

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231120003

文章编号: 1672-9331(2024)04-0168-08

引用格式: 吴丽娟, 张腾飞, 张梦源, 等. 具有圆形P⁺区的1 200 V SiC JBS二极管的研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(4): 168-175, 187.Citation: WU Lijuan, ZHANG Tengfei, ZHANG Mengyuan, et al. Research on 1 200 V SiC JBS diode with circular P⁺ regions[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(4): 168-175, 187.

具有圆形P⁺区的1 200 V SiC JBS二极管的研究

吴丽娟, 张腾飞, 张梦源, 梁嘉辉, 刘梦姣, 杨钢

(长沙理工大学 物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】通过改变碳化硅(silicon carbide, SiC)结势垒肖特基二极管(junction barrier Schottky diode, JBS)的P⁺掺杂区的形状, 将常规SiC JBS条形分布的P⁺掺杂区优化为圆形P⁺掺杂区, 并两两之间以正三角形分布于肖特基接触之间。【方法】通过三维结构有限元仿真方法模拟以上两种SiC JBS结构的正反向特性, 优化P⁺掺杂区宽度和外延层掺杂浓度, 并进行对比分析。【结果】仿真结果显示, 两种结构的反向击穿电压均高于1 500 V, 圆形P⁺掺杂区JBS二极管的正向导通压降比条形P⁺掺杂区JBS二极管的低: 在正向电流密度为400 A/cm²时, 导通压降由条形P⁺结构的2.37 V降低至圆形P⁺结构的2.05 V, 降低了13.5%; 圆形P⁺结构在经过优化外延层掺杂浓度后, 其在正向电流密度为400 A/cm²时的导通压降为1.97 V, 较条形P⁺结构的降低了16.9%。相较于条形SiC JBS, 圆形P⁺结构具有更大的肖特基接触面积, 在保证击穿电压的同时可以获得更低的导通压降, 并通过优化器件的外延层掺杂浓度进一步降低器件的导通压降。【结论】本文将P⁺掺杂区形状由条形调整为圆形, 并以正三角形分布排列。这种调整增大了器件的肖特基接触面积, 优化了正向导通特性, 并通过优化器件的外延层掺杂浓度进一步提高了导通特性, 获得了更低的导通压降。

关键词: 热载流子二极管; 碳化硅; 结势垒肖特基二极管; 导通压降; 击穿电压。

中图分类号: TN311⁺.7

文献标志码: A

Research on 1 200 V SiC JBS diode with circular P⁺ regions

WU Lijuan, ZHANG Tengfei, ZHANG Mengyuan, LIANG Jiahui, LIU Mengjiao, YANG Gang

(School of Physics & Electronic Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to optimize the shape of the P⁺ doping region of the junction barrier Schottky (JBS) diode of silicon carbide (SiC) by changing the strip-shaped P⁺ doping regions in conventional SiC JBS to the circular P⁺ doping regions, which are distributed between the Schottky contacts in regular triangles. [Methods] The forward and reverse characteristics of the above two SiC JBS structures were simulated by the three-dimensional structural finite element simulation method, and the width of the P⁺ doping region and the doping concentration of the epitaxial layer were optimized and compared. [Findings] The simulation results show that the reverse breakdown voltage is higher than 1 500 V for both structures, and the forward conduction voltage drop of the JBS diode with circular P⁺ doping region is lower than that of the JBS diode with strip-shaped P⁺ doping region. When the forward current density is 400 A/cm²,

收稿日期: 2023-11-20; 修回日期: 2023-12-21; 接受日期: 2023-12-21

基金项目: 湖南省自然科学基金(2024JJ5044); 湖南省教育厅科研基金(19K001)

通信作者: 吴丽娟(1974—) (ORCID: 0000-0001-9305-1656), 女, 副教授, 主要从事功率半导体器件方面的研究。

E-mail: 305719669@qq.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

the conduction voltage drop decreases from 2.37 V in the strip-shaped P⁺ structure to 2.05 V in the circular P⁺ structure, which is reduced by 13.5%. After optimizing the doping concentration of the epitaxial layer in the circular P⁺ structure, the conduction voltage drop at a forward current density of 400 A/cm² is 1.97 V, which is 16.9% lower than that of the strip P⁺ structure. Compared to the strip-shaped SiC JBS, the circular P⁺ structure has a larger Schottky contact area, ensuring breakdown voltage while achieving a lower conduction voltage drop. By optimizing the doping concentration of the epitaxial layer, the conduction voltage drop of the device is further intensified.

[**Conclusions**] In this paper, the P⁺ doping region is adjusted from a strip shape to a circular one and arranged in a regular triangular distribution. This adjustment increases the Schottky contact area of the device, optimizes the forward conduction characteristics of the device, and further improves the conduction characteristics by optimizing the doping concentration of the epitaxial layer of the device. At the same time, a lower conduction voltage drop is obtained.

Key words: hot carrier diode; silicon carbide; junction barrier Schottky diode; conduction voltage drop; breakdown voltage

Foundation items: Project (2024JJ5044) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (19K001) supported by Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department

Corresponding author: WU Lijuan (1974—) (ORCID: 0000-0001-9305-1656), female, associate professor, research interest: power semiconductor devices. E-mail: 305719669@qq.com

0 引言

碳化硅材料作为第三代宽禁带半导体材料的代表,具有大禁带宽度、高临界击穿电场、高饱和载流子速度和高热导率等优越性能,成为制作高功率、高频、耐高温和抗辐射器件的理想材料,在功率器件领域极具潜力^[1-4]。碳化硅是一种具有多种晶体结构的化合物半导体,其同质异型体已有200多种。最常见的有3C-SiC、4H-SiC和6H-SiC^[5-6],其中3C-SiC为立方碳化硅,在高于2 100 °C时会向六方碳化硅不可逆地转变^[7],因此3C-SiC目前还没有体单晶可以做衬底;4H-SiC的禁带宽度比6H-SiC的更大,其电子迁移率是后者的三倍。随着4H-SiC高质量衬底材料制备技术的突破,碳化硅材料被认为是最理想的功率半导体材料之一^[8]。因此,下文提及与使用的均为4H-SiC。

碳化硅功率二极管主要包括肖特基二极管(Schottky barrier diode, SBD)和PIN (positive intrinsic negative)二极管。SBD是一种单极器件,具有较低的开启电压和导通压降,但由于肖特基势垒,其反向漏电流较大^[9-11];PIN二极管反向漏电流较小,但其开启电压较高,因此开关损耗大。

碳化硅结势垒肖特基二极管(silicon carbide junction barrier Schottky diode, SiC JBS diode)综合了两种器件的优势,在SBD的肖特基接触中加入P⁺掺杂区,P⁺区在器件反向时与N型外延相互耗尽,能屏蔽肖特基接触处的高电场、减小漏电流^[12-14]。因此,SiC JBS二极管得到了广泛的研究,在大功率应用方面具有很大的潜力^[15-17]。早在2014年,中国电子科技集团第五十五研究所成功研制了击穿电压为10 000 V的SiC JBS二极管^[18],该二极管在电流密度为10 A/cm²时的正向压降为2.70 V;同年,浙江大学的任娜等^[19]设计了1 700 V的沟槽型结势垒肖特基(trenched junction barrier Schottky, TJBS)二极管,更好地平衡了导通电阻与击穿电压的关系;2020年,DOU等^[20]研制了沟槽型4H-SiC JBS二极管,该二极管在1 200 V的反向偏压下的反向漏电流仅为 1.62×10^{-7} A/cm²,在400 A/cm²的正向电流密度时的压降约为1.90 V。目前,国内主要厂商的SiC JBS二极管产品结构仍以条形P⁺区为主,但正向导通压降仍然有降低的空间。

本课题组将圆形P⁺掺杂区代替条形P⁺掺杂区,并以正三角形分布,进一步增加肖特基接触的

面积,进而降低器件的导通压降;同时使用有限元仿真的方法对具有条形与圆形P⁺掺杂区的1 200 V SiC JBS二极管进行了三维仿真,并对正、反向特性进行了对比分析。

1 设计与仿真

本课题组计算了1 200 V SiC JBS二极管的外延层参数,再通过仿真软件构建出条形与圆形P⁺掺杂区JBS二极管的三维结构,并对其正、反向特性进行仿真对比,对元胞结构进行优化。

1.1 外延层参数设计

SiC JBS二极管等功率器件在反向工作时,主要由外延层承受较高的反向电压。一般地,外延层的厚度越大、掺杂浓度越低,器件就能够承受更高的反向电压,同时器件的导通电阻也会随之增加;反之,器件的击穿电压越低,导通电阻越小。因此,外延层需要选取合适的厚度与掺杂浓度,以保证器件在具有高反向击穿电压的同时,具有尽量低的导通电阻。

根据功率器件在临界击穿时的不同内部电场分布情况,器件分为漂移区完全耗尽的穿通(punch through, PT)型和漂移区未完全耗尽的非穿通(non-punch through, NPT)型,其内部电场分布如图1所示。由图1可知,PT型器件的耗尽区长度大于外延层(即N⁻区域)厚度,其电场在外延层中呈梯形分布;NPT型器件的耗尽区长度小于外延层厚度,其电场在外延层中呈三角形分布。因此,器件在正向导通时,超出耗尽区未承受反向电压的那部分外延层将会带来额外的导通电阻。

因此,在设计外延层厚度时应选择PT型器件结构,其临界击穿时的外延层内部电场分布可用式(1)表示:

$$E(x) = E_c - \frac{qN_d}{\varepsilon_s} x, \quad x \leq t_{\text{epi}} \quad (1)$$

式中: x 为外延层深度; $E(x)$ 为电场分布函数; E_c 为临界击穿场强; q 为电子的电荷量; N_d 为外延层掺杂浓度; ε_s 为介电常数; t_{epi} 为外延层厚度。

KONSTANTINOV等^[21]提供了4H-SiC材料在室温时的临界击穿场强经验公式,即式(2):

$$E_c \approx \frac{2.49 \times 10^6}{1 - 0.25 \lg(N_d/10^{16})} \quad (2)$$

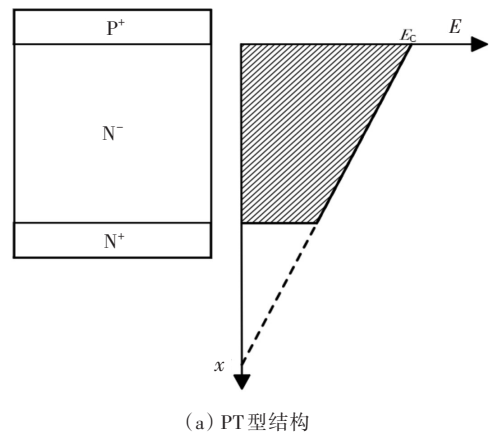
本课题组采用式(2)先计算出 E_c ,再沿 t_{epi} 方向对式(1)积分,可得到器件的击穿电压 V_{BR} 与电场的关系式,即式(3):

$$V_{\text{BR}} = \int_0^{t_{\text{epi}}} E(x) dx = E_c t_{\text{epi}} - \frac{qN_d t_{\text{epi}}^2}{2\varepsilon_s} \quad (3)$$

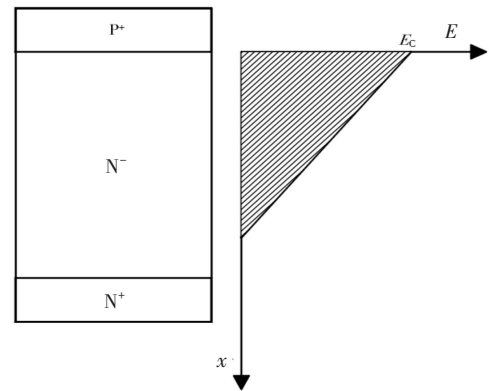
器件漂移区的导通电阻可采用式(4)计算^[22]:

$$R_{\text{on,sp}} = \frac{t_{\text{epi}}}{q\mu_n N_d} = \frac{4V_{\text{BR}}^2}{\mu_n \varepsilon_s E_c^3} \quad (4)$$

式中: $R_{\text{on,sp}}$ 为器件的比导通电阻; μ_n 为4H-SiC材料的电子迁移率。



(a) PT型结构



(b) NPT型结构

图1 PT和NPT型结构内部电场分布示意图

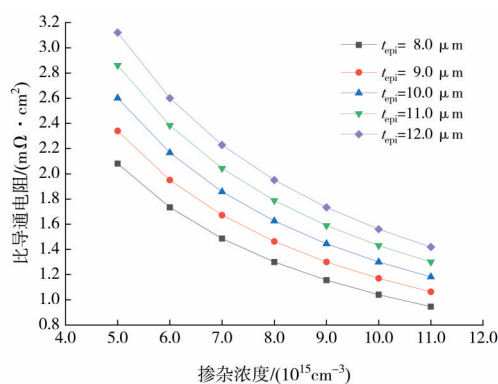
Fig. 1 Internal electric field distribution in PT and NPT structures

根据式(1)~(4)可计算穿通型器件在不同外延厚度下的比导通电阻、击穿电压与外延层掺杂浓度的关系,如图2所示。

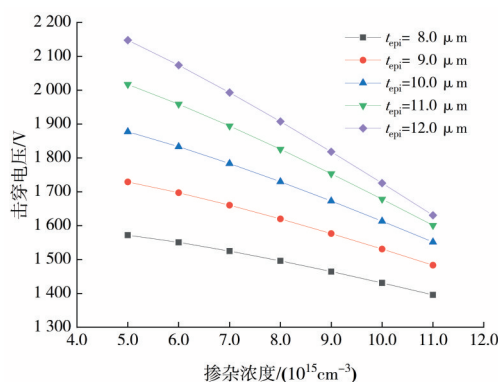
经测试,国内某款SiC JBS二极管产品的击穿电压在1 600 V左右。在常规操作中,业内通常将

球面边界与柱面边界在仿真与实际工艺中引入在 PN (positive negative) 结的边缘。这种操作易引起该边界位置的击穿电压低于平行平面结的击穿电压,将进一步导致功率半导体器件的击穿电压低于理论值。因此,本课题组选择击穿电压理论值在 1 700 V 以上的外延层参数。

从图 2 看出,外延层厚度 t_{epi} 越大,器件击穿电压随外延层掺杂浓度 N_d 增加而降低的幅度越大。在本研究中,本课题组最终选择 t_{epi} 与 N_d 分别为 10.0 μm 和 $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的方案,并作为基准进行仿真。



(a) PT 型器件在不同外延层厚度下的比导通电阻与外延层掺杂浓度的关系



(b) PT 型器件在不同外延层厚度下的击穿电压与外延层掺杂浓度的关系

图 2 PT 型器件在不同外延层厚度下的比导通电阻、击穿电压与外延层掺杂浓度的关系

Fig. 2 Relationship between specific conduction resistance and breakdown voltage of PT devices and doping concentration of epitaxial layer with different thicknesses

1.2 器件结构

根据上节中计算出的外延层厚度与外延层掺杂浓度,在仿真软件中构建出条形 P⁺区与圆形 P⁺区的 1 200 V SiC JBS 二极管的三维单元胞结构,

如图 3 所示。

条形与圆形 P⁺区 1 200 V SiC JBS 二极管的共同结构参数见表 1。通过表 1 中的数据可计算出,当两种结构的 P⁺区的尺寸相同且分别为 3.0、5.0 和 7.0 μm 时,具有圆形 P⁺区的 JBS 二极管的肖特基区域占比分别比条形 P⁺区的 JBS 二极管的提高了 21.8%、27.3% 和 25.6%。图 4 为两种器件的单元胞俯视图示意图。

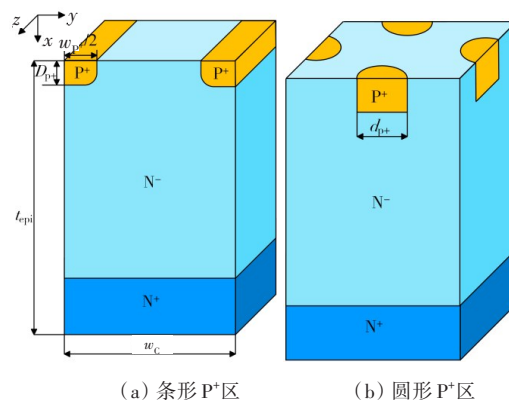


图 3 条形与圆形 P⁺区 SiC JBS 二极管三维单元胞结构示意图
Fig. 3 3D single cell structure of SiC JBS diodes with strip-shaped and circular P⁺ regions

表 1 条形与圆形 P⁺区的 1 200 V SiC JBS 二极管结构参数
Table 1 Common structural parameters of 1 200 V SiC JBS diodes with strip-shaped and circular P⁺ regions

$t_{\text{epi}}/\mu\text{m}$	N_d/cm^{-3}	$w_c/\mu\text{m}$	w_p (条形)/ μm 、 d_p (圆形)/ μm	$D_p/\mu\text{m}$	N_p/cm^{-3}
10.0	8×10^{15}	10.0	3.0、5.0、7.0	0.5	1×10^{19}

注: w_c 为器件单个元胞的宽度; w_p 为条形 P⁺区的宽度; d_p 为圆形 P⁺区的直径; D_p 为 P⁺区的注入深度; N_p 为 P⁺区的掺杂浓度,掺杂元素为铝。

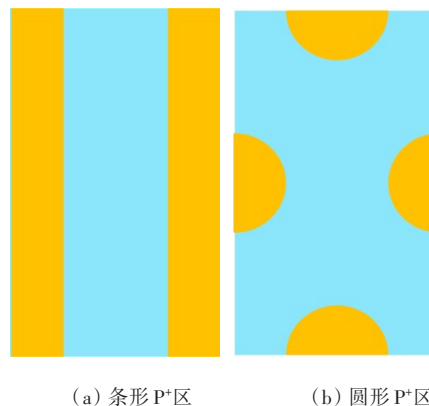


图 4 条形与圆形 P⁺区结构的 SiC JBS 二极管单元胞俯视图
Fig. 4 Top view of single cells of SiC JBS diodes with strip-shaped and circular P⁺ region structures

1.3 器件仿真

本课题组使用TCAD Sentaurus软件对条形与圆形P⁺区SiC JBS二极管进行正、反向电学特性仿真。

金属与N型半导体接触形成的肖特基势垒较低^[23]。肖特基结与PN结的能带图如图5所示。在图5中, E_c 为导带底部, E_v 为价带顶部, E_f 为费米能级; $x<0$ 的部分为金属, $x>0$ 的部分为半导体。显然,肖特基结势垒低于PN结势垒,因此肖特基结的导通压降更低,反向漏电流更大。

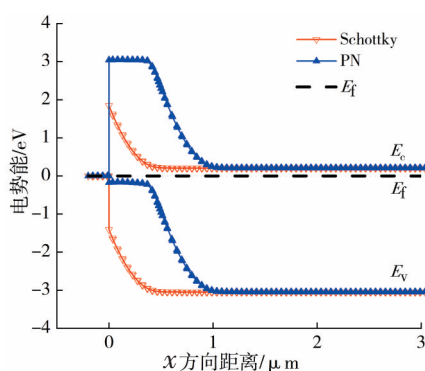
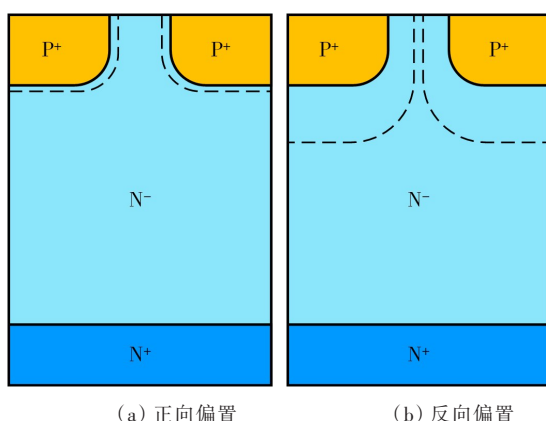


图5 肖特基结与PN结能带图

Fig. 5 Energy bands of Schottky junction and PN junction

JBS二极管通过在肖特基接触区域引入P⁺掺杂区来降低表面电场强度,提高器件的反向阻断能力。图6为JBS二极管在正反向偏置和反向偏置时耗尽区分布示意图。



(a) 正向偏置

(b) 反向偏置

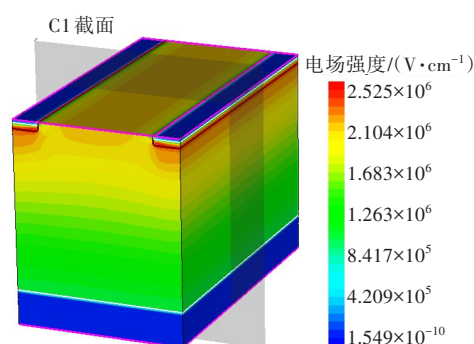
图6 JBS二极管在正向偏置和反向偏置时耗尽区分布示意图

Fig. 6 Depletion region distribution of JBS diodes under reverse bias and forward bias

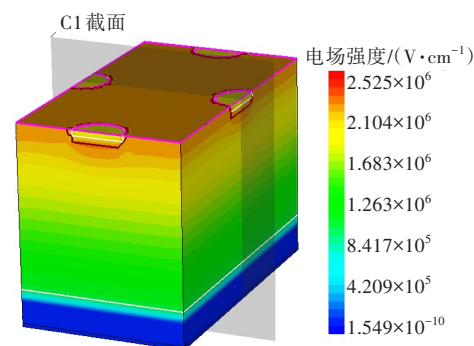
在反向偏置时,耗尽区增大,导电通道被夹断,反向电压主要由PN结承担;在正向偏置时,耗

尽区减小,肖特基接触导电,由于势垒较低,正向导通压降也较低。圆形P⁺结构以正三角形分布的圆形P⁺区在反向偏置时相互耗尽,且两两之间的耗尽区相互重叠,既增加了器件肖特基接触占比,又保证了器件的击穿电压。

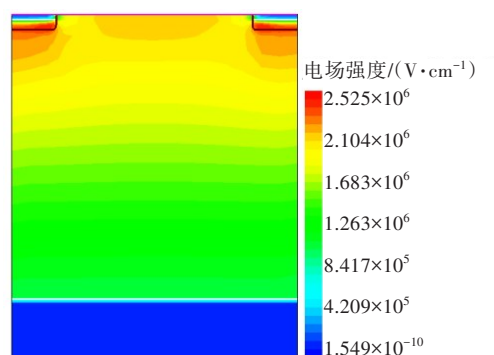
在反向偏置时,电场强度最大处在P⁺区的下端,屏蔽了肖特基结处的高电场,降低了器件的反向漏电流。图7(a)~7(b)分别为两种器件P⁺区尺寸为3.0 μm时的三维电场分布图;图7(c)~7(f)为两种器件在P⁺区尺寸为3.0 μm和7.0 μm时的垂直截面电场分布情况。P⁺区尺寸的增加降低了对肖特基结处的电场,增强了对肖特基结的电场屏蔽效果。



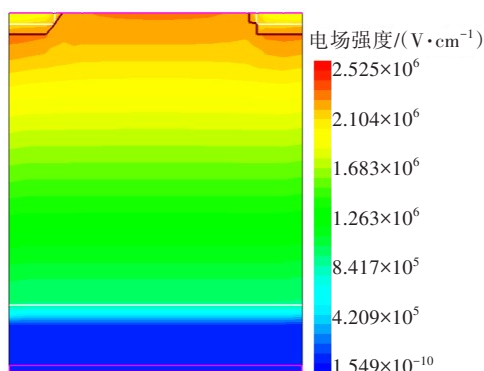
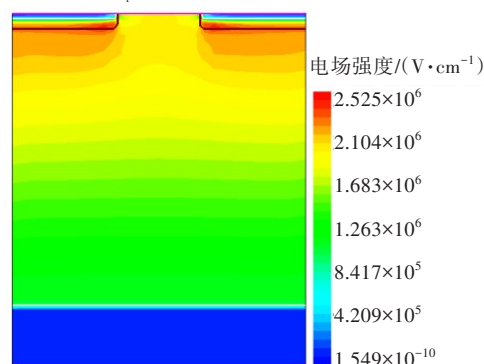
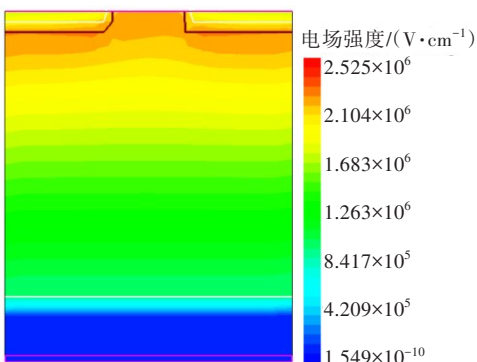
(a) 3D条形P⁺结构电场分布



(b) 3D圆形P⁺结构电场分布



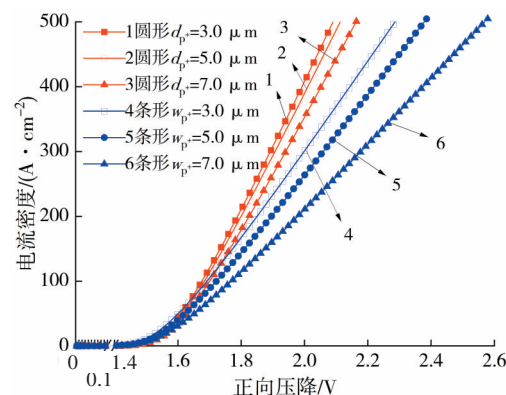
(c) $w_{p^+}=3.0\ \mu\text{m}$ 时的垂直截面电场分布

(d) $d_{p^+}=3.0\ \mu\text{m}$ 时的垂直截面电场分布(e) $w_{p^+}=7.0\ \mu\text{m}$ 时的垂直截面电场分布(f) $d_{p^+}=7.0\ \mu\text{m}$ 时的垂直截面电场分布图7 条形与圆形P⁺结构3D电场分布与P⁺尺寸为3.0、7.0 μm时的垂直截面电场分布Fig. 7 3D electric field distribution of strip-shaped and circular P⁺ structures and vertical cross-sectional electric field distribution for P⁺ sizes of 3.0 μm and 7.0 μm

2 结果

2.1 正向导通特性

器件的正向导通特性的仿真结果如图8所示。以P⁺区尺寸为7.0 μm为例,条形、圆形P⁺区二极管在电流密度为400 A/cm²时的导通压降分别为2.37、2.05 V。

图8 条形与圆形P⁺区结构在不同P⁺区尺寸下的正向特性
Fig. 8 Forward characteristics of strip-shaped and circular P⁺ region structures under different P⁺ region sizes

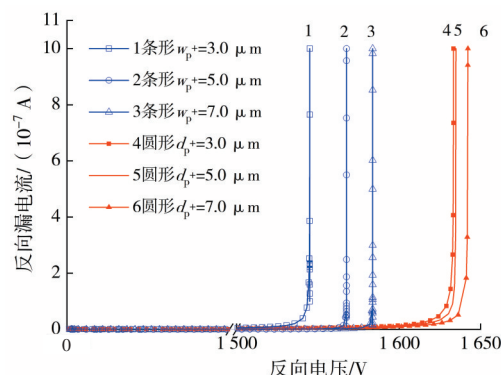
本课题组在不同电流密度时改变P⁺区的大小,对比分析了肖特基区域的占比对两种结构器件正向导通压降特性的影响,发现导通压降均随着肖特基区域占比增加而降低。相关具体数据见表2,其中 V_f 为正向导通压降。

表2 条形与圆形P⁺区结构在不同P⁺区尺寸下,在200、400 A/cm²时的导通压降对比Table 2 Comparison of conduction voltage drop between strip-shaped and circular P⁺ region structures under different P⁺ region sizes at 200 and 400 A/cm²

P ⁺ 区尺寸/μm	V_f/V (200 A/cm ²)		降低分数/%	V_f/V (400 A/cm ²)		降低分数/%
	条形P ⁺	圆形P ⁺		条形P ⁺	圆形P ⁺	
3.0	1.85	1.79	3.2	2.14	1.99	7.0
5.0	1.90	1.80	5.3	2.22	2.01	9.5
7.0	1.98	1.82	8.1	2.37	2.05	13.5

2.2 反向击穿特性

两种器件的反向击穿特性仿真结果如图9所示。

图9 条形与圆形P⁺区结构在不同P⁺区尺寸下的反向特性
Fig. 9 Reverse characteristics of strip-shaped and circular P⁺ region structures under different P⁺ region sizes

由仿真结果可知,圆形P⁺区结构的击穿电压均高于条形P⁺区结构的,且圆形P⁺区结构的击穿电压受P⁺区尺寸变化的影响不大;条形P⁺区结构的击穿电压随着P⁺区尺寸的增加而增大。

2.3 优化圆形P⁺区结构的外延层掺杂浓度

1.2小节提到,在P⁺区尺寸相同的情况下,圆形P⁺结构的肖特基区域占比均比条形P⁺区结构的高出20.0%以上。但通过前两节的结果可知,圆形P⁺区结构的击穿电压高于条形P⁺区结构的,本课题组在本小节中将P⁺区尺寸固定为7.0 μm,通过增加圆形P⁺区结构的外延层掺杂浓度来降低器件外延层电阻,在保证器件击穿电压变化在可接受范围内的前提下,进一步降低器件的导通压降。图10显示圆形P⁺区结构的反向特性随着其外延层浓度变化而变化。图11描述了圆形P⁺区结构外延层浓度对正向特性的影响。

从图10看出,随着外延层浓度增加,器件的击

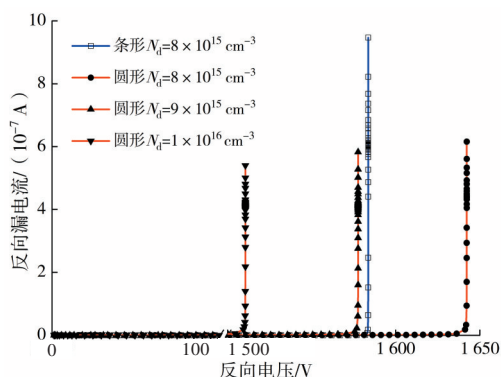


图10 圆形P⁺区结构反向特性随外延层浓度的变化

Fig. 10 Variation of reverse characteristics of circular P⁺ region structure with concentration of epitaxial layer

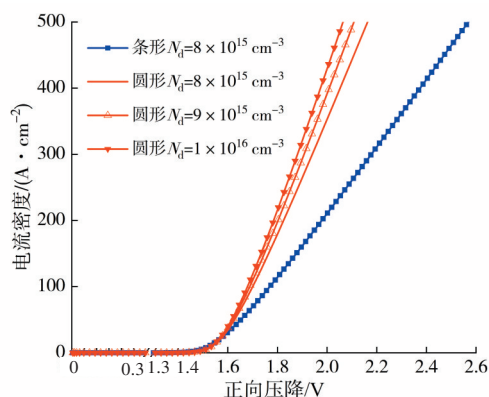


图11 圆形P⁺区结构正向特性随外延层浓度的变化

Fig. 11 Variation of forward characteristics of circular P⁺ region structure with concentration of epitaxial layer

穿电压逐渐降低。当两种结构的外延层浓度均为 $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 时,圆形P⁺区结构击穿电压为1 642 V,高于条形P⁺区结构的1 584 V;当圆形P⁺区结构外延层浓度提高到 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时,此时的击穿电压降至1 511 V,略低于条形P⁺区结构的1 584 V。

从图11看出,当外延层浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时,器件的正向导通压降为1.97 V。

3 讨论

本课题组通过改变SiC JBS二极管P⁺区的形状,增加了器件的肖特基区域占比。由于肖特基势垒低于PN结势垒,肖特基区域占比的增加使器件在正向偏置时更快导通,从而降低了器件的正向导通压降;在肖特基区域占比增加的同时,较低的肖特基势垒同样会使JBS在反向偏置时的漏电流增大。然而,以正三角形分布的圆形P⁺区在反向偏置时相互耗尽,屏蔽了肖特基结处的高电场,保证了器件的击穿电压。

由仿真结果可知,条形P⁺区与圆形P⁺区结构的击穿电压均能够保持在1 500 V以上,但圆形P⁺区结构击穿电压随P⁺尺寸变化不大。通过图7看出,圆形P⁺区结构在肖特基区域的电场分布更均匀,且随着P⁺区尺寸增加,其肖特基区域电场降低幅度小于条形P⁺区结构。因此随着P⁺区尺寸增加,圆形P⁺区结构击穿电压提升幅度小于条形P⁺区结构的。

对于正向特性,在电流密度为 400 A/cm^2 时,圆形P⁺区的正向导通压降为2.05 V,比条形P⁺区的2.37 V降低了13.5%;在优化外延层参数后,圆形P⁺区的正向导通压降进一步降至1.97 V,较优化前的圆形、条形P⁺区的分别降低了3.9%、16.9%,具有较大的提升。在较小电流密度情况下,圆形P⁺结构的导通压降也有所降低,但降低的幅度不大。因此,圆形P⁺结构的1 200 V SiC JBS二极管在一些大电流的应用中能够有效降低导通压降,减少损耗;在小电流情况下提升不多,传统条形结构在此时更具有优势。

4 结论

本课题组将两两之间以正三角形分布的圆形P⁺区SiC JBS二极管与传统条形P⁺区SiC JBS二极

管进行仿真对比,发现圆形P⁺区结构增加了肖特基区域的占比,在外加反向偏置时圆形P⁺区相互耗尽,保持器件的击穿电压,同时具有更低的导通压降。本课题组还优化了圆形P⁺区结构的外延层浓度,进一步降低导通压降。后续工作将进一步研究肖特基区域占比增加给器件带来的反向恢复能力与抗浪涌电流能力等,以及由此带来的影响。

【参考文献】

- [1] VASSILEVSKI K, NIKITINA I P, BHATNAGAR P, et al. High temperature operation of silicon carbide Schottky diodes with recoverable avalanche breakdown [J]. *Materials Science Forum*, 2006, 527/528/529: 931-934. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.527-529.931.
- [2] MILLÁN J, GODIGNON P, PERPIÑÀ X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29 (5): 2155-2163. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2268900.
- [3] HUANG A Q. Power semiconductor devices for smart grid and renewable energy systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(11): 2019-2047. DOI: 10.1109/JPROC.2017.2687701.
- [4] 盛况,任娜,徐弘毅.碳化硅功率器件技术综述与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(6): 1741-1753. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191728.
SHENG Kuang, REN Na, XU Hongyi. A recent review on silicon carbide power devices technologies [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(6): 1741-1753. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191728.
- [5] CHENG C, NEEDS R J, HEINE V. Inter-layer interactions and the origin of SiC polytypes [J]. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 1988, 21(6): 1049-1063. DOI: 10.1088/0022-3719/21/6/012.
- [6] LEBEDEV A A, VEINGER A I, DAVYDOV D V, et al. Doping of n-type 6H-SiC and 4H-SiC with defects created with a proton beam [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(11): 6265-6271. DOI: 10.1063/1.1309055.
- [7] 张秀玲.碳化硅/石墨烯复合材料的制备及性能研究[D].银川:北方民族大学,2023. DOI: 10.27754/d.cnki.gbfmz.2023.000048.
ZHANG Xiuling. Preparation and properties of SiC/GNPs composites [D]. Yinchuan: Beifang University of Nationalities, 2023. DOI: 10.27754/d.cnki.gbfmz.2023.000048.
- [8] 饶成元.高压4H-SiC JBS二极管新型结终端技术研究[D].成都:电子科技大学,2013.
RAO Chengyuan. Study of novel junction termination technology of high-voltage 4H-SiC JBS diode [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [9] 邓小川.4H-SiC MESFETs微波功率器件新结构与实验研究[D].成都:电子科技大学,2008.
DENG Xiaochuan. New structure and experimental study of 4H-SiC MESFETs microwave power device [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [10] GHANDI R, BUONO B, DOMEIJ M, et al. High-voltage 4H-SiC PIN diodes with etched junction termination extension [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, 30 (11): 1170-1172. DOI: 10.1109/LED.2009.2030374.
- [11] HUANG A Q, ZHANG B. The future of bipolar power transistors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(11): 2535-2543. DOI: 10.1109/16.960379.
- [12] ZHANG Q, MADANGARLI V, SOLOVIEV S, et al. High voltage Schottky barrier diodes on P-type SiC using metal-overlap on a thick oxide layer as edge termination [J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2011, 572(1): 75. DOI: 10.1557/PROC-572-75.
- [13] DAS M K, HULL B A, RICHMOND J T, et al. Ultra high power 10 kV, 50 A SiC PIN diodes [C]// *Proceedings of ISPSD'05*. Santa Barbara, CA, USA: The 17th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. (2005), 2005: 299-302. DOI: 10.1109/ISPSD.2005.1488010.
- [14] ZHAO J H, ALEXANDROV P, LI X. Demonstration of the first 10-kV 4H-SiC Schottky barrier diodes [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2003, 24(6): 402-404. DOI: 10.1109/LED.2003.813370.
- [15] 张进城,郝跃,赵天绪,等.SiC新型半导体器件及其应用[J]. *西安电子科技大学学报*, 2002, 29(2): 157-162. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2400.2002.02.003.
ZHANG Jincheng, HAO Yue, ZHAO Tianxu, et al. Advanced SiC semiconductor devices and their applications [J]. *Journal of Xidian University*, 2002, 29 (2): 157-162. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2400.2002.02.003.
- [16] 陈洪波.4H-SiC npn 双极晶体管特性研究[D].西安:西安电子科技大学,2007.
CHEN Hongbo. Study on characteristics of 4H-SiC npn bipolar transistor [D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
- [17] 张有润.4H-SiC BJT 功率器件新结构与特性研究[D].成都:电子科技大学,2010.
ZHANG Yourun. Study on Novel structure and characteristics of 4H-SiC BJT power devices [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.
- [18] HUANG R H, TAO Y H, CAO P F, et al.

(下转第187页)

- BAO Jiuwen, HU Wenwen, ZHANG Peng, et al. Effect of organic silicon hydrophobic agent on strength and capillary absorption of concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(10): 1644-1652. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20200283.
- [23] 胡红波, 罗震宇, 邱祥, 等. 不同纳米材料对水泥浆液基本性能的影响[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4): 36-42. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.006.
- HU Hongbo, LUO Zhenyu, QIU Xiang, et al. Effect of different nano-materials on the basic properties of cement slurry [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 36-42. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.006.
- [24] FENG H J, LE H T N, WANG S S, et al. Effects of silanes and silane derivatives on cement hydration and mechanical properties of mortars[J]. Construction and Building Materials, 2016, 129: 48-60. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.004.
- [25] HOU P K, QIAN J S, CHENG X, et al. Effects of the pozzolanic reactivity of nano SiO_2 on cement-based materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 55: 250-258. DOI: 10.1016/j.cemconcomp. 2014.09.014.
- [26] 周志刚, 李振威, 陶正文, 等. 胶粉纤维改性水泥稳定碎石抗裂性能研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2): 28-37. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023040120240466.
- ZHOU Zhigang, LI Zhenwei, TAO Zhengwen, et al. Study on the crack resistance of cement stabilized macadam modified by rubber powder fiber[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(2): 28-37. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023040120240466.
- [27] 熊钱华. 超高韧性水泥基复合材料耐久性能研究[J]. 公路与汽运, 2021, 37(1), 54-58.
- XIONG Qianhua. Study on durability of ultra-high toughness cement-based composites [J]. Highways & Automotive Applications, 2021, 37(1), 54-58.

(责任编辑:彭三军;校对:刘平)

(上接第175页)

- Development of 10 kV 4H-SiC JBS diode with FGR termination[J]. Journal of Semiconductors, 2014, 35(7): 074005. DOI: 10.1088/1674-4926/35/7/074005.
- [19] REN N, WANG J, SHENG K. Design and experimental study of 4H-SiC trench junction barrier Schottky diodes [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(7): 2459-2465. DOI: 10.1109/TED.2014.2320979.
- [20] DOU W T, SONG Q W, YUAN H, et al. Design and fabrication of high performance 4H-SiC TJBS diodes [J]. Journal of Crystal Growth, 2020, 533: 125421. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.125421.
- [21] KONSTANTINOV A O, WAHAB Q, NORDELL N, et al. Ionization rates and critical fields in 4H silicon carbide [J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(1): 90-92. DOI: 10.1063/1.119478.
- [22] 袁昊. 高性能4H-SiC SBD/JBS器件设计及实验研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- YUAN Hao. Design and experimental study of high performance 4H-SiC SBD/JBS device [D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [23] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生, 等. 半导体物理学[M]. 第8版. 北京: 电子工业出版社, 2023: 52-77.
- LIU Enke, ZHU Bingsheng, LUO Jinsheng. Semiconductor physics[M]. 8th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2023: 52-77.

(责任编辑:彭三军;校对:毛娜)