

大功率 IGBT 器件内部载流子控制方法综述

邹密¹, 马奎²

(1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州省微纳电子与软件技术重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 绝缘栅双极晶体管(IGBT)的内部载流子控制方法对器件的导通状态电压降、关断损耗、SOA、热可靠性和瞬态稳定性等器件性能至关重要。已经报道的许多载流子控制方法都侧重于发射极(或阴极)、集电极(或阳极)和漂移区的设计。重点介绍了当前和未来几代 IGBT 的载流子控制方法。回顾发射极、集电极和漂移区的设计如何影响正向压降和关断能量损耗之间的权衡。最后,总结展望未来大功率 IGBT 器件内部载流子控制方法的发展趋势。

关键词: 绝缘栅双极晶体管; 载流子控制方法; 器件性能; 关断损耗; 导通压降

中图分类号: TN389

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200085

中文引用格式: 邹密, 马奎. 大功率 IGBT 器件内部载流子控制方法综述[J]. 电子技术应用, 2020, 46(6): 21–27.

英文引用格式: Zou Mi, Ma Kui. Survey of internal carrier control methods for high power IGBTs[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(6): 21–27.

Survey of internal carrier control methods for high power IGBTs

Zou Mi¹, Ma Kui²

(1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Micro-Nano-Electronics of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

Abstract: Internal carrier control methods for Insulated Gate Bipolar Transistors(IGBTs) are critical for the device performances such as on-state voltage drop, turn-off losses, SOA, thermal reliability and transient ruggedness, etc. Numerous carrier control methods focusing on the design of the emitter(or cathode), collector(or anode), and drift regions have been reported. This paper focuses on the carrier control methods of current and future generations of IGBTs. In particular, the designs of the emitter, collector, and drift regions and how they affects the trade-off between the forward voltage drop and the turn-off energy loss are reviewed. Finally, the development trend of carrier control in high-power IGBT devices is summarized look forward to.

Key words: IGBT; carrier control methods; device performance; turn-off losses; on-state voltage drop

0 引言

在过去的三十年,绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT)已发展成为现代功率半导体器件的主力器件之一。和功率 MOSFET 相比, IGBT 有工作电压高、工作电流大、驱动功率小等优点,被广泛应用于电机控制、不间断电源(UPS)、空调、机器人、焊机和汽车电子等中频应用领域。

1 IGBT 的介绍

垂直双扩散 MOS(Vertical DMOS, VDMOS)和 IGBT 的基本器件结构如图 1 所示。两类器件结构相似,具有相同的 MOS 沟道和 n-漂移区域。唯一不同的是,VDMOS 的漏端是 n+衬底,IGBT 是构建在 p+衬底上而导致其存在寄生 PNP 晶体管。这一简单的改变使得 IGBT 综合了 MOS 棚结构驱动功率小和双极型晶体管电流控制能力强的优点,而且还有安全工作区宽的优点。

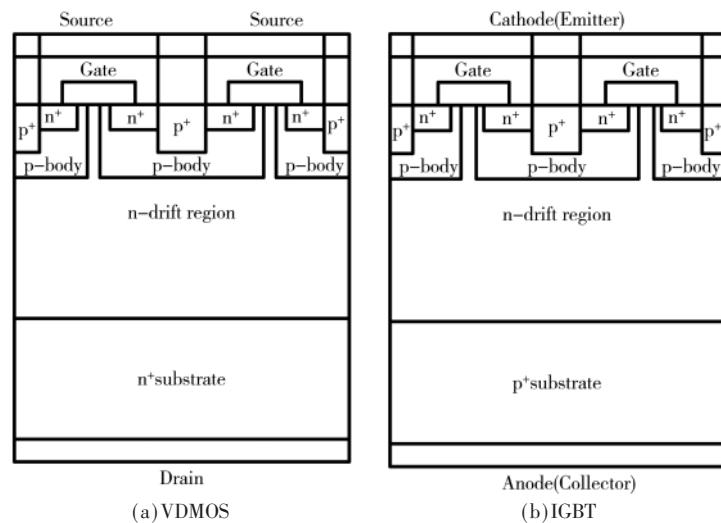


图 1 VDMOS 和 IGBT 的剖面示意图

如图 1(b)所示,工作在正向状态时,IGBT 中 p+衬底

综述与评论

Review and Comment

和 n-漂移区构成的 PN 结正偏，有大量的空穴从 p+衬底注入到 n-漂移区中，成为少数载流子，起到电导调制作用，能够显著降低 IGBT 的导通压降。然后，在 IGBT 关断时漂移区中的这些少数载流子需要较长的时间才能被抽走和复合掉，导致 IGBT 的关断时间较长。因此，IGBT 虽能承受大电流(>100 A)，高电压(>600 V)，但却只适用于中频(<50 kHz)开关应用领域。

早在 1968 年 YAMAGAMI K 就报道了 IGBT 的基本概念^[1]。然而，绝缘栅极整流器(IGR)直到 1982 年才被制造出来^[2]。到 1984 年，IGBT 最初较差的闩锁耐受能力得到了克服，使得其成为实用的电源开关^[3]，随后于 1985 年商业化。从那时起，IGBT 已成为主流功率半导体器件，并不断发展。目前，有很多产业化的 IGBT 结构。包括穿通型、非穿通型和具有平面栅^[4]和沟槽栅结构^[5]的场截止 IGBT，如图 2 所示。沟槽栅 IGBT 可以进一步降低导通电压降和增大 IGBT 的电流密度，是目前最流行的发射极结构。

发生在 IGBT 漂移区中的电导率调制效应对器件的导通压降(V_{on})、关断损耗(E_{off})、短路维持能力、热稳定性及瞬态耐用性有着重要影响。因此，IGBT 器件的性能在很大程度上由其内部载流子的输运和控制来决定。

2 已报道的 IGBT 的载流子控制方法

IGBT 的结构可以分为顶侧 MOS 沟道/发射极(或阴极)区域、中间的 n 漂移区域和背侧集电极(或阳极)区域。在本节中，将综述关于这些区域的设计。

2.1 发射极(或阴极)结构

早期的 IGBT 在发射极结构中具有平面 MOS 栅结构。而后期发现沟槽栅极具有较低的沟道电阻，是目前最受欢迎的选择。为了改善导通状态时对注入到漂移区中的载流子的抽取效果，除了改变栅极结构以外，也还有许多不同的发射区结构设计。在载流子存储沟槽双极

晶体管(CSTBT)中，如图 3(b)所示，P-body 区下面的 n 型层对空穴呈现势垒效果，在导通状态下限制了空穴从 N-drift 向 P-body 的移动，空穴将被“存储”在 P-body 区下面的 N 型层中。结果会导致 CSTBT 的内部载流子分布类似于与 p-i-n 二极管串联 MOSFET 的载流子分布，可有效降低通态电降，而不会牺牲正向阻断特性和开关性能^[6-7]。

为了解决 CSTBT 的缺点，XU X 等人提出了具有空穴阻挡的 HB-CSTBT(发射极结构，如图 3(a)所示。在保证器件其他性能的前提下，提高了 dV/dt 可控性，降低了 EMI 噪声，同时还克服了 CS-layer 带来的阻塞能力降低问题^[8]。图 3(b)中切割线 AA' 位于栅极氧化物下方。

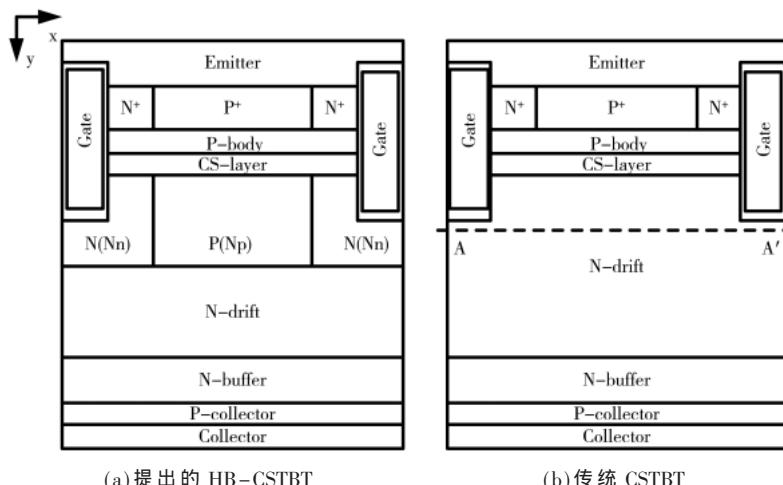


图 3 HB-CSTBT 与传统 CSTBT 结构示意剖面图

在图 4(a)所示的带独立浮空 p-layer 的 Trench-Gate IGBT(SFP-IGBT)中浮空的 p-layer 区域能够改善沟槽栅极附近的空穴载流子密度，以实现较低的导通电压降。此外，每单位面积内的沟槽栅极减少，使其具有更好的短路能力和更低的关断损耗^[9]。这种结构可以显著改善

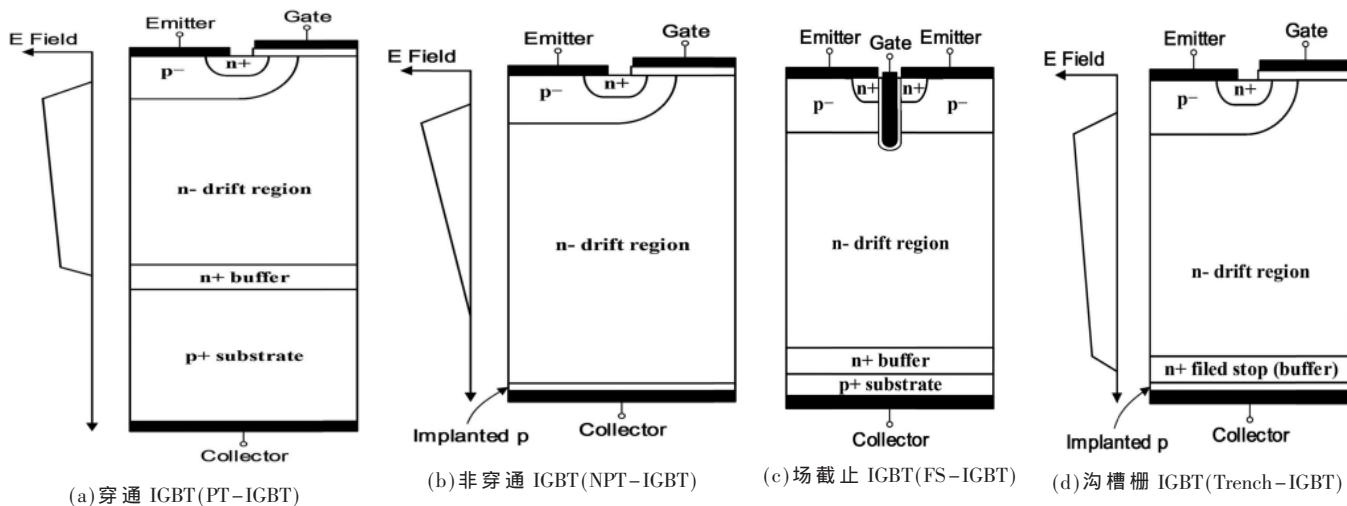


图 2 主要的 IGBT 器件结构

综述与评论 Review and Comment

V_{on} 和 E_{off} 之间的权衡关系 , 具有接近理想情况的载流子分布^[10]。PENG X 等人在 2019 年的 IEEE ISPSD 会议上报道了一种新型 HE-IGBT 结构 , 如图 4(b) 所示。相较于 SFP-IGBT , 其 AHP(Adjustable Hole Path) 区域的电位浮动 , 在关断转换期间能快速抽取空穴 , 同时 , AHP 区域有效地减小了沟槽栅极下的电场并在切换期间屏蔽了 IGBT 栅极 , 能实现更高的击穿电压和更低的米勒电容 , 以及优异的 dI_{CE}/dt 和 dV_{CE}/dt 的可控性 , 从而实现更低损耗和更高性能^[11-12]。

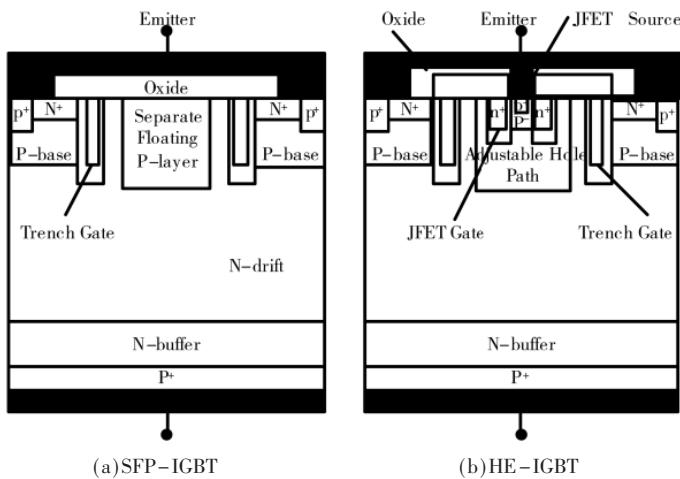


图 4 SFP-IGBT 和 HE-IGBT 的横截面示意图

图 5 所示的器件结构为 p-ring Trench FS+IGBT。发射极具有沟槽栅结构 , 发射极一侧的结构中引入了 n 型注入层(n-injector)和沟槽下的 p 型埋层(p-ring)。p 型埋层用于产生 RESURF 效应 , 同时提升器件的鲁棒性。增加 n 型注入层的掺杂浓度可以减少通态损耗^[13]。

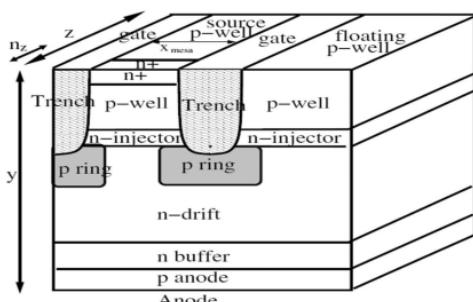


图 5 p 型环沟 FS+IGBT 的横截面图

在图 6(a) 中 , 在沟槽栅极下方添加了一层较薄的高度掺杂的 n 型电场调制(Electric Field Modulation, EFM)层。在击穿条件下 , EFM 层可以使发射极侧的 N-drift 区域中的空穴和电子密度之间的差异最小化 , 以改善雪崩的稳定性。在导通状态下 , 高掺杂的 EFM 层也可以存储载流子 , 使得沟槽栅极底部附近的 N-drift 区域中的空穴密度高于集电极侧 Field Stop 结构中的空穴密度 , 从而实现较低的导通电压降^[14]。

对于沟槽栅极 IGBT 来说 , 减小两个相邻沟槽栅极

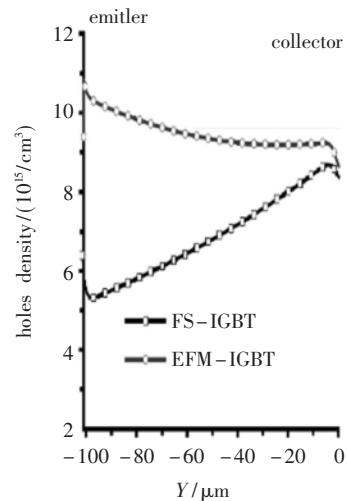
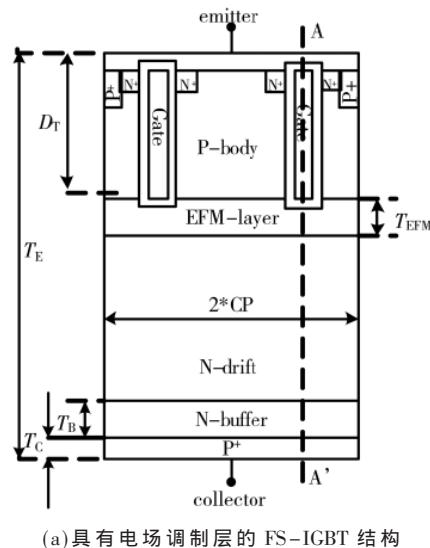


图 6 文献[14]设计结构

之间的硅区域(Mesa)的宽度能显著提高载流子从发射极侧注入到漂移区的注入效率。SUMITOMO M 等人报道了一种发射极侧部分变窄的 Mesa IGBT(PNM-IGBT)结构 , 其导通电压降和关断损耗之间的折衷关系能够得到有效改善^[15]。如图 7 所示为具有超窄 Mesa 的 IGBT(U-Fin-P IGBT)剖面结构。这种结构在改善导通电压降和关断损耗之间的折衷关系的基础上 , 可以进一步提高短路能力和关断过程中 dV/dt 的可控性^[16]。

2.2 集电极(或阳极)结构

除了发射极(或阴极)侧的结构外 , 改变集电极(或阳极)侧的结构也可以改变对载流子的控制 , 从而改善 IGBT 的性能。

在图 8 所描述的阳极短路的 n-LIGBT 结构中 , 衬底为 p-epi/p+SUBSTRATE , 阳极一侧有一个 n+ 区域将 NBUFFER 短路到阳极上 , 在衬底上制造的阳极短路的 n-LIGBT 具有 n+ 区 , 以将 n- 缓冲区短路到阳极。使得寄生的垂直 p+/n/n-/p-/p+ 双极晶体管具有较低的集电极电阻和较

综述与评论

Review and Comment

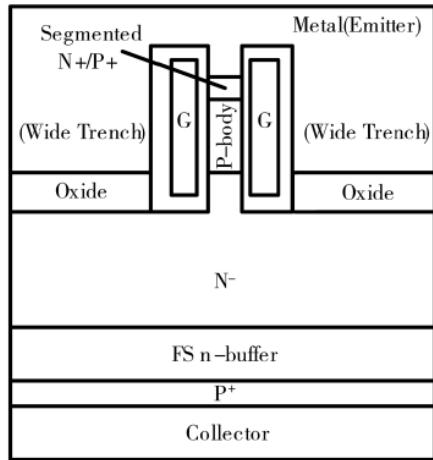


图 7 超窄 Mesa IGBT 结构

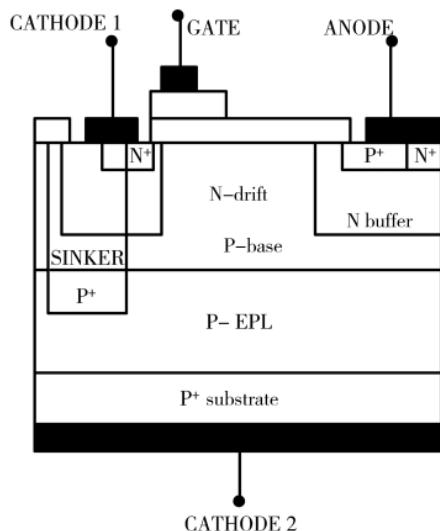


图 8 阳极短路的 n-LIGHT 的横截面图

高的电流增益,从而降低 IGBT 的导通压降。短路的阳极在器件导通时确保稳定的载流子注入,当器件关闭时它也为载流子抽取提供了有效的途径^[17]。

如图 9(a)所示,集电极金属接触面积缩小的 IGBT 具有受限的集电极电流路径,电流密度的增加会导致空穴注入效率的提高,从而实现较低的导通电压^[18]。如图 9(b)所示的注入效率受控的 IGBT(IEC-IGBT)的集电极结构比集电极金属接触面积缩小的 IGBT 具有更低的 V_{on} 。其集电极注入效率可通过 p 型集电区中的电流密度自行调节。IEC-IGBT 可同时提供低导通电压和卓越的安全工作区^[19]。对于这两类 IGBT,可以通过改变集电极金属接触宽度(W_c)来改善导通损耗。

反向导通的 IGBT(RC-IGBT)^[20]在同一芯片上集成了 IGBT 和续流二极管(FWD),如图 10 所示。这类器件非常适用于电感

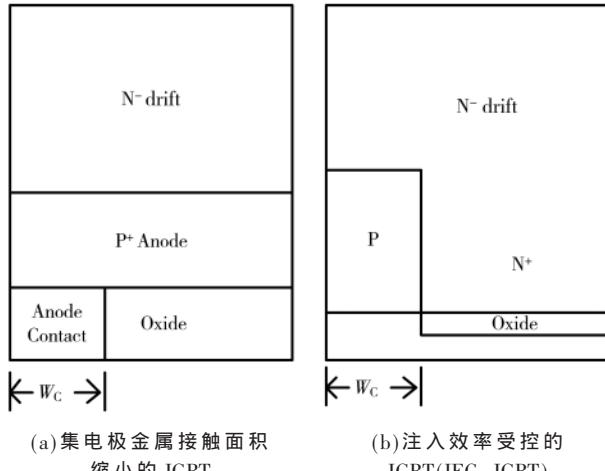


图 9 文献[18]及文献[19]中集电极结构

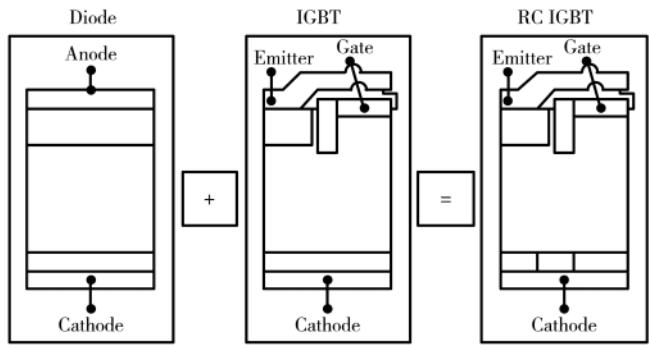
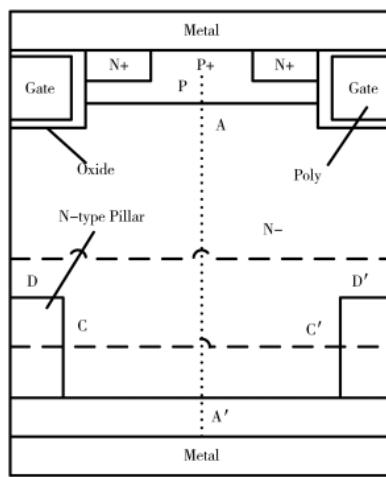


图 10 在同一个芯片上集成 IGBT 和 FWD 的反向导通 IGBT 的概念

线圈加热等软开关应用场合。其中的 FWD 由集电极侧的 n 区域,n-漂移区域和 IGBT 的 p-body 区构成。当 IGBT 的集电极和发射极之间加反向电压时,FWD 导通。

图 11 所示为一种在背面制作有 n 型柱的 IGBT(NP-IGBT)。在正向阻断状态下,n 型柱能夹断 n-漂移区域中的电场,起到电场终止层(Field Stop layer)的作用。在导



(a)NP-IGBT 的剖面图

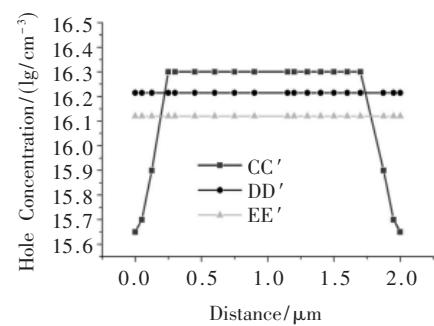


图 11 NP-IGBT 结构

综述与评论

Review and Comment

通状态下,空穴电流流过相邻n型柱之间的n-漂移区。在开关状态时,n-漂移区域中的电子通过n型柱被抽取走。在正向阻断模式下,夹在n型柱之间的轻掺杂n-漂移区将会被夹断。这会导致更高的雪崩能量和更宽的反向偏置安全操作区域^[21]。

在许多电力电子电路中,负载短路时有发生^[22]。在这种异常情况下,可能是因为IGBT内部产生的电流密度细丝导致器件失效。BHOJANI R等人提出了一种注入增强浮动发射极(Injection Enhanced Floating Emitter)IGBT(IEFE-IGBT),如图12所示,通过在集电极一侧的n型场阻止层引入一些不连续的浮空的p型区域,实现对注入空穴电流的放大,其中在p型发射区(通常称为P型集电区)附近实现浮动p-发射级以放大空穴电流的注入。这种结构在不影响器件的静态和动态性能的前提下能够显著提高短路能力^[23]。

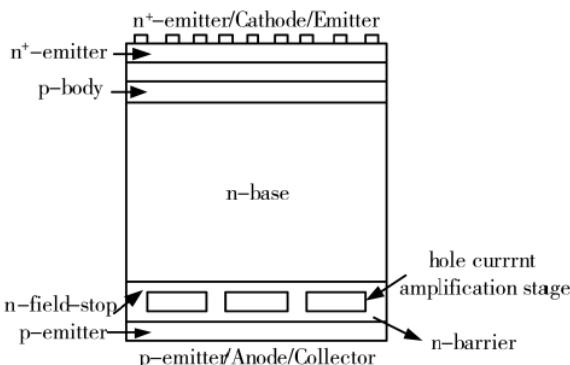


图12 注入增强型浮动发射极IGBT(IEFE-IGBT)的剖面图

2.3 漂移区设计

IGBT漂移区中的掺杂浓度通常由击穿电压来确定。击穿电压越高,漂移区的掺杂浓度就越低,这不利于降低器件的损耗。根据PN结二极管设计中的电荷平衡准则,发展出了由交替n/p/n/p柱构成的超结结构。在功

率器件的漂移区中使用超结结构,能够有效缓解击穿电压和导通损耗之间的矛盾关系。图13(a)所示为传统的SJ-NPT-IGBT的二维剖面结构^[24]。通过保持电荷平衡,与常规的漂移区相比,在相同的阻断电压要求下,n和p柱中的掺杂浓度可以同时增加一个数量级。在导通状态下,集电极附近的等离子体将电子转移到n柱中、将空穴转移到p柱中,漂移区的很大一部分是未调制的。因此,关断损耗可以非常低^[25]。图13(b)和图13(c)所示为新型的载流子存储增强型超结IGBT^[24],其中的p柱通过一个二极管或两个串联二极管连接到发射极,这有助于在导通状态下提高p柱中的空穴准费米势,从而增强n柱和p柱中的载流子存储效应、降低导通电压($V_{CE(sat)}$),还能实现快速关断、较大的设计自由度和出色的 E_{off} - $V_{CE(sat)}$ 折衷关系。为了实现双向阻塞能力和改进的 V_{on} 和 E_{off} 之间的折衷关系,Zhou Kun等人提出了一种具有短集电极沟槽的超结反向阻断IGBT^[26]。

3 IGBT的未来前景

到目前为止,最先进的Si IGBT最常用的额定电压为1200 V。根据图14所示的不同功率器件导通电阻与击

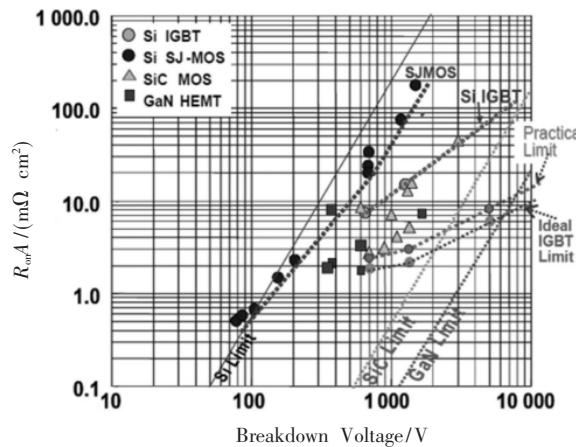


图14 IGBT的理论硅极限特性

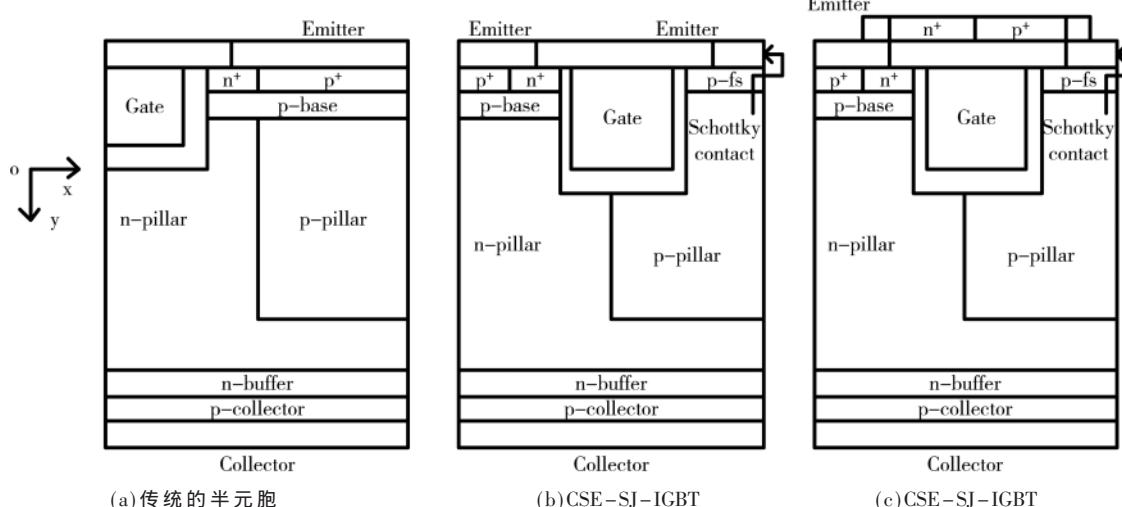


图13 SJ-IGBT与CSE-SJ-IGBT示意图

综述与评论 Review and Comment

穿电压之间的理论限制^[27~28],Si IGBT 在接近其理论极限之前仍有很大的改进空间。事实上,在6.5 kV 范围内,充分优化的 Si IGBT 可以超越 SiC 和 GaN 器件的性能。从图 14 中还可看出,基于宽禁带半导体材料 SiC 和 GaN 的功率 MOSFET 能够实现比硅基器件更好的 R_{on} 和 Breakdown Voltage 之间的折中。若基于 SiC 和 GaN 等宽禁带半导体材料实现 IGBT,将能使器件性能得到更大的提升。

但是,SiC 基 IGBT 的研究还在起步阶段,工艺难度较大、缺乏有效控制 SiC 中少子寿命的方法。GaN 以及近年来受到广泛关注的 β -Ga₂O₃ 都还存在高质量单晶材料制备、P型掺杂以及成熟的器件工艺等关键点需要攻克,要基于这些材料实现 IGBT 器件还有很长的路要走。

4 结论

本文分别从针对发射极(或阴极)、集电极(或阳极)和 n-漂移区结构综述了大功率 IGBT 器件内部载流子的输运和控制方法。梳理和讨论了包括 CSTBT、带浮动 p 体的 Trench IGBT、p 环 Trench FS+IGBT、带 EFM 层的 Trench FS-IGBT、窄台面结构、短路阳极、减少集电极接触、IEC-IGBT、RC-IGBT、NP-IGBT、IEFE-IGBT 和超结漂移区等各种已报道的器件结构。未来大功率 IGBT 器件内部载流子控制方法会朝着发射极(或阴极)、集电极(或阳极)和 n-漂移区结构的两两结合的方向发展,结合两种结构优点,最大化地实现大功率 IGBT 器件的 V_{on} 和 E_{off} 的折中关系,大大提升 Si IGBT 器件的性价比。

三十多年来,通过不断改善器件设计和封装技术,Si IGBT 器件在电力电子领域的地位持续提升^[20]。虽然基于 SiC 和 GaN 等新材料的功率器件近年来受到广泛关注,但 Si IGBT 在中、大功率应用中仍然是最具成本优势的。在未来几十年内,预计硅功率器件将与基于宽禁带半导体材料的功率器件共存,且硅功率器件将继续占据主要的市场份额。

参考文献

- [1] YAMAGAMI K.Transistors : Japanese Patent S4 721 739[P]. 1968-06-19.
- [2] BALIGA B J,ADLER M S,GRAY P V,et al.The insulated gate rectifier(IGR): a new power switching device[C].1982 International Electron Devices Meeting , 1982 : 264~267.
- [3] NAKAGAWA A,OHASHI H,KURATA M,et al.Non-latch-up 1200V 75A bipolar-mode MOSFET with large ASO[C]. 1984 International Electron Devices Meeting , 1984 : 860~861.
- [4] DODGE J.IGBT technical overview[DB/OL].[2020-02-12]. www.microsemi.com/micnotes/APT0408.pdf.
- [5] CHANG H R,BALIGA B J.500-V n-channel insulated-gate bipolar transistor with a trench gate structure[J].IEEE Transactions on Electron Devices , 1989 , 36(9) : 1824~1829.
- [6] TAKAHASHI H,HARUGUCHI H,HAGINO H,et al.Carrier stored trench-gate bipolar transistor(CSTBT)-a novel power device for high voltage application[C].8th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs , 1996 : 349~352.
- [7] KANG X,LU L,WANG X , et al.Characterization and modeling of the LPT CSTBT—the 5th/sup th/generation IGBT[C].38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference , 2003 : 982~987.
- [8] XU X,CHEN W,LIU C,et al.A novel CSTBT with hole barrier for high dV/dt controllability and low EMI noise[C]. 2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs(ISPSD) , 2019 : 331~334.
- [9] MORI M,OYA K,KOH Y,et al.A trench-gate high-conductivity IGBT(HiGT) with short-circuit capability[J]. IEEE Transactions on Electron Devices , 2007 , 54(8) : 2011~2016.
- [10] KITAGAWA M,OMURA I,HASEGAWA S,et al.A 4500 V injection enhanced insulated gate bipolar transistor(IEGT) operating in a mode similar to a thyristor[C].Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting , 1993 : 679~682.
- [11] PENG X,LI Z,ZHAO Y , et al.A novel 3300V trench IGBT with hole extraction structure for low power loss[C]. 2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs(ISPSD) , 2019 : 51~54.
- [12] HUANG J,HUANG H,LYU X,et al.Simulation study of a low switching loss FD-IGBT with high di/dt and dV/dt controllability[J].IEEE Transactions on Electron Devices , 2018 , 65(12) : 5545~5548.
- [13] ANTONIOU M,LOPHITIS N,UDREA F,et al.Experimental demonstration of the p-ring FS+ trench IGBT concept: A new design for minimizing the conduction losses[C]. 2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's(ISPSD) , 2015 : 21~24.
- [14] YANG Z,BIAN F,ZHU J,et al.1200 V FS-IGBT with electric field modulation layer to improve trade-off between avalanche ruggedness and on-state voltage drop[J].Electronics Letters , 2017 , 53(2) : 100~102.
- [15] SUMITOMO M,ASAI J,SAKANE H,et al.Low loss IGBT with Partially Narrow Mesa Structure(PNM-IGBT)[C].IEEE 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs(ISPSD) , 2012.
- [16] FENG H,YANG W,ONozawa Y , et al.A 1200 V-class Fin P-body IGBT with ultra-narrow-mesas for low conduction loss[C].2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs(ISPSD) , 2016 : 203~206.
- [17] CHOW T P,BALIGA B J.The effect of substrate doping on the performance of anode-shorted n-channel lateral insulated-gate bipolar transistors[J].IEEE Electron Device Letters , 1988 , 9(9) : 450~452.

综述与评论

Review and Comment

- [18] GREEN D W , VERSHININ K V , SWEET M , et al. Anode engineering for the insulated gate bipolar transistor—a comparative review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics , 2007 , 22(5) : 1857–1866.
- [19] HUANG S , AMARATUNGA G A J , UDREA F .The injection efficiency controlled IGBT[J]. IEEE Electron Device Letters , 2002 , 23(2) : 88–90.
- [20] IWAMURO N .Recent progress of power semiconductor devices and their futures[C]. 2017 IEEE CPMT Symposium Japan(ICSJ) , 2017 : 191–194.
- [21] JIANG M , SHEN Z J .Simulation study of an injection enhanced insulated-gate bipolar transistor with p-base schottky contact[J]. IEEE Transactions on Electron Devices , 2016 , 63(5) : 1991–1995.
- [22] BALIGA B J .Fundamentals of power semiconductor devices[M]. Springer Science+Business Media , 2008.
- [23] BHOJANI R , LUTZ J , BABURSKA R , et al. A novel Injection Enhanced Floating Emitter(IEFE) IGBT structure improving the ruggedness against short-circuit and thermal destruction[C]. 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD) , 2017.
- [24] HUANG M , GAO B , YANG Z , et al. A carrier-storage-enhanced superjunction IGBT with ultralow loss and on-state voltage[J]. IEEE Electron Device Letters , 2018 , 39(2) : 264–267.
- [25] BAUER F .The MOS controlled super junction transistor (SJBT) : a new , highly efficient , high power semiconductor device for medium to high voltage applications[C]. Proceedings of the 14th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs , 2002.
- [26] ZHOU K , LUO X , HUANG L , et al. An ultralow loss superjunction reverse blocking insulated-gate bipolar transistor with shorted-collector trench[J]. IEEE Electron Device Letters , 2016 , 37(11) : 1462–1465.
- [27] NAKAGAWA A .Theoretical investigation of silicon limit characteristics of IGBT[C]. 2006 IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's , 2006.
- [28] NAKAGAWA A , KAWAGUCHI Y , NAKAMURA K .Silicon limit electrical characteristics of power devices and ICs[C]. Solid State Devices and Materials , 2008.

(收稿日期:2020-02-12)

作者简介:

邹密(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向:高压大功率器件及其驱动控制技术。

马奎(1985-),通信作者,男,博士,副教授,主要研究方向:半导体功率器件及功率集成电路、三维集成技术。

电子技术应用“射频微波主题宣传季”帷幕即将拉开

为了全面系统地介绍微波射频领域的最新研究成果,展示射频微波领域的最新技术与产品,促进射频微波领域产学研用各界的交流,《电子技术应用》杂志、《信息技术与网络安全》杂志、ChinaAET 网拟于 2020 年 7 月~9 月共同举办“射频微波主题宣传季”活动。

作为国内射频微波领域重要的媒体平台,《电子技术应用》杂志及网站聚集了一大批优秀的射频与微波技术工程师及研发人员,影响力贯穿整个射频微波产业链。本次活动,旨在搭建射频微波电路、模块与通信系统的企业及科研院所的研究人员探讨新技术的交流平台。

活动期间,围绕“5G 通信”、“低小慢飞行器设计与防御”、“高精度室内定位”等射频与微波领域的热点方向,主办方将推出形式多样、内容丰富的系列活动,全面介绍射频微波领域的学术研究成果、最新技术及产业动向、新产品及应用。活动内容包括期刊“射频与微波”特约技术专栏、ChinaAET.com 网站“射频微波”专题、“RFMW 论坛”系列线上直播等,并将于 8 月在成都举办“2020 中国西部射频微波技术研讨会”。

活动主站:<http://ec.chinaaet.com/show/rf2020/>,期待射频微波领域的从业人员大力关注与参与!

活动联系人:王伟(电话 010-62311179; Email : wangw@chinaaet.com)。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所