

ボーズ アリジット

氏名	BOSE Arijit
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1240号
学位授与の日付	2022年3月31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	Study of AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> HEMTs on 3C-SiC/LR-Si by introducing a thick nitride layer for RF applications (厚いGa <sub>N</sub> 層を有する3C-SiC/LR-Si上AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> HEMTsのRF応用に向けた研究)
論文審査委員	主査 准教授 分島 彰男 教授 三好 実人 教授 大石 敏之 (佐賀大学)

## 論文内容の要旨

Chapter 1 gives the principal motivation for the work presented in this dissertation. In addition, the working principle of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure and cubic silicon carbide (3C-SiC) structure is briefly explained. Thereafter the outline of this dissertation is given.

In chapter 2, a structure of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> on 3C-SiC/low resistive (LR)-Si with an introduction of 8.0 μm thick nitride layer is proposed. The crack-free high-quality nitride layer was grown by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). The buffer layer condition was verified by Hall measurements which showed excellent electron transport characteristics compared to conventional epi-structures. Successful fabrication of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors (HEMTs) was achieved on the reported epitaxial structure.

In chapter 3, the FET operation in DC was analyzed. The DC drain  $I$ - $V$  and transfer characteristics ( $I_{on}/I_{off} \sim 10^6$ ). The off-state leakage current was stable at high temperatures and a small degradation of DC performance was observed at high temperatures because of the temperature dependency of mobility.

In chapter 4, a detailed temperature-dependent RF characterization is represented to evaluate the high-frequency performance of the device. The small-signal RF characteristics of 2- $\mu\text{m}$  gate length devices exhibited cut-off frequency ( $f_T$ ) and a maximum frequency of oscillation ( $f_{max}$ ) of 4.8 and 10.0 GHz, respectively. The obtained  $f_T$  attained remarkable competitiveness compared with previously reported results. A primitive study of the frequency response of RF loss was estimated using S-parameter measurements of open pad structures. It exhibited an ideal-like frequency response which confirmed suppression of loss even at the high temperature of 125 °C. At high temperatures, degradation of small-signal performance was observed. It was assumed that temperature dependency of intrinsic properties was solely responsible for the degradation of device performance at a high temperature. This was confirmed by comparing transconductance from S-parameters, calculated  $f_T$  values and DC characteristics with varying temperature. The load-pull measurement exhibited 47% power added efficiency (PAE) while delivering 2 W/mm output power with a linear gain of 17.2 dB for class A amplifier operation. A deterioration of output power and PAE was observed after a drain bias of + 22.5 V because of the current collapse. Temperature-dependent load-pull measurement exhibited a declination of output power, gain, and PAE. As in our case, the drain bias was fixed at its optimum point, the decrement was mainly because of the deterioration of drain current *i.e.* the mobility or the intrinsic property of the device.

In chapter 5, the high-frequency transmission loss evaluation is outlined. The loss was characterized by S-parameter measurements of microstrip lines designed and fabricated on three different epitaxial structures by varying nitride layer thickness (3.2, 5.3, and 8.0  $\mu\text{m}$ ). Attenuation constants of all three samples were evaluated which showed that a thick nitride layer can suppress the RF transmission loss compared to the sample with the thinnest nitride layer. EM simulation results also confirmed the above observation. Furthermore, the sample with 8.0  $\mu\text{m}$  thick nitride layer showed minimal loss compared to the sample with 3.2  $\mu\text{m}$  nitride layer at a high temperature of 125 °C.

Chapter 6 concludes the dissertation.

## 論文審査結果の要旨

申請者Bose氏は、低抵抗Si基板上に3C-SiCを成膜、さらに、その上にAlGaIn/GaNヘテロ構造を成長させた結晶構造を用いた高電子移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor) を作製し、本構造のマイクロ波増幅器としての有用性を初めて実証することに成功した。

博士論文では、Bose氏は、はじめに、上記構造の産業上、特に、移動体通信用途における重要性について述べた後、HEMTの作製方法について述べた。

次に、作製したHEMTにおける直流特性とその温度依存性について調べ、高温になるとドレイン電流の減少、相互コンダクタンスの減少などが生じるものの、温度の移動度の低下によるものと結論づけた。また、リーク電流の増加が125°Cまでではほとんど観察されないことを示し、温度上昇によって懸念されるバッファ層部のキャリア増加がほとんどないと結論づけた。

次に、高周波特性評価を行い、電流利得遮断周波数や最大発振周波数の温度依存性について議論した。温度上昇による電流利得遮断周波数の低下が、直流特性で確認した相互コンダクタンスの低下とほぼ一致することから、高周波的にも温度上昇によるバッファ層部のキャリア増加の影響がないことを確認した。また、同様の結果は、GaN上に形成した電極のキャパシタンスと抵抗の温度依存性からも確認した。増幅器特性（出力や効率）の温度依存性も調べ、各温度での出力特性が一般的な増幅器のA級動作と一致する妥当な結果を得た。

次に、将来のこの構造をつかったモノリシックマイクロ波集積回路の実現に向けて、伝送線路の損失特性を調べた。3C-SiC の効果である「GaN層を厚く成膜できる」という点に関して、8.0 μmもの厚いGaN層を用いることで、Si基板へのリークを大きく低減できること、また、その効果は高周波ほど顕著になるということを示した。

最後に、以上の結果をまとめている。

以上の内容が、学位論文として十分な内容を有すると判断し、審査委員全員一致で合格とした。