

# 沟槽形状对硅基沟槽式肖特基二极管电学特性的影响

翟东媛<sup>1)</sup> 赵毅<sup>1)†</sup> 蔡银飞<sup>2)</sup> 施毅<sup>1)</sup> 郑有焯<sup>1)</sup>

1)(南京大学电子科学与工程学院, 南京 210093)

2)(杭州启沛科技有限公司, 杭州 311121)

(2014年1月24日收到; 2014年3月8日收到修改稿)

随着对电子产品节能环保要求的提高, 对广泛应用于电子产品的肖特基二极管电学性能的要求也越来越高. 含金属-氧化物-半导体结构的沟槽式肖特基二极管 (trench barrier Schottky diodes, TMBS) 由于其优异的性能而备受青睐. 沟槽结构对提高肖特基二极管性能起着至关重要的作用, 但是关于沟槽形状对二极管电学性能的影响尚未见有深入的研究报道. 本文提出了两种新型的沟槽结构——圆角沟槽和阶梯型沟槽. 通过模拟研究发现, 圆角沟槽与传统的直角沟槽 TMBS 器件相比, 在维持同样的漏电流和正向导通电压的条件下, 击穿电压可以提高 15.8%. 阶梯沟槽与传统直角沟槽 TMBS 器件相比, 可以在击穿电压不减小的情况下, 漏电流降低 35%, 正向导通电压仅略有增加. 这归结于圆角沟槽和阶梯沟槽对有源区内部电场强度分布的调节.

**关键词:** 肖特基二极管, 金属-氧化物-半导体结构, 沟槽式肖特基二极管, 沟槽形状

**PACS:** 72.20.-i, 73.40.Lq, 77.22.Jp, 84.70.+p

**DOI:** 10.7498/aps.63.127201

## 1 引言

肖特基二极管由于其低的正向导通压降和快速的反向恢复时间, 在功率整流器件中得到了广泛应用. 但是在传统的平面硅肖特基二极管中, 由于其反向漏电主要来自于热电子发射<sup>[1]</sup>, 而不是 p-n 结一样来自于产生复合电流<sup>[2]</sup>, 因此, 在相同的面积和电压下, 平面肖特基结二极管的反向漏电流比 p-n 结大很多. 另一方面, 在高压器件中, 由于寄生电阻的影响, 平面肖特基二极管的低正向导通电压的优势也不明显了. 为了改善平面肖特基二极管的这些缺点, 1994年, Mehrotra 和 Baliga<sup>[3]</sup> 提出了沟槽式肖特基二极管 (trench barrier Schottky diodes, TMBS) 结构器件, 在该器件中, 电场耦合作用<sup>[4]</sup> 改变了一定电压下的电场强度分布, 将电场强度的最大值从肖特基结处转移到了硅的内部, 有效地抑制了反向偏压下由镜像力引起的肖特基

势垒降低效应, 从而减小了肖特基结的反向漏电流<sup>[5,6]</sup>; 另一方面, TMBS 结构还可以降低有源区中电场强度的最大值, 从而实现二极管反向击穿电压的增加, 因此, 在保证维持同样击穿电压的前提下, 可以使用比较高掺杂浓度的外延层, 从而实现较低的正向导通电压.

自从 TMBS 结构器件被提出以来, 不少研究者致力于通过改变 TMBS 器件的参数来进一步提高器件性能. 如 Baliga 和 Mahalingam<sup>[7]</sup> 通过改善有源区的掺杂分布来改善器件的击穿电压, 但是同时也导致了其反向漏电流的增加. Juang 等<sup>[8]</sup> 通过在沟槽底部引入 p-n 结来改善器件在沟槽底部的电场强度分布, 达到增加击穿电压的作用等. 但是作为 TMBS 结构器件中非常关键的沟槽结构, 其如何影响二极管的电学特性尚未见深入的研究报道. 虽然已有研究者对于梯形沟槽 TMBS 的性能进行了研究<sup>[9]</sup>, 但是性能改善并不明显. 本文设计了两种新结构沟槽 (圆角沟槽和阶梯型沟槽) TMBS 器件,

† 通讯作者. E-mail: yzhao@nju.edu.cn

并且通过使用器件模拟软件 Medici<sup>[10]</sup> 对器件性能进行了模拟. 模拟结果表明, 在维持同样的漏电流和正向导通电压的条件下, 圆角沟槽 TMBS 器件 (圆角 TMBS) 比传统的直角沟槽 TMBS 器件 (传统 TMBS) 的击穿电压增加了 15.8%; 阶梯沟槽 TMBS 器件 (阶梯 TMBS) 与传统 TMBS 相比, 可以在击穿电压不减小的情况下, 实现漏电流降低 35%, 正向导通电压仅略有增加.

## 2 器件参数

图 1(a) 为传统 TMBS 的器件结构示意图. 图 1(b) 和 (c) 为本文提出的圆角 TMBS 和阶梯 TMBS 的器件结构示意图. 与传统 TMBS 相比, 圆角 TMBS 中的沟槽变成了大曲率半径的圆角. 阶梯 TMBS 与传统 TMBS 相比, 减小了上部 (接近肖特基结的部分) 沟槽之间的间距 ( $a_1$ ).

在以下的模拟研究中, 三种结构中共同的一些器件参数都维持不变, 其中包括: 使用硅作为半导体材料; N-外延层的厚度  $h = 4 \mu\text{m}$ , 掺杂浓度都为  $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ; 器件阳极电极端肖特基结的势垒金属的功函数为 5 eV; 沟槽的总深度  $d = 1.65 \mu\text{m}$ ; 沟槽中氧化层厚度  $t_{\text{ox}} = 2000 \text{ \AA}$ .

## 3 模拟结果

### 3.1 影响传统 TMBS 击穿电压的因素

通过对传统 TMBS 性能的模拟, 本文研究了直角效应对器件电学性能的影响, 并提出了改进的方法. 模拟中除了第 2 节中列出的器件参数外, 所使用的其他器件参数为: 沟槽间有源区宽度  $a = 0.7 \mu\text{m}$ ; 沟槽的宽度  $t = 1.15 \mu\text{m}$ .

模拟结果表明, 器件发生雪崩击穿后, 在

沟槽中间的有源区, 电流路径仍沿着沟槽边缘 (图 2(a)), 而由雪崩击穿的机理<sup>[11,12]</sup> 决定器件击穿会首先发生在器件中电场强度最大的部位, 所以击穿时器件中的最大场强必定在沿着沟槽边缘的某个部位. 为此, 我们模拟了在击穿电压下离沟槽不同距离处的电场强度的分布. 模拟结果如图 2(b) 所示, 其中三条曲线分别表示器件中  $x$  坐标为 0.66, 0.8, 1  $\mu\text{m}$  位置处  $y$  坐标从 1—4  $\mu\text{m}$  处的电场强度分布, 也就是沿着图 2(a) 中除了电流路径以外的三条线的电场强度的分布, 这三条直线距离沟槽边缘为 0.01, 0.2 和 0.35  $\mu\text{m}$ . 从模拟结果可以看出, 在器件击穿时, 器件的电场强度的最大值位于沟槽底部临近沟槽的区域, 所以器件击穿后电流路径沿着沟槽边缘. 在图 2(b) 中还可以发现, 0.66  $\mu\text{m}$  处的电场强度曲线在深度 1.8—1.55  $\mu\text{m}$  之间有一段斜率很大的快速增长, 而此段快速增长导致在一定的反向偏压下器件中最大电场强度的增加, 也就导致器件耐压的降低. 如果能够抑制这段快速增长区域, 或者通过其他方法增加器件其他区域的电场强度, 就能更有效地利用器件的其他部位来分压, 从而减小器件中的最大电场强度, 进而增大器件的击穿电压.

本文认为, 导致上述电场强度快速增长的原因是沟槽中的氧化层与有源区间形成的直角以及沟槽中氧化层与金属间形成的直角共同作用的结果, 以下简称直角效应. 沟槽中氧化层与金属之间的直角的作用很容易理解, 金属的尖端效应导致直角处电荷的集聚, 此集聚的电荷在器件中场强最大的部位产生的附加场强 (左上) 与器件中其他部位电荷在此处产生的场强的方向 (左上) 成锐角, 所以此效应会导致场强的增加. 为了证明氧化层与有源区形成的直角的作用, 我们设计了图 3(a) 所示的结构, 此结构中去掉了薄层金属-氧化物-半导体 (MOS)

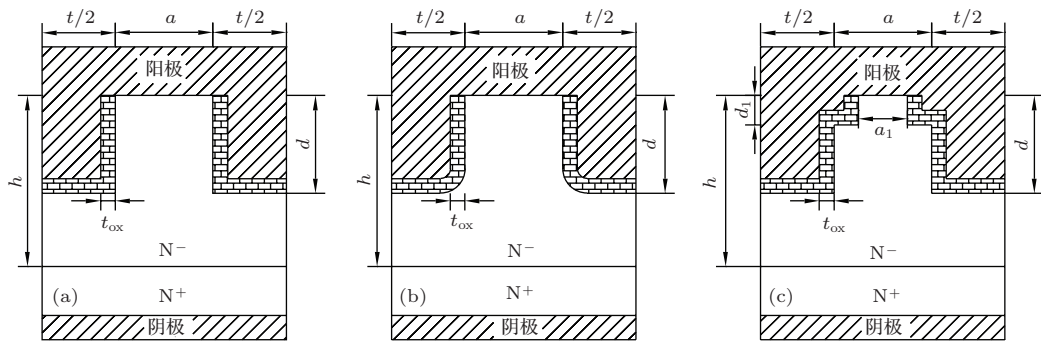


图 1 (a) 传统 TMBS 的结构; (b) 圆角 TMBS 的结构; (c) 阶梯 TMBS 的结构

结构的影响. 在模拟中, 为了使器件上可以加很高的反向电压, 我们去掉了雪崩击穿的模型, 得到了在器件耗尽到同图 2 中器件击穿时相同的深度处时 (需要在器件上加 185 V 的反向电压, 器件中沟槽附件的电荷分布就会与传统 TMBS 击穿时相同) 沟槽边缘的电场强度分布线, 如图 3(b) 所示. 可见有源区与氧化层之间的尖角确实有使沟

槽底部边缘部位电场强度迅速增加的作用, 但是同时也可以发现, 去掉薄层 MOS 结构的 TMBS 结构中 0.66  $\mu\text{m}$  处的场强分布曲线中, 在场强迅速增长区域里, 其增长速度不如含薄层 MOS 结构的传统 TMBS 的高, 这主要是由于上述的金属尖端效应的作用. 综上所述, 我们证明了传统 TMBS 结构中的直角效应确实会导致器件耐压的降低.

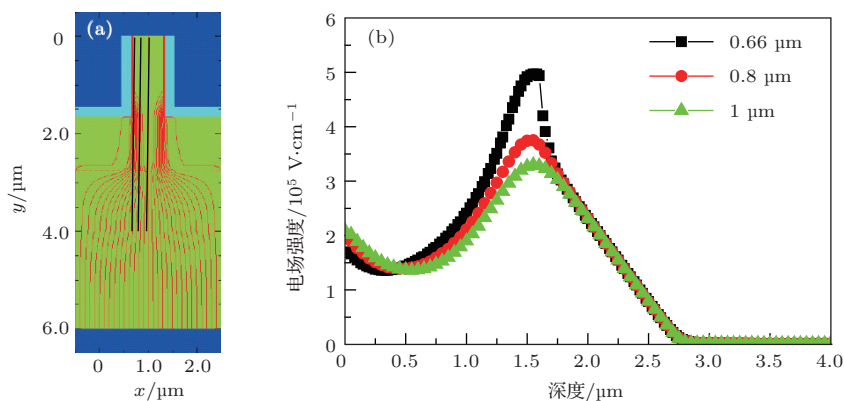


图 2 (网刊彩色) (a) 传统 TMBS 击穿时电流的路径, 其中有源区有三条直线, 分别是  $x$  坐标位于 0.66, 0.8 和 1  $\mu\text{m}$  处,  $y$  坐标为  $y = 0-4 \mu\text{m}$  的线; (b) 击穿电压下沿着这三条线的电场强度分布

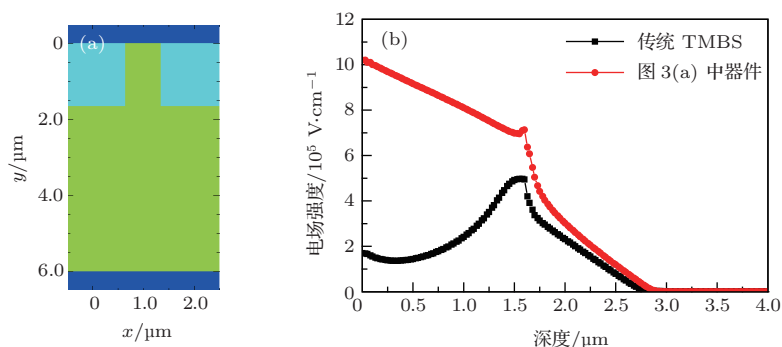


图 3 (网刊彩色) (a) 去除薄层 MOS 结构的传统 TMBS 器件结构示意图; (b) 图 3(a) 中器件于 185 V 下及传统 TMBS 于击穿电压下在  $x = 0.66 \mu\text{m}$ ,  $y = 0-4 \mu\text{m}$  的电场强度分布

### 3.2 通过圆角沟槽改善 TMBS 二极管的性能

为了消除直角效应所带来的负面效应, 比较直接的做法是把传统 TMBS 中的直角变成如图 4 中的圆角. 模拟结果表明, 在维持同样的漏电流和正向导通电压的条件下, 圆角 TMBS 比传统 TMBS 器件具有更高的击穿电压.

图 5 是传统 TMBS 与圆角 TMBS 的反向和正向电学性能曲线的对比. 可以看出, 圆角 TMBS 二极管的击穿电压相比传统的直角沟槽器件有了明显的增加. 图 2(a) 中的传统 TMBS 器件的击穿电压为 51.8 V ( $10^{-3} \text{ A/cm}^2$ ), 而图 4 所

示的圆角 TMBS 器件的击穿电压增加到了 60 V ( $10^{-3} \text{ A/cm}^2$ ), 增加了 15.8%.

由于击穿电压与器件中的最大电场强度密切相关, 而由图 4 可以知道在圆角沟槽器件击穿时电流的路径也是沿着沟槽的边缘的, 所以在图 6 中我们将相同反向电压下 (40 V 时), 圆角沟槽与传统直角沟槽器件中沿沟槽边缘、 $x$  坐标位置为 0.66  $\mu\text{m}$  处的电场强度在  $y = 0-4 \mu\text{m}$  的分布曲线做对比. 可以看出, 在圆角沟槽中由于直角效应引起的电场强度迅速增加的效应被减弱了, 所以使得圆角沟槽的器件可以达到更高的击穿电压. 因为 Medici 模拟条件所限, 沟槽底部的尖角并未完全被消除, 所以在圆角 TMBS 中仍然会有一个电场强度的小尖

角. 在实际器件制备过程中, 可以通过控制刻蚀工艺实现尽可能平滑的圆角.

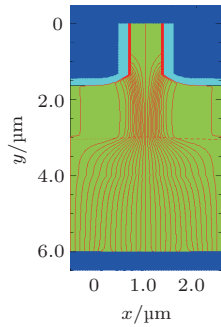


图4 (网刊彩色) 圆角 TMBS 击穿时电流路径图

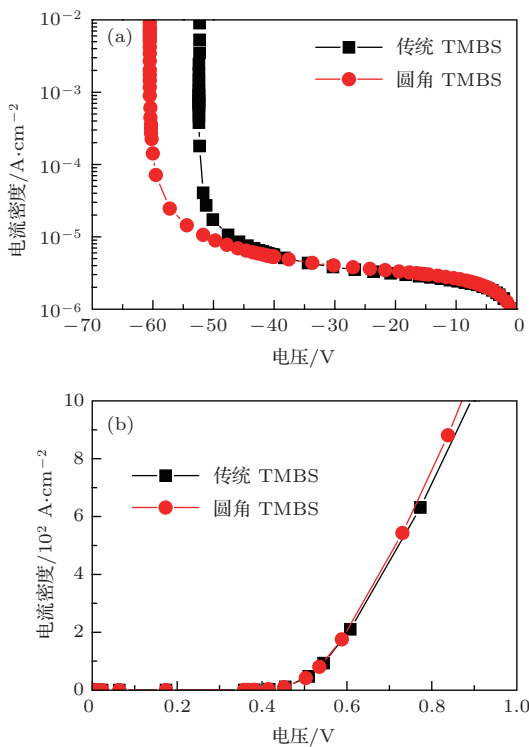


图5 (a) 传统 TMBS 与圆角 TMBS 反向  $I$ - $V$  曲线;  
(b) 传统 TMBS 与圆角 TMBS 正向  $I$ - $V$  曲线

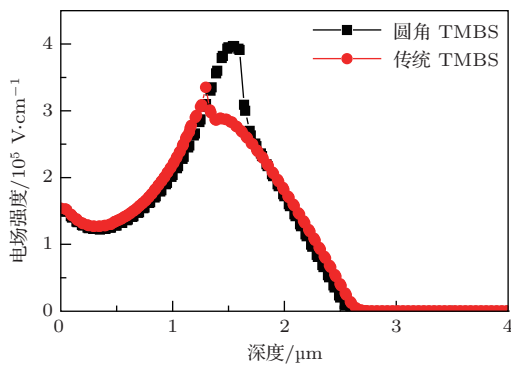


图6 40 V 下传统 TMBS 与圆角 TMBS 在  $x = 0.66 \mu\text{m}$ ,  $y = 0-4 \mu\text{m}$  的电场强度分布

对于肖特基二极管器件, 我们不仅需要关心其击穿电压, 同时也不能忽视反向漏电流和正向导通电压. 如图5所示, 圆角 TMBS 二极管在器件击穿电压增加的同时, 漏电流并没有增加. 同时, 由于圆角 TMBS 器件的寄生电阻实际是略有减小, 因此正向导通电压也会略有降低(图5(b)).

所以, 与传统 TMBS 二极管器件相比, 圆角 TMBS 能在维持同样的漏电流和正向导通电压的条件下, 具有更高的击穿电压.

### 3.3 通过阶梯沟槽改善 TMBS 二极管性能

尽管圆角 TMBS 已经能够非常有效地提高器件的击穿电压, 但是却无法改善器件的漏电流, 和传统 TMBS 一样, 圆角 TMBS 也只能通过减小沟槽之间的间距来减小器件的漏电流, 但是这样会降低击穿电压并增大正向导通电压.

基于以上矛盾, 我们设计了应用两个直角沟槽的阶梯 TMBS 结构(图1(c)). 模拟结果表明, 阶梯 TMBS 器件与传统 TMBS 器件相比, 可以在击穿电压不减小(的情况下, 实现漏电流降低 35%, 而正向导通电压只是略有增加(约为 0.024 V,  $150 \text{ A/cm}^2$ ). 为了证明阶梯沟槽结构的优势, 我们与两种不同参数的传统 TMBS 结构器件的性能进行了对比. 三种器件的结构如图7所示. 其中模拟参数分别为: 1) 传统 TMBS 结构1(图7(a))有源区宽度  $a = 0.7 \mu\text{m}$ , 沟槽宽度  $t = 0.7 \mu\text{m}$ ; 2) 传统 TMBS 结构2(图7(b))有源区宽度  $a = 4 \mu\text{m}$ , 沟槽宽度  $t = 0.7 \mu\text{m}$ ; 3) 阶梯 TMBS 结构(图7(c))沟槽上部有源区宽度为  $a_1 = 0.4 \mu\text{m}$ , 下部有源区宽度  $a = 0.7 \mu\text{m}$ , 上部沟槽的深度  $d_1 = 0.7 \mu\text{m}$ , 沟槽的宽度  $t = 1 \mu\text{m}$ , 保持下部沟槽宽度与和图7(a)中的沟槽宽度  $t$  一样有相同的宽度  $0.7 \mu\text{m}$ .

阶梯 TMBS 结构事实上是在传统 TMBS 结构的基础上, 将沟槽上部区域(接近肖特基结处)的沟槽间距减小. 这个减小将带来两个作用相反的效应: 一个是由于上部沟槽的直角效应导致的电场强度增加的效应; 另一个是由于上部沟槽间距的减小导致的电场耦合作用的增强, 从而使得电场强度降低的效应. 两种效应共同作用下阶梯 TMBS 与传统 TMBS 在 40 V 下沿沟槽边缘的电场强度分布如图8(a)所示. 从图中可知, 与传统 TMBS 器件相比, 在相同电压下阶梯 TMBS 器件中的最大场强仍在器件的下部沟槽的底部边缘, 而最大场强

的值略有降低, 所以阶梯 TMBS 器件的击穿电压略有增大. 在器件未击穿之前漏电流在沟槽间各个部位都有, 如图 8 (a) 和 (b) 所示, 在相同电压下, 阶梯 TMBS 与传统 TMBS 相比, 不同  $x$  坐标位置处在肖特基表面的电场强度值都有所下降, 所以可以有效地减弱肖特基势垒降低效应, 从而实现低的漏电流.

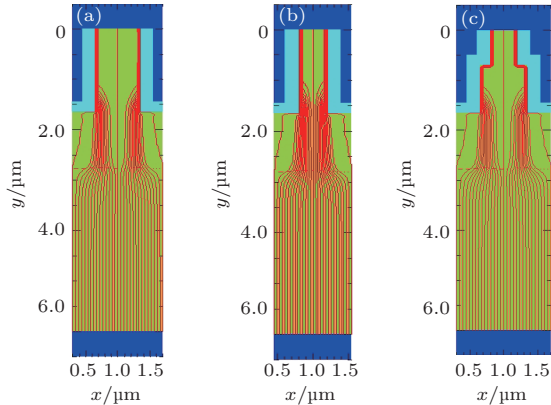


图7 (网刊彩色) TMBS 击穿时的电流路径图 (a)  $a = 0.7 \mu\text{m}$ , 传统 TMBS; (b)  $a = 0.4 \mu\text{m}$ , 传统 TMBS; (c) 阶梯 TMBS

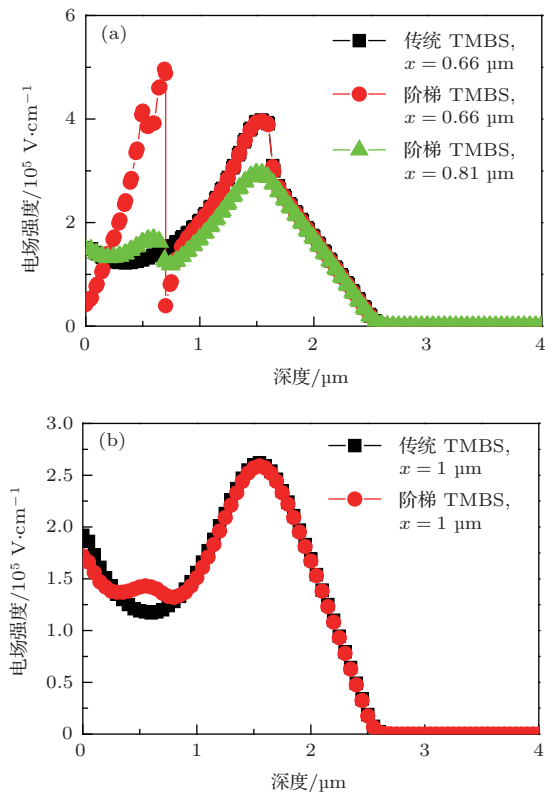


图8 40 V 下传统 TMBS 与阶梯 TMBS 在  $y = 0-4 \mu\text{m}$  的不同  $x$  坐标下的电场强度分布

图 9 (a) 和 (b) 为图 7 中三个器件反向和正向电学性能的模拟结果, 可以看出, 对于 7(c) 所示阶梯 TMBS 在 45 V 下的漏电流密度为  $8.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,

而图 7 (a) 所示的传统 TMBS 的漏电流密度为  $13.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , 阶梯 TMBS 比传统 TMBS 的漏电流低 35%, 同时击穿电压也略有增加, 而正向导通电压仅略有增加 (约为 0.024 V,  $150 \text{ A}/\text{cm}^2$ ). 而如果将传统 TMBS 沟槽间距减小, 即改为图 7 (b) 所示结构, 漏电减小的同时, 击穿电压也会有明显增加. 传统 TMBS 在 40 V 下沿沟槽边缘的电场强度分布如图 8 (a) 所示. 从图中可知, 与传统 TMBS 器件相比, 在相同电压下阶梯 TMBS 器件中的最大场强仍在器件的下部沟槽的底部边缘, 而最大场强的值略有降低, 所以阶梯 TMBS 器件的击穿电压略有增大. 在器件未击穿之前漏电流在沟槽间各个部位都有, 如图 8 (a) 和 (b) 所示, 在相同电压下, 阶梯 TMBS 与传统 TMBS 相比, 不同  $x$  坐标位置处在肖特基表面的电场强度值都有所下降, 所以可以有效地减弱肖特基势垒降低效应, 从而实现低的漏电流降低.

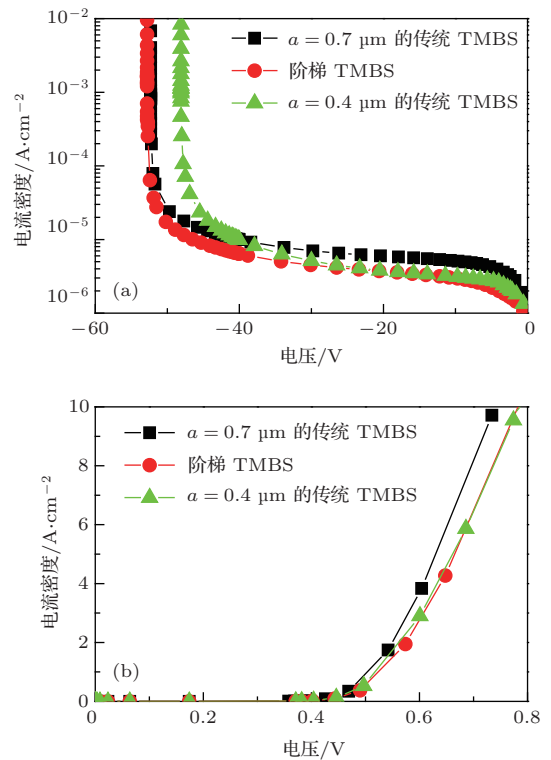


图9 有源区间距  $a = 0.7, 0.4 \mu\text{m}$  时传统 TMBS 与阶梯 TMBS 的  $I-V$  曲线 (a) 反向  $I-V$  曲线; (b) 正向  $I-V$  曲线

因为阶梯沟槽上部沟槽间有源区的宽度和深度都会影响器件的性能参数, 所以我们分别对这两个参数进行调节, 得到击穿电压、漏电以及器件的正向导通电压随这些参数的变化趋势. 图 10 方框中为图 7 (c) 中器件的性能. 模拟结果显示, 随着上部沟槽间距的减小和深度的增加, 器件的击

穿电压增加, 漏电减小, 但是正向导通电压会增加. 我们可以根据实际的应用需求来选择最佳的器件参数.

上述结果表明, 阶梯 TMBS 与传统 TMBS 相比较, 可以在击穿电压不减小, 正向导通电压只是略有增加的情况下, 实现漏电流降低 35%.

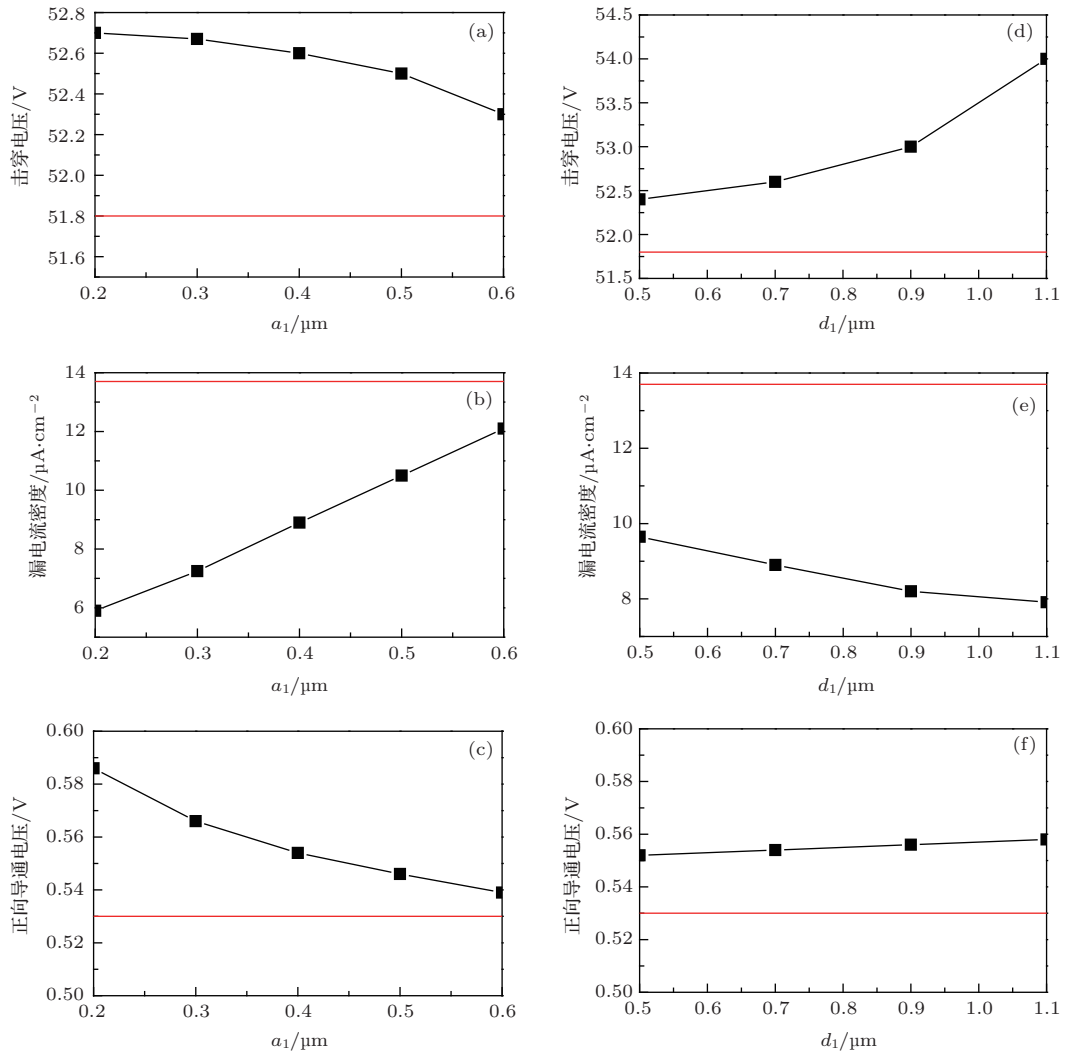


图 10 (a) 阶梯 TMBS 的击穿电压 (在电流密度达到时  $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$  所对应的电压) 随上部有源区宽度的变化; (b) 阶梯 TMBS 的漏电流密度 (45 V 下的漏电流密度) 随上部有源区宽度的变化; (c) 阶梯 TMBS 的正向导通电压 (在电流密度达到时  $150 \text{ A}/\text{cm}^2$  所对应的电压) 随上部有源区宽度的变化; (d) 阶梯 TMBS 的击穿电压随上部沟槽深度的变化; (e) 阶梯 TMBS 的漏电流密度随上部沟槽深度的变化; (f) 阶梯 TMBS 的正向导通电压随上部沟槽深度的变化; 其中各图中平行  $x$  轴的直线所对应的纵坐标值为有源区宽度为  $0.7 \mu\text{m}$  的传统 TMBS 二极管的相关性能数值

## 4 结 论

我们提出了两种新沟槽结构的 TMBS 二极管. 第一种是圆角 TMBS 结构, 该结构能有效消除传统 TMBS 结构中的直角效应, 在同样的漏电流和正向导通电压的条件下, 可以实现击穿电压提高 15.8%. 另一种是阶梯 TMBS 结构, 该结构合理地利用直角效应导致的局部电场强度增强效应, 与传统 TMBS 相比, 该结构器件可以在击穿电压不减小,

正向导通电压仅略有增加的情况下, 实现漏电流降低 35%.

## 参考文献

- [1] Padovani F A, Stratton R 1966 *Solid State Electron.* **9** 695
- [2] Sah C T, Noyce R N, Shockley W 1957 *Proc. IRE* **45** 1228
- [3] Mehrotra M, Baliga B J 1994 *Solid State Electron.* **38** 801

- [4] Baliga B J 1996 *Power Semiconductor Devices* (Boston: PWS Publishing Company)
- [5] Rideout V L, Crowell C R 1970 *Solid State Electron.* **13** 993
- [6] Sze S M 1981 *Physics of Semiconductor Devices* (2nd Ed.) (USA: Wiley Inter Science)
- [7] Mahalingam S, Baliga B J 1999 *Solid State Electron.* **43** 1
- [8] Juang M H, Yu J, Jang S L 2011 *Curr. Appl. Phys.* **11** 698
- [9] Li W Y, Ru G P, Jiang Y L, Ruan G 2011 *Chin. Phys. B* **20** 087304
- [10] MEDICI D-2010.03-0 a *2D Device Simulator* TMA Palo Alto USA
- [11] Mckay K G 1954 *Phys. Rev.* **94** 877
- [12] McIntyre R J 1966 *IEEE. Trans. Electron. Dev.* **13** 164

## Effect of the trench shape on the electrical properties of silicon based trench barrier schottky diode

Zhai Dong-Yuan<sup>1)</sup> Zhao Yi<sup>1)†</sup> Cai Yin-Fei<sup>2)</sup> Shi Yi<sup>1)</sup> Zheng You-Dou<sup>1)</sup>

1) (School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

2) (Hangzhou QP Chip Technology Co. Ltd, Hangzhou 311121, China)

( Received 24 January 2014; revised manuscript received 8 March 2014 )

### Abstract

With the globally enhancing demand for the energy saving and environmental protection of electronic products, the requirement for Schottky diode which is widely used in electronic products becomes higher and higher. The trench metal-oxide-semiconductor barrier Schottky (TMBS) diode is more and more favored because of its excellent performance. The shape of the trench plays an important role in determining the electrical properties of the Schottky diode. However, there is no intensive study on this point. In this study, we propose two novel trench structures, i. e., filleted corner trench and ladder trench. By performing the simulation with Medici, it is found that compared with the traditional trench TMBS diode, the filleted corner trench TMBS diode has a breakdown voltage with 15.8% increase under the conditions of the same leakage current and the forward turn-on voltage. Also, the ladder trench TMBS diode can reduce the leakage current by 35%, while have a breakdown voltage not smaller than the right angle trench TMBS and a forward turn-on voltage only a little bit higher than the right angle trench TMBS.

**Keywords:** Schottky diode, metal-oxide-semiconductor structure, trench barrier Schottky diodes, trench shape

**PACS:** 72.20.-i, 73.40.Lq, 77.22.Jp, 84.70.+p

**DOI:** 10.7498/aps.63.127201

† Corresponding author. E-mail: [yzhao@nju.edu.cn](mailto:yzhao@nju.edu.cn)