

n, p 柱宽度对超结 SiGe 功率二极管 电学特性的影响*

高勇¹⁾ 马丽^{2)†} 张如亮¹⁾ 王冬芳¹⁾

1) (西安理工大学电子工程系, 西安 710048)

2) (西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

(2010年6月7日收到; 2010年7月29日收到修改稿)

结合 SiGe 材料的优异性能与超结结构在功率器件方面的优势, 提出了一种超结 SiGe 功率二极管. 该器件有两个重要特点: 一是由轻掺杂的 p 型柱和 n 型柱相互交替形成超结结构, 取代传统功率二极管的 n⁻ 基区; 二是阳极 p⁺ 区采用很薄的应变 SiGe 材料. 该二极管可以克服常规 Si p⁺n⁻n⁺ 功率二极管存在的一些缺陷, 如阻断电压增大的同时, 正向导通压降随之增大, 反向恢复时间也变长. 利用二维器件模拟软件 MEDICI 仿真分析得到以下结论: 与相同结构尺寸的常规 Si 功率二极管相比较, 20% Ge 含量的超结 SiGe 功率二极管, 反向阻断电压提高了 1.6 倍, 正向压降减小了约 60 mV (正向电流密度为 10 A/cm² 时). 虽然反向恢复时间没有明显减少, 但反向峰值电流密度降低了 17%, 软恢复特性也显著提高, 后者的软度因子是前者的 2 倍多. 超结部分的 p 型柱和 n 型柱宽度是器件设计中的重要结构参数, 本文重点讨论了该参数对器件电学特性的影响: 柱区宽度越小, 阻断电压越高, 漏电流越小, 但同时正向压降有所增加. 柱区宽度对反向恢复特性的影响没有明显的单调性, 柱区宽度过小时会出现硬恢复现象. 通过对该结构参数进行优化设计可以同时获得低通态压降、高阻断电压、快速恢复的特性.

关键词: 超结, 锗硅二极管, n, p 柱宽度, 电学特性

PACS: 73.40.Lq, 85.30.Kr, 85.30.De

1. 引言

在现代电力电子装置中, 作为其核心部分的电力电子器件(功率器件)虽然只占整机总价值的 20%—30%, 但它对提高整个装置的各项技术指标起着十分重要的作用. 对功率器件性能的要求一般有如下几条: 1) 耐压高; 2) 导通时电流密度大; 3) 导通时器件上压降低; 4) 开关速度高; 5) 驱动功率小. 功率器件中常用的开关二极管对改善各种电力电子电路的性能、降低电路损耗和提高电源使用效率等方面都有重要作用. 因此, 设计性能优良的功率二极管显得非常必要. SiGe 材料由于具有许多优于 Si 材料的性能, 如其载流子迁移率高^[1]、能带可调, 其制作工艺又与成熟的 Si 工艺兼容等优点而成为备受瞩目的硅基半导体材料. 在异质结双极晶体管(HBT), 金属-氧化物-半导体场效应晶体管

(MOSFET)、光电子器件等领域都取得了巨大的成就. SiGe 器件在数字通信、单芯片射频、全球定位、信号处理等领域都有重要应用. 另外, SiGe 材料在功率器件方面也有了越来越深入的研究^[2-5]. SiGe Bi CMOS 功率放大器已达到手机中功率放大器的要求, 向传统的 GaAs 基功率放大器的“一统天下”提出了挑战.

为了降低功耗, 要求功率半导体器件在阻断状态时能承受较高的电压, 在导通状态时有较低的通态电阻. 功率 VDMOS 为了满足高耐压, 需要降低漂移区浓度或增大漂移区厚度, 但导通电阻也随之增大, 其导通电阻与击穿电压呈 2.5 次方关系^[6]. 将传统 VDMOS 中的 n 型漂移区替换为 p 柱和 n 柱相互交替形成的超结漂移区, 很好地解决了导通电阻和击穿电压之间的矛盾, 使其导通电阻与击穿电压呈 1.32 次方关系^[7]. 由此可见超结结构在提高击穿电压的同时可以减小导通电阻, 有利于降低通态功

* 陕西省教育厅专项科研项目(批准号:09JK640)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: mali@xaut.edu.cn

耗,超结结构目前还主要是应用于功率 MOS 器件中^[8,9]. 我们首次将 SiGe 材料与超结结构同时引入到功率开关二极管中,可显著提高器件的各种电学特性. 本文重点讨论影响超结 SiGe 功率二极管各种特性的关键结构参数超结部分 n, p 柱的宽度.

2. 器件结构及特性

2.1. 器件结构

超结 SiGe 功率二极管的结构(图 1(a))与文献[10]给出的超结双极型晶体管相似,主要有两个特点:一是 p⁺ 层采用应变 SiGe 材料,厚度很薄,30 nm 左右;二是基区由 p 型柱和 n 型柱相互交替形成超结结构,如同多个 pn 结并联在一起. 超结结构中纵向存在 p⁺n 结和 n⁺p 结,横向存在 pn 结,在纵向和横向都建立了电场. 为了提高耐压, p 柱和 n 柱中的电荷要完全平衡,并在击穿之前 p, n 柱完全耗尽. 为了更直观地说明超结 SiGe 功率开关二极管的优异性能,本文还给出了相同结构尺寸的常规 Si p⁺n⁻n⁺ 功率二极管(图 1(b))所示的电学特性.

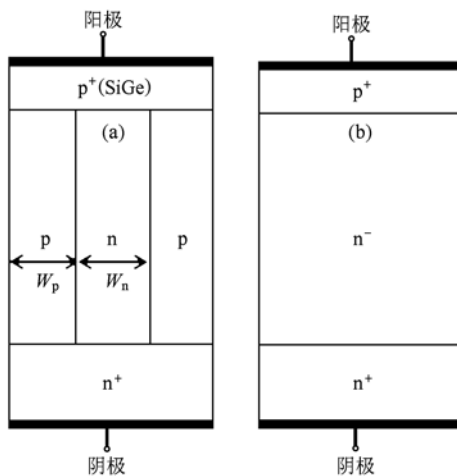


图 1 器件结构示意图 (a) 超结 SiGe 功率二极管; (b) 常规 Si 功率二极管

超结 SiGe 功率二极管在数值模拟中遇到了很大的挑战:一是超结部分由 p 型柱和 n 型柱相互交替形成,二是 p⁺ 层采用很薄的应变 SiGe 材料,所以在数值模拟中不管是在垂直方向还是水平方向都需要更小的网格,网格数目是常规结构 Si p⁺n⁻n⁺ 的数十倍,这为数值计算带来了一定难度. 为了准确反映实际情况,综合已发表的文献数据,采用了

适用 SiGe/Si 异质结功率器件模拟的关键物理参数模型. 以功能强大的二维器件模拟软件 Medici 为基础,对比分析了超结 SiGe 功率二极管和 Si 功率二极管的电学特性优劣,重点讨论了超结部分的 p 型柱和 n 型的宽度对超结 SiGe 功率二极管电学特性的影响规律.

2.2. 器件特性

在反向阻断特性模拟中,所加反向电压的最大值为 400 V,步长为 10 V. 正向导通特性模拟中所加最大正向电压为 1.6 V,步长为 0.1 V. 反向恢复特性模拟中,与二极管串联的电阻为 5 kΩ,电感为 0.05 mH. 首先使二极管正向导通,保持正向电流密度为 100 A/cm²,然后关断二极管,测试其反向恢复特性. 图 2 为相同结构尺寸的常规 Si 功率二极管与超结 SiGe 功率二极管的反向阻断特性、正向导通特性以及反向恢复特性的比较曲线. 两种二极管的 p⁺ 区厚度均为 30 nm,掺杂浓度同为 1 × 10¹⁹ cm⁻³; n⁺ 区厚度均为 2 μm,掺杂浓度同为 1 × 10²⁰ cm⁻³. 常规结构的 Si 二极管的基区厚度为 14 μm,掺杂浓度为 3 × 10¹⁵ cm⁻³,宽度为 8 μm. 超结 SiGe 二极管的超结区厚度为 14 μm, p, n 柱的掺杂浓度均为 3 × 10¹⁵ cm⁻³,两柱的宽度 W_n 和 W_p 均为 4 μm,总宽度也为 8 μm, SiGe 材料中 Ge 的含量为 20%.

从图 2 中可以看出,与 Si 功率二极管相比,超结 SiGe 二极管的各项电学性能指标均有明显提高,尤其是反向阻断电压大幅度增加,从 115 V 增加到了 303 V,提高了 1.6 倍(图 2(a)). 超结中相互交替的 p/n 柱在垂直方向和水平方向上都建立了电场,总的电场分布是两者共同作用下产生的,能够大大增加器件的耐压能力. 这一点也可以从两种二极管反向阻断过程中电场线的分布看出(图 3, 4 所示),超结 SiGe 二极管 p, n 柱内的纵向电场线基本都为矩形,而 Si 二极管的电场线为三角形. 也就是说,达到相同的耐压容量,超结 SiGe 二极管的厚度要远小于 Si 功率二极管,而半导体器件的厚度是影响其总体损耗的最重要因素,厚度越小越有利于降低其功率损耗.

超结 SiGe 功率二极管在获得高阻断电压的同时,正向导通压降也降低了. 如在正向电流密度为 10 A/cm² 的情况下,与 Si 二极管相比,正向压降降低了约 60 mV. p⁺(SiGe)/n⁻(Si) 异质结主要特点是禁带上移,即价带带阶远大于导带带阶 $\Delta E_v \gg$

$\Delta E_C^{[11]}$, $\Delta E_C = 0.02 \text{ eV}$, $\Delta E_V = 0.74x \text{ eV}^{[12]}$, x 为 p^+ (SiGe) 层中 Ge 的含量 (本文中 Ge 的含量 $x = 0.2$). 因而空穴的势垒比电子的势垒要高得多, 通过势垒的电流主要是电子电流, 空穴电流可以忽略不计, 导致 SiGe 二极管正向压降降低.

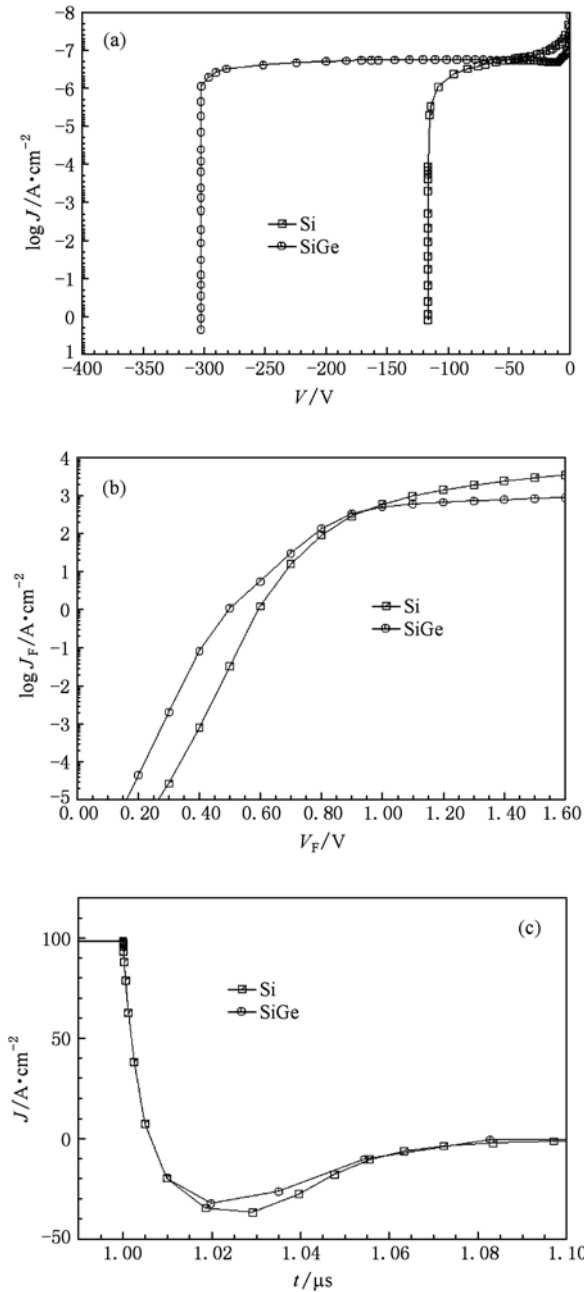


图2 常规结构 Si 二极管与超结结构 SiGe 二极管电学特性比较曲线 (a) 反向阻断特性; (b) 正向导通特性; (c) 反向恢复特性

对于应变 SiGe 层中电子迁移率, Rosenfeld 等人在 Caughey-Thomas 模型的基础上给出了一个温度为 300 K 下的拟合公式^[13], 该拟合公式与 Kay 等^[14]的计算结果以及 Manku 等^[15]的经验公式符合

得非常好.

$$\mu_n = \left[\frac{\mu_{n,\max} - \mu_{n,\min}}{1 + (N_A/N_0)^\beta} \right] \times (1 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3) + \mu_{n,\min}$$

其中, $\mu_{n,\max} = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; $\mu_{n,\min} = 175 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; N_A 掺杂浓度, $a_1 = -3.02$; $a_2 = -7.08$; $a_3 = 53.08$; $N_0 = 1.1 \times 10^{17} (1 + 14.65x) \text{ cm}^{-3}$; $\beta = 5/8$; x 为 Ge 的摩尔含量.

对于应变 SiGe 材料的室温空穴迁移率为^[16]

$$\mu_p = \frac{\mu_{p,0}}{1 + (N_A/N_0)^\beta} + \mu_{p,\min}$$

其中, $\mu_{p,0} = 400 + 29x + 400x^2 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; $\mu_{p,\min} = 44 - 20x + 850x^2 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; $N_0 = 2.35 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; $\beta = 0.9$, N_A 仍为掺杂浓度, x 为 Ge 的摩尔含量.

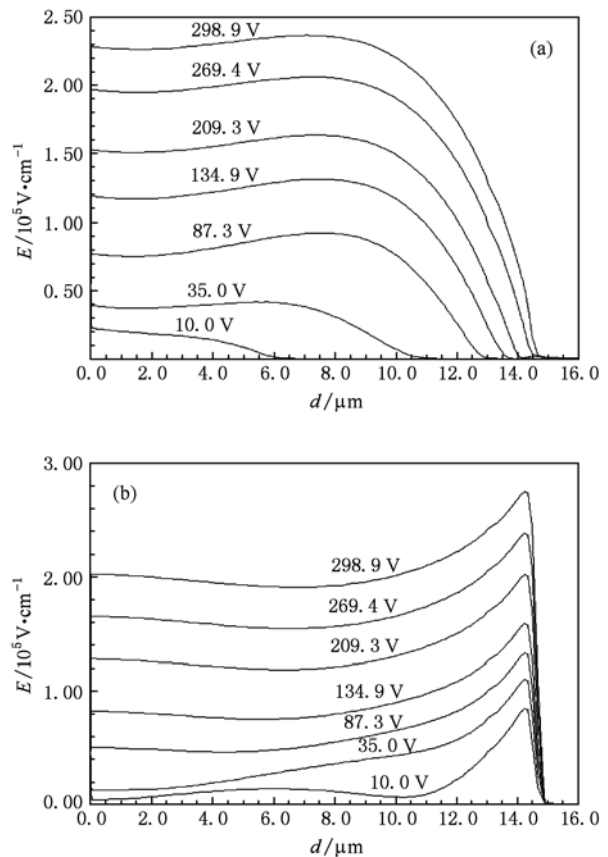


图3 反向阻断过程中超结 SiGe 二极管内纵向电场线的分布 (a) n 柱内纵向电场线的分布; (b) p 柱内纵向电场线的分布

在 Si 材料中引入 Ge 后, 载流子的迁移率增加了, 可提高器件的开关速度, 如图 2(c) 所示, 超结 SiGe 功率二极管的反向恢复时间略小于 Si 二极管的, 软度因子提高了 1 倍多, 同时反向峰值电流密度也下降了 17%. 另外, 采用超结结构后, 空穴和电子

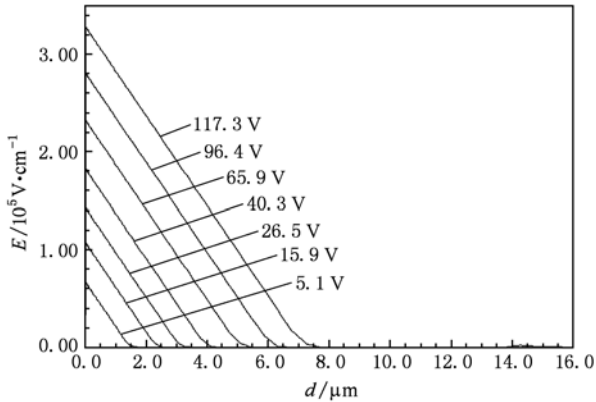


图4 反向阻断过程中Si功率二极管的纵向电场分布

可以分别通过 p 柱、n 柱排出,也会导致反向恢复时间缩短.但是从后文中可以看出,如果超结部分的结构参数选取不当,反向恢复后期电流会迅速截止,有可能出现硬恢复特性.

3. 影响超结 SiGe 功率二极管电学特性的重要参数——n, p 柱宽度

为考察超结区 n 柱、p 柱的宽度对器件特性的影响,柱区的掺杂浓度固定为 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,厚度固定为 14 μm ,柱区宽度取值分别为 2, 4, 6, 8 和 10 μm .图 5 为超结 SiGe 功率二极管的反向阻断特性、正向导通特性以及反向恢复特性随柱区宽度变化的关系曲线.

图 5(a)所示柱区宽度对器件的反向阻断特性影响非常显著,随着柱区宽度的增加,阻断电压迅速下降,漏电流也有所增加.当柱区宽度由 2 μm 增大到 8 μm 时,阻断电压由 310 V 减小到了 120 V 左右,同时漏电流增加了约 1 个数量级.因此柱区宽度越小越有利于反向阻断特性.从电场线的分布可以看出(图 6,7 所示), 2 μm 柱区宽度的二极管无论是 n 柱内还是 p 柱内,纵向平均电场均远高于 8 μm 柱区宽度的二极管,这使得两者达到相同的耐压水平时,前者的器件厚度要小于后者.为了达到最大的耐压,p/n 柱中的电荷要完全平衡,并且在击穿之前 p/n 柱需要完全耗尽.在器件制造中要做好超结结构 p 型柱和 n 型柱的几何尺寸和掺杂浓度的控制,若不能做到电荷平衡,会使击穿电压明显下降,这点在文献[17,18]中也有所体现.

图 5(b)显示,随着柱区宽度的增加,正向压降低,在大电流密度下下降趋势更明显一些.在

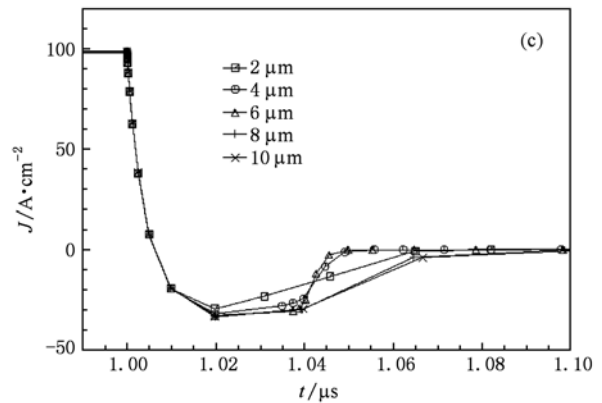
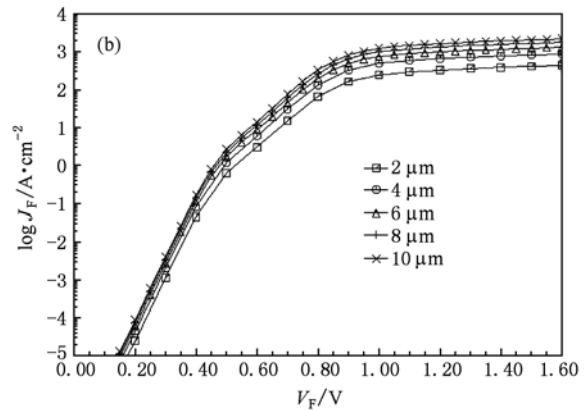
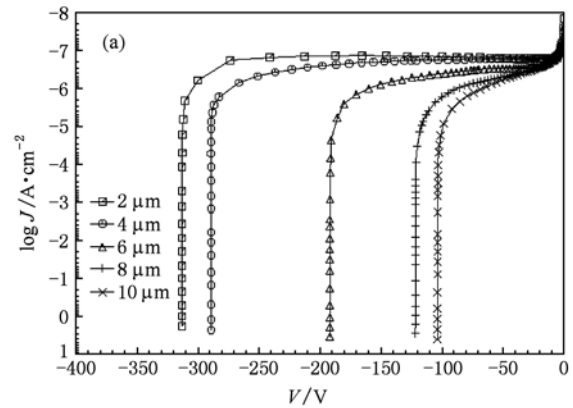


图5 超结区 n, p 柱宽度对器件特性的影响 (a) 反向阻断特性; (b) 正向导通特性; (c) 反向恢复特性

100 A/cm^2 的正向电流密度下,当柱区宽度由 2 μm 增加到 10 μm 时,超结 SiGe 二极管的正向压降降低了 0.14 V .

图 5(c)显示反向恢复特性受柱区宽度的影响并没有明显的单调性,当柱区宽度较小时(不超过 6 μm 时),反向恢复时间随柱区宽度增加而缩短,同时软恢复特性变差,即关断后期出现比较陡的电流跌落;当柱区宽度较大时(大于 6 μm),反向恢复

时间随宽度增加而略有增加. 如果柱区宽度设计的不合理, 会使软恢复特性变得很差, 例如由 $2\ \mu\text{m}$ 变为 $6\ \mu\text{m}$ 时, 虽然恢复时间缩短了三分之一, 但软度

因子减少了 50%, 出现硬恢复特性. 为了改善软恢复特性, 降低工艺难度及减少器件制造成本, 可采用半超结结构^[19,20].

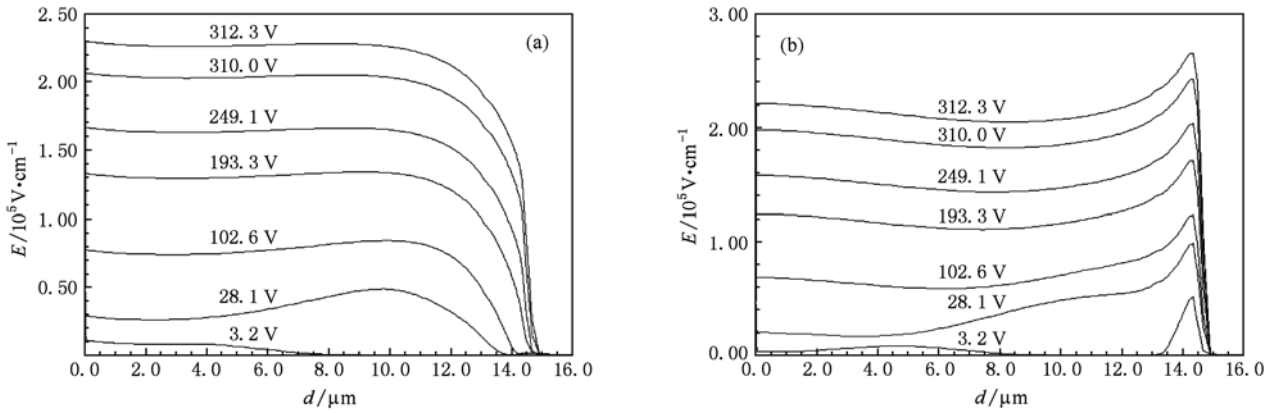


图6 柱区宽度为 $2\ \mu\text{m}$ 的超结 SiGe 功率二极管在反向阻断过程的纵向电场线分布 (a) n 柱内纵向电场线的分布; (b) p 柱内纵向电场线的分布

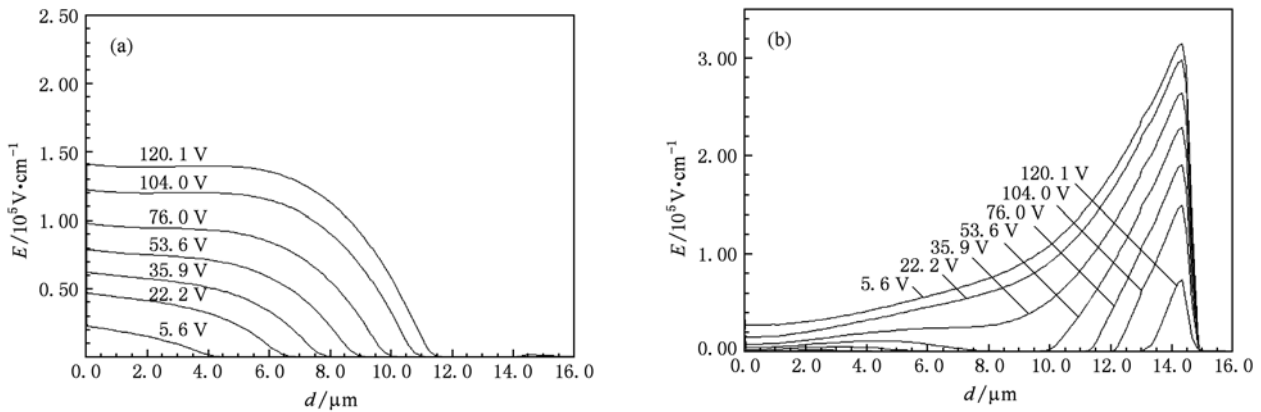


图7 柱区宽度为 $8\ \mu\text{m}$ 的超结 SiGe 功率二极管在反向阻断过程的纵向电场线分布 (a) n 柱内纵向电场线的分布; (b) p 柱内纵向电场线的分布

综合以上的结果可以看出, 柱区宽度越小越有利于反向阻断特性, 而越不利于正向通态特性, 兼顾考虑反向恢复特性, 柱区宽度设计为 $4\ \mu\text{m}$ 是比较合理的.

4. 结 论

超结 SiGe 功率开关二极管结合 SiGe 材料和超结结构的优越性能, 很好地解决了导通压降和反向耐压以及反向恢复时间之间的矛盾. 与相同结构尺寸的常规 Si 功率二极管相比, 该器件能够同时获得更低的通态压降, 更快的开关速度和更高的阻断电压. 超结区 n/p 柱宽度是影响器件各种特性的重要参数. n/p 柱宽度对器件的反向阻断特性有很大影

响, 柱区宽度越大, 反向阻断电压越小, 漏电流越高. 正向压降随着柱区宽度的增加反而减小. 反向恢复特性受这一结构参数的影响比较复杂, 在柱区的掺杂浓度为 $3 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 的情况下: 当柱区宽度不超过 $6\ \mu\text{m}$ 时, 反向恢复时间随柱区宽度增加而减小, 但同时软恢复特性变差; 柱区宽度超过 $6\ \mu\text{m}$ 时, 反向恢复时间随柱区宽度增加而略有增加. 该器件最大的优点是能够大幅度提高反向耐压, 因此在耐压要求一定的情况下, 这种超结 SiGe 功率二极管的器件厚度与 Si 二极管相比可以大大减小, 超结区掺杂浓度也可适当提高, 这不仅可以进一步减小反向恢复时间和正向通态压降, 同时又非常有利于降低工艺制造难度和成本. 超结结构和 SiGe 材料的引入为超结 SiGe 功率二极管的设计提供了更大的

自由度,设计良好的超结 SiGe 功率二极管在很大程度上打破了所谓的“硅极限”。

- [1] Carns T K, Chun S K 1994 *IEEE Trans. E D* **41** 1273
- [2] Brown A R, Hurkx G A M, Huizing H G A, Peter M S, de Boer W B, van Berkum J G M, Zalm P C, Huang E, Koper N 1998 *IEDM Tech. Dig.* (San Francisco, California) p256
- [3] Qi H, Gao Y 2003 *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition* (Florida, USA) p964
- [4] Gao Y, Ma L 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 414
- [5] Ma L, Gao Y, Wang C L 2004 *Chin. Phys.* **13** 1114
- [6] Baliga B J 1987 *Modern Power Device* (New York: John Wiley & Sons) p295
- [7] Chen X B, Johnny K O Sin 2001 *IEEE Trans. E D* **48** 344
- [8] Duan B X, Zhang B, Li Z J 2007 *Chin. Phys.* **16** 3754
- [9] Wang C L, Sun J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1231
- [10] Friedhelm D. Bauer 2004 *Solid-State Electronics* **48** 705
- [11] Shu B, Dai X Y, Zhang H M 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 237 (in Chinese) [舒斌、戴显英、张鹤鸣 2004 物理学报 **53** 237]
- [12] Yu L S 2006 *Semiconductor heterojunction physics* (2nd ed) (Beijing: Science Press) p102 (in Chinese) [虞丽生 2006 半导体异质结物理(第二版)(北京:科学出版社)第102页]
- [13] Rosenfeld D, Alterovitz S A 1994 *Solid State Electronics* **37** 119
- [14] Kay L E, Tang T W 1991 *J. Appl. Phys.* **70** 1483
- [15] Manku T, Nathan A 1992 *IEEE Trans. E D* **39** 2082
- [16] Chen Z M, Wang J N 1999 *Foundation of Material and Physics of semiconductors* (Beijing: Science Press) p224 (in Chinese) [陈治明、王建农 1999 半导体器件的材料物理学基础(北京:科学出版社)第224页]
- [17] Kondekar P N 2005 *IEEE Conference on Electron Devices and solid-state circuits* (China, Hong Kong) p551
- [18] Shenoy P M, Bhalla A, Dolny G M 1999 *International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's* (Canada, Toronto) p99
- [19] Ma L, Gao Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 529 (in Chinese) [马丽、高勇 2009 物理学报 **58** 529]
- [20] Yang Y T, Geng Z H, Duan B X, Jia H J, Yu C, Ren L L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 566 (in Chinese) [杨银堂、耿振海、段宝兴、贾护军、余涔、任丽丽 2010 物理学报 **59** 566]

Effects of p and n pillar widths on electrical characteristics of super junction SiGe power diodes *

Gao Yong¹⁾ Ma Li^{2)†} Zhang Ru-Liang¹⁾ Wang Dong-Fang¹⁾

1) (Department of Electronics Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

2) (Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 7 June 2010; revised manuscript received 29 July 2010)

Abstract

By combining merits of both SJ structure and SiGe material, a novel super junction (SJ) SiGe power diode is presented. The two important characteristics of SJ SiGe diode are its columnar structure of alternating p/n pillars substituting n^- base region of conventional Si $p^+n^-n^+$ diode and its far thinner strained SiGe p^+ layer, which can overcome the drawbacks of conventional Si power switching diodes, such as when the reverse blocking voltage is higher, the forward voltage drop is larger and the reverse recovery time becomes longer. For the SJ SiGe diode with 20% Ge content, the following conclusions can be obtained compared with comparable conventional Si power diodes: the breakdown voltages increase by 1.6 times, the forward voltage drop is reduced by 60 mV (at a current density of 10 A/cm^2) and the softness factor S increases by 2 times. Though the reverse recovery time is shortened slightly, the peak reverse current density decreases by 17% and the soft recovery characteristics is improved notably. The key parameters of the p and n pillar widths have important effects on the forward conduction characteristic, reverse blocking characteristic and reverse recovery characteristic of SJ SiGe power diode. The smaller the pillar width becomes, the higher the breakdown voltage is and the lower the reverse leakage current is, whereas the forward voltage drop increases slightly. The pillar width has no obviously monotonic effect on the reverse recovery characteristic. If the width is too small, the soft reverse recovery characteristic is degenerated. To optimize the parameter of pillar width, we can obtain excellent SJ SiGe diode with fast recovery speed, high breakdown voltage and low forward drop at the same time.

Keywords: super junction, SiGe diode, n,p pillars width, electrical characteristics

PACS: 73.40.Lq, 85.30.Kr, 85.30.De

* Project supported by the Special Scientific Research Program of the Education Bureau of Shaanxi (Grant No. 09JK640).

† Corresponding author. E-mail: mali@xaut.edu.cn