

論文審査の結果の要旨

氏名 黒田 正行

本論文は、低損失パワーデバイスおよび準ミリ波送受信システムに用いられる AlGaIn/GaN ヘテロ接合電界効果トランジスタ(HFET)の高性能化に向けて、新規なプロセス技術開発を行い、その有効性を実証した研究成果を述べたものであり、全7章からなる。

第1章は序論であり、電源機器の低損失化や無線通信システムにおけるミリ波帯技術の要請から GaN 系半導体の有用性が注目されているという研究背景を述べた後、これらの応用に適合する AlGaIn/GaN HFET を、新たなプロセス技術を開発することによって実現することを本研究の目的としたことを述べている。

第2章では、本研究で実現しようとする低損失パワーデバイスおよびミリ波通信向けデバイスにおける課題と解決手法について述べている。パワーデバイス応用に必須のノーマリオフ特性を得るためには、従来用いられてきた有極性の c 面((0001)面)に代えて、無極性の a 面((11-20)面)を成長面とすることが有効であり、それにより AlGaIn/GaN 界面に発生するシートキャリア密度を低く制御することで所期の特性を実現できることを指摘している。またミリ波帯通信応用では、結晶成長に引き続いて大気中曝露を経ずに AlGaIn 薄膜上に SiN ゲート絶縁膜を形成することにより、シートキャリア密度を低下させることなく、必要とされる大きい相互コンダクタンス(gm)を実現できることを述べている。

第3章では、AlGaIn/GaN HFET の各デバイス応用に向けての低コスト基板上への結晶成長を検討した結果について述べている。ノーマリオフ型 AlGaIn/GaN HFET に向けたサファイア基板(110-2)面上の(11-20)面 AlGaIn/GaN の有機金属気相成長(MOCVD)において、格子不整合および熱膨張係数差を緩和するためのバッファ層として、低温成長 GaN および高温成長 AlN を試み、広範囲でのシートキャリア密度の制御性を確認した。また厚膜 AlN バッファ層により、(11-20)面 GaN 層の結晶性が顕著に向上し、従来値の 2 倍となる 87 cm²/Vs の電子移動度を達成した。また高放熱が必要な高出力デバイスに向けては、Si(111)基板上への成長を検討した。超格子バッファ層導入による応力制御をおこなうことにより、6 インチ基板上でクラックのない良好な面内均一性を得た。

第4章では、(11-20)面 AlGaIn/GaN HFET を実際に作製し、ノーマリオフ動作と高ドレイン電流を実現したことについて述べている。(11-20)面 AlGaIn/GaN ヘテロ接合において AlGaIn 中の Si ドーピング量を変化させることにより、ヘテロ界面に生じるシートキャリア密度を広範囲に制御できた。Si ドーピングにより、HFET のしきい値電圧を正電圧側にシフトできた。またドレイン電流は、結晶のモフォロジーを反映して、ゲート方向が[1-100]の場合の方が[0001]よりも大きいことを示した。さらに厚膜 AlN バッファ層、低抵抗 n-GaN キャップ層を有するリセス MIS 構造とすることにより、しきい値電圧+1.3 V の完全なノーマリオフ特性、最大ドレイン電流 112 mA/mm、相互コンダクタンス 47 mS/mm という優れた特性を実現した。

第5章では、MOCVD 結晶成長後に連続成長した、いわゆる in-situ SiN をゲート絶縁膜に用いた AlGaIn/GaN MIS-HFET の特性について述べている。厚さ 6nm の極薄い AlGaIn 層上に SiN 薄膜を MOCVD 装置内で連続して成長することにより、低欠陥で不純物吸着のない SiN/AlGaIn 界面を形成することができ、それにより薄膜 AlGaIn と GaN の界面シートキャリア密度を増大させる効果があることを明らかにした。このゲート・チャネル間距離の短縮により gm 向上が容易となり、高周波特性の向上に対し有効である。作製した MIS-HFET により最大ドレイン電流 0.75 A/mm、最大 gm 240 mS/mm などの性能が得られ、ショットキーゲート HFET に比べて大きく向上した。また 180 GHz 以上の最大発振周波数(fmax)を実現するなど、ミリ波帯高出力増幅器としての有効性を実証した。

第6章では、AlGaIn/GaN MIS-HFETを用いた準ミリ波帯送受信器のためのプロセス技術を開発することにより、優れたデバイス性能を実証したことを述べている。準ミリ波帯HFETを集積化するために、高出力パルスレーザーを用いたレーザードリル技術を開発し、サファイア基板にビアホールを形成することにより、低損失なマイクロストリップ伝送線路の集積化を行い、HFETの3段接続からなる受信用増幅器集積回路において、26GHzにて22dBに達する優れた増幅性能を実現した。送信用パワーアンプにおいては、放熱性の高いSi基板を用い、26.5GHzにて10.7Wに達する優れた出力性能を実現した。

第7章は、本研究で得られた知見を総括しつつ本研究の結論を述べるとともに、GaNパワーデバイス応用の将来展望にふれている。

なお、本論文の第3章3-2節および3-3節は尾鍋研太郎、白木靖寛、片山竜二、第3章の3-4節以降から第6章までは田中毅、上田哲三、石田秀俊、石田昌弘、酒井啓之、按田義治、西嶋将明、村田智洋、根来昇との共同研究をそれぞれ含んでいるが、論文提出者が主体となって実験および解析を行ったもので、本人の寄与が十分であると判断される。

以上、本論文は、物質科学へ大きく寄与するものであり、よって、博士(科学)の学位を授与できると認められる。

以上 1984 字