

Al₂O₃ 绝缘层的 AlGa_N/Ga_N MOSHEMT 器件研究*

冯 倩 郝 跃 岳远征

(西安电子科技大学微电子研究所,西安 710071)

(宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室,西安 710071)

(2007 年 4 月 21 日收到,2007 年 7 月 21 日收到修改稿)

在研制 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件的基础上,采用 ALD 法制备了 Al₂O₃ AlGa_N/Ga_N MOSHEMT 器件.通过 X 射线光电子能谱测试表明在 AlGa_N/Ga_N 异质结材料上成功淀积了 Al₂O₃ 薄膜.根据对 HEMT 和 MOSHEMT 器件肖特基电容、器件输出以及转移特性的测试进行分析发现:所制备的 Al₂O₃ 薄膜与 AlGa_N 外延层间界面态密度较小,因而 MOSHEMT 器件呈现出较好的栅控性能;其次,该器件的栅压可以加至 +3 V,此时的最大饱和电流达到 800 mA/mm,远远高于肖特基栅 HEMT 器件的最大输出电流,而且栅漏反偏状态下的泄漏电流却减小了两个数量级,提高了器件的击穿电压.通过进一步分析认为泄漏电流主要来源于 Fowler-Nordheim 隧穿.

关键词: Al₂O₃, ALD, Ga_N, MOSHEMT

PACC: 7340N, 7360L, 7330

1. 引 言

基于 AlGa_N/Ga_N 异质结的高电子迁移率晶体管在高温器件及大功率微波器件方面有非常好的应用前景^[1].近几年人们在提高 HEMT 器件的工作频率、输出功率和增益等方面取得了一定的研究进展,但是肖特基栅过大的泄漏电流不仅降低了器件的击穿电压和功率容限,而且是低频噪声的主要来源^[2,3].为了解决这一问题,人们将 MOS 结构小的栅漏电、高击穿电压的特点与 AlGa_N/Ga_N HEMT 大电流的特点相结合,制备了以 SiO₂, Si₃N₄, Ga₂O₃ 作为绝缘层的 MISHEMT 结构,进一步提高了器件的输出电流,优化了器件的功率特性^[4-6].本文采用原子层淀积的方法(ALD)得到了高质量的绝缘介质 Al₂O₃,并以此作为绝缘材料制备绝缘栅 AlGa_N/Ga_N MOSFET 结构,其泄漏电流比传统的 HFET 结构小 2 个数量级,而且提供了一个较大范围的栅偏压,最大可以加到 +3 V,这样也有利于得到更高的输出电流、提高输出功率密度.

2. 实验及其样品

本文所用的 AlGa_N/Ga_N 异质结材料是采用 MOCVD 方法在蓝宝石衬底基片(0001)面上外延生长的, NH₃, TMGa, TMAI, SiH₄ 分别作为 N 源、Ga 源、Al 源和 Si 源.其中蓝宝石衬底厚度为 330 μm,材料层结构由下而上依次为 1 μm 未掺杂 Ga_N 外延层, 5 nm 未掺杂 AlGa_N 隔离层, 14 nm Si 掺杂 AlGa_N 层(Si 掺杂浓度为 2 × 10¹⁸ cm⁻³), 6 nm 未掺杂 AlGa_N 帽层.其中 Al 组分为 27%.采用感应耦合等离子体(ICP)刻蚀实现器件有源区的隔离,欧姆接触采用电子束蒸发 Ti/Al/Ni/Au(30 nm/180 nm/40 nm/60 nm)

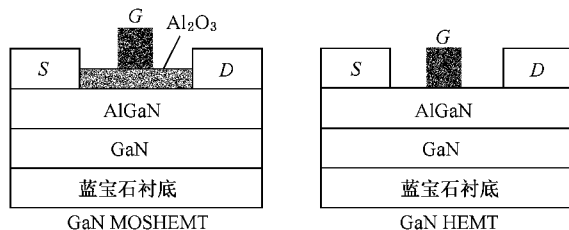


图 1 MOSFET 和 HEMT 截面图

830℃氮气环境中退火 30 s,在制备完欧姆接触后将材料放入 ASM Pulsar2000™ ALD 系统中淀积 3.5 nm 的 Al_2O_3 ;肖特基接触采用电子束蒸发 Ni/Au(30 nm/200 nm)样品表面未采用介质钝化.器件源、漏间距为 4 μm ,栅长为 1 μm (具体器件结构见图 1).

实验中所用的 X 射线光电子能谱仪是美国 PE 公司生产的,型号为 PHI5300ESCA,采用的是 Al 的 $K\alpha$ 线,功率为 250 W.

3. 实验结果与讨论

图 2 给出了 AlGaN/GaN 外延层在制备 Al_2O_3 后的 XPS 测试结果和拟合曲线(其中 15°和 65°代表不同的光电子测试角度).通过对图 2(a₂)(a₃)的分析,我们看到在两个测试角度下,Al2p 谱线均可以分解为 74.6 eV 处的 Al-N 和 74 eV 处的 Al-O 两种构成形态谱线的叠加,而 Al-N 峰值强度随着光电子测

试角度的增加而减小,但是 Al-O 峰值强度却未随测试角度的改变而发生变化,基本上维持恒定.在图 2(b₂)和(b₃)中,O1s 谱线可以分解为 531.1 eV 处的 Al-O 峰以及 532.8 eV 处的 Ga-O 峰,Ga-O 峰的峰值强度随着测试角度的改变与 Al-N 峰的变化情况相一致,我们认为这是由于当测试角度为 15°时,更多的 AlGaN 层的原子被轰击出来而探测到,随着角度的增加所测得的结果更接近于表面薄膜的组成,所以 Al-N 峰和 Ga-O 峰的峰值强度有所减小,进而对 Ga3p 谱的峰值强度进行测试,也呈现出衰减的趋势,当测试角度为 15°时,我们可以清晰地检测到 Ga3p 峰的存在,但是当角度增加至 65°时,则无法检测到 Ga3p 峰的存在(图 2(c)和(d)).从上面的测试分析结果可以看出,在 AlGaN/GaN 异质结材料的表面的确淀积了一层 Al_xO_y 薄膜,而且在淀积的过程中并没有造成 AlGaN 外延层的无序化,最后根据 65°测试所得到的 O1s 与 Al2p 的原子数目比以及所对

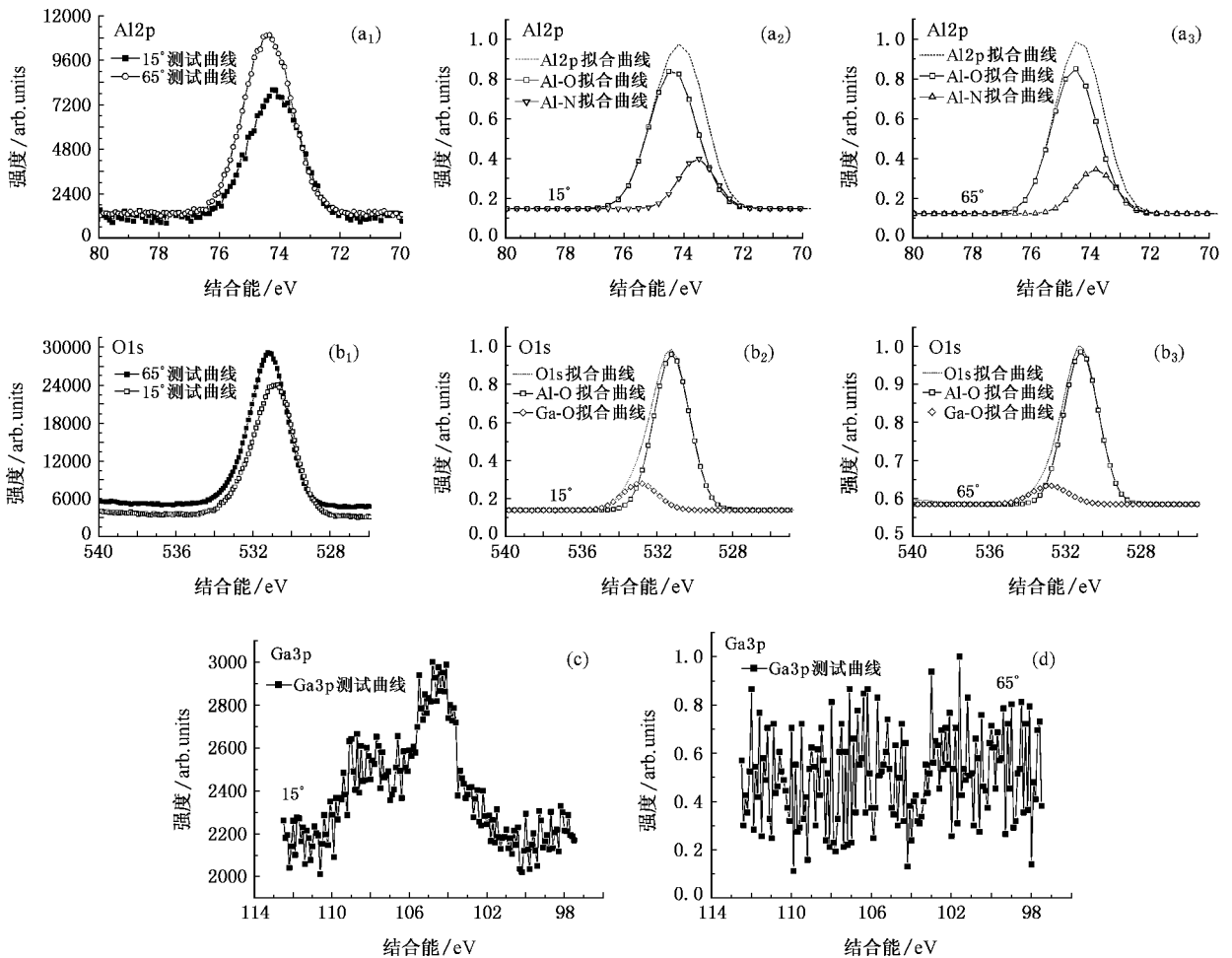


图 2 AlGaN/GaN 异质结淀积 Al_2O_3 后的 XPS 测试与拟合曲线 (a₁) Al2p 测试曲线 (a₂) 15° Al2p 拟合曲线 (a₃) 65° Al2p 拟合曲线 (b₁) O1s 测试曲线 (b₂) 15° O1s 拟合曲线 (b₃) 65° O1s 拟合曲线 (c) 15° Ga3p 测试曲线 (d) 65° Ga3p 测试曲线

应的灵敏度因子 0.78 和 0.193 ,可以算出表面淀积的氧化物应为 Al_2O_3 .

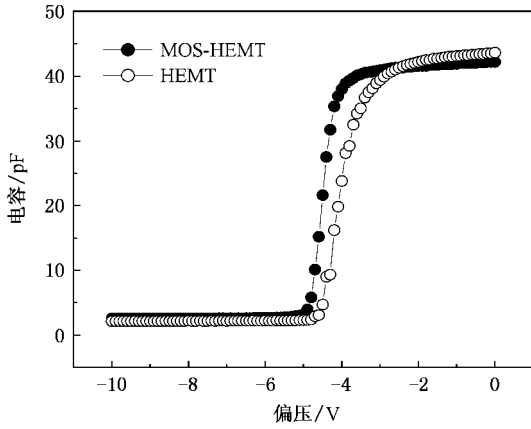


图 3 1 MHz 下栅电容 $C-V$ 测试曲线

图 3 为在 1 MHz 下 ,对 MOSHEMT 和 HEMT 器件栅电容的 $C-V$ 测试曲线 .从图中可以看出 ,不论 HEMT 还是 MOSHEMT ,当偏置电压为 -5 V 时都呈现出陡峭的电容变化趋势 ,由此我们认为在 AlGaIn 外延层和 ALD 制备的 Al_2O_3 绝缘层间具有良好的界面性质 ,界面态密度也控制在一定范围内 ,从图中我

们还可以得到 HEMT 结构电容在零偏下的电容为 43.6 pF ,而 MOSHEMT 结构的电容为 39.9 pF .我们取 AlGaIn 的介电常数为 8.8 ,厚度为 25 nm , Al_2O_3 绝缘介质的介电常数为 10 ,那么由下式计算可以得到 Al_2O_3 层的厚度约为 2.4 nm ,比预设的 3.5 nm 要略小一些 ,这可能是由于在淀积栅金属前对材料进行化学方法清洗时 ,对 Al_2O_3 薄膜也产生了一定程度的腐蚀 .

$$\frac{1}{C_{\text{MOS-HEMT}}} = \frac{1}{C_{\text{OX}}} + \frac{1}{C_{\text{HEMT}}}$$

其中绝缘介质层电容 $C_{\text{OX}} = \epsilon_0 \times \epsilon_{\text{OX}} \times A/d_{\text{OX}}$,测试的肖特基接触面积大小为 $A = \pi \times 63 \times 63\ \mu\text{m}^2$.

从图 4 MOSHEMT 和 HEMT 器件输出特性曲线中可以看出 ,以 Al_2O_3 为绝缘介质所制备的 MOSHEMT 器件呈现出很好的栅控性能 ,甚至在栅上的偏置电压可以加至 $+3\text{ V}$,最大饱和电流也比常规 HEMT 器件高出 170 mA/mm .而 MOSHEMT 器件的最大直流跨导比 HEMT 器件略大一些 ,但是它的截止电压为 -5 V ,而常规 HEMT 的截止电压仅为 -4 V ,可以看出尽管介质层的厚度仅为 2.4 nm ,但是对 2DEG 的控制能力仍有一定的影响 ,造成截止

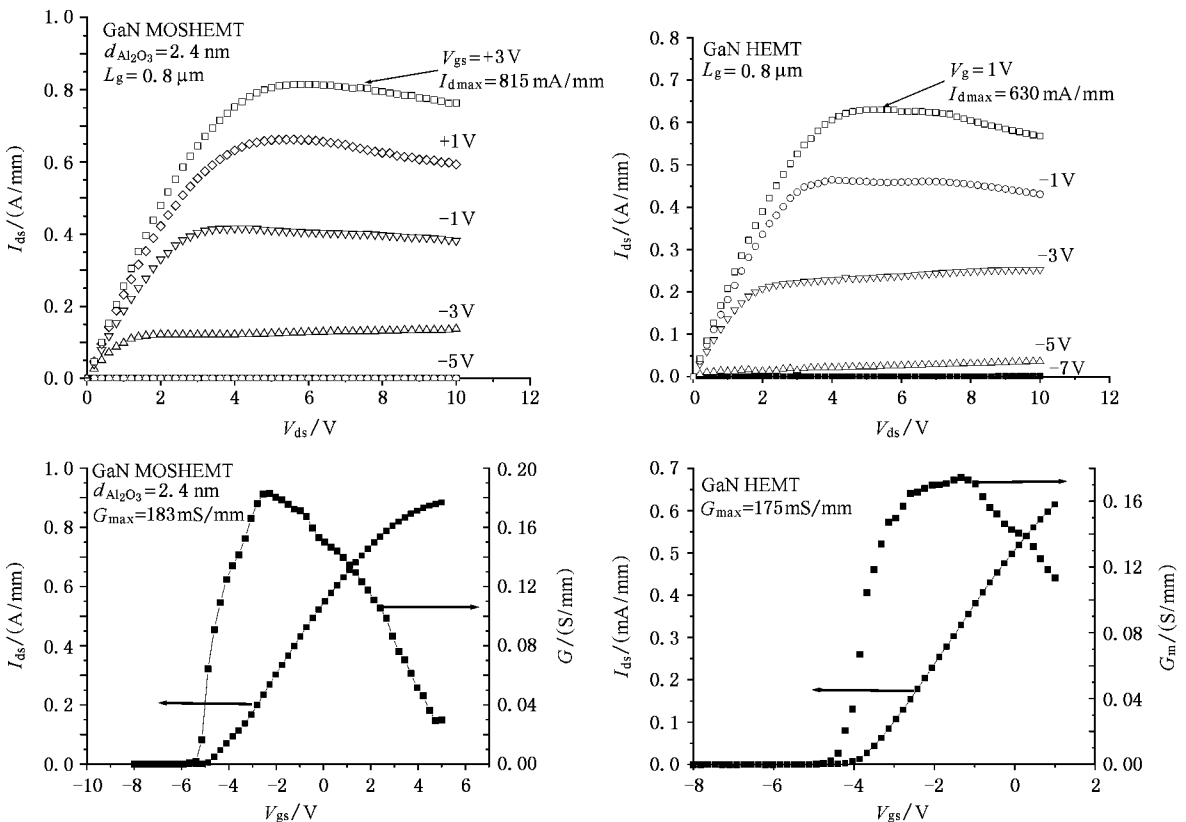


图 4 MOSHEMT 与 HEMT 器件输出、转移特性曲线

电压向负方向漂移 ;但是由于器件可以在较高的正偏压下工作 ,因而可以引起更多 2DEG 电子的积累 ,使得最大饱和电流有所增加 ,这两种效应相叠加最终造成 MOSHEMT 器件的最大直流跨导略高一些 .

从图 5 (a)对肖特基二极管的特性进行测试的曲线可以看出 ,在室温下 ,当 $V_{gs} = -20$ V 时 ,MOSHEMT 的泄漏电流仅为 $0.33 \mu A/mm$,而相同栅长的常规 HEMT 器件泄漏电流为 $56 \mu A/mm$.因而采用 Al₂O₃ 作为 MOS 结构的绝缘介质 ,可使得器件栅反向泄漏电流减小 2 个数量级 ,而且 HEMT 器件栅上所加电压必须小于 2 V ,否则会因肖特基接触正偏引起更大的泄漏电流 .将该图中 MOSHEMT 的肖特基接触特性曲线与文献中的相比较^[7,8] ,发现当栅

偏置电压大于零时 ,绝缘栅肖特基结构的反向泄漏电流快速增加 ,远远大于文献中的数值 .因而我们将这部分数据重新处理 ,如图 5 (b)所示 .从处理后的数据可以看出 , $\log(J/E^2)$ 与 $1/E$ 基本上满足线性关系 ,这也就是说由于 Al₂O₃ 绝缘介质层的厚度很薄 (仅为 2.4 nm) ,当 MOSHEMT 器件栅上施加正向偏置时 ,绝缘介质层导带发生倾斜后的最低处仍然高于 AlGaIn 外延层的导带底 ,而电子以一定的概率隧穿进入 AlGaIn 外延层的导带中引起泄漏电流的产生 ,也就是发生了 Fowler-Nordheim 隧穿 ,而不是直接隧穿 ,这与 Al₂O₃ 介质比 AlGaIn 层的导带底高出 2.1 eV 紧密相关^[9] .

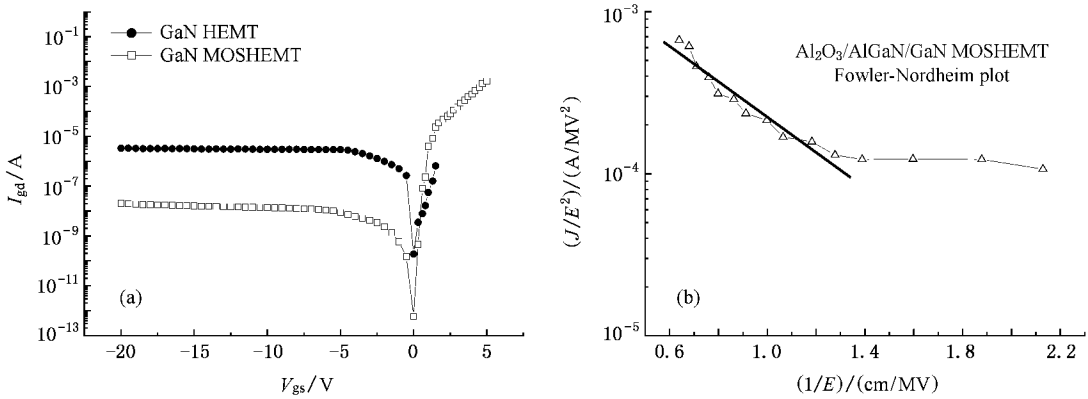


图 5 (a) GaN MOSHEMT 和 HEMT 器件肖特基接触特性曲线 (b) $\log(J/E^2)$ 对 $1/E$ 作图

4. 结 论

采用 ALD 方法在常规 AlGaIn/GaN HEMT 器件研制基础上制备了 MOSHEMT 器件 .通过对器件的 C-V 特性和输出、转移特性的测试发现 ,制备的 Al₂O₃ 介质薄膜与 AlGaIn 外延层间具有优良的界面性质 ,界

面态密度较小 ,呈现出较好的栅控性能 ;MOSHEMT 器件栅压可以加至 +3 V ,此时的输出电流约为 800 mA/mm ,也大于常规 HEMT 器件的最大输出电流 ,而栅漏反偏时的泄漏电流却减小了两个数量级 ,有利于器件击穿电压的提高 ,通过进一步分析我们认为 MOSHEMT 器件的泄漏电流主要来自于 Fowler-Nordheim 隧穿 .

[1] Trew R J ,Shin M W ,Gatto V 1997 *Solid State Electronics* **41** 1561
 [2] Rumyantsev S L ,Pala N ,Shur M S 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 6726
 [3] Tan W S ,Houston P A ,Parbrook P J 2002 *Appl. Phys. Lett* **80** 3207
 [4] Khan Ma ,Shur M S ,Chen Q C 1994 *Electron Lett.* **30** 2175

[5] Chang S J 2003 *J. Electrochem Soc.* **150** C77
 [6] Chiou Y Z 2003 *J Vac Sci Technol B* **21** 329
 [7] Tamotsu H ,Sanguan A 2004 *Japanese J Appl. Lett.* **43** L777
 [8] Ki Y P ,Hyun I C 2003 *Phys. Stat. Sol.* **7** 2351
 [9] Tamotsu H ,Sanguan A 2003 *J. Vac. Sci. Technol. B* **21** 1828

Study of AlGaN/GaN MOSHEMT device with Al_2O_3 insulating film^{*}

Feng Qian Hao Yue Yue Yuan-Zheng

(*The Institute of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(*Key Laboratory of Ministry of Education for Wide Band Gap Semiconductor Materials and Devices, Xi'an 710071, China*)

(Received 21 April 2007 ; revised manuscript received 21 July 2007)

Abstract

On the basis of AlGaN/GaN HEMT, the AlGaN/GaN MOSHEMT device was fabricated with Al_2O_3 insulating film for the first time, which was deposited by ALD. The X-ray photoelectron spectroscopy measurements showed successful deposition of Al_2O_3 layer on the AlGaN/GaN film. The results of Schottky capacitance, I - V characteristics and DC transfer characteristics measurement showed that the interface state density between the AlGaN film and the Al_2O_3 insulating film was fairly low and the MOSHEMT device showed successful gate control of drain current up to $V_{\text{GS}} = +3\text{ V}$ and achieved drain saturation current of 800 mA/mm, which was much larger than that of the HEMT device. Furthermore, the gate leakage current of MOSHEMT is two orders lower in the reverse bias condition as compared with the Schottky gate structure, which increased the device breakdown voltage, while the leakage current was governed by the Fowler-Nordheim tunneling mechanism.

Keywords : Al_2O_3 , ALD, GaN, MOSHEMT

PACC : 7340N, 7360L, 7330

^{*} Project supported by the National Advanced Research Program (Grant No. 51308030102) and Xi'an Applied Materials Innovation Fund (Grant No. XA-AM-200616).