

## 論文の内容の要旨

論文題目 AlGaIn/GaN HFETの高性能化プロセスに関する研究

氏名 黒田 正行

本論文は、低損失パワーデバイスや準ミリ波送受信システムに用いられる AlGaIn/GaN HFET の高性能化に向けてプロセス開発を行った研究成果をまとめたものである。論文は、以下の 7 章により構成される。

### 第一章

本章では、研究背景とその意義を概説する。次に、本研究の目的および構成について述べる。

近年、石油エネルギーの将来的な枯渇予測や、産業界での CO<sub>2</sub> 削減の意識の高まりから、省エネデバイスが求められている。電力消費の面では、その利用効率の向上が発電所からの環境負荷物質の排出抑制につながるが、現在わが国の電源機器を通過して消費される電力量は、総供給電力量の 40 % にも達し、電源機器の低損失化などの省エネ対策を図る必要性が高まってきている。一方、携帯電話に代表される無線通信システム分野では、これまでの数 GHz 程度のマイクロ波より低い周波数帯では利用可能な周波数帯の確保が困難であることと、さらなる高速大容量通信の要望から、30 GHz を超えるミリ波帯での無線伝送システム技術の研究開発が強く求められている。

このような背景のもと、本研究では、まず産業応用に向けて低コスト基板上の窒化物半導体結晶成長技術を確認する。その上でパワー応用に必須となるノーマリオフ型の AlGaIn/GaN HFET を開発し、また、ミリ波通信向けデバイス応用に向けて、AlGaIn/GaN HFET を用いた準ミリ波送受信システムを開発することを目的とする。

### 第二章

本章では、低損失パワーデバイス応用及びミリ波通信向けデバイス応用の基本構成と、その課題および解決手法を述べる。

パワーデバイス応用には機器の安全性確保の観点からノーマリオフ型が必須である。しかしながら、これまで AlGaIn/GaN HFET が形成されていた(0001)面では AlGaIn/GaN 界面にシートキャリアが発生するため、ノーマリオフ型の実現が困難であった。本研究では、これを解決するため、無極性面である(11-20)面を成長面とする AlGaIn/GaN HFET の MOCVD 成長およびデバイス構造を新たに検討した。(11-20)面上では(0001)面上と異なり自発分極およびピエゾ分極は(11-20)面に平行方向にのみ生じ、分極電界の影響を受けずにデバイスを作製することができる。よって、(11-20)面 AlGaIn/GaN では(0001)

面と異なり、ノーマリオフ動作に必要な比較的小さなシートキャリア密度を制御性良く実現でき、ノーマリオフ特性の実現が容易となる。

また、将来のミリ波帯通信分野に向け比較的長距離のアプリケーションが求められる中で、AlGaIn/GaN HFET の高周波特性を向上するためには、ゲート長の短縮に加え、表面のパッシベーションが重要となる。本研究では、MOCVD 成長した in-situ SiN<sub>x</sub> 膜をゲート絶縁膜に用いた AlGaIn/GaN MIS-HFET を検討した。AlGaIn の形成後に MOCVD 炉から取り出すことなく SiN<sub>x</sub> を形成することで、大気中曝露を経ずに絶縁膜-半導体層界面を形成でき、薄膜 AlGaIn と高いシートキャリア密度を両立することができる。

### 第三章

本章では、低コスト基板上的窒化物半導体結晶成長について述べる。

GaN 系結晶成長検討の先駆けて、窒化物半導体に特有な性質である巨大バンドギャップボウイングのメカニズム解明に向け、III-V-N 型窒化物混晶の MBE 成長を検討した。GaAs(001)面基板上 InAsN 成長を行い、窒素濃度 4.4% までの窒素濃度を有する InAsN 混晶を作製した。光吸収端からバンドフィリングを考慮してバンドギャップを導出したところ、ボウイングパラメータ 8.24 eV と巨大バンドギャップボウイングを示唆する結果が得られた。

次に、ノーマリオフ型 AlGaIn/GaN HFET に向けて、(110-2)面サファイア上に(11-20)面 AlGaIn/GaN を MOCVD 成長した。(11-20)面においても(0001)面上成長と同様に、格子不整合、熱膨張係数差を緩和するためのバッファ層技術の導入が不可欠である。そこで、低温成長 GaN 層及び高温成長 AlN 層を検討した。ヘテロ界面のシートキャリア密度は  $1.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  の広範囲な  $n_s$  を示した。また、厚膜 AlN バッファ層により(11-20)面 GaN の結晶性向上でき、XRC 半値幅 608 arcsec、表面荒さ 1 nm、電子移動度  $87 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  を得た。

また、高放熱が必要とされる高出力素子に向けては、Si(111)面基板上への結晶成長の検討を行った。超格子層バッファ導入によるストレス制御を行うことにより、6 インチ低コスト基板上で全面鏡面かつクラックフリー成長及び良好な面内均一性を確認し、6.4% と均一なシート抵抗面内分布を得た。

### 第四章

本研究では、(11-20)面 AlGaIn/GaN HFET を作製し、ノーマリオフ型を実現した結果について述べる。

(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た場合、(0001)面上ではヘテロ界面のシートキャリア密度がドーピング量に対しほぼ不変であるに対し、(11-20)面上では広範囲に制御できた。この結果を踏まえドーピング量を最適化して作製した AlGaIn/GaN HFET はしきい値電圧-0.5 V を示し、(0001)面 HFET での-4.0 V と比較して正電圧側にシフトさせることが可能となった。また、ドレイン電流がゲート方向に強く依存し、[1-100]ゲート FET では[0001]ゲート FET より大きなドレイン電流が流れることが判明した。[1-100]ゲート FET ではモフォロジーを反映したグレイン境界でのキャリア散乱の影響を受けにくく、[0001]ゲート FET に比べ大きなドレイン電流が流れたことが示唆される。

さらなるデバイス高性能化には、完全なノーマリオフ特性と、高いドレイン電流を実現する必要がある。そこで厚膜 AlN バッファ層、低抵抗 n-GaN キャップを有するリセス MIS 構造を備える構造を検討した。しきい値電圧は+1.3V と完全なノーマリオフ特性を示した。また、ゲートリーク電流を低減でき、ゲート電圧+5Vまで印加可能とした。これにより最大ドレイン電流 112 mA/mm、相互コンダクタンス 47 mS/mm と GaN 系ノーマリオフ FET として十分大きな値が得られた。ショットキーゲート(11-20)面 AlGaIn/GaN HFET に比べ、ドレイン電流は低温 GaN 上で作製した HFET の 5 倍以上の値であり、オン抵抗は 1/17 まで低減することができた。作製した(11-20)面 AlGaIn/GaN HFET はノーマリオフ特性および高いドレイン電流を実現することができ、パワースイッチング素子への応用に向け有望であることを示した。

## 第五章

本章では、MOCVD 結晶成長後に連続成長した、いわゆる in-situ SiN<sub>x</sub> 膜をゲート絶縁膜に用いた AlGaIn/GaN MIS-HFET について述べる。

GaN 層の成長後、Al 組成 40 % の AlGaIn 層を 6nm 形成し、ゲート絶縁膜として MOCVD 成長した 2 nm の薄膜 in-situ SiN<sub>x</sub> を用いた。このような in-situ 成長は、熱化学的な反応のみによる成膜のため低ダメージであり、SiN<sub>x</sub>/AlGaIn 界面で不純物吸着することなく形成することが可能である。そのため、結晶成長後に別装置で形成する SiN<sub>x</sub> に比べ良好な SiN<sub>x</sub>/AlGaIn 界面を形成することができる。in-situ SiN<sub>x</sub> 膜は P-CVD 成膜に比べ AlGaIn/GaN 界面の 2DEG シートキャリア密度を増大させる効果があることがわかった。特に AlGaIn 層が 6 nm と薄層の場合は、シートキャリア密度が一桁高くなる。この結果は、in-situ SiN<sub>x</sub> 膜は表面の影響を十分抑制できていることを示唆している。作製した MIS-HFET は  $I_{\max}$ : 0.75 A/mm、 $g_{\max}$ : 240 mS/mm とショットキーゲート HFET の  $I_{\max}$ : 0.14 A/mm、 $g_{\max}$ : 60 mS/mm に比べ大きく向上した。電流利得遮断周波数は 71 GHz、最大発振周波数( $f_{\max}$ )は 203 GHz が得られた。ゲート・ドレイン間距離を伸張してゲート・ドレイン間の耐量を増加させることにより、 $V_{ds} = 60$  V までのドレイン電圧において 180 GHz 以上の  $f_{\max}$  を実現した。この結果は、今回作製した素子がミリ波帯高出力増幅器として有望であることを示した。

## 第六章

本章では、AlGaIn/GaN MIS-HFET を用いた準ミリ波帯送受信器の検討について述べる。

MMIC では伝送線路の低損失化が必要であることから、受信用増幅器は基板損失を低減できる高絶縁性のサファイア基板に形成した。伝送線路としてはマイクロストリップ線路が一般的であるが、サファイアは化学的に極めて安定なため貫通孔の形成が非常に困難であった。本研究では高出力パルスレーザーを用いたレーザドリル技術を開発しサファイアにビアホールを形成した。このサファイア基板上ビアホールを用いてマイクロストリップ線路を集積化し、AlGaIn/GaN HFET を 3 段接続した準ミリ波帯受信用増幅器集積回路を作製した。その結果、26 GHz にて 22 dB と準ミリ波帯における GaN 増幅器として当時世界最高の値が得られた。

次に、高放熱性の観点から Si 基板上に準ミリ波帯パワーアンプ AlGaIn/GaN MIS-HFET を形成した。DC 特性として、 $I_{\max}$ : 1.1 A/mm、 $g_{\max}$ : 230 mS/mm を示した。ゲート・ドレイン間距離 2  $\mu$ m の素

子で 26.5 GHz で 10.4 dB の利得を示し、このときにゲートリーク電流の低減により耐圧 150 V と高い耐圧を示し、準ミリ波パワーデバイス応用へ向け十分高い耐圧と利得を両立できた。ゲート幅 5.5 mm の PA モジュールを試作し、動作電圧 55 V において飽和出力 40.3 dBm (10.7W)、利得 2.3 dB を実現できた。25 GHz 前後の準ミリ波帯においてシリコン基板上 AlGaIn/GaN HFET による最高出力を実現できた。

## 第七章

本章では本研究の総括を述べる。