，主要以晶闸管为主。80年以来，开发和完善了许多自关断电力半导体器件，功率VDMOS得到进一步完善，并进入大量使用阶段。GTR、GTO得到广泛的应用，同时出现了SIT、SITH和MOS-双极型复合器件，其中最为成熟的是IGT。总之，80年代以来形成的新型电力电子器件，由于微电子技术 with 电力电子技术的结合使半导体器件可具有更高的工作频率和更大的可控功率。

从全面看，分立电力半导体器件的主要发展趋势是：
(1) 高压、大电流化；(2) 快速、高频化；(3) 光输入化、易驱动化；(4) 模块化、功能复合化和智能化。

第一章 结型场效应晶体管

1952年,随着双极型晶体管的发展,肖克莱(Shockley)提出了利用PN结的反向偏置电压改变伸入沟道的耗尽区厚度,从而控制半导体导电能力的结型场效应晶体管的理论。其后,成功地制成了具有场效应特性的结型场效应晶体管。由于受当时制造工艺水平的限制,还不能生产出性能良好的管子。随着平面工艺及外延技术的发展,场效应晶体管得以迅速发展,到70年代,结型场效应晶体管的制造技术进入高电压功率控制方面,并发展到使这种器件列入现代电力半导体器件的领域。

根据器件结构类型,JFET分为横向型和纵向型两类;按性能分,有饱和型和非饱和型两种,它们分别具有与电子五极管和电子三极管相类似的特性。具有真空三极管类似特性的JFET,在工作机理及特性方面与一般的JFET截然不同,因而另取名为静电感应晶体管SIT,对这类管将在另章进行介绍,本章着重讨论一般的功率JFET的工作原理及其特性。

第一节 概 述

一、基本结构

结型场效应晶体管JFET是一种三端器件,其基本结构分为横向型和纵向型两种。图1-1所示为横向型结构。它的制造工艺过程是先在N型外延层上。通过磷扩散形成 N^+ 扩散区,然后在两个 N^+ 扩散区之间,用浓硼扩散形成作为栅极的