

500 V 沟槽阳极 LIGBT 的设计与优化

邵 雷, 李 婷, 陈宇贤, 王 颖

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 介绍一种双外延绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI)结构的沟槽阳极横向绝缘栅双极型晶体管(trench anode lateral insulated-gate bipolar transistor, TA-LIGBT)。沟槽阳极结构使电流在N型薄外延区几乎均匀分布,并减小了元胞面积;双外延结构使漂移区耗尽层展宽,实现了薄外延层上高耐压低导通压降器件的设计。通过器件建模与仿真得到最佳TA-LIGBT的结构参数和模拟特性曲线,所设计器件击穿电压大于500 V,栅源电压 $V_{gs} = 10$ V时导通压降为0.2 V,特征导通电阻为 $123.6 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

关键词: 沟槽; 横向绝缘栅双极晶体管; 击穿电压; 导通压降; 阈值电压; 特征导通电阻

中图分类号: TN 342.4

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)08-1153-05

Design and Optimization of 500 V Trench Anode LIGBT

SHAO Lei, LI Ting, CHEN Yu-xian, WANG Ying

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A type of silicon on insulator (SOI) trench anode lateral insulated-gate bipolar transistor (TA-LIGBT) with dual-epi layers is introduced in this paper. TA-LIGBT exploits the structure of trench electrode to decrease the cell size and the current flowlines of TA-LIGBT are uniformly distributed in the N-drift region. TA-LIGBT has achieved lower on-state drop and higher breakdown voltage on thin epitaxial layer because dual-epi layer can widen the depletion region. Optimal structure is obtained for 500 V TA-LIGBT through simulation. Characteristics of the device are also given. Results show that the device has a breakdown voltage above 500 V, a forward voltage of 0.2 V for V_{gs} of 10 V, and the specific on-resistance of $123.6 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$.

Key words: trench; lateral insulated-gate bipolar transistor (LIGBT); breakdown voltage; forward voltage; threshold voltage; specific on-resistance

智能功率集成电路(smart power IC, SPIC)正逐步成为工业自动化、电力技术、汽车制造业以及通讯产业等领域内的实用器件^[1-2]。目前,新型金属氧化物半导体(metal oxide semiconductor, MOS)功率器件已进入实用化阶段,其研究开发着眼于提高器件的工作频率和功率处理能力,主要集中于器件结构和性能的提高,并展开了新型半导体材料功率器件

的开发研制。绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI) SPIC 研究中,SOI 高压器件的设计和优化是研究的主要课题。SOI 横向绝缘栅双极型晶体管(lateral insulated-gate bipolar transistor, LIGBT)开态时在漂移区的场氧下形成少子的积累层,故开态电阻较小,而且其关态击穿电压也较高。但是由于存在少子积累层,其响应速度较 SOI 横向扩散金属氧化物半导

收稿日期: 2009-09-17.

基金项目: 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金资助项目(RC2007QN009016)。

作者简介: 邵 雷(1974—),男,硕士研究生,讲师,主要从事半导体功率器件、微电子工艺及器件方面的研究, E-mail: shaolei@hrbeu.edu.cn.

体 (laterally diffused metal oxide semiconductor, LDMOS) 的低^[3-4].

LIGBT 是一种目前十分常用的功率器件,它靠阳极注入的非平衡载流子导电,结合了 MOS 器件的栅控特性和双极型晶体管的高耐压、低导通损耗特点,具有广泛的用途^[2,4]. LIGBT 从根本上解决了 LDMOS 器件高电压与高导通电阻之间的矛盾,改善了器件的功率控制能力,使其广泛应用于中频和中等电流领域,但同时也引入关断时间延长和易发生门锁效应的负面效应. LIGBT 已广泛地用于 SPIC 中,但其内部寄生的横向 NPNP 晶闸管使器件易于门锁,尤其环境温度从 25 °C 上升到 200 °C 时,门锁电流将下降 1/3. 为此,SPIC 中必须加入电流检测和过流保护单元,这使得电路更加复杂且生产成本更高^[1,4]. 采用 SOI 材料制作的 LIGBT 在耐高温电力集成电路 (power IC) 和射频集成电路 (radio frequency IC) 中的应用愈来愈引人关注.

本文利用 Silvaco TCAD 工具研究了沟槽阳极 LIGBT (trench anode LIGBT, TA-LIGBT) 和普通 LIGBT (conventional LIGBT, C-LIGBT),通过器件建模与仿真得到最佳 TA-LIGBT 的结构参数和模拟特性曲线,研究结果为 500 V TA-LIGBT 的设计与优化提供理论依据.

1 结构及工作原理

图 1、2 分别表示 TA-LIGBT 和 C-LIGBT 的结构. 两者结构上的差别主要有: 1) TA-LIGBT 的阳极结构由横向变成纵向,沟槽阳极结构不仅使得在耐压、最大饱和电流一定时,元胞面积大大降低,而且使器件电流均匀分布于整个 N 型漂移区. 2) TA-LIGBT 的外延层是双外延结构,利用了 Super Junction 的基本思想, P 型外延层上生长 N 型外延层达到电荷补偿作用^[5],使耗尽区进一步展宽来提高高压器件的耐压. N 型缓冲区用来实现双外延层并抑制门锁效应^[6-7]. 3) 短路阳极结构用来抑制门锁效应^[8-9]. TA-LIGBT 的工作原理与 C-LIGBT 的一致,正向导通模式可通过逐渐增大阳极-阴极电压实现. 当阳极电压大于 1 个二极管压降、栅极电压大于阈值电压时,阳极电流产生^[6,10].

TA-LIGBT 正向导通时,空穴由 P⁺ 阳极区注入,大部分空穴被 P 外延区与 P 基区收集,很少空穴到达 N⁺ 阴极区,使得门锁效应有效抑制;同时沟槽阳极结构使器件电流均匀分布于整个 N 型漂移区. 而 C-LIGBT 增大阳极电压时,阳极 PN 结开启,空穴大

量注入晶体管的 N 漂移区,一部分空穴在流经 NMOS 沟道区时与电子复合,剩余部分空穴穿过 N 漂移区到达 P 基区/P⁺ 阴极区,空穴电流流过 P 基区的横向电阻产生横向压降,当 P 基区/N⁺ 阴极结承受压降大于 0.7 V 时,P⁺ NPN⁺ 4 层结构工作,器件失去栅控能力,发生门锁^[11];由于 C-LIGBT 的电极均处于器件表面,因此 C-LIGBT 的电流线集中于漂移区表面^[12-13].

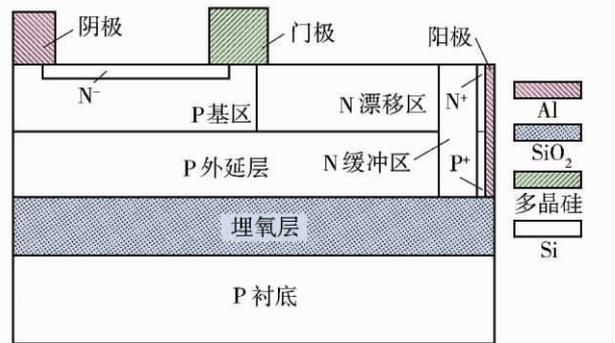


图 1 TA-LIGBT 的结构
Fig. 1 Structure of TA-LIGBT

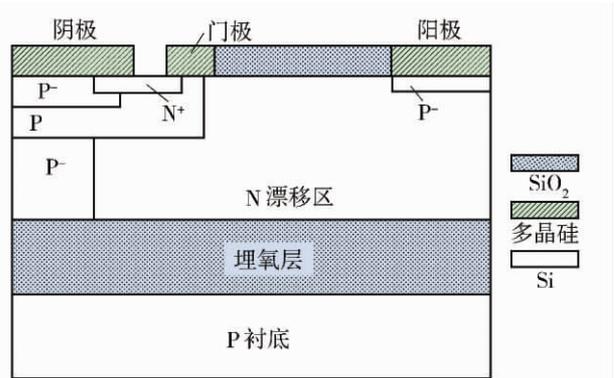


图 2 C-LIGBT 的结构
Fig. 2 Structure of C-LIGBT

TA-LIGBT 处于关闭状态,漂移区的耗尽层不仅是由水平方向 P 基区/N 外延结和垂直方向的 Si/SiO₂ 的耗尽层共同作用,而且由于电荷补偿原理,双外延层结构使耗尽区面积更大. 因此 TA-LIGBT 器件具有漂移区浓度较高且漂移区厚度较薄的特点. 本文结合 SOI RESURF 原理^[14-15]设计的 TA-LIGBT 结构参数如表 1 所示. 利用 SOI RESURF 原理设计的 C-LIGBT 的器件长度为 80 μm,漂移区厚 10 μm,漂移区浓度为 1 × 10¹⁵ cm⁻³,栅氧和埋厚度分别为 0.1、11 μm, P⁺ 阴极区结深 1 μm, P 基区结深 2 μm,浓度为 4.5 × 10¹⁶ cm⁻³, P⁺ 阳极区结深为 0.5 μm, N⁺ 阴极区参数与 TA-LIGBT 的 N⁺ 阴极区参数一致.

表 1 TA-LIGBT 的参数
Table 1 Parameters of TA-LIGBT

参数名称	厚度或结深/ μm	长度/ μm	浓度/ cm^{-3}	参数名称	厚度或结深/ μm	长度/ μm	浓度/ cm^{-3}
栅氧	0.1	3.5		埋氧	8	54	
N 漂移区	2.5	40	7×10^{15}	N ⁺ 阴极	0.5	10	1×10^{21}
N 缓冲区	5	1	1×10^{17}	N ⁺ 阳极	2.5	0.5	1×10^{21}
P 基区	2.5	13	1.5×10^{16}	P 外延	2.5	2.5	3×10^{15}

2 结果及分析

利用 ATLAS 器件仿真软件对 TA-LIGBT 和 C-LIGBT 进行了大量仿真. 图 3 (a) (b) 分别表示

TA-LIGBT 和 C-LIGBT 的电流分布, 可观察到 TA-LIGBT 的 N 漂移区电流分布均匀. 而 C-LIGBT 的电流线集中于漂移区表面^[16-17], 电流穿过 N 漂移区的有效面积占据总漂移区面积较小.

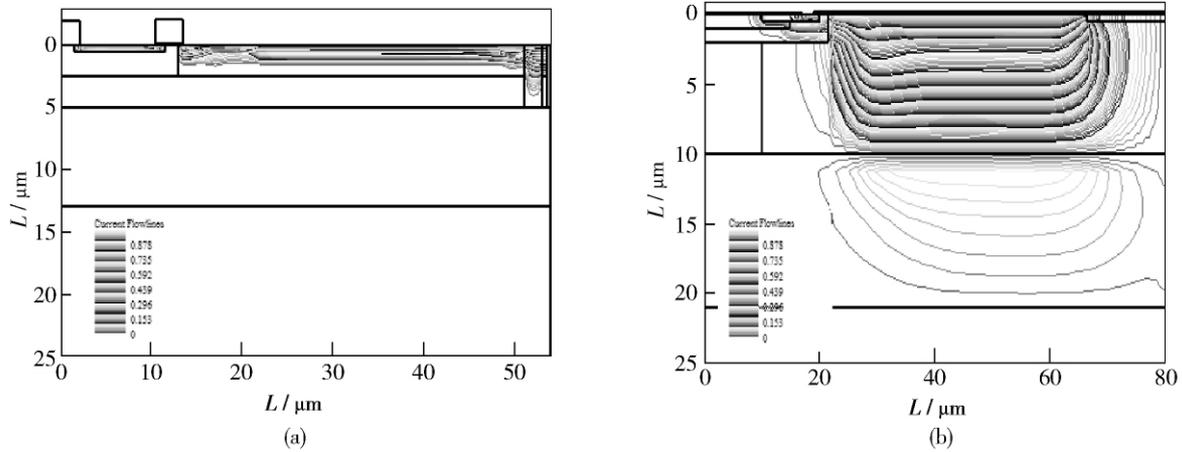


图 3 $V_c = 5 \text{ V}$ 时电流分布

Fig. 3 Current distribution at $V_c = 5 \text{ V}$

图 4 (a) (b) 分别表示 TA-LIGBT 击穿时纵向电场和横向电场, 可知 TA-LIGBT 的电场强度 E 最大点在 N 缓冲区和中间 SiO_2 层的交界处, 所以击穿发

生在此处. 图 4 (c) (d) 分别表示 C-LIGBT 击穿时的纵向电场和横向电场, 可知 C-LIGBT 的纵向击穿和横向击穿几乎同时发生.

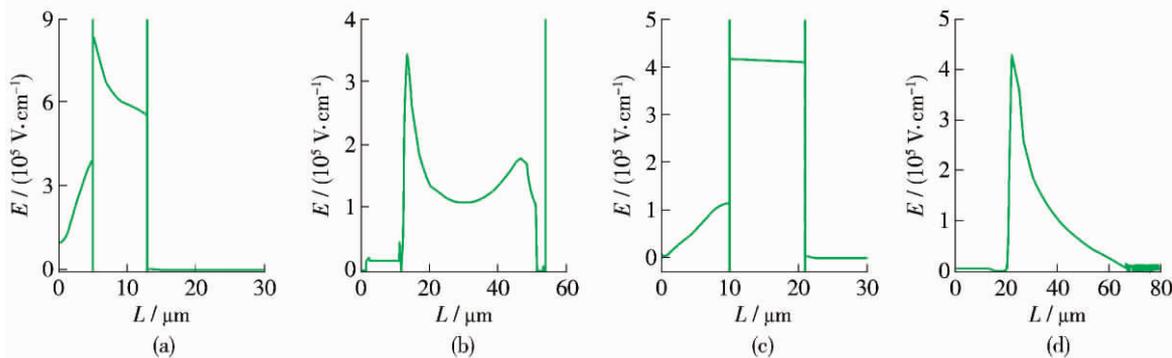


图 4 击穿时电场强度

Fig. 4 Electric field for breakdown

利用 DevEdit 软件建模并通过 ATLAS 软件电学特性仿真, 得到 C-LIGBT 和 TA-LIGBT 两种器件的

输出特性、正向导通特性、正向阻断特性、转移特性曲线, 分别如图 5 ~ 8 所示.

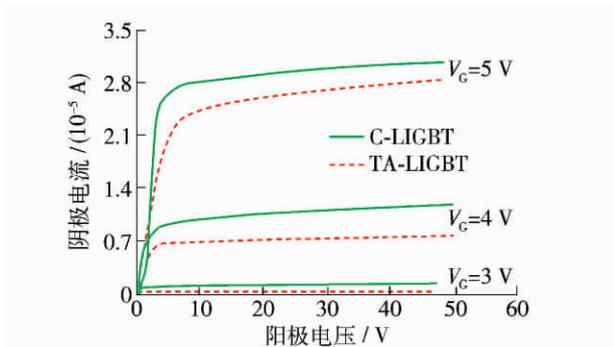


图5 输出特性

Fig. 5 Output properties

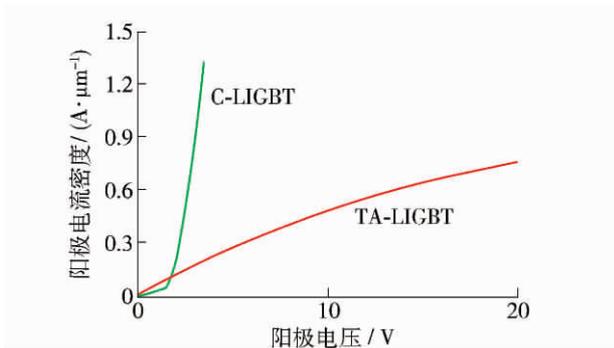


图6 正向导通特性

Fig. 6 Forward conducting characteristic

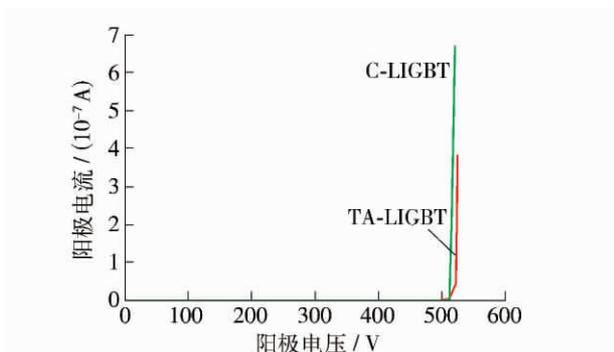


图7 正向阻断特性

Fig. 7 Forward blocking characteristic

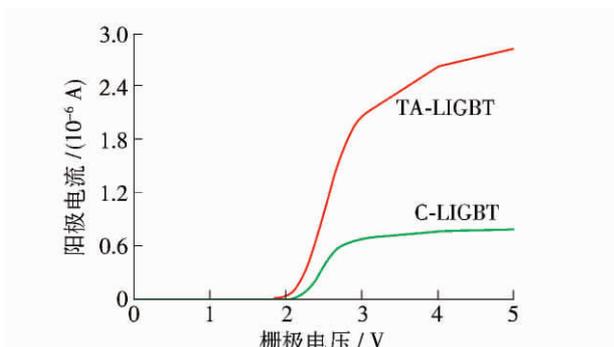


图8 转移特性

Fig. 8 Transfer characteristic

TA-LIGBT的阈值电压为2.2 V,饱和电流密度为 243.2 A/cm^2 ,击穿电压值为521.0 V,导通压降为0.2 V,特征导通电阻为 $123.6 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$. C-LIGBT的阈值电压为2.3 V,饱和电流密度为 277.4 A/cm^2 ,击穿电压值为516.7 V,导通压降为0.6 V,特征导通电阻为 $70.3 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$.与C-LIGBT相比,耐压相同时TA-LIGBT的导通压降下降了66.7%,元胞面积降低了32.5%.TA-LIGBT的N漂移区较薄,大大降低了导通压降;同时沟槽阳极结构大大缩小了阳极长度,双外延层结构使得N漂移区充分耗尽,有效降低了元胞面积.尽管外延层浓度较高,但是TA-LIGBT存在导通电阻大的缺点.

3 结论

1) 通过Silvaco TCAD软件建模与仿真,得到了击穿电压为521 V,饱和电流密度为 243.2 A/cm^2 ,特征导通电阻为 $123.6 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$,导通压降为0.2 V的TA-LIGBT.

2) 双外延层SOI结构的TA-LIGBT,漂移区充分耗尽,漂移区电流分布均匀,具有通态压降低、静态损耗小的特点,这对于节能设备有着重要的意义.

3) 沟槽阳极结构大大减小了器件面积,降低了成本,提高了集成度,但是特征导通电阻偏大.因此,在不影响其他特性的情况下,如何降低器件特征导通电阻将是重点研究内容之一.

参考文献:

- [1] CHEN Wan-jun, ZHANG Bo, LI Zhao-ji, et al. A novel high voltage LDMOS for HVIC with the multiple step shaped equipotential rings [J]. Solid-state Electronics, 2007, 51(3): 394-397.
- [2] ADAN A O, NAKA T, KAGISAWA A, et al. SOI as a mainstream IC technology [C]//SOI Conference, Florida, October 5-8, 1998: 9-12.
- [3] XIE Gang, ZHANG Bo. Self-clamping thyristor mode LIGBT based on SOI [C]//EDSSC, Hongkong, December 8-10, 2008: 1-4.
- [4] PATHIRANA V, NAPOLI E, UDREA F, et al. An analytical model for the lateral insulated gate bipolar transistor (LIGBT) on thin SOI [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(6): 1521-1528.
- [5] CHEN Wu-jun, ZHANG Bo, LI Zhao-ji. Realizing high breakdown voltage SJ-LDMOS on bulk silicon using a partial n-buried layer [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(3): 355-360.
- [6] KIM H W, KIM S C, SEO K S, et al. Device

- characteristics of the SOI LIGBT with dual-epi layers [C]//International Power Electronics and Motion Control Conference, Xi'an, August 14-16, 2004: 859-862.
- [7] KHANNA V K, KUMAR A, SOOD S C, et al. Investigation of degeneracy of current-voltage characteristics of asymmetrical IGBT with n-buffer layer concentration [J]. *Solid State Electronics*, 2001, 45(10): 1859-1865.
- [8] OH J K, KIM D Y, LEE B H. A dual-gate shorted-anode silicon-on-insulator lateral insulated gate bipolar transistor with floating ohmic contact for suppressing snapback and fast switching characteristics [J]. *Microelectronics Journal*, 1999, 30(6): 577-581.
- [9] BYEONA D S, CHUN J H, LEE B H, et al. The separated shorted-anode insulated gate bipolar transistor with the suppressed negative differential resistance regime [J]. *Microelectronics Journal*, 1999, 30(6): 571-575.
- [10] CAI Jun, SIN J K O. Latch-up characteristics of a lateral trench gate conductivity modulated power transistor [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 1998, 29(4): 481-486.
- [11] CAI Jun, SIN J, MOK P, et al. A new lateral trench gate conductivity modulated power transistor [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, 46(8): 1788-1793.
- [12] DISNEY D R, PEIN H B, PLUMMER J D. A trench gate LIGBT structure and two LMCT structures in SOI substrates [C] // International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, Switzerland, May 31-June 2, 1994: 405-410.
- [13] KANG Ey-goo, MOON Seung-hyun, SUNG Man-young. A new trench electrode IGBT for having superior electrical characteristics for power IC systems [J]. *Microelectronics Journal*, 2001, 32(8): 641-647.
- [14] HAN Seung-young, NA Long-min, CHOI Yearn-ik, et al. An analytical model of the breakdown voltage and minimum epi layer length for RESURF pn diodes [J]. *Solid State Electronics*, 1995, 39(8): 1247-1248.
- [15] MEER H, MEYER K. Threshold voltage model for deep-submicron fully depleted SOI CMOS transistors including the effect of source/drain fringing fields into the buried oxide [J]. *Solid State Electronics*, 2001, 45(4): 593-598.
- [16] HENKEL I, FEILER W, KOSTKA A. A two dimensional analytical model for the current distribution in a lateral IGBT [J]. *Solid State Electronics*, 2001, 45(10): 1725-1732.
- [17] ZHANG Hai-peng, SUN Ling-ling, JIANG Li-fei, et al. Process simulation of trench gate and plate and trench drain SOI NLIGBT with TCAD tools [C] // APCCAS, Macao, November 30-December 3, 2008: 1037-1040.

(责任编辑 吕小红)