

## A Low Reverse Recovery Current with Snapback-Free RC-IGBT Design\*

ZENG Wei, WU Hua\*, FENG Xiuping, CHEN Hanmin, YAO Jia, YANG Huanghong  
(College of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

**Abstract:** A snapback-free reverse-conducting insulated gate bipolar transistor (RC-IGBT) is proposed, an N-type layer is added below the collector side field cutoff layer as a high-resistance layer and the N<sup>+</sup> collector part is replaced with a P-type thin layer, and the collector resistance is increased by the addition of the N-type high-resistance layer, and the collector cavity can be injected at the first time at the initial conduction with a P-type thin layer, eliminating the snapback phenomenon. The device's reverse recovery current peak is reduced by 15 A/cm<sup>3</sup>, At the same time, the shutdown characteristics of the device are improved, and the shutdown time is reduced by 103 ns. Compared with the traditional FS RC-IGBT, the reverse recovery current peak is reduced by 33.3%, and the shutdown time is reduced by 9.93%.

**Key words:** insulated gate bipolar transistor; snapback-free; N<sup>+</sup> collector; reverse recovery current  
**EEACC:** 2560J **doi:** 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.06.004

## 一种低反向恢复电流的无电压回跳 RC-IGBT 设计\*

曾伟, 武华\*, 冯秀平, 陈翰民, 姚佳, 杨煌虹  
(赣南师范大学物理与电子信息学院, 江西赣州 341000)

**摘要:** 提出了一种无电压回跳的逆导型绝缘栅双极型晶体管 (RC-IGBT) 结构, 在集电极侧场截止层下方加入了一个 N 型层作为高阻层且把 N<sup>+</sup> 集电区部分替换为 P 型薄层, 通过加入的 N 型高阻层增加集电极电阻, 同时用 P 型薄层保证在初始导通时集电区的空穴能够在第一时间注入, 消除了电压回跳现象, 并且使器件的反向恢复电流峰值降低了 15 A/cm<sup>3</sup>, 同时改善了器件的关断特性, 关断时间减小了 103 ns。相较于传统 FS RC-IGBT, 反向恢复峰值电流降低了 33.3%, 关断时间减小了 9.93%。

**关键词:** 绝缘栅双极型晶体管; 无电压回跳; N<sup>+</sup> 集电区; 反向恢复电流

**中图分类号:** TN322+8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9490(2023)06-1480-04

绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 具有高输入阻抗和低导通压降的特性, 目前已成为高压、高功率开关器件领域的主流器件<sup>[1-3]</sup>。在大多数的应用场合, 由于传统 IGBT 器件自身没有反向导通能力, 需要与续流二极管 (Freewheeling Diode, FWD) 反并联使用, 以获得逆向导通性能, 但这不仅显著增加制造与封装成本, 而且对 FWD 的要求也很高, 相关研究机构先后提出并实现了将 IGBT 与 FWD 集成在同一块硅片上的新型 IGBT 器件结构<sup>[4-6]</sup>。于是诞生了在 IGBT 集电区引入 N<sup>+</sup> 短路区的 RC-IGBT, 但在 RC-IGBT 集电区引入短路的 N<sup>+</sup> 集电区后, 阳极短路结构使器件在初始导通时, 会出现电压回跳现象<sup>[7]</sup>。为解决该问题, 许多学者提出了各种解决方案, 通常有以下两种方法: 一种是增大器件集电区短路电阻, 降低器件漂移区电阻, 例如具有三明治集电极结构的半超结

RC-IGBT (SSS-RC-IGBT)<sup>[8]</sup>, 新型自控双沟栅极 RC-IGBT (DTG-RC-IGBT)<sup>[9]</sup>, 具有多 P<sup>+</sup>/N 集电极的 IGBT (SA-IGBT)<sup>[10]</sup> 等; 第二种是引入新结构, 改变逆向导通模式或保证器件导通时的空穴注入方法, 例如具有多提取通道的 RC-IGBT (MEC-RC-IGBT)<sup>[11]</sup>, 具有 N-Si/N-Ge 异质结的 RC-IGBT (NNH-RC-IGBT)<sup>[12]</sup>, 氧化槽隔离型 RC-IGBT (TO-RC-IGBT)<sup>[13]</sup>, 使器件快速度过工作模式转换。但无论是通过改变器件电阻解决回跳现象的器件, 还是通过改变逆向导通模式的器件, 器件结构都比较复杂, 对工艺要求较高, 并且对器件某些特性, 会有一定不利影响, 比如反向恢复特性, 阻断特性等。

本文提出了一种无回跳的 RC-IGBT 器件结构, 器件仅在集电极侧场截止层下方加入一个 N 型层作为高阻层, 同时把 N<sup>+</sup> 集电区部分替换为 P 型薄层, 通过加入的 N 型层增加集电极电阻, 同时用 P

**项目来源:** 国家自然科学基金项目 (61650404); 江西省教育厅科技项目 (GJJ201411)

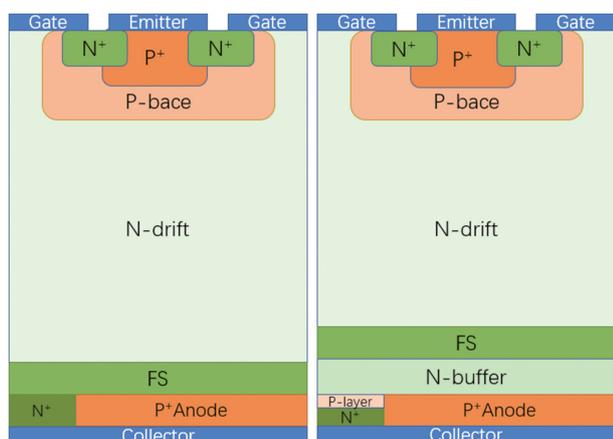
**收稿日期:** 2022-06-27 **修改日期:** 2022-08-13

型薄层替换了部分  $N^+$  集电区,保证在初始导通时集电区的空穴能够在第一时间注入,改变了传统器件在导通初始阶段是电子电流为主,随后空穴电流增大的情况,从而消除了 RC-IGBT 的电压回跳现象,同时具有低反向恢复电流。

## 1 器件结构与机理

传统 RC-IGBT 为了得到反向导通性能,在集电区引入  $N^+$  集电区,造成 RC-IGBT 器件在导通时存在电压回跳现象,即 RC-IGBT 器件在导通时,一开始工作在双极模式,在器件导通时需要从双极模式转换为单极模式,这时集电极电阻会急剧降低,从而导致出现电压骤回现象,这种现象在低温下会更加明显,严重时甚至会导致器件完全不能进入 IGBT 工作模式,使正向压降变得特别大。

基于优化 RC-IGBT 的电压回跳现象,设计并仿真了所提出的器件,传统的 FS RC-IGBT 和本设计的 P 型薄层替换部分  $N^+$  阳极的无回跳 RC-IGBT 剖面图如图 1 所示,两种器件正面均采用平面栅极结构,传统 FS RC-IGBT 背面集电区上方采用 N 缓冲层作为场截止层(Field Stop, FS)。所设计的 P 型薄层替换部分  $N^+$  集电区的无回跳 RC-IGBT,正面结构与传统 FS RC-IGBT 结构一样,但是器件背面集电区与场截止层之间加入了一层 N 型高阻层(N-buffer),同时将  $N^+$  集电区的一部分用 P 型薄层(P-layer)替换。本设计器件厚度为  $120\ \mu\text{m}$ ,器件集电极侧的  $N^+$  集电区与  $P^+$  集电区的长度比为 1:4,器件漂移区厚度为  $100\ \mu\text{m}$ ,掺杂浓度为  $8 \times 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$ ,加入的 N-buffer 层厚度为  $5\ \mu\text{m}$ ,掺杂浓度为  $8 \times 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$ ,用于替换的 P 型薄层厚度为  $1.5\ \mu\text{m}$ ,掺杂浓度为  $6 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ 。集电区厚度为  $5\ \mu\text{m}$ ,替换后剩余的  $N^+$  集电区厚度为  $3.5\ \mu\text{m}$ ,掺杂浓度为  $1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 。



(a) 传统的FS RC-IGBT (b) 设计的无回跳RC-IGBT

图1 传统 RC-IGBT 与所设计 RC-IGBT 剖面图

因为器件回跳电压会受到器件集电极电阻的影响,在集电区与场截止层之间加入一层 N 型高阻层,用于提高器件集电极电阻,缓解器件的电压回跳。同时电压回跳现象的产生也是由于  $N^+$  集电区加入后,器件的背面空穴注入受到了影响,因此本设计中用 P 型薄层替换一部分  $N^+$  集电区,保证一开始模式转换时的背面空穴注入,同时由于薄层的厚度较  $N^+$  集电区薄,其掺杂浓度比集电区低得多,能保证器件的反向导通性能,不会使器件失去反向导通能力。

## 2 设计结果与分析

图 2 所示是传统 FS RC-IGBT 与设计的无回跳 RC-IGBT 的正、反向导通特性的仿真结果,传统的 FS RC-IGBT 在正向导通过程中,会出现集电极电流增大,集电极-发射极电压减小的电压回跳现象,其回跳电压为  $5.59\ \text{V}$ 。从图 2 看出,本设计的无回跳 RC-IGBT 中,在 P-layer 层厚度为  $1.5\ \mu\text{m}$ ,掺杂浓度为  $6 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$  时,设计的器件消除了正向导通时的电压回跳现象。原因是在集电区与场截止层中间加入了 N-buffer 层,用于增加集电极电阻,同时把  $N^+$  集电区的一部分用轻掺杂 P-layer 层代替,使得  $P^+$  集电区在初始导通时就可以向漂移区注入空穴,有效抑制了器件的电压回跳现象。同时从图 2 可以看出器件在 P-layer 层厚度为  $1.5\ \mu\text{m}$ ,掺杂浓度为  $6 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$  时的反向导通性能依旧稳定。

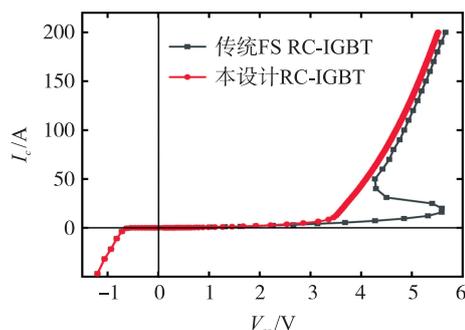


图2 传统 FS RC-IGBT 与所设计的无回跳 RC-IGBT 的正、反向导通特性

图 3 所示是 P-layer 层厚度为  $1.5\ \mu\text{m}$  时, P-layer 层掺杂浓度对无回跳 RC-IGBT 的正向导通特性的影响,器件回跳现象随着 P-layer 层掺杂浓度的增加而减弱,当掺杂浓度达到  $6 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$  时,设计的无回跳 RC-IGBT 的回跳现象已经完全消除。器件在初始导通阶段由发射极漂移到集电极侧的电子电流由于 P-layer 层的加入,在流入 N 型集电区前在 P-layer 层处产生压降,可以使 P 型集电区的空穴在初始阶段就参与导通,避免了由于初期仅有电子电

流,而后空穴电流才出现,使得漂移区电阻骤减引起电压回跳现象。

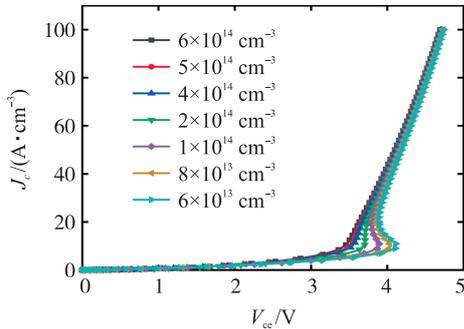


图 3 P-layer 层掺杂浓度对无回跳 RC-IGBT 正向导通特性的影响

图 4 所示为器件 P-layer 层掺杂浓度及厚度对无回跳 RC-IGBT 的反向导通特性的影响。由于 N<sup>+</sup> 集电区的一部分用轻掺杂的 P-layer 层代替, P-layer 层的加入会使器件的反向导通性能有所减弱, 要对 P-layer 层的厚度以及掺杂浓度进行设计, 当 P-layer 层的厚度以及浓度足够大时可以完全消除电压回跳现象, 但器件反向导通性能会有很大削弱, 甚至不能反向导通, 所以结合高阻 N-buffer 层使集电极电阻增加的效果, 在厚度为 1.5 μm、掺杂浓度为 6×10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup> 时, 完全消除了电压回跳现象。

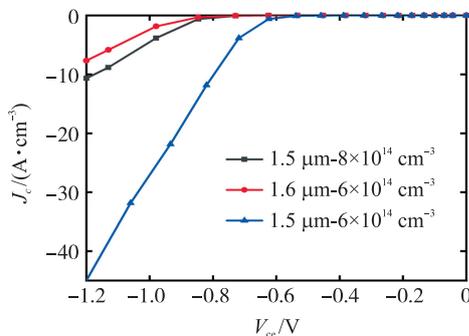


图 4 P-layer 层掺杂浓度及厚度对设计的无回跳 RC-IGBT 反向导通特性的影响

图 5 所示为场截止层浓度为 5×10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> 时, 传统 FS RC-IGBT 与本设计无回跳 RC-IGBT 的阻断特性, 结果表明所设计的无回跳 RC-IGBT 阻断特性与传统器件几乎一样, 其击穿电压为 725 V, 由于器件并没有改变场截止层的结构与掺杂, 所以器件的场截止层依旧能截断纵向电场, 保证器件阻断特性的稳定。

图 6 所示为反向导通电流密度为 50 A·cm<sup>-3</sup> 时, 传统 FS RC-IGBT 与设计的无回跳 RC-IGBT 的反向恢复特性曲线。两种器件的反向恢复时间均为 2 326 ns, 但本设计的器件由于 P-layer 层的加入, 使基区平衡空穴密度有所提升, 会减小产生的反向电

流, 所以反向恢复的峰值电流密度为 30 A/cm<sup>3</sup>, 比传统 FS RC-IGBT 反向恢复的峰值电流密度 45 A/cm<sup>3</sup> 小很多, 所设计的无回跳 RC-IGBT 在反向恢复过程中损耗会更低。

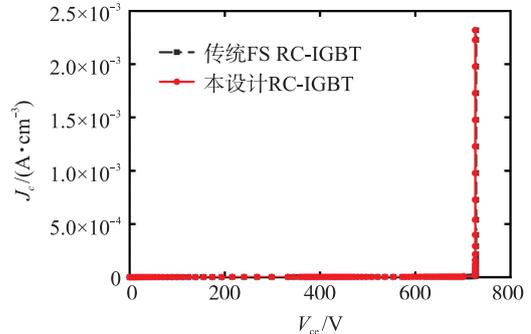


图 5 传统 FS RC-IGBT 与所设计的无回跳 RC-IGBT 的阻断特性

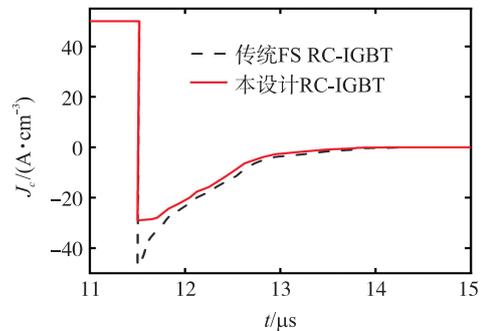


图 6 传统 FS RC-IGBT 与所设计的无回跳 RC-IGBT 的反向恢复特性

图 7 所示为传统 FS RC-IGBT 与设计的无回跳 RC-IGBT 关断特性曲线, 本设计的无回跳 RC-IGBT 关断时间 (从 90% J<sub>ce</sub> 下降到 10% J<sub>ce</sub> 的时间) 为 934 ns, 比传统 FS RC-IGBT 关断时间 1 037 ns 减小了 103 ns。因为加入的 P-layer 层在器件关断时, 与 N-buffer 层、N<sup>+</sup> 集电区组成的三极管结构会导通, 使器件漂移区中的载流子被抽取得更快, 在一定程度上使器件的关断能力有所提高, 同时由图 7 可知, 所设计的器件对关断损耗的优化较小, 器件的关断损耗与传统 FS RC-IGBT 器件差别不大。

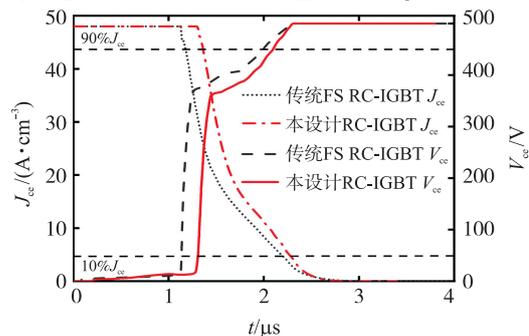


图 7 传统 FS RC-IGBT 与所设计的无回跳 RC-IGBT 的关断特性

表1为传统FS RC-IGBT与所设计的无回跳RC-IGBT一些主要性能参数对比,可以看出所设计的无回跳RC-IGBT消除了回跳现象,同时在反向恢复电流峰值和关断时间上比传统的器件有更优秀的特性。

表1 传统FS RC-IGBT与所设计的无回跳RC-IGBT性能参数对比

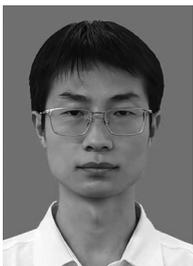
| 性能指标                        | 传统FS RC-IGBT | 所设计的无回跳RC-IGBT |
|-----------------------------|--------------|----------------|
| 击穿电压/V                      | 725          | 725            |
| 反向导通电压/V                    | 0.65         | 0.65           |
| 回跳电压/V                      | 5.59         | 无回跳            |
| 反向恢复电流/(A/cm <sup>3</sup> ) | 45           | 30             |
| 关断时间/ns                     | 1037         | 934            |

### 3 结论

基于Sentaurus TCAD提出了一种无回跳的RC-IGBT器件结构并进行了仿真验证,该RC-IGBT在器件宽度为24 μm, N-layer区厚度为1.5 μm,浓度为 $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时,器件的回跳现象已经消除,加入的N-buffer层增加了集电极电阻,同时P型薄层保证在初始导通时集电区的空穴能够在第一时间注入,改变了传统器件在导通初始阶段是电子电流为主,随后空穴电流增大的情况。在不影响器件反向导通性能的同时,消除了电压回跳现象,并且使器件的反向恢复电流峰值降低了 $15 \text{ A/cm}^3$ ,同时器件的关断特性也有所改善,关断时间减小了103 ns,相较于传统FS RC-IGBT,反向恢复峰值电流降低了33.3%,关断时间减小了9.93%。

### 参考文献:

- [1] Zhang J P, Luo J Y, Chen Z X, et al. A Novel Snapback-Free Reverse-Conducting IGBT with Si/SiC Heterojunction [C]//2020 4th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM), Penang, Malaysia, 2020:1-4.
- [2] Deng G Q, Luo X L, Zhou K, et al. A Snapback-Free RC-IGBT with Alternating N/P Buffers [C]//2017 29th IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD), Sapporo, Japan, 2017:127-130.
- [3] Zhang J P, Luo J Y, Wang K, et al. A Snapback-Free Reverse-Conducting IGBT with Integrated Schottky Diode in the Collector [C]//2019 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), Xi'an, China, 2019:1-3.
- [4] 刘志红, 汤艺, 盛况. 逆导型IGBT发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2):550-561.
- [5] 周东海, 张大华, 叶枫叶, 等. 高压IGBT短路热点研究和性能改进[J]. 半导体技术, 2022, 47(3):192-198.
- [6] 彭程, 李学宝, 杨艺烜, 等. IGBT芯片静态输出曲线连续测量方法[J]. 半导体技术, 2022, 47(1):70-76.
- [7] 黄靖杰, 马柯, 犬石常秀, 等. 逆导型IGBT电压回跳现象在电路应用中的影响分析[J]. 电源学报, 2021, 21(3):17-23.
- [8] 陈万军, 肖紫嫣, 刘超, 等. 具有三明治集电极结构的新型无电压回跳半超结RC-IGBT[J]. 电子与封装, 2020, 20(6):25-31.
- [9] Liu Z H, Sheng K. A Novel Self-Controlled Double Trench Gate Snapback Free Reverse-Conducting IGBT with a Built-in Trench Barrier Diode [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(4):1705-1711.
- [10] Shi S Y, Tang Z X, Yang J S. Low Turn-off Loss Shorted-Anode IGBT with Multiple p+/n Collector [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1907(1):012037.
- [11] Chen W, Lin X, Li S X, et al. A Snapback-Free Reverse-Conducting IGBT with Multiple Extraction Channels [J]. Journal of Power Electronics, 2022, 22(2):377-382.
- [12] Zhang X D, Wang Y, Bao M T, et al. A Snapback Suppressed RC-IGBT with N-Si/n-Ge Heterojunction at Low Temperature [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(10):5062-5067.
- [13] 马丽, 李伟, 李佳豪, 等. 氧化槽隔离型RC-IGBT的设计与仿真[J]. 固体电子学研究与进展, 2017, 37(3):195-200.



曾伟(1998—),男,赣南师范大学物理与电子信息学院硕士研究生,研究方向:功率半导体器件, zw18270799058@163.com;



武华(1979—),男,赣南师范大学物理与电子信息学院副教授,研究方向:半导体器件及模拟集成电路设计, wh1125@gnnu.edu.cn。