

# 論文の内容の要旨

論文名：窒化ガリウム高電子移動度トランジスタの  
高性能化に関する研究

氏名： 吉 川 俊 英

本論文は、窒化ガリウム(GaN)を用いた高電子移動度トランジスタ(HEMT: High Electron Mobility Transistor)において、新規な構造の検討などにより、高周波用途および電源用途における高性能化および高信頼性化を達成した研究成果を述べたものであり、全9章からなる。

GaN は光用途では様々な場面で実用化されている。青色発光ダイオード(LED)、青色レーザー、信号機(青信号)、白色照明などである。今後も紫外レーザー、緑色レーザー、赤外デバイス、センサーなど、様々な分野での応用が期待されている。電子デバイス用途としてみた場合、様々な応用分野で従来に比べて消費電力を低減させることができるメリットが期待されている。GaN は大きな破壊耐圧、伝導電子の比較的高い移動度、大きな飽和速度といった優れた性能ポテンシャルを有しているためである。その結果、高電圧動作が可能となり、システム動作時の電流量や損失を減らすことができる。電子デバイスのなかでも HEMT 構造は、2次元電子ガスを用いた高速性から、ガリウム砒素(GaAs)やインジウム燐(InP)で実用化されており、GaNでも HEMT 構造が期待されている。よって、本論文では、GaN-HEMT を用いた高周波(特にマイクロ波とミリ波)用途及び電源用途のトランジスタ技術開発を詳細に検討した。GaN の電子デバイスを実用

化するために必要な技術と従来デバイスでは実現困難なさらなる省エネ社会を実現する将来技術について詳細を述べる。

まず、第1章は序論であり、GaNの物性的利点、応用分野における要請など本研究の背景を述べた上で、これらの応用に適合する低消費電力性に優れた高性能なGaN-HEMTを、新規な構造および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る。図1にGaN電子デバイスの実用化ロードマップを示す。様々な周波数帯において応用分野が存在する。GaNは従来高出力というキーワードで開発が進められていたが、近年そのメリットは高効率・省エネに移っている。

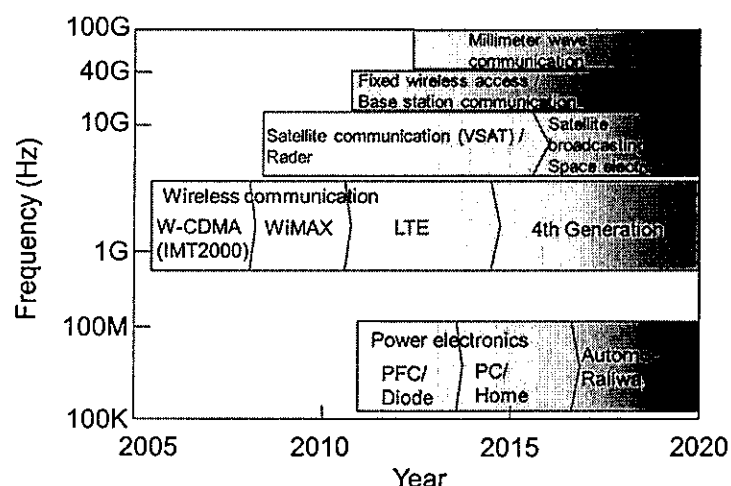


図1 GaN電子デバイスの応用分野と開発ロードマップ

次に第2章では、GaN-HEMTの基本的動作原理、ゲートリークや電流コラプスなどGaN特有の技術課題、さらにそれを克服する新規構造、結晶成長技術およびプロセス技術について述べる。ゲートリークおよび電流コラプスの原因となるゲート端への過度な電界集中、結晶表面の非平坦性、ゲート近傍での表面電荷蓄積などの諸現象を避けるために、有機金属気相成長(MOVPE)により作製する層構造において、n型GaNキャップ層の形成によるリセスオーミック型表面電荷制御構造を考案開発し、試作デバイスにおいて耐圧350Vに達する低ゲートリーク化と電流コラプス抑制を同時に達成した。この構造がGaN-HEMTの高信頼化に直接結びつく基礎技術となっている。

第3章では、GaN-HEMTの劣化要因の明確化を通じた信頼性向上のための技術開発について述べる。短期劣化要因として、成長温度起因の表面N脱離とSiC基板起因のヒロックが、長期劣化要因としてGaNバッファ層中のトラップ準位が関係していることを明らかにした。MOVPEによるエピタキシャル成長条件の最適化を通じて、これらの劣化要因を除去して、高温通電試験において1000時間の安定動作を確認した。

第4章では、GaN-HEMTを無線通信システムにおける基地局用増幅器へ適用し、高

出力および高効率性能を実現したことを述べる。GaN-HEMT チップをパッケージに実装し、最大出力 250 W という高出力を得た。またドレイン効率 40%という従来の Si ないし GaAs デバイスを 10%以上凌駕する高効率を得た。同時に高温成長窒化アルミニウム (AlN) バッファ層直上に鉄 (Fe) ドープ層を挿入することにより、電流オフに伴う電流ドリフトおよび増幅歪補償の問題も解決したことも示す。

第 5 章では、GaN-HEMT の基地局用増幅器応用において、低コスト化を実現する技術について述べる。炭化珪素 (SiC) 基板を半絶縁性基板に代えて低コストである導電性基板を用い、さらに寄生容量低減のために AlN 厚膜バッファ層を採用しその最適化を行った。それにより半絶縁性基板と同等の特性を得た。また基板の 3 インチ大口径化において、しきい値ゲート電圧の面内均一性を確認し、大口径導電性 SiC 基板の採用による低コスト化の可能性を示す。

第 6 章では、次世代 GaN-HEMT で要請のある順方向ゲートリーク抑制の手段として、絶縁ゲート構造の有効性を実証したことを述べる。ゲート絶縁膜として窒化珪素 (SiN) 膜を採用することにより、順方向ゲートリーク電流を 8 桁にわたり低減することに成功した。また出力 147 W、利得 12 dB という優れた出力性能を実演した。増幅動作における歪補償機能も確認し、さらに信頼度試験において性能劣化のない高信頼性を確認した。

第 7 章では、ミリ波応用のための短ゲート GaN-HEMT において、実用化に耐えうる性能を実現したことを述べる。Y 型ゲート電極、SiN/GaN キャップ、オフセットなどのデバイス構造の改良と、高 Al 組成 AlGaIn 層および n-GaN キャップ層構造の適用および最適化により、W 帯増幅器用デバイスとして十分な性能を満たす 190 V を超えるゲート耐圧を実現した。また GaN-HEMT をモノリシックに集積化したミリ波 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 増幅器を作製し、70 GHz 以上においても 1 W を超える優れた性能を世界で初めて実現した。

第 8 章では、電源用途のためのノーマリオフ型 GaN-HEMT を、高耐圧の酸化アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) を絶縁膜とするリセス型絶縁ゲート構造と 3 層キャップ構造を組み合わせる構造によって実現したことを述べる。ノーマリオフ動作のしきい値ゲート電圧は 3 V であり、ゲート電圧 10 V において 800 mA に達するドレイン電流 (オン電流) を得、低オン抵抗も同時に達成した。

最後に第 9 章では、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-HEMT の優れた特性にさらに期待しうる将来展望を示す。図 2 は GaN を用いた省エネ社会の模式図である。GaN-HEMT は宇宙から家庭まで様々な場所で使われる可能性を秘めている。第 2 章の基礎技術、第 3 章の高信頼度化技術、第 4 章の増幅器技術により第一世代が市場にでた段階である。今後、効率のさらなる向上と歪改善を行い市場優位性を確固たるものとするべく、第 4 章の技術を用いて第二世代の実用化が進むと思われる。加えて第 5 章の低コスト化技術を加えた実用化も必須となるであろう。

さらに第6章の絶縁ゲートなどの新型構造を用いた第三世代のデバイスが研究の中心となっていく、第7章のミリ波用途の第四世代短ゲートデバイス開発も加速していくと考えている。

また、第8章で示した低周波数用途での自動車や家電用途のパワーデバイス応用が2015年ごろには大きくはばたくと見込まれ、研究人口や論文数はさらに増加の一途をたどると思われる。

GaN-HEMTの研究材料は多数残っており、今後のさらなる発展を期待したい。



図2 GaN-HEMTによる省エネ社会像