

船舶用レーダー向けX帯300W GaN HEMT

X-Band 300W High-Power GaN HEMT for Marine Radar Systems

西原 信*
Makoto Nishihara

青嶋 真
Makoto Aojima

宮澤 直行
Naoyuki Miyazawa

従来船舶レーダーの送信デバイスとしてマグネトロンが使われてきたが、長寿命化、高性能化および電波法令への対応等のため、GaN HEMT*¹を用いた固体素子の使用が本格的に始まろうとしている。プレジャーボート向け小出力レーダーから大型商船向け高出力レーダーまでの各種船舶レーダーをターゲットに開発した、業界最高出力の300Wを筆頭とする、内部整合型*²X帯*³ GaN HEMT製品群について報告する。また、これらの製品ラインナップのデモンストレーションを目的とした小型固体化増幅器も試作したので、併せて報告する。

Magnetrons have long been used as transmitting devices for marine radar, however, gallium nitride high-electron-mobility transistors (GaN HEMT) are increasingly adopted due to their long life, high performance, and compliance with radio laws and regulations. This paper presents our internally-matched X-band GaN HEMT that feature the industry's highest output power of 300 W, targeting a variety of marine radar ranging from small-power radar for pleasure boats to high-power radar for large-commercial vessels. We also report on a prototype compact solid-state amplifier that has been made to demonstrate these transistors.

キーワード：GaN HEMT、X帯、船舶レーダー用、高出力、マイクロ波集積回路 (MIC)

1. 緒言

近年、海上輸送の効率化に伴い船舶の大型化や高速化が進む一方、高齢化による船員需要の逼迫から船舶航行の安全を確保する航法支援の需要は年々増えている。航法支援の一つである船舶搭載用レーダーは自船位置や他船の動向・周囲の状況をリアルタイムで把握でき衝突防止等を支援する有用な装置である。

従来このレーダー装置の増幅器には、優れた尖頭電力からマグネトロンが用いられてきたが、1~2年程度で定期交換が必要であり維持費低減の要求から10年以上の長期信頼性を持つ固体素子化への移行が進んでいる。固体素子としての素子としては従来のマグネトロンに比べ尖頭電力が約1/100程度と小さいが電力合成やパルス圧縮技術を用いることで従来のマグネトロンと同等以上のレーダー性能指標が実現可能となる。

本報告では船舶用レーダーの固体素子として採用が広がっている窒化ガリウム (GaN) 高電子移動度トランジスタ (HEMT) (以下、GaN HEMT) を用いた高出力製品であるX帯300W GaN HEMTと小型レーダー用に開発したマイクロ波集積回路 (MIC)*⁴であるX帯25W GaN HEMT MICについて紹介する。またこれらの製品を用いて固体化増幅器も試作したので併せて報告する。

2. X帯300W GaN HEMTの開発

我々はこれまでに船舶用レーダー向けにGaN HEMT製品であるX帯200W GaN HEMTの製品化を行った^{(1),(2)}。この製品は既に船舶レーダー用増幅器の最終段として採用されているが、さらなるレーダー出力を向上すべく市場からはより高出力なGaN HEMT製品が求められている。そこで今回我々は既存製品から出力電力を大きく向上させたX帯300W GaN HEMTの開発を行った。

まずX帯300W GaN HEMTに使うパッケージについてだがX帯200W GaN HEMTと同じサイズである24.0×17.4mmの従来パッケージを使うこととした。従来パッケージを使うことで、これまでに設計した固体化増幅器に載せ替えが可能となり、開発期間が短くなるメリットがある。次にパッケージ内部に実装するGaN HEMTチップについては、長期信頼性や組立性、また所望のRF特性を満足するためチップサイズを5.68×0.76mmとし、2個並列にする構成とした。チップサイズをX帯200W GaN HEMTより大きくすることによりトータルゲート幅が44.8mmだったのに対し64mmと大きくすることができた。写真1は、X帯300W GaN HEMTの内部写真である。パッケージ内部に実装する整合回路は、ユニットチップのロードプル*⁵測定から得られた最適インピーダンスとなるよう設計した。入力側整合回路はチップの利得最適インピーダンスからパッケージ端で50Ωに変換する2段変換回路とし、また出力側整合回路は出力電力最適インピーダンスから50Ωに変換する2段変換回路とした。

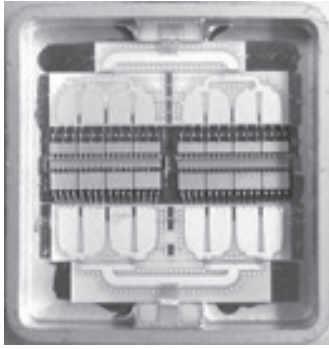


写真1 X帯300W GaN HEMTの内部写真

写真2は、X帯300W GaN HEMTのRF評価治具である。パッケージ端で50Ω整合されているため、治具には50Ω線路とλ/4のオープンスタブを接続したバイアス回路のみが設計されている。

図1は、入力電力46dBm (40W) におけるX帯300W GaN HEMTの周波数特性である。帯域9.3-9.5GHzにおい

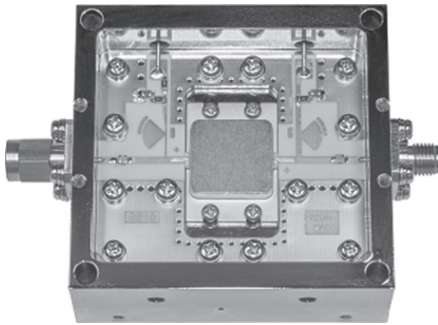
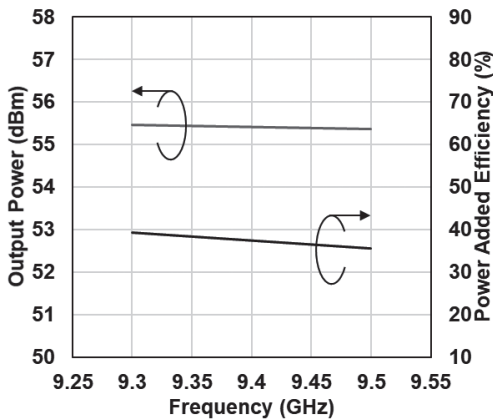


写真2 X帯300W GaN HEMT用評価治具



Vds=50V, Pin=46dBm, Pulse Width=100μs, Duty=10%

図1 X帯300W GaN HEMT のRF特性

て出力電力55.3dBm (340W)、電力付加効率38%を達成しており、この出力電力は業界最高である。

3. X帯25W GaN HEMT MICの開発

船舶レーダー用の固体素子として数百W級の高出力製品以外にプレジャーボート等に載せる小型レーダー用に数十W級の低出力製品の需要がある。今回我々はその小出力製品の需要に応えるべくX帯25W GaN HEMT MICの開発を行った。

一般的に低出力製品は動作周波数の汎用性を持たせるためにパッケージ内にチップのみを実装したディスクリット品にすることが多い。しかしながらディスクリット品は外部のプリント基板上で整合回路を形成する必要があることから固体化増幅器自体のサイズが大きくなってしまいうデメリットがある。このデメリットを解消し省スペース化を実現すべく6.7×8.3mmの小型パッケージを採用した内部整合型MICを開発にすることとした。これによりディスクリット品で構成される固体化増幅器より大幅にサイズを小さくすることが可能となる。

図2は、X帯25W GaN HEMT MICの回路図である。パッケージ内部には6Wと25WのGaN HEMTチップが実装されている。またチップ以外にパッケージ端子で50ohmにする整合回路と通常パッケージの外部のプリント基板上に形成するバイアス回路が設計されている。さらに主帯域よりも低い周波数の不要利得を減衰させるためにインダクタンスと抵抗、キャパシタを組み合わせたフィルタ回路も内蔵した。

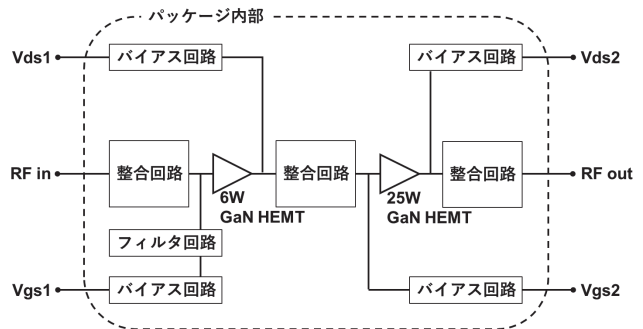


図2 X帯25W GaN HEMT MIC回路図

写真3は、X帯25W GaN HEMT MICのRF評価治具である。パッケージ端で50Ω整合されてパッケージ内にバイアス回路が内蔵されているため、治具上には50Ω線路とDCバイアスラインのみが設計された評価治具となっている。

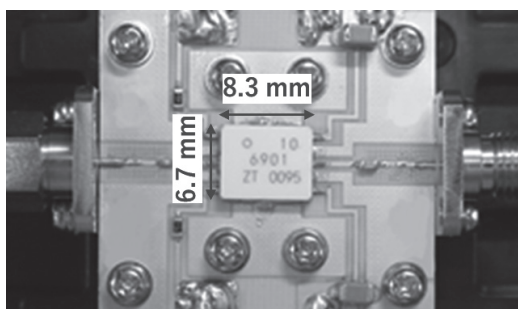


写真3 X帯25W GaN HEMT MIC用評価治具

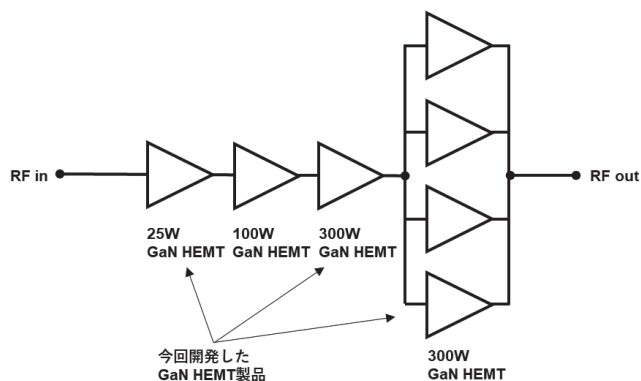
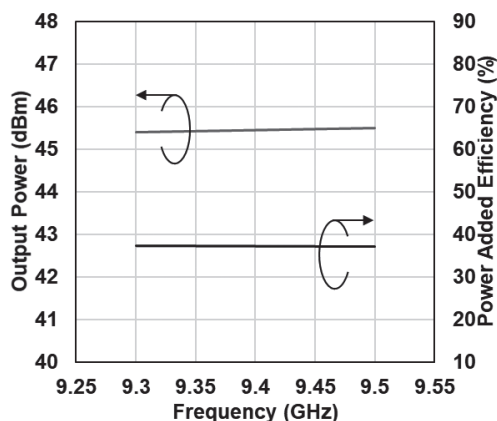


図4 固体化増幅器の構成図

図3は、入力電力22dBm (0.16W) におけるX帯25W GaN HEMT MICの周波数特性である。帯域9.3-9.5GHzにおいて出力電力45.4dBm (35W)、電力付加効率38%、その時の利得は23.4dBを達成した。GaN HEMTチップを2段にしたハイブリッド構成にしているため、非常に高い利得を得ることができた。



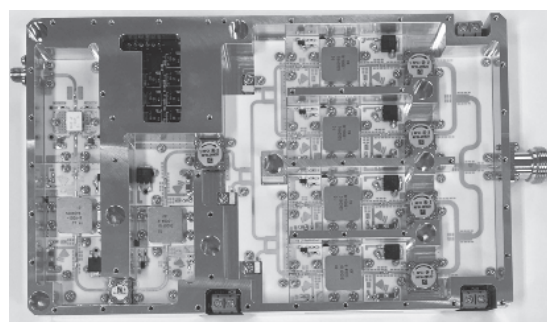
Vds=50V, Pin=22dBm, Pulse Width=100μs, Duty=10%

図3 X帯25W GaN HEMT MICのRF特性

4. 固体化増幅器の試作

今回我々が製品化したX帯300W GaN HEMTとX帯25W GaN HEMT MICを用い、デモンストレーション用に固体化増幅器を試作したので結果を報告する。図4は、試作した固体化増幅器の構成図である。最終段は300W製品を4合成し、ドライバー段には25W MIC製品の他に100W製品と300W製品単体を用いた。

写真4は、試作した固体化増幅器の写真である。サイズは200 (W) × 124 (H) × 20 (D) mmとなっており、非常に小型である。最終段の合成回路は入力側を90°ハイブリッド回路、出力側をトーナメント型回路で分配・結合した。

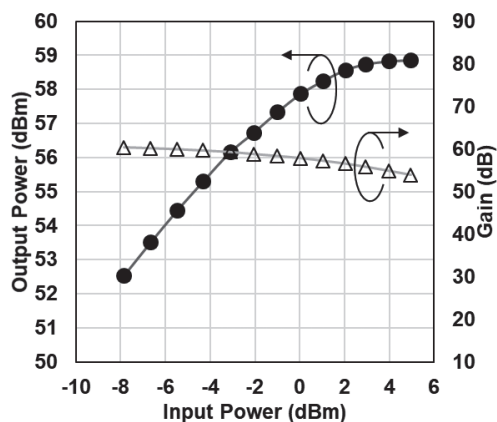


サイズ：200(W)×124(H)×20(D)mm

写真4 固体化増幅器の内部写真

また固体化増幅器にはスイッチング回路が内蔵されており印可電圧は-5V/+5V/50Vを直接入力し、パルス信号対応としてTTL信号に同期してGaN HEMT製品を高速にON/OFFできる仕様となっている。

図5は、9.4GHzにおける試作した固体化増幅器の入出力特性である。入力レベル5dBm (3mW) では出力電力は



f=9.4GHz, Vds=50V, Pulse Width=100μs, Duty=10%

図5 固体化増幅器の入出力特性

58.5dBm (700W) で利得53.5dBを達成した。今回簡素な平面型合成器を用いているため挿入損失が大きいが、導波管などの低損失な合成器を用いることでさらに高出力化が可能となる。

5. 結 言

表1に今回船舶レーダー向けに開発したX帯300W GaN HEMTとX帯25W GaN HEMT MICの評価結果をまとめる。X帯300W GaN HEMTはGaN HEMTチップ設計と整合回路設計の最適化により300W以上の業界最大出力電力が得られた。またX帯25W GaN HEMT MICはハイブリッド構成にすることにより小型で高利得な性能を得ることができた。最後に今回開発したGaN HEMT製品を使い固体化増幅器を試作した結果、サイズ200 (W) × 124 (H) × 20 (D) mmと小型で700Wという高出力電力が得られた。

表1 X帯GaN HEMT製品の評価結果

項目	X帯 300W	X帯 25W MIC
ドレイン電圧 V_{ds}	50V	50V
パルス幅	100μsec	100μsec
デューティサイクル	10%	10%
周波数	9.3-9.5GHz	9.3-9.5GHz
飽和出力電力 P_{sat}	340W	35W
パワーゲイン G_p	9.3dB	23.4dB
電力付加効率 PAE	38%	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 内部整合型

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。

※3 X帯

マイクロ波の周波数による分類において、8-12GHz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、8.5-10.0GHzの帯域でおおよそカバーされている。

※4 マイクロ波集積回路

マイクロ波帯で動作する受動素子あるいは分布定数回路をあらかじめ形成した絶縁体基板にマイクロ波トランジスタ、ダイオード等の能動素子を組み込んだ回路、あるいは半導体基板上に全ての素子や回路を一体形成した集積回路。前者のアルミナ等の絶縁体基板上に回路素子を組み込んだ回路をマイクロ波ハイブリッド集積回路 (MIC)、後者の半導体基板上に素子を半導体製法により作り込んだ回路をモノリシックマイクロ波集積回路 (MMIC) と呼ぶ。

※5 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) 宮澤直行、西原信、宇佐美邦博、青嶋真、山本高史、「S帯600W、X帯200Wを実現したレーダー送信機用GaN HEMT」、SEIテクニカルレビュー第190号、pp.138-142 (July 2017)
- (2) 佐野征吾、蛭原要、山本高史、佐藤富雄、宮澤直行、「無線通信用GaN HEMTの開発」、SEIテクニカルレビュー第192号、pp.69-74 (July 2018)

執 筆 者

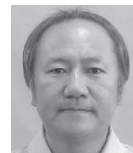
西原 信* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



青嶋 真 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) マネージャー



宮澤 直行 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 担当部長



*主執筆者