

一种新结构 IGBT——内透明集电极 IGBT 的仿真*

王 浩[†] 胡冬青 吴 郁 周文定 亢宝位

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘要: 对新近提出的一种新结构的 IGBT——内透明集电极 IGBT 进行了器件性能的仿真. 这种 IGBT 是在传统非透明集电极 IGBT 结构基础上, 通过在集电区内距离集电结很近处设置一个高复合层的方法, 使器件在物理上实现了集电极对电子的透明, 同时又避免了低压透明集电极 IGBT 制造过程中超薄片操作的技术难题. 对器件的温度特性和关断特性进行了仿真研究, 并与现行 PT-IGBT 和 FS-IGBT 进行了比较. 仿真结果表明, 通过合理调整内透明集电极 IGBT 的参数组合, 可以使其在具有通态压降正温度系数的同时, 又具有较快的关断速度, 实现透明集电极 IGBT 的优良性能.

关键词: 内透明集电极; PT-IGBT; NPT-IGBT; 高复合层

EEACC: 2560

中图分类号: TN323+.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)02-0348-04

1 引言

当前, 电力电子器件已进入高压高频的时代, 电压高达几千伏, 频率高达几十千赫. IGBT (insulated gate bipolar transistor) 兼顾了较低通态压降和较高的开关速度, 且具有通态损耗和开关损耗都较低, 又能承受高电压, 因此成为电力电子应用领域的主流器件.

从上世纪 80 年代初 IGBT 出现以后^[1], 平面栅 IGBT 大致经历了三代技术: 上世纪 80 年代初的穿通型 IGBT (punch-through IGBT, PT-IGBT), 1988 年的非穿通型 IGBT (non-punch-through IGBT, NPT-IGBT)^[2], 2000 年的电场终止型 IGBT (field-stop IGBT, FS-IGBT)^[3]. 穿通与非穿通是指: 在击穿电压下, 耗尽层是否穿通 n^- 漂移区 (耐压层). 但三者的根本区别不在此, 而在于提高器件开关速度的手段不同. PT-IGBT 以 p^+ 单晶为起始材料, 耐压层通过外延获得. 以衬底为集电区 (背发射区), 具有厚度大、掺杂浓度高等特点. 器件导通状态时, pnp 晶体管的空穴发射效率高, n^- 区电导调制效应显著, 产生大量电子空穴对. 器件关断过程中, 由于集电区很厚, 电子不能被有效抽出, 过剩载流子仅靠复合消失, 因此开关时间长, 开关损耗大. 为提高关断速度, PT-IGBT 采用电子辐照在 n^- 漂移区产生大量复合中心, 大幅降低其中的载流子寿命, 加快 IGBT 关断时 n^- 区中电子、空穴的就地复合. 但受过辐照后的 n^- 漂移区使器件特性有两个重要缺陷: 一是高温下关断时间和关断损耗显著增加; 二是饱和电压 V_{CEsat} 有负温度系数, 即饱和电流正温度系数. 这使器件不利于高温工作和并联应用^[4].

与此不同, NPT-IGBT 和 FS-IGBT 以 n^- 硅单晶为起始材料, 集电区通过注入形成. 它的特点是集电区被

减薄到亚微米量级且掺杂浓度适当降低. 当器件关断时, 由于集电区掺杂浓度很低且很薄, 对电子几乎是透明的, n^- 区在导通态存储的电子很容易通过扩散穿过集电区并从集电极流出, 实现器件快速关断 (此即所谓的透明集电极技术). 因此, 漂移区载流子寿命可以尽量高, 器件具有饱和电压正温度系数, 且关断时间随温度增加较少. 但对于低压的 IGBT 来说, 以 600V IGBT 为例, 当 Si 片减薄到 $70 \sim 80 \mu\text{m}$ 之后, 还要经过离子注入背面 p^+ 集电区以及多次清洗、退火、金属化淀积、合金等工艺步骤, 要想保证 Si 片不碎片、不翘曲、低缺陷, 从而实现较高的成品率, 这具有极高的技术难度.

综上所述, 对常用的 600~1200V 类 IGBT, 现行两种制造工艺都不理想. PT-IGBT 制造工艺简单, 但器件存在重大的性能缺陷, NPT-IGBT 和 FS-IGBT 性能优越, 但加工难度大. 为了兼顾 PT-IGBT 的加工低难度和透明集电极 IGBT 的优良性能, 本文作者新近提出了内透明集电极 IGBT (internal transparent collector IGBT, ITC-IGBT) 的概念, 本文是对这种新器件性能的首次比较深入的仿真分析.

透明集电极 IGBT 的基本思想, 是在集电区内紧邻集电结位置设置一个高复合层, 使关断时流出的电子在此复合, 达到透明集电极的效果. 同时, 高复合层以下上百微米的 p^+ 集电极在制造过程中起支撑作用, 从而巧妙地避免了超薄片加工的工艺障碍. 这有望成为独立于国际上现有透明集电极 IGBT 和非透明集电极 IGBT 之外的新一类 IGBT.

2 内透明集电极 IGBT 结构

内透明 IGBT 结构和已有的 3 种结构 IGBT 的对比如图 1 所示. 从图中可以看出, 内透明集电极

* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 60676049)

[†] 通信作者. Email: whelly777@163.com

2007-08-03 收到, 2007-09-04 定稿

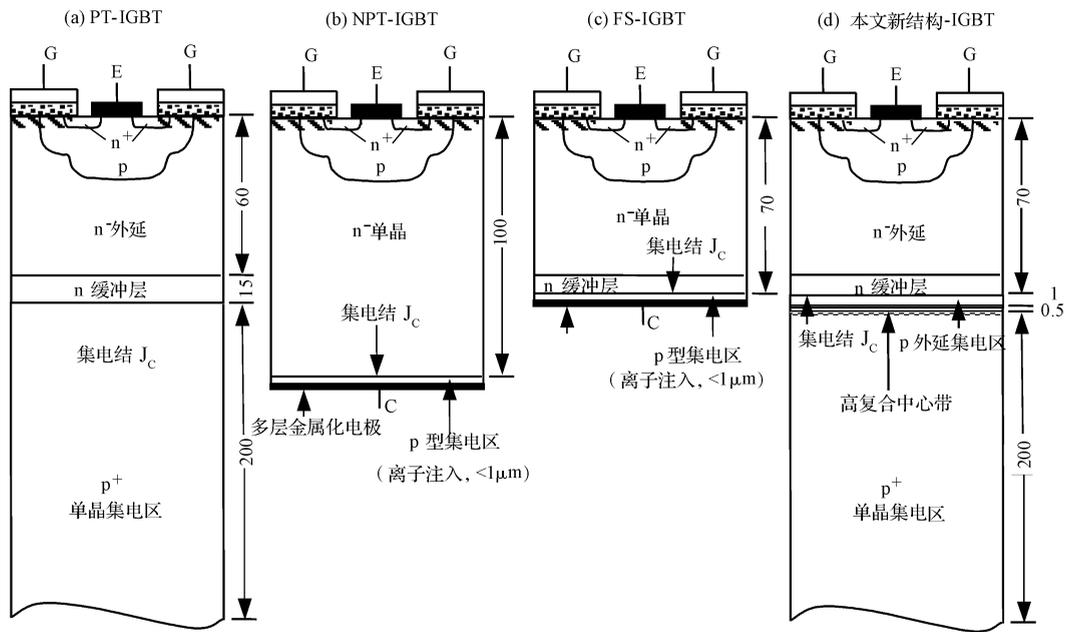


图 1 内透明集电极 IGBT 与 3 种现有 IGBT 结构对比示意图(单位:μm)

Fig. 1 Schematic structures of the ITC-IGBT former types of IGBTs and the ITC-IGBT (a) PT-IGBT; (b) NPT-IGBT; (c) FS-IGBT; (d) ITC-IGBT (Unit: μm)

IGBT 整体看来与 PT-IGBT 很相似,只是在集电区中多了一个高复合中心带.而在这个高复合层以上的结构,又和 FS-IGBT 十分相像,只是新结构采用外延工艺制造.

内透明集电极 IGBT 的 3 个设计目标概括如下:

- (1)新结构 IGBT 饱和电压正温度系数.新器件定位于实现透明集电极的物理功能,从而避免使用电子辐照等载流子寿命控制技术.
- (2)运用非透明集电极的外延制造技术实现了低压 IGBT 集电区透明的效果.避免超薄片操作的难题.
- (3)新结构 IGBT 具有较快的关断速度,达到 80ns 以内.内透明集电极 IGBT 不必像 PT-IGBT 那样必须等待载流子在 n⁻ 复合,因此具有较高的开关速度,可以应用于高频电力电子系统中.

3 新器件仿真分析

3.1 器件仿真参数

新结构 IGBT 的器件特性仿真借助于 Synopsis 公司的 ISE8.0 仿真软件,并通过与 FS-IGBT 的对比分析来说明内透明集电极 IGBT 的性能优势.两者都设计为耐压 600V,并且具有相同的正面 MOS 结构,如图 2 所示.

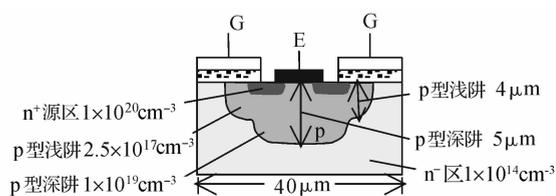


图 2 正面 MOSFET 结构参数

Fig. 2 Structure parameters of top MOSFET

3.2 仿真模型的选取

仿真工具 ISE8.0 提供了丰富的物理模型.本文根据内透明集电极 IGBT 器件的实际需要,选取了以下模型:考虑重掺杂的禁带变窄模型 (band gap narrowing);迁移率模型考虑了 4 种效应:迁移率随掺杂浓度变化;迁移率受表面垂直电场影响;迁移率受载流子与载流子之间散射影响;迁移率由于强电场而饱和;产生与复合模型:俄歇 (Auger) 复合模型,考虑了通过复合中心复合的 SRH 复合模型 (包含与掺杂浓度的关系);雪崩 (avalanche) 击穿模型.

4 仿真结果分析

本文对传统的 FS-IGBT 和内透明集电极 IGBT 的主要性能指标进行了仿真分析,通过对比它们的性能,说明内透明集电极 IGBT 结构合理性、可行性以及新结构 IGBT 的制造优势.同时,二者对于仿真过程来说,也可以互为验证.

4.1 温度特性

FS-IGBT 和内透明集电极 IGBT 的高低温静态输出特性曲线如图 3 所示.本文所涉及器件均设定额定电流密度为 150A/cm²,可见这时内透明集电极 IGBT 的导通压降在 300K 时约为 2.26V,略逊于 FS-IGBT 的 1.81V,这是由于 FS-IGBT 具有较低的缓冲层浓度和较薄的缓冲层厚度^[3].新器件的零温度系数点对应的电流密度为 6.5A/cm²,占到额定电流密度的 4.3%,比例很低,这可以保证器件在正常工作时具有良好的电压正温度系数.这得益于器件在构想上的突破.根据半导体

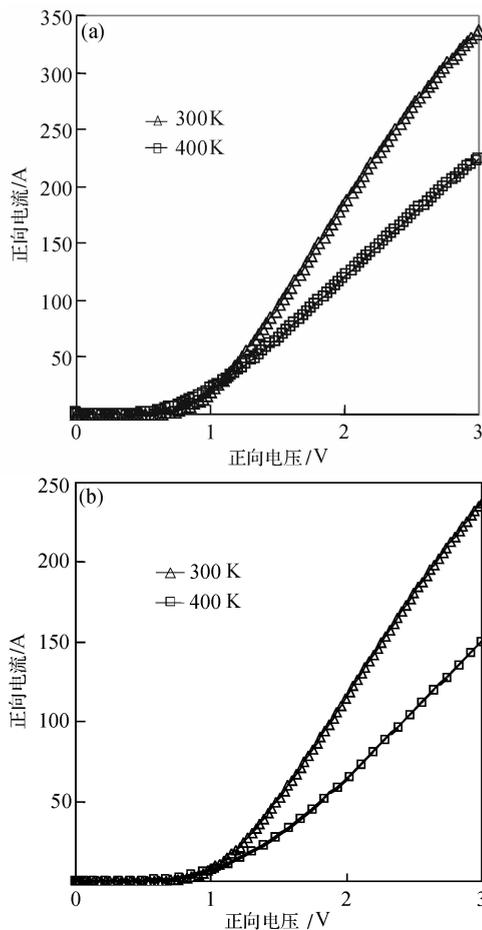


图 3 (a) FS-IGBT 正向特性; (b) 内透明集电极 IGBT 正向特性
Fig.3 (a) Forward voltage characteristics of FS-IGBT; (b) Forward voltage characteristics of ITC-IGBT

物理学知识,器件的温度特性主要取决于载流子寿命和迁移率随温度变化的情况.如果前者起主导作用,器件呈现电压负温度特性;而如果后者主导,器件具有电压正温度特性.内透明集电极 IGBT 不使用电子辐照进行寿命控制,而力图实现透明集电极的物理特性.从而使得器件温度特性主要取决于温度对迁移率的影响,实现了电压正温度系数,即电流负温度系数,提高了器件的热稳定性,便于并联使用,达到了设计目标(1).

4.2 开关特性

在仿真 FS-IGBT 和内透明集电极 IGBT 的过程中,本文采用图 4 所示电路.器件集电极接 300V 直流电源,栅极接入一个脉宽为 490ns、幅值为 15V 的正脉冲信号.由于 IGBT 导通电阻很小,根据电路所示参数可计算出导通电流约为 3A.同时适当设定仿真中面积因子,使器件的导通电流密度恰好为 $150\text{A}/\text{cm}^2$.

内透明集电极 IGBT 的开关特性示意图如图 5 所示.由于 IGBT 为栅控器件,开通时间通常足够短,因此我们着重关注关断时间.图 5 中栅压脉冲于 $5.1 \times 10^{-7}\text{s}$ 时刻结束,器件的延迟时间较短,在 6ns 左右.器件的发射极电流在 $5.8 \times 10^{-7}\text{s}$ 时刻已经低于 0.298A,因此,其下降时间小于 76.5ns,整个关断时间约为 82ns. FS-

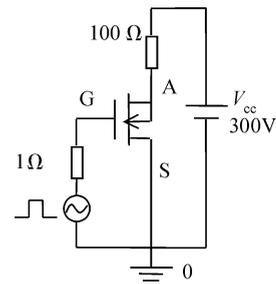


图 4 开关电路参数示意图
Fig.4 Schematics of the switch circuit parameters

IGBT 的下降时间约为 70ns,稍快于内透明集电极 IGBT.

内透明 IGBT 之所以能够实现较快的关断速度,是因为在器件导通时,漂移区中的电子电流占主要成分,比例达到 72.3%.导通状态 n^- 积累的大量过剩电子在关断时通过集电结进入集电区,以电子扩散流形式迅速到达高复合层,然后便与由 p^+ 衬底流过来的空穴在此复合消失.由于电子流比例大,所以在载流子成对消失的速度也较快.之所以能实现这样的效果,得益于集电结到高复合层之间的区域足够薄且掺杂浓度适当,使电子顺利通过该层;同时要求高复合层复合速率足够高,使到达的电子迅速复合消失.这样,高复合层产生的效果犹如欧姆接触,把大量过剩载流子从器件内部抽出,使得器件迅速关断.而上百微米厚的衬底在制造过程中能够增加 Si 片的机械强度,从而创造性地避开了薄片操作,实现了设计目标(2)和(3).

如果适当降低缓冲层的浓度,提高衬底向漂移区的注入效率,即牺牲一部分动态特性,当下降时间为 111.5ns 时,使其常温下 $150\text{A}/\text{cm}^2$ 电流密度时正向压降为 2.03V.

如图 5 所示,无复合层 IGBT 的结构和内透明集电极 IGBT 的结构完全相同,只是载流子的全局寿命前者是后者的 1/5.即使是这样,无复合层 IGBT 的关断时间仍在 230ns 以上,曲线显示出了明显而长时间的拖尾电流,可见,高复合层的设置对器件的开关特性来说至关重要.

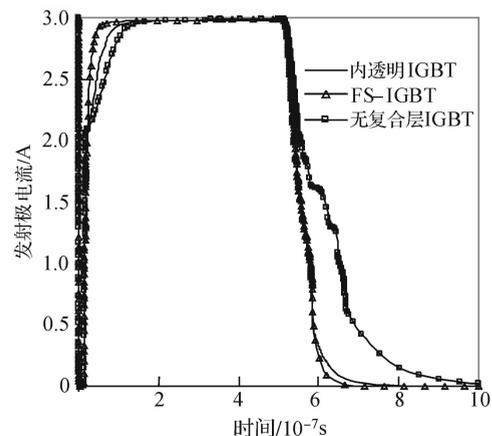


图 5 ITC-IGBT 开关特性
Fig.5 Switch characteristics of ITC-IGBT

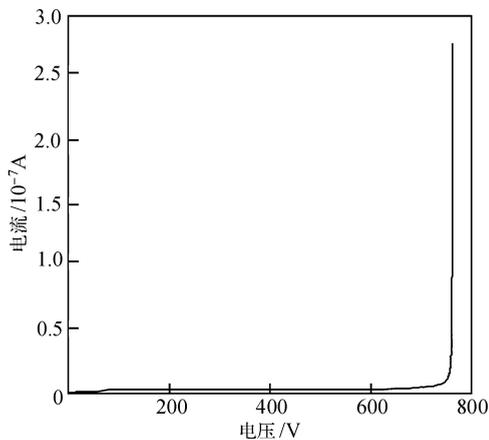


图 6 ITC-IGBT 击穿特性

Fig.6 Breakdown characteristics of ITC-IGBT

4.3 击穿电压

内透明集电极 IGBT 仿真中的击穿电压达到了 760V, 超过 600V 的设计电压 26.7%, 并且击穿特性比较硬, 如图 6 所示. 由于实际器件需要制作结终端, 而且生产工艺中的众多因素会使器件比仿真的理想击穿电压低, 留有足够的余量还是必要的.

5 结论

通过本文仿真可知, 新近提出的内透明集电极 IGBT 具有通态压降正温度系数, 开关速度较快, 是一种具有优良性能的开关器件. 内透明集电极 IGBT 的最大优势在于对于常用的 600~1200V 类 IGBT, 可以采用传统非透明集电极 IGBT 的工艺实现透明集电极 IGBT 的优良性能, 成功地避免了薄片操作的制造难题, 为今后 IGBT 的制造开辟蹊径.

参考文献

- [1] Baliga B J. Modern power devices. New York: John Wiley & Sons, 1987;354
- [2] Miller G, Sack J. A new concept for a non punch through IGBT with MOSFET like switching characteristics. IEEE PESC, Record 1, 1989;21
- [3] Laska T, Munzer M, Pfirsch F. The field stop IGBT (FS IGBT): a new power device concept with great improvement potential. Proceedings of the 12th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, 2000;355
- [4] Wu Yu, Lu Xiuhong, Kang Baowei, et al. A novel low power loss IGBT (LPL - IGBT) and its simulation. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(12): 1565 (in Chinese) [吴郁, 陆秀洪, 亢宝位, 等. 低功耗 IGBT(LPL - IGBT) 及其仿真. 半导体学报, 2001, 22(12): 1565]

A New Structural IGBT—— an Internal Transparent Collector IGBT and Its Simulation *

Wang Hao[†], Hu Dongqing, Wu Yu, Zhou Wending, and Kang Baowei

(Department of Electronic Science & Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The performance of a new structural IGBT— an internal transparent collector IGBT (ITC-IGBT) that is proposed recently is simulated. On the foundation of the traditional non-transparent collector IGBT structure, a local high recombination region where the carriers' lifetime is low enough is introduced just below the collector in the collector region. In this way, a transparent collector is realized in this IGBT. Meanwhile, the technical problem of ultra thin wafer processing during the manufacturing of low voltage transparent collector IGBTs is also avoided. We emphasize the simulation of the temperature and turn-off characteristics of the device, and compare it with the existing PT-IGBT and FS-IGBT. The results demonstrate that by properly coordinating the configuration of the parameters, not only does the internal transparent collector IGBT boast a positive temperature coefficient of saturation voltage, it also possesses a fast turn-off speed, indicating the excellent performance of the transparent collector IGBT.

Key words: internal transparent collector; PT- IGBT; NPT- IGBT; high recombination region

EEACC: 2560

Article ID: 0253-4177(2008)02-0348-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60676049)

[†] Corresponding author. Email: whelly777@163.com

Received 3 August 2007, revised manuscript received 4 September 2007