

S帯600W, X帯200Wを実現した レーダー送信機用GaN HEMT

S-Band 600 W GaN HEMT and X-Band 200 W GaN HEMT for Radar Applications

宮澤 直行*
Naoyuki Miyazawa

西原 信
Makoto Nishihara

宇佐美 邦博
Kunihiro Usami

青嶋 真
Makoto Aojima

山本 高史
Takashi Yamamoto

GaN HEMT*1を用いたS帯*2 600 W、X帯*3 200 Wの高出力・高効率・内部整合型*4増幅器の製品化について報告する。レーダー用送信機の固体素子化に向けて、GaNデバイスのさらなる高出力化が期待されている。S帯においては主に航空管制レーダー向けに2.7 - 2.9 GHzの帯域で出力600 W以上、パワーゲイン12.8 dB以上、ドレイン電力付加効率59 %を有する完全50Ω整合型のGaN HEMT、およびX帯においては主に船舶レーダー、気象レーダー向けに8.5 - 9.8 GHzの帯域で出力200 W以上、パワーゲイン9 dB以上、電力付加効率38 %を有する完全50Ω整合型のGaN HEMTをそれぞれ製品化した。これらは、製品化された内部整合型GaN HEMTにおいて世界最高水準の出力電力であり、レーダー送信機の小型化、軽量化、低消費電力化に大きく貢献している。

High output power gallium nitride (GaN) high electron mobility transistors (HEMTs) have been developed for S-band and X-band radar applications. The fully internally matched S-band GaN HEMT exhibits a minimum output power of 600 W, a minimum power gain of 12.8 dB, and a drain efficiency (DE) of 60% at 2.7-2.9 GHz for radar applications such as an air traffic control radar. The fully internally matched X-band GaN HEMT exhibits a minimum output power of 200 W, a minimum power gain of 9 dB, and a power-added efficiency (PAE) of 38% at 8.5-9.8 GHz for radar applications such as a marine radar and weather radar. The output power of these GaN HEMTs is the highest in the market, contributing to reduction in the size, weight and power consumption of radar transmitters.

キーワード：GaN HEMT、S帯、X帯、レーダー、高出力

1. 緒 言

近年、航空監視、船舶監視、気象観測に用いるレーダー用送信機向けに、窒化ガリウム高電子移動度トランジスタ (GaN HEMT) を用いた内部整合型トランジスタの開発が活発に進められている。各空港で航空機監視の高度化に対応するS帯レーダー、またゲリラ豪雨のような局所的な気象変動を検知できるX帯気象観測用レーダーは今後の需要拡大が期待される分野である。

このようなレーダー用途において求められる出力電力は数kW～数十kWにも達するため、従来これらの用途には高出力動作が可能で安価な、マグネトロンやクライストロンといった真空管による素子が主に用いられてきた。しかしながら、これらの真空管素子は寿命による交換のサイクルが半年から1年と短く、運用コスト上昇の一因となることが指摘されている。また、真空管は原理的に信号の雑音が大きく、占有帯域幅が広いと、周波数が近い他の無線通信システムと干渉しやすいという問題がある。このような理由から、長期信頼性や雑音特性の面で優れた固体素子の高出力化によって、真空管を置き換えることが求められてきた。

GaN HEMTはGaNの優れた材料物性に起因して、これ

まで固体素子として用いられてきたガリウム砒素電界効果トランジスタ (GaAs FET) *5と比較して高出力・高利得動作が可能であり、レーダーのような高出力アプリケーションに適した固体素子として注目されている。また、ユーザー側の設計における利便性の観点から、増幅器の広帯域化に対する要求も大きい。GaN HEMTは入出力インピーダンスが高いという特長を有しており、増幅器の高出力化とともに広帯域化も可能である。

当社では世界で初めて携帯電話基地局用GaN HEMTを製品化し、平成25年度に「第2回技術経営・イノベーション賞」において「文部科学大臣賞」を受賞した⁽¹⁾。また、これらの技術をベースとして⁽²⁾、GaN HEMTのさらなる市場拡大を目指してこれまで高出力アプリケーション向けの内部整合型GaN HEMTの高出力化に取り組んできた^{(3)~(6)}。本報告は、これらの数々の取り組みの結果として実現した世界最高レベルの出力電力を有するS帯、X帯レーダー用GaN HEMT製品を紹介するものである。

2. GaN HEMT技術

2-1 材料物性

表1にギガヘルツ (ギガは 10^9 ヘルツ) 帯の高周波増幅器などに用いられる主要な半導体材料の物性値を示す。GaNはSiやGaAsと比較して2倍以上の飽和電子速度 (v_{sat}) と、Siの10倍、GaAsの7.5倍の絶縁破壊電界強度 (E_c) を有する。高周波、高出力素子の性能比較には飽和電子速度と絶縁破壊電界強度に対して、 $v_{sat} \cdot E_c / 2\pi$ を指標とするJohnson性能指標が用いられる。このJohnson性能指標で比較すると、GaNはSiと比較して27倍、GaAsと比較しても約15倍と圧倒的な優位性を有している。

表1 主要な半導体材料物性一覧

	Si	GaAs	GaN
バンドギャップ (eV)	1.1	1.4	3.4
飽和電子速度 ($\times 10^7$ cm/s)	1.0	1.3	2.7
絶縁破壊電界強度 (MV/cm)	0.3	0.4	3.0
電子移動度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1300	6000	1500
熱伝導率 ($\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$)	1.5	0.5	1.5
Siを1としたときのJohnson性能指数	1.0	1.7	27

2-2 GaN HEMT基本特性

X帯の製品向けに開発したGaN HEMTの特性の例を示す。ゲート長はX帯で十分な利得が得られる最適値に設定した。図1はドレイン電流-ドレイン電圧 ($I_{ds}-V_{ds}$) である。 $V_{gs} = +2.0$ Vにおける飽和ドレイン電流は1.1 A/mmと高い電流能力が得られた。また、ピンチオフ状態にお

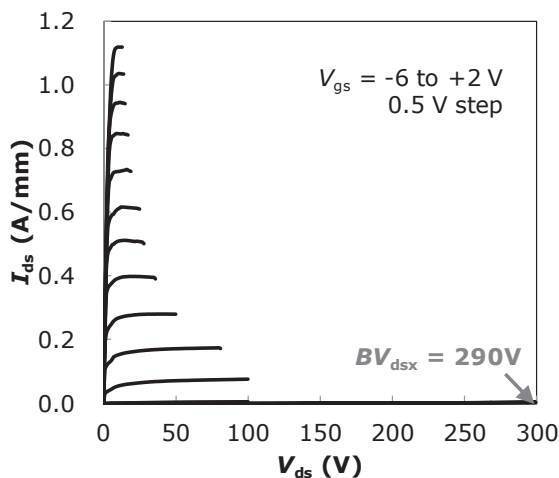


図1 作製したX帯GaN HEMTの $I_{ds}-V_{ds}$ 特性

る3端子耐圧 BV_{dsx} は290 Vが得られた。RF動作時のドレインソース間の電圧は最大で動作電圧の3倍以上に達する可能性があることが報告されているが⁽⁹⁾、今回得られた3端子耐圧は50 Vの動作電圧に対して十分に高い破壊耐圧を有している。

2-3 GaN HEMT信頼性

今回開発したX帯用GaN HEMTの平均故障時間 (Mean Time To Failure, 略称MTTF) を図2に示す。これはユニットトランジスタ用いた高温通電試験結果から求めている。チャンネル温度200 °Cにおいて、100万時間のMTTFが得られている。

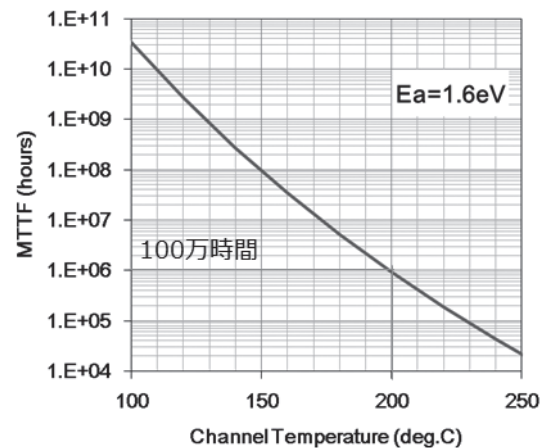


図2 X帯GaN HEMTのMTTF

3. 内部整合型GaN HEMTの開発

3-1 目標仕様

従来の製品 (S帯 320 W, X帯 120 W) に比べ出力電力を増加させるためには、トランジスタの熱設計、パルス条件、パッケージサイズ等を考慮する必要がある。

当社のGaN HEMT製品の信頼性の指標であるMTTF 100万時間を達成するためには、今回用いるGaN HEMTにおいてはトランジスタのチャンネル温度を200 °C以下に抑える必要がある。図3に模式的に示すようにパルス動作時のトランジスタのチャンネル温度はRFパルス終了時にピークに達し、パルス幅 (PW) が長いほど、また、デューティーサイクル (DC) が大きいほど高温になるため、高出力デバイス設計においてはパルス条件を考慮する必要がある。

一方で、レーダーシステムにおいて、送信するパルス幅とデューティーサイクルは、探査ターゲットまでの距離やサイズにより様々な条件が想定されるが、顧客要求をほぼ網羅する実用的な最大パルス条件として、フランジ温度75°CにおいてS帯でPW=200 μsec 、DC=10 %、X帯でPW=100 μsec 、DC=10 %と設定した。また周波数帯

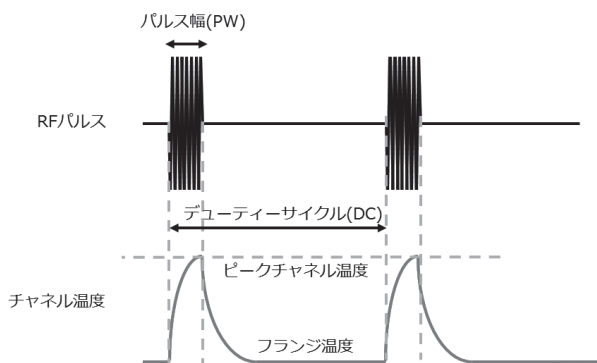


図3 RFパルスとチャンネル温度の関係の模式図

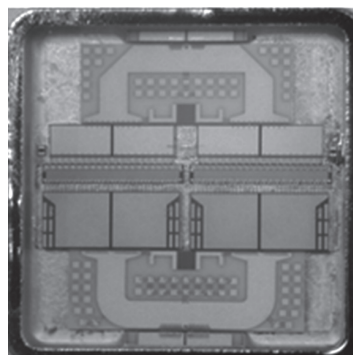


図4 S帯600 W 内部回路

域をS帯で航空管制レーダー向けに要求の多い2.7-2.9 GHz、X帯で船舶・気象レーダー向けをカバーする8.5-9.8 GHzと設定した。

また、消費電力を小さくしトランジスタのチャンネル温度の上昇をできるだけ抑えるために、より効率の高い最新世代のGaN HEMTテクノロジーを採用し、基本ユニットのトランジスタのロードプル^{*6}評価結果から、必要な周波数帯域で整合を取ったときの電力付加効率の目標値をS帯で60%、X帯で40%と設定した。

以上の動作条件、消費電力に加え、使用するパッケージの熱抵抗、および搭載可能なダイサイズから、出力電力の目標を50 V動作でS帯、最小600 W、X帯、最小200 Wとした。

3-2 GaN HEMTダイの設計

目標の出力電力を得るため、トランジスタのゲート幅をS帯で74.5 mm、X帯で14.4 mmのダイを作成し、二つのダイを並列動作させることとした。ゲートのフィンガー長は使用する周波数帯域で十分なゲインを有するように最低化している。ダイサイズはS帯が6.00 × 0.86 mm、X帯が5.38 mm × 0.76 mmである。

3-3 整合回路の設計

S帯、X帯とも基本ユニットのトランジスタモデルおよび、ロードプル結果を用いて設計を行った。S帯600 Wの内部回路を図4に示す。ボンディングワイヤを用いたインダクタとセラミックキャパシタからなる整合とし、広帯域特性を得るためにλ/4のウィルキンソンタイプのインピーダンス変換を用いて2ダイの出力電力を合成している。端子部分を除いたパッケージのサイズは24.0 × 17.4 mmである。

X帯200 Wの内部回路を図5に示す。S帯よりも周波数が高いため、各トランジスタユニットへ入出力信号の位相をより均一にするため、電磁界シミュレーションを行い4分割したエリアごとにローパス型整合を配置し、4-2-1のトーナメント型の同相分配・合成を行っている。端子部分を除いたパッケージのサイズは24.0 × 17.4 mmである。

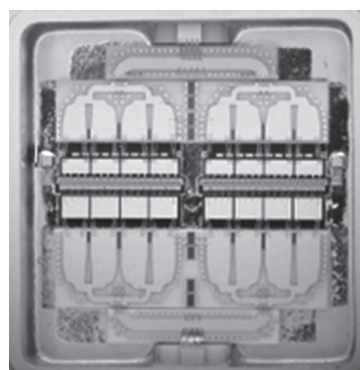


図5 X帯200 W 内部回路

4. 内部整合型GaN HEMT性能

4-1 RF特性

図6にS帯600 WのRF特性を示す。最小600 Wを満足する十分な出力電力が得られている。また、電力付加効率も59%とほぼ目標性能を達成している。

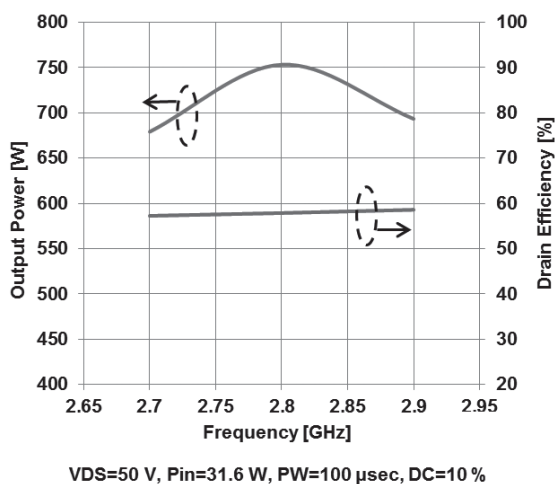


図6 S帯600 W RF特性

図7にX帯200 WのRF特性を示す。最小200 Wを満足する十分な出力電力が得られている。また、電力付加効率も38 %とほぼ目標性能を達成している。

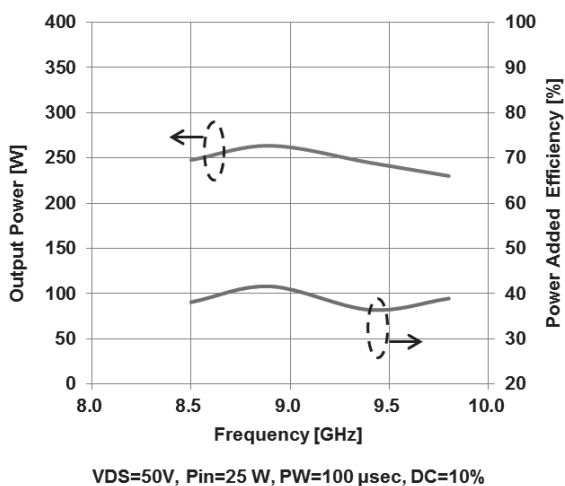


図7 X帯 200 W RF特性

4-2 評価治具

図8にX帯200 Wの評価治具を示す。完全50 Ω整合の内部整合により外部回路は50 Ω線路とλ/4バイアスラインのみになっている。

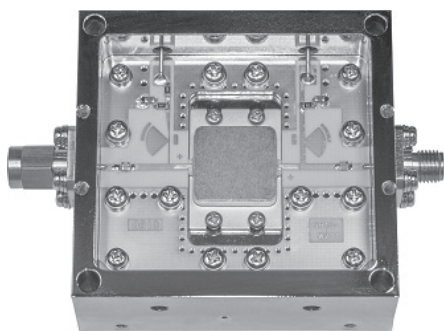


図8 X帯 200 W評価治具

4-3 チャンネル温度検証

図9に過渡熱解析装置を用いたX帯200 W品のチャンネル温度の評価結果を示す。PW = 100 μsec, DC = 10 %、フレンジ温度75 °Cにおいてピークチャンネル温度は150 °Cと十分低いことが確認できる。

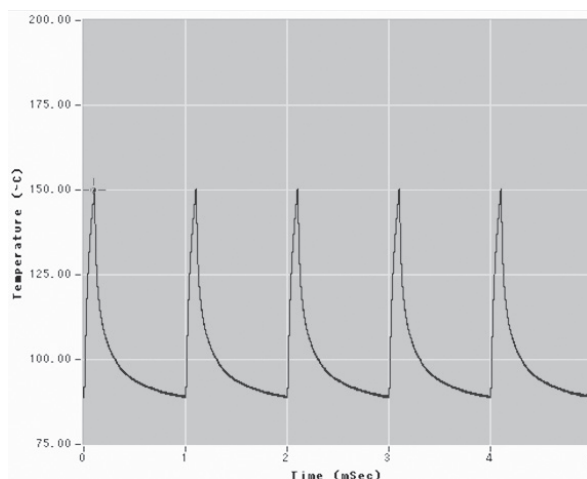


図9 過渡熱解析装置によるチャンネル温度評価

6. 結 言

表2に今回開発したS帯600 W、およびX帯200 W内部整合型GaN HEMTの評価結果をまとめる。今後、さらなる普及と発展が期待される各種監視レーダー、気象観測用レーダーでは、増幅器の固体素子化による長期信頼性の向上、および装置の小型化への期待が高まっている。本論文では、S帯、X帯において業界最高レベルの出力電力を有する内部整合型GaN HEMTの開発について述べた。当社では今後も高周波・高出力デバイスへの要求に応えるべく、GaN HEMTの技術開発・製品開発を進めていく。

表2 内部整合型GaN HEMTの評価結果

項目	S帯 600W	X帯 200W
ドレイン電圧 V_{ds}	50 V	50 V
パルス幅	200 μsec	100 μsec
デューティサイクル	10%	10%
周波数 (帯域全体)	2.7-2.9 GHz	8.5-9.8 GHz
飽和出力電力 P_{sat}	680 W	250 W
パワーゲイン G_p	13.2 dB	10.0 dB
電力付加効率 PAE	59%	38%

用語集

※1 HEMT

High Electron Mobility Transistor：半導体接合界面に誘起される2次元電子を利用したトランジスタ。不純物散乱の影響の少ない高電子濃度のチャンネルが形成できる。

※2 S帯

マイクロ波の周波数による分類において、2-4 GHzの帯域を指す。移動体通信、無線LAN等多様な用途に用いられ

ているが、2.7-3.5 GHzが各種レーダーに割り当てられている。X帯に比べ、航空監視等、長距離の観測に用いられている。航空監視レーダーでは主に2.7-2.9GHzが世界で広く用いられている。

※3 X帯

マイクロ波の周波数による分類において、8-12 GHzの帯域を指す。波長が短くアンテナの小型化が可能であることから各種レーダーに割り当てられており、他にも衛星や各種無線通信に用いられている。このうち、船舶監視あるいは気象観測用レーダーは、8.5-9.8 GHzの帯域が世界で広く用いられている。

※4 内部整合型増幅器

トランジスタとともに整合回路用の基板をパッケージ内に実装し、互いにワイヤーで結線した高周波増幅用デバイス。基板の素材や形状およびワイヤーの長さは、トランジスタや周波数に合わせて適切に調整される。

※5 GaAs FET

Gallium Arsenide Field Effect Transistor: 素材にガリウム砒素を用いた電界効果型トランジスタ。シリコンに比べ、電子が5倍近いスピードで移動できることから、マイクロ波など高周波増幅用途に適している。

※6 ロードプル

大信号特性の評価方法の1つ。チューナーと呼ばれるインピーダンス可変装置を用いて、インピーダンス整合条件を変えながら特性を評価するもの。

参考文献

- (1) URL http://www.sei.co.jp/news/press/14/prs010_s.html
- (2) 井上和孝、佐野征吾、舘野泰範、八巻史一、蛭原要、宇井範彦、川野明弘、出口博昭、「携帯電話基地局用窒化ガリウム電力増幅器 (GaN HEMT) の開発」、SEIテクニカルレビュー第177号、pp.97-102 (July 2010)
- (3) T. Yamamoto, E. Mitani, K. Inoue, M. Nishi, and S. Sano, "A 9.5-10.5GHz 60W AlGaIn/GaN HEMT for X-band High Power Application," Proc. Eur. Microw. Integr. Circuits Conf., pp. 173-175, Munich, Germany (October 2007)
- (4) M. Nishihara, T. Yamamoto, S. Mizuno, S. Sano, and Y. Hasegawa, "X-band 200W AlGaIn/GaN HEMT for high power application," Proc. Eur. Microw. Integr. Circuits Conf., pp. 65-68, Manchester, UK (October 2011)
- (5) S. Mizuno, F. Yamada, H. Yamamoto, M. Nishihara, T. Yamamoto, and S. Sano, "A 5.9-8.5GHz 20 Watts GaN HEMT," Proc. Asia-Pacific Microwave Conf., pp. 123-126, Yokohama, Japan (December 2010)
- (6) K. Kikuchi, M. Nishihara, H. Yamamoto, S. Mizuno, F. Yamaki and T. Yamamoto, "A 65 V operation high power X-band GaN HEMT amplifier," Proc. Asia-Pacific Microwave Conf., pp. 585-587, Sendai, Japan (November 2014)

- (7) K. Kikuchi, M. Nishihara, H. Yamamoto, S. Mizuno, F. Yamaki, T. Yamamoto and S. Sano, "An 8.5-10.0 GHz 310 W GaN HEMT for Radar Applications," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 1-4, Tampa, USA (June 2014)
- (8) 菊池憲、西原真、山本洋、水野慎也、八巻史一、山本高史、「X帯レーダー用300W級高出力GaIn HEMT」、SEIテクニカルレビュー第187号、pp.37-42 (July 2015)
- (9) F. Yamaki, K. Inoue, M. Nishi, H. Haematsu, N. Ui, K. Ebihara, A. Nitta, and S. Sano, "Ruggedness and Reliability of GaN HEMT," Proc. Eur. Microw. Integr. Circuits Conf., pp. 328-331, Manchester, UK (October 2011)

執筆者

宮澤 直行* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部 担当部長



西原 信 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部



宇佐美邦博 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部



青嶋 真 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部 マネージャー



山本 高史 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部 担当部長



*主執筆者