



大功率IGBT驱动与保护技术

杨 媛 文 阳 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

大功率IGBT驱动与保护技术

杨 媛 文 阳 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据大功率IGBT驱动与保护技术的最新发展现状,结合团队多年积累的科研成果和技术经验,对IGBT驱动和保护技术进行了全面的介绍。全书在介绍IGBT器件及驱动最新发展现状的基础上,从IGBT器件结构、特性以及工作原理出发,详细地分析了影响大功率IGBT开关特性的因素,介绍了IGBT模块的参数,进而对IGBT模块的驱动和保护技术进行全面的论述,在此基础上进一步阐述了数字化驱动保护技术以及IGBT串并联技术方案。另外,为帮助从事系统设计的读者选用合适的驱动器,书中介绍了市场上现有的驱动器的使用方法及推荐电路。最后,介绍了IGBT功率模块、IPM模块和IGBT模块驱动测试平台。

本书可供从事IGBT驱动与保护电路设计以及IGBT应用系统设计的高校科研人员和企企业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大功率 IGBT 驱动与保护技术 / 杨媛, 文阳著. —北京: 科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057703-0

I. ①大… II. ①杨… ②文… III. ①绝缘栅场效应晶体管-保护电路-研究 IV. ①TN386.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 115750 号

责任编辑: 宋无汗 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018年6月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 273 000

定价: 88.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

作为第三代电力半导体器件, IGBT(insulated gate bipolar transistor, 绝缘栅双极型晶体管)是电力电子设备中的核心器件, 被广泛应用于轨道牵引、新能源发电、智能电网及国防军工等领域, 而大功率IGBT的驱动电路对IGBT的安全运行起着至关重要的作用。IGBT驱动保护电路作为控制电路和功率器件之间的桥梁, 用来转换和响应控制电路的信号, 从而控制主电路中功率器件的开通和关断。对从事大功率IGBT驱动保护技术研究和应用系统开发的研究人员和工程技术人员来说, 既要掌握IGBT模块的器件特性, 理解驱动保护技术与IGBT模块特性参数之间的关系, 又要深入了解电力电子电路的应用知识, 掌握运行环境对IGBT模块特性的影响, 因此需要能够系统全面的阐述IGBT驱动保护技术方面的参考资料。

本书立足于当前国家电力电子及其应用发展的重大需求, 结合近几年的研究热点和课题团队取得的研究成果, 对大功率IGBT驱动和保护技术进行系统全面的介绍。第1章综述功率半导体器件和IGBT驱动技术的发展现状及趋势, 方便读者了解IGBT模块及驱动保护技术的最新发展动态。第2章对IGBT模块的开关特性和主要参数进行详细的介绍, 基于等效电路分析方法对IGBT开通和关断过程中各个阶段IGBT电流电压的特性进行分析, 介绍IGBT的安全工作区, 同时简单分析续流二极管的特性, 最后从应用的角度介绍IGBT和续流二极管数据手册中的重要参数, 为后续IGBT模块的合理使用和驱动保护技术奠定器件知识基础。第3章对IGBT驱动电路进行详细的介绍, 从电路设计的角度分别阐述驱动电源设计、信号隔离方式以及其他功能要求。第4章对IGBT的各种故障情况及保护策略进行描述, 该章和第3章构成IGBT驱动保护电路设计的基础。第5章结合IGBT驱动保护的最新技术, 介绍数字化驱动保护方案的实现。第6章针对需要多个IGBT模块并联使用的大电流场合, 介绍IGBT并联中存在的问题及并联均流措施。第7章为方便从事IGBT应用系统设计的工程技术人员选用合适的IGBT驱动器, 对市场上现有驱动器的使用方法及推荐电路进行介绍。第8章通过对IGBT与驱动器集成化的发展趋势的了解, 介绍智能功率模块的现状与发展趋势。第9章从IGBT驱动器测试实验的角度介绍常用的IGBT双脉冲测试方法和短路测试方法及常用仪器, 为IGBT驱动器的工程应用提供参考。

在撰写本书的过程中, 得到了项目团队王亮亮、孙浩、刘峰兵、惠城武、冯迎鸽、杨彦鹏、韩立业、付华光、陈厚霖和薛亚飞等研究生的大力支持, 他们参

与了书稿的整理、制图、排版等工作，同时很多章节中的参考资料来自于项目团队郑松、刘海锋、王亮亮、李济、王立虎和韩立业等的论文。在此，对所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的谢意！

本书的出版受到国家自然科学基金项目(No.51477138)、陕西省重点研发计划项目(No.2017ZDXM-GY-130)，以及甘肃省杰出青年基金项目(No.1606RJDE321)的资助。

另外，在撰写过程中，参考了大量国内外的相关书籍和论文，主要文献资料已列于章节后，但难免会有遗漏，在此一并表示衷心感谢。

在撰写过程中，作者力求正确，但书中仍难免有不妥之处，恳请读者批评指正！

杨 媛 文 阳

2017年9月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 功率半导体器件介绍	2
1.2.1 功率二极管	2
1.2.2 功率 MOSFET	4
1.2.3 晶闸管及其相关器件	6
1.2.4 IGBT	9
1.2.5 发展现状及展望	11
1.3 IGBT 驱动介绍	13
1.3.1 被动式驱动电路	14
1.3.2 主动式驱动电路	16
1.4 大功率 IGBT 串并联技术	21
1.4.1 IGBT 并联均流技术	21
1.4.2 IGBT 串联均压技术	23
1.5 展望	25
1.5.1 IGBT 在线监测与故障分析	25
1.5.2 大功率 IGBT 串并联技术	25
1.5.3 SiC 器件驱动与保护电路研究	26
参考文献	26
第 2 章 IGBT 的开关特性及主要参数	28
2.1 等效电路分析	28
2.1.1 IGBT 等效电路	28
2.1.2 开关过程等效电路	30
2.2 IGBT 开关特性	31
2.2.1 IGBT 开通过程	31
2.2.2 IGBT 关断过程	36
2.3 擎住效应	40
2.4 安全工作区	41

2.5	续流二极管	42
2.5.1	续流二极管静态特性	42
2.5.2	续流二极管开通特性	42
2.5.3	续流二极管关断特性	43
2.6	IGBT的数据手册	44
2.6.1	IGBT的极限参数	44
2.6.2	IGBT的特征参数	46
2.6.3	续流二极管的特征参数	50
	参考文献	51
第3章	IGBT 驱动电路	52
3.1	驱动电路简介	52
3.1.1	驱动电压	53
3.1.2	门极电阻	55
3.1.3	驱动电流	58
3.2	驱动电源	59
3.2.1	驱动功率计算	59
3.2.2	DC/DC电路设计	60
3.3	驱动信号隔离	63
3.3.1	光隔离方式	64
3.3.2	脉冲变压器隔离方式	65
3.4	驱动器其他要求	66
3.4.1	短脉冲抑制	66
3.4.2	死区时间设置	67
3.4.3	互锁设置	68
	参考文献	69
第4章	IGBT 故障分析与保护电路	70
4.1	电流故障及其保护电路	70
4.1.1	电流故障分析	70
4.1.2	过电流保护电路	72
4.2	过压保护	79
4.2.1	过压故障与原因分析	79
4.2.2	过压保护电路	80
4.3	过温保护	86
4.3.1	温度对IGBT的影响分析	86

4.3.2 过温保护策略	86
4.4 欠压保护	87
4.4.1 欠压故障分析	87
4.4.2 欠压保护策略	88
参考文献	88
第5章 数字化 IGBT 驱动保护电路的实现	89
5.1 数字化驱动保护器总体方案设计	89
5.2 驱动电路设计	91
5.3 数字化保护电路设计	92
5.4 信号预处理	94
5.4.1 短脉冲抑制	94
5.4.2 死区时间设置	95
5.4.3 互锁设置	95
5.4.4 过频保护	96
参考文献	96
第6章 并联均流	97
6.1 影响并联均流的因素	97
6.1.1 IGBT模块静态均流影响因素分析	97
6.1.2 IGBT模块动态均流影响因素分析	101
6.2 并联均流的措施	102
6.2.1 器件选型	102
6.2.2 驱动电路的对称性设计	102
6.2.3 功率回路的阻抗与寄生参数的对称性	103
6.2.4 降额法	104
6.2.5 有源门极控制法	105
6.2.6 电感均流法	106
6.2.7 有源门极控制IGBT并联均流	107
6.2.8 分散式有源门极控制法	110
参考文献	111
第7章 现有驱动产品介绍及应用	112
7.1 IR系列驱动器	112
7.1.1 IR2110电气特性	114
7.1.2 IR2110驱动电路抗干扰技术	115
7.2 EXB系列集成驱动器	117

7.2.1	EXB系列集成驱动器使用特点	117
7.2.2	EXB系列集成驱动器应用电路	119
7.3	落木源TX-KA101驱动器	121
7.3.1	TX-KA101驱动器基本功能	121
7.3.2	TX-KA101三段式驱动保护	125
7.3.3	TX-KA101应用参考电路	126
7.4	青铜剑2QD0435T17-C驱动器	130
7.4.1	2QD0435T17-C基本功能	130
7.4.2	2QD0435T17-C原边接口电路描述	133
7.4.3	2QD0435T17-C副边接口电路描述	135
7.4.4	2QD0435T17-C工作特点	138
7.5	SCALE系列	140
7.5.1	驱动核概述	140
7.5.2	2SC0535T原方接口电路描述	142
7.5.3	2SC0535T副方接口电路描述	144
7.6	Inpower系列数字驱动器	147
7.7	Amantys门极驱动器	149
7.8	驱动器应用举例	152
7.8.1	驱动器在有源电力滤波器中的应用	152
7.8.2	驱动器在机车牵引中的应用	153
	参考文献	154
第8章	IGBT 功率模块及 IPM	155
8.1	功率半导体模块	155
8.1.1	模块结构与特点	155
8.1.2	功率模块的性能	161
8.1.3	IGBT模块新技术	167
8.2	IPM	171
8.2.1	IPM特点	171
8.2.2	IPM结构与性能	173
8.2.3	IPM保护功能	179
8.2.4	IPM封装新技术	180
8.3	IPM产品介绍	181
8.3.1	低电感内部结构	182
8.3.2	SKiiP系列IPM功能	184

参考文献	187
第 9 章 IGBT 测试与装置	188
9.1 双脉冲测试平台	188
9.1.1 功率部分	188
9.1.2 测量设备	189
9.2 双脉冲测试方法	193
9.2.1 双脉冲测试意义	193
9.2.2 双脉冲测试简介	193
9.2.3 双脉冲实验的关注点	196
9.2.4 双脉冲实验的其他作用	199
9.3 短路测试方法	200
9.3.1 一类短路测试	200
9.3.2 二类短路测试	203
参考文献	204

第 1 章 概 述

1.1 引 言

电力电子技术是国民经济发展的重要支柱，而电力电子器件是电力电子技术的基础。随着大功率半导体技术的发展和完善，电力电子器件广泛应用于各个传统和高技术领域，尤其在近年世界各国不断强调资源保护(如能源节约问题)和开发新能源(如风力和光伏发电)的背景下，这种发展表现出了强劲增长的活力。

低材料消耗/低成本和高效率的部件对未来发展有着十分重要的意义。电力电子器件的应用可以明显节约系统成本，提高能源生产效率并降低系统能耗。图 1-1 显示了目前市场上提供的可控功率半导体器件产品的最高电压和电流等级。目前通过对功率半导体器件的串并联使用，几乎可以转换所有形式的电能。这种方式不但能把电能转换成其他的能源形式，而且可以从其他的能源形式获得电能。

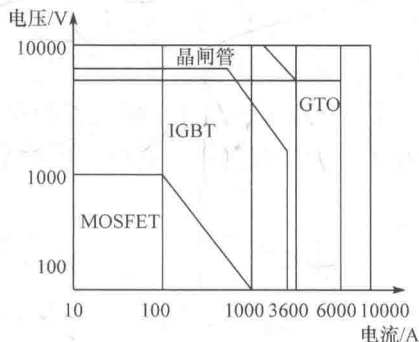


图 1-1 目前可控功率半导体器件的最高电压和电流等级

图 1-2 显示了不同功率半导体器件的开关频率范围及其重要用途和极限，IGBT(绝缘栅双极晶体管)广泛适用于从几千瓦的中功率到几兆瓦的大功率设备。

从 20 世纪 80 年代中期开始，IGBT 和其他一些有主动开关功能的大功率半导体器件，如大功率 MOSFET(金属氧化物半导体场效应晶体管)、GTO(门极可关断晶闸管)和集成模块 IGCT(集成门极换流晶闸管)，在实际应用中已完全取代了传统的晶闸管。而相对于其他大功率半导体器件，IGBT 和 MOSFET 显示出其一系列的优势。例如，IGBT 和 MOSFET 可应用于从主动的开关控制到被动的短路关闭的任何情况，无须关闭整个网络，同时还具有操作简单、开关时间短和开

关损耗相对较低等优点(阿伦特·文特里希等, 2011)。微电子技术的快速发展, 使生产这些大功率半导体器件变得更容易且成本更低廉。

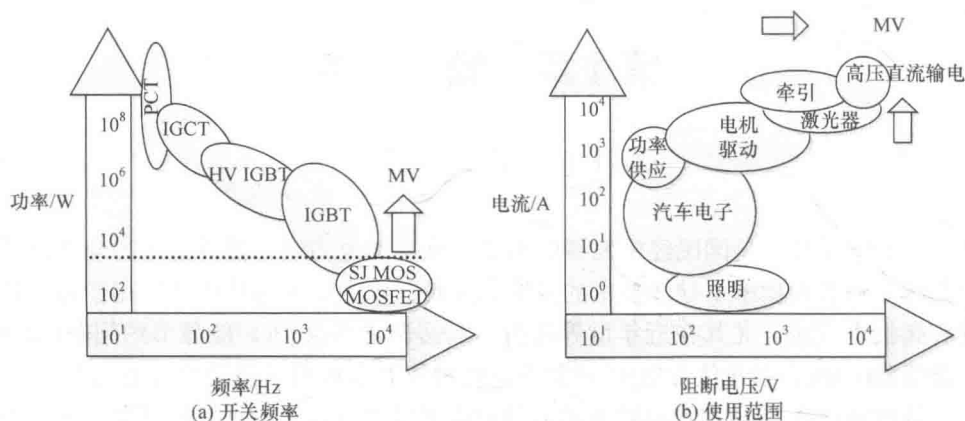


图 1-2 不同功率半导体器件的开关频率及使用范围

1.2 功率半导体器件介绍

1.2.1 功率二极管

1. 功率二极管的结构

功率二极管的外形、符号和结构如图 1-3 所示, 功率二极管的核心部分是一个 PN 结, 在 PN 结两端加上电极引线 and 管壳后制成了功率二极管。

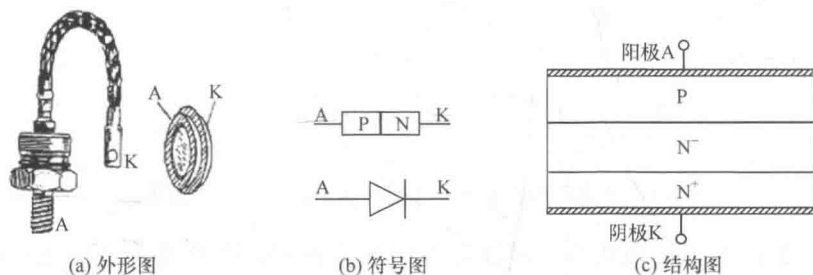


图 1-3 功率二极管的外形、符号和结构

2. 功率二极管的工作原理

由 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起形成二极管, 当外加正向电压(P 型区接正)时, 多子扩散得到增强, 少子漂移受到抑制, 产生正向电流; 当外加反向电压时, 多子扩散受到抑制, 少子漂移得到增强, 只有很小的反向漏电流。因此, 功率二极管具有单向导电性。

功率二极管是一种两端元件,一般作为交流变直流的整流器件。现在电力网络整流使用的半导体二极管绝大部分是用单晶硅制造的,整流二极管可分为 PN 结二极管和肖特基二极管。通过掺杂可将半导体制成 N 型半导体和 P 型半导体,它们的结合部就形成 PN 结,这时形成的就是 PN 结二极管;而肖特基二极管则是由金属和半导体接触而形成结的金属-半导体(接触)二极管,它们都具有单向导电性。

3. 功率二极管的特性

1) I - V 特性

功率二极管具有单向导电性,它有不称的 I - V 曲线,如图 1-4(a)所示。功率二极管在反向电压下只有很小的漏电流,当反向电压超过一定值时,功率二极管反向击穿,反向电流迅速增大;当功率二极管外加正向电压超过 V_{on} 时,正向电流随电压按指数增长。

2) 开关特性

开关过程如图 1-4(b)和图 1-4(c)所示,功率二极管在开通过程中,正向压降会出现一个过冲电压 V_{FRM} ,然后会逐渐趋向于稳态压降值。这一动态过程发生的时间,称为二极管的正向恢复时间 t_{fr} 。当功率二极管外加的正向电压变为反向时,它不会立即关断,而是电流逐渐下降到零,接着出现较大的反向电流和反向过冲电压,在一个反向恢复时间 t_{rr} 后才能截止(Yang et al., 2009)。

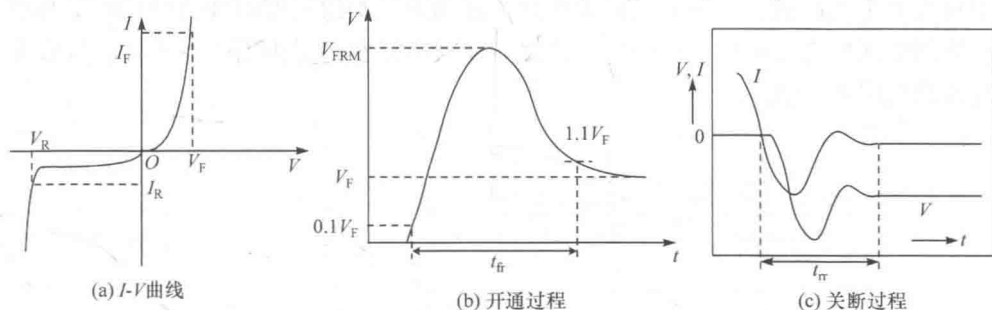


图 1-4 功率二极管的特性曲线

4. 功率二极管的主要参数

(1) 额定电流 I_{FR} : 在指定的管壳温度和散热条件下,器件允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。

(2) 正向压降 V_F : 在指定温度下,流过某一指定的稳态正向电流时器件对应的正向压降。

(3) 反向恢复时间 t_{rr} : 在关断过程中,从器件开始承受反压直到完全恢复反向阻断能力所需要的时间。

1.2.2 功率 MOSFET

功率 MOSFET(power metal-oxide semiconductor field effect transistor)是 20 世纪 70 年代在经典 MOSFET 的基础上发展起来的, 主要作为功率开关使用。功率 MOSFET 具有输入阻抗高、功率增益高和热稳定性好等优点(王兆安等, 2000)。它是多子器件, 导通状态下内部不存在电导调制效应, 因此其导通电阻较大。与常规 MOSFET 不同, 功率 MOSFET 的重点在于提高器件的功率特性, 增大器件的工作电压和工作电流。因此, 功率 MOSFET 的发展主要围绕如何解决器件耐压和功耗之间的矛盾, 产生了许多新结构。

功率 MOSFET 分为横向结构(LDMOS)和纵向结构(VMOS), 现在的功率 MOSFET 一般采用纵向结构, 源极和漏极分别被做在两个表面, 电流在垂直方向流动。纵向结构有 VVMOS、VUMOS、VDMOS 和超结 MOS 等, 实际应用中, 较多采用的是 N 沟道 VDMOSFET。

1. 功率 MOSFET 的结构

以普遍使用的 N 沟道增强型 VDMOS 为例介绍器件结构, VDMOS 器件结构和符号如图 1-5 所示, 其衬底是重掺杂 N^+ (超低阻)单晶硅片, 上方外延生长一个高阻 N^- 层, 称为 N^- 漂移区, 其厚度和电阻率决定了器件的耐压水平; 在 N^- 漂移区上经过 P 型和 N 型两次扩散, 最终形成 $N^+N^-PN^+$ 结构。器件沟道结构采用自对准工艺形成, 工作时在硅表面处形成沟道, 沟道长度由 P 型和 N 型两次扩散的结深决定, 可以做得很短。器件导通时电流在沟道内沿表面流动, 然后垂直流动被漏极接收。

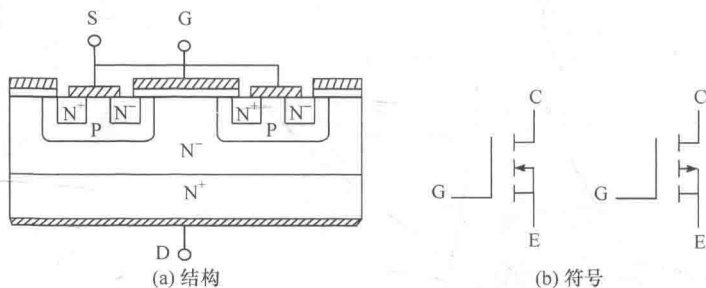


图 1-5 功率 VDMOS 的结构和电气符号

2. 功率 MOSFET 的工作原理

当栅源电压 $V_{GS}=0$ 时, 源极下方的 P 型区表面多子为空穴, 不会出现反型, 源极电子不可能穿过沟道到达漏极。此时, 在漏源之间即使加上正向电压, P 区也不会有载流子移动, 功率 MOSFET 处于关断状态。

当栅源电压 $V_{GS} > 0$ 但没有达到阈值电压时, 门极下方的 P 型区表面呈耗尽状态, 没出现反型, 功率 MOSFET 仍关断; 当 V_{GS} 达到阈值电压时, 门极下方的 P 型区表面会出现反型, 形成 N 型表面层(N 沟道), 把源极和漏极连接起来, 只要漏源之间加正向电压, 就会形成漏极电流 I_D , 功率 MOSFET 就会进入导通状态。

3. 功率 MOSFET 的特性

1) 转移特性

功率 MOSFET 的转移特性是指漏极电流 I_D 和栅源电压 V_{GS} 的关系, 它表明了器件门极电压对漏极电流的控制能力。如图 1-6 所示, I_D 较大时, I_D 与 V_{GS} 的关系近似线性, 曲线的斜率定义为器件的跨导 g_m (Yang et al., 2009)。

2) I - V 特性

在一定的栅源电压 V_{GS} 控制下, 漏极电流 I_D 和漏源电压 V_{DS} 的关系称为功率 MOSFET 的输出特性。如图 1-7 所示, 功率 MOSFET 的 I - V 特性分为三个区域: 截止区、饱和区和非饱和区。当 V_{GS} 没有达到阈值电压时, P 型区表面没有反型, 沟道还没出现, 功率 MOSFET 处于截止区。只有当 V_{GS} 大于阈值电压时, P 型区表面反型, 出现 N 型沟道, 并且 V_{GS} 越大, 反型沟道的电子浓度越大, 沟道电导越高。此时, 漏源之间加正电压, 漏极就会出现电流。当 V_{DS} 较小时, 导电沟道在两个 N 区之间是均匀的; 当 V_{DS} 较大时, 靠近 D 区的导电沟道变窄, 直至夹断, 载流子的漂移速率达到饱和, I_D 呈现恒流特性。

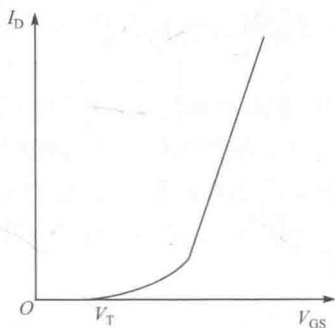


图 1-6 功率 MOSFET 的转移特性

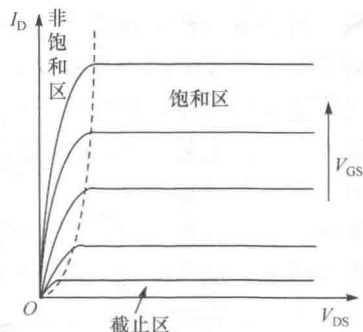


图 1-7 功率 MOSFET 的 I - V 特性

3) 开关特性

在电力电子电路中, 功率 MOSFET 通常作为开关使用。开关时间是衡量器件开关特性的重要指标, 功率 MOSFET 不存在少子存储效应, 因此关断过程非常迅速, 其开关时间通常为 $10 \sim 100\text{ns}$, 工作频率可达 100kHz 以上, 是目前电力电子器件中开关频率最高的。通常来说, 开关频率越高, 所需要的驱动功率越大。

4. 功率 MOSFET 的主要参数

(1) 漏源击穿电压 BV_{DS} : 栅源短路时, 源、漏之间的雪崩击穿电压决定 MOS 管的电压定额。

(2) 栅源击穿电压 BV_{GS} : 栅氧化层的击穿电压, 当 $V_{GS} > BV_{GS}$ 时, 将会导致绝缘层击穿, 决定 G、S 间能承受的最高电压。

(3) 阈值电压 V_T : 使半导体表面产生反型层所需的门极电压。

(4) 跨导 g_m : 表示门极电压控制漏极电流的能力。

(5) 导通电阻 R_{on} : 工作在线性区时源、漏之间的电阻, 决定器件的最大电流定额。

1.2.3 晶闸管及其相关器件

晶闸管俗称可控硅整流器(silicon controlled rectifier, SCR), 是一种大功率半导体器件, 1957 年开发成功, 它的出现使半导体器件由弱电领域扩展到强电领域。晶闸管不仅有定向导通特性, 而且对通断电压和导通电流的可控特性, 是弱电控制强电的“桥梁”, 广泛应用于整流、逆变、调压和开关电源等方面。

1. 晶闸管的结构和工作原理

晶闸管由四个交替 N 型和 P 型半导体组成(图 1-8), 中间的 N 型和 P 型半导体构成正向和反向的高截止 PN 结, 可以把晶闸管分解成一个 NPN 晶体管和一个 PNP 晶体管, 如图 1-9 所示。

当阴极接负电压, 阳极接正电压, 并有一个控制电流从门极流向阴极时, 电子就注入阴极, 也就是 NPN 晶体管的发射极。门极电流被 NPN 晶体管放大, 一部分电子会流到低掺杂度的 N⁻ 区, 它同样是 NPN 晶体管的集电极和 PNP 晶体管的基极。这个电流在 PNP 晶体管中再次被放大并传送到 NPN 晶体管的基极, 这种内部的紧密耦合决定了晶闸管的功能特性。

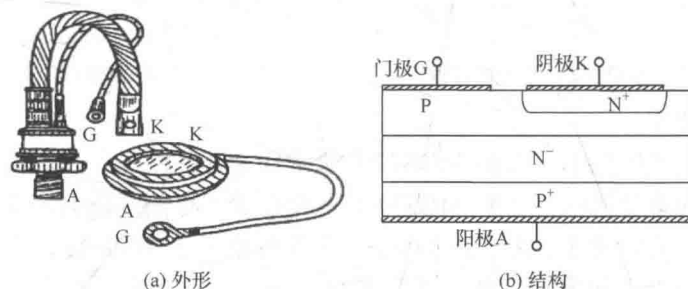


图 1-8 晶闸管的外形和结构

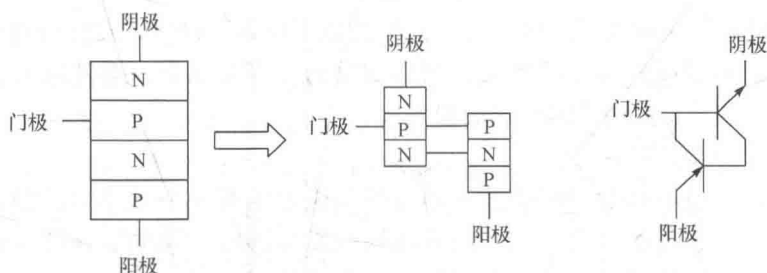


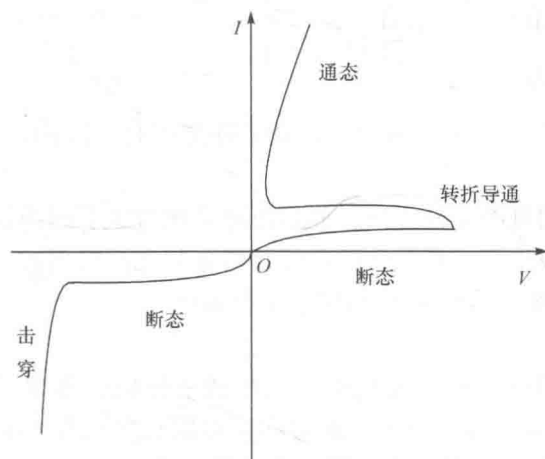
图 1-9 晶闸管的等效电路

当基极电流正好使两个晶体管的放大倍数大于等于 1, 即 $\alpha_{\text{NPN}} + \alpha_{\text{PNP}} \geq 1$ 时, 晶闸管被激发, 进入导通工作状态。基极的一个很小的电流脉冲(如 $10\mu\text{s}$ 的脉冲)就能使晶闸管激发导通。当脉冲消失, 流过晶闸管的电流大于擎住电流 I_L 时, 晶闸管保持导通状态; 当电流低于维持电流 I_H 时, 晶闸管进入正向截止状态。可充当激发电流的有外部的电流源、光照时在空间电荷区产生的电流和高温热效应产生的截止电流等。

2. 晶闸管的特性

1) I - V 特性

如图 1-10 所示, 当晶闸管的阳极和阴极间加正向电压, 门极不加触发电流 $I_G=0$ 时, 器件只有很小的正向漏电流, 此时器件处于正向阻断状态。随着正向电压的增大, 当它超过中间 PN 结的击穿电压时, 漏电流会急剧增大, 器件进入转折导通状态; 当门极加触发电流 $I_G>0$ 时, 中间 PN 结得到足够多的载流子而导通, 晶闸管就会触发导通。

图 1-10 晶闸管的 I - V 特性