

低导通电阻沟槽栅极 LIGBT 的模拟研究

李 婷, 王 颖, 陈宇贤, 高松松, 程 超

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 横向绝缘栅双极晶体管 (LIGBT) 采用少数载流子的注入来降低导通电阻, 完成了 $5\ \mu\text{m}$ 外延层上普通 LIGBT (C-LIGBT)、 $3\ \mu\text{m}$ 外延层上的 Trench Gate LIGBT (TG-LIGBT) 设计及仿真. 研究了利用沟槽结构改善 LIGBT 的正向特性和利用 RESURF 技术改善 TG-LIGBT 的反向特性. 通过 Silvaco TCAD 软件验证了了击穿电压大于 500 V 的两种结构 LIGBT 设计, 实现了导通压降为 1.0 V, 薄外延层上小元胞尺寸, 且有低导通电阻、大饱和电流的 TG-LIGBT 器件.

关键词: LIGBT; 沟槽; 击穿电压; 导通电阻; 导通压降

中图分类号: TN387.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2012)01-0078-04

Performance Simulation and Analysis of Trench Gate Lateral Insulated Gate Bipolar Transistor with Low on-state Resistance

LI Ting, WANG Ying, CHEN Yu-xian, GAO Song-song, CHENG Chao

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

Abstract: LIGBT has the advantage of very low on-resistance because of minority carriers injection. The optimization and simulation of this article is completed within two structures: $5\ \mu\text{m}$ conventional LIGBT (C-LIGBT) and $3\ \mu\text{m}$ Trench Gate LIGBT (TG-LIGBT) with epitaxial layer. The purpose of this thesis is to improve on-state performance based on trench gate and off-state performance through RESURF. Two over 500 V breakdown voltage LIGBT are investigated under the Silvaco TCAD software. A lower on-state resistance TG-LIGBT has been realized in cell-size thin epitaxial layer under 1.0 V of forward voltage. Moreover, TG-LIGBT exploits the structure of trench electrode to decrease chip size in forward voltage circumstance.

Key words: LIGBT; trench; breakdown voltage; on-state resistance; forward voltage

0 引 言

横向绝缘栅双极晶体管 (LIGBT) 是由 BJT 和 MOS 组成的复合全控型电压驱动式电力电子器件, 兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低导通电阻两方面优点. 从根本上解决了 LDMOS 所具有的器件耐压与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^[1-3].

从最初的表面栅 MOSFET 发展到现在的沟槽栅 MOSFET, 挖槽技术已经成为功率 MOSFET 工艺基础. 随着对器件性能要求的不断提高和挖槽技术的成熟, 现在的沟槽栅 MOSFET 向着越来越精细密集的结构发展, 元胞尺寸不断减小. 同时 LIGBT 本文将沟槽结构应用到 LIGBT 中, 达到减小元胞面积, 降低导通电阻^[4-5].

收稿日期: 2010-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(60906048); 黑龙江省青年科学基金(QC2009C66).

作者简介: 李 婷(1986—), 女, 硕士研究生;

王 颖(1977—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wangying01@hrbeu.edu.cn.

国际上目前主要开展的是薄外延导电硅层的高、低压隔离技术研究. 高压集成技术中关键的高压器件部分还是使用厚度为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 厚的外延层, 这主要是为了满足横向器件纵向耐压的需要^[6-7]. 但这么厚的外延层在工艺上势必增加了隔离的难度. 为了满足 HVIC 和 SPIC 高、低压兼容的需要, 在硅基中采用薄外延横向技术已成为发展的方向. 选择薄外延层的另一原因就是更适合 PN 结隔离^[8-9]. 本文利用 RESURF 技术优化 TG-LIGBT 结构, 使外延层减薄到 $3 \mu\text{m}$.

1 结构及工作原理

N 沟道 LIGBT 工作时, 通过在栅极-发射极间加阈值电压 V_T 以上的正电压, 在栅极电极正下方的 P 层上形成反型层(沟道), 开始从阴极下的 N^+ 层注入电子, 该电子为 PNP 晶体管的少数载流子. 从 P^+ 阳极层开始流入空穴, 进行电导率调制, 所以可以降低集电极-发射极间饱和电压^[6,13].

图 1、图 2 分别表示沟槽栅极 LIGBT (Trench Gate LIGBT, TG-LIGBT) 和普通 LIGBT (Conventional LIGBT, C-LIGBT). TG-LIGBT 结构与 C-LIGBT 在结构上的主要区别在于: 1) 栅阴极位置发生调换; 2) 栅极沟道由水平沟道转换为垂直沟道^[9-11]. 3) N 型缓冲层提高器件耐压, 降低导通电阻. 在较高阳极电压下, 漂移区即外延层(利用结隔离单 RESURF 技术设计) 全耗尽, 可起到降低表面电场, 提高耐压的作用. 高阻漂移区的存在提高了击穿电压, 并使阳极-阴极两极之间的寄生电容减少, 有利于提高频率特性^[12-14]. N 沟道 LIGBT 工作时, 通过在栅极-发射极间加阈值电压 V_T 以上的正电压, 在栅极电极正下方的 P 层上形成反型层, 开始从阴极下的 N^+ 层注入电子, 该电子为 PNP 晶体管的少数载流子. 从 P^+ 阳极层开始流入空穴, 进行电导率调制, 所以可以降低集电极-发射极间饱和电压^[9,14].

TG-LIGBT 在导通过程中, 大量空穴可直接被 P^+ 区收集, 不再需要经过 N^+ 区下的 P 基区电阻 R_p , 使得流过 R_p 的电流大大减小; 当栅极所加电压为正, 由于沟道形成的反型层的作用, 也在一定程度上减小了流过 R_p 的空穴流的密度, 从而进一步有效的抑制了闩锁效应的发生. 而且为了达到减小 R_p 的目的, 应尽量减小 N^+ 区的长度, 但由于光刻精度的限制, 目前 N^+ 区最小只能做到 $8 \mu\text{m}$. 这里采用 P^+ 区与 N^+ 区重叠的结构, 可以将 N^+ 区做得很小, 从

而有效抑制了闩锁效应^[11-17].

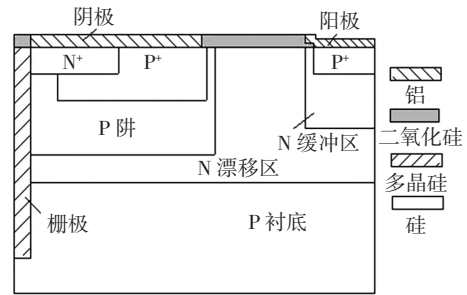


图 1 TG-LIGBT 结构

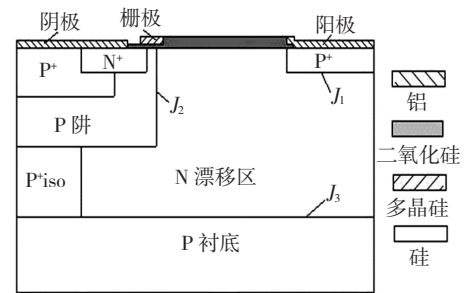


图 2 C-LIGBT 结构

单 RESURF 就是通过改变漂移区的尺寸比, 由纵向结构变成横向浅结结构时, 使高压漂移区内对应的耗尽电荷总量 Q_{nepi} 不变. 这样二维电场交叠效应将使 PN 结曲率引起的表面电场有效弱化, 实现了高压漂移区浅结结构的设计^[12-13]. 当 Q_{nepi} 在一定范围内时, 纵向二极管在 N_{nepi} 侧的耗尽区与横向二极管在 N_{nepi} 侧的耗尽区连接, 使得横向二极管耗尽区宽度与没有 P 型衬底横向二极管的耗尽区宽度相比有大幅度的增加. 因此在 P 阱/ N^+ 外延结处的横向电场比一维二极管的明显降低, 从而可提高器件击穿电压^[13-14]. 本文利用 Single RESURF 原理设计的 TG-LIGBT 和 C-LIGBT 结构参数如表 1 所示. 两种器件的 P^+ 阴极区结深都为 $1 \mu\text{m}$, P 阱区结深都为 $2 \mu\text{m}$, P^+ 阳极区结深都为 $0.5 \mu\text{m}$, N^+ 阴极区结深都为 $0.5 \mu\text{m}$, N^+ 阴极区长度都为 $10 \mu\text{m}$.

表 1 LIGBT 的结构参数

参数名称	TG-LIGBT	C-LIGBT
栅氧化层厚度/ μm	0.08	0.1
N 漂移区厚度/ μm	3	5
N 漂移区长度/ μm	40	62.5
N 漂移区浓度/ cm^{-3}	1.5×10^{15}	9×10^{14}
槽栅深度/ μm	5	—
槽栅长度/ μm	2	—
P^+ iso 结深/ μm	—	3
P 阱浓度/ cm^{-3}	2×10^{16}	5×10^{16}
器件长度/ μm	70	97.5

2 结果及分析

沟槽栅极结构有效地减少原胞尺寸和增加沟道密度,具有大电流,高电压等特点能够更为广泛的应用于 PIC. 根据大量仿真得到 TG-LIGBT 和 C-LIGBT 两种器件的击穿电压、阈值电压、饱和电流、导通压降及导通电阻,如表 2 所示.

表 2 LIGBT 的模拟特性参数

	TG-LIGBT	C-LIGBT
击穿电压/V	513.1	505.0
导通压降/V	1.0	0.9
阈值电压/V	2.2	1.9
饱和电流/(mA/mm)	1034	246
导通电阻/($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	26.5	109.6

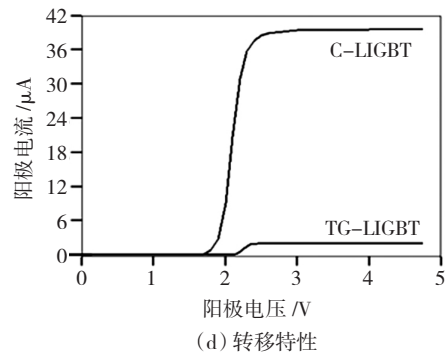
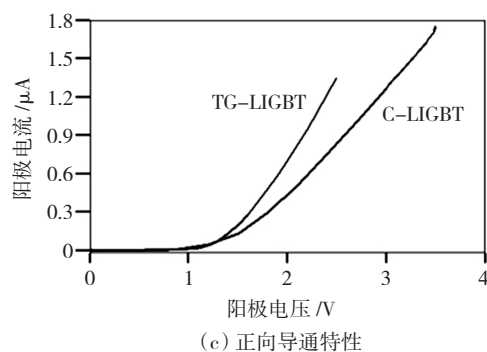
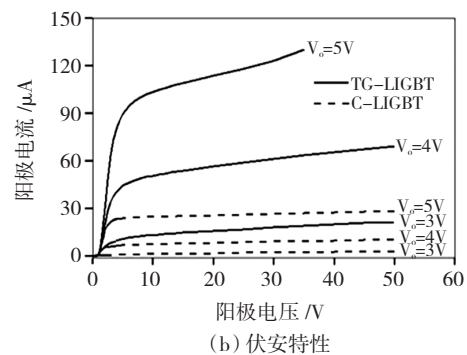
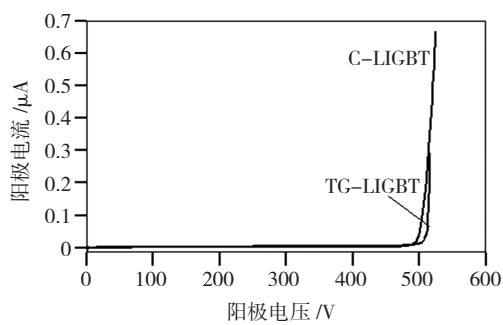


图 3 LIGBT 的模拟特性曲线

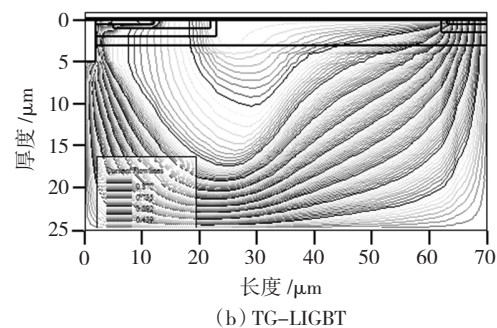
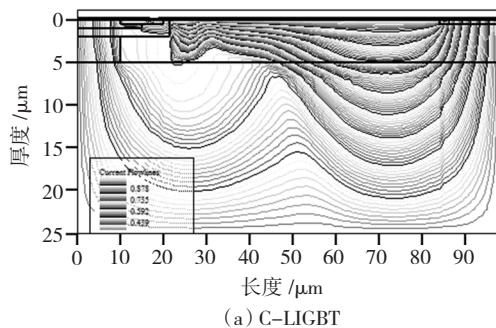


图 4 $V_G = 5\text{V}$ 时 LIGBT 电流分布

利用 DevEdit 软件建模并通过 ATLAS 软件仿真,得到两种器件(C-LIGBT 和 TG-LIGBT)的正向阻断特性、伏安特性、正向导通特性、转移特性曲线,分别如图 3 中(a)、(b)、(c)、(d)所示.

可见,在同等耐压下,TG-LIGBT 把 MOS 沟道移动到垂直于硅片表面的位置,使元胞尺寸减小,提高硅片利用率.满足一定耐压时,饱和电流比 C-LIGBT 要大的多,更适合大电流场合应用;同时,TG-LIGBT 拥有导通电阻小,功耗小的特点.

图 4 中(a)、(b)分别表示栅压为 5V 时 C-LIGBT、TG-LIGBT 的电流分布.可以观察到前者的 N 漂移区表面部分电流密度大;后者的 N 漂移区电流在体区密度大些,所以 TG-LIGBT 的饱和电流大.同时电导调制效应增强,使得导通电阻下降.

对于体硅结隔离器件而言,当阳极电压升高时,由于衬底掺杂浓度较小,在垂直方向上耗尽层主要向衬底扩展,即衬底承受了大部分外加电压,器件的纵向耐压主要是全耗尽的 N 漂移区及部分耗尽的 P 衬底耐压之和;同时 N 外延/P 阱结也是反向偏置,其耗尽层则向 N 外延区水平扩展,器件的横向耐压主要是 N 外延/P 阱结所承担电压^[7]. TG-LIGBT 和 C-LIGBT 的击穿发生在 P 阱/N 外延结处,两种器件击穿时电场分布如图 5、图 6 所示.

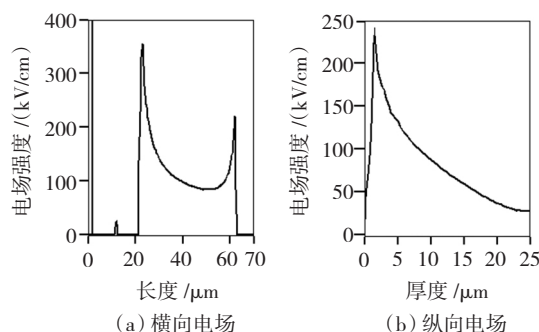


图 5 TG-LIGBT 击穿时电场分布

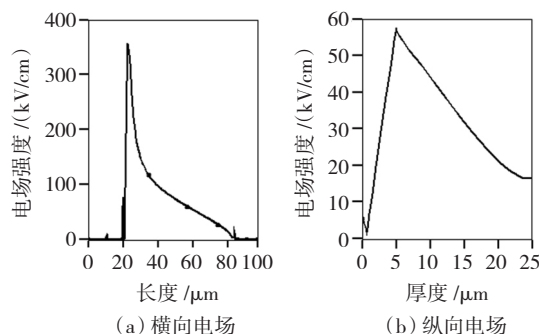


图 6 C-LIGBT 击穿时电场分布

3 结 语

本文完成了 5 μm 外延层上 C-LIGBT 和 3 μm 外延层上的 TG-LIGBT 设计与仿真,将两者正向和反向特性进行了比较. 本文不仅利用少子注入特点降低了功率器件的导通电阻而且利用沟槽栅极结构继续降低沟道电阻同时减小了元胞面积、较大幅度提高了饱和电流.

参 考 文 献:

[1] CHEN Wanjun, ZHANG Bo, LI Zhaoji, 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] CAI Jun, JOHNNY K O Sin, WAI Tung Ng, et al. Latch-up Characteristics of a Lateral Trench Gate Conductivity Modulated Power Transistor [J]. The Journal of University of Science and Technology of China, 1998, 29(4): 424-427.

[3] CAI Jun, JOHNNY K O, Sin, MOK K T, et al. A New Lateral Trench Gate Conductivity Modulated Power Transistor [J]. Electron Devices, IEEE Transactions on, 1999, 46(8): 1788-1793.

[4] Disney D R, PENI 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, 1994: 405-410.

[5] KANG Ey Goo, SUNG Man Young. A Small Sized Lateral Trench Electrode IGBT for Improving Latch-up and Breakdown Characteristics [J]. Solid-State Electronics, 2002, 46(2): 295-300.

[6] 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.

[7] KANG Ey Goo, MOON Seung Hyun, KIM Sangsig, et al. A Novel Trench-type LIGBT Having Superior Electrical Characteristics. IECON [C] //Annual Conference of the IEEE, 2001: 811-815.

[8] ZHANG H P, SUN L L, JIANG L F, et al. Process Simulation of Trench Gate and Plate and Trench Drain SOI NLIGBT with TCAD Tools [C] //Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, Macao, 2008: 1037-1040.

[9] KANG Ey Goo, KIM Sangsig, SUNG Man Young. Simulation of a New Lateral Trench IGBT Employing Effective p^+ Diverter for Improving Latch-up Characteristics [J]. Microelectronics Journal Denver, 2001, 32(29): 749-753.

[10] GREEN D W, SWEET M, VERSHININ K V, et al. Performance Analysis of the Segment npn Anode LIGBT [J]. Electron Devices, IEEE Transactions on, 2005, 52(11): 2482-2488.

[11] VASANTHA Pathirana, ETTORRE Napoli, FLORIN Udrea, et al. An Analytical Model for the Lateral Insulated Gate Bipolar Transistor (LIGBT) on Thin SOI [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2006, 21(6): 1521-1528.

[12] ZHANG H P, SUN L L, JIANG L F, et al. Process Simulation of Trench Gate and Plate and Trench Drain SOI nLDMOS with TCAD Tools [C] //IEEE International Conference on, 2008: 92-95.

[13] ZHANG Haipeng, JIANG L F, SUN L L, et al. A Novel SOI LDMOS with a Trench Gate and Field Plate and Trench Drain for RF applications [C] //International Symposium on, 2007: 34-39.

[14] HAN Seung-Youp, NA Jong-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.

(编辑: 温泽宇)