

N 型 4H-SiC 同质外延生长^{*}

贾仁需[†] 张义门 张玉明 王悦湖

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2007 年 12 月 6 日收到, 2008 年 5 月 8 日收到修改稿)

利用水平式低压热壁 CVD(LP-HW-CVD)生长系统, 台阶控制生长和衬底旋转等优化技术, 在偏晶向的 4H-SiC Si(0001)晶面衬底上进行 4H-SiC 同质外延生长, 生长温度和压力分别为 1550°C 和 10⁴ Pa, 用高纯 N₂ 作为 n 型掺杂剂的 4H-SiC 原位掺杂技术, 生长速率控制在 5 μm/h 左右. 采用扫描电镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)和 Hg/4H-SiC 肖特基结构对同质外延表面形貌、厚度、掺杂浓度以及均匀性进行了测试. 实验结果表明 4H-SiC 同质外延在表面无明显缺陷, 厚度均匀性 1.74%, 1.99% 和 1.32%(σ/mean), 掺杂浓度均匀性为 3.37%, 2.39% 和 2.01%. 同种工艺条件下, 样品间的厚度和掺杂浓度误差为 1.54% 和 3.63%, 有很好的工艺可靠性.

关键词: 4H-SiC, 同质外延生长, 水平热壁 CVD, 均匀性

PACC: 8160C, 6855, 7855

1. 引 言

碳化硅作为宽禁带半导体材料代表之一, 其常见晶型 4H-SiC ($E_g = 3.26$ eV) 具有高击穿电场 (3 MV/cm)、高热导率 (4.9 W/cm·K)、高载流子饱和漂移速度等优良特性^[1]. 因此 SiC 电子器件在高温、高频和高功率等极端环境条件下使用具有很大的优势^[2]. 如 4H-SiC PIN 整流电压接近 19 kV^[3], 肖特基二极管击穿电压高于 1.5 kV^[4]. 但 SiC 衬底中存在大量微管、边界线、位错等晶体缺陷^[5], 这些缺陷严重影响 SiC 器件的电学特性^[3]和稳定性^[4]. 因此, 基于 SiC 的电子器件必须在 SiC 的外延上进行制作.

化学气相淀积(CVD)是生长 SiC 外延的常用方法之一, 根据不同的需求, 分为立式^[6]和水平^[7]两种不同的反应室. 在 SiC 生长过程中, 硅烷和丙烷作为反应气体源, 提供 Si 和 C 元素, 而 N 元素是 n 型 SiC 的主要掺杂元素, 由参与反应的氮气提供. 通过 Larkin 等人^[8]提出的竞位技术, 可以精确的控制 N 的掺杂浓度, 以满足不同器件的需要.

本文报道采用水平式低压热壁 CVD 方法, SiH₄/C₃H₈/H₂ 系统, 在偏轴 Si(0001)面 4H-SiC 衬底上成功的生长出 4H-SiC 同质外延. 借助扫描电镜(SEM)

和原子力显微镜(AFM)观测外延的表面形貌, 傅里叶变换红外光谱(FTIR)测试厚度, 汞探针接触测试载流子浓度. 通过调整生长工艺参数, 得到表面光滑、厚度和掺杂分布均匀的高质量 4H-SiC 同质外延.

2. 实 验

本实验采用瑞典 Epigress 公司的 VP508 水平式低压热壁 CVD 系统, 生长时衬底气浮旋转, 以达到生长厚度的均匀, 如图 1 所示. 衬底为德国 SiCrystal AG 公司提供的 Si 面, 偏离(0001)面 8° 的 2 英寸 (1 英寸 = 2.54 cm) n 型 4H-SiC 单晶, 载流子浓度约为 10¹⁸ cm⁻³. 衬底生长前在 1400°C 高温, C₃H₈ 和 H₂ 混合气体的条件下进行表面刻蚀, 消除抛光引起的表面划痕. 硅烷 (20 ml/min) 丙烷 (10 ml/min) 和氮气 (20 ml/min) 由高纯氢气 (80 l/min) 稀释并均匀混合进入密闭石英管反应室, 生长温度为 1550°C, 压强为 10⁵ Pa, 工艺流程如图 2 所示.

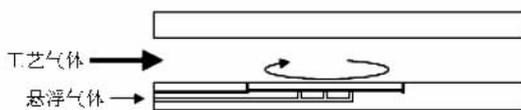


图 1 反应室示意图

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973)批准号: 51327020202)和教育部科学技术研究重点项目(批准号: 106150)资助的课题.

[†] E-mail: rxjia@mail.xidian.edu.cn

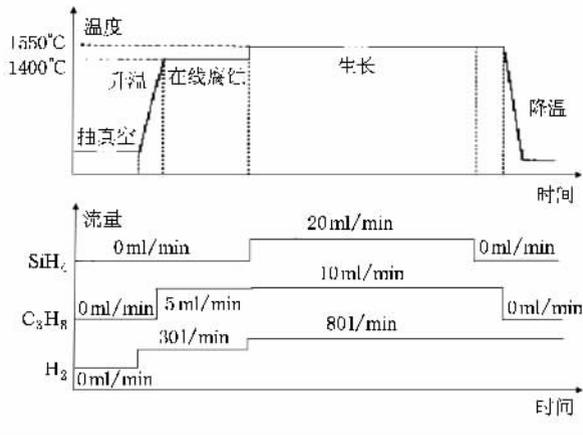


图 2 工艺流程示意图

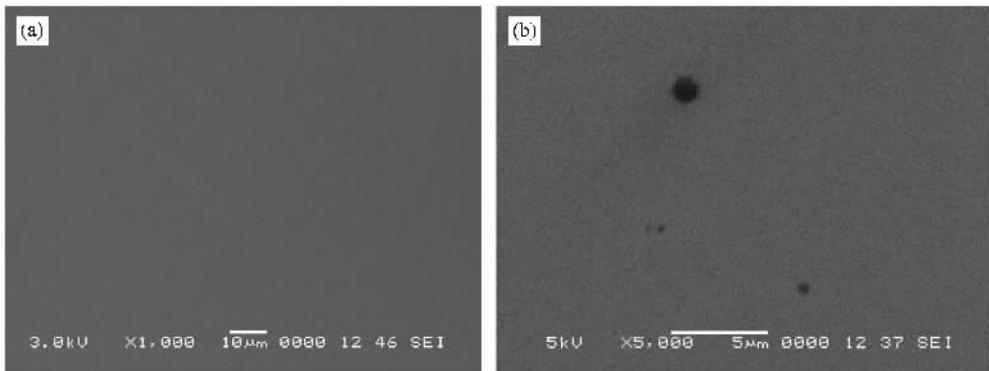


图 3 4H-SiC 外延的 SEM 图 (a)放大 1000 倍 (b)为(a)中的表面缺陷的放大 SEM 图

行了 AFM 测试,如图 4 所示.图 4(a)为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ AFM 测试图片,其 RMS 为 0.269 nm. 由于在 4H-SiC 单晶 c 轴方向两层 SiC 原子间的间距为 0.25 nm,我们认为 4H-SiC 外延有很好的表面平整度,表面存在原子级起伏不平,最大相差 1 nm,其 3D 模式图见图 4(b). 本文认为造成这一现象的原因为生长结束,为了快速冷却而又尽量减少表面 Si 滴的凝聚,会通大流量氢气,从而与表面发生还原反应,对表面进行非刻意的刻蚀,形成表面缺陷;本实验生长 4H-SiC 外延时的,属于富 C ($C/Si = 1.5:1$) 情况^[10]. 因此,生长结束时,4H-SiC 外延的表面为 Si 面,而 SiC 在 1400°C 左右时,表面的 Si 原子不太稳定,容易热分解.Si 分解留下空位产生的应力相互作用,在表面形成起伏不平.

厚度及生长均匀性由红外傅里叶光谱 (FTIR) 测试得到,测试结果见表 1. 在相同生长条件下,平均厚度分别为 10.327, 10.259 和 10.013 μm . 使用 (最大值 - 最小值) / (最大值 + 最小值) 计算方法,得到相同生长工艺下厚度误差为 1.54%,表明该工艺有很

3. 结果和分析

图 3(a)为 Si 面衬底上生长的 4H-SiC 同质外延放大 1000 倍的 SEM 图像,表明外延表面没有微管和孪晶区,只存在极少的表面缺陷和由基平面位错引起的表面突起.图 3(b)为图 3(a)的局部放大,我们可以清晰的看到黑色类圆形缺陷,经物质成分分析,它应为降温过程中硅元素成核凝聚成的 Si 滴, Kimoto 也做过类似报道^[9].

为了进一步对表面进行分析,我们对外延片进

好的稳定性.同时,我们对样品进行了对称十字形 9 点的厚度测试,9 点为中心点和距离中心点 $2/5R$ / $5/5R$ 处 (R 为样品的半径) 结果见表 1. 用 σ /平均值的计算方法计算出的厚度不均匀性分别为 1.74%, 1.99%, 1.32%. 生长过程中由于基座的旋转,样品边缘的厚度相对于中心厚.由 4H-SiC 外延厚度和生长时间 (2 h) 可以粗略的算出生长速率为 $5\ \mu\text{m}/\text{h}$.

用直径 $859\ \mu\text{m}$ 的 Hg/4H-SiC 肖特基结构对样品进行了 $C-V$ 测试,给出样品的载流子浓度在不同位置 and 不同深度的分布,测试点的位置和 FTIR 分布相同.样品 A 的 9 点的 $C-V$ 曲线和中心点的浓度纵向分布如图 5 所示.根据图 5(a)的 $C-V$ 曲线,可以计算出各点的载流子浓度,结果见表 2. 4H-SiC 外延样品的平均掺杂浓度为 1.46×10^{16} , 1.56×10^{16} 和 $1.57 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$,用 σ /平均值计算得到误差为 3.37%, 2.39% 和 2.01%. 在纵向,中心处从表面到 800 nm 的厚度范围内,载流子浓度基本保持不变,有很好的均匀性.从 600—800 nm 的范围内,由于测试设备的干扰,测试结果有一定的误差.

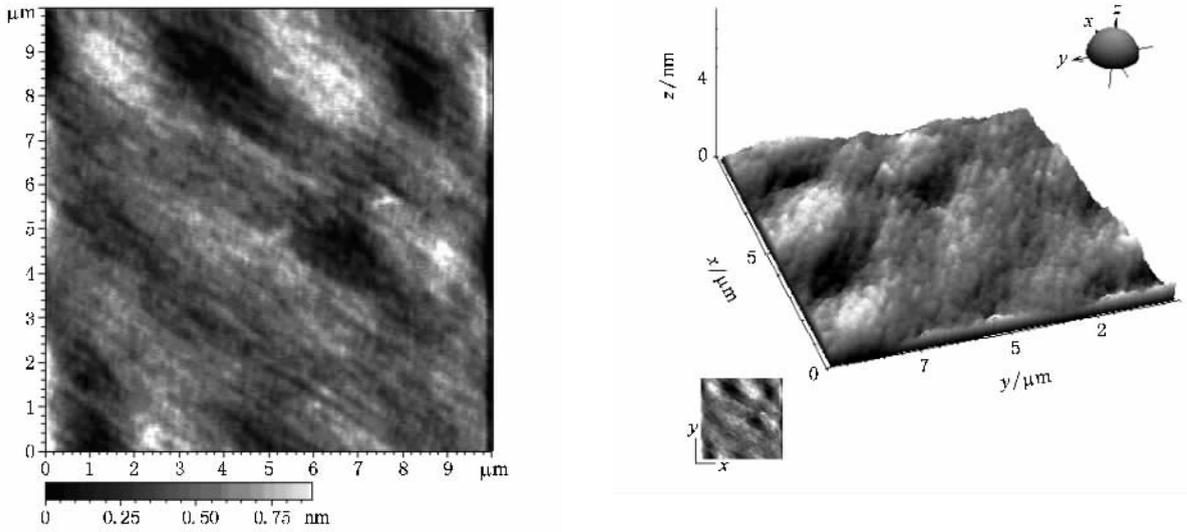


图 4 (a) 为 4H-SiC 外延的的 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ AFM 测试图 (b) 为 (a) 的 3D 模式图

表 1 九点十字形 FTIR 厚度测试结果

样品	$C/\mu\text{m}$	$L_1/\mu\text{m}$	$L_2/\mu\text{m}$	$R_1/\mu\text{m}$	$R_2/\mu\text{m}$	$U_1/\mu\text{m}$	$U_2/\mu\text{m}$	$D_1/\mu\text{m}$	$D_2/\mu\text{m}$	平均值/ μm	均分差/%
A	10.205	10.197	10.345	10.3	10.3	10.386	10.771	10.24	10.2	10.327	1.74
B	10.07	10.147	10.6	10.126	10.36	10.154	10.55	10.05	10.276	10.259	1.99
C	9.944	9.885	9.97	10.016	10.27	9.959	10.2	9.904	9.97	10.013	1.32

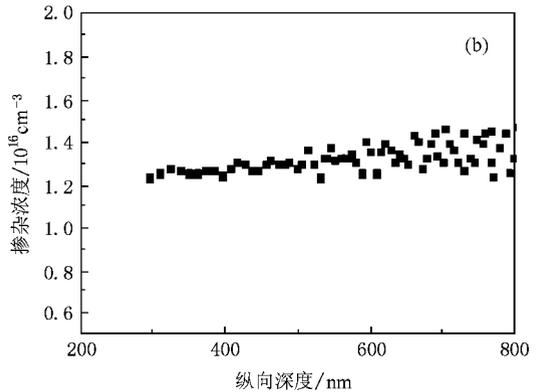
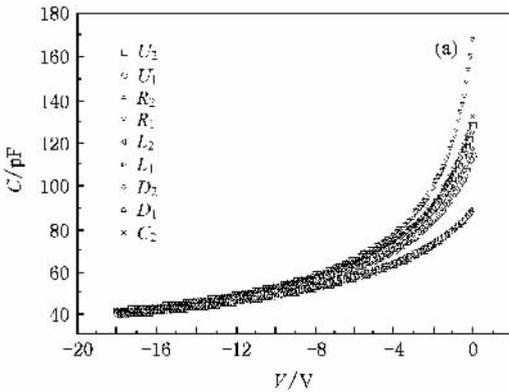


图 5 (a) 为九点 C-V 测试得到的 C-V 曲线图 (b) 为中心点载流子浓度随厚度变化的曲线

表 2 计算出的各点的载流子浓度图

样品	C $/10^{16}\text{cm}^{-3}$	L_1 $/10^{16}\text{cm}^{-3}$	L_2 $/10^{16}\text{cm}^{-3}$	R_1 $/10^{16}\text{cm}^{-3}$	R_2 $/10^{16}\text{cm}^{-3}$	U_1 $/10^{16}\text{cm}^{-3}$	U_2 $/10^{16}\text{cm}^{-3}$	D_1 $/10^{16}\text{cm}^{-3}$	D_2 $/10^{16}\text{cm}^{-3}$	平均值 $/10^{16}\text{cm}^{-3}$	均方差 /%
A	1.52	1.47	1.49	1.41	1.40	1.47	1.53	1.45	1.4	1.46	3.37
B	1.52	1.6	1.61	1.54	1.56	1.57	1.58	1.55	1.5	1.56	2.39
C	1.55	1.60	1.58	1.6	1.54	1.53	1.56	1.61	1.53	1.57	2.01

4. 结 论

通过水平式低压热壁 CVD 系统,在 Si 面,偏离 (0001) 面 8° 的 2 寸 n 型 4H-SiC 单晶衬底上成功的制备出 4H-SiC 同质外延. SEM 测试发现表面光滑,无明显的微管和孪晶区,只存在极少的表面缺陷. AFM 的 RMS 为 0.269 nm,说明外延片表面质量很好. FTIR 测试得到外延片样品的厚度误差分别为

1.74% ,1.99% 和 1.32%. C-V 测试得到 4H-SiC 外延的 n 型载流子浓度在不同点和纵向的分布,9 点测试不同点的掺杂浓度误差分别为 3.37% ,2.39% 和 2.01% ,并且从表面到外延内部的掺杂浓度基本不变,说明 4H-SiC 外延的掺杂浓度在不同点和不同厚度上保持很高的一致性. 样品间厚度和掺杂浓度误差分别为 1.54% 和 3.63% ,说明外延片厚度和掺杂比较均匀,且有很好的工艺可靠性.

-
- [1] Ryu S H , Komegay K T 1998 *IEEE Trans . Elect . Devices* **45** 45
 - [2] Morkoc H , Strite S , Gao G B , Lin M E , Sverdlov B , Burns M 1994 *J. Appl. Phys.* **76** 1363
 - [3] Sugawara Y , Takayama D , Asano K , Singh R , Palmour J , Hayashi T 2001 *International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* Piscataway NJ 27 (Piscatanayi IEEE)
 - [4] <http://www.infineon.com> (accessed August 2006)
 - [5] Guo C L 1982 *Acta Phys . Sin .* **31** 1511 (in Chinese] 郭常霖 1982 *物理学报* **31** 1511]
 - [6] Schoner A , Konstantinov A , Karlsson S 2002 *Mater . Sci . Forum* **389-393** 187
 - [7] Fujihira K , Kimoto T , Matsunami H 2002 *Mater . Sci . Forum* **389-393** 175
 - [8] Larkin D J , Neudeck P G , Powell J A , Matus L G 1994 *Appl. Phys . Lett .* **65** 1659
 - [9] Kimoto T , Chen Z Y , Tamura S 2001 *J. Appl. Phys .* **40** 3315
 - [10] Kazutoshi K , Satoshi K , Hajime O , Kazuo A 2006 *Appl. Phys . Lett .* **88** 1907

Nitrogen doped 4H-SiC homoepitaxial layers grown by CVD^{*}

Jia Ren-Xu[†] Zhang Yi-Men Zhang Yu-Ming Wang Yue-Hu

(*Key Laboratory of Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices* ,

School of Microelectronics , Xidian University , Xi 'an 710071)

(Received 6 December 2007 ; revised manuscript received 8 May 2008)

Abstract

Homoepitaxial growth of 4H-SiC on off-oriented Si-face (0001) 4H-SiC substrates is performed at 1550°C , under the pressure of 100 mbar using the mbar step-controlled technique with rotation in the horizontal low-pressure hot-wall CVD (LP-HW-CVD) system to obtain high quality 4H-SiC epilayers . The surface morphology , structure and optical properties of the epilayers are characterized by SEM , AFM , FTIR and *C-V* measurement . The 4H-SiC epitaxial layer has a good crystalline structure and mirror-like surface with few surface defects . N type 4H-SiC epilayers are obtained by in-situ doping of N₂ . The uniformities of thickness are 1.74% , 1.99% , and 1.32% , and the uniformities of doping concentration are tested to be 3.37% , 2.39% , and 2.01% , respectively . The deviations in thickness and concentration between different samples are 1.54% and 3.63% under the same processing conditions , which shows that the process is repeatable and reliable .

Keywords : 4H-SiC , homoepitaxial growth , horizontal hot-wall CVD , uniformity

PACC : 8160C , 6855 , 7855

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 51327020202) and the Key Program of the Ministry of Education , China (Grant No. 106150) .

[†] E-mail : rxjia@mail.xidian.edu.cn