

レーダ用固体化電力増幅器向け X帯130 W級GaN HEMT

X-Band 130 W-Class GaN HEMT for SSPAs in Radar Systems

山村 拓嗣

黒田 健太

桜井 博幸

■ YAMAMURA Takuji

■ KURODA Kenta

■ SAKURAI Hiroyuki

東芝は、気象レーダや船舶レーダなどに用いられるマイクロ波固体化電力増幅器 (SSPA) 向けの高周波・高出力素子として、X帯 (8 ~ 12 GHz帯) 130 W級窒化ガリウム (GaN) 高電子移動度トランジスタ (HEMT) を開発した。

このGaN HEMTは、既開発のチップ構造に改良を加えるとともに、高調波ロードプルを用いた整合回路設計により性能向上を図り、周波数9.0 GHzのパルス動作 (デューティ比10%, パルス幅100 μ s) で、飽和出力144 W、電力付加効率52%を達成した。これにより、X帯レーダシステムは高精度化や、長寿命化、小型・軽量化などを実現できることから、今後電力増幅器の固体化がいつそう加速すると考えられる。

Toshiba has developed an X-band (8-12 GHz) 130 W-class gallium nitride (GaN) high electron mobility transistor (HEMT) device for solid-state power amplifiers (SSPAs) used in weather and marine radar systems.

This GaN HEMT device achieves a saturated power output of 144 W and a power-added efficiency (PAE) of 52% under pulsed operation at 9.0 GHz (duty ratio: 10%; pulse width: 100 μ s) through improvement of the chip structure of existing GaN HEMT devices and enhancement of performance by applying a matching circuit to control harmonic components based on active load-pull measurement. SSPAs employing the newly developed GaN HEMT device are expected to contribute to the accelerated dissemination of X-band radar systems offering high-precision observation capabilities together with compact dimensions, light weight, and long operating life.

1 まえがき

マイクロ波は、気象レーダや、船舶レーダ、空港監視レーダなどのレーダシステム、衛星通信や地上間通信などの無線通信システムに用いられている周波数が数GHz~数十GHz、波長が1~10 cmの電波である。

マイクロ波半導体は、これらのシステムの中でマイクロ波の電力増幅に広く用いられている。マイクロ波半導体の材料にはヒ化ガリウム (GaAs) が数十年にわたって用いられてきたが、近年、高い飽和電子速度や絶縁破壊耐圧などの特長を持つ窒化ガリウム (GaN) が注目を集め、急速に技術開発が進んでいる。GaN高電子移動度トランジスタ (HEMT) は従来のGaAs系マイクロ波半導体と比較して、約10倍の出力電力を実現できる。

東芝は、C帯 (4 ~ 8 GHz帯)、X帯 (8 ~ 12 GHz帯)、及びKu帯 (12 ~ 18 GHz帯) の各周波数帯で高出力GaN HEMT製品を開発し⁽¹⁾⁻⁽³⁾、気象レーダ用や衛星通信用の固体化電力増幅器 (SSPA) に適用してきた⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

マイクロ波の電力増幅には、マイクロ波半導体を用いたSSPA以外にも、マグネトロンやクライストロンなどを用いた真空管式電力増幅器が用いられる。これら真空管式電力増幅器の特長は、容易に高い出力電力が得られることである。

一方SSPAの特長は、小型で軽量であることや、長寿命で

メンテナンスに掛かるコストが低いこと、高圧電源が不要であることなどが挙げられる。そのため、真空管式電力増幅器をSSPAで置換する固体化の要求は強い。小型、軽量、及び高出力のSSPAを実現するために、マイクロ波半導体には、高出力化、高利得化、及び高効率化が求められてきた。

最大30 W程度の出力電力が限界であるGaAs系マイクロ波半導体を用いて、出力電力が数百Wを超えるSSPAを実現するためには、数多くの素子を並列合成する必要があり、現実的ではなかった。100 Wを超える出力電力が得られるGaN HEMTの登場により、出力電力が数百Wを超える電力増幅器の固体化が本格化している。したがって、固体化をよりいっそう進めるため、GaN HEMTには更なる高出力化が求められている。

高出力化を実現するには、既開発品では直列接続するGaN HEMTの数 (段数) を多くする必要があり、SSPAが大きくなってしまふ。これを避けるためには同じ入力電力に対してGaN HEMTの出力電力を大きくすればよく、これはGaN HEMTの利得を上げることに相当する。すなわち、GaN HEMTの利得を向上させれば、SSPAの大きさを変更することなく、高出力化を実現できる。

一方、GaN HEMTの出力電力が増加すると発熱量も増加するので、冷却のためのスペースを多く確保する必要がある。これに対しては、GaN HEMTの電力付加効率 (PAE) を向上

させることにより、発熱量を低減でき、冷却のために必要なスペースは最小限に抑えられる。

ここでは、レーダシステム用SSPA向けに開発したX帯130 W級GaN HEMTの概要、性能向上のポイント、及びX帯130 W級GaN HEMTの特性について述べる。

2 X帯130 W級GaN HEMTの概要

X帯130 W級GaN HEMTの外観を図1に示す。パッケージサイズは25.2×17.4 mmと、既開発のX帯100 W級GaN HEMTと同じサイズを維持したまま、出力電力30%、利得2.5 dB、及びPAE 10%の性能向上を実現した。気密封止されたパッケージ内部には、GaN HEMTチップと整合回路を実装しており、入出力インピーダンスは50 Ωである。

GaN HEMTチップの断面構造を図2に示す。GaNと窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn) を積層したヘテロ構造により、2次元電子ガスチャネルを形成している。AlGaIn層上には、ゲート電極、ソース電極、及びドレイン電極が形成され、表面

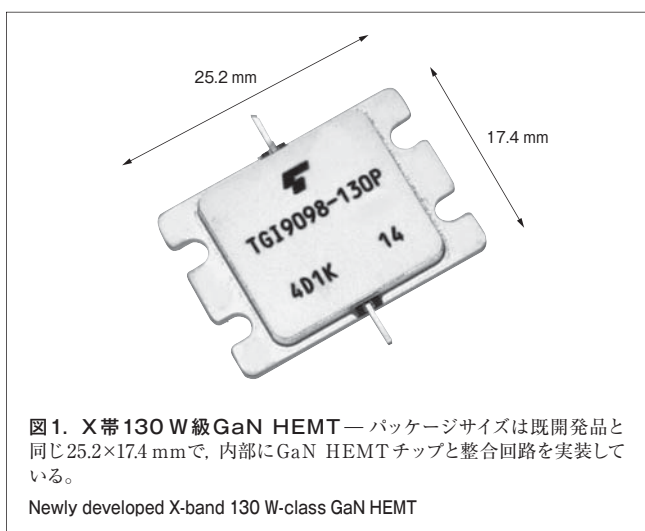


図1. X帯130 W級GaN HEMT — パッケージサイズは既開発品と同じ25.2×17.4 mmで、内部にGaN HEMTチップと整合回路を実装している。

Newly developed X-band 130 W-class GaN HEMT

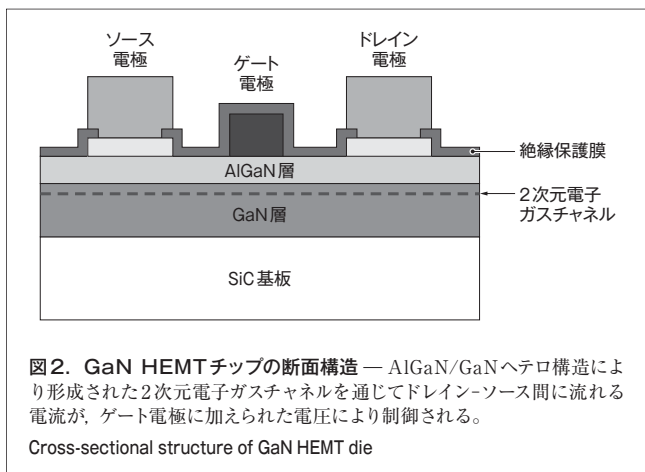


図2. GaN HEMTチップの断面構造 — AlGaIn/GaNヘテロ構造により形成された2次元電子ガスチャネルを通じてドレイン-ソース間に流れる電流が、ゲート電極に加えられた電圧により制御される。

Cross-sectional structure of GaN HEMT die

は絶縁保護膜で被われている。基板材料には、放熱性と、GaN及びAlGaInとの結晶整合性に優れる炭化シリコン (SiC) を採用している。

3 性能向上のポイント

X帯130 W級GaN HEMT開発のポイントは、SSPA向けに、出力電力、利得、及びPAEを向上させることである。今回の開発では、次の3点に着目してGaN HEMTの性能向上に取り組んだ。

- (1) 電流コラプス抑制による出力電力向上
- (2) ゲートドレイン間容量の低減による利得向上
- (3) 高調波制御によるPAE向上

3.1 電流コラプス抑制による出力電力向上

マイクロ波半導体の出力電力は、ドレイン電圧振幅とドレイン電流振幅に依存する。GaN HEMTは、GaNが高い絶縁破壊耐圧を持つので、数十Vのドレイン電圧で動作でき、ドレイン電圧振幅を大きくすることで、出力電力を大きくすることができる。しかし、ドレイン電圧が上昇するにつれて、ドレイン電流が低下する電流コラプスと呼ばれる現象がしばしば観測される。電流コラプスは、ゲート電極近傍に電界が集中することで発生する高いエネルギーを持った電子が、半導体中や絶縁保護膜中、及び半導体と絶縁膜界面に捕獲され、2次元電子ガスチャネルの電子の動きを阻害する現象と考えられている。この電流コラプスを抑制できれば、電流振幅が大きくなり、出力電力を大きくできる。

今回の開発では、ゲート電極近傍の構造を工夫することで電界の集中を緩和し、電流コラプスを抑制した。改善前後の電流-電圧特性を図3に示す。電流コラプスを抑制したことにより、ドレイン電流が大きくなっていることがわかる。これに

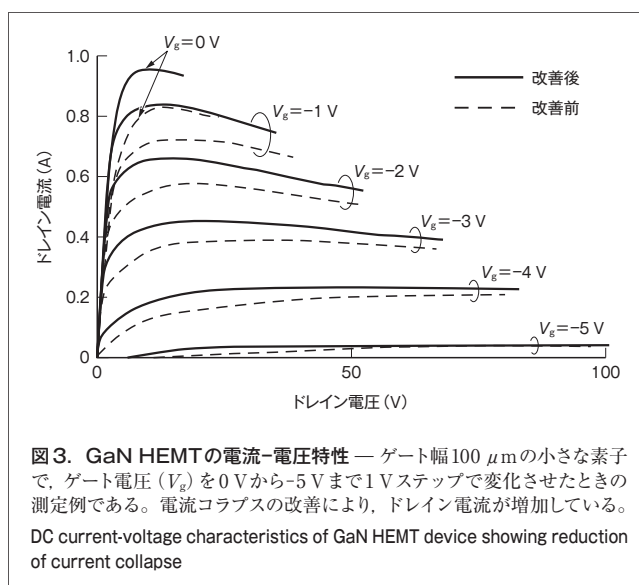


図3. GaN HEMTの電流-電圧特性 — ゲート幅100 μmの小さな素子で、ゲート電圧 (V_g) を0 Vから-5 Vまで1 Vステップで変化させたときの測定例である。電流コラプスの改善により、ドレイン電流が増加している。

DC current-voltage characteristics of GaN HEMT device showing reduction of current collapse

より、出力電力は30%向上した。

3.2 ゲート-ドレイン間容量の低減による利得向上

マイクロ波半導体の利得を向上させるためには、ゲート電極を微細化するなどしてゲート-ソース間容量 (C_{gs}) を小さくすることが一般的である。しかし、ゲート電圧を印加してもドレイン電流を制御できなくなるショートチャネル効果などの問題が生じることがある。そこで今回の開発では、ゲート-ドレイン間容量 (C_{gd}) に注目した。

高周波領域では、容量が大きくなるほどリアクタンスが小さくなるので、高周波信号が流れやすくなる。 C_{gd} は、入力端子であるゲート電極と、出力端子であるドレイン電極との間に発生する寄生容量である。 C_{gd} が大きいと、入力端子へ出力信号が負帰還しやすくなり、利得が低下する。当社は、ゲート-ドレイン間の構造及び配置を変えることで、 C_{gd} を30%低減できる条件を見いだした。これにより出力信号の負帰還を抑制でき、利得が2.5 dB向上した。

3.3 高調波制御によるPAE向上

マイクロ波半導体で高周波電力を増幅する際には、動作周波数の2倍や3倍の周波数を持つ高調波成分が発生する場合がある。発生する高調波成分の振幅や位相は、高調波に対する負荷インピーダンスによって変化する。半導体素子に接続した整合回路により、高調波成分を適切に制御することで、PAEが向上することが確認されている。

半導体素子の負荷インピーダンスと高周波性能の関係を評価する装置に、ロードプルがある。これは、動作周波数の基本波に対して所望の負荷インピーダンスを半導体素子に与え

て、高周波性能を測定する装置である。更に高調波ロードプルは、基本波に加えて高調波に対しても所望の負荷インピーダンスを与えて、高周波性能を測定できる。

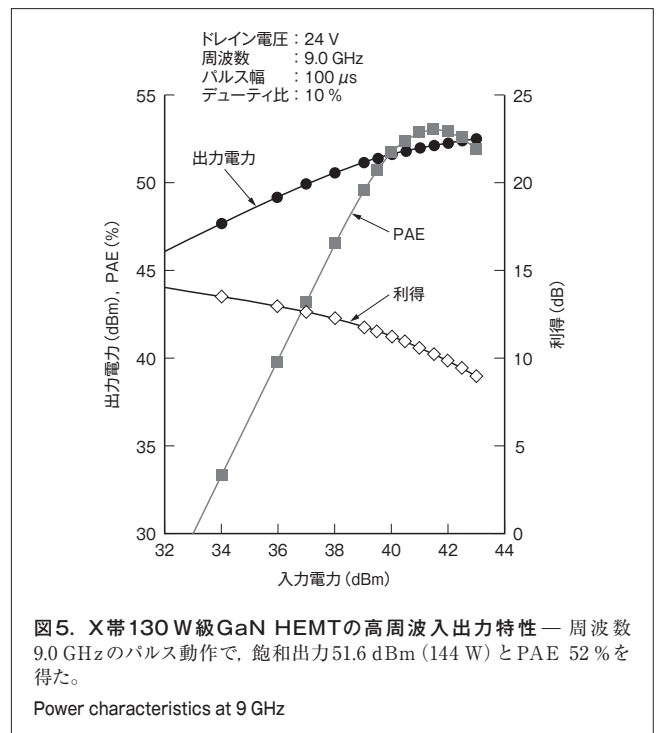
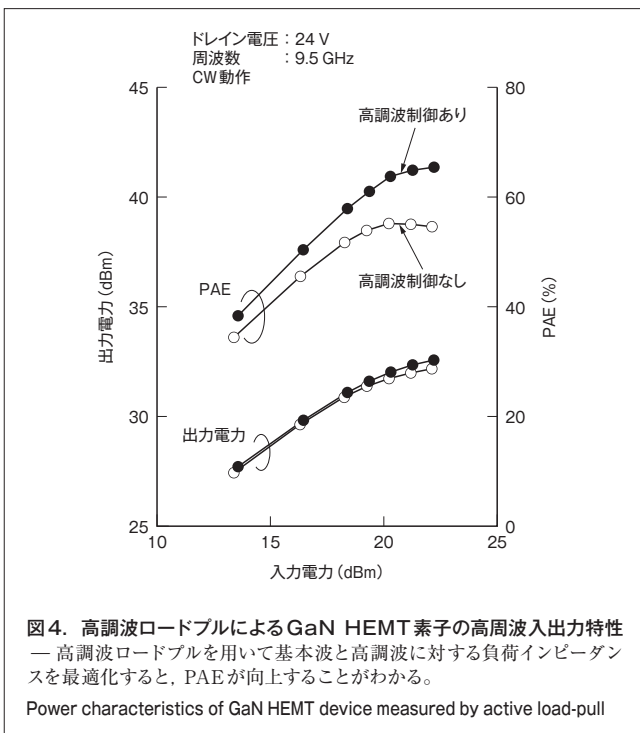
今回開発したGaN HEMTの高周波性能を、高調波ロードプルを用いて測定した。周波数9.5 GHzの連続波(CW)動作で、ゲート幅400 μm の小さい素子の高調波に対する負荷インピーダンスの影響を比較した。基本波及び高調波に対する負荷インピーダンスを、高調波ロードプルで最適化したときの高周波入出力特性を図4に示す。高調波成分を適切に制御したことで、PAEが10%向上した。

4 X帯130 W級GaN HEMTの特性

3.3節で述べた高調波ロードプルで得たゲート幅が小さい素子に対する最適負荷インピーダンスを基に、ゲート幅が大きい130 W級GaN HEMTのチップに対しても同様に高調波成分を制御した整合回路を設計した。

開発したX帯130 W級GaN HEMTを周波数9.0 GHzでパルス動作させたときの高周波入出力特性を図5に示す。入力電力40.5 dBmのとき、出力電力51.0 dBm、利得10.5 dB、及びPAE 52%を得た。また飽和出力は、51.6 dBm (144 W) を達成した。

入力電力40.5 dBmにおける、出力電力とPAEの周波数帯域特性を図6に示す。X帯レーダシステムの周波数帯域である9.0 ~ 9.8 GHzにおいて、PAEが50%以上と良好な特性が得られた。



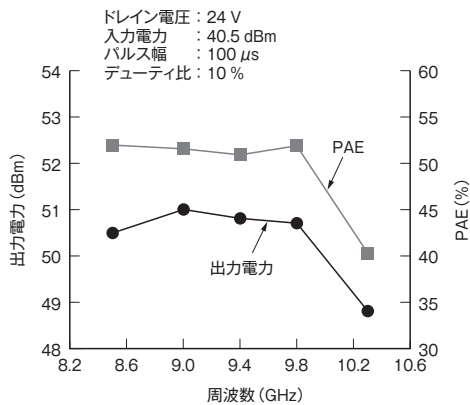


図6. X帯130 W級Ga N HEMTの周波数帯域特性 — X帯レーダシステムの周波数帯域である9.0 ~ 9.8 GHzにおいて, PAE 50 %以上の良好な特性を得た。

Frequency characteristics

5 あとがき

当社は、レーダシステム用SSPA向けにX帯130 W級Ga N HEMTを開発した。既開発の100 W級と比較して、電流コラプスの抑制により出力電力を30 %向上させるとともに、ゲートドレイン間容量の低減により利得を2.5 dB向上させ、出力電力144 Wを達成した。また整合回路での高調波制御により、PAEを10 %向上させた。

今回開発したGa N HEMTを採用することで、従来よりも高出力のSSPAを実現することができる。これにより、気象レーダや船舶レーダなどのX帯レーダシステムにおいて、小型で高出力のSSPAの採用がいつそう加速すると考えられる。

今後、開発したX帯130 W級Ga N HEMTの製品化を進めるとともに、マイクロ波半導体の更なる性能向上を進め、レーダシステムの発展に貢献していく。

文献

- (1) 松下景一 他. C帯150 W級Ga N電力HEMT. 東芝レビュー. 60, 12, 2005, p.32 - 35.
- (2) 高木一考 他. X帯50 W級Ga N電力HEMT. 東芝レビュー. 62, 4, 2007, p.42 - 45.
- (3) 高木一考 他. Ku帯50 W級Ga N HEMT. 東芝レビュー. 63, 5, 2008, p.40 - 43.
- (4) 旭 保彰 他. 5 GHz帯気象レーダ用1 kW級Ga N固体化電力増幅器. 東芝レビュー. 67, 2, 2012, p.46 - 49.
- (5) 旭 保彰 他. X帯気象レーダ用Ga N固体化電力増幅器. 東芝レビュー. 63, 2, 2008, p.58 - 61.
- (6) 望月 亮 他. Ku帯衛星通信用 小型・屋外型SSPA. 東芝レビュー. 65, 11, 2010, p.46 - 49.



山村 拓嗣 YAMAMURA Takuji

社会インフラシステム社 小向事業所 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。

Komukai Complex



黒田 健太 KURODA Kenta

社会インフラシステム社 小向事業所 マイクロ波技術部。
 マイクロ波半導体デバイスの設計・開発に従事。IEEE会員。

Komukai Complex



桜井 博幸 SAKURAI Hiroyuki

社会インフラシステム社 小向事業所 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。

Komukai Complex