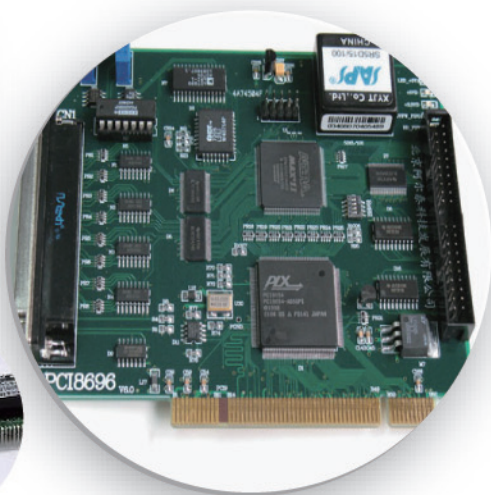


Technology
实用技术

■ 高科实用电力电子技术丛书

MOSFET、IGBT驱动 集成电路及应用

李宏 编著



科学出版社

高科实用电力电子技术丛书

MOSFET、IGBT 驱动 集成电路及应用

李宏 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在简析电力 MOSFET 和 IGBT 的基本工作原理、内部结构、主要参数及其对驱动电路的要求的基础上,介绍电力 MOSFET 及 IGBT 的 80 多种集成驱动电路的基本特性和主要参数,重点讨论 50 多种电力 MOSFET 及 IGBT 栅极驱动电路的引脚排列、内部结构、工作原理、主要技术参数和应用技术。书中不但给出多种以这些驱动器集成电路为核心单元的典型电力电子变流系统专用驱动控制板的应用实例,而且对这些具体实例的电路工作原理、正常工作波形、技术参数和应用技术进行较为细致的讨论。这些实例均为作者研制,且已批量投入工程实际应用,极具实用性和代表性。

本书是从事主功率器件为电力 MOSFET 和 IGBT 的电力电子变流设备及特种电源的设计、调试、安装和制造及研究开发的工程技术人员不可多得的实用参考书,亦适合高等院校电力电子及相关专业的广大师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

MOSFET、IGBT 驱动集成电路及应用/李宏编著.—北京:科学出版社,2012

(高科实用电力电子技术丛书)

ISBN 978-7-03-035380-1

I .M… II .李… III .集成电路 IV .TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 197020 号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面制作:赵志远

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市四季青双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张: 26 1/2 插页 3

印数: 1—4 000 字数: 510 000

定 价: 49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

电力电子技术是电工技术的重要分支,是当今世界各发达国家竞争的一个高技术领域。由于采用电力电子技术可以达到广泛的节能效果,实现生存环境及电网的绿色化,所以在人类日益面临能源危机、环境危机和人口危机等多重危机的时代,电力电子技术已经变得越来越重要,越来越受到各国政府的重视,与人们的日常生活越来越密不可分。

电力电子技术的组成可分为三大部分,即电力电子器件(由于至今我们已批量使用的电力电子器件几乎都用半导体材料制成,所以这类器件在行业内又称为电力半导体器件)、电力电子变换技术(Power Conversion)和为实现电力电子变换所涉及的控制技术。其中,电力电子变换包括对电能的三大要素(频率、电压、电流)进行量值与类型的变换和对交流电相数的变换。这三者中,电力电子器件是基础,控制技术是手段,而实现电力电子变换(又称功率的变换)是目的。若用一个人来表示电力电子技术的话,可以把电力电子器件看做人的健康身体,控制技术是人的大脑和四肢,电力电子变换技术则是具有健康身体的人在大脑的指挥下完成各种工作取得的良好效果。

1955年美国通用电气公司(General Electronic Company)发明人类第一只电力整流二极管,标志着电力电子技术的诞生,1970年地球上有了电力电子技术的Newell定义,经过几十年的发展,我们已经拥有40多种电力电子器件可供从事电力电子变流设备设计、制造及维护的工程师根据用途、容量及性价比进行选用。各种电力电子器件的应用已经深入到工业、农业、交通运输、国防和社会生活的各个方面,其典型的应用领域包括电化学、直流牵引、直传动、交流传动、电机励磁、电火花加工、电镀、电冶、电磁合闸、充电、中频及高频感应加热、交流及直流不间断电源、开关电源、稳压电源、电力电子开关、高压静电除尘、直流输电、无功补偿、风力发电、环境保护、家用电器、储能电站、航空器控制、感应电能传输、空间探测、遥测遥感、交通运输、火灾预防、医疗卫生、防盗报警等。在人类已有的可供选用的近50种电力电子器件中,电力场效应晶体管MOSFET的可使用开关频率最高,而需要的驱动功率最小。电力MOSFET并联使用的自均流特性、开关频率甚高等优良性能,使其成为开关电源等应用场合的主要器件,但由于受限于工艺技术和材料基础,电力MOSFET很难制造出同时具有高电压、大电流特性的器件,为解决应用需求与电力MOSFET本身功率容量相矛盾的问题,同时避免电力晶体管GTR所需驱动电流大的问题,在20世纪80年代中后期,人类发明了驱动输入级为MOSFET而输出级为电力晶体管GTR的双

机理复合器件 IGBT,至今其单只器件可控制功率(额定电压乘以额定电流)已达兆瓦数量级。电力 MOSFET 与 IGBT 应用的两个最关键的技术问题是驱动问题和保护问题。IGBT 与电力 MOSFET 是人类如今不断投入工业各部门广泛使用的电力电子器件,有着大量、广泛的应用,其中驱动技术与驱动电路的成熟性和性能是决定被驱动电力 MOSFET 或 IGBT 能否长期工作的根本。驱动电路性能不好,常常造成被驱动电力 MOSFET 和 IGBT 的损坏或缩短 MOSFET 和 IGBT 的寿命。我国电力电子行业电力 MOSFET 及 IGBT 器件主要依靠进口,因发达国家技术垄断、售价不低,造成器件本身成本很高,所以驱动及保护技术的研究显得更为重要。

尽管我国电力 MOSFET 和 IGBT 器件工艺和驱动技术与技术发达的国家(如日本、德国、英国、瑞士、美国等)相比有很大的差距,但据不完全统计,我国从事主功率器件 IGBT 和电力 MOSFET 制造以及应用它们研制电力电子变流设备的企事业单位也有近千家,以电力 MOSFET 和 IGBT 为主功率器件的电力电子变流设备用户几乎遍布全国各工业及民用企事业单位。我国以电力 MOSFET 及 IGBT 为主功率器件的电力电子变流设备的研制开发与生产水平及全民的掌握程度相对发达国家还很低,许多技术人员在电力电子变流设备调试和维修中不能很快查出设备运行不正常的原因,而且国内至今这方面的系统参考书还很少。为了给国内的电力电子变流设备设计、调试和维护人员提供一实用的有价值的参考资料,我们将多年从事电力电子变流设备研究、设计、调试和维修的经验加以总结,写下这本 MOSFET 和 IGBT 驱动电路及应用技术的通俗读物,以期给从事这一行业的下列人员:

- 电力 MOSFET 和 IGBT 驱动器的研究设计人员;
- 以 MOSFET 和 IGBT 为主功率器件的电力电子变流设备设计、制造企业的设计人员及现场调试人员;
- 以 MOSFET 和 IGBT 为主功率器件的电力电子变流设备使用单位从事设备运行管理、维护的人员;
- 上述三种单位的操作及装配人员;
- 高等院校的教师、研究生、本科生以及中等专业学校的师生;
- 各种职业培训学校的教师及学员。

提供实用的有价值的参考资料,希望能为他们的工作带来一点方便。

1983年,我从西安交通大学毕业后,到西安电力电子技术研究所(原西安整流器研究所)工作,从此与电力电子技术结下不解之缘。在该所工作的10年中,我有幸参与国家“六五”、“七五”攻关课题,主要从事电力电子器件的可靠性和电力电子变流设备的研究和开发工作,这些经历锻炼了我的工程设计能力,使我终生受益。1992年,我调入西安石油大学工作,这是我人生的又一转折,在这里,我把所学的知识及工程经验与工作实际相结合,总结提高,一直从事着电力电子变流设备的开发与设计工作。陕西高科电力电子有限责任公司为我的研究和工作的提供了一个良好的平台,保证了我的课题组及研究生得到很好的试验条件和经费支持,延续了我的电力电子技术情缘。

大学毕业至今近 30 年来,我从事过变频器、开关电源、感应加热用中频电源、交流调压、交流调功、电化学、环境保护、有色冶金、热工试验、聚变科学等行业使用的电力电子变流设备的科研及设计、调试工作,亲自设计或主持设计的电力电子变流设备种类达几十个品种,已投入国内有色冶金、化工、钢铁、煤矿、核工业、国防、航天、航空等行业使用的总计有 1000 多台(套)。其中不乏有用于核聚变研究的中国环流二号(HL-2A)16 套磁场电源系统,有亚洲唯一的运行于 4700m 高海拔地区的 30kA 大电流整流系统,有用于某国防重点试验项目的国内首套 75kW 高精度(0.5‰)无刷直流电动机调速系统,用于某国防重点试验项目中的 8 相位电源,以及用于核工业某国防重点实验室的 15MW 热工试验电源……亦曾有幸主持了近 40 种电力电子变流设备控制板的研制及改进定型工作,这些控制板累计在国内使用 30 000 多块。更为有幸的是我受命主编或参编的电力电子技术方面的实用技术资料有 20 多种,其中已公开出版 15 种。不可否认的是,因电力电子器件种类繁多,应用各种电力电子器件研制的电力电子变流设备更是多种多样,内部结构千差万别,使用领域差别甚大,功率容量有大有小,驱动技术各有需求,要逐个归纳总结并全面而系统地介绍各种电力电子器件的驱动技术是十分困难的,也是我的学识及能力无法实现的。如何根据众多的电力电子器件的不同需求及驱动技术提炼总结,写出可以解决读者工作中遇到的问题实用资料,是编写本书的真正困难所在。考虑到在国民经济各部门使用量的大小,本书以国内工农业生产中使用量大、应用面广的电力电子器件 MOSFET 和 IGBT 的驱动集成电路及应用技术为主线,而不追求面面俱到,对近几年新出现的电力电子器件或在国民经济中使用量较小的电力电子器件及正处于研发阶段的电力电子器件的驱动问题没有涉猎,热切希望读者能理解我的这一良苦用心!

MOSFET 的基本特性和工作原理、主要技术参数和对驱动电路的要求,是其驱动技术的基本问题,在各种以电力 MOSFET 为主功率器件的电力电子变流设备的研制及调试与维修中都会遇到,具有普遍性,所以作为一部分重要的内容在本书的第 1 章进行较全面的讨论。

电力 MOSFET 至今仍为使用频率最高的电力电子器件,其应用的关键问题是栅极驱动电路的设计,第 2 章给出 52 种电力 MOSFET 栅极驱动电路的基本特性和主要参数,详细介绍 30 种电力 MOSFET 栅极驱动电路引脚的排列、内部结构、参数限制和应用技术。

作为应用实例,第 3 章详细介绍陕西高科电力电子有限责任公司开发的 MTC3X 系列电力场效应晶体管栅极驱动板的内部结构、工作原理、主要设计特性、电参数限制、应用技术及典型应用实例。

IGBT 的功率容量在电力电子家族中居于第四,它已向晶闸管及 GTO 提出挑战,第 4 章介绍绝缘栅控双极型晶体管(IGBT)的基本特性、性能参数、特性曲线及对栅极驱动电路的要求。

IGBT 应用的关键问题是栅极驱动电路的设计,第 5 章给出 32 种电力 IGBT

栅极驱动电路的基本特性和主要参数,详细介绍 27 种 IGBT 栅极驱动电路引脚排列、内部结构、参数限制和应用技术。


为了使读者掌握 IGBT 对驱动的要求及已讨论的多种驱动集成电路的应用技术,第 5 章专门给出陕西高科电力电子有限责任公司应用前述驱动电路研制的、经众多用户使用证明性能可靠的 8 种 IGBT 栅极驱动电路的实用控制板的电路原理、外形尺寸、技术参数、正确接线、应用技术和典型应用举例。

为便于读者直接选用,本书的附录简介国内研制并已批量使用的电力电子变流设备控制板和电力电子变流设备的主要性能和参数。

在本书编写过程中,陕西高科电力电子有限责任公司提供了许多十分珍贵的参考资料和难得的实例资料,该公司的工程技术人员根据多年的工作总结和 1000 多台(套)电力电子变流设备设计、制造、调试与可靠运行的经验及教训,提供了许多经过实际运行考验及在多台电力电子变流设备中使用证明鲁棒性及可靠性都很好的可直接应用的原理插图及电路参数。同时,在编写过程中,参考和使用了书末参考文献中所列作者的研究和试验成果,引用了本人独立编著的由机械工业出版社出版的《电力电子变流设备用器件及集成电路应用指南》第一分册——《电力半导体器件及驱动集成电路》中的部分章节,科学出版社的刘红梅女士对本书出版做了许多辛勤的工作,陕西高科电力电子有限责任公司的祝海燕同志参与了书中大量的文稿整理和绘图工作,陕西高科电力电子有限责任公司的张瑞平、赵正富、马晓平对本书的许多电路进行了实用检验,提出了许多有益的建议,我的历届研究生冯广义、杭发琴、邢隆、赵栋、李岩、王昆、范柳絮、徐婷、江林、郝浩、岳清涛、董瑾、张仰维、杨宏亮、赵家贝、唐媛芬、陈少东、周大磊、许亚飞、张伊凡参与了部分电路的研究与实验及画图工作,在此一并感谢!在本书出版之际,我还应感谢我贤惠的妻子梁萍的支持,多年来她无私地支持我的研究及开发工作,在生活等方面提供了很多帮助,对本书的出版做了间接的、有益的工作。

本书作为“高科实用电力电子技术丛书”的第 4 本,由我本人选题并参与撰写和统稿,美国国际整流器公司(International Rectifier Company)西安研发与技术服务中心的李明高工提供了许多原文资料,我的研究生唐媛芬与杨宏亮分别与我共同编写了第 2.1~2.7 节与第 2.8~2.18 节;我的研究生张仰维与我共同编写了第 4 章;我的研究生赵家贝与我共同编写了第 6 章;其余章节由西安石油大学电子工程学院武晓曦副教授与我共同编写。受参考资料所限,加之编写时间仓促,更受限于自身的学术修养及技术水平,书中定有不少错误与纰漏之处,恳请本书的读者及国内电力电子行业的专家们斧正,并提出宝贵的意见,望阅读本书的专家学者及同仁们不吝赐教!指正意见与建议请寄往西安市电子二路 18 号西安石油大学自动化系,李宏收,邮编 710065。亦可电子邮件 lihong@xsyu.edu.cn 直言相告,对书中介绍的应用 MOSFET 及 IGBT 驱动器集成电路为核心的电力电子变流设备控制板实例电路有新的改进方案或更好的建议亦可直接与陕西高科电力电子有限责任公司(网址:<http://www.sgk.com.cn>,E-mail:sgkddd@163.com)技术部(电

话: 18802978897, 传真: 029-86479180) 或销售部(电话: 029-85236567, 18802978512, 传真: 029-85213405)联系, 进行交流与探讨。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '李锐' (Li Rui).

2012年4月于西安石油大学

目 录

第 1 章 电力场效应晶体管的基本特性及对驱动电路的要求

1.1 概 述	1
1.2 电力场效应晶体管的基本结构和工作原理	1
1.3 电力场效应晶体管的基本特性	5
1.4 电力 MOSFET 的主要技术参数	15
1.5 电力 MOSFET 对驱动电路的要求	21
1.6 高速 MOSFET 驱动器设计中应考虑的问题	30
1.6.1 高速开关过程对驱动电路的要求	30
1.6.2 MOSFET 开关过程的功率损耗	32
1.6.3 栅-源极有效电容的计算及驱动电流的确定	32
1.6.4 驱动电路方案的选择	33

第 2 章 电力场效应晶体管专用栅极驱动集成电路

2.1 概 述	35
2.2 IR2101 带有欠压封锁功能的半桥电力 MOSFET 驱动器	43
2.2.1 引脚排列、名称、功能和用法	43
2.2.2 内部结构和工作原理	44
2.2.3 主要设计特点、参数限制和推荐工作条件	44
2.2.4 应用技术	45
2.3 IR2110 具有两路输出的大电流桥臂电力 MOSFET 栅极驱动器	46
2.3.1 引脚排列、名称、功能和用法	47
2.3.2 内部结构和工作原理	48
2.3.3 主要设计特点、参数限制和推荐工作条件	50
2.3.4 应用技术	52
2.4 IR2117 单通道电力 MOSFET 栅极驱动器集成电路	61
2.4.1 引脚排列、名称、功能和用法	61
2.4.2 内部结构和工作原理	62
2.4.3 主要设计特点和极限参数	62
2.4.4 应用技术	63

2.5	IR2125 带电流限制的电力 MOSFET 栅极驱动器集成电路	64
2.5.1	引脚排列、名称、功能和用法	65
2.5.2	内部结构和工作原理	66
2.5.3	主要设计特点和参数限制	67
2.5.4	应用技术	68
2.6	IR2133/IR2135/IR2233/IR2235 三相全桥中六个 MOSFET 的栅极 驱动器集成电路	69
2.6.1	引脚排列、名称、功能和用法	69
2.6.2	内部结构和工作原理	72
2.6.3	主要设计特点和参数限制	73
2.6.4	应用技术	76
2.7	TPS2832/TPS2833 停滞时间控制同步降压 MOSFET 栅极驱动器 集成电路	78
2.7.1	引脚排列、名称、功能和用法	78
2.7.2	内部结构和工作原理	79
2.7.3	主要设计特点和参数限制	79
2.7.4	应用技术	80
2.8	SI9976DY 桥式 MOSFET 栅极驱动器集成电路	80
2.8.1	引脚排列、名称、功能和用法	81
2.8.2	内部结构和工作原理	82
2.8.3	主要设计特点和参数限制	85
2.8.4	应用技术	86
2.9	UC3724/UC3725 隔离 MOSFET 栅极驱动器集成电路	88
2.9.1	引脚排列、名称、功能和用法	88
2.9.2	内部结构和工作原理	91
2.9.3	主要设计特点和参数限制	94
2.9.4	应用技术	95
2.10	EL7202C/EL7212C/EL7222C 高速双路电力 MOSFET 栅极驱动器 集成电路	97
2.10.1	引脚排列、名称、功能和用法	97
2.10.2	内部结构和工作原理	98
2.10.3	主要设计特点和参数限制	98
2.10.4	应用技术	99
2.11	HT04 高压隔离 MOSFET 栅极驱动器集成电路	99
2.11.1	引脚排列、名称、功能和用法	100
2.11.2	内部结构和工作原理	100
2.11.3	主要设计特点和参数限制	101

2.11.4	应用技术	101
2.12	TLP250 光电隔离单 MOSFET 栅极驱动器集成电路	107
2.12.1	引脚排列、名称、功能和用法	107
2.12.2	内部结构和工作原理	107
2.12.3	主要设计特点和参数限制	108
2.12.4	应用技术	108
2.13	MC34151/MC33151/MC34152/MC33152 高速双路电力 MOSFET 栅极驱动器集成电路	109
2.13.1	引脚排列、名称、功能和用法	109
2.13.2	内部结构和工作原理	110
2.13.3	主要设计特点和参数限制	111
2.13.4	应用技术	112
2.14	MDC1100A 具有集成门电路钳位的 MOSFET 关断器集成电路	116
2.14.1	引脚排列、名称、功能和用法	116
2.14.2	内部结构和工作原理	117
2.14.3	主要设计特点和参数限制	117
2.14.4	应用技术	118
2.15	IRS21844 带驱动信号封锁功能和死区时间设置的大电流半桥 MOSFET 驱动器	120
2.15.1	引脚排列、名称、功能和用法	120
2.15.2	内部结构和工作原理	122
2.15.3	主要设计特点和参数限制	122
2.15.4	应用技术与典型应用举例	126
2.16	IRS2127 带电流限制的单管 MOSFET 栅极驱动器集成电路	127
2.16.1	引脚排列、名称、功能和用法	127
2.16.2	内部结构和工作原理	129
2.16.3	主要设计特点和参数限制	129
2.16.4	应用技术与典型应用举例	131
2.17	L6390 高电压低端驱动器集成电路	133
2.17.1	引脚排列、名称、功能和用法	134
2.17.2	内部结构和工作原理	135
2.17.3	主要设计特点和参数限制	136
2.17.4	应用技术与典型应用举例	139
2.18	TD352 前置电力 MOSFET 驱动器集成电路	141
2.18.1	引脚排列、名称、功能和用法	141
2.18.2	内部结构和工作原理	142
2.18.3	主要设计特点和参数限制	142

2.18.4 应用技术与典型应用举例	144
--------------------------	-----

第3章 电力 MOSFET 集成驱动器应用举例

3.1 概 述	147
3.2 MTC3.1 型电力 MOSFET 栅极驱动板	148
3.2.1 对外引线的排列、名称、功能及用法	149
3.2.2 电路构成及工作原理	150
3.2.3 主要设计特点和参数限制	150
3.2.4 应用技术	150
3.3 MTC3.2 单相半桥电力 MOSFET 驱动板	153
3.3.1 对外引线的排列、名称、功能及用法	153
3.3.2 电路构成及工作原理	155
3.3.3 主要设计特点和参数限制	155
3.3.4 应用技术	157
3.4 MTC3.4 电力 MOSFET 单相全桥驱动板	158
3.4.1 对外引线的排列、名称、功能及用法	159
3.4.2 电路构成及工作原理	161
3.4.3 主要设计特点和参数限制	163
3.4.4 应用技术	163
3.5 MTC3.6 三相全桥电力 MOSFET 驱动板	166
3.5.1 对外引线的排列、名称、功能及用法	166
3.5.2 电路构成及工作原理	169
3.5.3 主要设计特点和参数限制	171
3.5.4 应用技术	171

第4章 绝缘栅控双极型晶体管的基本特性及对栅极驱动电路的要求

4.1 IGBT 的基本结构和工作原理	175
4.1.1 基本结构	175
4.1.2 电路图形符号	176
4.1.3 工作原理	176
4.2 IGBT 的基本特性	177
4.2.1 静态特性	177
4.2.2 动态特性	178
4.2.3 擎住效应	180
4.2.4 安全工作区	181

4.2.5 栅极特性	182
4.3 IGBT 的主要技术参数	184
4.4 绝缘栅控双极型晶体管对驱动电路的要求	186
4.4.1 IGBT 对栅极驱动的特殊要求	186
4.4.2 IGBT 栅极驱动器应满足的条件	187
4.4.3 栅极串联电阻及栅极驱动电压的上升、下降速率	188
4.4.4 栅极驱动电路举例	190

第 5 章 绝缘栅控双极型晶体管栅极驱动控制专用集成电路

5.1 概 述	195
5.2 HL401A IGBT 厚膜集成驱动器	200
5.2.1 引脚排列、名称、功能和用法	200
5.2.2 内部结构及工作原理	201
5.2.3 主要设计特点和参数限制	202
5.2.4 应用技术与典型应用举例	202
5.3 HL402A(B)具有自保护功能的 IGBT 厚膜驱动器集成电路	204
5.3.1 引脚排列、名称、功能和用法	204
5.3.2 内部结构及工作原理	206
5.3.3 主要设计特点和参数限制	207
5.3.4 应用技术与典型应用举例	208
5.4 HL403A(B)可驱动 600A IGBT 模块的厚膜集成驱动器	211
5.4.1 引脚排列、名称、功能和用法	211
5.4.2 内部结构及工作原理	211
5.4.3 主要设计特点和参数限制	211
5.4.4 应用技术及典型应用举例	212
5.5 UC1727/UC2727/UC3727 隔离高端 IGBT 集成驱动器	215
5.5.1 引脚排列、名称、功能和用法	215
5.5.2 内部结构及工作原理	217
5.5.3 主要设计特点和参数限制	218
5.5.4 应用技术与典型应用举例	219
5.6 HR065 IGBT 栅极驱动器集成电路	221
5.6.1 引脚排列、名称、功能和用法	221
5.6.2 内部结构及工作原理	222
5.6.3 HR065 的设计特点及与 EXB 系列电路的对照	224
5.6.4 应用技术与典型应用举例	226

5.7	EXB 系列 IGBT 厚膜驱动器集成电路	230
5.7.1	引脚排列、名称、功能和用法	230
5.7.2	内部结构及工作原理	231
5.7.3	主要设计特点和参数限制	233
5.7.4	应用技术	235
5.8	M57957L/M57958L 不含保护性能的 IGBT 厚膜驱动器集成电路	240
5.8.1	引脚排列、名称、功能和用法	240
5.8.2	内部结构及工作原理	241
5.8.3	主要设计特点、参数限制和推荐工作条件	241
5.8.4	应用技术	242
5.9	M57959AL/M57962AL/M57959L/M57962L 带保护和定时复位的 IGBT 厚膜驱动器集成电路	243
5.9.1	引脚排列、名称、功能和用法	243
5.9.2	内部结构及工作原理	244
5.9.3	主要设计特点、参数限制和推荐工作条件	245
5.9.4	应用技术	247
5.9.5	M57959L 及 M57962L	250
5.10	M57963L 混合集成 IGBT 驱动器集成电路	251
5.10.1	引脚排列、名称、功能和用法	251
5.10.2	内部结构及工作原理	252
5.10.3	主要设计特点、参数限制和推荐工作条件	252
5.10.4	应用技术	254
5.11	GH-038 高速大容量 IGBT 栅极驱动器集成电路	256
5.11.1	引脚排列、名称、功能和用法	257
5.11.2	内部结构及工作原理	257
5.11.3	主要设计特点和参数限制	258
5.11.4	应用技术	259
5.12	GH-039 带有过电流保护功能的高速大容量 IGBT 厚膜驱动器集成电路	260
5.12.1	引脚排列、名称、功能和用法	260
5.12.2	内部结构及工作原理	261
5.12.3	主要设计特点、参数限制和推荐工作条件	262
5.12.4	应用技术	263
5.13	SKH121/SKH122 性能优良的混合双 IGBT 驱动器集成电路	265
5.13.1	引脚排列、名称、功能和用法	265
5.13.2	内部结构及工作原理	266
5.13.3	主要设计特点和参数限制	269

5.13.4	应用技术	270
5.14	IR21141/IR22141 带 IGBT 退饱和保护的半桥驱动集成电路	272
5.14.1	引脚排列、名称、功能和用法	273
5.14.2	内部结构及工作原理	275
5.14.3	主要设计特点和参数限制	275
5.14.4	应用技术与典型应用举例	283
5.15	IR21381Q/IR22381Q 带退饱和及软关断保护的三相桥式 IGBT 栅极驱动器集成电路	285
5.15.1	引脚排列、名称、功能和用法	285
5.15.2	内部结构及工作原理	289
5.15.3	主要设计特点和参数限制	291
5.15.4	应用技术与典型应用举例	302
5.16	2SP0115T 具有完善保护功能的隔离双路大电流 IGBT 栅极驱动器模块	304
5.16.1	各插座插针的排列、名称、功能和用法	304
5.16.2	内部结构及工作原理	306
5.16.3	主要设计特点和参数限制	309
5.16.4	应用技术与典型应用举例	314
5.17	1SC2060P 大电流隔离单管驱动器	319
5.17.1	引脚排列、名称、功能和用法	319
5.17.2	内部结构及工作原理	321
5.17.3	主要设计特点和参数限制	323
5.17.4	应用技术与典型应用举例	333
5.18	TLP358×× 系列光电隔离大电流驱动器集成电路	338
5.18.1	引脚排列、名称、功能和用法	338
5.18.2	内部结构及工作原理	339
5.18.3	主要设计特点和参数限制	340
5.18.4	应用中要特别注意的问题	343

第 6 章 IGBT 栅极驱动器集成电路的具体应用举例

6.1	概 述	345
6.2	IGC2.1 型单管 IGBT 栅极驱动板	348
6.2.1	主要设计特点	348
6.2.2	内部结构和工作原理	348
6.2.3	主要电气参数和极限参数	349
6.2.4	应用技术和使用注意事项	350

6.3	IGC2.2 型单相半桥 IGBT 栅极驱动板	351
6.3.1	主要设计特点	351
6.3.2	内部结构和工作原理	352
6.3.3	主要电气参数和极限参数	354
6.3.4	应用技术和使用注意事项	354
6.4	IGC2.4 型单相全桥 IGBT 栅极驱动板	356
6.4.1	主要设计特点	356
6.4.2	内部结构和工作原理	357
6.4.3	主要电气参数和极限参数	357
6.4.4	应用技术和使用注意事项	358
6.5	IGC2.6 型三相全桥 IGBT 栅极驱动板	360
6.5.1	主要设计特点	360
6.5.2	内部结构和工作原理	361
6.5.3	主要电气参数和极限参数	361
6.5.4	应用技术	361
6.6	IGC3.1T 型单管大功率 IGBT 栅极驱动板	363
6.6.1	主要设计特点	364
6.6.2	内部结构和工作原理	364
6.6.3	主要电气参数和极限参数	364
6.6.4	应用技术	365
6.7	IGC3.2T 型单相半桥大功率 IGBT 栅极驱动板	366
6.7.1	主要设计特点	366
6.7.2	内部结构和工作原理	366
6.7.3	主要电气参数和极限参数	367
6.7.4	应用技术	367
6.8	IGC3.4T 型单相全桥大功率 IGBT 栅极驱动板	368
6.8.1	主要设计特点	369
6.8.2	内部结构和工作原理	369
6.8.3	主要电气参数和极限参数	369
6.8.4	应用技术	370
6.9	IGC3.6T 型三相全桥大功率 IGBT 栅极驱动板	372
6.9.1	主要设计特点	372
6.9.2	内部结构和工作原理	373
6.9.3	主要电气参数和极限参数	373
6.9.4	应用技术	373

附 录 电力电子变流设备介绍及选型	377
附录 1 电力电子变流设备举例	377
附录 2 电力电子变流设备控制板和电力电子器件驱动板选型指南	385
参考文献	401

第1章 电力场效应晶体管的基本特性及对驱动电路的要求

1.1 概述

自从电力电子技术成为独立学科五十多年来,世界各国在电力电子器件方面的研究取得了突飞猛进的进展,极大地带动了电力电子变流设备的研制和应用,使其向高效能化、绿色化、智能化和小型化等方面发展。其中尤其以电力场效应晶体管与绝缘栅控双极型晶体管(IGBT)较为突出。

MOSFET 是 Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (金属氧化物半导体场效应晶体管)的缩写。电力场效应晶体管分为结型和绝缘栅型,但通常将绝缘栅型的 MOSFET 型简称为电力 MOSFET (Power MOSFET)。其特点是用栅-源极电压来控制漏极电流,驱动电路简单,需要的驱动功率小,开关速度快,工作频率高,热稳定性优于电力晶体管(Giant Transistor, GTR),但限于材料及工艺技术条件,目前电力 MOSFET 的电流容量小,耐压低,一般只适合在功率不超过 10kW 的电力电子变流设备中使用。

电力场效应晶体管器件以其优异的高频和自均流性能在各种高频电力电子变流设备中得到广泛应用,成为当代电力电子工程师所必须熟识的器件。本章主要介绍电力 MOSFET 的基本特性及对驱动电路的要求。只有熟练掌握了电力 MOSFET 的基本特性,才能知道驱动它们时应该注意的问题,并有助于理解驱动集成电路的原理和使用方法。后续章节主要列举和介绍电力 MOSFET 的各种常用驱动电路、驱动集成电路、驱动模块和驱动器的应用技术。

1.2 电力场效应晶体管的基本结构和工作原理

为了说明 MOSFET 的结构特点与工作原理,首先要说明场效应器件的基本结构。图 1.1 示出了 N 沟道 MOSFET 的结构。由于输出电流是由栅极通过金属氧化膜半导体系统进行控制的,所以这种结构称为 MOS 结构。在 MOSFET 中只有一种载流子(N 沟道时是电子,P 沟道时是空穴)从源极 S 出发经漏极 D 流出。图 1.2 示出了 MOSFET 的模拟结构,在栅-源极电压 $U_{GS}=0$ 时,漏极与源极间的 PN 结状态与普通二极管一样,为反向偏置状态,此时即使在漏-源极之间施加电压,也不会造成 P 区内载流子的移动,即器件保持关断状态。我们把这种正常关断型的

2 第1章 电力场效应晶体管的基本特性及对驱动电路的要求

MOSFET 称为增强型。其模拟结构如图 1.2(a)所示。

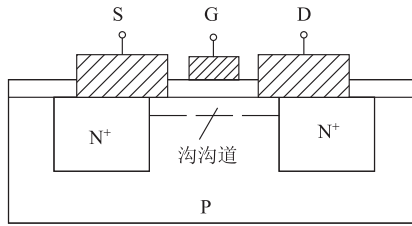


图 1.1 N 沟道 MOSFET 的基本结构

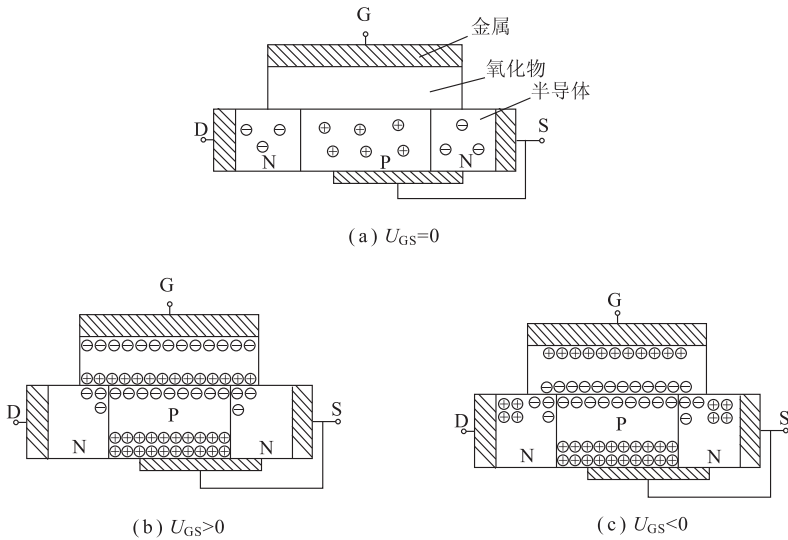


图 1.2 MOSFET 的模拟结构

如果在栅极 G 与源极 S 之间加正向电压 ($U_{GS} > 0$)，就会在栅极下面的硅表面出现耗尽区，接着就出现了负电荷(电子)，硅的表面从 P 型反型成 N 型，如图 1.2 (b)所示，此时电子从源极移动到漏极形成漏极电流 i_D ，我们把导电的反型层称作沟道。如果在栅极与源极之间加反向电压 ($U_{GS} < 0$)，则与上述情况相反，在栅极下面的硅表面上因感应产生空穴，故没有 i_D 电流流过，如图 1.2(c)所示。

从图 1.1 中可以看出，传统的 MOSFET 结构是把源极、栅极及漏极安装在硅片的同一侧面上，因而 MOSFET 中的电流是横向流动的，电流容量不可能太大。要想获得大的功率处理能力，必须有很高的沟道长宽比 (W/L)，而沟道长度 L 受基板和光刻工艺的限制不可能做得很小，所以只能增加管芯面积，这显然是不经济的，甚至是难以实现的。

根据载流子的性质，MOSFET 可分为 N 沟道和 P 沟道两种类型，它们的电路图形符号分别如图 1.3(a)与(b)所示，图中箭头表示载流子移动的方向。图 1.3(a)表示 N 沟道，电子流出源极；图 1.3(b)表示 P 沟道，空穴流出源极。

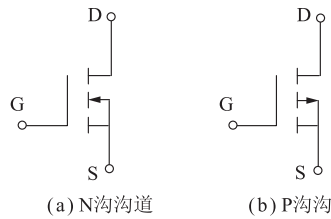


图 1.3 N 沟道和 P 沟道 MOSFET 的图形符号

电力 MOSFET 研究的目的是为了解决 MOS 器件的大电流、高电压问题,以提高其功率处理能力。它既要保持 MOS 器件场控的优点,又要吸收 GTR 的长处,因此其关键是如何既保留沟道又能实现垂直导电。由垂直导电结构组成的场控晶体管称为 VMOSFET (Vertical MOSFET),VMOSFET 在传统的 MOS 器件基础上做了下述三项重大改进:

① 垂直地安装漏极,实现了垂直传导电流,将在原 MOS 结构中,与源极和栅极同时水平安装在硅片顶部的漏极改装在硅片的底面上,这样充分利用了硅片面积,基本上实现了垂直传导漏-源极电流,降低了串联电阻值,为获得大电流容量提供了前提条件。

② 模仿 GTR 设置了高电阻率的 N^- 型漂移区,不仅提高了器件的耐压容量,而且降低了结电容,并使沟道长度稳定。

③ 采用双重扩散技术替代光刻工艺控制沟道长度,可以实现精确的短沟道,降低沟道电阻值,提高了工作频率,并使输出特性具有良好的线性。

根据结构形式的不同,VMOSFET 又分为 VVMOSFET 和 VDMOSFET 两种基本类型。

(1) VVMOSFET

VVMOSFET 结构形式是美国雷达半导体公司在 1975 年首先提出的,其结构如图 1.4 所示,它是在 N^+ 型高掺杂浓度的硅片垫底上外延生长 N^- 型漂移区,在 N^- 高阻漂移区内选择地扩散出 P 型沟道体区,再在 P 型沟道体区内选择地扩散 N^+ 源区。利用各向异性腐蚀技术刻蚀出 V 形槽,槽底贯穿过 P 型体区。在 V 形槽的槽壁处形成金属-氧化膜-半导体系统。 N^+ 型和 N^- 型区共同组成器件的漏区,漏区与体区的交界面是漏区 PN 结。体区与源区的交界面是源区 PN 结。由于源区和体区总是被短路在一起由源极引线引出,因此源区 PN 结处于零偏置状态,而漏区 PN 结处于反向偏置状态。当栅极上加以适当的电压时,由于表面电场效应,就会在 P 型体区靠近 V 形槽壁的表面附近形成 N 型反型层,成为沟通源区和漏区的导电沟道。这样电流从 N^+ 区源极出发,经过沟道流到 N^- 漂移区,然后垂直地流到漏极,首次改变了 MOSFET 电流沿表面水平方向流动的传统概念,实现了垂直导电。这一从横到纵、从水平到垂直的改变是 MOS 功率器件的重大突破。这一突破,为解决大电流技术难题奠定了基础。从结构上说,由于漏极是装在硅片衬底上的,因此不仅充分利用了硅片面积,而且实现了垂直传导电流,可以获得大

4 第 1 章 电力场效应晶体管的基本特性及对驱动电路的要求

的电流容量。在器件中间设置的 N^- 型高阻漂移区,不仅提高了耐压,还减少了栅电容。双重扩散技术精确地控制了短沟道,从而使沟道电阻值降低,使 VVMOSFET 的工作频率和开关速度大为提高。在芯片背面安装漏极可以做到高度集成化,但是 V 形槽沟道的底部容易引起电场集中,故继续提高耐压能力有困难,为此又将槽底改为平的,这种结构则称为 V 形槽 MOSFET。

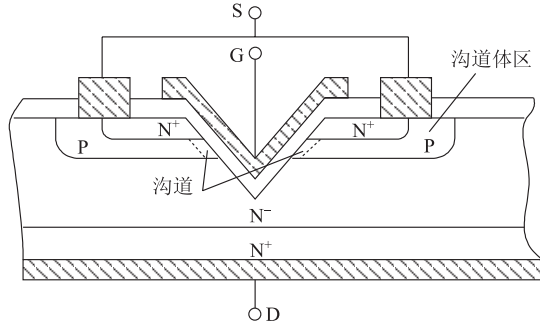


图 1.4 VVMOSFET 的结构

(2) VDMOSFET

垂直导电的双扩散 MOS 结构称为 VDMOSFET,其典型结构如图 1.5 所示。沟道部分是由同一扩散窗利用两次扩散形成的 P 型体区和 N^+ 型源区的扩散深度差形成的,沟道长度可以精确控制。电流在沟道内沿表面流动,然后垂直地被漏极吸收。由于漏极也是从硅片底部引出,所以可以高度集成化。漏-源极间施加电压后,由于耗尽层的扩散使栅极下的 MOSFET 部分几乎保持在一定的电压下,因此可使耐压提高。在这种结构的基础上,VDMOSFET 在高集成度、高耐压、低反馈电容和高速性能方面不断改进提高,出现了诸如 TMOS、HEXFET、SIP-MOS、 π -MOS 等一大批结构各异的新器件。它们采用新的结构图形把成千上万个 MOSFET 单元并联连接,实现了大电流化。

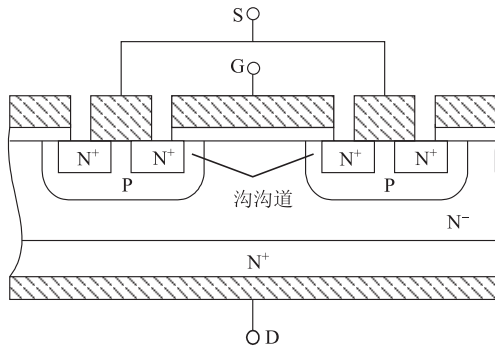


图 1.5 VDMOSFET 的结构

1.3 电力场效应晶体管的基本特性

电力场效应晶体管的基本特性如下。

1. 输出特性 $i_D = f(u_{DS})$

在 N 沟道增强型 VMOSFET 中,当栅-源极电压 u_{GS} 为负值时,栅极下面的 P 型区呈现空穴的堆积状态,不可能出现反型层,无法沟通源区与漏区。即使栅-源极电压为正,但数值不够大时栅极下面的 P 型体区表面呈现耗尽状态,也不会出现反型层,同样无法沟通源区与漏区。在这两种状态下,VMOSFET 都处于截止状态,即使加以漏极电压 u_{DS} ,也没有漏极电流 i_D 出现。只有当栅-源极间电压 u_{GS} 达到或超过强反型条件时,栅极下的 P 型体区表面才会发生反型,形成 N 型表面层并把源区和漏区联系起来,使 VMOSFET 进入导通状态。栅-源极电压 u_{GS} 越大,反型层越厚(即沟道越宽),则漏极电流越大。可见漏极电流 i_D 受栅-源极电压 u_{GS} 的控制,以栅-源极电压 u_{GS} 为参变量反映漏极电流 i_D 与漏-源极间电压 u_{DS} 间关系的曲线族称为 VMOSFET 的输出特性,如图 1.6 所示。输出特性分为三个区域,可调电阻区 I、饱和区 II 和雪崩区 III。

在可调电阻区 I,器件的电阻值是变化的。因为一定的栅-源极电压对应一定的沟道,由于沟道已经形成,只要有很小的漏-源极电压 u_{DS} ,就可以流过一定的漏极电流 i_D 。由于漏-源极电压较小,它对沟道的影响可以忽略不计,这样沟道宽度和沟道电子的迁移率几乎不变,所以 i_D 与 u_{DS} 几乎呈线性关系。

当 u_{DS} 较大后,情况有所不同:一方面随着 u_{DS} 的增加,靠近漏区一端的沟道要逐渐变窄;另一方面沟道电子将达到散射极限,速度不继续增加。于是,尽管 u_{DS} 继续增加,但 i_D 增加缓慢,使沟道的有效阻值逐渐增加,直至靠近漏区一端的沟道被夹断或沟道电子达到散射极限速度,才能使沟道电子的运动摆脱沟道电场的影响,开始进入饱和区 II。此后漏极电流 i_D 趋于稳定不变,即特性曲线趋于与横轴平行。如以后继续增大漏-源极电压,当漏极 PN 结发生雪崩击穿时,漏极电流 i_D 突然剧增,曲线再次转折进入雪崩区 III,直至器件损坏,在应用中应避免这种情况出现。

2. 饱和特性

电力 MOSFET 的饱和特性如图 1.7 所示,由于电力 MOSFET 的通态电阻较大,所以饱和压降也大。这是因为它不像 GTR 那样有超量存储电荷,它是单极型器件,没有载流子的存储效应。为了降低通态电阻,在设计上要采取一些措施。以

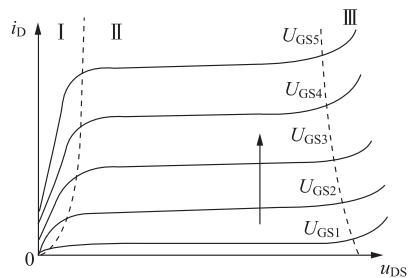


图 1.6 VMOSFET 的输出特性 $i_D = f(u_{DS})$

6 第 1 章 电力场效应晶体管的基本特性及对驱动电路的要求

美国 MOTOROLA 公司的 T MOS 器件为例,其通态电阻 R_{on} 由四部分组成:反型层沟道电阻 r_{CH} 、栅-漏积聚区电阻 r_{ACC} 、FET 夹断区电阻 r_{JFET} 、轻掺杂漏极区电阻 r_D ,如图 1.8 所示。沟道电阻 r_{CH} 随着沟道长度而增加,结的夹断电阻 r_{JFET} 与外延区电阻率和电极宽度成正比,与沟道宽度成反比。为了提高器件的耐压能力,要求外延区电阻率要高、漏区要厚,其结果是 r_D 增大,也使 R_{on} 增大。可见,对耐压和 R_{on} 的要求是相互矛盾的, R_{on} 随温度变化近似呈线性关系,如图 1.9 所示。图 1.9 还表明,器件电压越高, R_{on} 随温度变化越显著。在这样的温度条件下,器件额定电压越高,其 R_{on} 值就越大。

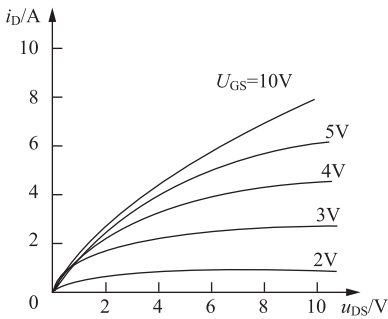


图 1.7 电力 MOSFET 的饱和特性

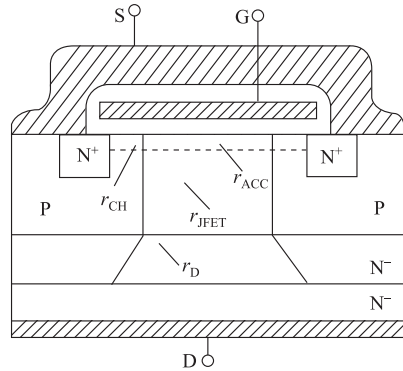


图 1.8 T MOS 器件的通态电阻 R_{on} 的组成

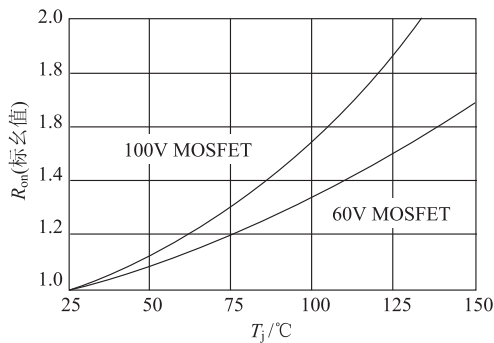


图 1.9 R_{on} 随温度变化的关系

3. 转移特性

转移特性表示电力 MOSFET 的栅-源极输入电压 u_{GS} 与漏极输出电流 i_D 之间的关系。图 1.10 中实线为增强型电力 MOSFET 的转移特性,虚线为耗尽型电力 MOSFET 的转移特性,现在已商品化的电力 MOSFET 中增强型占主流。转移特性表示电力 MOSFET 的放大功率,与 GTR 中的电流增益 β 相仿,由于电力 MOSFET 是电压控制器件,因此用跨导这一参数来表示。

跨导 g_m 定义为

$$g_m = \Delta I_D / \Delta U_{GS} \quad (1.1)$$

式中, g_m 为跨导(S), 表示转移特性曲线的斜率。

由于转移特性的非线性, g_m 与 u_{GS} 的关系曲线也是非线性, 图 1.11 为 MOTOROLA 公司生产的 MTP8N10 型电力 MOSFET 器件在小信号下跨导与栅-源极间所加电压 u_{GS} 的关系曲线。测试条件为 $U_{DS} = 15V$ 、 $T_C = 25^\circ C$ 。为提高 g_m , 除应提高单位管芯面积的沟道长宽比 (W/L) 外, 还应具有良好的工艺, 以保证电子的有效表面迁移率和有效栅-源极限开关速度达到应有的水平。

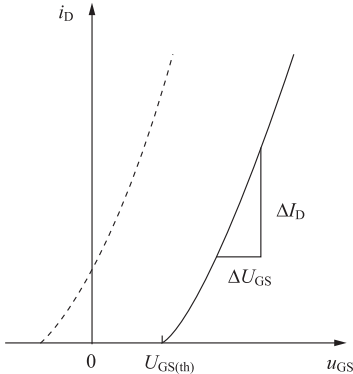


图 1.10 MOSFET 的转移特性

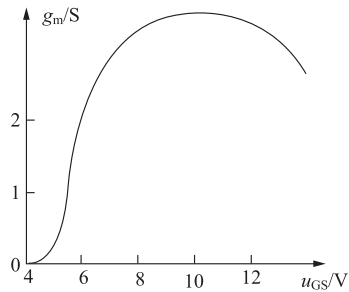


图 1.11 跨导 g_m 与栅-源极间所加电压 u_{GS} 的关系曲线

4. 开关特性

电力 MOSFET 开关特性的测试电路如图 1.12(a) 所示, 开关特性如图 1.12(b) 所示。其中 u_p 为矩形脉冲电压信号源, R_s 为信号源内阻, R_G 为栅极电阻, R_L 为漏极负载电阻, R_F 用于检测漏极电流。

因为 MOSFET 存在输入电容 C_m , 所以当脉冲电压 u_p 的前沿到来时, C_m 有充电过程, 栅极电压 u_{GS} 呈指数曲线上升, 如图 1.12(b) 所示。当 u_{GS} 上升到开启电压 U_T 时, 开始出现漏极电流 i_D 。从 u_p 前沿时刻到 $u_{GS} = U_T$ 并开始出现 i_D 的时刻, 这段时间称为开通延迟时间 $t_{l(on)}$ 。此后, i_D 随 u_{GS} 的上升而上升。 u_{GS} 从开启电压上升到 MOSFET 进入非饱和区的栅-源极电压 $U_{GS(th)}$ 这段时间称为上升时间 t_r , 这时相当于电力场效应晶体管的临界饱和, 漏极电流 i_D 也达到稳态值。 i_D 的稳态值由漏-源极电源电压 U_{DS} 和漏极负载电阻所决定, $U_{GS(th)}$ 的大小和 i_D 的稳定值有关。当 u_{GS} 的值达到 $U_{GS(th)}$, 在脉冲信号源 u_p 的作用下继续升高直至达到稳态, 但 i_D 已不再变化, 相当于电力 MOSFET 处于深度饱和。

当脉冲电压 u_p 下降到 0 时, 栅-源极输入电容 C_m 通过信号源内阻 R_s 和栅极电阻 R_G ($\gg R_s$) 开始放电, 栅-源极电压 u_{GS} 按指数曲线下降, 当下降到 $U_{GS(th)}$ 时, 漏极电流 i_D 才开始减小, 这段时间称为关断延迟时间 $t_{l(off)}$ 。此后, C_m 继续放电, u_{GS} 从 $U_{GS(th)}$ 继续下降, i_D 减小, 到 $u_{GS} < U_T$ 时沟道夹断, i_D 下降为 0。

以上为电阻负载条件下, MOSFET 开关特性的粗略分析。实际上, 随负载为电阻和电感的不同, 开关过程根本不相同。下面按阻性和感性负载的区别详细分

8 第 1 章 电力场效应晶体管的基本特性及对驱动电路的要求

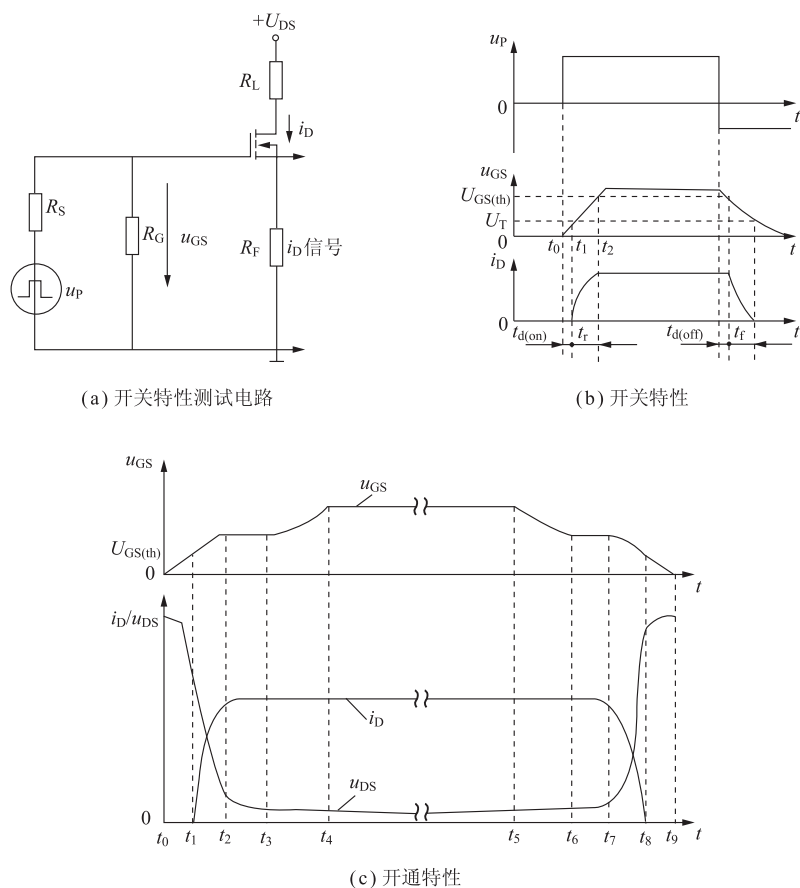


图 1.12 电力 MOSFET 的开关过程

析如下。

1) 阻性负载的开关特性

(1) 开通过程

MOSFET 在 t_0 时驱动[图 1.12(c)],输入电容 C_{in} 通过驱动电路的内阻 R_s 充电,栅-源极电压开始上升。与驱动电路的内阻 R_s 相比,栅极电阻 R_G 的影响可以忽略。在 t_1 时刻达到开启电压, MOSFET 开始导通,栅-源极电压随着负载电阻上压降的上升而下降。

漏极电流在 $t_1 \sim t_2$ 区间内是增加的。此时密勒电容较小,它因漏-源极电压的变化而放电,由传输特性曲线可见漏-源极电压的增加。

在 t_2 时,漏-源极电压 u_{DS} 变得与栅-源极电压 u_{GS} 相等,密勒电容的影响变得显著。在 $t_2 \sim t_3$ 区间, MOSFET 的作用像一个密勒积分器。也就是说,在栅-源极电压保持恒定时,栅极充电电流流过密勒电容,这样导致了漏-源极电压进一步下降。在 t_3 时刻,漏-源极电压达到了由输出特性曲线决定的线性区的末端。

在 $t_3 \sim t_4$ 区间,输入电容 C_{in} 被充电直到等于所加的驱动电压,而且沟道电阻

进一步下降。在 t_4 时, MOSFET 的通态电阻 $R_{DS(on)}$ (漏-源极电压与漏极电流的比值) 达到最大值。

(2) 关断过程

从 t_5 时刻始, 由于漏-源极通态电压很小, 驱动电压开始降低, 关断过程开始。输入电容 C_{in} 上电压已达到用户加到栅-源极间驱动电压的最大值, 并且通过驱动电路的内阻 R_s 放电。栅-源极电压稍稍降低, 在此电压下漏极电流仍能流过电阻区。在 t_6 时刻, 通态电阻只有微微地上升。

在 $t_6 \sim t_7$ 区间, MOSFET 再次表现出一个密勒积分器的作用。当栅-源极电压恒定时, 栅极驱动电流仍然流过该等效密勒电容, 促使漏-源极电压上升。

在 t_7 时刻, 栅-源极电压与漏-源极电压相等, 密勒电容减小。在 $t_7 \sim t_8$ 区间, 密勒电容充电, 漏-源极电压急剧升高, 漏-源电流减小, 以响应负载电阻上压降的变化, 栅-源极电压也减小到某个低值。

在 t_8 时刻, 栅-源极电压达到阈值电压, MOSFET 完全关断。在最后的 $t_8 \sim t_9$ 区间, 输入电容放电直至与驱动电压相等。

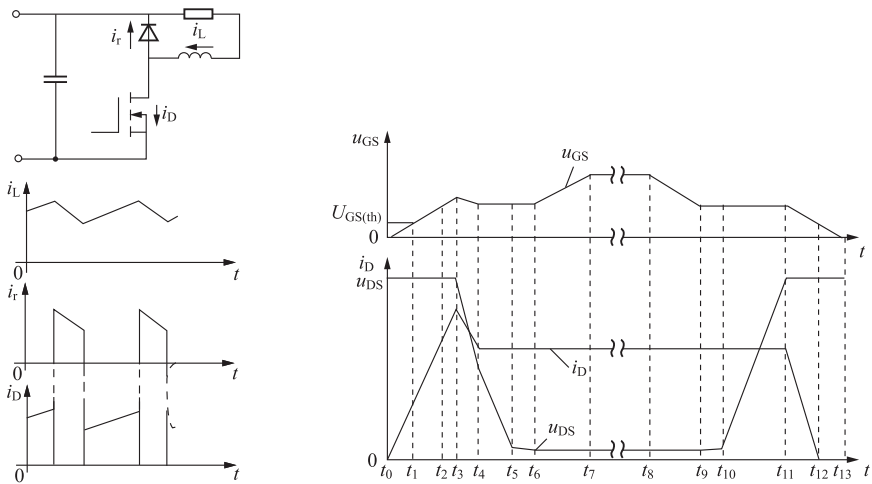
因为在 MOSFET 工作中不涉及存储时间, 所以开关时间只由输入电容的充、放电过程决定。如果驱动电路的内阻 R 可以自由选择, 则 MOSFET 的开关时间可在较宽范围内调节。

2) 感性负载的开关特性

电流流过感性负载和续流二极管时的开关特性如图 1.13 所示, 其详细开关过程的分析如下。

(1) 开通过程

用方波信号驱动 MOSFET 的电路原理如图 1.13 (a) 所示, 在 t_0 时, 随着



(a) 感性负载的电流特性

(b) 感性负载和续流二极管的特性

图 1.13 感性负载时电力 MOSFET 的开关特性

MOSFET 的栅-源极分布电容即输入电容 C_{in} 通过驱动电路内阻充电,栅-源极电压上升,在 t_1 时刻达到阈值电压。在 $t_1 \sim t_2$ 区间,漏极电流与栅-源极电压成正比地上升,同时漏-源极电压保持在工作电压量级。在 t_2 时刻,电力 MOSFET 吸收了全部的负载电流。

在随后的 $t_2 \sim t_3$ 区间,由于二极管的反向恢复电流加到负载电流中,漏极电流进一步上升。在二极管反向恢复电流极性转变点,漏极电流最大。直到此时,漏-源极电压仍然与工作电压相等。漏-源极电压升高到允许电力 MOSFET 产生的峰值电流流过时的数值。

在 $t_3 \sim t_4$ 区间,漏-源极电压下降,二极管的反向电压以同样的数量上升。漏-源极电压下降的速度与密勒电容通过栅极驱动电压放电的速度相同。在这个区间,栅-源极电压应保持恒定,就像在随后的 $t_4 \sim t_5$ 区间一样。

然而在 $t_3 \sim t_4$ 区间,开关过程进一步受到因二极管反向恢复电流引起的漏极电流变化的影响。当栅极电流变小时,栅-源电容通过密勒电容放电。栅-源电压降低到足以使漏极电流流过,因此在这个区间观察到了漏-源极电压波形的突变。

在 $t_3 \sim t_5$ 区间,当漏-源极电压变化时必须特别注意。当电力 MOSFET 用一个低阻抗电源驱动时,漏极电流上升的速率和续流二极管中换向电流的变化率很高,二极管的反向恢复电流达到较高值。一旦其达到最高值后,将开始急剧下降。二极管反向恢复电流的这种急剧变化会导致超过器件额定的击穿电压。

(2) 关断过程

在 t_5 时刻关断过程开始。在 t_5 时刻,栅-源极电压减小到使漏极电流仍然可流过电阻区的程度。在 $t_5 \sim t_{10}$ 区间,MOSFET 的作用像一个具有大电容量密勒电容的密勒积分器。如果漏-源极电压超过了栅-源极电压,则 MOSFET 在 $t_{10} \sim t_{11}$ 区间的作用像一个具有小电容量密勒电容的密勒积分器。在 t_{11} 时,续流二极管导通,以便使漏-源极电压保持恒定。漏极电流与栅-源极电压成正比地下降,在 t_{12} 时刻,栅-源极电压降到关断阈值电压,漏极电流减小到 0。在 $t_{12} \sim t_{13}$ 区间,输入电容完全放去电荷。

5. 极间电容与漏-源极电压的关系 $C=f(u_{DS})$

电力 MOSFET 的极间电容对开关过程有直接影响,其等效电路如图 1.14 所示。这些电容分为两类: C_{GS} 、 C_{GD} 是由 MOS 结构形成的,它们的大小取决于几何形状和绝缘层的厚度,其数值很稳定,几乎不随电压和温度变化; C_{DS} 则是由 PN 结形成的,其大小决定于沟道面积和有关结构的反偏宽度,它将会受到电压和温度变化的影响。在应用中,常用输入电容 C_{in} 、输出电容 C_o 及反馈电容 C_{rss} 的概念,它们与电力 MOSFET 极间电容的关系可参见式(1.6)~式(1.8)。它们与 MOSFET 漏-源极间所加电压 u_{DS} 的大小密切相关。

$$\begin{aligned} \text{当 } u_{DS} < 5V \text{ 时, } C_{rss} < C_{in} < C_o \\ \text{当 } u_{DS} > 5V \text{ 时, } C_{rss} < C_o < C_{in} \end{aligned} \quad (1.2)$$

这些电容与 u_{DS} 的关系曲线如图 1.15 所示。开关时间与器件的极间电容和寄生电感有关,它们之间的关系都是非线性的,因此开关时间明显地与驱动源参数和漏极负载情况有关。测试条件不同,参数值也不同,因此要明确标出测试时的 u_{DS} 、 i_D 、驱动源内阻 Z 、过驱动栅极电压 u_{GS} 的脉冲参数。电力 MOSFET 的开关速度几乎不随温度而变化,其动态损耗也不随温度变化,其开关速度的快慢仅与寄生电容的充放电时间相对应。

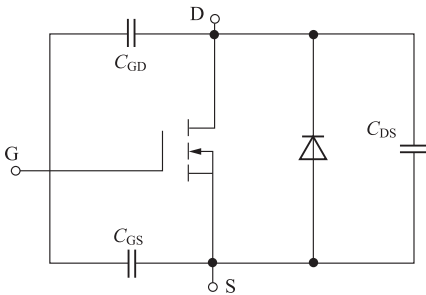
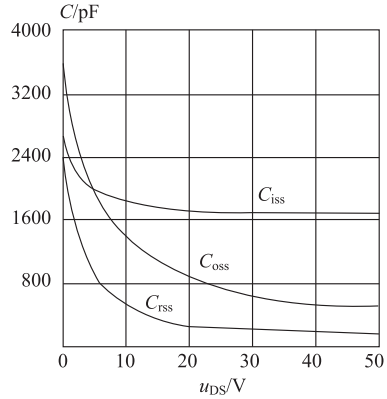


图 1.14 电力 MOSFET 的极间电容等效电路

图 1.15 极间电容与 u_{DS} 的关系曲线

6. 安全工作区

电力 MOSFET 没有二次击穿问题。具有非常宽的安全工作区(SOA),特别是在高电压范围内,但是电力 MOSFET 的通态电阻 R_{on} 比较大,所以在低压部分不仅受最大电流的限制,还要受到自身功耗的限制。

1) 正向偏置安全工作区

电力 MOSFET 的正向偏置安全工作区(FBSOA)如图 1.16 所示。它是由四条边界极限曲线所包围的区域。这四条边界极限曲线是:最大漏源极电压线 I、最大漏极电流线 II、漏-源极通态电阻线 III 和最大功耗限制线 IV。最大功耗的限制曲线和 GTR 相同,是由器件的热响应特性、最大允许结温和最大热阻抗共同决定的,对应不同的工作时间有不同的耐量,时间越短,耐量越大。图 1.16 示出了五种情况:直流 DC、脉宽 10ms、脉宽 1ms、脉宽 $100\mu s$ 、脉宽 $10\mu s$ 。和 GTR 的安全工作区相比,有两点明显的不同:一是电力 MOSFET 无二次击穿问题,故不存在二次击穿功率 P_{SB} 限制线;二是 GTR 饱和压降很小,自身导通功耗低,所以最大电流限制线一直延伸到纵坐标处,而电力 MOSFET 的通态电阻较大,自身导通功耗也较大,所以在低压侧不仅受最大漏极电流的限制,而且受到通态电阻 R_{on} 的限制。

2) 开关安全工作区

开关安全工作区(SSOA)表示电力 MOSFET 工作的极限范围,如图 1.17 所示。它是由最大峰值电流 I_{DM} 、最小漏-源极击穿电压 BU_{DS} 和最大结温 T_{jmax} 决定的,超出该区域,器件将要损坏。图 1.17 给出了一个 I_{DM} 及 BU_{DS} 分别为 50A、

400V 的电力 MOSFET 的开关安全工作区。器件的开通与关断时间均小于 $1\mu\text{s}$ 。

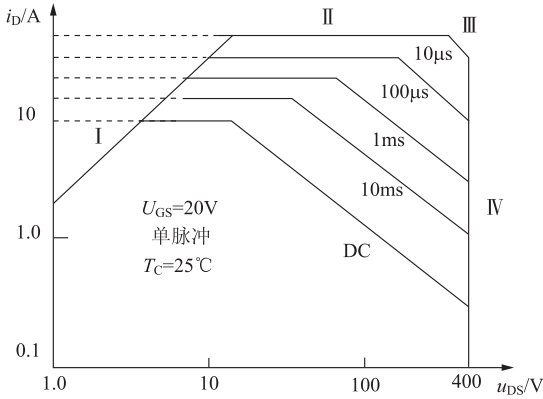


图 1.16 正向偏置安全工作区

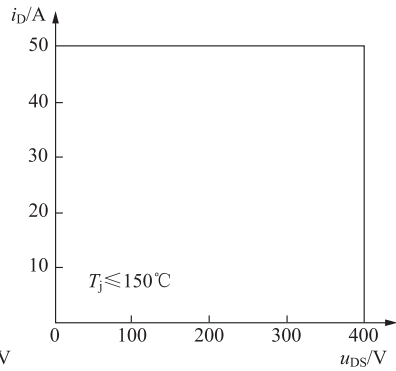


图 1.17 开关安全工作区

3) 换流安全工作区

由于电力 MOSFET 工作频率高,经常处于开关转换过程中,而前述的寄生晶体管又影响开关转换问题,为此还定义了换流安全工作区(CSOA),主要限制反向恢复电荷的数值。影响换流过程的因素很多,最后都归结到反向恢复电荷这个问题上,它们的关系如图 1.18 所示。

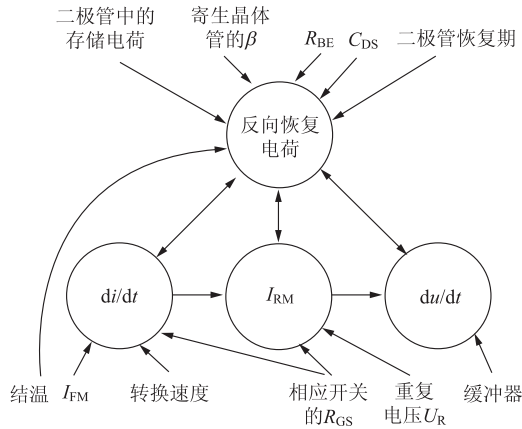


图 1.18 与换流过程和反向恢复电荷有关的因素

图 1.18 中上面一排是与器件相关的参数,下面一排是与电路相关的参数,其中影响最明显的是与电路有关的三个参数:转换前二极管中的最大正向电流 I_{FM} 、重复电压 U_R (或漏-源极峰值电压 U_{DSP}) 及转换速度。

以 MOTOROLA 公司生产的 MTP3055A 型电力 MOSFET 器件为例的 CSOA 如图 1.19 所示。它也是以电压和电流为轴线,上方被二极管最大正向电流所限制,右方被最大允许重复电压所限制,中间曲线分别对应着 $di/dt=200\text{A}/\mu\text{s}$ 和 $100\text{A}/\mu\text{s}$ 的情况。目前有很多 MOSFET 的 CSOA 已接近于图 1.17 所示的开

关安全工作区的形状。例如, MTP3055E 型 MOSFET 在电路杂散电感为 100nH 、电压为 50V 时的 di/dt 可达 $500\text{A}/\mu\text{s}$ 。

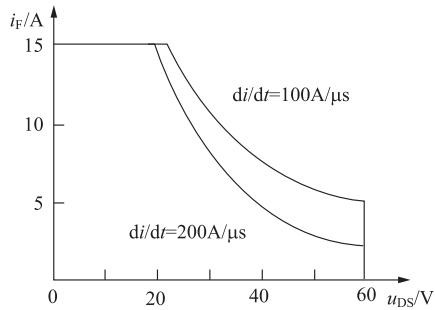


图 1.19 MTP3055A 器件的换流安全工作区

在电力 MOSFET 换流过程中,当器件体内反并联二极管从导通状态进入反向恢复期时,如果漏极电压上升率 du_{DS}/dt 过大,则很容易造成器件损坏。二极管反向恢复期内漏-源极的电压上升率又称为二极管恢复 du_{DS}/dt 耐量。二极管恢复 du_{DS}/dt 耐量是电力 MOSFET 可靠性的一个重要参数。

电力 MOSFET 体内反并联二极管在关断过程中存在反向恢复时间。图 1.20 所示为二极管反向恢复期的电压和电流波形。由图可见,在反向恢复期内,二极管要承受漏-源极间迅速上升的电压变化 du_{DS}/dt ,同时又有反向恢复电流流过。这将使电力 MOSFET 中的寄生双极型晶体管开通,导致其产生类似二次击穿的雪崩现象,从而缩小电力 MOSFET 的安全工作区。

电力 MOSFET 的实际应用中,栅-源极间阻抗、器件结温和电路引线电感等也会对 CSOA 造成影响。

(1) 栅-源极间电阻 R_{GS} 或电感 L_{GS} 的影响

如果 R_{GS} 或 L_{GS} 过大,由于二极管反向恢复产生的 du_{DS}/dt ,可能使 $u_{CS} > U_{CS(th)}$,从而使电力 MOSFET 导通。虽然有时不能使电力 MOSFET 导通,但是可使其进入放大状态,延缓二极管反向恢复时间。图 1.20(a)、(b)分别示出了栅-源极间电阻 R_{GS} 为 10Ω 和 100Ω 情况下,功耗增加时反向恢复期间的电压、电流波形。由图可见, R_{GS} 值较大时,二极管反向恢复时间较长。在这种情况下运行时,虽反向恢复期间功耗增加,但因漏-源极电压峰值较低,故可避免电力 MOSFET 的过电压击穿。

(2) 结温的影响

实验证明,电力 MOSFET 的结温对 CSOA 没有直接影响,但是器件的漏-源极电压和电流直接受结温高低的影响。最终结果是结温升高,CSOA 曲线向缩小的方向变化。

(3) 线路引线电感的影响

电路中的引线电感在二极管反向恢复过程中会产生反电动势,使器件承受很高的峰值电压。二极管换向电流上升率越快或引线电感越大,器件承受的峰值电压越高。过高的电压使对器件 CSOA 的要求更加苛刻。为此,应尽量缩短电路引线,以便