

氏名	ジョスダス ジョセフ フリーズマン JESUDASS JOSEPH FREEDSMAN
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第860号
学位授与の日付	平成25年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	Investigation of MIS-type GaN-based HEMT grown by MOCVD on silicon (111) substrate (MOCVD法を用いて成長したシリコン基板(111)上MIS型窒化ガリウム系HEMTに関する研究)
論文審査委員	主査 教授 江川孝志 教授 三好実人 准教授 Niraula Madan

論文内容の要旨

GaN-HEMT technology on silicon substrate finds extensive applications in the areas of high temperature, high power and high frequency due to the availability of less expensive and large size substrates. However, there are few serious issues which are yet to be solved. One among the serious issues is the trap states at different locations existing in AlGa_N/Ga_N/Si HEMTs which deteriorates the device performance mainly due to current collapse and gate leakage respectively. Excessive gate leakage can limit the breakdown voltage while high current collapse makes the device not good at radio frequency (rf) conditions. Thus the excess traps limit the high power and high frequency application of the AlGa_N/Ga_N HEMT. The location of these trap states can be as AlGa_N surface, the AlGa_N/Ga_N hetero-interface and the deep level buffer traps.

The trap states can be due to various factors such as interruption of crystal periodicity, dangling bonds, interface roughness, dislocations, impurities and defects. Therefore, an extensive investigation on the trapping properties of the AlGa_N/Ga_N/Si HEMT is needed to improve both the crystal quality as well as the device performance.

In this study, the MOCVD growth of AlGaIn/GaN heterostructures on Si using thick buffer layers or the super lattice structures (SLS) and consequent improvements in crystal quality and current transport properties were presented. A detailed XRC characterization of the AlGaIn/GaN HEMT heterostructures grown using thicker SLS showed lower edge dislocation densities. The Hall measurements revealed high mobilities of AlGaIn/GaN heterostructures grown using thick SLS layers. In addition, the trapping properties from frequency dependent conductance analyses showed a remarkable decrease in fast traps related to the AlGaIn/GaN layers confirming improvements in the crystal quality using thicker SLS. The increase in mobilities is attributed due to the reduction of dislocation related scattering in the case of HEMT structures grown with thicker SLS.

A detailed description about preparation of process compatible Al₂O₃ by oxidative annealing technique was also discussed. The device characteristics of Al₂O₃ based AlGaIn/GaN MOS-HEMT compared with the normal HEMT shows lower leakage and higher breakdown voltage. The power device figure-of-merit (FOM) of AlGaIn/GaN HEMT with and without Al₂O₃ was 1.53×10^8 and $1.89 \times 10^8 \text{ V}^2 \Omega^1 \text{ cm}^{-2}$ respectively. The $B-V$ and FOM value of MOS-HEMT is the highest reported for any dielectric at $L_{gd} \leq 4 \mu\text{m}$ without using any slant fields or overlapping gate insulators. Furthermore, the trapping characteristics by frequency dependent conductance analyses on the MOS-HEMT showed fast traps corresponding to the AlGaIn/GaN heterostructure and absence of surface related slow traps. The distinct surface related slow traps were not observed in the case of MOS-HEMT revealing the passivation effects due to the Al₂O₃ as well as due to surface annealing conditions.

The potential importance of using a thin *in-situ* MOCVD grown AlN as a passivating layer for AlGaIn/GaN MIS-HEMTs on Si substrates was also presented. The influence of AlN layer's growth temperature on surface traps and their role in device characteristics were also briefly discussed. The trapping properties of AlN/AlGaIn/GaN MIS-heterostructures were analyzed by frequency dependent conductance method. The results revealed that low growth temperature of AlN layer favor less defect AlN/AlGaIn/GaN MIS-HEMT structures. The device characteristics also support the results of the conductance analyses.

論文審査結果の要旨

本論文は、シリコン(111)基板上の金属/絶縁体/半導体(MIS)構造を有する窒化ガリウム系高移動度トランジスタ(HEMT)におけるデバイス作製及び特性評価に関する研究内容をまとめたものである。

第1章では、本研究の背景として、GaNの物性、AlGaN/GaNヘテロ構造を利用したHEMTのデバイス特性及び結晶成長に用いる基板の物性について記述されている。また、AlGaN/GaN HEMTにおける電子捕獲準位の種類及び電子捕獲準位に関する本研究の目的について述べられている。

第2章では、有機金属気相成長(MOCVD)法を用いたSi(111)基板上AlGaN/GaNヘテロ構造の成長方法及び成長における問題点とその対策について記述されている。

第3章では、AlGaN/GaNヘテロ構造の品質を評価するX線回折法(XRD)、原子間力顕微鏡(AFM)法及びホール効果測定による移動度の算出方法が記述されている。さらに、AlGaN/GaN HEMTの作製方法並びに電流-電圧(I - V)、容量-電圧(C - V)及びコンダクタンス-電圧(G - V)測定について述べられている。 C - V 測定より、緩衝層(バッファ層)の膜厚が厚くなるに伴い、AlGaN/GaN界面における2次元電子ガス層の電子密度が増大することが分かった。また、 C - V 及び G - V 測定を用いた周波数依存コンダクタンス法により、AlGaN/GaN界面における伝導帯付近の界面準位密度は、バッファ層の膜厚が1 μm 増大する毎に約 $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 減少することが分かった。

第4章では、MIS構造の絶縁体として熱酸化法により成膜した Al_2O_3 を用いた $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}/\text{GaN}$ HEMTを作製し、デバイスの電気特性及び界面準位の評価を行った。この方法を用いて作製したMIS型デバイスは良好なピンチオフ特性を示し、耐圧はMIS構造によって256 Vから431 Vへ増大した。伝導帯付近のトラップ準位密度は $2.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ であった。

第5章では、MIS構造の絶縁膜としてMOCVD法を用いてin-situ成膜したAINを用いたAIN/AlGaN/GaN HEMTを作製し、デバイスの電気特性及び界面準位の評価を行った。その結果、AIN絶縁膜由来のトラップ準位($D_{\text{T-AIN}}$)とAlGaN/GaN界面由来のトラップ準位($D_{\text{T-AlGaN}}$)の2種類の準位が見られた。AINを1030°Cの高温で成膜した場合、伝導帯付近の $D_{\text{T-AIN}}$ と $D_{\text{T-AlGaN}}$ は $4.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ と $1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ であった。600°Cの低温でAINを成膜した場合には $D_{\text{T-AIN}}$ と $D_{\text{T-AlGaN}}$ は $1.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ と $1.2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ であり、成膜温度を低下させることにより、トラップ準位密度が低減された。また、耐圧等の電気特性についてもAINを低温で成膜することにより改善した。

第6章では本研究で得られた成果が総括されている。

以上の研究成果は、4編の学術論文として発表されており、シリコン基板上の窒化ガリウム系MIS-HEMTに関する重要な知見を与えている。従って、本論文は本学の博士(工学)論文として十分な価値を有するものと認められる。