

用 SIPOS-SiO₂ 复合层对 4H-SiC n⁺ pp⁺ 结构钝化的分析

姜岩峰 李思渊 刘 肃 曹 磊 薄建军

(兰州大学物理系静电感应器件研究所, 兰州 730000)

摘要: 用半绝缘多晶硅(SIPOS)-SiO₂复合层作为4H-SiC n⁺ pp⁺结构的钝化层, 克服了用多孔碳化硅或单纯用SiO₂钝化的不足。在LPCVD淀积SIPOS层后, 用900℃氧气退火代替了平常的热氧化, 在SIPOS层上生长了一层SiO₂。实际测量证实了这种新方法的合理性。分析了各主要工艺对钝化效果的影响, 综合优化指出: 在淀积SIPOS层时, 掺氧量要高, 而淀积温度不应太高。用此方法钝化的4H-SiC n⁺ pp⁺结构, 击穿电压接近理想值, 反向漏电流明显降低。

关键词: SiC; 钝化层

PACC: 7390; 7360; 7360F

中图分类号: TN 304. 2¹ 4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)07-0686-05

4H-SiC n⁺ pp⁺ Structure Passivated with SIPOS-SiO₂ Compound Layer

JIANG Yan-feng, LI Si-yuan, LIU Su, CAO Lei and BO Jian-jun

(Institute of Static Induction Devices, Department of Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Received 13 July 1999, revised manuscript received 18 December 1999

Abstract: A semi-insulating polycrystalline silicon (SIPOS)-SiO₂ compound sheet is used as a passivating layer of 4H-SiC n⁺ pp⁺ structure. After the deposition of SIPOS by LPCVD, a unique thermal oxidation step, annealing in oxygen atmosphere at 900℃ instead of oxide layer deposition, in normal method is adopted to grow a SiO₂ layer over it. The passivating result demonstrates the reasonability of the alternation. Moreover, chief technological parameters that influence the passivating effect are also adjusted and the conclusions have been drawn that there should be excess oxygen in SIPOS layer with depositing temperature lower than 1000℃. The annealing temperature should be high up to 900℃. Experimental data show that SIPOS-SiO₂ compound layer can act as an effective passivation sheet of the 4H-SiC n⁺ pp⁺ structure to get an ideal breakdown voltage and leakage current.

姜岩峰 男, 1972年出生, 博士生, 感兴趣方向: 宽禁带半导体, 新型半导体器件。

李思渊 男, 1934年出生, 兰州大学教授、博士生导师, 多年从事静电感应器件的研究。

1999-07-13 收到, 1999-12-18 定稿

Key words: SiC; passivation layer

PACC: 7390; 7360; 7360F

Article ID: 0253-4177(2000)07-0686-05

1 引言

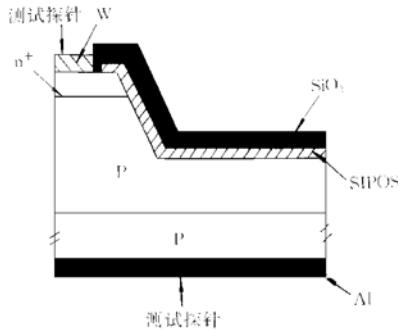
近年来,作为宽禁带半导体家族中非常重要的一员,碳化硅越来越受到重视。国内外研究人员对碳化硅材料的性质进行了深入研究^[1~6],使得这个材料越来越接近于实用。材料实用化的一个重要标准就是看这种材料能否做成应用器件。阻碍 SiC 实用化的因素很多,缺乏有效的钝化层就是一个重要的因素^[1]。碳化硅由于高的临界击穿电压以及良好的热稳定性成为目前开发高温大功率器件的首选材料。以 4H-SiC 为例,临界电场强度为硅的 5—6 倍^[1],用碳化硅制作整流二极管可以使击穿电压 V_{br} 大幅度提高。对于碳化硅 pn 结,平面终端下 V_{br} 已可达到 2kV^[7],而台面结构的 V_{br} 可达到 4.5kV^[8]。由于空气中火花、电弧等的影响,远远低于理想值时击穿就已经发生。在硅油这类高电强度的液体中测量是避免击穿提前发生的一个有效方法^[9]。实际应用中,为提高 V_{br} 以及避免不可逆转的、破坏性的击穿发生,就需要一个有效的钝化层。有关碳化硅钝化方面的工作,集中在多孔碳化硅钝化^[10]和 SiO₂ 钝化^[11],这两种方法都可将击穿电压升至理想值的 80% 左右,起到了一定的作用。但这两种方法都存在缺点,对于多孔碳化硅钝化,由于反应机理的特殊性,对于 p 型材料长不出多孔碳化硅,所以目前此钝化方法仅适用于 n 型材料^[12~14];而对于 SiO₂ 钝化,由于碳化硅材料氧化工艺的不成熟,导致 SiC-SiO₂ 界面态密度和可动电荷密度过大,使得钝化效果不理想。半绝缘多晶硅层在作为器件的钝化层时,对漏电流的抑制相当有效,但其介电常数仅为 9 左右,如果再在其上加一层氧化层,可以使器件的击穿电压提高。为此,本文拟采用 SIPOS-SiO₂ 复合层作为钝化层,并通过实验研究了各工艺对钝化效果的影响,同时,也提出了一个关于如何在 SIPOS 层上生长致密氧化层的新方法。

2 样品的制备

首先,准备一个 p⁺ 型(0001)4H-SiC 衬底,其上有一 p 型外延层,厚度 8μm,掺杂浓度为 10^{14}cm^{-3} ,然后通过离子注入法在其上形成 n⁺ 层,注入源为 N/P^[10],方块电阻为 $2.5 \times 10^2\Omega/\square$,再利用等离子刻蚀法刻蚀出台面,台面的直径为 2000μm,深度为 5μm,这样就得到了台面结构的 4H-SiC n⁺ pp⁺ 二极管。先测量其反向击穿电压、反向漏电流等,然后清洗表面,准备在其上覆盖钝化层。第一步是淀积 SIPOS 层,在清洁的碳化硅表面,用 LPCVD 法,在 20Pa 下,通过 SiH₄ 与 N₂O 化学气相反应淀积。先固定反应室温度(800°C),通过改变 N₂O 和 SiH₄ 的流量比率来调节生成膜中氧原子的含量,制成 A、B、C 三个样品,其对应氧含量分别为 2%、20%、30%;再固定 N₂O 和 SiH₄ 的流量比率,调节反应室温度(650~1100°C),制成 D、E、F、G 四个样品,对应淀积温度分别为 700、900、1000、1000°C,其中 F 和 G 的淀积温度相同,均为 1000°C。对已经覆盖了 SIPOS 层的各个样品进行测量,然后在其上覆盖一层氧化层。以前的常规工艺是采用化学气相淀积法,然后再退火^[16]。本文中,直接在高温氧气气氛中退火,生成致密氧化层,工艺简单,效果好。对样品 A、B、D、E、F 的退火温度为 900°C,样品快速推进,在氧气气氛中保持高温 3min,然后慢速降温,30min 后降为室温;而样品 C、G 的退火温度为 700°C,条件和时间均相同。这样,又在 SIPOS 上生长了一层 SiO₂,再次测量各样品的击穿电压、漏电流。样品的结构图如图 1 所示。

3 实验结果

用 MEDICI 软件对 4H-SiC n⁺ pp⁺ 台面结构进行模拟,击穿电压理想值为 800V。对制备的各样品在不

图 1 4H-SiC n^+ pp^+ 结构示意图FIG. 1 Diagram for 4H-SiC n^+ pp^+ Structure

同阶段的击穿电压值如表 1 所示。

表 1 各样品在不同阶段的击穿电压值

Table 1 Breakdown Voltage of Various Samples at Different Stages

样品	A	B	C	D	E	F	G
没有钝化时的击穿电压/V	450	450	455	470	440	430	450
退火前的击穿电压/V	580	650	650	630	660	670	670
退火后的击穿电压/V	680	750	700	750	750	550	720

从表 1 可以明显地看出, 没加钝化层前, 击穿电压 V_{br} 仅为理想值的一半左右, 当在样品表面淀积一层 SIPOS 后, 各样品的击穿电压均得到了不同程度的提高, 但含氧量低的样品 A, 其击穿电压比其它样品均要低得多; 对样品 D、B、E、F 来说, 在退火前, 对应的 V_{br} 随着淀积 SIPOS 温度的升高有增大的趋势, 但是在 900°C 退火之后, D、B、E 的 V_{br} , 均为 750V, 而样品 F 的 V_{br} 却下降, 仅有 550V; 样品 G 的 SIPOS 淀积温度与样品 F 相同, 在 700°C 氧退火后, 其 V_{br} 与样品 F 不同, 为 720V, 样品 C 在 700°C 退火后, 击穿电压也有所上升, 但上升幅度没有样品 B 明显。

对于样品 A、B、C, 分别对应 SIPOS 层不同的氧含量, 在退火前, 其反向漏电流与反向电压关系如图 2 中 a, b, c 三条线所示。由图中可以看出, 对样品 A, 反向漏电流 I_0 与反向电压 V_r 近似指数关系, 说明此时的钝化效果非常不明显; 而对样品 B、C, I_0 值不但低, 而且根据半导体 p-n 结理论, I_0 与 V_r 存在着 $\frac{1}{3}$ 至 $\frac{1}{2}$ 指数关系, 这说明 SIPOS 层有较好的钝化作用。在退火后, A、B 两样品的漏电流大幅度地降低了, I_0 随 V_r 变化的趋势进一步缓和, 如图 2 中 a', b' 线所示, 样品 C 的变化却没有 A、B 这么明显。

样品 D、B、E、F 对应着 SIPOS 层不同的淀积温度, 各样品 I_0 与 V_r 之间关系示于图 3。可以看出, 随着淀积温度的升高, 相同电压下反向漏电流减小。在退火前, 各样品之间 I_0 差别很小, 但退火后, 样品 F 的漏电流突然大幅度增大, 如图 3 中 f' 线所示。

为了更准确地说明问题, 对钝化的这些样品进行 C-V 测量。对于 SiC 器件, 要在高温下(大于 300°C) 测量才能反映出真实的界面密度^[19]。测量用的是 Keithley 595 准静态 C-V 仪, 结果列于表 2 中。为了便于比较, 我们另外做了一个样品, 其淀积 SIPOS 的温度为 800°C, 氧含量为 30%, 在没有进行氧退火的情况下, 其界面态密度为 $11 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 。

表 2 各样品在高温氧退火后的界面态密度
Table 2 Densities of Interface State for Various Samples

After Annealing in O₂ at High Temperature

样品	A	B	C	D	E	F	G
界面态密度 / 10^{11} cm^{-2}	5.2	3.0	7.8	3.0	2.8	32	7.4

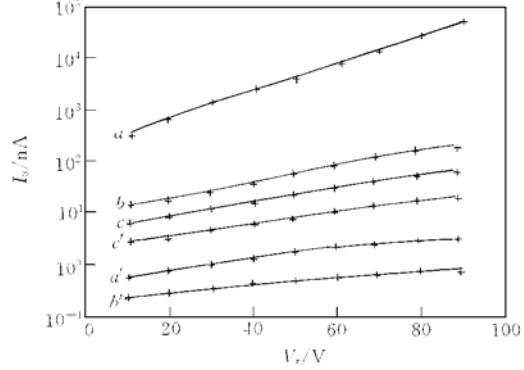


图 2 样品 A, B, C 在退火前后漏电流 I_0 与反向电压 V_r 关系曲线
(其中曲线 a, b, c 表示退火前的 I_0 - V_r 关系
曲线 a', b', c' 表示退火后的 I_0 - V_r 关系)

FIG. 2 Leakage Current I_0 of Sample A, B and C Before and After Annealing Versus Backward Voltage V_r

4 分析和讨论

图 1 所示样品结构, 漏电流 I_0 由下式给出:

$$I_0 = I_{gs1} + I_{gs2} + I_c + I_{bl} + I_{b2} \quad (1)$$

式中 I_{gs1} 为 SIPOS-SiC 界面能级产生的电流; I_{gs2} 为 SiO₂-SIPOS 界面能级产生的电流; I_c 为 SiC 体内的扩散电流; I_{bl} 为 SIPOS 层内流动的电流; I_{b2} 为 SiO₂ 层内流动的电流, 一般说来, I_c 可忽略不计; I_{bl} 和 I_{b2} 与钝化膜的电阻率和厚度成反比; I_{gs1} 和 I_{gs2} 与界面复合速度成正比, 即与界面态密度成正比。

SIPOS 层中的氧原子可用来减少 SiC 表面的悬挂键和界面的过渡键^[20], 使 SIPOS 与 SiC 界面态密度减少, 即使(1)式中 I_{gs1} 和 I_{gs2} 下降, 从而降低漏电流。对样品 A, 其掺氧量极低, 界面态密度较大, 钝化效果不太理想; 对样品 B、C 而言, 其掺氧量分别为 20% 和 30%, 二者由于氧原子都已足够多, 所以在减少 SiC 与 SIPOS 界面态密度的程度上相差不大。在相同电压下, 样品 C 的漏电流略小于样品 B, 原因是, 对于 SIPOS 层, 其禁带宽度和掺氧量有关, 随着掺氧量的增加, 禁带宽度增加^[17], 所以样品 C 的 SIPOS 层禁带宽度大于样品 B, 漏电流要小一些。可以推论: 用 SIPOS 做钝化层时, 掺氧量的多少对钝化效果有一定的影响。

退火前, 样品 B 与 C 的击穿电压没有明显区别。对样品 A、B 两样品进行 900℃ 高温氧退火后, 其击穿电压均提高了 100V 左右, 而且漏电流大幅度降低, 而对 C 仅用 700℃ 条件退火, 击穿电压没有 B 提高的幅度大, 漏电流降低得不显著, 这说明使用高温氧退火对提高钝化效果是有利的。根据实验观察, 在 900℃ 氧气气氛下退火所得到的氧化层, 其质量与同样温度下的干氧化所得的结果一致。

如图 2 中曲线 a'、b' 所示, 在高温氧退火后, 它们的漏电流大幅度降低。这可归结为两方面的原因: 一个是在 SIPOS 层中的 Si_xO_y 在退火后转变成 SiO₂^[20], 使 SIPOS 膜电阻率上升, I_{bl} 减小, 同时这一步骤对降低 SiO₂-SIPOS 以及 SIPOS-SiC 的界面态是有利的, 这可从表 2 中的数据观察到, 使得 I_{gs1} 和 I_{gs2} 均减小, 导致漏电流减小。对在 700℃ 下氧退火的样品 C, 由于退火温度不高, 生成的氧化层不致密, 且对降低界面态效果不明显, 所以, 与样品 A、B 相比, 击穿电压上升幅度不大, 漏电流下降不显著。

样品 D、B、E、F 掺氧量相同, SIPOS 层沉积温度不同。随着沉积温度的升高, 击穿电压缓慢上升, 这是由于较高沉积温度对应的结构缺陷较少。在退火后, D、B、E 的 V_{br} 均提高到 750V, 反向漏电流下降, 即高温退火提高了钝化效果; 表 2 中的数据表明在高温氧退火后这三个样品的界面态密度是最低的。但是对于样品 F, 退火后其击穿电压没有提高, 反而下降为 550V, 且漏电流大幅度上升, 此时其界面态密度比其它样品要高一个数量级。对样品 G, 其沉积温度与 F 一样, 但退火温度取为 700℃, 由表 1 看出, 样品 G 的击穿电压比退火前有所提高, 而且经过实际测量, 漏电流也受到了限制。可以看出, 样品 F 钝化效果的降低是由于退火温度过高, 虽然 900℃ 氧退火对提高样品 D、B、E 的钝化效果有很大提高, 但是由于样品 F 沉积 SIPOS 时温度太高, 退火温度不宜过高。900℃ 的退火温度不适于 SIPOS 沉积温度过高的样品。

基于以上分析, 对样品 F 的反常现象作者们做了如下解释: 在沉积 SIPOS 层时, 温度越高, 越容易破坏 SiC 表面附近的 Si—C 键。在 Si—C 键被破坏后, 由于碳原子的半径(0.077nm)比硅原子半径(0.117nm)小, 碳原子析出后体积减小所产生的 SiC 体积应变能小于硅原子的析出, 所以碳原子优先析出, 这样在原来的 4H-SiC 与 SIPOS 界面上, 出现了硅氧化物夹层 Si_xO_y, 在这一夹层中, 很难确定出其中氧原子的状态,

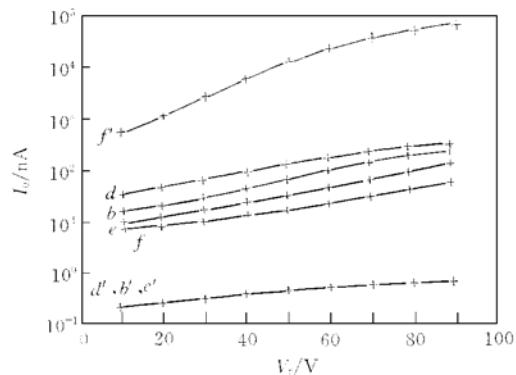


图 3 样品 D, B, E, F 在退火前后漏电流 I_0 与反向电压 V_r 关系曲线

(其中曲线 d, b, e, f 表示退火前的 I_0 - V_r 关系
曲线 d', b', e', f' 表示退火后的 I_0 - V_r 关系)

FIG. 3 Leakage Current I_0 of Sample D, B, E and F Before and After Annealing Versus Backward Voltage V_r

可能是 O_2^- 、 O_2 或者 O_4^- 等^[20], 由于晶格失配和热膨胀系数的差异等原因, 在这一层中存在着应力梯度。淀积温度越高, 应力梯度越大。所以对于 D、B、E、F 这几个样品, 样品 F 内的应力梯度最大, 使得高温退火时, SIPOS-Si_xO_y 和 Si_xO_y-SiC 界面处的键断裂^[18], 结果, 界面态密度和固定电荷密度大幅度增加, I_{gs1} 和 I_{gs2} 大幅度增大, 导致了反向漏电流突然剧增, 击穿电压大幅度下降。若限制退火温度, 使得界面处的键不发生断裂, 就不会发生这种现象。

综上所述, 有两种方法可用来避免这种“钝化失效”情况的发生, 一个是降低淀积 SIPOS 的温度; 另一个 是降低退火温度。但是, 退火温度过低, 钝化效果将会下降。从图 3 中可以看出, 淀积温度不同的样品, 反向特性差异不大, 高温退火后, 差异更小。所以采取低温淀积加上高温退火的方法可以使钝化效果优化。

5 结论

本工作提出了一个适于碳化硅器件的钝化方法, 即用 SIPOS-SiO₂ 复合层做钝化层, 可克服目前 SiC 钝化的不足。经过实验分析, 在淀积 SIPOS 时, 掺氧量要高; 淀积温度不应太高, 且高温氧退火是一个比较重要的工艺步骤。用此方法制备钝化层, 器件的反向击穿电压接近于理想值, 反向漏电流明显降低。

参 考 文 献

- [1] J. B. Casady and R. W. Johnson, Solid-State Electronics, 1996, **39**(10): 1409—1422.
- [2] 李宁生, 鲍希茂, 廖良生, 等, 半导体学报, 1997, **18**(10): 731—733[LI Ningsheng, BAO Ximao, LIAO Liangsheng et al., Chinese Journal of Semiconductors, 1997, **18**(10): 731—733(in Chinese)].
- [3] 王引书, 李晋闽, 张方方, 等, 半导体学报, 1999, **20**(7): 630—632[WANG Yinshu, LI Jinmin, ZHANG Fangfang et al., Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(7): 630—632(in Chinese)].
- [4] 臧嵒, 杨凯, 张荣, 等, 半导体学报, 1998, **19**(3): 197—201[ZANG Lan, YANG Kai, ZHANG Rong et al., Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(3): 197—201(in Chinese)].
- [5] 张玉明, 罗晋生, 张义门, 半导体学报, 1997, **18**(9): 718—720[ZHANG Yuming, LUO Jinsheng, ZHANG Yimen, Chinese Journal of Semiconductors, 1997, **18**(9): 718—720(in Chinese)].
- [6] 杨修春, 韩高荣, 张孝彬, 等, 半导体学报, 1998, **19**(6), 423—426[YANG Xiuchun, HAN Gaorong, ZHANG Xiaobin et al., Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(6): 423—426(in Chinese)].
- [7] P. G. Neudeck, D. J. Larkin, C. S. Salupo et al., A 2kV 4H-SiC Diode with Planar Terminal, Proceedings of the International Conference on SiC and Related Materials, Washington, D. C., 1993, 475—477.
- [8] O. Kordina, J. P. Bergman, A. Henry et al., Appl. Phys. Lett., 1995, **67**(16): 1561—1563.
- [9] L. G. Matus, J. A. Powell and C. S. Salupo, Appl. Phys. Lett., 1991, **59**(18): 1770—1772.
- [10] C. I. Harris, A. O. Konstantinov, C. Hallin et al., Appl. Phys. Lett., 1995, **66**(12): 1501—1502.
- [11] S. Ortolland, C. Raynaud, M. L. Locatelli et al., J. Appl. Phys., 1998, **84**(3): 1688—1692.
- [12] J. S. Shor, I. Grimberg, B. Z. Weiss et al., Appl. Phys. Lett., 1993, **62**(19): 2836—2838.
- [13] A. O. Konstantinov, C. I. Harris and E. Janzen, Appl. Phys. Lett., 1994, **65**(17): 2699—2701.
- [14] T. Matsumoto, J. Takahashi, T. Tamaki et al., Appl. Phys. Lett., 1994, **64**(2): 226—228.
- [15] Jason A. Gardner, Andrew Edwards and Mulpuri V. Rao, J. Appl. Phys., 1998, **83**(10): 5118—5124.
- [16] D. Dong, E. A. Irene and O. R. Young, J. Electrochem. Soc., 1978, **125**(5): 819—822.
- [17] Wang Yun-Zhen, Analysis of the Relationship Between the Bandgap Width and Oxygen Concentration, The Proceedings of the International Conference on Semiconductor and Integrated Circuit Technology, Beijing, 1986, 494—497.
- [18] W. Xie, J. N. Shenoy, S. T. Sheppard et al., Appl. Phys. Lett., 1996, **68**(16): 2231—2233.
- [19] J. N. Shenoy, G. L. Chindalore, M. R. Melloch et al., J. Electron. Mater., 1995, **24**(2): 303—307.
- [20] H. Mochizuki, T. Aoki, H. Yamoto et al., Jpn. J. Appl. Phys., 1976, **15**(S1): 41—43.