

# 最新一代功率集成器件及其应用 (IGBT和MCT的发展)

机电部北京自动化研究所

情 报 室

一九九一年十月

## 前 言

I G B T与M C T这两种场控功率高速开关器件是近年才出现的最有生命力的电力电子器件之一。特别是I G B T器件，在额定功率、额定电压、额定电流和饱和压降等参数方面都已接近或部份地超过了同类功率器件G T R，而在动态特性如开关时间、耐 $di/dt$ 、 $dv/dt$ 等方面远比G T R优越得多，目前已在电机调速、数控机床、开关电源、工业机器人等领域得到了广泛的应用，取代G T R的趋势已是肯定无疑的了。至于M C T器件，目前尚处于发展之中，应用还不甚普遍。该类器件在美国发展很快，估计今后2-3年内将有新的突破。

我们这里向读者所介绍的关于I G B T和M C T有关资料，是从近年来国外部份期刊杂志中搜集编辑而成，还不够全面。今后将陆续报导这方面的新动态。请读者批评指正。

程 章 陈 瑜

1991年10月

## 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第一部分：国外 IGBT (绝缘栅晶体管) 的发展动向 | 1  |
| 一、IGBT 的发展简况                | 1  |
| 二、IGBT 的基本结构和工作原理           | 6  |
| 三、IGBT 的特性                  | 8  |
| 1. 最大额定值和电特性                | 9  |
| 2. 集电极-发射极间饱和电压             | 14 |
| 3. 开关特性                     | 16 |
| 四、IGBT 的设计和制造工艺             | 16 |
| 1. IGBT 的设计                 | 16 |
| 2. 关于制造工艺                   | 17 |
| 五、各代 IGBT 的特征               | 19 |
| 六、应用实例                      | 24 |
| 1. IGBT 用于 UPS (不间断电源)      | 24 |
| 2. 电机驱动用的 IGBT 逆变器          | 25 |
| 3. IGBT 式 PWM 逆变器           | 29 |
| 4. 3 KVA 太阳能电池用逆变器          | 29 |
| 5. 谐振功率变流器                  | 31 |
| 6. 电动机控制用的半控桥驱动器            | 31 |
| 7. 电视水平偏转电路用 1500 V IGBT    | 32 |
| 8. 电子灶用 IGBT                | 36 |
| 第二部分：MCT (MOS 控制晶闸管)        |    |
| 的发展动向                       | 38 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 一、前    言            | 3 8 |
| 二、M C T的基本结构和工作原理   | 3 8 |
| 1 • 基本结构及等效电路       | 3 8 |
| 2 • 工作原理            | 4 1 |
| 三、M C T的性能及与其他器件的比较 | 4 1 |
| 1 • M C T的性能        | 4 1 |
| 2 • 性能比较            | 4 2 |
| 四、M C T的发展趋势        | 4 5 |

## 第一部分 国外 IGBT (绝缘栅晶体管) 的发展动向

### 一、IGBT 的发展简况

IGBT 兼备功率 MOSFET 的易控性和高速开关特性, 以及双极晶体管的高导通特性等。因此很受人们的青睐。它的研制成功为提高电力变流器装置的性能, 特别是使逆变器的小型轻量化、高效化、低噪音化提供了新的器件。IGBT 模块串并联式连接时的平衡特性也好, 多用于电力领域。

1982 年美国 GE (通用电气公司) 和 RCA (美国无线电公司) 首先研制出 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), 当时的容量仅有  $500\text{ V} / 20\text{ A}$ , 而且由于少量载流子的累积效应, 未能达到预期的快速性; 同时因二个晶体管的正反馈作用, 发生锁定现象 (latch up), 丧失了门极控制能; 再者因流过源极的空穴电流, 使 NPN 晶体管受到激励。这些问题妨碍了 IGBT 的推广使用。

为了解决这些技术课题, 85 年以来许多公司, 如美国的国际整流器公司 (IRC)、日本的东芝、富士公司等都在大力进行开发。其主要技术有: 1) 采用自对准技术, 进行多重杂质扩散, 以减少 P 基区横向电阻  $R_s$ ; 2) 在接近 P 发射极区设高浓度  $N^+$  过渡层来控制空穴注入量; 3) 采取  $N^+$  源层部分短路的空穴电流分流结构; 4) 通过电子辐照等技术来缩短载流子寿命。经过这些改进使 IGBT 具有真正的 GTR 的高电流密度、低饱和电压和功率 MOSFET 的高输入阻抗、高速等特性, 成为较理想的功率开关器件。

经过几年的不断改进, 到 1986 年开始正式生产 IGBT,

并已系列化，到90年已完成第二代产品，正向第三代产品过渡。

IGBT产品广泛用于：

- ① UPS (不间断电源装置)
- ② 通用逆变器 (电机变速驱动)
- ③ 交流伺服 (自动化、数控装置)
- ④ DC-DC变换器
- ⑤ 焊机、感应加热装置
- ⑥ 家用电器 (空调、炊事器具)

研制水平已达1400V、1000A，现在试制1800V、10A IGBT。其主要产品及生产厂家列于表1、表2、表3、表4和表5。

表1 富士IGBT的产品系列

| 分类      | 用 途                         | 系 列                                                                                       |
|---------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 模 块     | 电动机控制，<br>UPS (不间断<br>电源装置) | 标准系列<br>600V/10~400A<br>1, 200V/8~300A<br>高速开关系列 (L系列)<br>600V/10~400A。<br>1, 200V/8~300A |
|         | ~20kHz                      | 低通态电压系列 (F系列)<br>600V/10~400A<br>1, 200V/8~300A                                           |
| 分 立 元 件 | 电子灶，电磁灶                     | 900V/50~60A                                                                               |
|         | 电视机水平偏转回路显示器                | 1, 500V/12A                                                                               |
|         | 电动机控制                       | 600V/10~50A<br>1, 200V/8~25A                                                              |

表2 富士IGBT模块系列

| 封 装  | 600V 系列               | 1,200V 系列      |
|------|-----------------------|----------------|
| 6 元件 | 10 A<br>15 A<br>20 A  | 8 A            |
| 6 元件 | 30 A                  | 15 A           |
| 6 元件 | 50 A<br>75 A<br>100 A | 25 A<br>50 A   |
| 2 元件 | 50 A<br>75 A<br>100 A | 25 A<br>50 A   |
| 2 元件 | 150 A                 | 75 A           |
| 2 元件 | 200 A                 | 100 A          |
| 2 元件 | 300 A                 | 150 A          |
| 1 元件 | 400 A                 | 200 A<br>300 A |

表3 高速开关模块系列一览表  
(a) 600V系列

| I <sub>c</sub> (A) | 元 件 数         |               |               |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | 6管式           | 2管式           | 1管式           |
| 10                 | 6MBI 10L-060  |               |               |
| 15                 | 6MBI 15L-060  |               |               |
| 20                 | 6MBI 20L-060  |               |               |
| 30                 | 6MBI 30L-060  |               |               |
| 50                 | 6MBI 50L-060  | 2MBI 50L-060  |               |
| 75                 | 6MBI 75L-060  | 2MBI 75L-060  |               |
| 100                | 6MBI 100L-060 | 2MBI 100L-060 |               |
| 150                |               | 2MBI 150L-060 |               |
| 200                |               | 2MBI 200L-060 |               |
| 300                |               | 2MBI 300L-060 | 1MBI 300L-060 |
| 400                |               |               | 1MBI 400L-060 |

(b) 1200V系列

| I <sub>c</sub> (A) | 元 件 数        |               |               |
|--------------------|--------------|---------------|---------------|
|                    | 6管式          | 2管式           | 1管式           |
| 8                  | 6MBI 8L-120  |               |               |
| 15                 | 6MBI 15L-120 |               |               |
| 25                 | 6MBI 25L-120 | 2MBI 25L-120  |               |
| 50                 | 6MBI 50L-120 | 2MBI 50L-120  |               |
| 75                 |              | 2MBI 75L-120  |               |
| 100                |              | 2MBI 100L-120 |               |
| 150                |              | 2MBI 150L-120 |               |
| 200                |              |               | 1MBI 200L-120 |
| 300                |              |               | 1MBI 300L-120 |

表 4 东芝 IGBT 模块系列

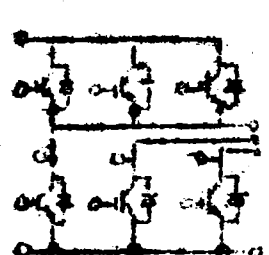
| 电 路                                                                                 |    | 最 大 额 定      |           |           |           |           |            |            |                |                |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|----------------|----------------|----------------|
| 等效电路                                                                                | 符号 | $V_{CES}(V)$ | $I_C(A)$  |           |           |           |            |            |                |                |                |
|                                                                                     |    |              | 15        | 25        | 50        | 75        | 100        | 150        | 200            | 300            | 400            |
|    | BS | 500          | MG15H1BS1 | MG25H1BS1 | MG50H1BS1 | MG75H1BS1 | MG100H1BS1 |            |                |                |                |
|                                                                                     |    | 1,000        | MG15N1BS1 | MG25N1BS1 | MG50N1BS1 | MG75N1BS1 |            |            |                |                |                |
|    | US | 500          |           |           |           |           |            |            |                | MG300<br>H1US1 | MG400<br>H1US1 |
|                                                                                     |    | 1,000        |           |           |           |           |            |            | MG200<br>N1US1 | MG300<br>N1US1 |                |
|  | YS | 500          |           | MG25H2YS1 | MG50H2YS1 | MG75H2YS1 | MG100H2YS1 | MG150H2YS1 | MG200<br>H2YS1 |                |                |
|                                                                                     |    | 1,000        | MG15N2YS1 | MG25N2YS1 | MG50N2YS1 | MG75N2YS1 | MG100N2YS1 | MG150N2YS1 |                |                |                |
|                                                                                     |    | 1,400        |           | MG25S2YS1 |           |           |            |            |                |                |                |
|  | ES | 500          | MG15H6ES1 |           |           |           |            |            |                |                |                |
|                                                                                     |    | 1,000        | MG15N6ES1 |           |           |           |            |            |                |                |                |

表5 欧美主要IGBT生产厂家及产品

| 厂家名称                   | 型 号                     | 规 格                       | 封 装         |
|------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------|
| I R C<br>(国际整流<br>器公司) | I R C B C 2 0           | 1 1 A / 6 0 0 V           | T O - 2 0   |
|                        | I R C B C 3 0           | 1 8 A / 6 0 0 V           |             |
|                        | I R C B C 4 0           | 4 0 A / 6 0 0 V           |             |
| I X Y S                | I X G P H 1 0 N 1 0 0 A | 2 0 A / 1 0 0 0 V         | T O - 2 2 7 |
|                        | I X G P H 2 0 N 1 0 0 A | 4 0 A / 1 0 0 0 V         | T O 2 4 7   |
|                        | I X G P H 2 5 N 1 0 0 A | 5 0 A / 1 0 0 0 V         | T O 2 4 7   |
| S G S                  | S T H 1 0 7 N 5 0       | 7 A / 5 0 0 V             |             |
|                        | S T H 1 1 0 N 5 0       | 1 0 A / 5 0 0 V           |             |
| 菲力浦                    | U B K 8 0 0             | 5 0 0 V 8 0 0 V 1 0 0 0 V |             |
| 西门子                    | B U P 3 0 4             | 2 5 A / 1 0 0 0 V         |             |

## 二、IGBT的基本结构和工作原理

IGBT的基本结构和等效电路示于图1。它在结构上近似于MOSFET，其不同点在于在n沟道MOSFET的n+基板（漏极）上加一层P+基板（IGBT的集电极），形成四层结构，由PnP—n Pn晶体管构成IGBT。但是，n Pn晶体管的基极和发射极因铝电极短路，设计时尽可能使n Pn不起作用。所

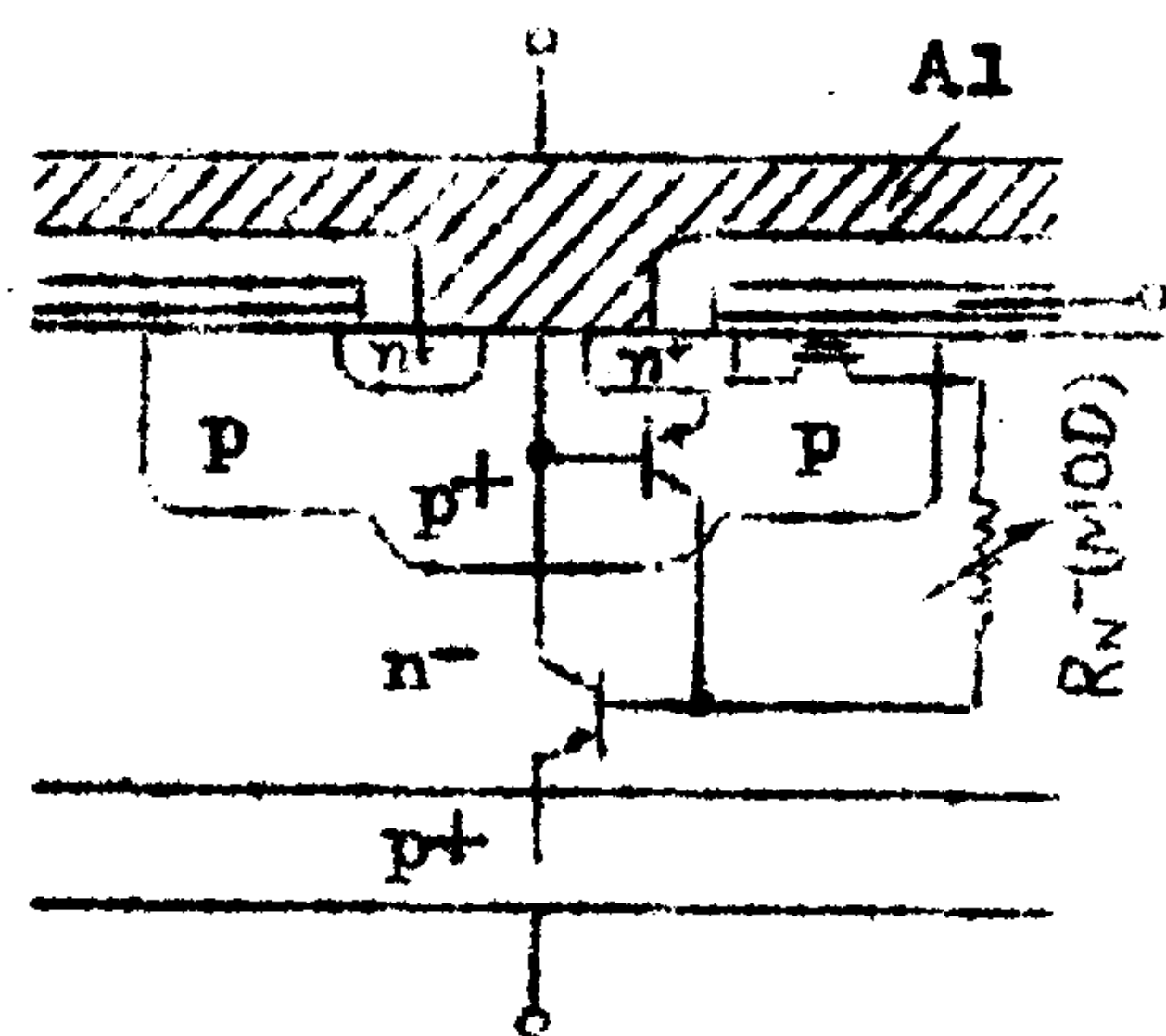
以说，IGBT的基本工作与 $n-p-n$ 晶体管无关，可以认为是将 $n$ 沟道MOSFET作为输入级， $p-n-p$ 晶体管作为输出级的单向达林顿晶体管。

采取这样的结构可在 $N^-$ 层作电导率调制，提高电流密度。这是因为从 $P^+$ 基板经过 $N$ 层向高电阻的 $N^-$ 层注入少数载流子的结果。

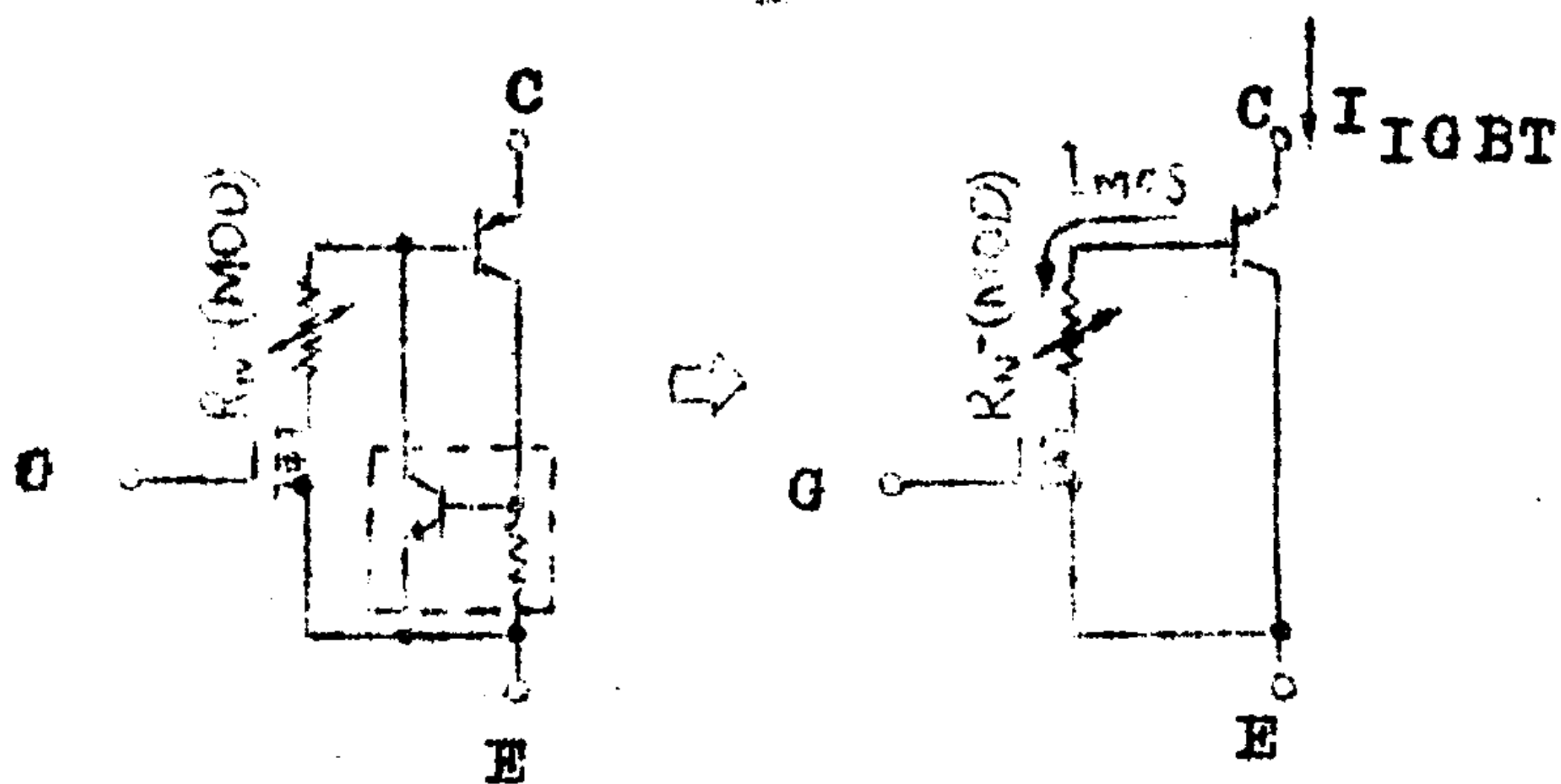
IGBT的设计如等效电路(b)所示，通过 $p-n-p-n-p-n$ 晶体管的连接，形成晶闸管，它作为电力用IGBT即使在负载短路时的大电流条件下， $n-p-n$ 晶体管也不动作。因此，IGBT的基本工作机制可认为是：除去 $n-p-n$ 晶体管， $n$ 沟MOSFET和 $p-n-p$ 晶体管相结合的倒置式达林顿晶体管的作用。IGBT的开关作用是通过施加正向栅极电压形成沟道，给 $p-n-p$ 晶体管提供基极电流，使其开通。反之，施加反向栅极电压消除沟道，流过反向基极电流，使其关断。

IGBT的驱动方法基本上和MOSFET相同，只须控制输入级 $n^-$ 沟道MOSFET，因此具有高输入阻抗特性。

MOSFET的沟道形成后，从 $P^+$ 基板注入到 $n^-$ 层的空穴（少数载流子），对 $n^-$ 层进行电导调制，减少 $n^-$ 层的电阻，使IGBT在高电压时，也具有低的通态电压特性。



(a) 基本结构



(b) 等效电路 I

(c) 等效电路 II

图1 IGBT的基本结构和等效电路

### 三、IGBT的特性

关于IGBT的特性各公司产品所列项目和参数不尽相同，为便于参考一并列出。

IGBT最典型的电特性如表1所示，表2所列富士公司的产品，表3为东芝公司的产品特性。

# 1 • 最大额定值和电特性

IGBT模块的最大额定值和电特性参看表6~表10。

表6 IGBT典型的电特性

| 最大额定电压 (V)                  |                      | 1000 |       | 500 |     |       |
|-----------------------------|----------------------|------|-------|-----|-----|-------|
| 最大额定电流 (A)                  |                      | 25   | 50    | 25  | 50  | 100   |
| 饱和电压<br>(V)                 | 25℃                  | 3    | 3     | 3   | 3   | 3     |
|                             | 125℃                 | 3.5  | 3.5   | 3.5 | 3.5 | 3.5   |
| 下降时间<br>(μs)                | 25℃                  | 0.5  | 0.5   | 0.5 | 0.5 | 0.5   |
|                             | 125℃                 | 0.9  | 0.9   | 0.9 | 0.9 | 0.9   |
| 最大可关断电流<br>(A)              |                      | 330  | 600   | 150 | 300 | 700   |
| 断电流<br>(A/cm <sup>2</sup> ) |                      | 660  | 600   | 600 | 600 | 700   |
| * 负载耐<br>短路<br>峰值<br>电压 (V) |                      | 800  | 800   | 400 | 400 | 400   |
|                             | 峰值电流 (A)             | 380  | 750   | 220 | 400 | 790   |
|                             | (A/cm <sup>2</sup> ) | 760  | 750   | 880 | 800 | 790   |
| VCEX(sus) 能量 (mJ)           |                      | 96   | 200   | 42  | 85  | 225   |
| 芯片尺寸 (mm <sup>2</sup> )     |                      | 8×8  | 12×12 | 6×6 | 8×8 | 12×12 |

• 脉冲宽度 10μs

表7 特性表

(a) 绝对最大额定值

| 项 目         | 记 号       | 条 件                        | 额 定 值         |     |       |     | 单 位 |
|-------------|-----------|----------------------------|---------------|-----|-------|-----|-----|
|             |           |                            | B2A           | B3A | O2A   | O3A |     |
| 电源电压        | $V_{CC}$  |                            | 2 5           |     |       |     | V   |
| 光电耦合器输入电流   | $I_{in}$  |                            | 70            | 25  | 70    | 25  | mA  |
| 正偏压输出电流     | $I_{G_1}$ | PW=2 $\mu$ s, 占空比=0.05以下   | 1 . 5         |     | 3 . 0 |     |     |
| 反偏压输出电流     | $I_{G_2}$ | PW=2 $\mu$ s, 占空比=0.05以下   | 1 . 5         |     | 3 . 0 |     |     |
| 输入——输出间绝缘耐压 | $V_{ISO}$ | AC50Hz/<br>60Hz, $I_{min}$ | 2 5 6 0       |     |       |     | V   |
| 工作时间表面温度    | $T_c$     |                            | ~ 1 0 ~ + 6 0 |     |       |     | ℃   |
| 保存温度        | $T_{stg}$ |                            | - 2 5 ~ + 2 5 |     |       |     | ℃   |

(b) 电气特性

| 项 目       | 记 号              | 条 件                  | 额 定 值    |     |     |          |     |     | 单 位 |
|-----------|------------------|----------------------|----------|-----|-----|----------|-----|-----|-----|
|           |                  |                      | B3A, C3A |     |     | B2A, C2A |     |     |     |
|           |                  |                      | ( 高速 )   |     |     | ( 中速 )   |     |     |     |
|           |                  |                      | 最小       | 标准  | 最大  | 最小       | 标准  | 最大  |     |
| 开关时间 1    | t <sub>on</sub>  | V <sub>cc</sub> =20V |          |     | 1.0 |          |     | 2.0 | μs  |
| 开关时间 2    | t <sub>off</sub> | V <sub>cc</sub> =20V |          |     | 1.0 |          |     | 4.0 | μs  |
| 过电流保护工作电压 | V <sub>ocp</sub> | V <sub>cc</sub> =20V |          | 6.5 |     |          | 6.5 |     | V   |
| 过电流保护延迟时间 | t <sub>ocp</sub> | V <sub>cc</sub> =20V |          |     | 10  |          |     | 10  | μs  |
| 报警延迟时间    | t <sub>ALM</sub> | V <sub>cc</sub> =20V |          |     | 1   |          |     | 1   | μs  |
| 反偏压电源电压   | V <sub>RB</sub>  | V <sub>cc</sub> =20V |          | 5   |     |          | 5   |     | V   |

表8 东芝MG25N2Y81最大额定值 ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

| 项 目                              | 符 号               | 额 定 值          | 单 位   |
|----------------------------------|-------------------|----------------|-------|
| 集电极——发射极间电压                      | V <sub>CE</sub> S | 1000           | V     |
| 门极——发射极间电压                       | V <sub>GE</sub> S | $\pm 20$       | V     |
| 集电极电流 (DC)<br>(I <sub>ms</sub> ) | I <sub>C</sub>    | 25             | A     |
|                                  | I <sub>CP</sub>   | 50             | A     |
| 正向电流 (DC)<br>(I <sub>ms</sub> )  | I <sub>F</sub>    | 25             | A     |
|                                  | I <sub>FM</sub>   | 50             | A     |
| 集电极损耗                            | P <sub>C</sub>    | 200            | W     |
| 结 温                              | T <sub>j</sub>    | 125            | °C    |
| 储 存 温 度                          | T <sub>stg</sub>  | -40~125        | °C    |
| 绝 缘 耐 压                          | V <sub>ISOL</sub> | 2500 (AG, 1分钟) | V     |
| 紧固力矩 (端子/安装)                     |                   | 20/30          | kg/cm |

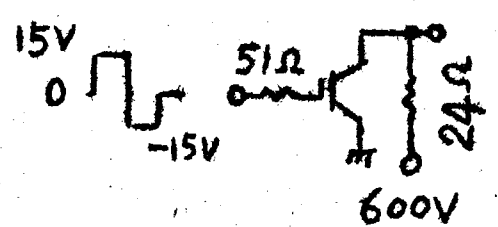
表9 智能功率模块额定特性

| 形 名           | 逆变器单元           |              |              |                         |                          |                      | 制动单元            |              |              | 预驱动             |                  | 过热保护                        | 过电流保护           |                         | 短路保护            |                         | 报警输出              |
|---------------|-----------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
|               | $V_{cc}$<br>(V) | $I_c$<br>(A) | $P_c$<br>(W) | $t_{on}$<br>( $\mu s$ ) | $t_{stg}$<br>( $\mu s$ ) | $t_f$<br>( $\mu s$ ) | $V_{cc}$<br>(V) | $I_c$<br>(A) | $P_c$<br>(W) | $V_{pd}$<br>(V) | $I_{pd}$<br>(mA) | $T_{SD}$<br>( $^{\circ}C$ ) | $I_{SD}$<br>(A) | $t_{oc}$<br>( $\mu s$ ) | $V_{CE}$<br>(V) | $t_{oc}$<br>( $\mu s$ ) | $t_{lat}$<br>(ms) |
| 7MB30A-060EHR | 450             | 30           | 150          | 6                       | 6                        | 0.5                  | 450             | 20           | 100          | 20              | 50               | 90                          | 4.5             | 50                      | 5               | 20                      | 10~30             |
| 7MB50A-050EHR | 450             | 50           | 200          | 6                       | 6                        | 0.5                  | 450             | 20           | 100          | 20              | 50               | 90                          | 7.5             | 50                      | 5               | 20                      | 10~30             |
| 7MB75A-050EHR | 450             | 75           | 240          | 6                       | 6                        | 0.5                  | 450             | 20           | 100          | 20              | 50               | 90                          | 11.3            | 50                      | 5               | 20                      | 10~30             |

$V_{pd}$  : 驱动电压     $I_{pd}$  : 驱动电流     $T_{SD}$  : 保护开始温度     $I_{SD}$  : 保护开始电流     $t_{oc}$  断开时间

$V_{CE}$  : 保护开始电压     $t_{lat}$  : 输出脉宽

表 10 东芝 MG25NZS-1 的特性 ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

| 项 目                                 | 符 号                                     | 测 试 条 件                                                                            | 最 小              | 标 准                      | 最 大                      | 单 位           |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| 栅极漏电流                               | $I_{GES}$                               | $V_{GE} = \pm 20\text{V}, V_{CE} = 0$                                              | -                | -                        | $\pm 500$                | nA            |
| 集电极关断电流                             | $I_{CES}$                               | $V_{CE} = 1000\text{V}, V_{GE} = 0$                                                | -                | -                        | 1.0                      | mA            |
| 集电极-发射极间电压                          | $V_{CES}$                               | $I_C = 10\text{mA}, V_{GE} = 0$                                                    | 1000             | -                        | -                        | V             |
| 门极-发射极间关断电压                         | $V_{GE}(\text{OFF})$                    | $V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 25\text{mA}$                                            | 3.0              | -                        | 6.0                      | V             |
| 集电极-发射极间饱和电压                        | $V_{CE}(\text{sat})$                    | $I_C = 25\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}$                                            | -                | 3.0                      | 5.0                      | V             |
| 输入电容                                | $C_{ies}$                               | $V_{CE} = 10\text{V}, V_{GE} = 0$<br>$f = 1\text{MHz}$                             | -                | 3000                     | -                        | PF            |
| 上升时间<br>关断时间 - 开通时间<br>开降时间<br>关断时间 | $t_r$<br>$t_{on}$<br>$t_f$<br>$t_{off}$ |  | -<br>-<br>-<br>- | 0.3<br>0.4<br>0.6<br>1.0 | 1.0<br>1.0<br>1.0<br>2.0 | $\mu\text{s}$ |
| 正向电压                                | $V_F$                                   | $I_F = 25\text{A}, V_{GE} = 0$                                                     | -                | 1.5                      | 2.5                      | V             |
| 反向恢复时间                              | $t_{rr}$                                | $I_F = 25\text{A}, V_{GE} = 10\text{V},$<br>$di/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$      | -                | 0.2                      | 0.5                      | $\mu\text{s}$ |
| 晶体管部<br>热阻<br>二极管部                  | $R_{th(j-c)}$<br>$R_{tn(j-c)}$          |                                                                                    | -<br>-           | -<br>-                   | 0.625<br>1.0             | C/W           |