

双异质外延 SOI 材料 Si/ γ -Al₂O₃/Si 的外延生长*

谭利文 王 俊 王启元 郁元桓 邓惠芳 王建华 林兰英

(中国科学院半导体研究所 材料科学中心, 北京 100083)

摘要: 利用 MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition) 和 APCVD (atmosphere chemical vapor deposition) 硅外延技术在 Si(100) 衬底上成功地制备了双异质 Si/ γ -Al₂O₃/Si SOI 材料. 利用反射式高能电子衍射 (RHEED)、X 射线衍射 (XRD) 及俄歇能谱 (AES) 对材料进行了表征. 测试结果表明, 外延生长的 γ -Al₂O₃ 和 Si 薄膜都是单晶薄膜, 其结晶取向为 (100) 方向, 外延层中 Al 与 O 化学配比为 2:3. 同时, γ -Al₂O₃ 外延层具有良好的绝缘性能, 其介电常数为 8.3, 击穿场强为 2.5 MV/cm. AES 的结果表明, Si/ γ -Al₂O₃/Si 双异质外延 SOI 材料两个异质界面陡峭清晰.

关键词: SOI; MOCVD; 双异质外延; Si/ γ -Al₂O₃/Si

PACC: 6855; 8155

中图分类号: TN 304.055

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)12-1289-04

1 引言

CMOS/SOI (silicon on insulator) 器件和电路与体硅器件相比具有高速、低功耗、良好的散热与介质隔离、抗辐射等优点, 被誉为本世纪最重要的集成电路技术. 而 SOI 材料是 SOI 技术的基础, 目前制备 SOI 材料主要采用注氧隔离 (SIMOX) 技术、硅片键合 (SDB) 技术及外延技术. 与 SIMOX 和 SDB 技术相比, 外延生长技术具有其他技术所没有的独特优点: (1) 可以制备出膜厚可控的超薄层绝缘介质膜和硅膜; (2) 可以实现绝缘介质膜、硅膜的交替连续生长, 形成叠层 SOI 结构, 因此具有三维立体电路开发价值^[1,2].

蓝宝石上外延硅薄膜 (SOS) 是绝缘衬底上外延硅 (SOI) 最成功的例子, 但蓝宝石硬度大、难加工, 用 SOS 制作的器件成本高, 难以在普通民用工业中广泛应用, 因而限制了它在市场中的竞争能力. 通过多年的研究探索, Ishida 等人^[3~5] 已经成功地在 Si 衬底上外延生长出了 Si/ γ -Al₂O₃/Si 结构的 SOI 材料, 并成功地用其制作了 MOS 器件和力敏电路. 本

文采用 MOCVD 外延技术, 先在 Si(100) 衬底上外延生长 γ -Al₂O₃ 绝缘膜形成 γ -Al₂O₃/Si 异质结构, 然后再利用 APCVD 硅外延技术在 γ -Al₂O₃/Si 衬底上外延 Si 薄膜, 形成 Si/ γ -Al₂O₃/Si 双异质 SOI 材料. 为了表征双异质 SOI 材料的性能, 我们利用反射式高能电子衍射 (RHEED)、X 射线衍射 (XRD) 及俄歇能谱 (AES) 对材料进行了表征. 同时, 测量了硅衬底上 γ -Al₂O₃ 绝缘层的电学特性.

2 实验方法

本文采用自行设计研制的冷壁立式超低压 MOCVD 外延设备^[6], 利用 Al(CH₃)₃ 和 O₂ 作为反应源, 在电阻率为 6~9 $\Omega \cdot \text{cm}$ 的 p 型 Si(100) 衬底上外延生长 γ -Al₂O₃ 绝缘膜形成 γ -Al₂O₃/Si 异质结构, 然后再利用 APCVD 硅外延技术在 γ -Al₂O₃/Si 衬底上外延生长 Si 薄膜, 形成 Si/ γ -Al₂O₃/Si 双异质结构的 SOI 材料. 为了改善外延膜的质量, 我们采用两步外延生长法生长 γ -Al₂O₃ 和 Si 薄膜^[7,8]. 具体的外延工艺参数如表 1 所示. 衬底 Si 片进行 RCA 化学清洗后用稀 HF 去除表面氧化层并使表

* 国家重点基础研究专项经费资助项目 (No. G20000365)

谭利文 男, 助理研究员, 目前主要从事新型硅基 SOI 材料的外延生长研究.

2003-01-06 收到, 2003-06-03 定稿

©2003 中国电子学会

面氢钝化,并在外延 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 薄膜前,在气压为 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$,衬底温度为 1000°C 环境下预处理 Si 衬底 5 ~ 10min. 采用 RHEED、XRD 及 AES 对材料进行了表征,并测量了 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 外延层的介电常数及其击穿电场.

表 1 双异质结构的 SOI 材料的外延工艺参数

Table 1 Epitaxial process conditions of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and Si films

$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 薄膜外延工艺 ^[7]	
背底真空/Pa	5×10^{-6}
TMA 流量/sccm	20
O ₂ 流量/sccm	70
生长气压/Pa	3×10^{-2}
生长温度/ $^\circ\text{C}$ 时间/min	930/30+ 980/90
膜厚/nm	70
Si 薄膜外延工艺 ^[8]	
SiH ₄ 流量/sccm 时间/s	350/8+ 150/40
H ₂ 流量/slm	15
生长气压/Pa	1×10^5
生长温度/ $^\circ\text{C}$	980
膜厚/nm	500

3 实验结果

3.1 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 材料的结构表征

采用 MOCVD 外延技术在 Si(100) 衬底上外延生长的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 薄膜具有光亮平整的表面,为了表征外延层的晶体结构和结晶质量,我们采用 XRD 和 RHEED 对外延膜进行了表征. 图 1 给出了 Si(100) 衬底上外延生长的 Al_2O_3 双晶 XRD 谱. 从图 1 可以看出,样品的 XRD 谱只出现了两个衍射峰,一个在 69.5° ,对应于 Si 衬底(400) 衍射峰;另一个在 46.0° 左右,对应于 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (400) 衍射峰^[9],据此可计算出其晶格常数为 0.79 nm . 由此可见,在 Si(100) 衬底上外延生长的 Al_2O_3 外延层为单相的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$,其结晶取向为(100) 方向. 同时,利用型号为 JEM-200CX 的 RHEED 在高压为 100kV 的条件下观察了样品表面的衍射花样. 图 2 为电子束沿着硅的[100] 方向入射观察到的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 样品衍射斑点花样. 从图 2 可以看出, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 样品的衍射花样为点状花样,没有发现明显的多晶衍射环花样和

孪晶斑点. 同时,测试样品时平移样品其衍射花样并不发生变化. 以上测试结果表明,在 Si(100) 衬底上异质外延生长的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为单晶薄膜,其与 Si 的结晶关系为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3(100)/\text{Si}(100)$.

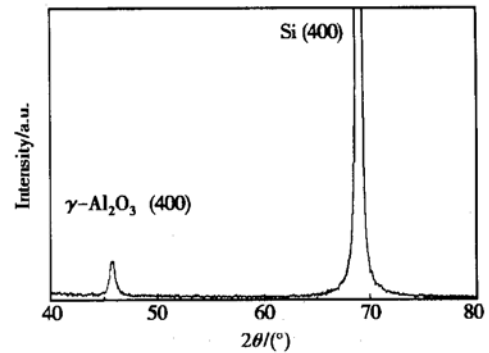


图 1 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 异质结构材料的 XRD 衍射谱

Fig. 1 XRD results of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ film



图 2 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 外延层的 RHEED 衍射花样图

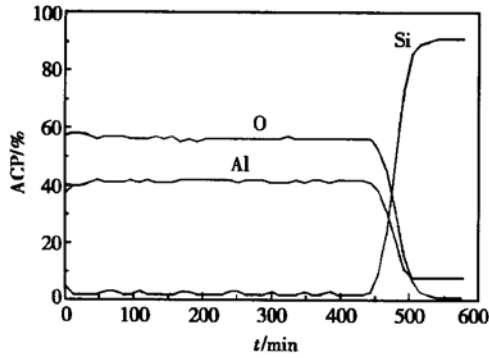
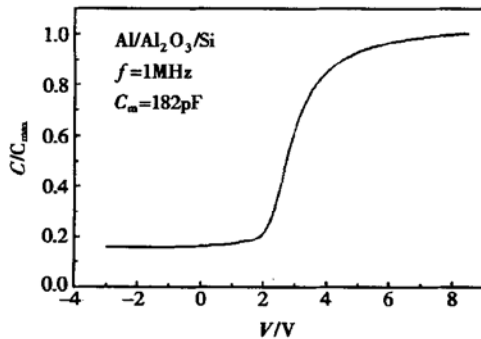
Fig. 2 RHEED patterns of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ film on silicon

3.2 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 材料的 AES 分析

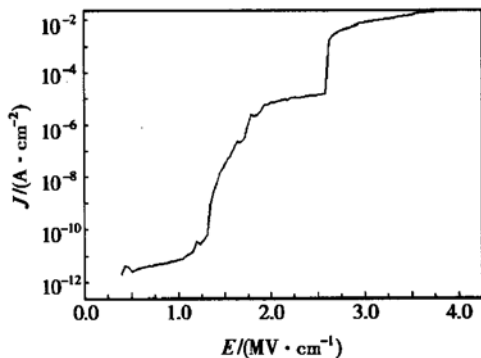
为了分析外延层的组分及其深度分布均匀性,我们进一步测定了外延膜的 AES 谱,如图 3 所示. 从样品的 AES 深度谱可以看出,外延层中 Al 与 O 成分比较均匀,外延层的化学配比 Al/O 为 2:3. 同时, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 外延层与 Si 衬底间的界面陡峭清晰.

3.3 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 异质结构材料的电学性能

为了测定 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 异质结构材料的电学性能,我们测试了 Al/ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 结构的高频 C-V 曲线及其漏电电流. 图 4 给出外延生长的 Al/ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 结构的高频(1MHz) C-V 曲线,由此计算

图3 γ -Al₂O₃/Si 材料的俄歇深度谱Fig. 3 AES depth profile of γ -Al₂O₃/Si structure图4 Al/ γ -Al₂O₃/Si 结构的 C-V 曲线Fig. 4 High frequency C-V curve of Al/ γ -Al₂O₃/Si

出厚度为 70nm 的 γ -Al₂O₃ 外延层的介电常数约为 8.3, 击穿场强为 2.5MV/cm. 图 5 为 Al/ γ -Al₂O₃/Si

图5 Al/ γ -Al₂O₃/Si 结构的 I-V 曲线Fig. 5 Leakage current characteristic for Al/ γ -Al₂O₃/Si

结构的 I-V 曲线, 在场强小于 1.5MV/cm 时, 其漏电流小于 $1 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, 可与相似厚度的 SiO₂ 击穿相比. 由此可见, 外延生长的 γ -Al₂O₃ 膜具有良好的绝缘性能.

3.4 Si/ γ -Al₂O₃/Si 双异质结构材料的表征

采用 MOCVD 外延技术在 Si(100) 衬底上外延单晶 γ -Al₂O₃ 薄膜, 形成 γ -Al₂O₃(100)/Si(100) 结构后, 接着我们采用 APCVD Si 外延技术在其上外延 Si 薄膜, 形成 Si/ γ -Al₂O₃/Si 双异质外延 SOI 材料. 以下给出了 Si 外延薄膜的 RHEED 及 Si/ γ -Al₂O₃/Si 双异质外延 SOI 结构材料的 AES 测试结果.

图 6 为 γ -Al₂O₃(100)/Si(100) 衬底上外延的 Si 薄膜的 RHEED 图, 电子束入射方向为硅的 [100] 方向. 从图 6 可以看出, 外延 Si 薄膜的电子衍射花样为点状花样, 同时也没有发现多晶衍射环花样和孪晶斑点. 由此可见, 在 γ -Al₂O₃/Si 上外延生长的 Si 薄膜为单晶薄膜, 其结晶关系为 Si(100)/ γ -Al₂O₃(100)/Si(100). 从图 7 可以看出 AES 谱分布为清晰的三部分, 表面部分只有 Si, 中间部分没有 Si 组分只有 γ -Al₂O₃ 的组分 Al 和 O, 第三层为 Si 衬底信号, Si/ γ -Al₂O₃/Si 双异质外延 SOI 结构材料层与层之间有很清晰的界面. 由此可见, 我们利用 MOCVD 和 APCVD 外延技术成功地在 Si(100) 衬底上制备了 Si(100)/ γ -Al₂O₃(100)/Si(100) 双异质外延 SOI 材料.

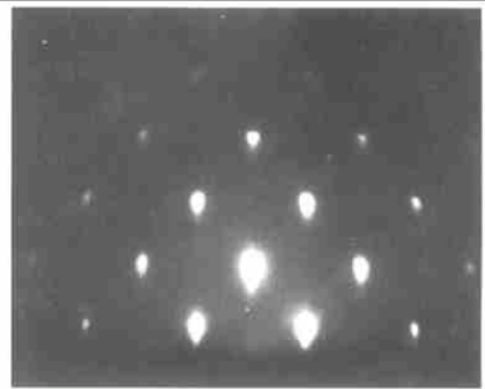
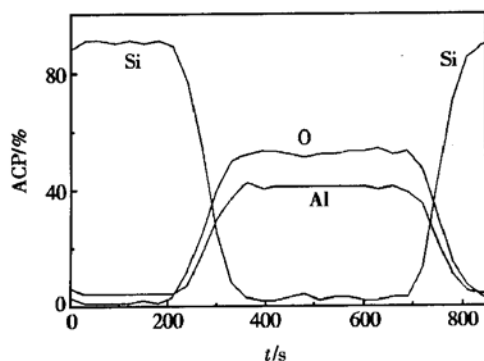


图6 Si 外延层的 RHEED 衍射花样图

Fig. 6 RHEED patterns of silicon film on γ -Al₂O₃/Si

4 小结

本文采用 MOCVD 外延技术首先在 Si(100) 衬底上外延生长 γ -Al₂O₃ 薄膜形成 γ -Al₂O₃/Si 结构, 然后再利用 APCVD 外延技术在 γ -Al₂O₃/Si 衬底

图7 Si/γ-Al₂O₃/Si 材料的俄歇深度谱Fig. 7 AES depth profile of Si/γ-Al₂O₃/Si

上外延 Si 薄膜, 形成 Si/γ-Al₂O₃/Si 双异质外延 SOI 材料. 测试结果表明, 外延生长的 γ-Al₂O₃ 薄膜和 Si 薄膜都为单晶薄膜, γ-Al₂O₃ 外延层具有良好的绝缘性能, 其介电常数为 8.3, 击穿场强为 2.5 MV/cm, Si/γ-Al₂O₃/Si 双异质外延 SOI 材料的结晶关系为 Si(100)/γ-Al₂O₃(100)/Si(100).

参考文献

- [1] Ishiwara H, Asano T. Appl Phys Lett, 1982, 40: 66
- [2] Ihara M, Arimoto Y, Jifuku M, et al. J Electrochem Soc, 1982, 129: 256
- [3] Ishida M, Katakabe I, Ohitake N, et al. Appl Phys Lett, 1988, 52: 1326
- [4] Ishida M, Yamaguchi S, Mase Y, et al. J Appl Phys, 1991, 69: 8408
- [5] Chung C S, Kawahito S, Ishida M, et al. Jpn J Appl Phys, 1991, 30: 1378
- [6] Zan Yude, Wang Jun, Lin Lanying, et al. Heteroepitaxial growth of γ-Al₂O₃/Si with HVMOCVD. Chinese Journal of Semiconductors, 1998, 19: 886 (in Chinese) [咎育德, 王俊, 林兰英, 等. γ-Al₂O₃/Si(100) 薄膜高真空 MOCVD 异质外延生长. 半导体学报, 1998, 19: 886]
- [7] Tan Liwen, Wang Jun, Wang Qiyuan, et al. J Cryst Growth, 2002, 236: 261
- [8] Tan Liwen, Wang Jun, Wang Qiyuan, et al. J Cryst Growth, 2003, 247: 255
- [9] Yom S S, Kang W N, Yoon Y S, et al. Thin Solid Films, 1992, 72: 213

Growth of Double Heteroepitaxial SOI Materials of Si/ γ-Al₂O₃/Si*

Tan Liwen, Wang Jun, Wang Qiyuan, Yu Yuanhuan, Deng Huifang,
Wang Jianhua and Lin Lanying

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

Abstract: Double heteroepitaxial SOI material of Si/γ-Al₂O₃/Si is successfully grown on Si(100) substrate. First, single crystalline γ-Al₂O₃(100) insulator films are grown epitaxially on Si(100) using the sources of TMA (Al(CH₃)₃) and O₂ by very low-pressure chemical vapor deposition (VLP-CVD). Afterwards, Si(100) epitaxial films are grown on γ-Al₂O₃(100)/Si(100) epi-substrates using an APCVD method. The Si/γ-Al₂O₃/Si SOI materials are characterized in detail by RHEED, XRD and AES techniques. The XRD and RHEED results indicate that both γ-Al₂O₃ and Si epi-layers are single crystal films, and their crystal orientation is Si(100)/γ-Al₂O₃(100)/Si(100). The AES shows that the ratio of oxygen atoms to aluminum atoms is 3:2. Meanwhile, the insulator layer of γ-Al₂O₃ has an excellent dielectric property. The dielectric constant of γ-Al₂O₃ films is 8.3 and the breakdown electric field is 2.5 MV/cm for the 70nm γ-Al₂O₃ epi-layer.

Key words: SOI; MOCVD; double heteroepitaxial; Si/γ-Al₂O₃/Si

PACC: 6855; 8155

Article ID: 0253-4177(2003)12-1289-04

* Project supported by the Special Funds for Major State Basic Research Projects (No. G20000365)

Tan Liwen male, was born in 1973, assistant professor. He is engaged in the research on novel SOI materials epitaxial growth.

Received 6 January 2003, revised manuscript received 3 June 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics