# 双向 IGBT 理论模型及其封装形式可行性研究

## 陈明保

(海南省工业学校 五指山 572200)

摘要 针对常规 IGBT 在应用中存在的一些不足,提出了一种五层四端结构的新型双向 IGBT 功率半导体器件,其核心是以平面栅型 IGBT 为基础,通过对新器件采取对称结构和两路 输入控制的方法,从而达到对新器件双向控制的目的。文中详细分析了它的原理,首先推导该 双向 IGBT 的理论模型及其控制策略,然后建立实验电路验证,最后对该双向 IGBT 的封装形式做了一定的探讨。综合分析的结果表明,该双向 IGBT 具备双向导通和双向阻断能力,文中提出的双重关断方案,不但能有效减小器件在关断时的拖尾电流,还能提高器件的工作频率。

关键词: 双向 IGBT 理论模型 双重关断 封装 功率器件 矩阵式变换器 中图分类号: TN303

# Research on Theoretic Model & Its Package Types of the Bidirectional IGBT

Chen Mingbao

(Hainan Industrial School Wuzhishan 572200 China)

Abstract Due to the defects in the applications of normal IGBT, a new power semiconductor device based on five layers four ends structure of the bidirectional IGBT is put forward. Its main part is a plane gate of the IGBT, used the strategy based on symmetry structure and two ways input control of the bidirectional IGBT, and the purposes based on bidirectional control is attained. Their principles is analyzed in detail, it is first deduces the theoretic model and control strategy of the bidirectional IGBT, then establishes and proofed the experimental circuit of the bidirectional IGBT, studies the footprints of the bidirectional IGBT in the end. Theoretical analysis and experimental results demonstrate the functions base on dual turn-on and dual turn-off of the bidirectional IGBT are good, the dual turn-off plan raised, not only reduces the tails of current effectively, but also can improve operating frequency of the bidirectional IGBT.

**Keywords:** Bidirectional IGBT, theoretic model, dual turn-off, package types, power device, matrix converter

收稿日期 2008-05-21 改稿日期 2008-10-21

## 1 引言

大功率电力电子器件是现代电力电子技术的核心硬件,它的发展已成为衡量一个国家电力电子技术应用及发展水平的一个重要标志。纵观功率器件的发展史不难发现,历史上每一种有应用价值的新型功率器件的出现都较大地推动着电力电子技术的

发展,但从应用的角度看,在目前的主流功率器件中,无论是半控型的还是全控型的,绝大多数都是单向型器件,而双向型器件相对较少。在一些应用领域中,往往要求功率器件必须是双向型的,比如矩阵式变换器(MC),为了实现主电路中的双向开关,文献[1-2]中介绍了一种较典型的做法:将两个单向 IGBT 以集电极背对背的方式连接组成双向开关;文献[3]进一步提出用该法制作一种集成双向半导体功率模块。由于该法中所用的 IGBT 不具有

反向电压阻断能力,往往是通过串联一个二极管来 实现的,这样一个开关单元的总损耗为 IGBT 和二 极管损耗之和,且器件数量也增多了[4]。显然在较 理想的双向型功率器件尚未实现实用化之前, 这样 做是无奈之举。可以说,现有的功率器件还远不是 理想的功率控制器件, 较理想的全控型功率器件, 除了应具有工作频率高、控制容量大、损耗低等特 点外,还应具有双向导通和双向阻断能力,具有这 种能力的功率器件更适合用于矩阵式变换器中[5]。 据了解,目前对功率器件的研究主要集中在应用新 材料、新工艺如何提高功率器件的各项性能(如为 突破器件的材料极限,目前有两大技术发展方向值 得关注,一是采用新的器件结构,二是采用宽能带 间隙的半导体器件[6]),但对双向型功率器件的研 究报道较少, 能够实现产品实用化的报道更是寥寥 无几。

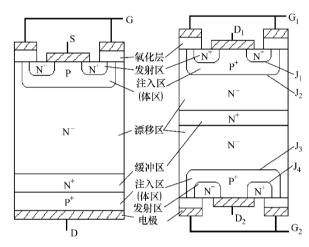
本文以平面栅型 IGBT 为研究对象,提出了一种新型的双向 IGBT 的理论模型及其控制策略,并从实用角度提出它的封装形式。

### 2 理论模型和控制策略

#### 2.1 理论模型

图 1a 是平面栅型 IGBT 的剖面结构图,为了实 现双向通流,双向 IGBT 必须采取对称结构,即在 平面栅型 IGBT 的基础上进行改造。做法是:在图 1a 平面栅型 IGBT 下部的 P+型注入区中,对称地扩 散出两块重掺杂度的 N+型半导体,作为另一个 IGBT 的发射区,再做出该 IGBT 的栅极,并拉出 引线,从而做出了一个上下两部分完全对称的双向 IGBT,如图 1b 所示。图中上部 P+型半导体既是上 部 IGBT 的体区,又是下部 IGBT 的注入区,同理 下部 P+型半导体既是下部 IGBT 的体区,又是上部 IGBT 的注入区。通过对比图 1a 和图 1b 可以发现, 两者有许多相同点,但也有不同点,例如图 1a中 的体区是 P型, 而图 1b 中的体区是 P+型。在 MOSFET 器件中,为了提高器件的阻断电压,一般 对衬底进行轻掺杂。而在 IGBT 器件中, 阻断电压 是由 N-层漂移区承受的。 IGBT 器件中的体区也可 以重掺杂,这样做的优点是,既可满足注入区是 P+型的要求,又可大幅降低体区中的电阻,从而提 高 IGBT 器件的锁定电流,克服由于体区电阻较大 而使 IGBT 器件在大电流导通时将导通状态锁定的 可能性,提高器件工作的可靠性[7-9]。图 1a 是有

N+缓冲区的非对称型 IGBT,而在图 1b 中,将 N+缓冲区移到两个 N-漂移区的中间,从而构成一个对称型、穿通型双向 IGBT。图 1b 是一种五层四端结构的新型 IGBT,其有四个 PN 结,当  $U_{\text{D1D2}}>0$  时( $U_{\text{D1D2}}$ 为加在双向 IGBT 的  $D_1$ 、 $D_2$  两脚间的电压,取  $U_{\text{D1D2}}=+V_{\text{CC}}$ ,为分析方便,笔者这样假定),由  $J_3$  结承受阻断电压,而当  $U_{\text{D1D2}}<0$  时(即  $U_{\text{D1D2}}=-V_{\text{CC}}$ ),由  $J_2$  结承受阻断电压,由于结构对称,该新型器件的正反向阻断电压可以做到同样的水平。



(a) 平面栅型 IGBT 结构图

(b) 双向 IGBT 结构图

图 1 两种 IGBT 比较

Fig.1 Comparison of the two IGBT

#### 2.2 控制策略

图 2a 是图 1b 的等效电路图,图 2b 是其电气符号图。可以看出,图 2a 中的 PNP 管可以看作是一个厚基区的、双 B 极的、C 极和 E 极完全对称的三极管, $R_{dr}$  是漂移区中的扩展电阻,该 IGBT 器件是以 PNP 为主导元件,以两个 MOSFET 管为驱动元件的达林顿结构双向通流开关器件,当 $U_{D1D2}>0$  且  $MOS_2$  导通时,电流路径是  $I_a$  (流过  $MOS_2$  管的漏极电流),而当  $U_{D1D2}<0$  且  $MOS_1$  导通时,电流路径是  $I_b$  (流过  $MOS_1$  管的漏极电流)。

102 电工技术学报 2009年10月

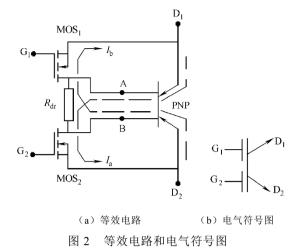


Fig.2 Equivalent circuit and electric symbols

图 3a 是双向 IGBT 控制原理图,分  $U_{D1D2}>0$  和  $U_{D1D2}<0$  两种情况。下面结合图 2a,以  $U_{D1D2}>0$  为例分析: 开始时,先将开关  $S_1$  拨向电源  $E_1$ ,而  $S_2$  拨向  $E_4$ ,则 IGBT 器件的两个栅极都承受反偏电压,图 2a 中的两个 MOSFET 管都关断,显然 IGBT 器件也是关断的。如果继续保持  $G_1$  为负偏压( $G_1$  为双向 IGBT 的第一个栅极),而将  $S_2$  拨向  $E_3$ ,让  $G_2$  转而承受正偏压( $G_2$  为双向 IGBT 的第二个栅极),则图 2a 中的  $MOS_2$  管导通,电流  $I_a$  的路径是  $D_1$ —A 点 $\Box R_{dr}$ — $MOS_2$  管一 $D_2$ ,如果再将  $S_2$  拨向  $E_4$ ,则 IGBT 器件将因  $G_2$  承受反向偏压而关断。可见,当  $U_{D1D2}>0$  且  $G_1$  为负偏压时,通过改变  $G_2$  偏压的极性就可达到控制 IGBT 器件通断的目的。

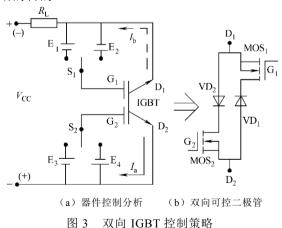


Fig.3 Control strategy of the double-direction IGBT

U<sub>D1D2</sub><0 时双向 IGBT 的控制基本与上述分析类似,为便于比较,将图 3a 这两种电路的控制状态编成真值表列在下表中,并假定 "0"为栅极承受负偏压,而"1"为栅极承受正偏压。

#### 表 双向 IGBT 状态真值表

Tab. The true worth of the bidirectional IGBT

组合 -	输 入		输  出	
	$U_{\mathrm{G1}}$	$U_{ m G2}$	$U_{\rm D1D2}>0$	$U_{\rm D1D2} < 0$
1	0	0	截止	截止
2	0	1	导通	截止
3	1	0	截止	导通
4	1	1	导通	导通

表中说明, $U_{\text{DID2}} > 0$  时,可通过变换组合 1 和组合 2 来达到控制 IGBT 器件通断的目的;同理,当  $U_{\text{DID2}} < 0$  时,也可通过变换组合 1 和组合 3 来达到控制 IGBT 器件通断的目的。

对平面栅型 IGBT 的研究发现,在器件导通后,若将栅极电压突然减至零甚至负偏压,则沟道消失,通过沟道的电子电流为零,IGBT 的漏极电流有所下降,但由于导通时在漂移区中注入了大量的电子——空穴对,发生了所谓的载流子存储效应,因而漏极电流不会马上为零,即出现了一个拖尾电流[10-11]。这个拖尾电流是相当有害的,它的存在不但增加了 IGBT 器件的关断损耗,也限制了器件工作频率的提高。

深入研究图 1b 的结构发现,以  $U_{D1D2}>0$  为例,如果让  $G_1$ 和  $G_2$ 加上互为反相的电压(即在组合 2 和组合 3 之间变换),设在器件导通后,两个栅极的控制电压由组合 2 变换为组合 3,则器件在关断时的拖尾电流大为减小,这是什么原因呢?原来,由组合 2 变换为组合 3 后,MOS<sub>2</sub>管由导通变为关断,而  $MOS_1$ 管由关断变为导通,  $MOS_1$ 管将图 1b 上部的  $P^+$ 型注入区和  $N^-$ 型漂移区短接,将漂移区中的少子(空穴)迅速复合掉,正是由于弱化了少子的存储效应,使得关断时 IGBT 器件的拖尾电流大为减小。由于降低了器件的关断损耗,将使器件在工作时的散热问题得到较大改善,无形中也就提高了器件的工作频率,这就是所谓的双重关断。

应该避免让器件工作在组合( 4)状态,因为在该状态下,两个栅极都正偏,也就是  $MOS_1$  和  $MOS_2$  都导通,则不论是  $U_{D1D2}>0$  还是  $U_{D1D2}<0$ ,都会减弱器件在导通时  $P^+$ 型注入区向  $N^-$ 型漂移区注入空穴的效率,引起漂移区扩展电阻的增加,最终增大器件的通态压降及损耗。

通过上述分析还发现,双向 IGBT 其实更像是一个双向可控二极管,如图 3b 所示。

## 3 实验结果

图 4 是双向 IGBT 模拟实验电路,图中  $R_L$  是由绕线式可变电阻器做的负载,与  $R_L$  并联的高频二极管 VD 的作用是续流,因为在高频时  $R_L$  具有一定的感抗效应,并联 VD 将使负载波形较干净和直观;扩展电阻  $R_{dr}$  在此忽略不计(即  $0\Omega$ );MOS<sub>1</sub> 是 N-MOSFET 管,用来关断,MOS<sub>2</sub> 是 P-MOSFET 管,用来开通。

下面简要说明实验步骤:

步骤 1: 将开关  $S_1$ 和  $S_2$ 都拨向"1"位,此时  $MOS_1$ 关断,而  $MOS_2$ 开通,调节  $R_L$ ,使电流表指示的负载电流为 1.4A。

步骤 2: 开关  $S_2$  保持在"1"位,将  $S_1$  拨向"2"位, $G_2$  分别接入频率为 20kHz 和 400kHz 的、幅度足够的正负矩形脉冲,得到图 5a 所示的波形。

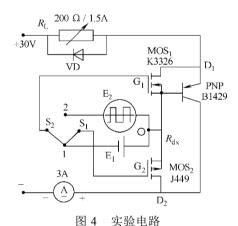


Fig.4 Experimental circuit

步骤 3: 将开关  $S_1$ 和  $S_2$ 都拨向"2"位, $G_1$ 、 $G_2$ 同时接入频率为 20kHz 或 400kHz 两个信号,得到图 5b 所示的波形。

通过对比发现,图 5a 的拖尾电流较大,且当工作频率上升到约 100kHz 时电路已无法关断,为便于比较,图 5a 画的是 20kHz 和 400kHz 两个频率点的波形;而图 5b 在同样的频率点下却能可靠的关断,且拖尾电流大大减小。这就表明采用双重关断法不但能减小拖尾电流,还能提高电路的工作频率,所得实验结果基本与理论分析吻合。需指出,图 4 只是基本验证了新型双向 IGBT 的可行性,鉴于多方面的限制,要真正模拟出该器件的特性是较困难的。因为我们知道,在真正的 IGBT 器件中,流过 MOSFET 的电流是 IGBT 总电流的主要部分,而在图 4 中,流过 PNP 的电流是负载电流的主要部

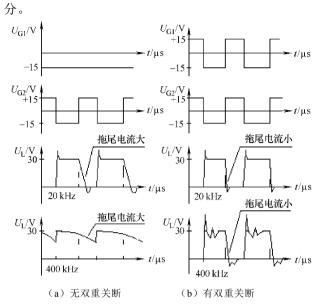


图 5 两种关断方式比较  $U_{G_1}$ 一栅极  $G_1$  的控制电压  $U_{G_2}$ 一栅极  $G_2$  的控制电压  $U_{I_1}$ 一 $R_{I_2}$  负载电压

Fig.5 Two turn-off comparison

在本实验中,工作频率从 400kHz 逐渐往上调后,输出波形逐渐有所劣化,原因是 MOSFET 管的输入端相当于一个容性负载,工作频率越高则积分效应越严重,因输入波形发生畸变而引起输出波形劣化,通过示波器观察输入输出波形就充分证实了这一点。

#### 4 封装问题探讨

众所周知,借鉴于现代集成电路的制造工艺,一个实用的大功率 IGBT 是由许多小 IGBT 元胞单元并联而成的,虽然笔者在上面已从理论上对新型双向 IGBT 进行了较充分的论述,并得出了一些有益的结论,但鉴于该器件的结构特点,如果不在结构上对该器件加以改进,不能找到一种较合适的封装形式,使器件在工艺上更易于制造,在应用中更易于发挥其性能优点,则这种讨论就没有什么实际意义。在大中容量的 IGBT 应用系统中,散热问题已成为目前影响 IGBT 深度应用的主要限制因素之一,如何改进该新型器件的结构,将器件的所有引脚都做在同一个平面上,做到既能保持该器件优点的同时,又能解决器件在应用中的散热问题,也是本文需要重点探讨的内容。

如图 1b 所示,如果先将上下两个对称的 IGBT 看作是两个相同的元胞单元,再以中间的

N+层缓冲区为对称线,将下部的元胞单元向上对折后再向左向右水平拉开一定的距离,则就形成了如图 6 上部分所示的改进型双向 IGBT。该结构也可视为以 N-为衬底,在衬底上面均匀地制作出许多小IGBT 元胞单元,任两个相邻的元胞单元之间有一层 N+缓冲区(在要求有高耐压的器件中,可以将该缓冲层取消)。该图实际上也是一种横向型 IGBT (LIGBT) [ $^{12}$ ],它的特点是,任一个元胞单元都不是一个独立的 IGBT 单元,只有与一个或一个以上相邻的异性元胞单元才构成一个独立的 IGBT 单元。其控制策略是:如当  $U_{D1D2}>0$ ,且  $G_1$  都零偏、 $G_2$  都正偏时,漏极电流  $I_D$  流经路径如图 6 上部分的虚线所示,而当  $G_2$  都反偏时负载电流关断。其他情况与上述分析类似,这里不再赘述。

图 6 下部分是改进型双向 IGBT 的立体结构图,从图中可看出,一个双向 IGBT 功率器件是由许多元胞单元均匀、对称地制作在一块 N-型衬底上,且器件所有的元胞单元的引脚都做在同一个平面上,衬底则安装在一块散热片上。这种封装方式具有结构简单、用常规的 IGBT 制作工艺就可实现对新型器件的制造、散热效果较好等特点,是一种较合适的封装形式。

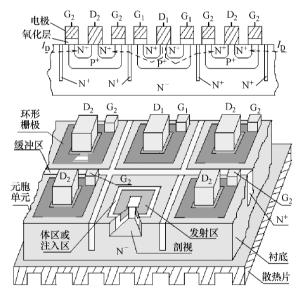
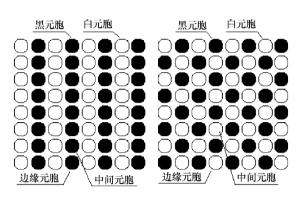


图 6 双向 IGBT 平面图和结构图 Fig.6 The plane chart and structure of the bidirectional IGBT

图 7 是双向 IGBT 中元胞单元的排列情况,其中黑圆圈代表主电极是  $D_1$  的元胞单元,而白圆圈代表主电极是  $D_2$  的元胞单元。



(a) 元胞列交叉

(b) 元胞元交叉

图 7 元胞排列比较

Fig.7 Comparison of the unit arrange

图 7a 是两种元胞列交叉的情况,可以看出,除了边缘的元胞外,中间的任一个元胞都与两个同性的元胞和两个异性的元胞相邻,这种排列结构有利于元胞中各引脚的连接,如将所有黑元胞的 D<sub>1</sub> 电极并联在一起(其他引脚接法类似),但这种接法的缺点是芯片浪费较大,效率较低,因而电流处理能力也较低;而图 7b 是另一种排列情况,即元胞元交叉排列情况,其特点是,除了边缘的元胞外,中间的任一个元胞都与四个异性的元胞相邻,这种排列结构虽然不利于元胞中各引脚的连接,即引脚连接较复杂,但效率较高,能获得较大的电流处理能力。

上述讲的都是元胞以平面的方式排列的情况,其缺点是边缘的元胞与中间的元胞可能存在不均流的情况,因为两者之间与之相邻的异性元胞数目不相同,因此在工艺上需要进行一些改进。进一步研究发现,如果将散热片做成中空的圆柱体状(即水管状),而将元胞排列在圆柱体曲面的外表面上,形成一个排列环,则在基本不影响散热效果的基础上,元胞更均流,器件的电流处理能力进一步提高。不难证明,元胞以球面体的方式排列,均流最好,电流处理能力最高,但工艺最难,散热效果也最差,因而根本不实用。

#### 5 结论

本文以研究一种对电流具有双向控制能力的半导体功率开关器件为目标,以平面栅型 IGBT 为研究对象,提出了一种五层四端结构的新型双向 IGBT 功率器件的模型及其控制策略。通过原理分析和实验结果验证,基本证明了该器件的可行性,并对该器件的封装形式进行了一定的理论分析与探讨。

45.

本文在新器件的控制方面重点解决了器件的双向控制问题和双重关断问题,在结构上较为合理地解决了器件的封装与散热之间的矛盾问题,取得了一定的理论研究结果。该新型器件虽因结构特异而具备某些新颖特性,但也由于多引入了一个不在同一公共端的控制极,将使控制电路较常规 IGBT 控制电路略为复杂一些。鉴于多方面限制,该器件的机理和特性还有待做更深入的研究。

#### 参考文献

- [1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业 出版社, 2002.
- [2] Bose B K. 现代电力电子学与交流传动 [M]. 王聪, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 张洁, Sum Tom, 王安华. 集成双向半导体功率模块 矩阵变频器及其自适应换流 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 66-76.
  - Zhang Jie, Sum Tom, Wang Anhua. Matrix converter based on integrated bidirectional power modules and adaptive commutation for medium-power applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 66-76.
- [4] 余岳辉,周郁明,等.全控型功率开关器件技术新进展[J]. 电气时代,2005,274(3):48-51.
  Yu Yuehui, Zhou Yuming. Development on technique of power electronics[J]. Electric Age, 2005, 274(3):
- [5] 孙凯,周大宁,梅杨.矩阵式变换器技术及其应用[M].

- 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [6] 陈大立,朱历. 挑战与机遇并存的电力电子 [J]. 电气时代, 2005, 274(3): 42-45.
  Chen Dali, Zhu Li. The crisis and opportunity with power electronics[J]. Electric Age, 2005, 274(3): 42-
- [7] 李序葆,赵永健. 电力电子器件及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社,2000.
- [8] 周志敏,周纪海,纪爱华.IGBT 和 IPM 及其应用电路[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.
- [9] 刘树林,张华曹,柴常春.半导体器件物理[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [10] 袁寿财. IGBT 场效应半导体功率器件导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [11] 董颖辉, 柳超, 翟琦. 甚低频固态发射机功率器件分析[J]. 现代电子技术, 2008, 31(11): 100-102. Dong Yinghui, Liu Chao, Zhai Qi. Performance analysis of power devices used for VLF solid-state amplifier[J]. Modern Electronics Technique, 2008, 31(11): 100-102.
- [12] 维捷斯拉夫 本达,约翰 戈沃,等.功率半导体器件——理论及应用[M]. 吴郁,等译.北京:化学工业出版社,2005.

作者简介:陈明保 男,1976年生,高级讲师,研究方向为电气课程 改革、新型电力电子器件、电气传动。

## 《电力电子与电机系统集成分析基础》简介

由清华大学赵争鸣等教授编著,机械工业出版社出版的《电力电子与电机系统集成分析基础》(书号:ISBN978-7-111-27367)一书,从电力电子与电机系统集成的角度出发,将电机、电力电子变换及其控制有机地结合在一起进行分析和应用。主要介绍电力电子与电机集成系统的基本特征和主要内容;分析变频电源对交流电机的影响,介绍了变频调速电机设计概念及谐波分析和可控优化运行;介绍电力电子变频器中的半导体器件及其主回路特点,重点介绍多电平主回路结构;介绍与多电平结构相对应的 PWM 控制方法及其变异;着重分析系统中的部件匹配和集成特性效应;讨论系统高精度闭环控制方法;分析集成系统中的数据通信;从能量变换的角度,初步讨论了集成系统中的电磁关系、电磁能量变换建模以及电磁能量传输等。

本书可供从事电力传动系统设计、研究、运行和管理等工作的科技人员、技术管理人员以及高等

院校相关专业的教师与学生参考使用。可作为电力电子与电力传动学科的研究生教材。