

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics

智能制造与装备制造业转型升级丛书

绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 设计与工艺

DESIGN AND PROCESS OF
INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR

◎赵善麒 高勇 王彩琳 等编著

非外借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
电力电子新技术系列图书
智能制造与装备制造业转型升级丛书

绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 设计与工艺

赵善麒 高 勇 王彩琳 等编著



机械工业出版社

IGBT是新型高频电力电子技术的CPU,是目前国家重点支持的核心器件,被广泛应用于国民经济的各个领域。本书共分10章,包括器件结构和工作原理、器件特性分析、器件设计、器件制造工艺、器件仿真、器件封装、器件测试、器件可靠性和失效分析、器件应用和衍生器件及SiC-IGBT。

本书面向电气、自动化、新能源等领域从事电力电子技术的广大工程技术人员和研究生,既满足从事器件设计、制造、封装、测试专业人员的知识和技术需求,也兼顾器件应用专业人员对器件深入了解以满足更好应用IGBT的愿望。

图书在版编目(CIP)数据

绝缘栅双极型晶体管(IGBT)设计与工艺/赵善麒等编著.

—北京:机械工业出版社,2018.9

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 电力电子新技术系列
图书 智能制造与装备制造业转型升级丛书

ISBN 978-7-111-60498-3

I. ①绝… II. ①赵… III. ①绝缘栅场效应晶体管
IV. ①TN386.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第161857号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:罗莉 责任编辑:罗莉

责任校对:刘志文 刘岚 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京铭成印刷有限公司印刷

2018年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·19.25印张·354千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-60498-3

定价:98.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

谨以此书献给所有从事 IGBT 设计、研发、生产和应用的科技工作者，感谢他们为国产 IGBT 的研制和推广做出的杰出贡献！

—— 编著者



第 2 届
电力电子新技术系列图书
编 辑 委 员 会

主 任：徐德鸿

副主任：白继彬 牛新国 康 勇 李崇坚 杨 耕

委 员：(按姓名拼音字母排序)

白继彬 陈 坚 陈道炼 陈守良 陈治明

高艳霞 郭 宏 郭世明 康 勇 李崇坚

李永东 刘进军 吕征宇 牛新国 潘三博

阮新波 孙流芳 孙玉坤 王旭东 王兆安

肖湘宁 徐德鸿 徐殿国 杨 耕 杨 旭

查晓明 张 波 张 兴 张承慧 张卫平

赵善麒 赵争鸣 钟彦儒 周 波 周维维

秘书组：陈守良 孙流芳 杨 旭 罗 莉

电力电子新技术系列图书

序言

1974年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术学科的定义，电力电子技术是由电气工程、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉而形成的。电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率利用，以及对电机运动进行控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术，几乎应用于科技、生产、生活各个领域：电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。进入 21 世纪，电力电子技术在节能减排方面发挥着重要的作用，它在新能源和智能电网、直流输电、电动汽车、高速铁路中发挥核心的作用。电力电子技术的应用从用电，已扩展至发电、输电、配电等领域。电力电子技术诞生近半个世纪以来，也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，电力半导体器件性能不断提高，并出现了碳化硅、氮化镓等宽禁带电力半导体器件，新的技术和应用不断涌现，其应用范围也在不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群。与之相应，从事电力电子技术领域的工程技术和科研人员的数量与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列图书，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，促进电力电子技术及应用知识的普及。

在 20 世纪 80 年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套“电力电子技术丛书”，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。

理论联系实际，以应用技术为主。

本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前言

绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 是在金属氧化物半导体场效应晶体管 (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) 和双极结型晶体管 (Bipolar Junction Transistor, BJT) 的基础上, 结合两者优点发展起来的一种新型复合电力半导体器件。经过穿通型 (Punch-Through, PT) IGBT、非穿通型 (Non-Punch-Through, NPT) IGBT 和场阻止型 (Field-Stop, FS) IGBT 等器件纵向结构的进化, 从平面栅 (Planar-Gate) IGBT、到沟槽栅 (Trench-Gate) IGBT 的栅结构演变, 已成为高电压、大电流、高频电力电子装置中应用最为广泛的电力半导体器件。其应用遍布于工控领域, 如电机调速、各种开关电源、UPS、静电感应加热等; 家用电器, 如变频空调、变频洗衣机、变频冰箱、电磁炉等; 新能源领域, 如太阳能逆变器、风能变流器、电动汽车、电能质量管理等; 轨道交通, 如动车、地铁的牵引系统、车厢的变流装备、车载空调等; 还有, 智能电网与物联网; 城市照明与亮化工程; 医疗器械和半导体装置; 航天航空与军事等。使用 IGBT, 可以将原有电力电子装备的电能消耗降低 10%~40%, 根据 Baliga 教授引用的数据, 1990~2010 年的 20 年间, 如果 50% 的电机采用 IGBT 调速控制技术, 全球累计节约电能 41.9 万亿 kW·h。同时, 减少 20.91 万亿 kg 的二氧化碳排放。我国生产和利用的电机普遍低于三级能效标准, 如果要达到这一标准, 需要采用 IGBT 调速控制技术将电机整体能效提升 5%~8%, 届时, 每年可节约电能 2000 亿 kW·h 左右, 相当于两个三峡电站的年发电量, 减少约 1800 亿 kg 的二氧化碳排放。可见, IGBT 已经成为节能减排的核心器件, 是电力电子装备中绿色的芯。目前我国 IGBT 的市场规模在 2016 年已经超过了 100 亿, 约占全球市场的三分之一。未来几年在电动汽车、光伏及智能制造的牵引下, IGBT 的需求量将以超过 15% 的年复合增长率增长。但具有中国“芯”的 IGBT 器件, 市场占有率不高, 产品系列化不全。国产 IGBT 器件要有大发展, 需要从设计方法、芯片制造工艺、封装、测试及可靠性技术方面下功夫, 需要扎扎实实地做好大量的基础工作。

作为“电力电子新技术系列图书”中的一册, 本书系统地介绍了 IGBT 器件基本结构和工作原理、静动态特性、仿真设计、制造工艺、测试技术及可靠性与失效分析等内容, 并给出了一些典型应用实例。本书还简要介绍了 IGBT 的衍生器件和碳化硅 IGBT 的最新发展。

本书可以作为电子信息科学与技术及电力电子技术等相关专业本科生和研究生

的参考书，也可为 IGBT 应用工程师提供器件方面的专业知识。

本书的整体架构和写作大纲是由江苏宏微科技股份有限公司赵善麒博士提出并撰写，并参与了部分章节的撰写和审核。西安工程大学高勇教授和西安理工大学王彩琳教授分别撰写了主要章节并对全书进行了审核。参与本书撰写工作的还有西安工程大学冯松博士、江苏宏微科技股份有限公司姚天保高级工程师、刘清军高级工程师、西安理工大学杨媛教授、江苏力行电力电子科技有限公司钱昶博士以及魏进博士。江苏宏微科技股份有限公司井亚会硕士参与了本书的整理和校对工作。另外西安交通大学杨旭教授对本书应用章节也提出了宝贵的意见，在此表示感谢！虽经过几轮修改，但水平有限，书中错误和不当之处敬请读者和同行批评指正。

本书的编写提纲得到了“电力电子新技术系列图书”编委会的指导，作者在此向他们深表谢意！

作 者

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章 器件结构和工作原理 1

1.1 器件结构 1

1.1.1 基本特征与元胞结构 1

1.1.2 纵向结构 3

1.1.3 横向结构 8

1.2 工作原理与 $I-U$ 特性 11

1.2.1 等效电路与模型 11

1.2.2 工作原理 12

1.2.3 物理效应 14

1.2.4 $I-U$ 特性 16

参考文献 24

第 2 章 器件特性分析 26

2.1 IGBT 的静态特性 26

2.1.1 通态特性 26

2.1.2 阻断特性 27

2.2 IGBT 的动态特性 31

2.2.1 开通特性 31

2.2.2 关断特性 34

2.2.3 频率特性 40

2.3 安全工作区 44

2.3.1 FBSOA 44

2.3.2 RBSOA 44

2.3.3 SCSOA 45

参考文献 46

第 3 章 器件设计 48

3.1 关键电参数的设计 48

3.1.1 关键参数 48

3.1.2 需要协调的参数 49

3.2 有源区结构设计 50

3.2.1 元胞结构 50

3.2.2 栅极结构 51

3.2.3 栅极参数设计 52

3.3 终端结构设计 54

3.3.1 场限环终端设计 54

3.3.2 场板终端设计 56

3.3.3 横向变掺杂终端设计 57

3.3.4 深槽终端设计 58

3.4 纵向结构设计 59

3.4.1 漂移区设计 59

3.4.2 缓冲层设计 60

3.4.3 集电区设计 62

3.4.4 增强层设计 63

参考文献 65

第 4 章 器件制造工艺 67

4.1 衬底材料选择 67

4.1.1 硅单晶材料 67

4.1.2 硅外延片 69

4.2 制作工艺流程 69

4.2.1 平面栅结构的制作 69

4.2.2 沟槽栅结构的制作 73

4.3 基本工艺 77

4.3.1 热氧化 77

4.3.2 掺杂 79

4.3.3 光刻 85

4.3.4 刻蚀 88

4.3.5 化学气相淀积 92

4.3.6 物理气相淀积 94

4.3.7 减薄与划片工艺 95

4.4 工艺质量与参数检测 98

4.4.1 工艺质量检测 98

4.4.2 工艺参数检测	99	6.4.2 功能单元	174
参考文献	103	6.4.3 仿真技术应用	175
第5章 器件仿真	105	6.5 典型封装技术与工艺	183
5.1 半导体计算机仿真的基本 概念	105	6.5.1 焊接过程	184
5.1.1 工艺仿真	105	6.5.2 清洗	185
5.1.2 器件仿真	106	6.5.3 键合	188
5.1.3 电路仿真	107	6.5.4 灌胶保护	189
5.2 器件仿真方法、软件及流程	107	6.5.5 测试	190
5.2.1 器件仿真方法 (TCAD)	107	6.6 IGBT 模块封装技术的新进展	190
5.2.2 器件仿真与工艺仿真 软件	108	6.6.1 低温烧结技术	190
5.2.3 器件仿真流程	111	6.6.2 压接技术	191
5.3 器件物理模型选取	111	6.6.3 双面散热技术	192
5.3.1 流体力学能量运输模型	111	6.6.4 引线技术	192
5.3.2 量子学模型	113	6.6.5 端子连接技术	193
5.3.3 迁移率模型	114	6.6.6 SiC 器件封装	194
5.3.4 载流子复合模型	116	参考文献	194
5.3.5 雪崩产生模型	118	第7章 器件测试	195
5.4 器件物理结构与网格划分	119	7.1 静态参数	195
5.5 器件电特性仿真	121	7.1.1 集电极-发射极电压 U_{CES}	195
5.6 1200V/100A IGBT 设计实例	123	7.1.2 栅极-发射极电压 U_{GES}	196
5.6.1 元胞设计	123	7.1.3 最大集电极连续电流 I_C	197
5.6.2 终端设计	128	7.1.4 最大集电极峰值电流 I_{CM}	197
5.6.3 器件工艺设计	131	7.1.5 集电极截止电流 I_{CES}	198
参考文献	144	7.1.6 栅极漏电流 I_{GES}	199
第6章 器件封装	147	7.1.7 集电极-发射极饱和 电压 U_{CEsat}	199
6.1 封装技术概述	147	7.1.8 栅极-发射极阈值 电压 $U_{GE(th)}$	200
6.2 封装基本结构和类型	149	7.2 动态参数	200
6.3 封装关键材料及工艺	152	7.2.1 输入电容 C_{ies}	201
6.3.1 绝缘基板及其金属化	153	7.2.2 输出电容 C_{oes}	202
6.3.2 底板材料	160	7.2.3 反向传输电容 C_{res}	203
6.3.3 黏结材料	162	7.2.4 栅极电荷 Q_G	203
6.3.4 电气互联材料	167	7.2.5 栅极内阻 r_g	204
6.3.5 密封材料	168	7.2.6 开通期间的各时间间隔和 开通能量	205
6.3.6 塑料外壳材料	170	7.2.7 关断期间的各时间间隔和 关断能量	206
6.3.7 功率半导体芯片	170	7.3 热阻	208
6.4 IGBT 模块封装设计	171		
6.4.1 热设计	172		

7.3.1 IGBT 的热阻定义	208	9.2 IGBT 驱动电路与设计	259
7.3.2 结-壳热阻 $R_{th(j-c)}$ 和结-壳瞬态热阻抗 $Z_{th(j-c)}$	208	9.2.1 IGBT 的栅极驱动电路	260
7.4 安全工作区	211	9.2.2 栅极电阻选取	260
7.4.1 最大反偏安全工作区 RBSOA	211	9.2.3 驱动电流	262
7.4.2 最大短路安全工作区 SCSOA	213	9.2.4 栅极保护	262
7.4.3 最大正偏安全工作区 FBSOA	215	9.2.5 死区时间	263
7.5 UIS 测试	217	9.3 IGBT 保护电路	263
7.6 可靠性参数测试	218	9.3.1 过电流保护电路	264
7.6.1 高温阻断试验 (HTRB)	220	9.3.2 过电压保护电路	265
7.6.2 高温栅极偏置 (HTGB)	220	9.3.3 过热保护电路	266
7.6.3 高温高湿反偏 (H^3 TRB)	221	9.3.4 典型的驱动电路示例	267
7.6.4 间歇工作寿命 (PC)	222	9.4 IGBT 评估测试	267
7.6.5 温度循环 (TC)	223	9.4.1 双脉冲测试法	267
参考文献	224	9.4.2 双脉冲测试设备	268
第 8 章 器件可靠性和失效分析	225	参考文献	273
8.1 器件可靠性	225	第 10 章 衍生器件及 SiC-IGBT	274
8.1.1 闩锁电流	225	10.1 双向 IGBT	274
8.1.2 雪崩耐量	231	10.1.1 基本结构	274
8.1.3 抗短路能力	235	10.1.2 器件特性	276
8.1.4 抗辐射能力	238	10.1.3 工艺实现方法	278
8.2 器件失效分析	242	10.2 逆导 IGBT	279
8.2.1 过电压失效	243	10.2.1 基本结构	280
8.2.2 过电流与过热失效	246	10.2.2 器件特性	280
8.2.3 机械应力失效分析	250	10.2.3 工艺实现方法	283
8.2.4 辐射失效分析	252	10.3 逆阻 IGBT	283
参考文献	254	10.3.1 基本结构	283
第 9 章 器件应用	256	10.3.2 器件特性	283
9.1 IGBT 应用系统介绍	256	10.3.3 工艺实现方法	284
9.1.1 IGBT 损耗的计算	257	10.4 超结 IGBT	284
9.1.2 IGBT 电压、电流等级选取	258	10.4.1 基本结构	285
		10.4.2 器件特性	285
		10.4.3 工艺实现方法	287
		10.5 SiC-IGBT	288
		参考文献	292

第 1 章

器件结构和工作原理

本章主要介绍了 IGBT 的基本特征与结构类型、等效电路与工作原理、内部物理效应及 $I-U$ 特性。

1.1 器件结构

1.1.1 基本特征与元胞结构

1. 基本特征

绝缘栅双极型晶体管 (Insulate Gate Bipolar Transistor, IGBT) 是在纵向双扩散 MOS 场效应晶体管 (Vertical Double Diffusion MOS Field Effect Transistor, VDMOS) 的基础上发展而来的。IEC 60747-9-2007 中将绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 定义为具有导电沟道和 pn 结, 且流过沟道和结的电流由施加在栅极和集电极-发射极之间电压所产生的电场来控制的晶体管^[1]。

图 1-1 给出了 IGBT 与 VDMOS 的剖面结构图^[2]。如图 1-1a 所示, 在 VDMOS 结构中, 栅极和源极均位于芯片上表面, 漏极位于下表面。当栅极-源极外加电压高于阈值电压 (即 $U_{GS} > U_T$) 时, p 体区表面反型, 形成 n 型导电沟道, 于是在外加的正向漏极-源极电压 (即 $U_{DS} > 0$) 作用下, n^+ 源区的电子经沟道进入 n^- 漂移区, 再通过漂移到达 n^+ 漏区, 形成由源极到漏极的电子流, 即漏极电流就是由漏极流到源极电子电流。由于 VDMOS 中只有一种载流子 (多子) 导电, 导通期间不

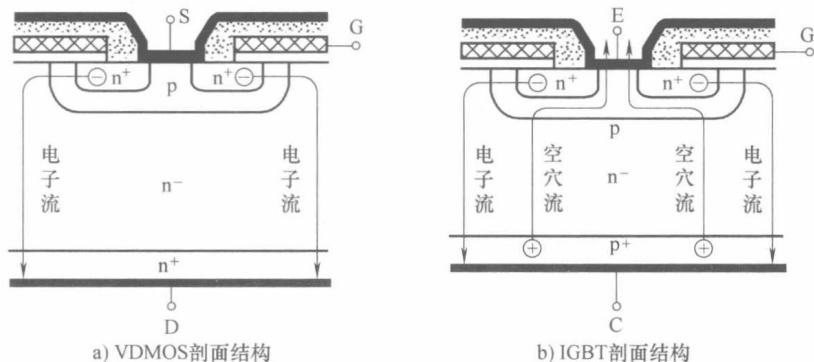


图 1-1 IGBT 与 VDMOS 的剖面结构比较

存在电导调制效应, 所以其导通电阻较大。特别是当 VDMOS 的击穿电压较高时, n^- 外延层较厚, 漂移区电阻增大, 使其导通电阻随之增加。通常, VDMOS 的击穿电压 U_{BR} 和导通电阻 R_{ON} 之间的关系用 $R_{ON} \propto U_{BR}^{1.4-2.6}$ 来表示^[3]。

如图 1-1b 所示, 如果在 VDMOS 的漏极增加一个 p^n 结, 或者说, 将漏极 (衬底) n^+ 区改为 p^+ 区, 同时将 VDMOS 的漏极 (D) 改为集电极 (C), 源极 (S) 改为发射极 (E), 并保持 MOS 结构的栅极 (G) 不变, 于是 VDMOS 结构就变成了 IGBT 结构。在 IGBT 导通期间, 当 n^+ 发射区的电子经沟道进入 n^- 漂移区后, 会导致 n^- 漂移区的电位下降, 于是背面的 p^+ 集电区会向 n^- 漂移区注入空穴, 形成由集电极到发射极的空穴流, 其方向正好与沟道注入的电子流相反。显然, IGBT 的集电极电流是由电子电流和空穴电流两部分组成, 并从集电极流向发射极。可见, IGBT 结构虽然是由 VDMOS 结构演变而来, 但 IGBT 的工作模式已由 VDMOS 的单极变为双极模式, 导通时有两种载流子参与导电, 故 IGBT 实质上是一个电压控制的双极型器件。

双极型器件有一个共同的特点, 即在导通期间内部存在电导调制效应, 使其饱和电压明显下降。同时, 由于存在少数注入, 关断期间这些非平衡载流子必须通过复合逐渐消失, 导致其开关速度有所减慢。因此, 发展 IGBT 需要解决的主要问题就是, 在保证阻断能力的前提下, 尽量协调好饱和电压与开关速度之间的矛盾关系。

2. 元胞结构

IGBT 元胞剖面结构如图 1-2 所示, 是一个由 MOS 控制的五层三结、三端子器件。为便于分析, 通常定义 p^+ 集电区与 n^- 缓冲层形成的 pn 结为 J_1 结, p 基区与 n^- 漂移区形成的 pn 结为 J_2 结, p 基区与 n^+ 发射区形成的 pn 结为 J_3 结。

IGBT 的输入端为 MOS 栅极, 沟道位于 p 基区表面, 沟道长度由两次扩散的横向结深决定, 不受光刻精度的限制, 可以做得很短。 n^+ 发射区位于 p 基区内, 并与 p 基区短路, 以消除由 n^+ 发射区、 p 基区及 n^- 漂移区所形成的寄生 npn 晶体管。若 p 基区的横向电阻 (也称为短路电阻) R_B 较大, 容易诱发寄生 npn 晶体管导通。为了减小 R_B , 通常在 p 基区的正下方制作一个 p^+ 阱区, 并尽量减小 n^+ 发射区的横向尺寸。所以, IGBT 芯片通常由许许多多小元胞并联而成, 这样不仅可以减小 R_B , 防止寄生 npn 晶体管工作, 而且可以增加沟道宽度, 从而提高电流容量。

IGBT 的输出端为集电极, 位于整个器件的下表面。在集电极侧, 具有承担外加反向电压的 J_1 结。 n^- 缓冲层位于 n^- 缓冲层位于 p^+ 集电区与 n^- 漂移区之间, 因其

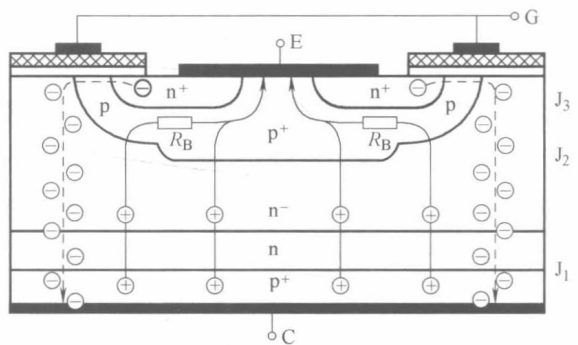


图 1-2 IGBT 元胞剖面结构

阻断时可以压缩 n^- 漂移区电场，提高阻断电压，故 n^- 漂移区厚度可以减薄，导通电阻降低，饱和电压减小；同时，导通时可以限制集电区空穴注入，降低 J_1 结空穴注入效率，提高关断速度，达到改善 IGBT 导通特性和开关特性的目的，但由于 n 缓冲层的浓度较高，使得 J_1 结的击穿电压较低，故 IGBT 的反向阻断电压很低。

3. 特点

IGBT 因输入端采用 MOS 结构，输出端采用双极晶体管结构，因而综合了 MOSFET 和 BJT 两者的共同优点，集 MOSFET 的栅极电压驱动简单和双极晶体管 (BJT) 的低导通电阻于一体，具有阻断电压高、电流容量大、驱动功率小、开关损耗低、工作频率高以及安全工作区 (SOA) 宽等优点，是近乎理想的电力半导体器件，是目前 MOS-双极型功率器件的主要发展方向之一，有十分广阔的应用前景。

目前，IGBT 从 5kW 的单管到 500kW 的模块，在 600~6500V 电压范围内、20kHz 以上的中频领域内可取代功率 MOSFET、功率双极晶体管及 GTO 晶闸管。采用 IGBT 开发的相关电力电子设备，以其独特的、不可取代的特殊功能，几乎应用于国民经济的各个领域，包括通信、工业、医疗、家电、照明、交通、新能源、半导体生产设备、航空、航天及国防等诸多领域。

1.1.2 纵向结构

纵向结构与器件特性密切相关，决定了器件的耐压、饱和电压及开关速度。IGBT 的纵向结构包括耐压结构和电子注入增强 (IE) 辅助层结构。前者主要是为了改善器件的阻断电压和饱和电压而提出的不同结构，后者主要是为了降低高压 IGBT 的饱和电压而提出的新结构，并且都与提高器件的开关速度有关。下面分别加以介绍。

1. 耐压结构

IGBT 的耐压结构主要有穿通型 (Punch Through, PT)、非穿通型 (Non-Punch Through, NPT) 及场阻止型 (Field Stop, FS)^[4] 三种结构。此外，还有由 PT-IGBT 和 NPT-IGBT 派生的弱穿通 (Light Punch Through, LPT) 结构^[5]，由 FS 派生的软穿通 (Soft Punch Through, SPT)^[6]、可控穿通 (Controlled Punch Through, CPT)^[7]、多 FS 层结构及隐埋 FS 结构^[8] 等，也用在不同公司的产品中。图 1-3 为 IGBT 三种主要纵向耐压结构及其电场强度分布图。

(1) 穿通型 (PT) 结构 如图 1-3a 所示，PT-IGBT 采用外延片，较厚的 p^+ 衬底上有 n 缓冲层和 n^- 漂移区两层外延层。在外加正向集电极-发射极电压 ($U_{CE} > 0$) 下，由反偏的 J_2 结来承担外加电压 U_{CE} ， J_2 结耗尽层主要向 n^- 漂移区扩展。由于 n^- 漂移区较薄，当 J_2 结峰值电场还未达到临界击穿电场时，耗尽层已经穿通 n^- 漂移区扩展至 n^-n^+ 结处，故称之为穿通型，于是 n^- 漂移区的电场在 n 缓冲层内被压缩，使其电场强度近似为梯形分布。PT-IGBT 的正向阻断电压就是梯形电场强度

分布的面积。

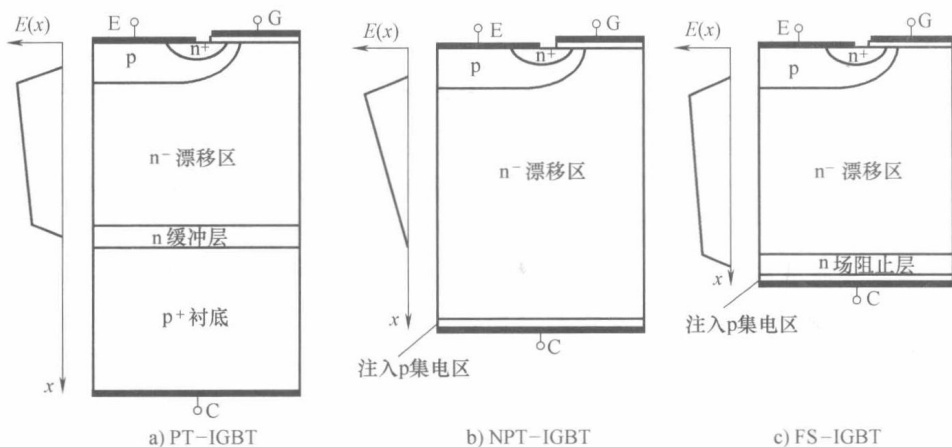


图 1-3 IGBT 三种主要耐压结构及其电场强度分布

(2) 非穿通型 (NPT) 结构 如图 1-3b 所示, NPT-IGBT 的 n^- 漂移区为衬底, 采用了原始高阻区熔单晶材料, 故成本较低。集电区是利用离子注入工艺形成的薄 p^+ 区。在外加正向集电极-发射极电压 ($U_{CE} > 0$) 下, NPT-IGBT 的 J_2 结反偏来承担外加电压 U_{CE} , J_2 结耗尽层也向 n^- 漂移区扩展。由于 n^- 漂移区较厚, 当 J_2 结的峰值电场达到临界击穿电场时, 耗尽层还未穿透 n^- 漂移区, 故称之为非穿通型, 此时 n^- 漂移区中还存在中性区域, 于是便形成了三角形的电场强度分布。NPT-IGBT 的正向阻断电压就是三角形电场强度分布的面积。

(3) 场阻止型 (FS) 结构 如图 1-3c 所示, FS-IGBT 的 n^- 漂移区也是采用原始的高阻区熔单晶材料, 集电区利用离子注入工艺形成的薄 p^+ 区。与 NPT-IGBT 结构不同的是, 在 n^- 漂移区和 p^+ 集电区之间增加一个掺杂浓度比缓冲层低的 n 型场阻止层, 导致 n^- 漂移区较薄。在外加正向集电极-发射极电压 ($U_{CE} > 0$) 下, 反偏的 J_2 结耗尽层也向 n^- 漂移区扩展。当反偏的 J_2 结的峰值电场强度还未达到临界击穿电场强度时, 耗尽层已经穿通 n^- 漂移区扩展至 n FS 层, 形成了类似于 PT-IGBT 的梯形电场强度分布。但由于 n FS 层的浓度较低, 对 n^- 漂移区电场强度的压缩有限, 故 n^-n 结处的电场峰值较低。FS-IGBT 的正向阻断电压就是梯形电场强度分布的面积。

PT-IGBT 与 FS-IGBT 的主要区别在于 n 缓冲层和 n FS 层有所不同。由于 n 缓冲层的浓度较高 (在 10^{17}cm^{-3} 以上)、厚度较薄 (约为 $10 \mu\text{m}$), 所以, n 缓冲层不仅压缩 n^- 漂移区的电场, 还可以阻挡 p^+ 集电区的空穴注入, 降低集电极的空穴注入效率; 而 FS-IGBT 中的 n FS 层的浓度较低 (通常在 10^{16}cm^{-3} 以下), 且厚度随耐压而变化 ($2 \sim 30 \mu\text{m}$), 因此, n FS 层不会降低集电区的空穴注入效率, 仅仅起压缩 n^- 漂移区电场的作用, 并且压缩程度有限, 故称为场阻止层。

表 1-1 对比了三种不同耐压结构 IGBT 的主要特点、制作工艺及特性。从成本

而言, PT-IGBT 结构采用外延材料, 虽然衬底成本高, 但工艺简单, 一般情况下不需要减薄工艺, 故工艺成本较低。但当衬底较厚时, 为了降低热阻, 也可采用减薄工艺来减小集电区厚度。NPT-IGBT 采用高阻区熔单晶材料, 虽然材料成本低, 但需要用离子注入工艺形成集电区, 并需要用减薄工艺来减小 n^- 漂移区厚度以获得较低的饱和电压, 所以工艺成本较高。FS-IGBT 也采用高阻区熔单晶材料, 同时需采用离子注入工艺形成集电区和 FS 层, 需要减薄工艺来减小 n^- 漂移区厚度, 故工艺成本比 NPT-IGBT 更高。

表 1-1 三种不同耐压结构的 IGBT 结构特点、制作工艺及特性比较

结构名称		PT-IGBT	NPT-IGBT	FS-IGBT
结构特征及参数	n^- 漂移区	外延层 厚度较薄	原始衬底材料 厚度较厚	原始衬底材料 厚度很薄
	缓冲层/FS 层	外延层 浓度约 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 厚度为 $5 \sim 15 \mu\text{m}$	无	离子注入或扩散形成 浓度为 $10^{14} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; 厚度为 $2 \sim 30 \mu\text{m}$
	p^+ 集电区	原始衬底材料 厚度很厚 浓度约 10^{19} cm^{-3}	离子注入形成 厚度很薄, 几微米 浓度为 $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	离子注入形成 厚度很薄, $0.5 \mu\text{m} \sim$ 几微米 浓度约 10^{18} cm^{-3}
	总厚度	厚	中	薄
制作工艺	衬底材料	外延片	高阻区熔单晶	高阻区熔单晶
	减薄工艺	减薄 p^+ 衬底	减薄 n^- 漂移区	减薄 n^- 漂移区
	寿命控制	有	无	无
特性	J_1 结注入效率	高	低	低
	电场强度分布	近似梯形分布	三角形分布	近似梯形分布
	饱和电压	最低	高	低
	阻断电压	$< 600\text{V}$	$> 600\text{V}$	$> 600\text{V}$
	拖尾电流	小而长	大而短	小而短
可靠性	多芯片并联使用	不宜	适宜	适宜
	抗短路能力	弱	最强	强
	抗动态雪崩能力	弱	最强	强

从芯片总厚度来看, PT-IGBT 最厚 (主要因 p^+ 衬底较厚), NPT-IGBT 次之, FS-IGBT 的最薄; 但从 n^- 漂移区厚度看, NPT-IGBT 最厚, PT-IGBT 最薄。对于 1200V IGBT, NPT-IGBT 的 n^- 漂移区厚度约为 $175 \mu\text{m}$, FS-IGBT 的 n^- 漂移区厚度约为 $110 \mu\text{m}$, 是 NPT-IGBT 的 $2/3$, PT-IGBT 的 n^- 漂移区厚度仅为 NPT-IGBT 的 $3/5$ 。可见, PT-IGBT 的饱和电压最低, 但其抗短路能力较弱; NPT-IGBT 的饱和电压较大, 其抗短路能力较强, 并且由于其饱和电压具有正的温度系数, 适合并联使用。相比较而言, FS-IGBT 更有利于改善器件的阻断特性、通态特性和开关特性之间的矛盾关系, 并具有较强的抗短路电流和抗动态雪崩的能力。