

金属-铁电体-GaN 结构研究*

毕朝霞 张 荣 李卫平 殷 江 沈 波 周玉刚 陈 鹏 陈志忠
顾书林 施 毅 刘治国 郑有焘

(南京大学物理系 固体微结构国家重点实验室, 南京 210093)

摘要: 以铁电体 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.55}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ 取代传统绝缘栅氧化物制备了 GaN 基金属-绝缘层-半导体(MIS)结构. 由于铁电体具有较强的极化电场和高介电常数, GaN 基金属-铁电体-半导体(MFS)结构的电容-电压特性与其他 GaN 基 MIS 结构相比较得到了显著的提高. GaN 基 MFS 结构中 GaN 激活层达到反型时的偏压小于 5V, 这和硅基电子器件和集成电路的工作电压一致, 而且结果表明 GaN 层的载流子浓度比其背景载流子浓度减小了一个数量级. 因此, GaN 基 MFS 结构对于 GaN 基场效应晶体管的实际应用具有重要的意义.

关键词: GaN; PZT; MFS; MOCVD; PLD

PACC: 7340Q; 8115H; 8115I; 8140R

中图分类号: O472⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)01-0030-04

1 引言

纤锌矿结构 GaN 具有比较宽的禁带、高的击穿电压和饱和载流子迁移速率, 在高温和大功率电子器件方面有重要的应用前景. 近来, 对此类器件的研究引起了人们的广泛关注. Casey 和 Arulkmaran 等人对 GaN 基金属-绝缘层-半导体(MIS)结构进行了研究^[1,2], Ren 等人制备并报道了第一个 GaN 基 MOSFET^[3]. 这些 GaN 基 MIS 结构均采用传统绝缘栅氧化物, 例如 SiO_2 ^[1,2]、 Si_3N_4 ^[2] 或 Ga_2O_3 (Gd_2O_3)^[3]. 还未见文献报道 GaN 基 MOSFETs 已获得实际的应用. 其中一个重要的原因是其工作电压比较大, 和广泛应用的硅基电子器件及集成电路不兼容. 即使在绝缘栅氧化物层非常薄的情况下, GaN 激活层也很难在小于 10V 的偏压下接近反型. 而且栅绝缘层厚度的减小会引起器件漏电流的增加. Ren 等人指出, 高介电常数的绝缘层能够用来减小栅绝缘层的厚度和减小器件的工作电压. 由于铁

电体具有高的介电常数, 用其代替传统的绝缘栅氧化物能够改善 GaN 基 MOSFETs 的工作电压特性. 而且, 铁电体能够提供比较高的极化电场, 能够促进载流子的耗尽, 从而对工作电压的减小也有贡献. 本文对 GaN 金属-铁电体-半导体(MFS)结构进行了研究.

因为在非挥发性存储器件、高速电子器件及其集成电路方面的应用前景, 金属-铁电体-半导体场效应晶体管(MFSFETs)成为近年研究的一个热点^[4-6]. 目前, 这方面的研究主要集中在 Si 衬底上进行, 然而在铁电体薄膜淀积过程中铁电体和 Si 衬底之间存在着相互扩散, 这导致铁电体薄膜和 Si 的界面不稳定, 因而不利于 Si 基 MFSFETs 器件特性的进一步提高^[6]. 然而, GaN 材料具有高温稳定性, 能够在 1000°C 的高温下稳定工作^[7], 因此在 GaN 表面淀积铁电薄膜能够改善铁电体和半导体之间的界面特性, 有可能用来制备具有高温稳定性的 MFS-FETs.

本文对 GaN 基金属-铁电体-半导体(MFS)结

* 国家重点基础研究规划(G20000683)、国家杰出青年研究基金(60025411)、国家自然科学基金(69976014, 69636010, 69806006, 69987001)和国家“八六三”高技术研究计划资助项目

毕朝霞 男, 1978 年出生, 硕士研究生, 从事半导体材料生长与物性表征.

张 荣 男, 1964 年出生, 教授, 博士生导师, 从事半导体材料生长研究与器件研制.

2000-12-06 收到, 2001-02-14 定稿

构进行了研究. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 衬底上 GaN 薄膜的制备采用了 MOCVD 两步生长工艺. 铁电体采用 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{-Ti}_{0.47})\text{O}_3$ (PZT), 其生长利用脉冲激光淀积 (PLD) 技术直接在 GaN 表面进行. 采用 X 射线衍射技术分析了 PZT 薄膜的晶体特性, MFS 结构的电学特性分别采用 HP4194A 阻抗分析仪和 RT6000HVS 系统来测量.

2 实验

在本论文的 GaN MFS 结构中, n 型 GaN 激活层由光辐射加热低压金属有机物化学气相淀积 (LRH-LP-MOCVD) 技术制备. 衬底采用有机溶剂、 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_3\text{PO}_4$ (3:1) 溶液和去离子水清洗的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ^[8,9]. 采用 GaN 两步生长工艺, 首先在 520°C 淀积约 30nm 厚的 GaN 缓冲层, 然后升温至 1040°C 淀积 GaN 激活层 ($n \approx 10^{17}\text{cm}^{-3}$).

GaN 薄膜上铁电体 PZT 的淀积采用 PLD 技术. 本系统采用 Lambda Physic LPX205I 型 KrF 激光器 (波长 248nm), 在靶表面产生 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$ 的能量密度. 生长时反应室内温度为 750°C , O_2 气氛压强 20Pa, 脉冲频率 5Hz. 为了减小 PZT 疏松而引起的漏电流, 在 PZT 上淀积了很薄的 SiO_2 层 (PECVD). 顶电极采用磁控溅射技术制备, 厚度约为 200nm, 直径为 0.2mm. GaN 表面底电极采用金属 Al, 为了形成良好的欧姆接触, 整个样品 (图 1) 在 550°C 的温度下退火 10min, 退火氛围为 N_2 .

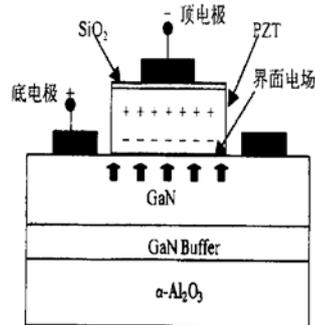


图 1 金属-PZT-GaN (MFS) 结构在反向偏压下的示意图
Fig. 1 Schematic diagram of Metal-PZT-GaN (MFS) structures under negative bias

3 结果和讨论

用 X 射线衍射技术对淀积在 GaN (0001) 表面

上的 PZT 薄膜进行了分析 (图 2). XRD 结果显示 PZT 沿 (100), (110), (211) 和 (111) 方向淀积, 其中 (110) 晶面衍射峰最强. 而对铁电特性没有贡献的焦绿石相的峰没有出现, 这表明 PZT 薄膜具有较好的钙钛矿晶体结构.

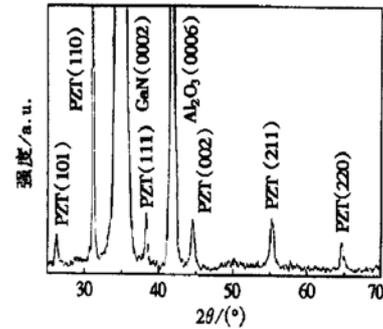


图 2 淀积在 GaN 上的 PZT 的 X 射线衍射谱 没有焦绿石相 PZT 生成.

Fig. 2 XRD pattern of PZT grown on GaN No peak of pyrochlore phase is observed.

GaN MFS 结构的电容-电压 ($C-V$) 特性在 1MHz 的频率下进行测量. 从图 3 可以看出与传统的 GaN MIS 结构相比较, GaN MFS 结构的工作电压显著减小, GaN 激活层在小于 5V 的偏压下达到

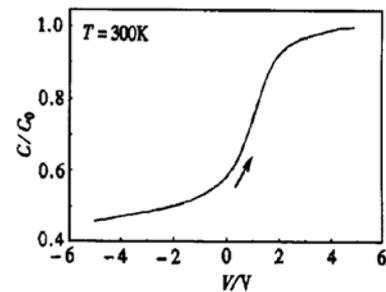


图 3 MFS 结构的电容-电压 ($C-V$) 曲线 测量频率为 1MHz, 电压扫描速率为 50mV/s.

Fig. 3 $C-V$ curve for the Metal-PZT-GaN (MFS) structures The frequency is 1MHz and the scanning rate is 50mV/s.

了反型. GaN MFS 结构电压特性的提高是因为铁电体 PZT 本身的重要特性. 图 4 给出了 GaN 层上 PZT 薄膜的极化-电压 $P-V$ 特性曲线, 剩余正、负极化电荷密度 ($+P_r, -P_r$) 分别为 $1.7\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 和 $2.2\mu\text{C}/\text{cm}^2$. 可以观察到 $+P_r$ 和 $-P_r$ 的不同以及 $-P_r$ 存在释放, 这是由 GaN 和顶电极间的功函数不同造成的^[10,11]. 在 5V 的偏压下 PZT 的自发极化约

为 $4.7\mu\text{C}/\text{cm}^2$. 当反向偏压加在 GaN MFS 结构上时, PZT 反向极化, 在 GaN 和 PZT 界面产生指向 PZT 的约为 $10^6\text{V}/\text{cm}$ (利用高斯定理估计) 的极化电场(图 1). 这种内建电场远大于外加电场 ($10^4\sim 10^5\text{V}/\text{cm}$), 促使 GaN 载流子在较小的外加偏压下

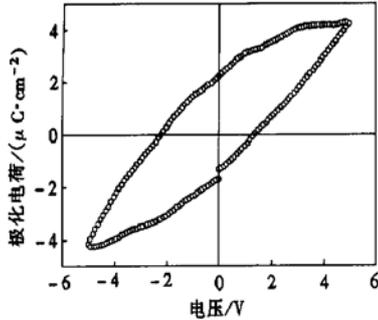


图4 (0001) GaN 上 PZT 的极化-电压($P-V$) 曲线

Fig. 4 $P-V$ characteristics of PZT (0001) GaN film

耗尽, 从而使 GaN MFS 结构的电容迅速减小. 另外, Ren 指出外加电场在半导体和绝缘层间的分布正比于绝缘层和半导体间的介电常数的比值^[3], 即

$$V_c = V_i + V_d = (1 + C_d/C_i) V_d$$

其中 V_c 为外加栅电压; C_d 、 C_i 分别为 GaN 耗尽层电容和栅绝缘层的电容; V_d 为反型时加在 GaN 激活层上的电压. 在上式中 C_d 和 V_d 为常数, 因此 PZT 高的介电常数(相对介电常数在 10^2 数量级)使外加电压的大部分作用在 GaN 层上, 也加快了 GaN 载流子的耗尽.

MIS 结构中半导体激活层的载流子浓度能够通过耗尽区 $1/C^2-V$ 曲线的斜率来计算^[12]. 根据图 3 中的 $C-V$ 曲线, GaN 的载流子浓度约为 $2 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, 而霍尔测量得到背景载流子浓度为 $4 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$. 因此, 铁电体(PZT)比传统的氧化物绝缘层更快地耗尽 GaN 激活层, 此结果也说明了 GaN 和 PZT 界面上较高的极化电场的存在. 从图 3 可以得到平带电压平移约为 2.5V, 远大于半导体和金属电极间的势垒高度而不能用金属和半导体间的功函数差来解释. 实际上, 大的平带电压平移是因为 PZT 和 GaN 界面的极化电场.

4 结论

我们采用 PLD 技术制备的 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ (PZT) 作为绝缘层研究了 GaN 基金属-铁电体-半导体(MFS)结构. $C-V$ 测量结果表明 GaN 激活层在小于 5V 的反向偏压下达到了反型层, 远低于其他文献中 GaN MIS 结构的反型层电压. 这是因为铁电体 PZT 能够提供比较高的界面电场和高的介电常数, 界面电场促进了 GaN 表层载流子的耗尽, 而高的介电常数增加了外加电压在 GaN 层的分布. GaN MFS 结构中 GaN 激活层的载流子浓度比其背景载流子浓度低一个数量级, 这证明了 PZT 和 GaN 界面极化电场的存在. 结果表明 GaN MFS 结构对于 GaN 基场效应晶体管有重要意义.

参考文献

- [1] Casey H C Jr, Gfountain G, Alley R G, et al. Appl Phys Lett, 1996, 68: 1850
- [2] Arulkmaran S, Jimbo T, Ishikawa H, et al. Appl Phys Lett, 1998, 73: 809
- [3] Ren F, Hong M, Chu S N G, et al. Appl Phys Lett, 1998, 73: 3893
- [4] Rost T A, He Lin, Rabson T A. Appl Phys Lett, 1991, 59: 3654
- [5] Alexe M. Appl Phys Lett, 1998, 72: 2283
- [6] Senzaki Junji, Kurihara Koji, Namura Naoki, et al. Jpn J Appl Phys, 1998, 37: 5150
- [7] Morimoto Y. J Electrochem Soc, 1974, 121: 1381
- [8] Shen B, Zhou Y G, Chen P, et al. Appl Phys A, 1999, 68: 593
- [9] Zhou Y G, Shen B, Chen Z Z, et al. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20: 147 [周玉刚, 沈波, 陈志忠, 等. 半导体学报, 1999, 20: 147]
- [10] Matthew S, Ramesh R, Venkatesan T, et al. Science, 1997, 276: 238
- [11] Lee J, Choi C H. Appl Phys Lett, 1998, 72: 3380
- [12] Sze S M. Physics of Semiconductor Devices. Wiley, New York, 1981

Metal-Ferroelectric-GaN Structures*

Bi Zhaoxia, Zhang Rong, Li Weiping, Yin Jiang, Shen Bo, Zhou Yugang, Chen Peng,
Chen Zhizhong, Gu Shulin, Shi Yi, Liu Zhiguo and Zheng Youdou

(National Laboratory of Solid State Microstructures, Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: A GaN-based metal-insulator-semiconductor (MIS) structure is fabricated by using ferroelectric $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ (PZT) instead of conventional oxides as insulator gate. Because of the polarization field provided by ferroelectric and the high dielectric constant of ferroelectric insulator, the capacitance-voltage (C - V) characteristics of GaN-based metal-ferroelectric-semiconductor (MFS) structures are markedly improved compared with that of the previously studied GaN MIS structures. The GaN active layer in MFS structures can reach inversion at the bias below 5V, which is the applied voltage used in silicon-based integrated circuits. The surface carrier concentration of GaN layer in the MFS structure is decreased by one order compared with the background carrier concentration. The GaN MFS structures are promising for the practical application of GaN-based field effect transistors.

Key words: GaN; PZT; MFS; MOCVD; PLD

PACC: 7340Q; 8115H; 8115I; 8140R

Article ID: 0253-4177(2002)01-0030-04

* Project Supported by National Key Basic Research Plan of China, National Excellent Youth Foundation of China National Natural Science Foundation of China, and National High Technology Research and Development Program

Bi Zhaoxia was born in 1978. Now he is working for his MS degree in Nanjing University. His research interests include material growth and characterization of III-V semiconductor materials.

Zhang Rong was born in 1964, professor. His present research focuses on material growth and device preparation in III-V semiconductor materials.

Received 6 December 2000, revised manuscript received 14 February 2001

©2002 The Chinese Institute of Electronics