

Si 衬底和 Si-SiO₂-Si 柔性衬底上的 GaN 生长*

王军喜 王晓亮 刘宏新 胡国新 李建平 李晋闽 曾一平

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 使用 MBE 方法在 Si(111) 衬底和 Si-SiO₂-Si 柔性衬底上生长了 GaN 外延层, 并对在两种衬底上生长的样品进行了对比分析. 在柔性衬底上获得了无裂纹的外延层, 其表面粗糙度为 0.6nm. 研究了 GaN 外延层中的应力及其光学性质, 光致发光测试结果表明柔性衬底上生长的外延层中应力和杂质浓度明显低于直接生长在 Si 衬底上的样品的值. 研究结果显示了所用柔性衬底有助于改善 GaN 外延膜的质量.

关键词: 分子束外延; GaN; 柔性衬底; 光致发光

PACC: 6855; 7280E; 7855E **EEACC:** 0520D; 2520D

中图分类号: TN304. 054 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2004)06-0678-04

1 引言

因为 Si 单晶具有质量好、尺寸大、便于集成、价格低、易于解理、容易制作电极以及在高温下不易分解等优势, 因此是实现 GaN 基光电子和微电子器件集成的最具潜力的衬底材料. 近年来, 氮化物在 Si 衬底上的外延生长引起了广泛的关注^[1-6], 并取得了一定进展. 目前, 使用 MOCVD 方法在 Si(111) 衬底上生长的 AlGaIn/GaN 2DEG 结构材料的室温迁移率达到了 900cm²/(V·s)^[7], 用 MBE 方法在 Si(111) 衬底上生长的高电子迁移率晶体管材料的室温电子迁移率为 1600cm²/(V·s), 20K 时为 7500cm²/(V·s)^[8]. 另外, Si 衬底上的 GaN 基紫外探测器^[9]和 LED^[10]也已经研制成功.

由于 Si 和 GaN 具有大的晶格失配 (~ 17%) 和热膨胀系数失配 (~ 37%), 因此在 Si 衬底上难以得到无裂纹的 GaN 外延膜. 裂纹在材料中作为散射中心能够妨碍光的传播, 阻碍平面电流以及使垂直电流突变^[11, 12], 因此极大地限制了 Si 基 GaN 器件的发展.

Si-SiO₂-Si 柔性衬底(以下简称柔性衬底)的最

上面一层为一薄层单晶 Si, 厚度约为 50nm, 薄层单晶 Si 下面是一薄层非晶 SiO₂, 非晶 SiO₂ 下面是较厚的 Si 单晶材料. 由于结构上的特点, 所以柔性衬底能够降低 Si 衬底与 GaN 材料之间因大的晶格和热膨胀系数失配带来的影响. 在本文中, 我们对 Si 衬底和柔性衬底上的 GaN 的 MBE 生长进行了研究, 比较了在两种衬底上所生长的 GaN 材料的性质, 发现使用柔性衬底有助于改善材料的表面形貌, 降低外延层中应力, 抑制裂纹的产生. 结果显示所用的柔性衬底是一种有潜力的 GaN 衬底材料.

2 实验

材料外延生长设备是国产 IV 型 MBE 设备, 生长 GaN 外延层所用的氮源为高纯度的 NH₃, 其流量用质量流量计控制; 镓源为纯度为 7N 的高纯金属镓, 其束流强度由源炉的温度控制.

我们用 NH₃-MBE 设备分别在 Si(111) 衬底和柔性衬底上生长了 GaN 样品. 图 1 为柔性衬底的结构示意图. 薄层 Si(100) 的厚度约为 50nm, 非晶 SiO₂ 层的厚度约为 70nm, 非晶 SiO₂ 层下面为厚层(100) Si 衬底. 由于非晶 SiO₂ 具有较强的范性, 生长在其上

* 国家自然科学基金(批准号: 60136020), 国家重点基础研究发展规划(批准号: G20000683), 国家高技术研究发展计划及中国科学院资助项目

王军喜 男, 1975 年出生, 博士研究生, 研究方向是 GaN 基微电子材料及器件研究.

王晓亮 男, 1963 年出生, 博士, 研究员, 博士生导师, 目前主要从事氮化物材料的 MBE 和 MOCVD 生长、物理及器件研究.

2003-05-26 收到, 2003-09-19 定稿

©2004 中国电子学会

的单晶 Si 膜又很薄,因此该结构可以吸收外延过程中产生的应力。

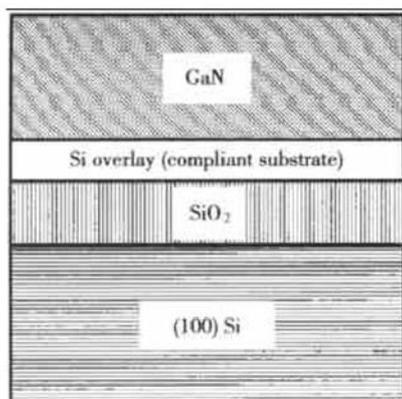


图 1 Si-SiO₂-Si 柔性衬底结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of Si-SiO₂-Si compliant substrate

生长前首先要对衬底进行化学清洗并在分析室加热预除气,然后转入生长室将衬底加热至 800 °C 并持续高温 1h 以去除其表面氧化层.用 RHEED 进行在位监测,清洁后的 Si(111) 表面应呈现 7 × 7 的表面再构图形。

GaN 外延层的生长采用三步生长法,即先在 750 °C 左右在衬底表面铺一薄层金属 Al,然后低温

生长 AlN 成核层,最后在高温下生长 GaN 外延层. GaN 外延层的厚度在 1~ 1.2 μm 之间.在生长 AlN 成核层前需要注意的问题是要防止非晶 SiN_x 的形成.由于 Si-N 的化学键合能为 9.5eV,远大于 Al-N 的 2.98eV,因此 N 原子会优先与 Si 结合形成非晶 SiN_x,影响了材料的质量.所以在生长 AlN 缓冲层之前,要先在衬底上淀积 2~ 3 个原子层的 Al 原子,然后再将 NH₃ 引入到生长系统中,从而阻止了 N 与 Si 的接触,使其只与 Al 反应形成 AlN 成核层。

用 Olympus 光学显微镜和原子力显微镜对样品表面形貌进行了观测比较,并在低温下对样品进行了光致发光谱测试,所用激发光源为 He-Cd 激光器(波长为 325nm,激发功率为 10mW)。

3 结果和讨论

首先用光学显微镜对样品表面进行了观测,发现在 Si(111) 衬底上生长的 GaN 外延层表面裂纹密布,而在柔性衬底上生长的 GaN 膜则表面平整无裂纹,如图 2 所示.这说明使用柔性衬底能够很好地降低外延层中由于大失配而引起的应力,改善材料质量。

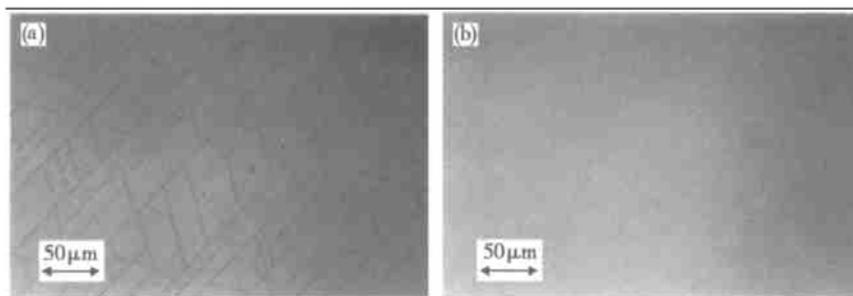


图 2 GaN 外延层光学显微镜照片 (a) Si(111) 衬底; (b) Si-SiO₂-Si 柔性衬底

Fig. 2 Optic microscope pictures of GaN epitaxy layers (a) Si(111) substrate; (b) Si-SiO₂-Si compliant substrate

图 3 是生长在柔性衬底上的样品的 AFM 形貌图.其表面粗糙度 RMS 仅为 0.6nm,而在 Si(111) 衬底上,一般样品的表面粗糙度则为 10nm 左右,说明在柔性衬底上可以得到表面形貌较好的外延层,这是由于柔性衬底可以吸收生长过程中外延层中产生的应力,从而实现较好的二维生长的缘故。

图 4(a) 所示为低温(11K)时 Si(111) 衬底上 GaN 的光致发光谱.由图可知 GaN 的带边峰位于

3.437eV,而文献报道的自由 GaN 的带边峰位于 3.469eV^[13,14].我们观测到的结果比文献报道值低 32meV,这是由于外延层中存在大的平面双轴张应力而导致的峰位红移现象,证实了直接生长在 Si(111) 衬底上的 GaN 膜中存在较大的平面双轴张应力,应力并未通过裂纹的产生而弛豫.图 4(a) 中位于 3.155eV 附近的双峰和 GaN 外延层中的施主-受主对跃迁有关,其发光强度可与外延层的带边发光

峰比拟,说明 GaN 膜中含有较高数量的浅能级杂质

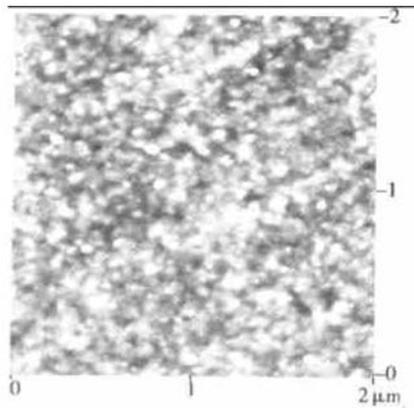


图3 柔性衬底上 GaN 膜的 AFM 表面形貌图 表面粗糙度 RMS 为 0.6nm.

Fig. 3 AFM image of surface morphology of GaN film grown on compliant substrates with a RMS of 0.6nm

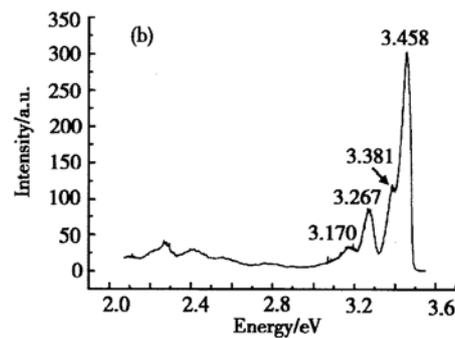
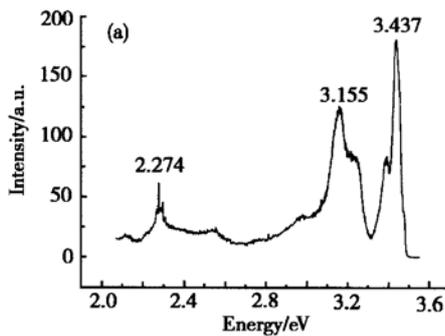


图4 生长在 Si(111) 衬底(a) 和柔性衬底上(b) 的 GaN 低温 PL 谱(11K)

Fig. 4 Low temperature (11K) PL spectra of films grown on Si(111) substrates (a) and compliant substrates (b)

4 结论

使用 MEB 方法在 Si(111) 衬底和 Si-SiO₂-Si 柔性衬底上生长了 GaN 外延层,利用光学显微镜和原子力显微镜对外延层的表面形貌进行了对比研究,发现所用柔性衬底可以有效地吸收应力,抑制裂纹产生和实现二维生长.同时,对外延层的低温光致发光谱进行了对比分析,结果表明生长在柔性衬底上的 GaN 膜中具有较少的杂质和缺陷.在柔性衬底上,我们获得了无裂纹,表面粗糙度为 0.6nm,具有较好光致发光特性的 GaN 外延膜.研究结果表明, Si-SiO₂-Si 柔性衬底在 GaN 基材料和器件制备方面具有潜在的发展前景.

和缺陷.另外,在 GaN 中经常观测到的黄光峰也出现在 2.27eV,说明外延层中也含有相关的深能级杂质缺陷.图 4(b) 为柔性衬底上生长的 GaN 膜的低温 (11K) PL 谱,由图可知其带边峰位于 3.458eV,与文献报道的自由 GaN 的带边峰 3.469eV 相比,相差 11meV.与直接生长在 Si(111) 衬底上的 GaN 膜相比,生长在柔性衬底上的 GaN 膜中的应力明显降低.图 4(b) 左边的几个峰的峰位分别位于 3.381, 3.267 和 3.170eV 处,位于 3.381eV 的峰应为带边峰的 TO 声子伴线(GaN 的 TO 声子能量为 70meV);位于 3.267eV 和 3.170eV 的峰分别为 DAP(施主-受主对)线和它的 LO 声子伴线(GaN 的 LO 声子能量为 92meV).这些峰和黄光带的强度与直接生长在 Si(111) 衬底上样品的相应发光峰的强度相比大大降低,说明生长在柔性衬底上的外延层中含有较少的杂质和缺陷.

致谢 感谢中国科学院物理所李辉博士、中国科学院半导体所陆书龙博士对样品进行的 AFM 和光致发光测试.

参考文献

- [1] Nikishin S A, Faleev N N, Antipov V G, et al. High quality GaN grown on Si(111) by gas source molecular beam epitaxy with ammonia. *Appl Phys Lett*, 1999, 75: 2073
- [2] Follstaedt D M, Han J, Provencio P, et al. Microstructure of GaN grown on (111) Si by MOCVD. *MRS Internet J Nitride Semicond Res*, 1999, 4S1: G3. 72
- [3] Ishikawa H, Zhao G Y, Nakada N, et al. GaN on Si substrate with Al-GaN/AlN intermediate layer. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38: 492

- [4] Calleja E, Sanchez-Garcia M A, Sanchez F J, et al. Growth of III-nitrides on Si(111) by molecular beam epitaxy doping, optical, and electrical properties. *J Cryst Growth*, 1999, 201/202: 296
- [5] Lahreche H, Vennegues P, Tottereau O, et al. Optimisation of AlN and GaN growth by metalorganic vapour-phase epitaxy (MOVPE) on Si(111). *J Cryst Growth*, 2000, 217: 13
- [6] Semond F, Damilano B, Veziari S, et al. GaN grown on Si(111) substrate: From two-dimensional growth to quantum well assessment. *Appl Phys Lett*, 1999, 75: 82
- [7] Shreiner A T, Smart J A, Wang Y, et al. GaN grown on Si(111) substrate: From two-dimensional growth to quantum well assessment. *Appl Phys Lett*, 2000, 76: 736
- [8] Semond F, Lorenzini P, Grandjean N, et al. High-electron-mobility Al-GaN/GaN heterostructures grown on Si(111) by molecular-beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 335
- [9] Osinsky A, Gangopadhyay S, Wang J W, et al. Visible-blind GaN Schottky barrier detectors grown on Si(111). *Appl Phys Lett*, 1998, 72: 551
- [10] Guha S, Bojarczuk N A. Ultraviolet and violet GaN light emitting diodes on silicon. *Appl Phys Lett*, 1998, 72: 415
- [11] Zamir S, Meyler B, Salzman J. Thermal microcrack distribution control in GaN layers on Si substrates by lateral confined epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 288
- [12] Etzkorn E V, Clarke D R. Cracking of GaN films. *J Appl Phys*, 2001, 89: 1025
- [13] Monemar B. Fundamental energy gap of GaN from photoluminescence excitation spectra. *Phys Rev B*, 1974, 10: 676
- [14] Turnbull D A, Li X, Gu S Q, et al. Luminescence studies of GaN grown on GaN and GaN/AlN buffer layers by metalorganic chemical vapor deposition. *J Appl Phys*, 1996, 80: 4609

GaN Growth on Si and Si-SiO₂-Si Compliant Substrates*

Wang Junxi, Wang Xiaoliang, Liu Hongxin, Hu Guoxin, Li Jianping, Li Jinmin and Zeng Yiping

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

Abstract: GaN films are deposited on Si and Si-SiO₂-Si compliant substrates by MBE(molecular beam epitaxy) technique and compared optical properties and residual strain with that of the obtained films on the two-kind of substrates. Investigation of the surface morphology shows that crack-free GaN epilayers are obtained on compliant substrates with a value of RMS(root mean square) of 0.6nm. Photoluminescence measurements indicate a great reduce of the residual strain and impurity density in GaN films grown on compliant substrates compared with those on Si substrates. The results show that Si-SiO₂-Si compliant substrates are promising as a substrate for GaN material growth.

Key words: MBE; GaN; compliant substrate; photoluminescence

PACC: 6855; 7280E; 7855E **EEACC:** 0520D; 2520D

Article ID: 0253-4177(2004)06-0678-04

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60136020), State Key Development Program for Basic Research of China (No. G20000683), National High Technology Research and Development Program of China, and The Chinese Academy of Sciences.

Wang Junxi male, was born in 1975, PhD candidate. He is engaged in the research on GaN-based semiconductor materials and devices.

Wang Xiaoliang male, was born in 1963, PhD, professor. He is engaged in the research on semiconductor material growth, physics, and devices.

Received 26 May 2003, revised manuscript received 19 September 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics