

实用电子技术丛书

# IGBT基础与应用实务

吴红奎 编



科学出版社  
www.sciencep.com

实用电子技术丛书

# IGBT 基础与应用实务

吴红奎 编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是“实用电子技术丛书”之一,从实践和应用的角度介绍了 IGBT 的概念与一般应用。考虑到 IGBT 是一种新型功率电子器件,相关理论目前尚不完善,多种理论并存而且各自都有自己的佐证,同时也考虑到本书是针对功率电子领域的入门者与实践者,因此尽量避免了介绍艰深的理论知识而侧重于应用。

本书内容包括认识 IGBT、实践入门、IGBT 技术参数详解、基本电路、简单设计、范例电路等。作者根据自己的从业经验,试图从应用的角度告诉读者:撇开芯片级的 IGBT 制造理论和电路设计理论,IGBT 用起来并不难。因此本书对于业余爱好者、即将就业的电子专业大学生有启发性作用,对刚刚从事功率电子电路硬件设计的工程师亦有参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

IGBT 基础与应用实务/吴红奎编.—北京:科学出版社,2010

(实用电子技术丛书)

ISBN 978-7-03-028970-4

I .I… II .吴… III .绝缘栅双极晶体管-基本知识 IV .TN386.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 177816 号

---

责任编辑:喻永光 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

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>

北京天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 11 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 11 月第一次印刷 印张: 15 1/4

印数: 1—5 000 字数: 230 000

**定 价: 32.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

---

这是一本业余电子爱好者给业余电子爱好者编写的书。

笔者曾经分不清电子爱好者和无线电爱好者的区别,很长时间里自诩为无线电爱好者。后来逐渐明白,无线电爱好者的门槛其实更高,要花的钱也更多,即使将收音机爱好者算作无线电爱好者,也比很多电子电路复杂,甘做电子爱好者,心中也就释然了。

除去无线电,电子的领域仍然很宽泛,即使科班出身的人(大专以上电子类相关专业),也难以涵盖全部。不过,这样的爱好者一般都有相当的理论基础,即使爱好离所学专业很远,恐怕也超出了业余爱好者的范围。

所学专业与电子无关,这样的电子爱好者应该才算是“正宗”的业余爱好者。即使是这样的爱好者,有些也有着相当的理工科基础和英语水平,与无缘大学乃至缺少学习机会的爱好者相比,仍然要幸福得多。

因为是业余的,很难有从事专业研究的机会,爱好以体验实践为主也就不足为奇了;对理论与原理不求甚解,创新与原创也就少之又少了。请不要误解,这不是为轻视基础理论研究找借口,尽管这也是很多生产商忽略的地方;一旦过了专门学习的阶段,系统学习、实践一门基础理论知识实在不是件容易的事情。

笔者有幸接受过高等教育,专业却与电子不相干,好在学习初中物理课本中电学部分的时候(大约是初中二年级吧),学校有很好的实验室和实验条件,电学部分没有学完,笔者已经能在家里自行为电器布线了,至今仍颇感自豪。

一个偶然的的机会,笔者有幸参与了一家民营企业对板级封装模块的研发与试产。在与客户打交道的过程中,曾不止一次被问及诸如“125W 的管子(MOS 或 IGBT)能输出多大的功率”这种看似简单却不容易正确回答的问题;如果将整机设备看作一幢大楼,管子就像是盖大楼所需的砖石、水泥,这些砖石、水泥能盖多高的楼?这不是个应该有严格答案的问题(路边的窝棚和百米高大楼,都是用砖石、水泥盖起来的)。

但是,如果这样的问题能有个不太严格的答案,对理论不扎实或者没有理

论基础的人而言则很有用,而且这其中也的确有一定的规律可循。

本书的目的就是从不严格角度出发,用没有普适性的实践经验和自身经历帮助入门者大胆使用 IGBT。

基于此,本书内容并没有真正原创的东西,编者将自认为有用的零散知识串了起来,有点像技术类“散文”,希望对初学者有所帮助。

无数同行和业者积累了弥足珍贵的理论与应用资料,这是本书的基石,在此仅向他们致以最崇高的敬意和最诚挚的谢意。特别的,向技术员王文丽、资深电子爱好者郑玉山、王素苹等在本书编写过程中提供搜集和整理技术资料帮助的同 志一并致谢。

笔者才疏学浅,书中恐有不足之处,敬请读者不吝赐教。

# 目 录

---

<b>第 1 章 认识 IGBT</b> .....	1
1.1 我们为何需要 IGBT .....	1
1.1.1 功率电子与功率开关 .....	1
1.1.2 功率半导体器件 .....	3
1.1.3 IGBT 的优势 .....	6
1.2 IGBT 是什么 .....	11
1.2.1 IGBT 的结构 .....	11
1.2.2 IGBT 的等效电路 .....	13
1.2.3 闩 锁 .....	15
1.2.4 拖尾电流 .....	15
1.3 IGBT 芯片的主流技术 .....	16
1.3.1 PT 与 NPT .....	16
1.3.2 平面栅与沟槽栅 .....	17
1.3.3 第 5 代 IGBT 芯片技术种种 .....	18
1.4 IGBT 中的另类 .....	21
1.4.1 RC-IGBT .....	21
1.4.2 RB-IGBT .....	21
1.4.3 BiMOSFET .....	23
1.4.4 IEGT .....	23
1.5 IGBT 模块 .....	25
1.5.1 模块,主要是芯片的组装方式不同 .....	25
1.5.2 IPM 与 PIM .....	27
1.5.3 MCM .....	28
1.5.4 板级封装 .....	29
1.6 IGBT 的发展近况 .....	31

1.6.1	高电压规格的 SiC 晶体管与 IGBT .....	31
1.6.2	平面栅与沟槽栅 .....	32
1.6.3	DLB .....	33
1.6.4	专用化 .....	34
1.6.5	高速化 .....	35
<b>第 2 章</b>	<b>实践入门 .....</b>	<b>37</b>
2.1	认识电路中的 IGBT .....	37
2.1.1	辨认 IGBT 的引脚很容易 .....	37
2.1.2	电路原理图中的 IGBT .....	38
2.2	IGBT 引脚的判别 .....	39
2.2.1	判别栅极 .....	39
2.2.2	判别集电极与发射极 .....	40
2.3	IGBT 好坏的简单判别 .....	40
2.3.1	用万用表简单判别 .....	40
2.3.2	用晶体管直流参数测试表判别 .....	41
2.4	花 10 元钱做个简单的 IGBT 实验 .....	42
2.4.1	基于 TRIAC 的吊扇调速器 .....	42
2.4.2	简单的 IGBT 调速实验 .....	45
2.5	为避免在电路试验中炸管准备的一些简单工具 .....	47
2.5.1	用接触式调压器构建实验电源 .....	47
2.5.2	为驱动电路和控制电路准备单独的直流电源 .....	48
2.5.3	电炉丝——方便易用的假负载与小阻值的大功率电阻 .....	50
<b>第 3 章</b>	<b>IGBT 技术参数详解 .....</b>	<b>53</b>
3.1	$V_{CE}$ 、 $V_{CES}$ 、 $V_{(BR)CES}$ .....	53
3.1.1	$V_{CES}$ 的定义 .....	54
3.1.2	一个粗略测试 $V_{CES}$ 的简单方法 .....	54
3.1.3	$V_{CES}$ 的实际意义 .....	55
3.2	$I_C$ 、 $I_{CM}$ 、 $I_{CP}$ 、 $I_{CL}$ 、 $I_{LM}$ .....	57
3.2.1	$I_C$ 的定义 .....	57
3.2.2	降额因子 .....	57
3.2.3	$I_{CM}$ 、 $I_{CP}$ .....	58

3.2.4	$I_{CL}$ 、 $I_{LM}$ .....	60
3.2.5	$I_C$ 、 $I_{CM}$ 的实用意义 .....	61
3.3	$V_{CE(sat)}$ 、 $V_{CE(ON)}$ .....	62
3.4	$P_C$ 、 $P_D$ 、 $P_{TOT}$ .....	64
3.5	$C_{ies}$ 、 $C_{oes}$ 、 $C_{res}$ .....	65
3.6	$Q_G$ 、 $Q_{GE}$ 、 $Q_{GC}$ .....	66
3.6.1	定义与曲线图 .....	66
3.6.2	栅电荷的实际意义 .....	69
3.7	$t_{on}$ 、 $t_{d(on)}$ 、 $t_r$ 、 $t_{off}$ 、 $t_{d(off)}$ 、 $t_f$ 、 $(di/dt)_{on}$ .....	71
3.7.1	给定技术条件 .....	71
3.7.2	开关参数的定义 .....	72
3.8	$E_{on}$ 、 $E_{off}$ 、 $E_{is}$ .....	73
3.9	$R_{\theta JC}$ 、 $R_{\theta CS}$ 、 $R_{\theta JA}$ 、 $R_{\theta JCD}$ 、 $R_{\theta CA}$ .....	74
3.9.1	定 义 .....	74
3.9.2	热欧姆定律 .....	75
3.10	$T_J$ 、 $T_C$ 、 $T_A$ 、 $T_{STG}$ 、 $T_L$ .....	76
3.11	SOA、FBSOA、DCSOA、RBSOA、SCSOA、SSOA、 $Z_{\theta JC}$ .....	77
3.12	$V_{GE}$ 、 $V_{GES}$ .....	82
3.13	$V_{iso}$ .....	82
3.14	$I_{CES}$ .....	83
3.15	$I_{GES}$ .....	83
3.16	$V_{GE(th)}$ .....	83
3.17	$g_{fs}$ .....	84
3.18	$L_E$ .....	84
3.19	$E_{ARV}$ .....	85
3.20	体二极管的技术参数 .....	85
<b>第4章</b>	<b>基本电路</b> .....	<b>89</b>
4.1	基本电路形式 .....	89
4.1.1	单管电路 .....	89
4.1.2	半桥电路及死区时间 .....	90
4.1.3	全桥电路 .....	90
4.1.4	三相桥电路 .....	91



4.1.5	推挽电路	91
4.2	IGBT 模块的内部等效电路	92
4.2.1	单管模块,1 in 1 模块	92
4.2.2	半桥模块,2 in 1 模块	93
4.2.3	全桥模块,4 in 1 模块	93
4.2.4	三相桥模块,6 in 1 模块	94
4.2.5	PIM 模块, CBI 模块,7 in 1 模块	94
4.2.6	双单向开关、单向开关、双开关	95
4.2.7	Chopper, 断路器, 高边/低边断路器	97
4.3	常见实际应用电路	97
4.3.1	变频器的主电路	97
4.3.2	UPS 的主电路	98
4.3.3	直流伺服电源的主电路	100
4.3.4	开关磁阻电动机(SRD)驱动电路的主电路	100
4.3.5	高频电焊机的主电路	101
4.3.6	电磁炉的主电路	101
4.3.7	AC-DC 开关电源的主电路	102
4.3.8	直流断路器的主电路	109
4.4	栅极保护电路	110
4.4.1	静电保护	110
4.4.2	栅极保护电阻	111
4.4.3	栅极钳位电路	111
4.4.4	高速栅极钳位电路	112
4.5	栅极驱动电路	113
4.5.1	驱动条件对 IGBT 的影响	113
4.5.2	死区时间	114
4.5.3	栅极驱动的隔离	114
4.5.4	栅极驱动的抗干扰问题	117
4.6	突波吸收电路	117
4.6.1	突波产生的原因	117
4.6.2	抑制突波的方法	118
4.6.3	常见突波吸收电路	120

4.6.4	突波吸收电容 .....	122
4.6.5	突波吸收电路的损耗 .....	123
4.7	过流保护电路 .....	123
4.7.1	$V_{CE(sat)}$ 检测方法 .....	124
4.7.2	电流检测 .....	127
4.7.3	电阻压降检测 .....	128
4.8	IGBT 的并联 .....	128
4.8.1	直流母线(主电路)的供电 .....	129
4.8.2	驱动电路 .....	129
4.8.3	器件选择 .....	130
4.8.4	散热问题的考虑 .....	130
4.9	IGBT 的串联 .....	131
4.9.1	静态、动态均压电路 .....	132
4.9.2	栅极的隔离驱动 .....	132
4.9.3	多电平变换电路 .....	135
<b>第 5 章</b>	<b>简单设计 .....</b>	<b>141</b>
5.1	IGBT 模块的选型 .....	141
5.1.1	电压规格的选择 .....	141
5.1.2	电流规格的选择 .....	143
5.2	栅极电阻的选型 .....	144
5.3	集成型栅极驱动电路 .....	146
5.3.1	集成型栅极驱动电路的常见类型 .....	146
5.3.2	选用栅极驱动电路的一般原则 .....	148
5.3.3	HVIC 栅极驱动 IC 选型参考 .....	149
5.3.4	光耦型栅极驱动 IC 选型参考 .....	154
5.3.5	光耦隔离型栅极驱动电路选型参考 .....	156
5.3.6	变压器隔离型栅极驱动电路选型参考 .....	160
5.3.7	通用型栅极驱动 IC 选型参考 .....	161
5.4	栅极驱动电路的简单选型 .....	163
5.4.1	制造商给出的推荐应用条件实例 .....	163
5.4.2	选型的简单验证计算 .....	164
5.5	突波吸收电容的选型 .....	165

5.6 IGBT 的推荐工作频率 .....	165
<b>第 6 章 范例电路 .....</b>	<b>167</b>
6.1 380~500V 市电输入的 AC-DC 开关电源 .....	167
6.1.1 技术规格与电路原理 .....	167
6.1.2 元器件参数的确定 .....	170
6.1.3 关键点的工作波形 .....	173
6.1.4 扩展与变通 .....	173
6.2 单级软开关有源 HPF .....	173
6.2.1 电路架构 .....	174
6.2.2 电路的主要参数 .....	174
6.2.3 电路原理 .....	176
6.2.4 主要元器件的技术规格 .....	178
6.2.5 实体电路及性能 .....	180
6.3 基于 IGBT 的后沿相位控制调光电路 .....	183
6.3.1 电路原理与架构 .....	184
6.3.2 $di/dt$ 和 $dv/dt$ 的控制 .....	184
6.3.3 实用电路 .....	185
6.3.4 主要元器件的技术规格 .....	187
6.3.5 扩展与变通 .....	189
6.4 PWM 调压电路 .....	190
6.4.1 电路原理 .....	190
6.4.2 各关键点的波形 .....	191
6.4.3 实用电路 .....	192
6.4.4 主要元器件的技术规格 .....	195
6.4.5 扩展与变通 .....	198
6.5 电磁炉电路 .....	199
6.5.1 电路架构 .....	199
6.5.2 实用电路 .....	200
6.5.3 主要元器件的技术规格 .....	203
6.5.4 电路实物 .....	206
6.5.5 工作波形 .....	206
6.5.6 PWM 开关波形 .....	210

---

附录 1 缩略语 .....	213
附录 2 本书涉及的 IGBT 制造商(含驱动) .....	217
附录 3 IGBT 的技术参数符号与中文释义 .....	223
附录 4 常见 IGBT 单管封装 .....	227
参考文献 .....	231

# 第 1 章 认识 IGBT

因为在民用电磁炉中的广泛应用,IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor,绝缘栅双极晶体管)似乎是在一夜之间就走到了电子爱好者的面前。

## 1.1 我们为何需要 IGBT

### 1.1.1 功率电子与功率开关

直到目前,“功率电子”(Power electronic)在业内还没有统一明确的界定,因为功率的概念很难界定。在一般情况下,“功率”往往指的是大功率,所以“功率电子”在国内更多地被称为“电力电子”。但是在一般人的意识中,家电、一般工业电器似乎与电力并无直接的关系,而且功率的大小也是相对的。

#### 1. 功率电子转换的优势

功率电子的功能是电能转换,将电能转换为适合各种各样的电气设备来使用。这种转换的优势在于:

- 能量变换效率高:50/60Hz 的工频电源与开关电源当然不能相比;
- 高可靠性,低成本;
- 清洁安全;
- 低噪声;
- 减少对石化资源和核能资源等不可再生能源的依赖;
- 减少城市垃圾的产生。

#### 2. 功率开关是功率电子的核心

“功率电子”的功能是通过“功率电子”电路调控“电压”或者“电流”实现的,

功率电子电路的核心电子器件通常称为“开关”(Switch)或者“功率开关”(Power switch)。

功率开关是功率电子的核心,它有两个基本特征:

- 开关速度,打开与关闭所需要的时间;
- 功率容量,处理能量的能力。

功率开关有两种基本工作状态:

- 完全开通(饱和导通,导电状态);
- 完全关断(停止导电状态)。

### 3. 功率电子电路的组成

“功率电子”电路一般包括两大部分:功率处理器(Power processor)与控制器(Controller)。功率处理器完成功率的输入与输出;控制器则告诉功率处理器如何完成功率的输入→输出变换。如图 1.1 所示。

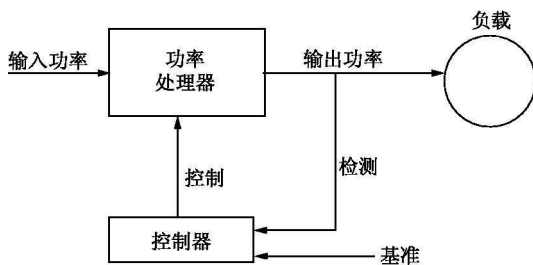


图 1.1 功率电子电路的基本构成

“功率电子”电路与“电子”电路在形式上并无本质不同,所不同的是应用的目的和手段:功率电子电路的目的是输出大功率(高压或者大电流),所用电子器件主要工作在开关状态而不是放大状态。

### 4. 功率电子电路的基本形态

根据输入/输出能量的形式,“功率电子”电路大致有以下四种基本形态:

- 交流(AC)→直流(DC)——整流器(Rectifier),正向变流,频率由交流变为 0;
- 直流(DC)→交流(AC)——逆变器(Inverter),逆向变流,频率由 0 变为交流;
- 直流(DC)→直流(DC)——断路器(Chopper),阻断主电路,不经常开关的称为直流断路器,高速开关的称为斩波;
- 交流(AC)→交流(AC)——Cycloconverter,主要的应用是变压,同时可

以实现输入/输出端的隔离以及开关(交流断路器)。

现实生活中的各种实际应用都是上述 4 种基本形态的变形。例如,电磁炉,就依次进行了如下形式的变换:

AC→DC,将 220V 的市电(交流电)变成 310V 的直流电;

DC→AC,将 300V 的直流电变成高频率的交流电,输送到锅底线圈(负载),完成了将交流市电变换为适合锅底线圈及锅底使用的高频交流电的两个任务。

需要说明的是,在电能转换的过程中,从能量输入到输出全过程,并不都是“开关”,如线性稳压器、线性功率放大器及最常见的 A 类、AB 类音频功率放大器。不过,近年来基于“开关”的 D 类放大器正迅速发展。

### 1.1.2 功率半导体器件

担当功率开关的半导体器件就是功率半导体器件,大致有三大类。

(1) 二极管(Diode):开关状态由主电路(功率电路)自身控制,因此又称为被动开关、不可控开关。

(2) 可控硅(Silicon controlled rectifier):又称为 Thyristor(半导体闸流管),能够被低功率的控制信号打开,但只能由主电路(功率电路)自身来关断而不能被控制信号关断,因此又被称为半可控开关。

(3) 可控开关(Controllable switch):开通与关断都能由低功率的控制信号实现。目前,商品化的半导体可控开关包括 GTO、IGCT、BJT 与 GTR、IGBT、VMOS(缩写含义参见附录 1),其电路符号如图 1.2 所示。

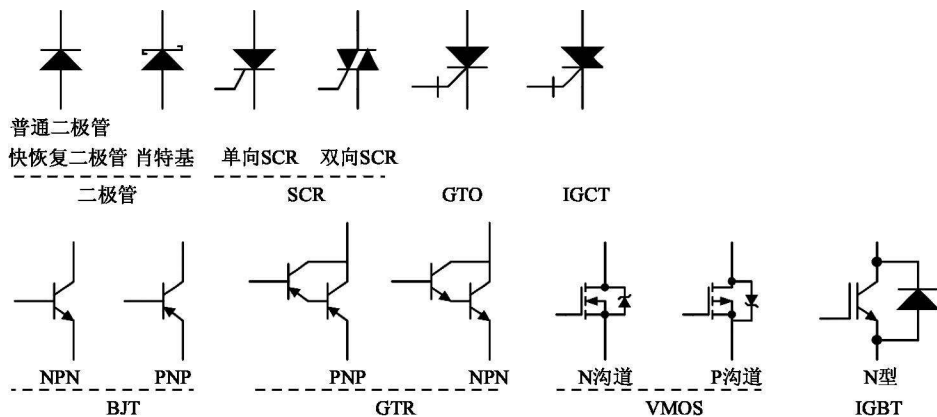


图 1.2 半导体功率开关的电路符号

在半导体器件规模应用之前,电子管也曾经广泛用作功率开关。现在,功率半导体器件几乎全部取代了电子管器件,是因为我们特别在意功率开关的效率。电子管器件自身的功耗很高,而且不能传送足够的电流。就像《西游记》里的“猪八戒”,虽然力气大,但是耐力不行,而且吃得太多;我们更需要“孙悟空”,效率高、耐力强,吃的还不多。换言之,就是“马儿要跑,最好还要不吃草”。

效率降低包含两个方面的因素。

- 随着能量消费量的增加,能量的成本随之增加。
- 随着能量消费量的增加,设计的复杂程度增加,尤其是开关器件的散热问题变得尤为突出。表征这一因素的主要参数——“热阻”,就是半导体器件的核心参数之一。

### 1. 理想的功率开关

理想的功率开关波形如图 1.3 所示,具备以下几个特征。

- 开通、导电状态能传输无限量的电流。
- 关断、不导电状态能耐受无限量的电压。
- 开通、导电状态下,自身的电压降为 0。
- 关断、不导电状态下,自身的泄露电流为 0。
- 不限制开关的操作速度,上升时间和下降时间为 0。

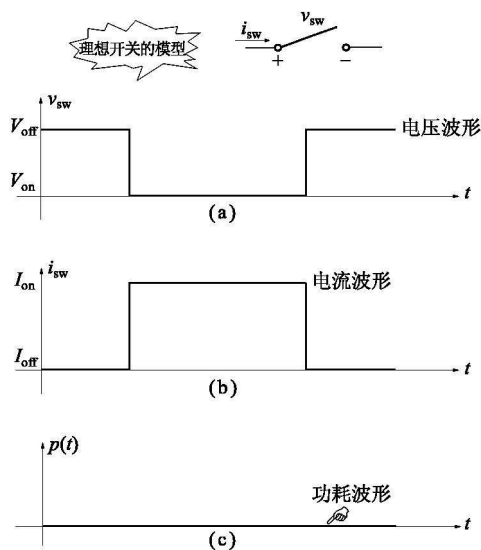


图 1.3 理想的功率开关波形

从上述特征来看,机械开关是比较理想的,但是开关速度低,难以实现自动控制。



## 2. 现实中的功率开关

现实中的电子功率开关波形如图 1.4 所示,其特征如下。

- 功率容量受限:主要受限因素是电流。
- 开关速度受限:功率开关的开通与关断需要一定的时间,此时间内的功率开关处于放大状态,由此带来的功耗称为开关功耗。
- 开通、导电状态存在导通压降(饱和压降),由此带来的功耗称为通态功耗,也称为传输功耗、传导功耗。
- 关断、不导电的状态下存在泄露电流,由此带来的功耗称为静态功耗。

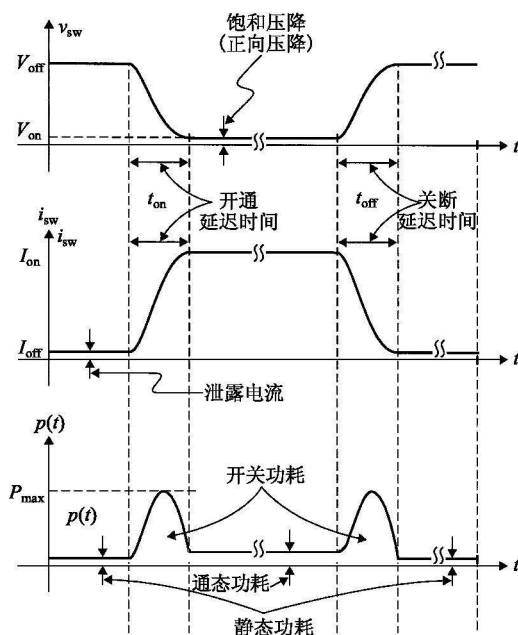


图 1.4 现实中的功率开关波形

## 3. 常见功率半导体器件的工艺技术水平比较

常见功率半导体器件的工艺技术水平比较见表 1.1。为了对比,也将基本退出主流应用领域的电子管并列入内。

表 1.1

类 型	商用年代	电压规格	电流规格	开关频率	功率容量	驱动电路	注 释
GVT <sup>(1)</sup>	1920s <sup>(2)</sup>	20kV	10A	10MHz	100kW	比较简单	1950s后应用渐少
MTR <sup>(3)</sup>	1920s	25kV	20A	10MHz	100kW	不需要	1950s后应用渐少
RD <sup>(4)</sup>	1950s					不需要	开关不可控
SCR	1957	6kV	3.5kA	500Hz	100s <sup>(5)</sup> MW	简单	栅控不可关断

续表 1.1

类型	商用年代	电压规格	电流规格	开关频率	功率容量	驱动电路	注释
GTO	1962	8kV	8kA	1kHz	10s MW	非常简单	功率容量最高
IGCT	1990s	4.5kV	2.2kA	2kHz	10s MW	非常简单	功率容量很高
BJT	1960s	1.2kV	40A	5kHz	1kW	复杂	应用渐少
GTR	1970s	1.2kV	400A	5kHz	1MW	比较简单	应用渐少
VMOS	1976	500V	200A	1MHz	100kW	非常简单	高频性能最好
IGBT	1983	6.5kV	2.4kA	150kHz	100skW	非常简单	综合性能好

- (1) GVT: Gate controled Vacuum Tube, 栅控电子管, 包括三极管与多栅管。  
 (2) 1920s, 20 世纪 20 年代, 即 1920~1929 年, 以下类同。  
 (3) MTR: Mercury Tube Rectifier, 汞蒸气二极管, 水银整流器, 大功率电子二极管的主流。  
 (4) RD: Silicon Rectifying Diode, 硅半导体二极管, 功率半导体二极管的主流。  
 (5) 100sMW: 100MW 以上, 数百兆瓦, 1MW=1000kW, 以下类同。

#### 4. 功率半导体器件的应用领域

功率半导体器件的一般应用领域见表 1.2。

表 1.2 功率半导体器件的一般应用领域

领域	行业	DIP-IPM <sup>(1)</sup>	IPM <sup>(2)</sup>	IGBT IGBT 模块	IGCT	SCR GTO	高压 IGBT/IPM
工业	电力设备						
	炼铁/钢						
	电气铁路						
	汽车						
	UPS						
	变频器						
	电机控制						
	高频焊机						
	医疗设备						
商用	空调						
	电冰箱						
	洗衣机						

- (1) DIP-IPM: 双列直插封装的 IPM。  
 (2) IPM: 智能功率模块, 常见的是 IGBT 类, 也有 VMOS 类。

### 1.1.3 IGBT 的优势

#### 1. 高压大电流

与 BJT、VMOS 相比, IGBT 是高压大电流全控开关。换言之, 是大功率晶体管。

从实物来看,IGBT 的个头就显得比较大。如图 1.5 所示,我们似曾相识的 (f)部分仅仅是 IGBT 家族中很小的一部分,一般 IGBT 单管才会是这个样子。

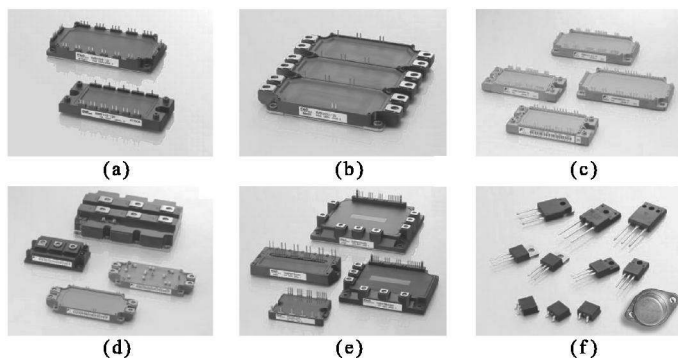


图 1.5 大个头的 IGBT 更为常见

功率半导体器件电压等级的横向比较如图 1.6 所示。在过去很长一段时间里,IGBT 最低的电压规格都是 600V;IGBT 商用化之初,已能够达到了 1200V/35A 的规格。如今,1700V/30A、3300V/30A 的 IGBT 单管不少见;至于 IGBT 模块,3300V、4500V、6500V 乃至更高电压规格,数千安的产品也已经实用化。

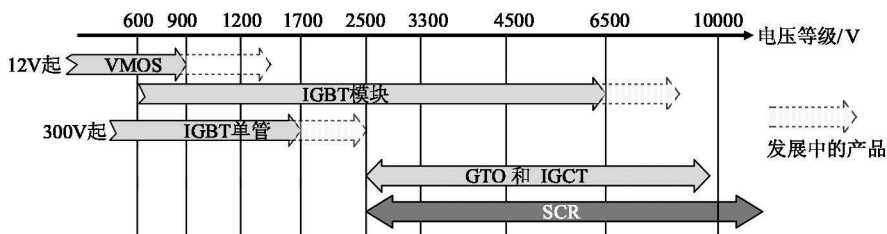


图 1.6 功率半导体器件电压等级的横向比较

图 1.7 是 1~2kW 电磁炉的主电路板,散热器下的 IGBT 就是功率开关——一个 TO-3P 封装的 IGBT 单管。

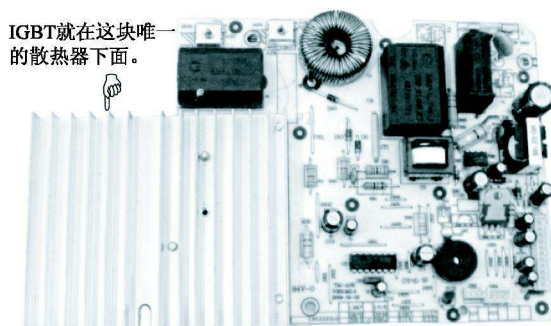


图 1.7 美的 MC-IH-M02 电磁炉的主电路板

## 2. 易于驱动

与 GTO、IGCT 相比,IGBT 开关速度快,更容易驱动,参见表 1.3。

表 1.3 IGBT 与 GTO、IGCT 的驱动性能对比

项 目	IGBT	GTO	IGCT
通态功耗	100%	70%	50%
静态功耗	100%	100%	100%
开关功耗	100%	80%	5%
开关速度	100%	1%	1%
栅极驱动功率	1%	100%	50%
短路电流	自身限制	外部限制	外部限制
吸收电路	比较简单	复杂	简单
安全工作区	大	小	大
损坏后的特征	开路	短路	短路
常见封装	塑壳封装	夹片式	夹片式+驱动板

IGBT、GTO、IGCT 的常见外形如图 1.8 所示。

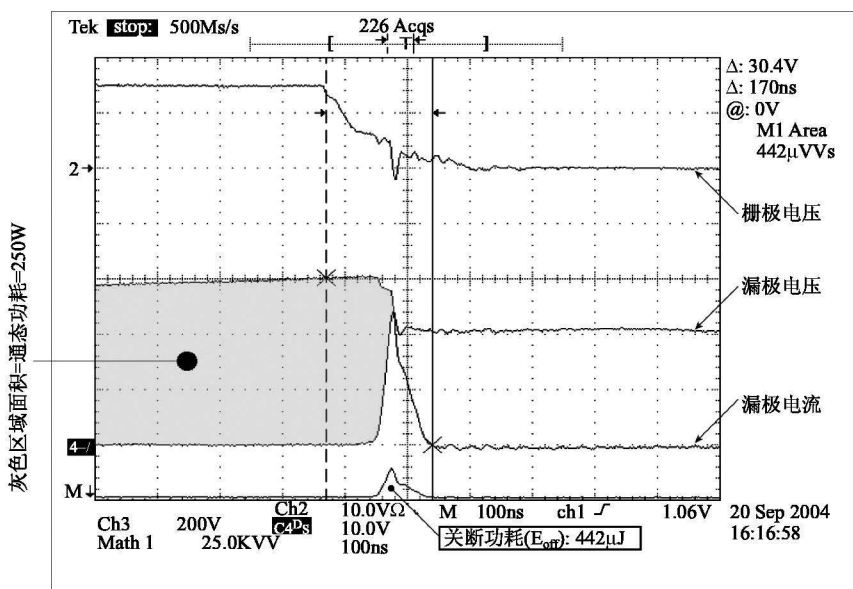


图 1.8 IGBT、GTO、IGCT 的常见外形

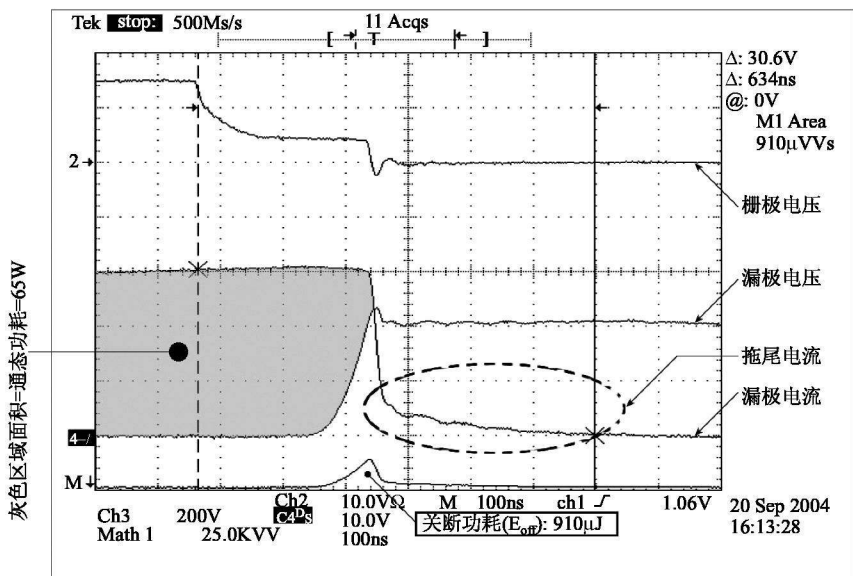
## 3. 低功耗

IGBT 与 VMOS 的开通功耗相近,但 IGBT 的通态功耗比较小,且由于拖尾电流(tail current)的存在,IGBT 关断功耗比 VMOS 高得多,如图 1.9 所示。

在低电压(100V 以内)条件下,VMOS 的通态功耗又要比 IGBT 低得多。但是,随着电压的增加,VMOS 的饱和压降直线上升,通态功耗也随之直线上升;而 IGBT 却变化很小,参见表 1.4。



(a) APT5014B2LL: 500V/35A的VMOS



(b) APT30GT60BR: 600V/35A的IGBT

图 1.9 规格相似的 IGBT 与 VMOS 的功耗对比

表 1.4 低电压条件下 IGBT 与 VMOS 的通态功耗对比

电压等级/V	IGBT	100	300	600	1200
	VMOS	100	250	500	1000
典型压降(1.7A/mm <sup>2</sup> ,100℃)/V	IGBT	1.5	2.1	2.4	3.1
	VMOS	2.0	11.2	26.7	100

上述特点只是针对各自适宜的工作条件而言的,在小电流情况下,即栅极电压在阈值电压附近时,VMOS 的导电能力比 IGBT 强;在大电流情况下,IGBT 适用的工作频率比 VMOS 高。即在相同电流条件下,随着工作电流的增加,VMOS 的适用工作频率下降得更快。

#### 4. 半导体功率开关,各有所长

功率电子电路,主要的工作条件无外乎电压、电流、频率。

与 VMOS 相比,就电压规格与适用的工作电压而言,IGBT 与 GTO、IGCT 不相上下,比 VMOS 高得多。

250V 以下的工作电压范围是 VMOS 应用的最佳领域。此时,VMOS 的饱和压降仍然比 IGBT 为高,但是关断功耗低。工作电压越低,VMOS 的优势越大,低于 100V 时,其优势就越发突出了;如果低于 50V,则 VMOS 与二极管的功耗相当。

在 250~1000V 内,则要看工作频率。20kHz 以下,IGBT 占优势;20~200kHz,IGBT 和 VMOS 均可适用;高于 200kHz,目前仍然是 VMOS 的优势范围。如图 1.10 所示。

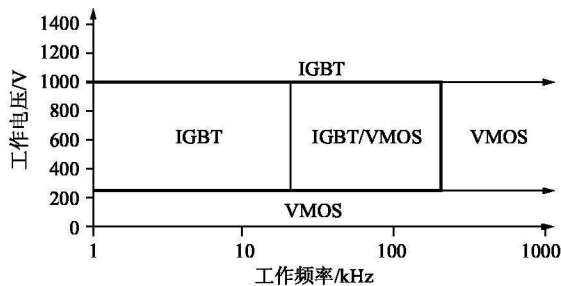


图 1.10 IGBT 与 VMOS 的适用工作条件对比

当工作电压高于 1000V 时,IGBT 仍然是首选。但如果工作频率在 1kHz 左右时,GTO 是首选;如果成本不是首要矛盾,则 IGCT 更为适合。

当工作电流高达 1kA 或者更高时,GTO 是首选,但这时候就要牺牲工作频率了;如果苛求效率和成本,则不如仍然以 50/60Hz 的频率工作,以交流方

式采用 SCR 为功率开关；

在数千伏、数千安培的应用领域，SCR 的优势很大。

半导体功率器件的适用领域，如图 1.11 所示。

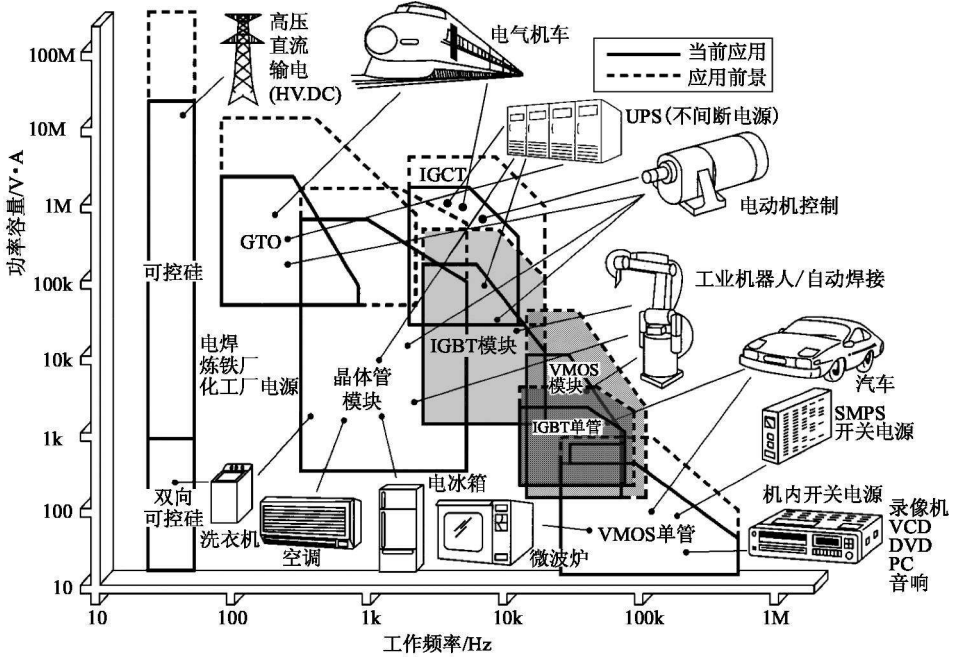


图 1.11 功率半导体器件的适用领域

## 1.2 IGBT 是什么

### 1.2.1 IGBT 的结构

IGBT 的结构如图 1.12 所示。

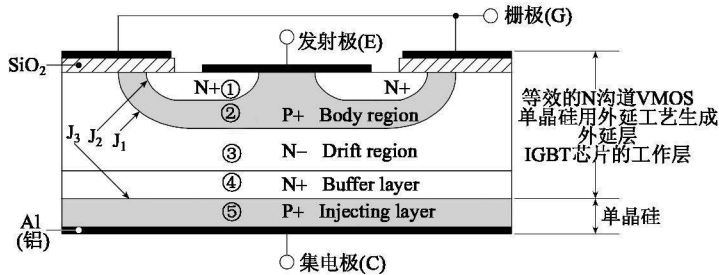


图 1.12 N 型 IGBT 的典型结构

① N+ Source region: 源区、扩散源区、发射区，与发射极相连，等效于

VMOS 的源极(参见图 1.14)、NPN 管的发射极。

② P+Body region: 扩散型 P 阱(P 型区), 在 N 型单晶硅的衬底上扩散生成。

③ N-Drift region: N-基区、漂移区、基区、高阻 N-区, 等效于 VMOS 管的漏极、PNP 管的基极。此区域决定了 IGBT 的饱和压降和电压等级, 也是影响 IGBT 开关速度的主要区域。

④ N+Buffer layer: 缓冲区、(高阻)外延层、N+缓冲层, 其作用是降低 N-漂移区的厚度, 以减小饱和压降和缩短开关时间。不是所有的 IGBT 芯片都有此区。

⑤ P+Injecting layer: Drain injecting region、漏注入区、背发射区、P+背发射区、集电区、P+衬底, 等效于 PNP 管的发射极。此区是 IGBT 的衬底, 即底层。

④、⑤ 合在一起, 也称为集电区(Collector bulk region)。

①、②、③、④以单晶硅为基础, 用外延法生成, 因此称为外延层, 也是 IGBT 的工作层。

③、④又称为掺杂区, 其厚度和掺杂程度决定了器件的电压等级和饱和压降。若要提高电压等级, 则需要这个区域厚一些, 掺杂浓度低一些; 若而要降低饱和降压, 而需要采取相反的措施, 即掺杂区薄一些, 掺杂浓度要高一些。

说“IGBT 是 P-N-P-N 4 层结构的器件”, 指的是①、②、③、⑤, 不包含 N+缓冲区。

$J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$  表示的是 PN 结, 又称为空间电荷区, 基本不含载流子, 主要由不能移动的空间电荷组成。因此又称为“耗尽层”, 意思是能够移动的载流子(电子或空穴)都被耗尽了。P 型半导体侧靠近 PN 结的区域的空间电荷是负离子, N 型半导体侧靠近 PN 结的区域的空间电荷是正离子。

IGBT 与 BJT 均被称为多子器件, 这是因为二者的导电既有电子的迁移, 又有空穴的注入。二者不同之处在于, BJT 中电子的迁移需要以空穴注入为触发条件, 空穴的注入量控制着电子迁移量, 故 BJT 的导电需要维持空穴的注入, 需要比较大的驱动功率; IGBT 中电子的迁移与空穴的注入是依靠电场来维持的, 二者是同时而且是相向而行的, 故 IGBT 的驱动仅需要一个驱动电压而已(以维持电场的存在)。

VMOS 则被称为少子器件, 因为它的导电仅依靠电子的迁移。

三者的导电原理可以用图 1.13 来形象地说明。由于中止空穴的注入需要



能量与时间,所以 BJT 与 IGBT 的开关速度均没有 VMOS 快。

BJT 中的电子迁移与空穴注入的方向相同,只有中止空穴的注入才能中止电子的迁移,既需要能量又需要时间,因此在大电流工作状态下,速度明显没有 IGBT 快。

IGBT 中电子迁移与空穴注入也可以理解为二者的中和,无论是电子的迁移路径还是空穴的注入,路径均比较短,单位时间内的载流子(电子迁移与空穴注入的总和)通过量比较大,所以 IGBT 的电流规格能够做得比较高。

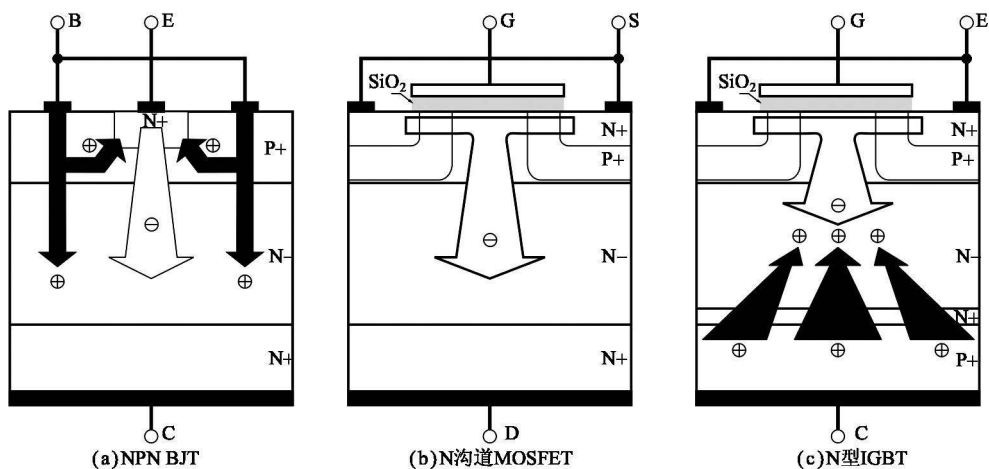


图 1.13 三种晶体管的导电原理

## 1.2.2 IGBT 的等效电路

图 1.14 是 N 型 IGBT 的等效电路。等效 NPN 管是等效 MOSFET 形成时寄生的;等效 JFET 主要是由漂移区形成的;等效电阻  $R_B$  主要由基区等效电阻构成,也包括漂移区、缓冲区(NPT 型除外)、源区的等效电阻;等效 PNP 管才是导电通道的主角。

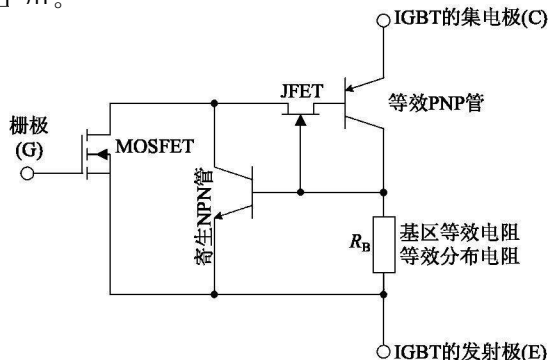


图 1.14 IGBT 的等效电路

在正常情况下, JFET 相当于串联在 MOSFET 漏极与 PNP 管基极之间的电阻  $R_D$ , 简化电路如图 1.15(a)所示, 这是目前比较常见的等效电路。这时候, 寄生的 NPN 管与 PNP 管相当于一个 SCR, 故 IGBT 的等效电路可进一步简化为图 1.15(b), 这正是 IGBT 电流密度比 BJT 大的内在原因。

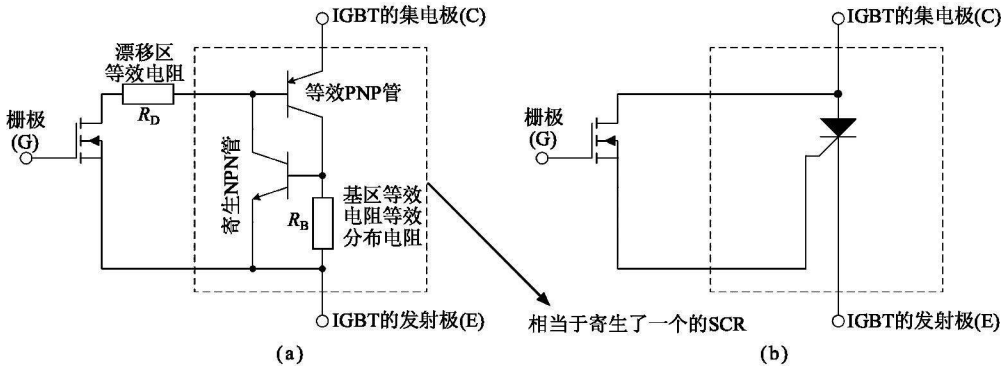


图 1.15 简化后的 IGBT 等效电路(1)

正常情况下, 寄生的 NPN 管并不起作用, 故 IGBT 等效电路又可简化为图 1.16。这时候的 IGBT 就是一个 VMOS+PNP 型的 BJT, 相当于一个 VMOS 输入级的 NPN 达林顿管, 而输出级是一个 BJT, 故 IGBT 容易驱动且输出特性与 BJT 类似。由于达林顿管的极性最终由输入级决定、与输出级无关, 而输入级的 MOSFET 是 N 沟道的, 形成的达林顿也是 NPN 型的, 因此等效 PNP 管的集电极是 IGBT 的发射极, 而等效 PNP 管的发射极是 IGBT 的集电极。

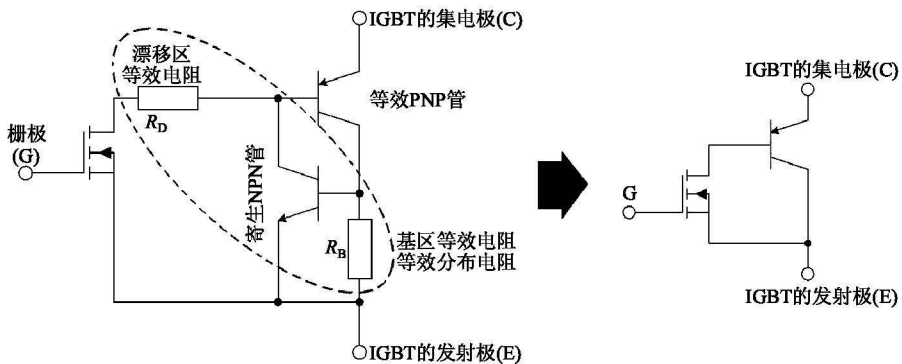


图 1.16 简化后的 IGBT 微观等效电路(2)

对于 BJT 而言, 早期大功率 PNP 管的性能往往不如 NPN 管, 所以常常用一个 PNP 的小功率管与一个大功率的 NPN 管组成一个大功率的 PNP 达林顿管, 很好地解决了大功率 NPN 管与 PNP 管性能不对等的问题。但是, 双极性

达林顿管的速度远低于 BJT,所以即使是同等电流规格,达林顿管也不能与 IGBT 相媲美。

如果将 IGBT 看成一个 P-N-P-N 4 层结构的器件,也可以将 IGBT 看作图 1.17 所示更为简化的等效电路。这个等效电路可以解释 IGBT 的饱和压降为什么至少为一个二极管的压降;也能够说明,在低电压领域,VMOS 的自身功耗更小。

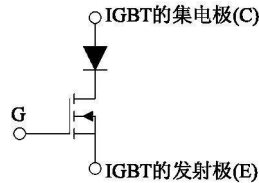


图 1.17 简化后的 IGBT 等效电路(3)

### 1.2.3 闩锁

闩锁(latch)是指 IGBT 的电流失控现象,有点像柴油机的飞车现象。等效电路中的 NPN 管是导致 IGBT 产生闩锁的元凶。

一种情况是常温时, $R_b$  并不大,其压降并不足以使等效 NPN 管导通。但是温度升高以后, $R_b$  的阻值增加,压降随之增加,导致 NPN 管导通,对 PNP 管形成偏置,VMOS 的控制作用被 NPN 的偏置管代替,即 IGBT 的栅极失去了控制功能,处于失控状态。这种情况被称为静态闩锁。在高温环境中,静态闩锁会导致设备一上电就出现短路故障,还会造成 IGBT 在看似无故障的条件下烧毁。

另一种情况是,温度虽然不高,但是集电极电流(瞬时峰值电流或者稳定的工作电流)过大, $R_b$  上的压降升高到足以让 NPN 管导通而产生闩锁故障,这种情况被称为动态闩锁。动态闩锁意味着 IGBT 的抗短路能力低,抗电流冲击的能力低。

### 1.2.4 拖尾电流

拖尾电流(Tail current)指的是 IGBT 不能迅速关断的现象,如图 1.9 所示。

拖尾电流是 IGBT 等效电路中的 JFET 造成的。在图 1.15 中,等效的 JFET 有限制 PNP 管基极电流、抑制 IGBT 自身谐振的作用,但更多的负面影响是其缓冲作用会导致 PNP 管不能迅速关断,形成 IGBT 特有的拖尾电流现象。

象,从而增加了 IGBT 的关断功耗,降低了电路效率。

### 1.3 IGBT 芯片的主流技术

IGBT 芯片的主流技术大致有以下几个方面(术语缩写参见附录 1)。

- PT-IGBT:采用平面栅或者沟槽栅,技术改进的主要方向是控制载流子寿命和优化 N+缓冲区。
- NPT-IGBT:采用平面栅或者沟槽栅,技术改进的主要方向是减小芯片厚度。
- 电场控制技术:Field stop、LPT、LiPT…技术改进的主要方向是在薄芯片上实现梯形电场分布。
- 空穴存储结构:CSTBT、IEGT、HiGT…技术改进的主要方向是降低通态功耗,即降低饱和压降。
- 上述几种技术的糅合:TS=FS+Trench(沟槽栅),技术改进的主要方向是如何取长补短才不至于画蛇添足。

#### 1.3.1 PT 与 NPT

##### 1. PT

图 1.12 实际上是 PT 型 IGBT 芯片的结构图,图 1.13(c)是其导电原理。所谓 PT(Punch Through,穿通型),是指电场穿透了 N-漂移区(图 1.12 中的③),电子与空穴的主要汇合点在 N-区[图 1.13(c)]。

NPT 在实验室实现的时间(1982 年)要早于 PT(1985),但技术上的原因使得 PT 规模商用化的时间比 NPT 早,所以第 1 代 IGBT 产品以 PT 型为主。

PT-IGBT 很好地解决了 IGBT 的闩锁问题,但是需要增加外延层厚度,技术复杂,成本也高。IGBT 芯片中的外延层与电压规格是直接相关的,电压规格越高、外延层越厚,1200V、2000V 的 PT-IGBT 外延层厚度分别达到了 100 $\mu\text{m}$  和 200 $\mu\text{m}$ 。

##### 2. NPT

所谓 NPT(Non-Punch Through,非穿通),是指电场没有穿透 N-漂移区,其结构如图 1.18 所示。NPT 的基本技术原理是取消 N+缓冲区(图 1.12 中的④),直接在集电区(图 1.12 中的⑤)注入空间电荷形成高阻区,电子与空穴的主要汇合点换成了 P+集电区。这项技术又被称为离子注入法、离子掺杂工艺。

### 3. PT 与 NPT 的区别

PT 与 NPT 型 IGBT 是目前的主流产品类型,600V 电压规格的 IGBT 基本上是 PT 型,600V 以下则全是 PT 型。二者在生产工艺与技术性能上的差别参见表 1.5。

表 1.5 PT-IGBT 与 NPT-IGBT 的差别

项 目		PT-IGBT 芯片	NPT-IGBT 芯片
生 产 工 艺 与 芯 片 结 构	原料(单晶硅)	低电阻率的 P+ 单晶硅(生成 P+ 背发射区)	高电阻率的 N- 单晶硅(生成 N- 漂移区)
	外延工艺	需要	不需要
	MOS 结构	在外延层中	在单晶硅中
	芯片减薄工艺	基本不需要(为了保证电压规格)	需要(有利于提高性能)
	离子注入工艺	不需要(P+ 背发射区已经生成)	需要(生成 P+ 背发射区)
	高能离子辐照工艺	需要(中子、电子等)(目的是提高开关速度)	不需要
	成本	100%	约 75%
技 术 指 标 与 性 能	饱和压降	低,负温度系数	高,正温度系数
	开关功耗	低	高
	关断功耗	高,受温度的影响大	低,受温度的影响小
	关断时间	长(饱和压降指标相同时)	短(饱和压降指标相同时)
	拖尾电流	短,受温度的影响大	长,受温度的影响小
	闩锁	易出现,抗短路能力弱	不易出现,抗短路能力强
	雪崩击穿	抗雪崩击穿能力低	抗雪崩击穿能力高
	并联	复杂,饱和压降指标需要配对	容易,饱和压降指标不一定需要配对

PT 与 NPT 生产工艺的区别如下。

- PT-IGBT 芯片的生产从集电区(P+背发射区)开始,先在单晶硅的背面生成低掺杂的 P+ 发射区,然后用外延工艺在单晶硅的正面依次生成 N+ 缓冲区、MOS 结构。

- NPT-IGBT 芯片的生产从基区(N-漂移区)开始,先在 N 型单晶硅的正面生成 MOS 结构,然后用研磨减薄工艺从背面减薄到 IGBT 电压规格需要的厚度,再从背面用离子注入工艺生成集电区。

#### 1.3.2 平面栅与沟槽栅

图 1.13 实际上是平面栅极(Planar gate,简称“平面栅”)的 IGBT 芯片结

构图。

所谓沟槽栅极(Trench gate,简称沟槽栅、槽栅),是相对于早期 IGBT 呈平面状分布的栅极结构而言的,目的是减少饱和压降(比平面栅减少约 30%)、增加电流密度,大致的技术思路是在硅片上面刻蚀大量浅而密的沟槽,把栅极氧化层( $\text{SiO}_2$ )和栅电极(Al)做在沟槽侧壁上。平面栅与沟槽栅的结构示意图如图 1.18 所示。

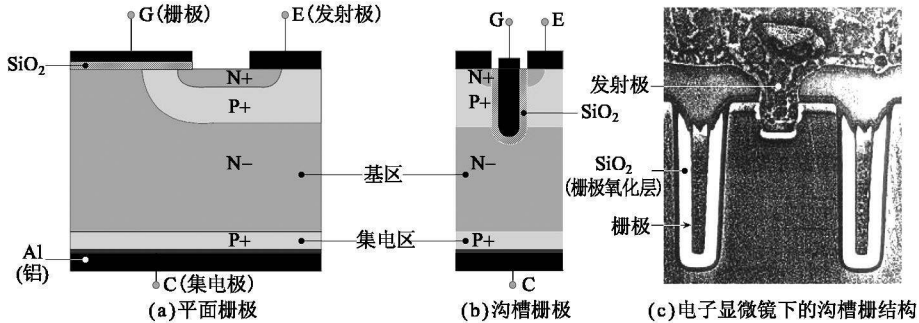


图 1.18 平面栅与沟槽栅的结构示意图(NPT 型)

由于沟槽栅的样子很像英文字母“U”,因此有些资料也将沟槽栅 IGBT 简称为 U-IGBT。

### 1.3.3 第 5 代 IGBT 芯片技术种种

第 5 代 IGBT 芯片技术可谓是 IGBT 芯片技术的“春秋战国”,宣称是第 5 代的技术大致列于表 1.6,部分新品结构与 PT/NPT 的对比如图 1.19 所示。

表 1.6 部分宣称第 5 代 IGBT 技术的概况

名称		中文参考译名	开发者/隶属公司	主要改进
缩写	全称			
FS	Field Stop	场阌	Siemens 或者 Infineon	N-基区厚度与 NPT 相比减少约 30%,关断功耗降低,拖尾电流减小,最大结温提高
TS	Trench gate field Stop	槽栅-场阌		饱和压降降低
SPT	Soft Punch Through	软穿通	Semikron ABB	饱和压降降低
SPT+	SPT plus	超软穿通		电压等级提高
CSTBT	Carrier Stored Trench Bipolar Transistor	多子存储槽栅双极性晶体管	Mitsubishi	电压等级提高,饱和压降很低,抗短路能力提高
LPT	Light Punch Through	轻穿通		LPT-CSTBT,抗短路能力进一步提高
QPT	Quick Punch Through	快穿通	Fairchild	开关速度提高