

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

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,笔者已经能在家自行布电器布线了,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。

本书的目的就是从非严格角度出发,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

第1章 认识 IGBT	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
第 2 章	实践入门	37
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
第 3 章	IGBT 技术参数详解	53
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
第 4 章	基本电路	89
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

第 5 章 简单设计

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
------------------------	-----

第 6 章 范例电路

167

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。

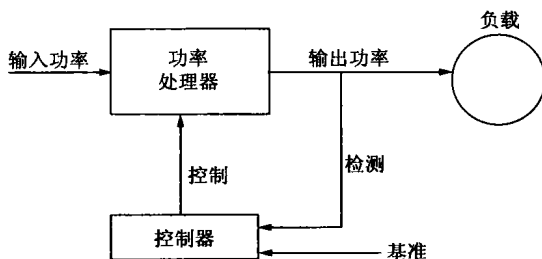


图 1.1 功率电子电路的基本构成

“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。

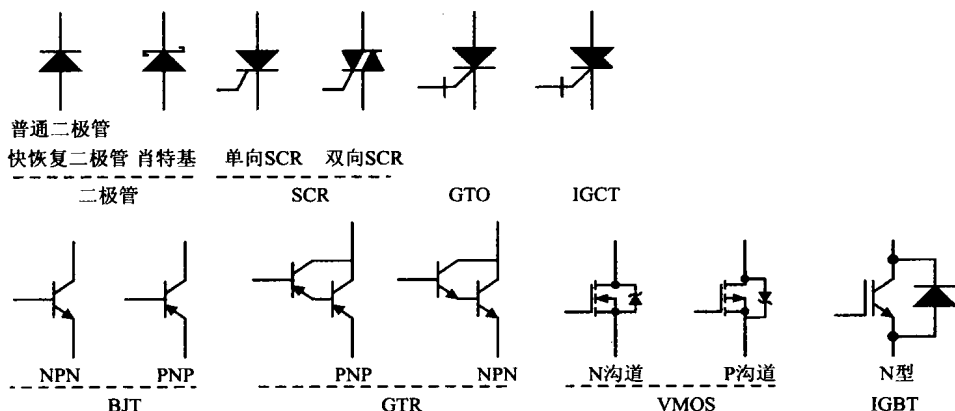


图 1.2 半导体功率开关的电路符号

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。

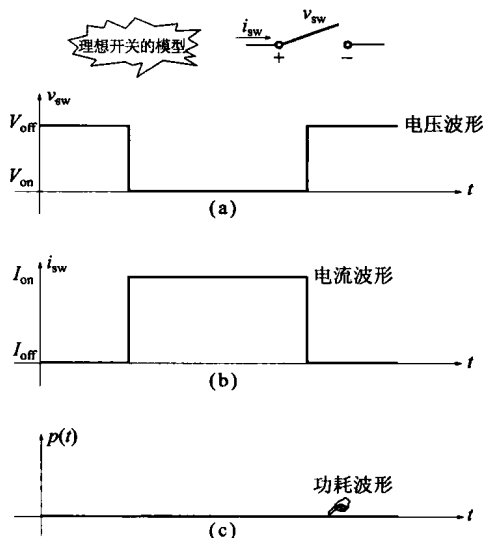


图 1.3 理想的功率开关波形

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。

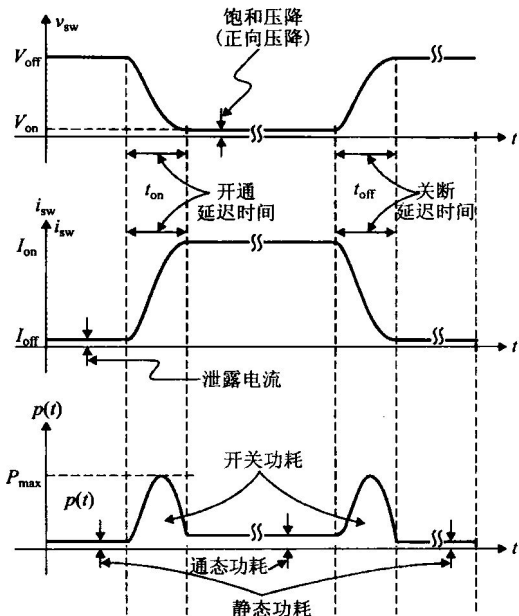


图 1.4 现实中的功率开关波形

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 ⁽¹⁾	1920s ⁽²⁾	20kV	10A	10MHz	100kW	比较简单	1950s 后应用渐少
MTR ⁽³⁾	1920s	25kV	20A	10MHz	100kW	不需要	1950s 后应用渐少
RD ⁽⁴⁾	1950s					不需要	开关不可控
SCR	1957	6kV	3.5kA	500Hz	100s ⁽⁵⁾ 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 ⁽¹⁾	IPM ⁽²⁾	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。