

C帯 150 W級 GaN 電力 HEMT

C-Band 150 W-Class GaN Power HEMT

松下 景一 桜井 博幸 高木 一考

■ MATSUSHITA Keiichi ■ SAKURAI Hiroyuki ■ TAKAGI Kazutaka

東芝は、尖頭(せんとう)出力で 150 W を超える C 帯(4 ~ 8 GHz 帯)窒化ガリウム(GaN)電力 HEMT(High Electron Mobility Transistors)の開発試作に成功した。これは、ウェーハ構造や素子作製のプロセスを見直すとともに、ヒ化ガリウム(GaAs)FET(Field Effect Transistors)開発で培ってきた電力合成技術を駆使することにより達成したものであり、C 帯において 174 W の尖頭出力が得られた。これによりマイクロ波 GaN 電力 HEMT の実用化にめどがついたものと考えられる。

Toshiba has succeeded in developing a C-band GaN power high-electron-mobility transistor (HEMT) device with an output power exceeding 150 W. This was achieved by taking advantage of our accumulated GaAs-related technologies; namely, our expertise in semiconductor process technologies and in-depth knowledge of wafer structures and internal matching. A peak output power of 174 W at 6.0 GHz was obtained in a prototype test.

1 まえがき

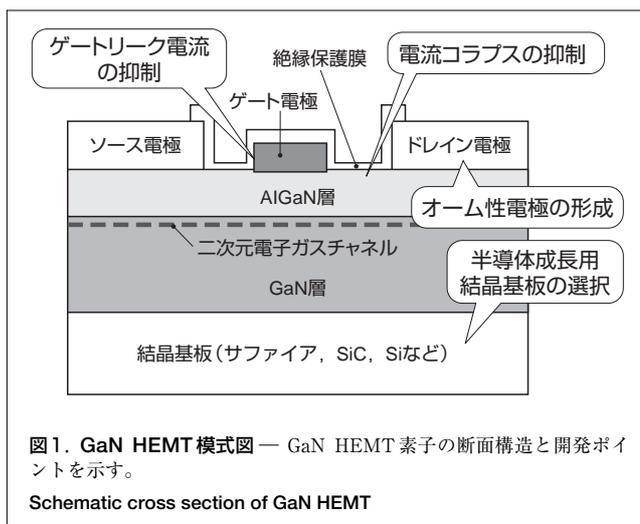
近年の通信情報の大容量化に伴い、通信基地局や衛星通信用途の増幅素子は更なる高速・高出力化が求められている。東芝では、マイクロ波通信用途として、既に 6 GHz 帯で出力 90 W⁽¹⁾、14 GHz で出力 30 W⁽²⁾ の GaAs 電力 FET を開発、製品化している。更に出力をアップするためには FET の集積度を上げる必要があるが、それは高い熱の発生を意味する。しかし、放熱は既に限界に近づいてきており、GaAs という材料の限界が見えてきた。

GaN(窒化ガリウム)は、近年青色発光ダイオードの材料として急速に注目を集めているが、材料特性上、GaAs 以上に高い飽和電子速度と絶縁破壊耐圧を持っており、マイクロ波帯以上の周波数で使用できる高出力増幅素子用材料としても有望視されている。加えてバンドギャップ(半導体の禁制帯幅)が広いことを生かして GaAs より高い温度でも動作する可能性を持っており、限界に近づいた GaAs 系材料に代わる次世代材料として期待されている。

ここでは、C 帯(4 ~ 8 GHz 帯) 150 W 級 GaN 電力 HEMT(High Electron Mobility Transistors)の開発における三つのキーポイント、半導体成長の結晶基板の選定、素子化プロセスの改善、そして放熱を考慮した電力合成について述べる。

2 GaN 電力 HEMT 開発

GaN HEMT の模式的な構造を図 1 に示す。今回の開発にあたって留意したことは、次の 3 点である。



- (1) 結晶基板の選択
- (2) ゲートリーク電流の抑制、良好なオーム性電極の形成及びチャンネル電流の安定性確保(電流コラプスの抑制)といった素子化プロセスの改善
- (3) 実装時の放熱性を考慮したパッケージ内電力合成

2.1 半導体成長用結晶基板の選択

GaN HEMT の構造は、サファイア、SiC(炭化シリコン)、Si(シリコン)などといった結晶基板を下地として、その上に GaN 層や窒化アルミニウムガリウム(AlGaIn)層などを分子線エピタキシー(MBE: Molecular Beam Epitaxy)法や有機金属気相成長(MOCVD: Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)法を使って、成長層として形成させる。このとき

GaN層やAlGaN層などは、下地の結晶構造に合わせて連続的に形成(エピタキシャル成長)させる。本来、下地の結晶基板としては、同じGaN結晶基板が望ましいのであるが、現在の技術では大口径のGaN単結晶を得ることが難しいため、表1に示した結晶基板で代用している。

これらの結晶基板材料には一長一短があるが、高出力電力素子を実現するために熱伝導性と成長層の結晶品質を重要視してSiCを結晶基板として採用した。

表1. 結晶基板の比較
Characteristics of substrate wafers

結晶基板	熱伝導	成長層結晶品質	基板結晶品質	価格	大口径化
サファイア	×	△	○	○	◎
SiC	◎	◎	△	×	△
Si	○	△	◎	◎	◎

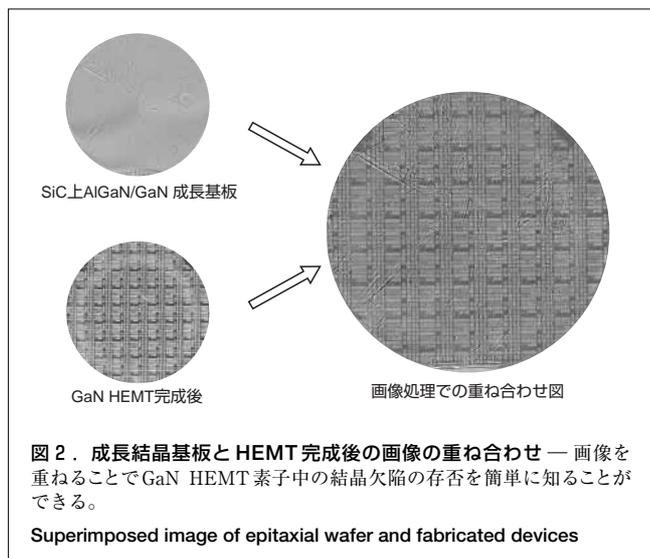
◎：非常に良い ○：良い △：やや悪い ×：非常に悪い

2.2 プロセス改善

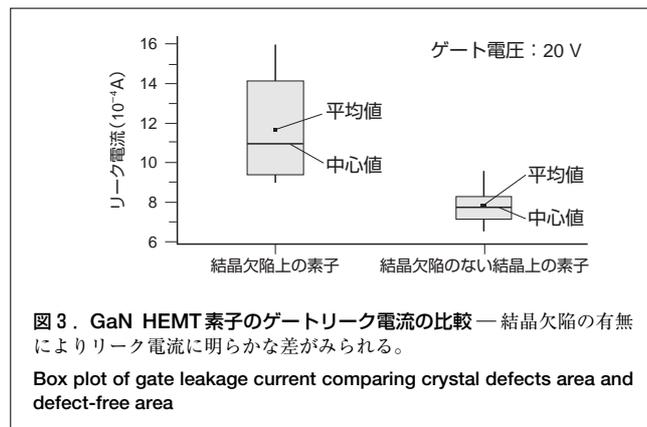
2.2.1 ゲートリーク電流の低減

GaNは高い破壊耐圧を持っているが、トランジスタ製作プロセスにより、電極間あるいは半導体結晶内部で漏えい電流(ゲートリーク電流と総称している)が発生してしまうことがあり、このリークが発生すると材料特性を生かした高電圧動作ができなくなる。リーク電流の経路としては、AlGaN層と絶縁保護膜との界面、あるいはAlGaN層中にある結晶欠陥を經由して結晶基板などへ流れることが考えられる。

結晶基板材料に使用するSiC結晶基板には、転位やマイクロパイプと呼ばれる結晶欠陥が、依然多く存在している。当社は今回の開発の過程で、図2に示すように、Si結晶基板の



上に形成させるAlGaN層及びGaN層にこれらの結晶欠陥が引き継がれる状況を光学表面検査装置で可視化し、この成長層上に形成したGaN電力HEMTのパターンを画像処理により重ね合わせることで、結晶欠陥と作成した素子とを1対1で対比できるようにした。この情報を基に、結晶欠陥上に形成されたHEMTと良好な結晶上に形成されたHEMTとで、ゲートリーク電流を比較した結果を図3に示した。図3からわかるように、結晶欠陥の有無によるリーク電流の大きさには明らかな差が見られ、結晶基板から成長層に引き継がれた結晶欠陥を低減することが、素子特性改善に重要であることがわかる⁽³⁾。



今回のHEMT開発では、ゲート電極やAlGaN層の表面などに起因するリーク電流については、ゲート電極金属の構成や、電極形成前の処理を最適化することで低減を図った。

上記のような成長層内の結晶欠陥を經由するリーク電流の低減は、基板結晶性の改善を待つことになるが、今回については、結晶欠陥のない表面に形成されたGaN電力HEMTを選別することで対応した。

2.2.2 オーム性電極の形成

GaAsと同様、素子の高性能化には、ソース及びドレイン電極の接触抵抗低減が重要である。GaNは反応性が少ない材料であるため、電極金属の種類、電極形成前処理や熱処理によって性能が大きく左右される。今回の開発ではTi(チタン)系の積層構造電極を採用し高温短時間の熱処理をするために急速熱アニール(RTA: Rapid Thermal Anneal)を行った。層構造及び熱アニール温度の最適化により、接触抵抗 $10^{-5} \Omega \text{ cm}^2$ 以下のソース及びドレイン用オーム性電極を実現した。

2.2.3 チャンネル電流の安定性(電流コラプスの抑制)

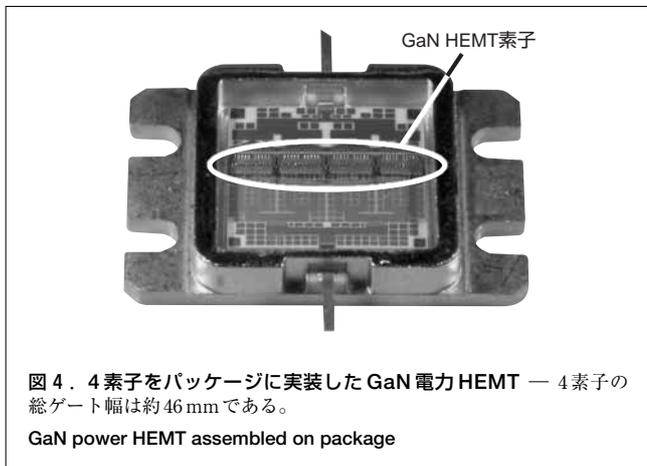
GaN HEMT素子では、電流コラプスと呼ばれる電流不安定現象がしばしば観測される。これは、GaN上に形成したHEMTなどの三端子素子において、ゲート電圧を一定にして、ドレイン電圧を上昇していくと、ドレイン電流が減少するというもので、高出力素子にとっては非常に大きな問題である。

電流コラプスについては、まだ原因が特定されていないものの、GaN半導体表面の欠陥などに起因した電子捕獲準位が関係した現象であることは、ほぼ定説化している。今回のGaN電力HEMT開発においては、ゲート電極形成前及び表面保護膜形成時に半導体表面へのダメージを抑えるプロセスと装置条件を実験的に見いだして適用し、電流コラプスを抑え込むように工夫した。

2.3 放熱性を考慮したパッケージ内電力合成

冒頭で述べたとおり、GaN HEMT素子はGaAs系素子の10倍の電力密度で動作する能力を持っている。しかしながら、電力付加効率^(注1)はGaAs系素子と同等程度であり、大電力化に比例して大量の熱が発生する。GaAsに比べてバンドギャップが広い分、高温動作が可能であるが、増幅回路を構成するほかの部品の耐熱性を考慮すると、GaN HEMTといえども、電力密度と放熱性を考慮した素子サイズを選択する必要がある。

今回開発したGaN電力HEMTでは、目標とする出力と発熱量を考慮し、GaN HEMT素子のサイズ、更には素子を実装するパッケージ(きょう体)の大きさを決定した。今回開発したGaN電力HEMTの外観を図4に示す。パッケージには四つのGaN HEMT素子を実装し、GaN HEMT素子の発熱部の集中を抑えることでGaN材料の利点をGaN HEMT素子性能として十分に引き出すように工夫した。



3 開発したGaN電力HEMTの特性例

開発したGaN電力HEMTの6GHzにおける入出力特性を図5に示す。ドレイン電圧15V、連続動作(CW)での飽和出力として47.9dBm(61.7W)、パルス動作(デューティ比20%、パルス幅100μs)での飽和出力48.5dBm(70.8W)を得た。

(注1) 電力素子に供給された電力が出力信号として出力電力に変換される効率のこと。変換されなかった電力の多くは熱になる。

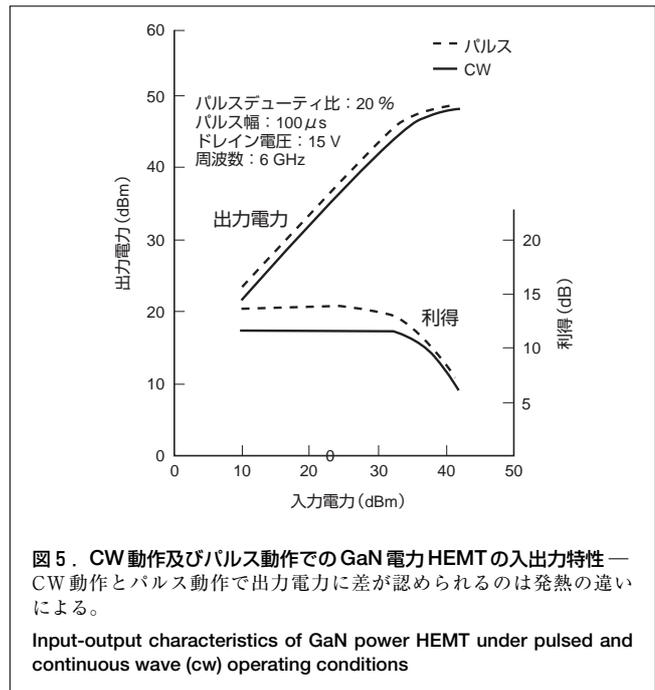


図5. CW動作及びパルス動作でのGaN電力HEMTの入出力特性 — CW動作とパルス動作で出力電力に差が認められるのは発熱の違いによる。

Input-output characteristics of GaN power HEMT under pulsed and continuous wave (cw) operating conditions

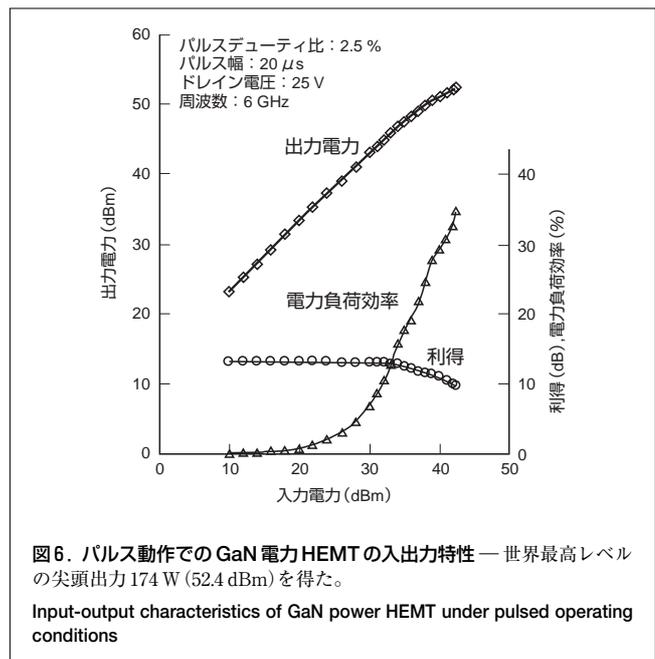


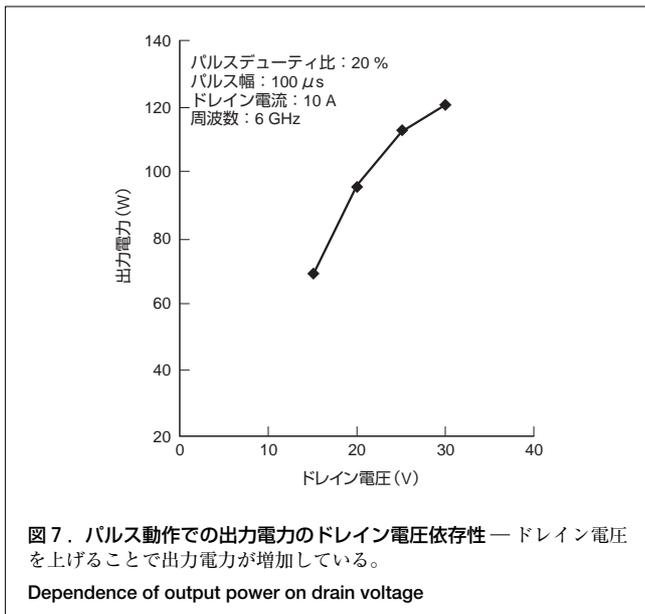
図6. パルス動作でのGaN電力HEMTの入出力特性 — 世界最高レベルの尖頭出力174W(52.4dBm)を得た。

Input-output characteristics of GaN power HEMT under pulsed operating conditions

線形利得は11.5dB(CW動作)、13.2dB(パルス動作)であった。CWとパルスとの飽和出力差0.6dBmは動作温度の違いによるものである。

また、パルス動作(デューティ比2.5%、パルス幅20μs)、ドレイン電圧25Vで飽和出力52.4dBm(174W)を得た(図6)。このときの線形利得は13.2dB、電力付加効率は34%である。

周波数6GHzパルス動作(デューティ比20%、パルス幅100μs、ドレイン電流10A)における入出力電力特性のドレイン電圧依存性を図7に示す。ドレイン電圧が増えるに従っ



て、出力電力が大きくなっていることがわかる。これはGaNの特色を生かし電圧振幅を大きくした効果である。

4 あとがき

今回、尖頭出力で150Wを超えるC帯GaN電力HEMTの開発に成功したことにより、GaNという、高出力電力素子に適した材料のポテンシャルの高さを実証できたものと考えている。材料の欠陥、電流コラプス、熱設計の最適化など、実用化までに解決すべき課題も多いが、今回の開発試作によりGaN電力HEMTの実用化に向け確実に一歩前進することができた。

文献

- (1) 木村英樹, ほか. C帯90W電力FET. 東芝レビュー. **60**, 6, 2005, p.48-51.
- (2) 高木一考, ほか. Ku帯30W電力FET. 東芝レビュー. **60**, 11, 2005, p.48-51.
- (3) K. Matsushita, et.al. "Gate Leakage Current of AlGaIn/GaN HEMTs Device Influenced by Substrate Defects". CS MANTECH Conference 2005 digest of papers. p.71-73.



松下 景一 MATSUSHITA Keiichi

社会ネットワークインフラ社 小向工場 マイクロ波技術部 主務。マイクロ波半導体及び半導体製造プロセスの設計・開発に従事。応用物理学会会員。

Komukai Operations



桜井 博幸 SAKURAI Hiroyuki

社会ネットワークインフラ社 小向工場 マイクロ波技術部。マイクロ波半導体製造プロセスの設計・開発に従事。

Komukai Operations



高木 一考 TAKAGI Kazutaka

社会ネットワークインフラ社 小向工場 マイクロ波技術部 主査。マイクロ波半導体デバイスの設計・開発に従事。応用物理学会会員。

Komukai Operations