

2

IGBT, 大功率晶体管, 功率晶体管

IGBT 大功率开关管及其驱动器

区初

8-11

徐雪金

TN323.4

IGBT 是一种新型的大功率开关管,近年来在国内外变频器或开关电源中获得广泛的使用。为了避免短路过流烧坏管子,必须要用相应的驱动器来驱动和保护。本文首先介绍 IGBT 的工作原理,再介绍台湾斯米克公司生产的一种 IGBT 分立式驱动器 IDM400A,最后提出应用中的几个问题供读者使用时参考。

IGBT 的基本原理及特性

一. IGBT 的基本原理

IGBT 是绝缘栅双极型大功率晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor) 的简称,自 80 年代中期以来,它作为一种新一代的电力电子器件在交流变频器、逆变器、大功率开关电源、电子焊机等方面获得了广泛应用,虽然在 IGBT 问世之前,大功率双极型晶体管 (GTR) 已经在电力电子线路中获得了应用,如小功率开关电源及逆变器等,但随着转换功率的增

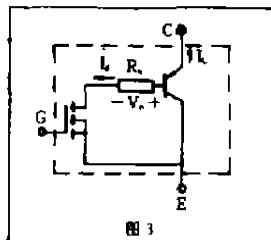


图 3

性,它的开关时间只有 GTR 的几十分之一到几百分之一,因此工作频率可以比 GTR 高得多;由于 VDMOS 是场控器件,输入阻抗高,所需的控制功率极微,通常可直接使用集成电路的输出,这给驱动电路的设计带来方便;VDMOS 还具有良好的热稳定性,由于其沟道电阻具有正的温度系数,当芯片温度升高时,沟道电阻增大,使通过的电流减小,从而能自动调节整个芯片电流的均匀分布,使大电流器件的制造成为可能,也使多个器件能够直接并联使用而不需采取特别均流措施。VDMOS 与 GTR 相比的主要缺点是管子导通时的通态压降 $V_{DS(on)}$ 比较大,使管子功耗大。造成 VDMOS 通态压降大的原因是电流通道上存在着较大的轻掺杂区,即 n^- 区电阻 R_D ,而 n^- 区又是提高器件耐压所必须的,因此在 VDMOS 中高耐压和低通态压降是一对矛盾。

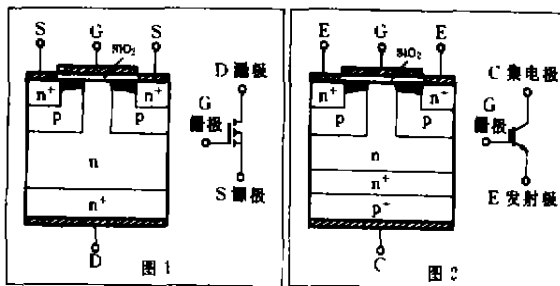


图 1

图 2

IGBT 是 VDMOS 的改进,从结构原理上看它是 VDMOS 和 GTR 的结合,兼有两者的优点。图 2 是它的结构和电路符号,它在 VDMOS 基础上引进了 $p-n$ 结,利用基区(轻掺杂 n^- 区)少数载流子的电导调制效应来降低基区电阻,从而使 IGBT 的通态压降 $V_{CE(on)}$ 下降。简单地说 IGBT 相当于 1 个由 MOSFET 驱动的厚基区 pnp 晶体管,它的简化等效电路如图 3 所示,图中 R_b 为 pnp 管基区内的调制电阻。当 V_{CE} 为正且大于阈值电压 $V_{GE(th)}$ 时, MOSFET 内形成沟道并为 pnp 晶体管提供基极电流而使 IGBT 导通,此时从 p^+ 区注入 n^- 的空穴(少数载流子)对 n^- 区进行电导调制,减小 n^- 区的电阻

差,开、关状态转换时间长,开关损耗大,工作频率低;(2)热稳定性差,容易损坏;(3)驱动功率大,驱动线路复杂,这就限制了 GTR 在大电流,高电压方面的进一步发展,70 年代出现的电力场效应管 (Power MOSFET) 是一种电场控制型的大功率器件,较常见的管子结构型式是漏极和源极不在同一平面上的垂直导电双扩展 MOS 器件 (VDMOS),图 1 是 VDMOS 的结构示意图和电路符号,它的工作原理如下:如在 VDMOS 漏极 D 和源极 S 间加上正向电压 V_{DS} ,当栅极 G 和源极 S 间所加的电压 $V_{GS}=0$ 时, D 与 S 间因存在 $p-n^-$ 反向结,在 D 与 S 间没有电流通过;当 V_{GS} 加正向偏置时,由于 SiO_2 绝缘层的存在, $I_G=0$,但金属栅极充电而聚集正电荷, p 型硅中的空穴被正电荷排斥向体内运动,而留下了带负电的离子,形成了一层没有载流子的空间电荷区,称为耗尽层,耗尽层不能导电,随着 V_{GS} 增大,耗尽层加宽,当 V_{GS} 大到一定值时, p 型硅中的电子(少数载流子)被栅极正电荷吸引到表面,在耗尽层和 SiO_2 之间出现 n^- 型导电层,称为反型层,或称 n^+ 沟道,见图 1 阴影处,出现反型层所需的栅极正偏压称为阈值电压。VDMOS 器件的电流全部依靠电子(多数载流子)运载,属于“单极型器件”,与双极型管子相比, VDMOS 具有良好的动态特

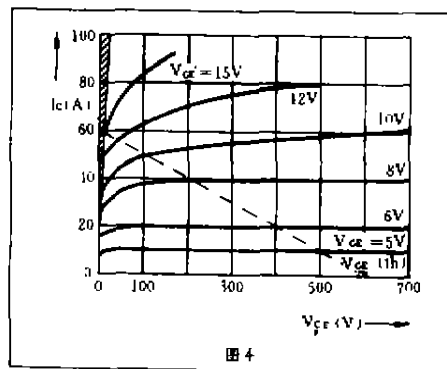


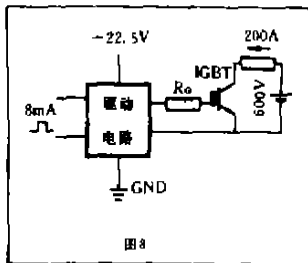
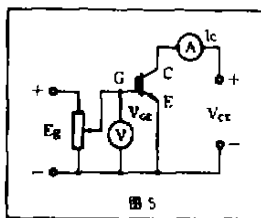
图 4

IGBT 大功率开关管及其驱动器

Rn,使高耐压的 IGBT 也有很小的通态压降,当 V_{GE} 为 0 或反向时, MOSFET 内沟道消失, pnp 管的基极电流被切断, IGBT 关断, $V_{CE(on)}$ 下降意味着 IGBT 器件的电流容量可以做得更大,耐压也可更高。虽然 IGBT 因 p-n 结存在着少数载流子存储效应,动态特性比 VDMOS 差一些,但总体性能明显优于前两者,是当前电力电子器件较为理想的一种。随着容量、损耗、工作频率、安全可靠性等指标的提高,当前 IGBT 已经发展到第三代、第四代,它的驱动线路也已集成化、模块化,大大方便了使用。

二. IGBT 的输出特性和主要参数

IGBT 的输出特性是指以 V_{GE} 为控制变量,集电极电流 I_c 与集、射极间电压 V_{CE} 之间的关系,图 4 为典型的 IGBT 输出特性曲线。当 $V_{CE} > 0$ 而 $V_{GE} < V_{GE(th)}$ 时, IGBT 为正向阻断状态,此时沟道没有形成, IGBT 只有很小的集电极漏电流 I_{CES} 流过。当 $V_{CE} > 0$ 且 $V_{GE} > V_{GE(th)}$ 时,沟道形成,靠近集电极的 p-n 结处于正偏状态, p^+ 区将向 n 基区注入空穴, V_{CE} 升高,注入的空穴密度也增大,直到超过 n 基区的电子密度,在这种情况下,随着 V_{GE} 的升高,向基区提供电子的沟道加宽, I_c 将增大。在正向导通的大部分区域内, I_c 与 V_{GE} 呈线性关系, IGBT 的这种工作状态为有源工作状态或称线性工作状态。图 4 中输出特性明显弯曲的部分为饱和工作区,此时 I_c 与 V_{GE} 不呈线性关系。对于工作在开关状态的 IGBT,应尽量避免工作于有源区,否则功耗将会很大。



IGBT 的主要参数:

1. 集、射极最高电压 BV_{CES} 是指栅极与发射极短接时, C, E 间允许的最大电压,即通常所指的额定电压。
2. 集电极最大电流 I_{CM} 是指管子安全温度范围内集电极最大允许通过的直流电流,通常 IGBT 的安全温度为壳温 85℃。
3. 集电极通态压降 $V_{CE(on)}$ 指在一定的集电极电流

表 1

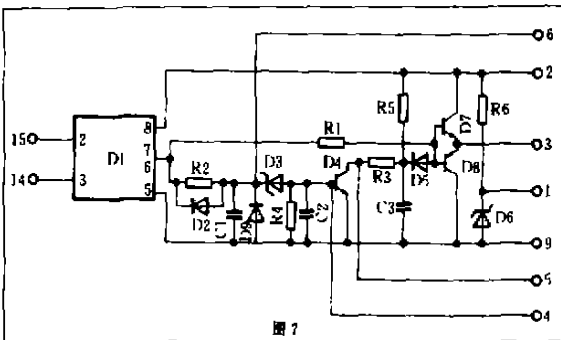
型号	额定电压 BV_{CES} (V)	集电极最大电流 I_{CM} (A)	集电极峰值电流 $I_{CP}(\leq 1ms)$ (A)	通态压降 $V_{CE(on)}(25^\circ C)$ (V)	阈值电压 $V_{GE(th)}$ (V)	开通时间 (t_{on}) (μS)	关断时间 (t_{off}) (μS)
FF100R 500K	500	100	200	3	4.5	0.8	0.8
FF100R1000K	1000	100	200	3		0.6	1.0
FF150R 500K	500	150	300	3		0.8	0.8
FF150R1000K	1000	150	300	3.5		0.7	1.1
FF200R 500K	500	200	400	3		0.85	0.8
F 200R1000K	1000	200	400	3		0.9	1.1
F 300R 500K	500	300	600	3		0.9	0.9
F 300R1000K	1000	300	600	3.5		0.9	1.2
F 400R 500K	500	400	800	3		1.0	0.9

下, C, E 间的饱和压降,从图 4 可见,在饱和导通时, $V_{CE(on)}$ 与集电极电流近似成正比。

4. 阈值电压 $V_{GE(th)}$ IGBT 实现电导调制而导通的最低 G, E 间电压。25℃ 时 $V_{GE(th)}$ 的范围在 2~6V 之间, $V_{GE(th)}$ 值随温度升高略有下降,温度每升高 1℃,其值下降约 5mV。 $V_{GE(th)}$ 值可以由图 5 所示的基本电路来测量,图中当 $V_{GE}=0$ 时,集电极电流很小,为漏电流 I_{CES} ,升高 V_{GE} 使 I_c 上升到规定的集电极电流时测得的 G, E 间电压即为 $V_{GE(th)}$ 。

5. 开通时间 t_{on} 即 IGBT 在开通过程中从驱动电压 V_{GE} 脉冲前沿的 0.1 V_{GE} 处起至 I_c 上升到 0.9 I_c 处所需的时间。

6. 关断时间 t_{off} 即 IGBT 在关断过程中从 V_{GE} 脉冲后沿

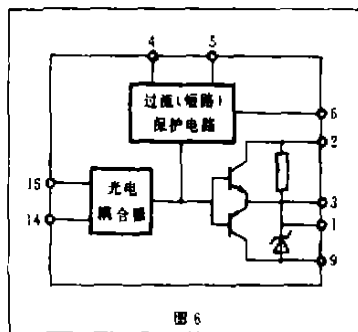


的 0.9 V_{GE} 处起至 I_c 下降到 0.1 I_c 处所需的时间。 IGBT 的 t_{on} 和 t_{off} 约 1~2 μs 。

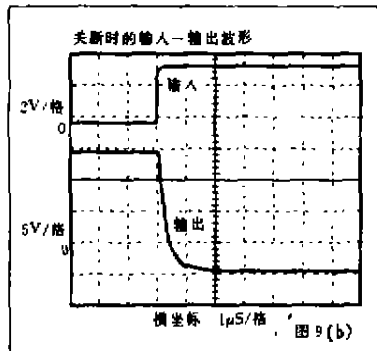
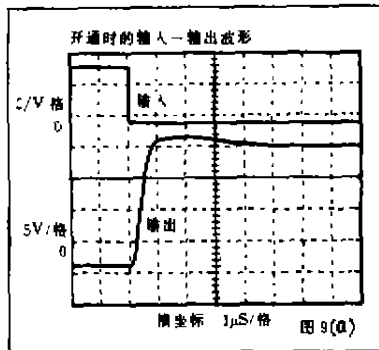
表 1 为 AEG 公司几种 IGBT 的主要性能,供读者参考。

介绍一种 IGBT 驱动器

虽然 IGBT 的驱动功率小,电路简单,但 IGBT 的驱动电路设计得好坏对器件安全可靠地工作关系很大, IGBT 驱动

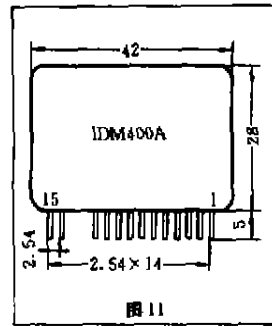
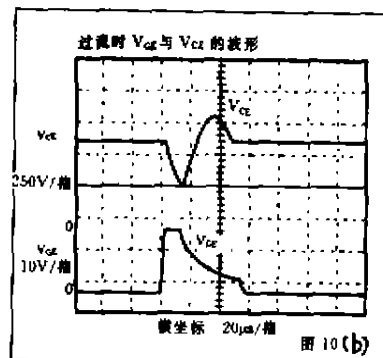
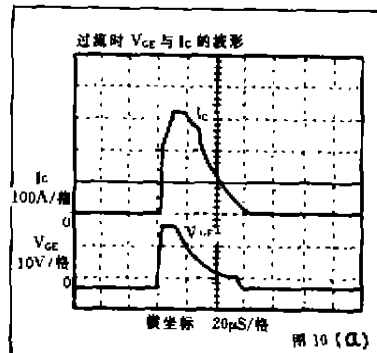


新器件应用



器除了应具备驱动放大功能外,还必须要有良好的隔离和保护功能,对它的具体要求是:

1. 提供适当的正向驱动电压 V_{CE} 。为了保证 IGBT 充分导通以达到降低饱和压降的目的,正向驱动电压要足够大,通常取 15V 左右,另外为了保证 SiO_2 绝缘层不被击穿和长期可



管脚	功能
1	用于连接反偏置电源的滤波电容器
2	电源(+22.5V)
3	驱动输出
4	连接外部电容,防止保护电路误动作
5	过流(短路)保护信号输出
6	IGBT 集电极电压检测
7	不接
8	不接
9	电源地
10	电源地
14	驱动信号输入
15	驱动信号输入

靠工作, V_{CE} 最大不得超过 20V。

2. 提供适当的反向偏置电压,为了防止外界干扰脉冲引起误导通,栅极反向应施加 $-5 \sim -10V$ 电压。

3. 具有可靠的短路和过流保护能力,在切断 IGBT 短路电流时要有一小段延时,以避免引起瞬态尖峰电压损坏管子。

4. 有良好的输入输出隔离能力。

5. 尽可能小的输入输出信号传输延迟。

6. 具有过流监控信号的输出功能。

一. IDM400A 驱动器

IDM400A 是一种分立元件的 IGBT 专用驱动器模块,图 6 为 IDM400A 的方框图,图中④、⑮脚是控制信号输入端,③脚是驱动信号输出端,它通过栅极驱动电阻 R_G 与 IGBT 的栅极相连,用来开关 IGBT。⑤脚是过流监控信号输出端,它通过外接光耦输出故障信号。⑥脚为过流保护信号输入端,为了与高压隔离,该引脚必须外接高压的取样二极管与 IGBT 集电极相接。①脚与 IGBT 发射极直接相连,⑩脚为地端。

IDM400A 的电原理如图 7 所示,电源电压加在②、⑩脚之间,推荐值为 22.5V。图中由高压隔离光耦 D1、互补推挽输出管 D7/D8、5V 稳压管 D6 及电阻 R1 组成驱动器的基本电路, D1 的输出端子⑤、⑥及⑦、⑧间为 1 对互补管,输入脉冲信号(推荐值为 8mA)经 D1 隔离放大,传送到推挽功放管 D7、D8 输出。正常工作时,当 D7 饱和, D8 截止,输出脚③向 IGBT 提供正向驱动电压约 16V;当 D7 截止, D8 饱和,脚③向 IGBT 提供反向偏置电压约 $-5V$ 。IDM400A 驱动 IGBT 导通和关断的测试电路和输入—输出波形如图 8 及图 9 所示。

图 7 中的 D3、D4、D5、R3、R4、R5、C2、C3 等构成了过流检测、故障信号输出及导通保持电路。检测过流故障的方法是

IGBT 大功率开关管及其驱动器

表 2

项 目	IDM400A	EXB840	EXB841
最大供电电压(V)	35	25	25
最大输入电流(mA)	10		
最大正向偏置输出电流(A)	9	1.5	4
最大反向偏置输出电流(A)	-9	-1.5	-4
最大工作频率(kHz)	25	40	40
输入/输出隔离电压(kV)	2.5	2.5	2.5
最高表面工作温度(°C)	-10~+85	-10~+85	-10~+85
工作电压(V)	22.5	20	20
输入正向电流(mA)	8	10	10
输出高电平电压(V)	16	14.5	14.5
输出低电平电压(V)	-5	-4.5	-4.5
导通时间(μs)	1.5	1.5	1.5
关断时间(μs)	1.5	1.5	1.5
过电流检测电压(V)	7.5	7.5	7.5
过电流保护延时时间(μs)	10	10	10
报警信号延时时间	2	1	1

利用 IGBT 通态压降 $V_{CE(on)}$ 跟集电极电流 I_c 成正比的特性,通过监视 $V_{CE(on)}$ 的大小来判断过流是否产生。IGBT 在正常工作状态下通态压降 $V_{CE(on)}$ 约 4V(第 2 代 IGBT 管子),一旦过流发生, $V_{CE(on)}$ 增大,当增大到设定值 7.5V 时,驱动器③与①脚之间为 8.2V,过流保护动作电压达 13.2V(C1 两端),D3 反向导通,为 D4 提供基极电流,D4 由截止转为导通,使⑤脚电平由高变低,对外输出过流监控信号。同时由于 D4 导通,C3 向 D4 放电,约经 10μs 后,D5 导通,D7 的基极电流减小,以致 D7 由饱和状态变为放大状态,同时 D8 也由截止变为放大,IGBT 栅极正向驱动电压随之降低,实现软关断,称为延时过流保护。在这段时间内若过流故障消失,IGBT 的 $V_{CE(on)}$ 减小,D4 回到截止状态,③脚恢复正常驱动电压输出。若这段时间过后过流故障不消失,将促使 D7 截止,D8 饱和,形成负偏压,关断管子。过流保护的動作曲线如图 10 所示,图中当 IGBT 从关断转为开通时,若此时发生过流故障,则输出驱动电压在 16V 处延时 10μs 后下降,约 50μs 后关断。

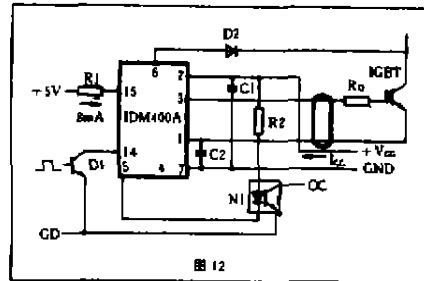
IDM400A 的外形尺寸和管脚功能见图 11。

二. IDM400A 驱动器的主要参数

IDM400A 的额定参数与主要特性见表 2。表 2 中还列出了日本富士 EXB 系列驱动器的性能。从表中可见,两者的电性能相似,但 IDM400A 有更大的驱动能力,在工作频率低于 25kHz 时,它最大能驱动 1200V/400A 的 IGBT,当驱动第 2 代 600V/200A 或 1200V/100A 的 IGBT 时有良好的安全性。

三. IDM400A 驱动器的典型应用

IDM400A 的典型应用见图 12。图中 C1、C2 用来吸收电源阻抗引起的电压变化,避免电路产生误动作,使用时电容尽量靠近驱动器,建议 C1 取 47μF/35V,C2 取 47μF/16V。取样二极管 D2 的选取必须考虑反向耐压,恢复时间和通态压降 3 个因素,它的反向耐压必须大于相对应的 IGBT 的额定电压,它的恢复时间必须小于 IGBT 的关断时间,它的正向压降应



不大于过流保护动作电压(13.2V)减去 IGBT 过流时的 $V_{CE(on)}$ 及稳压管(图 7 中 D6)电压后得到的差,可选用快恢复二极管 FR157 或其他同类型管子。

R_G 是个非常重要的参数,它涉及到 IGBT 的开关速度和开关损耗,并影响电路是否出现振荡,是否产生浪涌电压和电流。增大 R_G 可抑制振荡,减小浪涌,但开关损耗随之增大,表 3 给出了富士 EXB 系列驱动器配置富士第 2 代 IGBT 的电阻计算值,也可供 IDM400A 使用时参考。表中 R_G 计算值与所给的标准值可能有较大出入,一般要高出 2~3 倍。 R_2 为故障输出光耦的限流电阻, R_2 太大,光耦输入电流太小,故障信号不能有效传递; R_2 太小将使故障输出信号的保持时间变短,使有关电路来不及处理而导致保护失败, R_2 的推荐值为 5.1kΩ。

表 3

R_G	$I_c(A)$									$V_{CE}(V)$
	8	15	35	50	75	100	150	200	300	
R_G 计算值(Ω)	560	360	200	91	63	46	35	21	15	1200
R_G 标准值(Ω)	150	82	50	25	16	9.1	5.6	4.7	2.7	
R_G 计算值(Ω)	270	150	68	47	35	27	16	11		600
R_G 标准值(Ω)	150	82	50	33	25	15	12	8.2		