

半超结 SiGe 高压快速软恢复开关二极管*

马 丽^{1)†} 高 勇²⁾

1) 西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

2) 西安理工大学电子工程系, 西安 710048)

(2008 年 3 月 1 日收到, 2008 年 4 月 25 日收到修改稿)

将 SiGe 材料的优异性能与半超结结构的优势相结合, 提出了一种半超结 SiGe 功率二极管, 可适应高频化电力电子电路对功率二极管低通态压降、高击穿电压、较小的反向漏电流以及快而软的反向恢复特性的要求, 显著提高器件的各种特性.

关键词: 半超结, 硅锗二极管, 高压, 快速软恢复

PACC: 7340L

1. 引 言

目前, 几乎所有的功率系统中都采用硅器件. 毫无疑问, 成熟的硅工艺技术是硅器件的最大优势. 目前, 这些器件的开关性能已随其结构设计和制造工艺的相当完善而接近其由材料特性决定的理论极限. 依靠硅器件继续完善和提高电力电子装置与系统性能的潜力已十分有限. 采用新材料满足新一代电力电子装置与系统对器件性能的更高要求, 早在世纪交替之前就在电力电子学界与技术界形成共识. 传统的 Si p-i-n 功率二极管由于其材料特性的局限性, 很难适应高频化电力电子电路对功率二极管低通态压降、高的击穿电压、较小的反向漏电流以及快而软的反向恢复特性的要求. SiGe 合金因其载流子迁移率高^[1]、能带可调并与成熟的 Si 工艺兼容等优点受到越来越广泛的关注. 迄今 SiGe 合金的研究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 合金材料在功率器件方面的研究也有了一定的进展^[2-6].

近年来, 超结结构 (super junction, SJ) 引起人们的广泛关注. 这种新结构利用相互交替的 n 型柱和 p 型柱代替传统单一的 n 型基区, 在提高击穿电压

的同时减小导通电阻, 很大程度上打破了击穿电压与导通电阻之间的“硅极限”^[7-11]. 但是应用超结结构有两个显著缺点: 二极管反向恢复硬度高和制造工艺难度大. 超结结构的实现是通过外延层生长和硼离子注入交替进行的, 因此, 形成超结结构的生长次数与成本的高低直接成正比. 若使用其他方法, 如埋沟加外延生长, 则工艺中的难度也随着注入 p 区深度与宽度的比值 (深宽比) 的增加而提高. 这表明, 在具有较高的深宽比时, 为得到较低的导通电阻, 需要增加外延生长的次数, 即提高了生产成本. 因此, 从生产工艺成本的角度看, 必须减小深宽比. 半超结 (semi-super junction, SSJ) 结构是在传统超结结构中的基区增加一个 n 型区, 称之为底端辅助层 (bottom assist layer, BAL). 在具有相同的深宽比时, 半超结可以获得比超结更低的导通电阻, 而深宽比则直接影响工艺的难度及成本. 在超结结构中, 深宽比的减小主要是由于 n 区和 p 区宽度的增加, 从而使导通电阻有较大提高. 而在半超结结构中, 导通电阻是超结结构的电阻与底端辅助层 BAL 的电阻的总和. 因为两者是串联在一起的, 所以, 减小深宽比实际上是减小超结结构部分的深度, 也就同时增加了辅助层的深度. 由于辅助层掺杂浓度是按照低压功率二极管的漂移层设定的, 其深度增加后所带来的电阻增量比较小, 所以, 较之传统超结二

* 国家自然科学基金 (批准号 50477012)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号 20050700006) 和陕西省教育厅专项科研计划 (批准号 05JK268) 资助的课题.

† E-mail: mali@xaut.edu.cn

极管半超结器件总的导电电阻值更小. 本文将 SiGe 材料的优异性能与半超结结构的优势相结合, 提出了一种半超结 SiGe 功率开关二极管, 可显著提高器件的各种特性.

2. 器件结构

常规 SiGe 二极管 (图 1(b)) 采用类似于 Si p-i-n

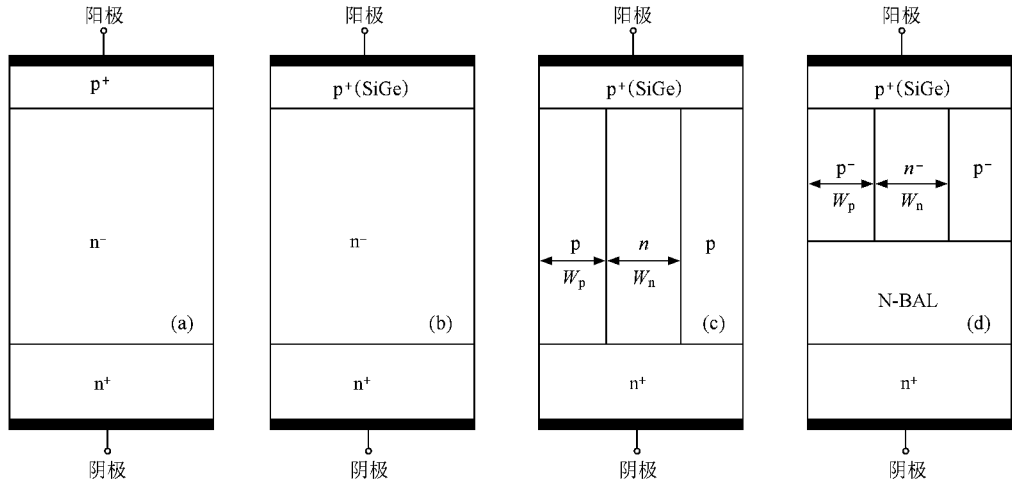


图 1 常规 Si 功率二极管 (a)、SiGe 二极管 (b)、超结 SiGe 二极管 (c) 和半超结 SiGe 二极管 (d) 结构示意图

3. 结果与讨论

为了说明 S-SJ SiGe 二极管的优越性能, 同时还对常规结构的 Si 和 SiGe 两种功率二极管进行了特性模拟, 没有特别指明的情况下, 所有器件的基区总厚度均为 $12 \mu\text{m}$, p^+ 层厚度为 50 nm , 掺杂浓度为 $10^{19}/\text{cm}^3$, 阴极结深为 $2 \mu\text{m}$, 掺杂浓度为 $10^{20}/\text{cm}^3$, SiGe 器件中 Ge 的含量为 20%.

3.1. 正向通态特性

图 2 为常规 Si、SiGe 二极管与半超结 SiGe 二极管的正向通态特性比较曲线. 可以看出, 在正向电流密度不超过 $1000 \text{ A}/\text{cm}^2$ 时, 常规和半超结结构的 SiGe 二极管的正向特性远远优于 Si 二极管.

与 Si 二极管相比, SiGe 功率二极管可以实现低正向压降下高电流密度的运输, 大大降低了器件的通态功耗. $p^+(\text{SiGe})/n^-(\text{Si})$ 异质结的能带结构属于低势垒尖峰情形: 在界面处 $n^-(\text{Si})$ 的势垒“尖峰”低于 $p^+(\text{SiGe})$ 的导带底, 可用扩散模型来处理异质 $p^+(\text{SiGe})/n^-(\text{Si})$ 结的电流. 热平衡状态时, 空穴由

二极管结构 (图 1(a)) 所不同的是其 p^+ 层采用应变 SiGe 材料, 厚度很薄, 大约在 $20\text{--}50 \text{ nm}$. 超结 (SJ) SiGe 二极管 (图 1(c)) 的 n^- 基区由 p 型柱 (pillar) 和 n 型柱 (pillar) 相互交替形成. 为了提高耐压, 要求 p/n 柱中的电荷完全平衡, 并在击穿之前 p/n 柱完全耗尽. 半超结 (S-SJ) 结构由 SJ 和 BAL 两部分构成, 结构如图 1(d) 所示, 不但具有优良的电特性, 而且工艺难度和制造成本也大大降低.

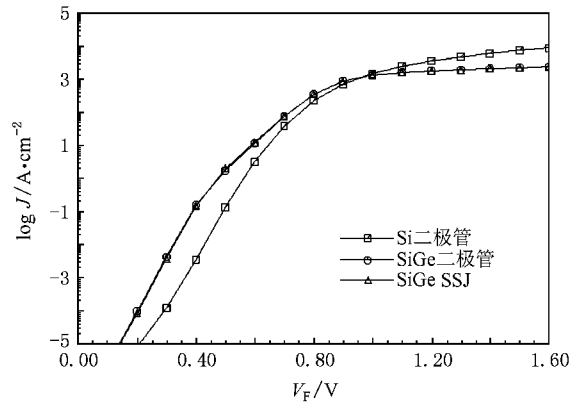


图 2 常规 Si、SiGe 二极管和半超结 SiGe 二极管的正向通态特性比较曲线

p 型 SiGe 的价带到 n 型 Si 的价带遇到的势垒高度为 $qV_D + \Delta E_v$, 而电子由 n 型 Si 的导带到 p 型 SiGe 的导带遇到的势垒高度为 $qV_D - \Delta E_c$. $p^+(\text{SiGe})/n^-(\text{Si})$ 异质结主要特点是禁带上移, 即价带带阶远大于导带带阶 $\Delta E_v \gg \Delta E_c$ [12], 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, 导致 SiGe 二极管正向压降

降低.

3.2. 反向阻断特性

图 3 为常规结构的 Si, SiGe 二极管和半超结 SiGe 二极管的反向阻断特性比较曲线. 采用半超结结构后, 器件的反向耐压有了显著提高, 由 240 V 增加到 310 V, 增加了 30% 左右. 传统功率二极管要满足高耐压要求时, 需降低基区浓度和增大基区厚度, 导通电阻会随之增大, 反向恢复时间也会增长. 基于电荷平衡原理的超结 (SJ) 的提出, 即将传统的 n⁻ 基区替换为由 p 型柱和 n 型柱相互交替形成的超结基区, 很好地解决了导通电阻和耐压之间的矛盾. SJ 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. 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^[13, 14].

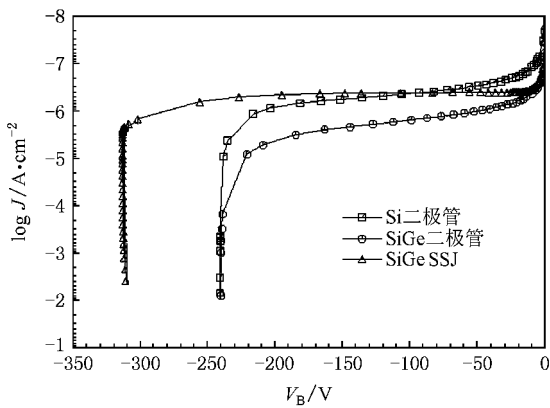


图 3 常规 Si, SiGe 二极管和半超结 SiGe 二极管的反向阻断特性比较曲线

从图 3 还可以看出, 相比常规结构的 Si 二极管, 常规 SiGe 二极管的反向耐压几乎没有改变, 但漏电流有了大幅度的增加. 而半超结 SiGe 二极管在较低的反向电压下, 基区就会完全耗尽, 可以获得高耐压又可保证具有低的漏电流. 外延制备 SiGe/Si 异质结器件材料的主要困难在于生长具有良好结晶完整性的 SiGe 合金与控制异质结的掺杂. 由于 Ge, Si 之间存在着较大的晶格失配度(约 4.2%), 因此生长在 Si 衬底上的 SiGe 合金受到应变的作用而产生四方畸变, 当合金层厚超过一临界值 h_c 时, 应力的作用将使外延层中产生失配位错或形成岛状生

长, 外延层中的位错通常会导致器件退化和失效. 另一方面, 优良的外延生长环境和妥善的衬底化学处理亦是获得优质 SiGe/Si 异质结材料与器件的关键因素, 因为外延中非有意引入的杂质或缺陷都有可能形成非辐射复合中心, 从而引起漏电或成为成核中心产生失配位错. 但如果在 Si 上外延生长的 SiGe 合金足够薄, 通过 SiGe 合金层的应变补偿其晶格失配, 仍可获得无界面失配位错的 SiGe 合金层.

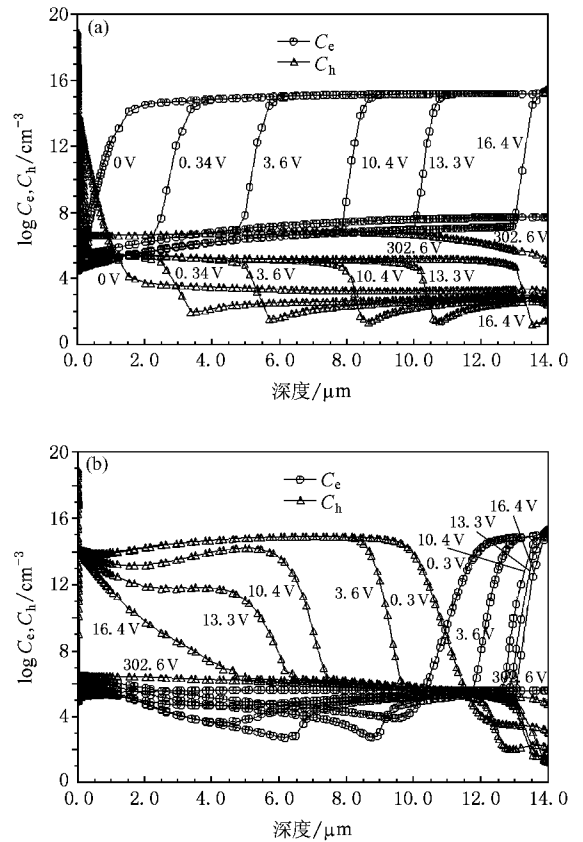


图 4 (a) 半超结 SiGe 二极管反向阻断过程中 n 型柱 (n-pillar) 电子浓度 C_e 、空穴浓度 C_h 的分布曲线; (b) 半超结 SiGe 二极管反向阻断过程中 p 型柱 (p-pillar) 电子浓度 C_e 、空穴浓度 C_h 的分布曲线

图 4 (a) (b) 为半超结 SiGe 二极管反向阻断过程中载流子浓度(电子浓度 C_e 、空穴浓度 C_h) 随反向电压的分布曲线. n 型柱中载流子的耗尽是从 p⁺ 结开始, 很快进行到 n⁺ 结. 而 p 型柱中载流子的耗尽则是沿相反方向从 n⁺ 结向 p⁺ 结进行的, 这样可以加快耗尽区的形成, 降低漏电流.

3.3. 反向恢复特性

半超结结构器件的一个重要优点就是具有较软的反向恢复特性, 并且恢复噪声很小. 这是因为反

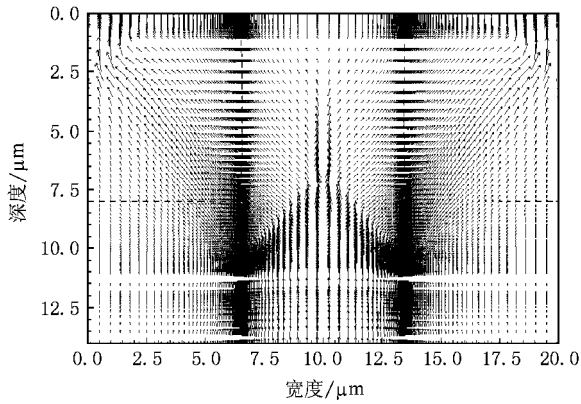


图 5 半超结 SiGe 二极管反向恢复过程中电流矢量分布图

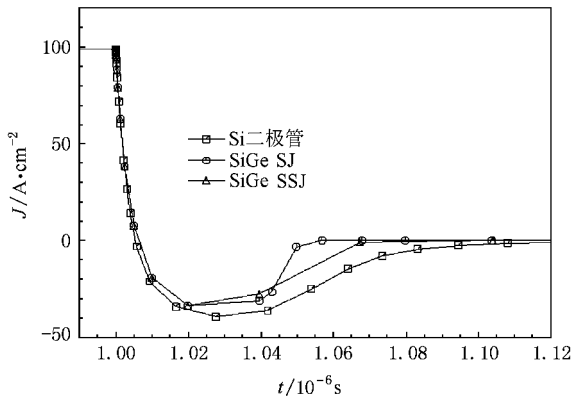


图 6 常规 Si 二极管、超结 SiGe 二极管和半超结 SiGe 二极管的反向恢复特性比较曲线

向恢复特性主要取决于基区的耗尽情况。二极管处于导通状态时,大量过剩载流子储存在基区中,使二极管具有很高的反向恢复电荷 Q_{rr} 。采用超结结构时,横向 pn 结的存在会使这些载流子迅速排出,在较低的反向电压下,基区就完全耗尽,使结电容很快下降至零,反向恢复电流迅速截止,造成了很差的反向恢复特性。而在半超结结构中,由于底端辅助层的存在,耗尽是逐渐发生的,因而结电容缓慢降低,反向恢复特性变软。这一点也可以从图 5 半超结 SiGe 二极管反向恢复过程电流矢量分布图中看出,二极管阳极侧移出的电荷要比阴极侧快得多,在恢复后期辅助层内仍有较多的载流子,使非平衡载流子的快速消失受到抑制导致更软的恢复特性。从以上分析可以看出,所谓半超结结构根本上还是以超结结构为雏形的。但是,它在器件性能上的改善却是显而易见的。图 6 是器件的反向恢复特性比较曲线。常规 Si 二极管的反向恢复时间 t_{rr} 最长,反向恢

复峰值电流 I_{RRM} 最大。反向恢复电荷 Q_s 正比于二极管的反向恢复功耗,由 $Q_s = \frac{1}{2} I_{RRM} t_{rr}$ 可知 Si 二极管的反向恢复功耗是最大的。SiGe 超结二极管的反向恢复时间虽然最短,但软恢复特性也最差。而 SiGe 半超结二极管既有短的恢复时间,也具有很软的恢复特性,电流的变化非常平缓,反向恢复峰值电流也最小。具有软恢复的二极管应用在开关电路中,将不需要任何吸收,而且不会产生 EMI,可以简化系统设计和降低成本。

3.4. 辅助层对器件特性的影响

底端辅助层与 p 型、n 型柱的相对厚度及相应的掺杂浓度变化,对器件特性有很大影响。在以下讨论中,所有器件基区总厚度均相同,p 型与 n 型柱的宽度保持不变。超结部分柱区高度与底端辅助层厚度比例为 t ,柱区越高,辅助层越薄,底端辅助层的掺杂浓度为 N_D 。

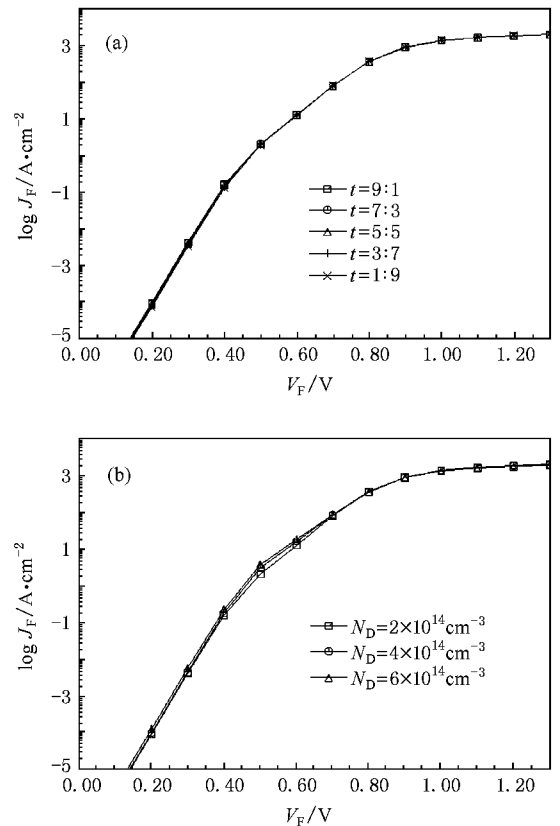


图 7 半超结 SiGe 二极管的正向导通特性 (a)不同柱区高度比例;(b)不同辅助层掺杂浓度

图 7 (a) (b) 分别显示柱区高度比例和辅助层掺杂浓度对半超结 SiGe 二极管通态特性的影响。

可以看出,器件的正向特性并未随柱区高度比例和辅助层掺杂浓度的改变而产生明显变化.由于电导调制效应,正向导通时,注入基区的载流子浓度远远大于相对低的平均基区掺杂浓度而导致电阻显著下降,使二极管在低正向压降下实现高电流密度的输运.在电流密度较小的情况下,正向压降随底端辅助层掺杂浓度的增加而略有降低(图 7(b)).

一旦采用半超结结构后,柱区高度变化对器件的阻断电压几乎没有影响,但随着柱区高度降低,漏电流明显增加(图 8(a)).图 8(b)显示辅助层掺杂浓度对阻断电压有显著影响,掺杂浓度越低,阻断电压越大.当底端辅助层浓度为 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时,反向阻断电压比 $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 掺杂浓度时高出 70 多伏,而漏电流基本不变.

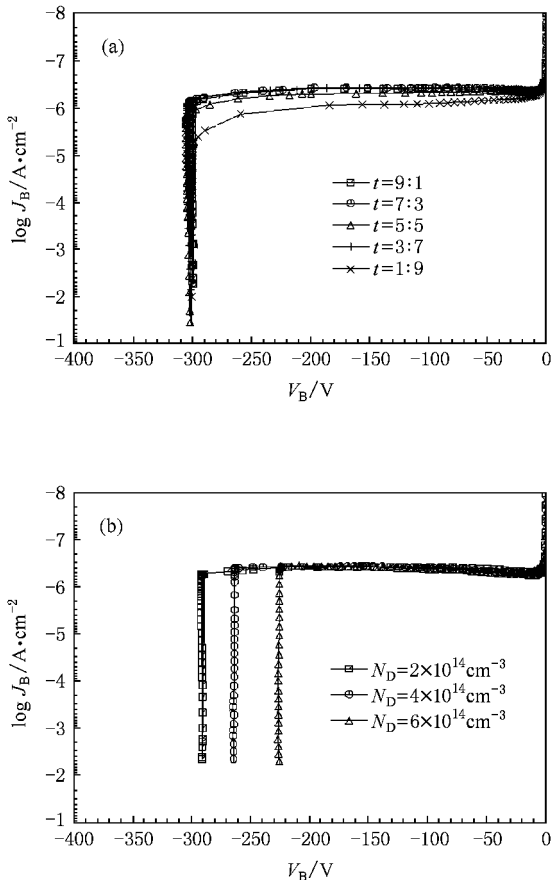


图 8 半超结 SiGe 二极管的反向阻断特性 (a)不同柱区高度比例;(b)不同辅助层掺杂浓度

从图 9(a)可以看出,当超结比例较大时,反向恢复时间大大缩短,但二极管反向恢复硬度也随之变高.当超结部分高度不超过底端辅助层厚度时,反向恢复特性基本保持不变,可以获得非常软的恢

复特性.底端辅助层掺杂浓度的变化对反向恢复时间的影响并没有单一的关系,掺杂浓度为 $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时,比掺杂浓度为 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和 $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时的反向恢复时间都要短(图 9(b)).

超结部分柱区越高,深宽比也就越大,加大了工艺复杂度,提高了制造成本.综合以上对半超结 SiGe 二极管特性的讨论,当柱区高度与底端辅助层厚度的比例为 3:7 时,在获得优良器件特性的前提下,大大降低了工艺难度和成本.而底端辅助层的掺杂浓度可根据耐压和反向恢复特性需要进行调整.

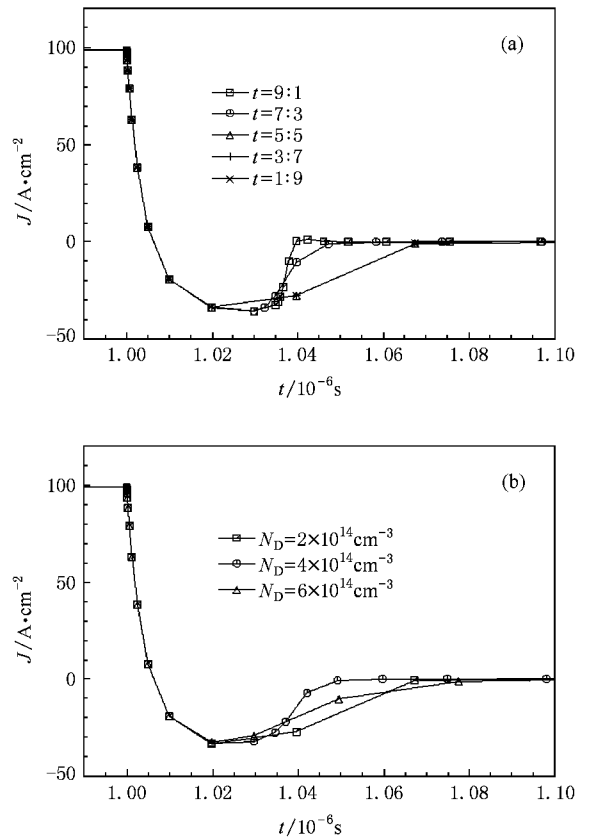


图 9 半超结 SiGe 二极管的反向恢复特性 (a)不同柱区高度比例;(b)不同辅助层掺杂浓度

3.5. Ge 含量对器件特性的影响

Ge 含量是影响器件性能的重要参数,也为器件设计提供了更大的自由度.图 10 显示了不同 Ge 含量半超结 SiGe 功率开关二极管的正向通态特性、反向阻断特性和反向恢复特性曲线.从图中可以看出,器件的正向通态特性和反向恢复特性对 Ge 含量非常敏感,反向阻断电压几乎不受 Ge 含量的影

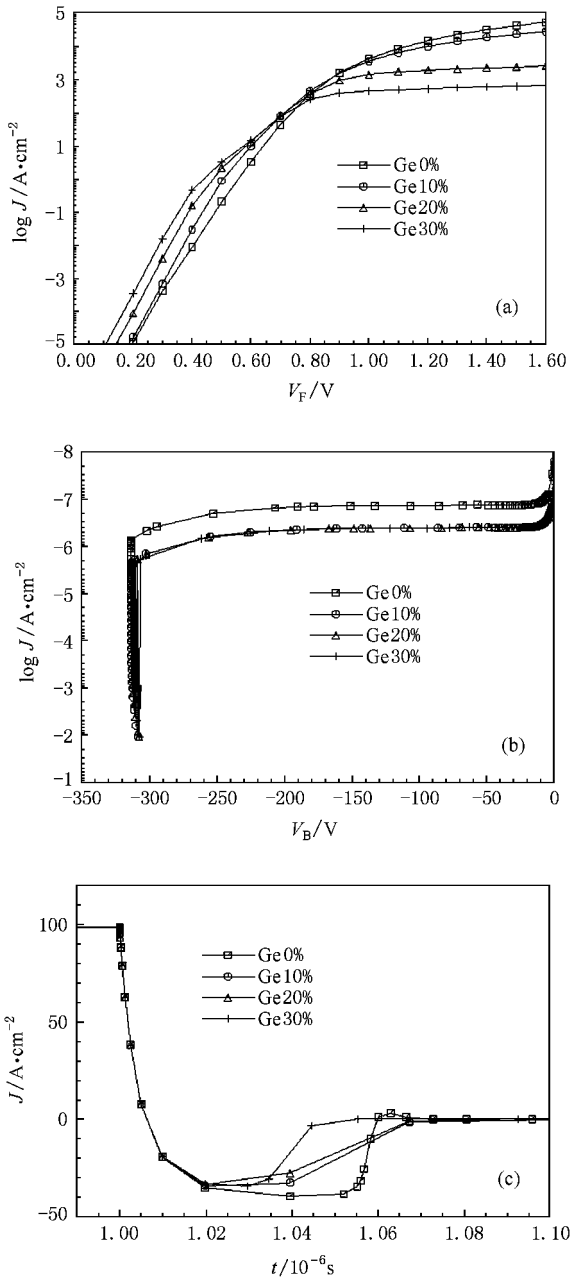


图 10 Ge 含量对半超结 SiGe 二极管正向通态特性 (a) 反向阻断特性 (b) 和反向恢复特性 (c) 的影响

响. 当正向电流密度不高于 200 A/cm^2 时, 半超结 SiGe 二极管的通态压降随 Ge 含量的增加而降低; 正向电流密度超过 200 A/cm^2 , 通态压降随 Ge 含量的增加而增加, Ge 含量高于 20% 时通态压降增加的更显著. 在 Si 二极管中也采用半超结结构时, 其反向漏电流要比含 Ge 二极管的小, 但阻断电压基本不随 Ge 含量改变. 图 10(c) 显示随着 Ge 含量的增加, 反向恢复时间明显变短, 30% Ge 含量的二极管比同结构的 Si 半超结二极管的反向恢复时间缩短了三分之一以上, Si 二极管不但反向恢复时间最长, 软恢复特性也最差. 虽然 Ge 含量越高, 反向恢复时间也越短, 但软恢复特性也随之变差. 10% Ge 含量的二极管的软恢复因子是 30% 的 1.8 倍. 另外, 从材料生长的角度考虑, Ge 的含量也不能一味的增加. 由于 Si 和 Ge 的晶格失配率为 4.17%, 应变 SiGe 层的厚度存在一个临界厚度. 当 SiGe 薄膜的厚度超过临界厚度时, 应变被弛豫, 产生失配位错, 破坏材料和器件的物理性能^[15]. 随着 SiGe 层中 Ge 含量的增加, 临界厚度会变小. 因此, 从材料生长的角度来考虑, Ge 的含量不能太高, 综合考虑 10%—20% Ge 含量是比较合理的.

4. 结 论

结合 SiGe 材料和半超结结构的优越性能, 提出了一种半超结 SiGe 功率开关二极管, 可同时获得更快的开关速度、更软的恢复特性, 低的正向压降和高的阻断电压, 显著改善器件的综合特性. 用半超结结构来制造高压器件, 只需调整底端辅助层 BAL 的厚度和掺杂浓度, 而超结部分的结构不变. 在相同导电阻下, 半超结比传统超结的深宽比要小, 减少了外延生长和离子注入的工序, 降低了工艺难度和成本. 另外 SiGe 材料的引入也为器件设计提供了更大的自由度.

[1] Carns T K, Chun S K 1994 *IEEE Trans. El. Dev.* **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) 256
 [3] Gao Y, Cheng B T, Yang Y 2002 *Chin. J. Semicond.* **23** 735 (in Chinese) [高勇、陈波涛、杨媛 2002 半导体学报 **23** 735]
 [4] Qi H, Gao Y 2003 18th *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition* (Florida, USA) 964

[5] Gao Y, Ma L 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 414
 [6] Ma L, Gao Y, Wang C L 2004 *Chin. Phys.* **13** 1114
 [7] Zhang B, Xu Z, Huang A Q 2000 *Proc. International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's.* (Toulouse, Seiten) 61
 [8] Chen X B U.S. Patent 5,216,275, Jun. 1, 1993
 [9] Chen X B, Mawby P A, Board K 1998 *Microelectronics Journal* **29** 1005
 [10] Chen X B, Sin J K O 2001 *IEEE Trans. El. Dev.* **48** 344

- [11] Strollo A G M , Napoli E 2001 *IEEE Trans. El. Dev.* **48** 2161
- [12] 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]
- [13] Kondekar P N 2005 *IEEE Conference on Electron Devices and solid-state circuits.* (Hong Kong) 551
- [14] Shenoy P M , Bhalla A , Dolny G M 1999 *Proc. International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs.* (Toronto , Canada) 99
- [15] Lee S W , Chen H C , Chen L J 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 6880

Semi-super junction SiGe high voltage fast and soft recovery switching diodes ^{*}

Ma Li^{1)†} Gao Yong²⁾

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

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

(Received 1 March 2008 ; revised manuscript received 25 April 2008)

Abstract

Semi-super junction (S-SJ) is developed on the basis of the super junction (SJ) structure by adding BAL (bottom assist layer) in the base region. One should only adjust the depth and the doping concentration of the BAL in the S-SJ structure to obtain higher working voltages. At the same on resistance , the aspect ratio of p-column in the S-SJ structure is less than that in the super junction structure , which means simpler process of epitaxial growth and ion implantation , which is very effective in reducing the process difficulty and the manufacture cost. Because the band gap of SiGe material can be adjusted by changing the Ge fraction and the epilayers strain , the carrier mobility is increased with the increasing Ge content , the manufacture process is compatible with Si process , and great importance has been gradually attached to the SiGe material. To meet the requirements of low forward conducting voltage drop , high breakdown voltage , minimum reverse leakage current , and fast and soft reverse recovery process for power diodes in high frequency power electronics circuits , a S-SJ SiGe diode with remarkable improvement in all these characteristics of present power diode is proposed by combining both merits of S-SJ structure and SiGe material in this paper.

Keywords : semi-super junction , SiGe diode , high voltage , fast and soft recovery

PACC : 7340L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50477012) , the Doctoral Program Foundation of Institutes of Higher Education of China (Grant No. 20050700006) and the Special Scientific Research Program of the Education Bureau of Shaanxi Province , China (Grant No. 05JK268).

[†] E-mail : mali@xaut.edu.cn