

# 6H-SiC 高反压台面 pn 结二极管

王姝睿 刘忠立 李晋闽 王良臣 徐萍

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 在可商业获得的单晶 6H-SiC 晶片上, 通过化学气相沉积, 进行同质外延生长; 并在此 6H-SiC 结构材料上, 利用反应离子刻蚀和接触合金化技术, 制作台面 pn 结二极管。详细测量并分析了器件的电学特性, 测量结果表明此 6H-SiC 二极管在室温、空气介质中,  $-10V$  时, 漏电流密度为  $2.4 \times 10^{-8} A/cm^2$ , 在反向电压低于  $600V$  及接近  $300^\circ C$  高温下都具有良好的整流特性。

**关键词:** 碳化硅; pn 结二极管; 6H-SiC

**EEACC:** 2530B; 2560H; 2520M; 7310B; 7310D

**中图分类号:** TN31      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2001)04-0507-04

## 1 引言

碳化硅(SiC)材料具有良好的物理和化学性能: 禁带宽度大(6H-SiC:  $3.03 eV$ , 4H-SiC:  $3.26 eV$ ), 临界电场强度高( $2 \times 10^6 V/cm$ ), 高饱和漂移速度( $2 \times 10^7 cm/s$ )和高热导率( $3.0 - 3.8 W/(cm \cdot K)$ ), 机械硬度高(莫氏硬度为 9, 仅次于金刚石), 化学性能稳定(在  $1500^\circ C$  以下几乎不受任何实验室溶剂作用), 抗辐射能力强, 是实现高温与高压, 高功率及高频相结合的理想材料<sup>[1,2]</sup>。目前国内对 SiC 材料、器件及工艺的研究刚刚起步<sup>[3-7]</sup>, 1997 年, 张玉明<sup>[3]</sup>等人在 n 型 6H-SiC 体材料上制备了欧姆接触, 比接触电阻为  $8.4 \times 10^{-5} \Omega \cdot cm^2$ ; 1999 年张玉明<sup>[6]</sup>等人研制了 SiC 肖特基势垒二极管, 理想因子为 1.23, 肖特基势垒高度为  $1.03 eV$ , 开启电压为  $0.5V$ 。pn 结的电学性质是半导体器件的基础。在电子电路中, 整流、隔离、开关和放大都涉及到 pn 结, 因此 pn 结二极管的制作是 SiC 半导体器件发展的一个起点。在器件制作工艺中, 形成 dn 结有两种途径: 原位掺杂和离子注入。由于 SiC 离子注入要求的激活温度极高, 所以通过同质外延进行原位掺杂引起关注。1987 年, Shibahara 等人<sup>[8]</sup>报道了在 Acheson 法生长的 6H-

SiC 衬底上, 用 CVD 技术进行同质外延, 在此材料上制作出击穿电压为  $100V$  的 pn 结二极管; 1991 年, Matus<sup>[9]</sup>等人在 Cree 公司提供的 6H-SiC 衬底上, 通过 CVD 生长出高质量的外延薄膜, 成功制作了反向击穿电压为  $1kV$  台面 pn 结二极管; 随后, Neudeck<sup>[10]</sup>和 Kordora<sup>[11]</sup>先后制作出  $2kV$  和  $4.5kV$  高反压 pn 结二极管。本文介绍在 6H-SiC 衬底片上, 采用化学气相沉积工艺生长  $n^-$  和  $p^+$  型外延层; 并在此结构材料上, 利用反应离子刻蚀和接触合金化技术, 在国内首次研制出 6H-SiC 高反压台面 pn 结二极管, 并进行了系统的电学测量。

## 2 材料和器件制备

### 2.1 材料制备

6H-SiC 台面 pn 结二极管的 N 型衬底材料购自于美国 Cree 公司<sup>[12]</sup>, 其电阻率为  $0.045 \Omega \cdot cm$ 。为了提高生长速率, 特别是使外延薄膜的厚度达到器件的要求, 我们对原有的 MBE 系统进行了改造, 使此系统兼有 MBE 原位监测生长和 CVD 快速生长的双重优点, 生长速率可控制在几十 nm 到  $6 \mu m/h$ 。在 SiC 衬底材料上进行同质外延生长, 采用的反应气体分别为乙硅烷( $Si_2H_6$ )和乙烯( $C_2H_4$ ), 以  $H_2$  为

王姝睿 女, 1971 年出生, 博士生, 现从事 SiC 器件的研究工作。

刘忠立 男, 1940 年出生, 研究员, 博士生导师, 从事半导体器件及其物理的研究。

2000-03-22 收到, 2000-05-30 定稿

©2001 中国电子学会

稀释和输送气体。衬底用射频感应电炉加热，生长温度为1450℃。为测量外延生长厚度及生长速率，采用了压条技术，即将BN条压在同质外延用的SiC衬底上，生长出一个比较陡的外延膜台阶，通过常规的台阶仪来测量外延层的厚度，经过多次实验，在不同的生长条件下，用新改型的SiC材料生长系统，在 $2.67 \times 10^4$ Pa的反应压力下，获得了1—6μm的生长速率，这一生长速率满足了SiC器件对外延层厚度的要求。采用上述方法，在N型衬底上依次生长了8.5μm厚掺N的n<sup>-</sup>外延层和1.5μm厚掺Al的p<sup>+</sup>外延层，掺杂浓度分别为 $5.8 \times 10^{15}$ cm<sup>-3</sup>和 $9.0 \times 10^{18}$ cm<sup>-3</sup>。由此构成pn结二极管的结构材料。

## 2.2 台面pn结二极管的制备

制备6H-SiC台面pn结二极管的工艺步骤如下：(1)清洗，6H-SiC片在丙酮，无水乙醇中煮沸，并在稀盐酸中浸泡5min；(2)背面蒸Ni/Au，在900℃下合金3min；(3)用丙酮，无水乙醇超声清洗6H-SiC片5min，去离子水冲洗，浸在稀氢氟酸(10%)中1min，去离子水冲洗，并用氮气吹干；(4)正面蒸Al(1.5μm)，用作刻蚀掩蔽及欧姆接触；(5)光刻Al，图形为直径80μm的圆点；(6)采用干法刻蚀(RIE)SiC来隔离pn结，刻蚀条件为：气体流量比O<sub>2</sub>:SF<sub>6</sub>=1:3，功率0.26W/cm<sup>2</sup>，刻蚀速率为20nm/min，刻蚀深度为1.8μm。并用微晶片掩蔽一部分，用作欧姆接触测量；(7)先后在450℃、700℃氮气氛中合金。

## 3 测量结果与分析

### 3.1 欧姆接触特性

图1为距离150μm的两个铝点电极之间测量到的电流-电压特性曲线。三条曲线分别为未合金，450℃合金及700℃合金的I-V曲线，合金温度低于700℃时为非线性的肖特基接触，合金温度为700℃时，形成线性欧姆接触。采用四点探针法<sup>[13]</sup>测量并计算出欧姆接触电阻约为3.6Ω，比接触电阻为 $7.2 \times 10^{-5}$ Ω·cm<sup>2</sup>，此值达到了应用的要求。但是，在Al高温合金后，发现表面发黑，可能是温度过高引起Al挥发或氧化，这使压焊工艺无法进行。若采用Al/Ti或者在Al表面淀积SiO<sub>2</sub>保护层，防止Al挥发或氧化，可能会使欧姆接触表面得到改善<sup>[14]</sup>。

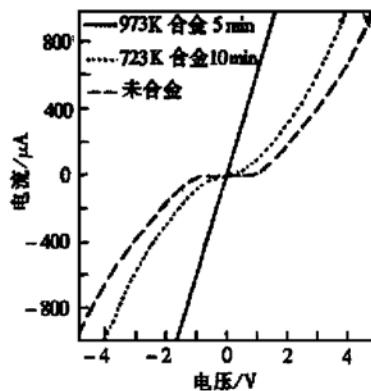


图1 不同合金温度，两个电极之间的电流-电压曲线

FIG. 1 I-V Curves Between Two Al Electrodes

### 3.2 SiC二极管的正向特性

二极管的电流-电压特性的测量仪器为Keithley 2400。图2和图3示出二极管在不同温度下的线性和半对数坐标下的正向特性曲线。由线性坐标图可看出随着温度的升高，开启电压由室温的3V左右减少为280℃的2V左右。由于加热台只能升到300℃左右，所以未能测出更高温度的电学特性。

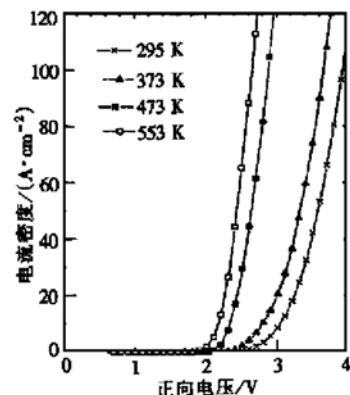


图2 二极管在不同温度下的正向特性曲线(线形坐标)

FIG. 2 Forward Characteristics of Diode at Different Temperatures(Linear Coordinate)

在半对数坐标曲线中包括两个不同区域：

(1) 中等电流密度区( $10^{-6}$ — $10^{-1}$ A/cm<sup>2</sup>，室温)，电流随电压指数增加，理想因子为2.0，表明此区域主要是复合电流。pn结二极管的正向电流中，扩散电流与本征载流子浓度的平方( $n_i^2$ )成比例，复合电流与 $n_i$ 成比例。由于6H-SiC室温的本征载流子浓度极低( $10^{-6}$ cm<sup>-3</sup>)，扩散电流分量可忽略，随着温度的升高，本征载流子浓度迅速增加(550K时为 $10^6$ cm<sup>-3</sup>)，扩散电流分量也应随之增加，理想因子相应减小，但测量结果中理想因子仍为2，这是由于

SiC 生长质量还不如 Si, 在结附近存在高密度缺陷, 复合中心浓度较高, 所以复合电流一直是主要电流, 直到串联电阻开始限制电流.

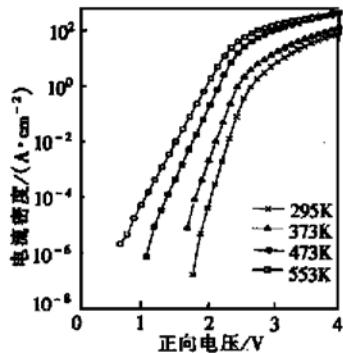


图 3 二极管在不同温度下的正向特性曲线(对数坐标)

FIG. 3 Forward Characteristics of Diode at Different Temperatures (Logarithmic Coordinate)

(2) 在高电流密度区( $10\text{A}/\text{cm}^2$ , 室温), 电流受到串联电阻限制, 室温串联电阻为 $7\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 553K 时为 $3\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ . 串联电阻包括欧姆接触电阻, 外延层及衬底电阻. 高温时串联电阻减少, 可能是由于激发了 Al 受主的电离.

由于受测量仪器精度( $10\text{pA}$ )限制, 无法得到低电流密度区的理想因子.

室温下复合电流的饱和电流密度为 $1 \times 10^{-21}\text{A}/\text{cm}^2$ , 100K 时为 $6 \times 10^{-17}\text{A}/\text{cm}^2$ , 553K 时为 $3 \times 10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$ , 饱和电流密度随着温度升高而迅速增加, 这是由于 SiC 材料中存在的缺陷随着温度的增加而增加所致, 另外 SiC 本征载流子浓度随温度升高而迅速增加也将引起饱和电流密度的增加. 由饱和电流密度计算复合电流的激活能为 $1.4\text{eV}$ , 近似为禁带宽度的一半, 与理论估计相一致.

### 3.3 SiC 二极管的反向特性

图 4 为二极管在不同温度下的反向电流-电压特性(半对数坐标). 在室温,  $-10\text{V}$  时, 漏电流密度为 $2.4 \times 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $-90\text{V}$  时, 漏电流密度为 $1.1 \times 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$ . 随着温度升高, 漏电流密度随之增加.

在室温空气中测量二极管, 反向电压低于 $600\text{V}$  时, 都表现了极好的整流特性. 当反向偏压高于 $600\text{V}$  时, 台面边缘发生电弧放电, 使二极管烧毁. 为测量实际的击穿电压, 应将二极管浸在高介电强度绝缘液体中测量<sup>[5]</sup>. 由反向击穿电压( $V_B$ )的理论公式可知: 突变结的 pn 结  $V_B$  与临界击穿电场( $E_c$ )的

平方成比例; 线形缓变结的 pn 结  $V_B$  与  $E_c$  的 1.5 次方成比例, SiC 的  $E_c$  是 Si 的 10 倍左右, 这样 SiC 的击穿电压是 Si 的几十倍. 所以 SiC 电子器件在高压领域应用具有极大优势.

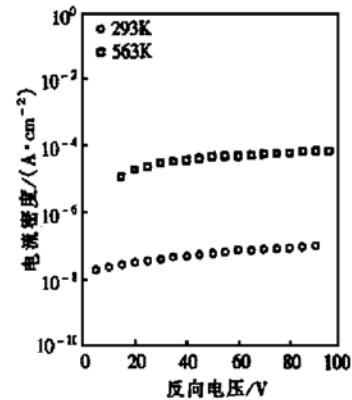


图 4 二极管在不同温度下的反向特性曲线

FIG. 4 Reverse Characteristics of Diode at Different Temperatures

### 3.4 二极管的电容-电压特性

图 5 为二极管的电容-电压特性.  $C-V$  曲线表明电容随着电压的改变而变化.

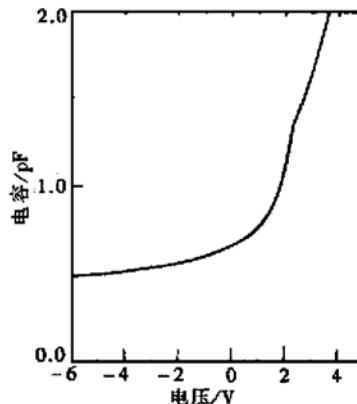


图 5 二极管电容-电压特性曲线

FIG. 5 C-V Characteristic of Diode

突变 pn 结的单位面积的势垒电容如下式:

$$C_d = \left[ \frac{q\epsilon_s\epsilon_0 N_a N_d}{2(V_d - V)(N_a + N_d)} \right]^{1/2}$$

式中  $q$  为电子电荷;  $\epsilon_s$  为 SiC 的相对介电常数;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $N_a$  为受主浓度;  $N_d$  为施主浓度;  $V_d$  为扩散势;  $V$  为外加电压; 所以对于突变结,  $V$  与  $C^{-2}$  成正比.

若 pn 结为线形缓变结, 则  $C_d$  如下式

$$C_d = \left[ \frac{q\epsilon_s^2\epsilon_0^2 a}{12(V_d - V)} \right]^{1/3}$$

这里  $a$  为杂质浓梯度. 所以对于线形缓变结,  $V$  与  $C^{-3}$  成正比. 实验测量结果表明,  $C$  的指数介于 -2 和 -3 之间, 说明实验采用的外延材料形成的 pn 结介于突变结和线形缓变结之间.

## 4 结论

利用改造的 MBE 系统, 通过化学气相沉积, 在 6H-SiC 衬底上进行同质外延, 生长出结构材料. 在此基础上, 采用传统的半导体工艺设备制作了 SiC 台面型 pn 结二极管. 此二极管在室温,  $-10V$  时, 漏电流密度为  $2.4 \times 10^{-8} A/cm^2$ , 在反向电压低于  $600V$  及高温下都具有良好的整流特性. 所以 SiC 电子器件在高温高压领域应用具有极大优势. 在更高温度环境中(大于  $300^\circ C$ ), 欧姆接触的稳定性及器件封装技术的研究工作仍在进行中.

## 参考文献

- [1] J. B. Casady and R. W. Johnson, Solid State Electron., 1996, **39**: 1409.
- [2] P. G. Neudeck, J. Electron. Mater., 1995, **24**: 283.
- [3] ZHANG Yuming, LUO Jinsheng and ZHANG Yimen, Au/NiCr Ohmic Contacts to n-Type 6H-Silicon Carbide, Chinese Journal of Semiconductors, 1997, **18** (9): 718—720 (in Chinese).
- [4] ZANG Lan, YANG Kai, ZHANG Rong et al., Photocurrent Studies of Ultraviolet Detector Based on GaN/6H-SiC, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19** (3): 197—201 (in Chinese).
- [5] WANG Huiyao, WANG Yinyue, SONG Qing et al., Effect of Argon Ion Bombardment on Formation of 6H-SiC Prepared by Annealing of RF Sputtering a-SiC:H Film, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19** (8): 569—573 (in Chinese).
- [6] ZHANG Yuming, LUO Jinsheng and ZHANG Yimen, Pt Schottky Barried Diodes on n-Type 6H-Silicon Carbide, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20** (11): 1040—1043 (in Chinese).
- [7] SHANG Yechun, ZHANG Yimen and ZHANG Yuming, A Model of Minority Carrier Lifetime Degradation in SiC Irradiated by Electron, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21** (2): 169—173 (in Chinese).
- [8] K. Shibahara, N. Kuroda and S. Nishino et al., Jpn. J. Appl. Phys., 1987, **26**: L1815.
- [9] L. G. Matus, J. A. Powell and C. S. Salupo, Appl. Phys. Lett., 1991, **59**: 1770.
- [10] P. G. Neudeck, D. J. Larkin, J. A. Powell et al., Appl. Phys. Lett., 1994, **64** (11): 1386.
- [11] O. Kordina, J. P. Bergman and A. Henry et al., Appl. Phys. Lett., 1995, **67** (11): 1561.
- [12] CREE Research Inc. 2810 Meridian Parkway, Durham, NC27713.
- [13] O. Nennewitz, L. Spiess and V. Breternitz, Applied Surface Science, 1995, **91**: 347.
- [14] Crofton, L. M. Porter and J. R. Williams, Phys. Status. Solidi B, 1997, **202**: 581.

## Electrical Characterization of 6H-SiC pn Diodes

WANG Shu-rui, LIU Zhong-li, LI Jin-min, WANG Liang-chen and XU Ping

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The fabrication and the electrical characterization of  $p^+$ - $n$  junction diodes on 6H-SiC are reported, using the reactive ion etching and electrical contact metallization techniques. The mesa structured  $p^+$ - $n$  junction diodes are fabricated in 6H-SiC epilayers grown by chemical vapor deposition on commercially available single-crystal 6H-SiC wafers, which are tested in the air and show a small reverse leakage current of  $2.4 \times 10^{-8} A/cm^2$  at the bias voltage of  $-10V$  and the high breakdown voltage of  $600V$  at room temperature. Good rectification characteristic is shown at a high temperature of  $550K$ .

**Key words:** silicon carbide; pn junction diode; 6H-SiC

**EEACC:** 2530B; 2560H; 2520M; 7310B; 7310D

**Article ID:** 0253-4177(2001)04-0507-04

WANG Shu-rui was born in 1971. Now she is Ph. D candidate and engaged in the research on SiC devices.

LIU Zhong-li was born in 1940, research professor, doctoral advisor, who is engaged in the research on semiconductor device and physics.

Received 22 March 2000, revised manuscript received 30 May 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics