

具有N型缓冲层REBULF Super Junction LDMOS*

段宝兴[†] 曹震 袁小宁 杨银堂

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2014年6月30日收到; 2014年7月10日收到修改稿)

针对功率集成电路对低损耗LDMOS (lateral double-diffused MOSFET) 类器件的要求, 在N型缓冲层super junction LDMOS (buffered SJ-LDMOS) 结构基础上, 提出了一种具有N型缓冲层的REBULF (reduced BULK field) super junction LDMOS结构. 这种结构不但消除了N沟道SJ-LDMOS由于P型衬底带来的衬底辅助耗尽效应问题, 使super junction的N区和P区电荷完全补偿, 而且同时利用REBULF的部分N型缓冲层电场调制效应, 在表面电场分布中引入新的电场峰而使横向表面电场分布均匀, 提高了器件的击穿电压. 通过优化部分N型埋层的位置和参数, 利用仿真软件ISE分析表明, 新型REBULF SJ-LDMOS的击穿电压较一般LDMOS提高了49%左右, 较文献提出的buffered SJ-LDMOS结构提高了30%左右.

关键词: lateral double-diffused MOSFET, super junction, 击穿电压, 表面电场

PACS: 73.40.Kp, 73.40.Vz, 73.61.Ey

DOI: 10.7498/aps.63.227302

1 引言

横向功率半导体器件LDMOS (lateral double-diffused MOSFET) 由于漏极、源极和栅极都在芯片表面, 易于通过内部连接与低压信号电路集成等优点, 成为实现功率集成电路PIC (power integrated circuit) 和高压集成电路HVIC (high voltage integrated circuit) 技术的关键. 实现PIC技术除了要求LDMOS具有驱动简单与低压电路易于隔离和兼容外, 最关键的是LDMOS必须具有低的导通电阻以减小PIC集成电路的功率损耗^[1-3]. 虽然基于第三代半导体材料SiC和GaN制作的功率器件具有很低的功率损耗^[4-6], 但这类材料和器件由于特殊的工艺还不能实现真正的高低电压集成, 基于硅材料的高低电压集成技术仍然是研究和应用的热点. 实现低导通损耗的PIC集成电路要求的功率器件可以有两种选择: 一种是使用LIGBT (later-

al insulated gate bipolar transistor) 实现功率驱动, 但IGBT不能工作于高频, 限制了PIC的高频化发展; 另一种是将super junction应用于LDMOS形成SJ-LDMOS结构. 然而N沟道LDMOS具有的P型衬底对要求电荷完全补偿的super junction结构带来了衬底辅助耗尽问题^[7-12]. 为了解决衬底辅助耗尽效应, 国际上提出了许多新的结构^[9-12]. 对于文献^[9, 10]提出的具有N型缓冲层SJ-LDMOS结构, 虽然解决了衬底辅助耗尽问题, 但LDMOS具有的纵向电压使横向电场分布没有垂直型super junction结构的分布均匀.

为了进一步优化SJ-LDMOS的横向表面电场分布, 提高器件的击穿电压, 本文提出了具有REBULF (reduced BULK field)^[13,14]效应的SJ-LDMOS, 简称REBULF SJ-LDMOS. 此结构具有的优点如下: 1) 用于PIC的LDMOS器件电流主要流经表面, REBULF SJ-LDMOS利用了super junction结构充分减小了导通损耗; 2) REBULF

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2014CB339900)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61234006) 和国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61334002) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: bxduan@163.com

SJ-LDMOS的N型缓冲层不但可以增加电流的导通通道,还可以补偿P型衬底对SJN型区的辅助耗尽,从而消除了衬底辅助耗尽效应;3)利用REBULF效应将部分N型层埋入靠近漏端的漂移区下方,可以通过电场调制效应^[15-24]进一步优化表面电场,提高器件的横向击穿电压.

本文提出的REBULF SJ-LDMOS结构在消除衬底辅助耗尽效应的基础上,使器件的横向和纵向电场分布优化,击穿电压提高.利用仿真软件ISE^[25]分析表明,REBULF SJ-LDMOS击穿电压较一般LDMOS提高49%左右,较文献^[9]报道的N型缓冲层结构提高了30%左右.

2 器件结构

图1所示为三种N沟道LDMOS结构示意图.图1(a)为传统的LDMOS,器件具有的三个电极在同一表面体现了用于PIC的优点,但MOS类器件具有的击穿电压与导通电阻的矛盾关系^[26,27]阻碍了此类器件向大电流高功率的发展和应

用.为了解这种矛盾,我们已提出了多种新的结构并已被同行认可^[15-24].图1(b)为文献^[9, 10]提出的具有N型缓冲层SJ的LDMOS (buffered SJ-LDMOS),其中的N型沟道即为N型缓冲层,将具有电荷补偿的SJ应用于LDMOS结构的表面导电区可以大大降低器件的导通损耗,而非SJ的N型沟道,即N型缓冲层正好消除了SJ应用于横向结构引起的衬底辅助耗尽问题,但这种结构的缺点在于器件的横纵向电场分布不均匀,需要实现高耐压时必须增加器件的横向尺寸,而击穿电压随横向漂移区长度增加而饱和.所以,为了进一步优化器件的电场分布(包括横向表面电场和纵向漏端电场),本文提出了图1(c)所示的REBULF SJ-LDMOS,利用部分N型埋层的电场调制效应进一步优化横向表面电场,提高了击穿电压.图1(c)中 T_B 表示N型埋层与表面SJ层的距离,即N型缓冲层的厚度; L_N 表示N型埋层位于REBULF SJ-LDMOS漂移区中的长度; N_N 和 N_P 表示super junction中N型柱和P型柱的浓度; N_B 表示N型缓冲层沟道的浓度; N_S 表示P型衬底的浓度.

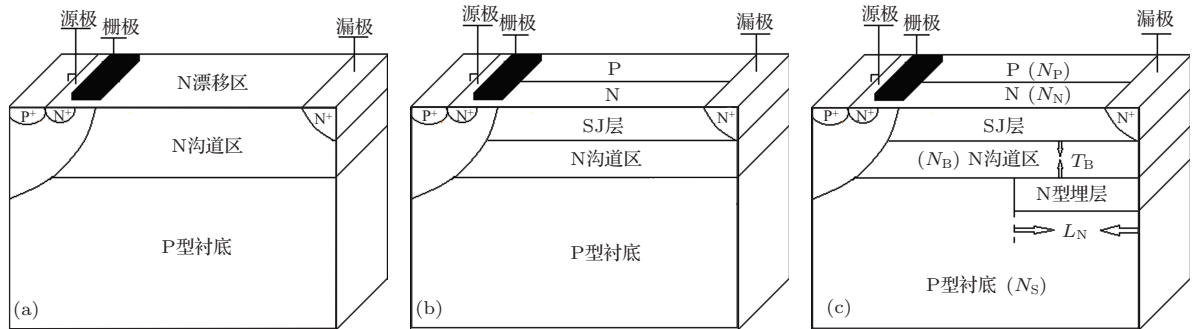


图1 三种器件结构示意图 (a)一般LDMOS结构; (b)文献^[9, 10]报道的buffered SJ-LDMOS结构; (c)本文提出的REBULF SJ-LDMOS

3 仿真结果与分析

图2所示为三种结构的等势线分布.图2(a)为传统结构LDMOS当击穿电压为254 V时的等势线分布,在满足RESURF (reduced SURface field)^[28]条件下,漂移区完全耗尽,但由于纵向电场的作用,使等势线在靠近栅边缘和漏电极边缘聚集,从而使得这两处出现高电场峰.图2(b)为文献^[9]报道的buffered SJ-LDMOS结构当击穿电压为289 V时的等势线分布,可以看出,通过优化表面SJ区与Buffered N型区浓度,可以实现SJ区的电荷完

全补偿,即SJ的N区和P区完全耗尽,但同样由于纵向电压的作用使等势线在靠近栅边缘和漏电极边缘聚集,表面电场需要进一步优化.图2(c)所示为本文提出的REBULF SJ-LDMOS结构等势线分布,在消除了衬底辅助耗尽效应,使SJ的N区和P区完全电荷补偿基础上,由于N型埋层的电场调制作用,使聚集在栅边缘和漏电极边缘的等势线密集度缓解,等势线分布趋于均匀.

图3所示为器件的横向表面电场分布.可以看出,由于REBULF SJ-LDMOS具有的电场调制效应,使表面电场分布中出现新的电场峰 P_{KX} 而分布均匀,新的电场峰使栅边缘和漏电极边缘的高

电场减小, 击穿电压较文献[9]报道的buffered SJ-LDMOS结构从289 V 提高到378 V, 提高了30%; 与传统LDMOS结构的254 V 击穿电压比较, 提高了49%. 电场调制效应是作者为了优化LDMOS结构击穿电压与比导通电阻矛盾关系提出的新技术,

这种技术已通过设计新型功率器件结构[15-24]得到充分验证. 由于REBULF的体电场调制效应, 即通过使器件纵向电场分布中出现新的峰而进一步降低漏端的高电场, 提高器件的纵向击穿电压, 这就是REBULF效应的作用.

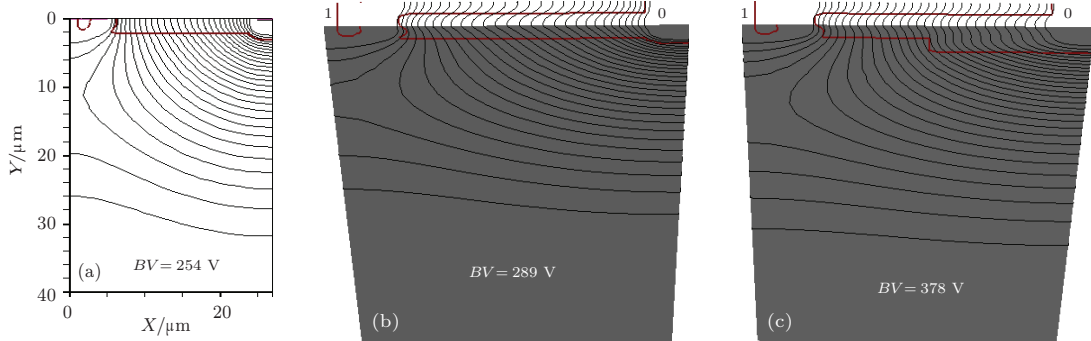


图2 三种器件击穿时的等势线分布 (a) 一般LDMOS; (b) buffered SJ-LDMO; (c) REBULF SJ-LDMOS ($L_d = 20 \mu\text{m}$; $N_N = N_P = 1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$; $N_S = 1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$; $N_B = 4.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$)

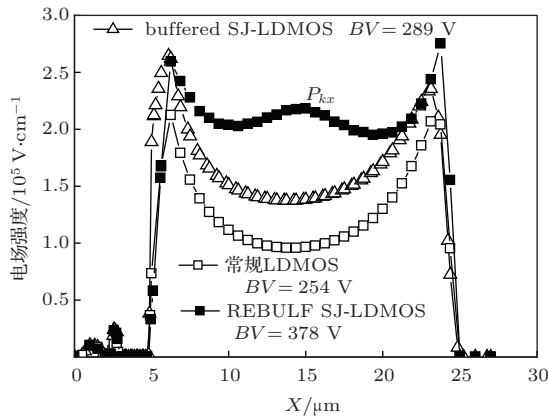


图3 三种结构横向表面电场分布 $L_d = 20 \mu\text{m}$; $N_N = N_P = 1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$; $N_S = 1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$; $N_B = 4.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$

为了进一步确定REBULF SJ-LDMOS结构的设计参数, 图4分析了REBULF SJ-LDMOS中N型埋层的设计规律. 首先需要优化N型埋层与表面SJ层的距离, 即通过调整缓冲漂移区(buffered drift region)的厚度优化电场调制的强度. 电场调制效应的优化体现在新电场峰 P_{KX} 的变化, 图4(a)所示为不同N型缓冲漂移区厚度(T_B)下的表面电场分布, 当 T_B 太小, 即N型埋层距离表面SJ区太近时, 表面新产生的电场峰 P_{KX} 过高, 器件击穿时的电压为360 V; 当 T_B 太大, 即N型埋层距离表面SJ区太远时, 表面新产生的电场峰 P_{KX} 太低, 器件的击穿电压降低为353 V. 所以, 通过优化缓冲漂移区的纵向位置, 可以使电场峰 P_{KX} 与栅、漏边缘的电场峰基本等高, 表面电场达到最优分布, 击穿电压为最高值378 V, 这正是电场调制效应

的体现.

当N型埋层与SJ的距离优化后, 需要选择N型埋层的长度, 以使表面电场分布均匀. 图4(b)所示为N型埋层长度(L_N)对表面电场分布及击穿电压的影响, 可以明显看出, N型埋层的横向长度决定了新产生电场峰在表面电场分布中的位置. 当N型埋层位于漂移区中间时, 生的新电场峰有效地降低了栅、漏边缘的高峰电场, 表面电场分布最优击穿电压达到最大.

应用于N沟道LDMOS的super junction由于P型衬底的作用, 使super junction的N区完全耗尽时P区不能完全耗尽, 这就是衬底辅助耗尽效应. 通过N型缓冲漂移区补偿了P型衬底的作用, 消除了衬底辅助耗尽问题, 提高了击穿电压. 图5显示了电荷不平衡作用对击穿电压的影响, 可以看出, 对于传统的SJ-LDMOS, 由于衬底辅助耗尽问题, 击穿电压只有128 V; 对于buffered SJ-LDMOS, 当通过N型缓冲漂移区逐渐补偿P型衬底时, 击穿电压逐渐增加, 当N型缓冲层补偿的浓度为 $4.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 时, 击穿电压增加了 ΔV_1 , 达到最大值289 V, 说明此时SJ的N区与P区电荷完全补偿, 漂移区完全耗尽, 即消除了衬底辅助耗尽效应. 对于REBULF SJ-LDMOS, 在消除衬底辅助耗尽效应基础上, 通过N型埋层的电场调制效应和REBULF效应, 横、纵向电场优化, 器件击穿电压较一般LDMOS结构增加了 ΔV_2 , 与buffered SJ-LDMOS比较从289 V增加到378 V.

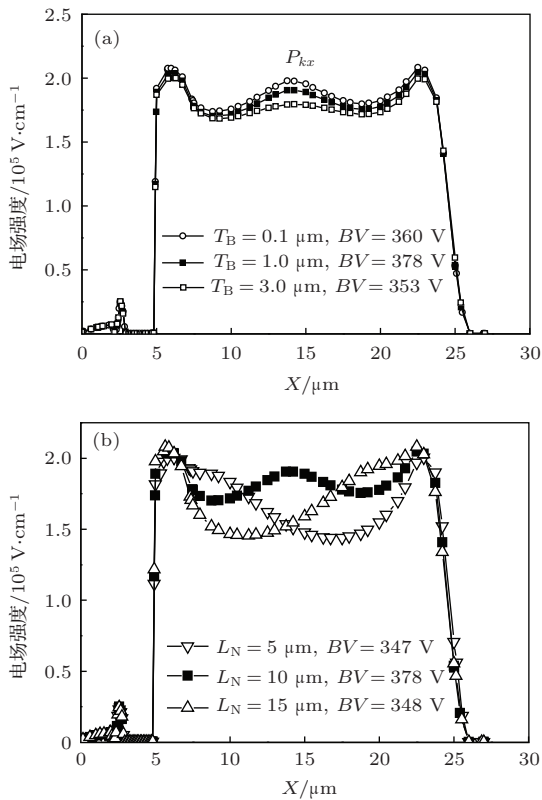


图4 (a) N型缓冲层厚度 T_B 对表面电场的影响 ($L_d = 20 \mu\text{m}$; $N_N = N_P = 1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $N_S = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; $N_B = 4.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; $L_N = 10 \mu\text{m}$); (b) N型缓冲层长度 L_N 对表面电场的影响 ($L_d = 20 \mu\text{m}$; $N_N = N_P = 1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $N_S = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; $N_B = 4.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; $T_B = 1.0 \mu\text{m}$)

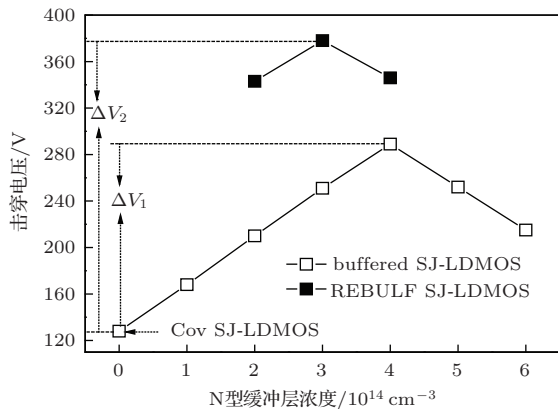


图5 电荷补偿效应对击穿电压的影响 ($L_d = 20 \mu\text{m}$; $N_N = N_P = 1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $N_S = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)

对于 LDMOS 结构, 器件耐压随漂移区长度的增加而增加, 并当纵向耐压达到最大时趋于饱和. 由于 REBULF SJ-LDMOS 通过部分 N 型埋层的电场调制效应优化了横向表面电场分布, 所以, 从图 6 中可以看出, 对于相同的漂移区长度, 击穿电压较一般 LDMOS 和 buffered SJ-LDMOS 结构的

增加; 同时, 利用 REBULF 效应使漏端高电场降低, 纵向耐压提高, 所以, 对于 REBULF SJ-LDMOS, 器件击穿电压达到饱和时的漂移区长度增加. 从图 6 中可以看出, 由于 REBULF SJ-LDMOS 横、纵向均匀分布的电场, 使饱和的击穿电压较文献 [9] 报道的 buffered SJ-LDMOS 结构提高 30% 左右.

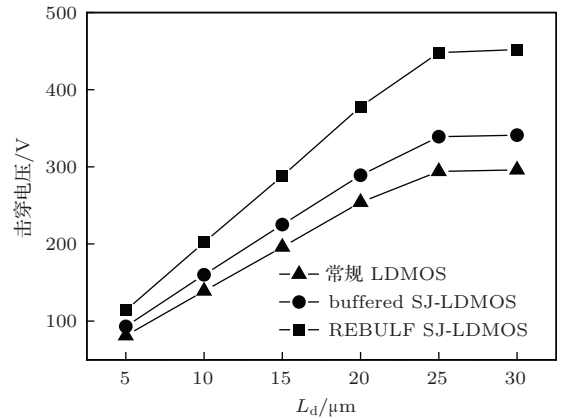


图6 三种结构击穿电压与漂移区长度的关系 ($N_N = N_P = 1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $N_S = 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)

4 结 论

为了降低 LDMOS 器件的功率损耗, 提高 PIC 集成电路的功率驱动能力, 本文提出了一种具有 REBULF 效应的 SJ-LDMOS 新结构, 此结构利用 super junction 层降低了 LDMOS 电流主要流经的表面导电区电阻; 通过 N 型缓冲层补偿了 N 沟道 LDMOS P 型衬底引起的衬底辅助耗尽问题; 利用部分 N 型埋层的电场调制效应优化了器件横向表面电场分布; 利用 REBULF 效应优化了纵向电场分布, 即通过同时提高器件的横、纵向耐压能力而提高器件的击穿电压. 通过仿真分析表明 REBULF SJ-LDMOS 的击穿电压较一般 LDMOS 提高 49% 左右, 较文献报道的 buffered SJ-LDMOS 结构提高 30% 左右.

参考文献

- [1] Kyungho L, Haeung J, Byunghee C, Joonhee C, Pang Y S, Jinwoo M, Susanna K 2013 *Proceedings of the 25th International Power Semiconductor Devices and ICs Kanazawa*, May 26–30, 2013 p163
- [2] Yoshiaki T, Katakura H, Takatoshi O, Masanobu I, Hitoshi S 2013 *Proceedings of the 25th International Power Semiconductor Devices and ICs Kanazawa*, May 26–30, 2013 p145

- [3] Chang H, Jung J, Kim M H, Lee E K, Jang D E, Park J S, Jung J H, Yoon C J, Bea S R, Park C H 2012 *Proceedings of the 24th International Power Semiconductor Devices and ICs* Bruges, Belgium, June 3–7, 2012 p217
- [4] Duan B X, Yang Y T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 057201
- [5] Zhang X J, Yang Y T, Duan B X, Chen B, Chai C C, Song K 2012 *Chin. Phys. B* **21** 017201
- [6] Zhang X J, Yang Y T, Duan B X, Chai C C, Song K, Chen B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 037303
- [7] Sameh G, Khalil N, Salama C A T 2003 *IEEE Trans. Electron Dev.* **50** 1385
- [8] Sameh G, Khalil N, Li Z H, Salama C A T 2004 *IEEE Trans. Electron Dev.* **51** 1185
- [9] Park Y, Salama C T 2005 *Proceedings of the 17th International Power Semiconductor Devices and ICs* Santa Barbara, California, May 26–30, 2005 p163
- [10] Zhang B, Chen L, Wu J, Li Z J 2005 *International Conference on Communications, Circuits and System* Hongkong, May 16–20, 2005 p1399
- [11] Duan B X, Yang Y T, Zhang B 2009 *IEEE Electron Dev. Lett.* **30** 305
- [12] Duan B X, Yang Y T 2011 *Micro Nano Lett.* **6** 881
- [13] Duan B X, Zhang B, Li Z J 2007 *Chin. J. Semicond.* **28** 166
- [14] Chen J B, Zhang B, Li Z J 2008 *IEEE Electron Dev. Lett.* **29** 645
- [15] Duan B X, Zhang B, Li Z J 2005 *Solid-State Electron.* **49** 1965
- [16] Duan B X, Zhang B, Li Z J 2006 *IEEE Electron Dev. Lett.* **27** 377
- [17] Duan B X, Zhang B, Li Z J 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1342
- [18] Duan B X, Yang Y T, Zhang B, Hong X F 2009 *IEEE Electron Dev. Lett.* **30** 1329
- [19] Duan B X, Yang Y T, Zhang B, Li Z J 2008 *Chin. J. Semicond.* **29** 677
- [20] Duan B X, Yang Y T 2011 *IEEE Trans. Electron Dev.* **58** 2057
- [21] Duan B X, Yang Y T, Zhang B 2010 *Solid-State Electron.* **54** 685
- [22] Duan B X, Yang Y T, Chen J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 247302 (in Chinese) [段宝兴, 杨银堂, 陈敬 2012 物理学报 **61** 247302]
- [23] Duan B X, Yang Y T, Chen J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 227302 (in Chinese) [段宝兴, 杨银堂, 陈敬 2012 物理学报 **61** 227302]
- [24] Duan B X, Yang Y T 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 057302 (in Chinese) [段宝兴, 杨银堂 2014 物理学报 **63** 057302]
- [25] ISE TCAD Manuals, release 10.0
- [26] Chen X B, Wang X, Johnny K O S 2000 *IEEE Trans. Electron Dev.* **47** 1280
- [27] Chen X B, Johnny K O S 2001 *IEEE Trans. Electron Dev.* **48** 344
- [28] Appels J A, Collet M G, Hart P A H, Vaes H M J 1980 *Philips J. Res.* **35** 1

New REBULF super junction LDMOS with the N type buffered layer*

Duan Bao-Xing[†] Cao Zhen Yuan Xiao-Ning Yang Yin-Tang

(Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 30 June 2014; revised manuscript received 10 July 2014)

Abstract

In this paper, a new REBULF (reduced BULK field) SJ-LDMOS (lateral double-diffused MOSFET) is proposed with the N type buffered layer based on the buffered SJ-LDMOS for the low loss of LDMOS used in the power integrated circuits. In this structure, the problem of the substrate-assisted depletion, produced due to the P-type substrate for the N-channel SJ-LDMOS, is eliminated by the N-type buffered layer. The charges for the N-type and P-type pillars are depleted completely. Moreover, a new electric field peak is introduced into the surface electric field distribution, which makes the lateral surface electric field uniform. The breakdown voltage is improved for the REBULF SJ-LDMOS in virtue of the ISE simulation results. By optimizing the location and parameters of the N-type buried layer, the breakdown voltage of REBULF SJ-LDMOS is increased by about 49% compared with that of the conventional LDMOS, and improved by about 30% compared with that of the buffered SJ-LDMOS.

Keywords: lateral double-diffused MOSFET, super junction, breakdown voltage, surface electric field

PACS: 73.40.Kp, 73.40.Vz, 73.61.Ey

DOI: [10.7498/aps.63.227302](https://doi.org/10.7498/aps.63.227302)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB339900), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61234006, 61334002).

[†] Corresponding author. E-mail: bxduan@163.com