

X帯船舶レーダー用400W GaN固体化増幅器

400W GaN Solid-State Power Amplifier for X-Band Marine Radar Systems

須藤 正則 菅原 博樹 沢柳 雅哉 山縣 純次
Masanori Sudoh Hiroki Sugawara Masaya Sawayanagi Junji Yamagata

要 旨

総務省殿から電波資源拡大のための研究開発を委託され、「固体素子を用いた9GHz帯船舶用レーダーの研究開発」を行っている。この研究開発において、パルス動作の高出力固体化電力増幅器を開発した。これまで主流であったGaAs（ガリウム砒素）FETではなく、1デバイスで120W以上の電力が出力可能なGaN（窒化ガリウム）HEMTを採用し、4並列合成により9.4GHzにおいて400Wの電力を出力する固体化増幅器を実現している。サイズは187(W)×140(H)×48(D)mmと非常に小型であり、これにより船舶に積載するレーダー装置の小型化が可能となる。

Abstract

JRC has developed a solid-state power amplifier (SSPA) for X-band marine radar systems employing new gallium nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs) of over 120W. The developed SSPA achieved the peak output power exceeding 400W, in combination of four GaN HEMTs, under pulse operation at 9.4GHz. The SSPA is small with the dimensions of 187(W)×140(H)×48(D) mm, which enables reduction of the size of marine radar units. This result is part of R&D for improving the frequency utilization efficiency, which is a contract research from the Ministry of Internal Affairs and Communications.

1. まえがき

通信のブロードバンド化に伴い、電波資源有効利用の面でレーダーの狭帯域化が求められている。又、維持費削減のため、現在使用されているX帯高出力管であるマグネトロンに変わる固体素子を用いたX帯増幅器によるレーダーが望まれている。しかし数十kWのX帯マグネトロンレーダーと同程度のレーダー性能を確保するには、パルス圧縮技術^{*}のレーダー方式をたとえ使用しても、増幅器として数百W程度の出力が必要となる。今までX帯の固体素子としてGaAs（ガリウム砒素）FETが使用されてきたが、出力電力はデバイス単体で30W程度であり、固体化増幅器として4合成しても100Wの出力電力しか見込めない。それ以上の出力電力を得ようとするより更なる多重並列接続が必要となり、船舶用にはサイズ/コスト/電力効率の面で課題があった。

ところが近年通信のブロードバンド化の普及に合わせてマイクロ波デバイスの研究が進み、まだ開発途上では有るが、高出力のX帯GaN（窒化ガリウム）HEMTを利用した増幅器の開発が可能になってきた。既にL/S帯GaN HEMTでは商品化のレベルに達しており、より周波数の高いC/X/Ku帯GaN HEMTにおいても近年研究発表が盛んに行われている^{(1)~(6)}。

今回試作した固体化増幅器は、1デバイスで120W以上の電力を出力できる世界でもトップクラスのGaN HEMTを使用しており、4並列合成することにより400Wの電力を出力

できる。またサイズは187(W)×140(H)×48(D)mmと非常に小型であり、X帯アプリケーションに求められる小型化の要求にマッチする。本稿では高出力、小型化を達成したX帯船舶レーダ用固体化増幅器について紹介する。

2. X帯GaN HEMT

PA（パワーアンプ）に使用する固体素子は、1素子にて120W以上の電力を出力できるX帯GaN HEMTを採用した。図1に示すパッケージ内にGaN HEMTチップが4個並列実装され、50Ωに内部整合されている。

船舶用レーダーでは、デバイスはパルス駆動を前提としている。図2に示すようにパルス動作ではCW動作と比べて動作時のジャンクション領域の発生熱量も大幅に小さくなり、デバイスの利得/入出力インピーダンスが異なってくる。またデバイスの熱破壊条件緩和により、印加電圧を上げることができる。図3はIV特性に対する負荷線を示しているが、パルス駆動においては電流と電圧の積に比例する発生熱量が小さいため、ドレイン電圧を上げることが可能である。ただしデバイスの絶縁破壊電圧を200Vと想定し、飽和時の電圧振幅が動作電圧の最大3倍まで振れると考えてドレイン電圧を60Vとした。

図4はGaN HEMTの入出力特性、利得特性を示している。パルス駆動、周波数9.4GHz、ドレイン電圧60Vの条件で飽和出力は51.7dBm（148W）、線形利得は11.3dBである。

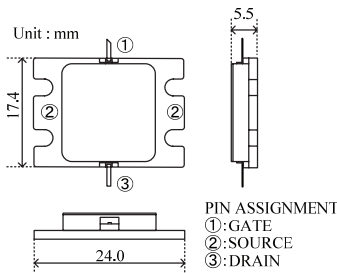


図1 GaN HEMTパッケージ
Fig.1 Package of GaN HEMT

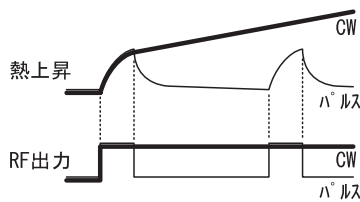


図2 ジャンクションの熱上昇
Fig.2 Transient temperature rise of junction

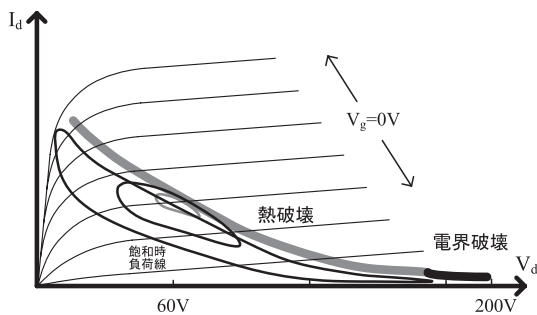


図3 ドレイン電圧による破壊条件
Fig.3 Dependency of braking down on drain voltage

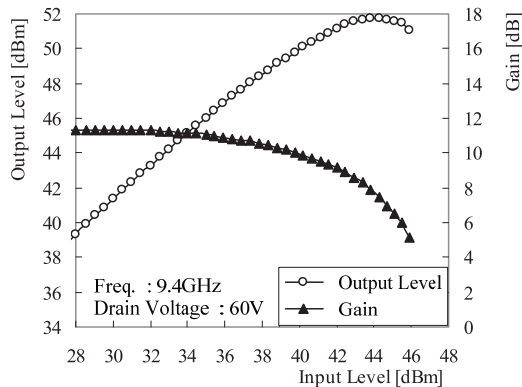


図4 GaN HEMTの入出力特性
Fig.4 IO characteristics of GaN HEMT

3. 固体化増幅器の設計

船舶レーダー用固体化増幅器はパルス駆動を行うためにスイッチング回路が必要であるが、面積的に大きなウェットを占めるのみならず、雑音特性および効率に影響する。また固体化増幅器の構成は小型化に影響し、合成器の損失低減は高出力化に寄与する。これら固体化増幅器の設計に

必要となる技術課題について次に述べる。

3.1 スwitching回路

レーダーに使用するデバイスは消費電力を抑え、熱の発生を抑圧するため、入力パルス波にタイミングを合わせてドレイン電流をスイッチングする回路が必要となる。スイッチング回路が低速である場合、スプリアス特性に影響する出力パルス波形を保证するためにスイッチング回路のタイミングを入力パルス波に対してマージンを持って長めにとる(タイミング・マージン: 図5)。しかしパルス波が出力されるタイミング以外に電流が流れるため、効率は悪化する。また立ち下りのタイミングではパルス波出力後もデバイスが動作することになるため、デバイス自体の雑音およびデバイスで増幅された入力雑音を受信系に回り込み、受信信号に重畳されて特性に影響を及ぼす可能性がある。このためスイッチング回路の高速化は重要となる。

スイッチング方式には「ドレインスイッチング方式」と「ゲートスイッチング方式」がある(図6)。「ドレインスイッチング方式」は、デバイスのドレイン端子にドレイン電流スイッチング用のロードスイッチ回路を付加する方式で、一般的に高速スイッチングが可能である。今回ドレイン電流が大きく、ロードスイッチ回路には大電流を制御するためMOSを使用する。高出力を得るためGaN HEMTのドレイン電圧を高くするが、高電圧動作に対応するためMOSの耐圧を上げると高速性が犠牲となる。加えてMOSのON抵抗により電圧降下があり、高耐圧用になるほど電圧降下量は大きくなり、回路全体としての効率は悪化する。また高耐圧用のMOSはサイズが大きく、スイッチング回路としてある程度のスペースが必要になる。

対して「ゲートスイッチング方式」は、デバイス自体をスイッチング素子として使用する方式である。デバイスのゲート端子に駆動用の電圧パルスを印加してデバイスのドレイン電流のスイッチングを行う。一般的にゲート・ソース/ドレイン間の容量(C_{GS}/C_{GD})により高速スイッチングに

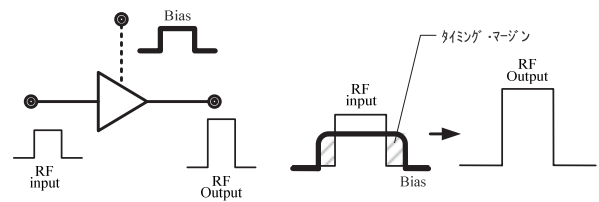
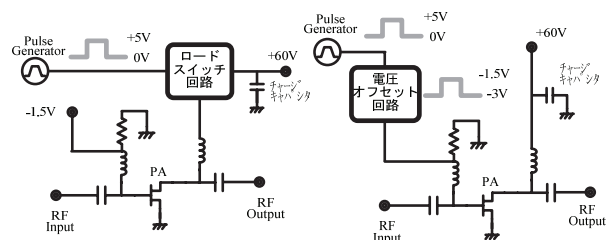


図5 パルスタイミング
Fig.5 Pulse timing



(a) ドレインスイッチング方式 (b) ゲートスイッチング方式
図6 Switching方式
Fig.6 Techniques for switching

限界が生じるが、ゲートをON/OFFするだけのスイッチング回路であるので小型化できる。今回数百nsecのタイミングマージンを設計値として考えているので、スイッチング回路の小型化を重視して、「ゲートスイッチング方式」を採用した。

3.2 固体化増幅器の構成

固体化増幅器の構成を図7に示す。120W以上の電力を出力できるPA用GaN HEMTを4並列合成するが、ドライバアンプは固体化増幅器の効率を上げるため、より低消費電力である60W以上の電力を出力できるGaN HEMTを使用している。ドライバ用GaN HEMTはPA用のものより小型のパッケージを使用し、内部に同様のGaN HEMTチップを2個並列実装している。また固体化増幅器の分配/合成器は基板上にマイクロストリップ線路で形成し、コスト/サイズ/損失の増大につながる各段間のアイソレータは省略した。これにより固体化増幅器の小型化および低コスト化を図っている。

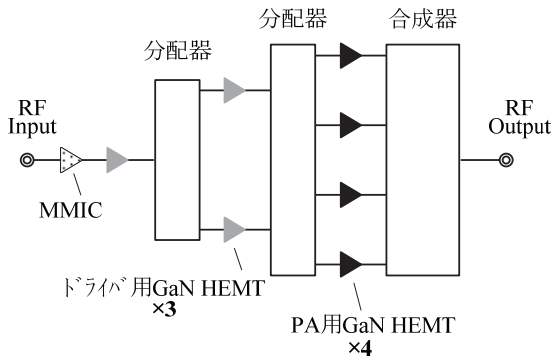


図7 固体化増幅器の構成
Fig.7 Block diagram of SSPA

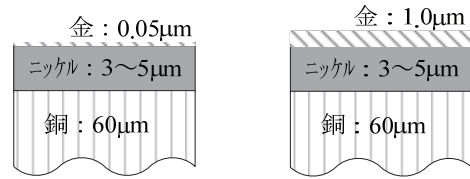
3.3 合成器の損失

PA以降の合成器の損失は固体化増幅器の出力に直結するため、低損失であることが望まれる。合成器は4入力を合成して400W以上を出力できるマイクロストリップ回路を基板上に形成している。基板材はコスト削減のため高周波用の銅張積層板を使用するが、酸化防止のため表面に金フラッシュメッキを施す(図8(a))。

しかし下地として数 μm 程度のニッケル層が必要となる。マイクロ波は表皮効果により表1に示す表皮厚を伝播するが、金フラッシュメッキは0.05 μm の厚さしかないためほとんどニッケル層を伝播することになる。ニッケルは金、銅と比べて損失の大きい素材であるのでマイクロストリップライン損失の増大につながる。低い周波数では極力ニッケル層を薄くすることにより損失の低減も可能であるが、X帯においては表皮厚が薄いため損失低減の効果が少ない。

そこで無電解ボンディング金メッキ(図8(b))により金厚を1 μm とした。表1よりX帯での金の表皮厚は0.8 μm であり、マイクロ波は金層のみを伝播することになり、ライン損失は低減する。図9は金メッキによるマイクロストリップラインの損失を示したものである。無電界ボンディング金メッキの損失は、低い周波数ではマイクロ波がニッケル層を伝播する金フラッシュメッキの損失に近いが、周波数

が上がる毎に表皮厚が薄くなるので金メッキおよびニッケル層なしの損失に近づく。この方法によりX帯では約20%の損失低減効果が期待できるが、低コスト化には相反するため、金厚と出力電力のトレードオフが必要となる。



(a) 金フラッシュメッキ (b) ボンディング金メッキ
図8 金メッキの断面構造

Fig.8 Cross section structure of gold coatings

表1 各素材の表皮厚さ

Table 1 Skin depths for some metals

周波数[GHz]	0.1	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0	10	30
銅[μm]	6.6	3.8	3.0	2.1	1.2	0.9	0.7	0.4
金[μm]	7.9	4.5	3.5	2.5	1.4	1.1	0.8	0.5
ニッケル[μm]	13	7.5	5.8	4.1	2.4	1.8	1.3	0.8

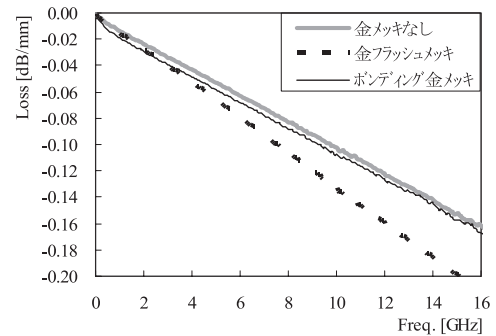


図9 金メッキによるライン損失
Fig.9 Insertion loss of microstrip line with gold coatings

4. 固体化増幅器の特性

試作したパルス駆動X帯400W固体化増幅器の写真を図10に示す。サイズは187(W)×140(H)mmとコンパクトにB5サイズに収まっている。放熱器は固体化増幅器単体評価のため使用したが、実使用では空中線に内蔵し、ケース面に直付けしたトータルでの放熱を想定している。駆動用パルスは0/5VのCMOS入力、印加電圧は-5V/+6V/+60Vを使用する。

図11は9.4GHzにおけるパルス駆動固体化増幅器の出力電力特性を示している。想定している入力レベル+4dBmでは、出力電力は+56.7dBm (470W)、利得52.7dBとなる。印加電圧を上げれば出力は増大し、65Vの印加電圧では500Wの出力電力を確認している。これら固体化増幅器の特性を表2にまとめる。

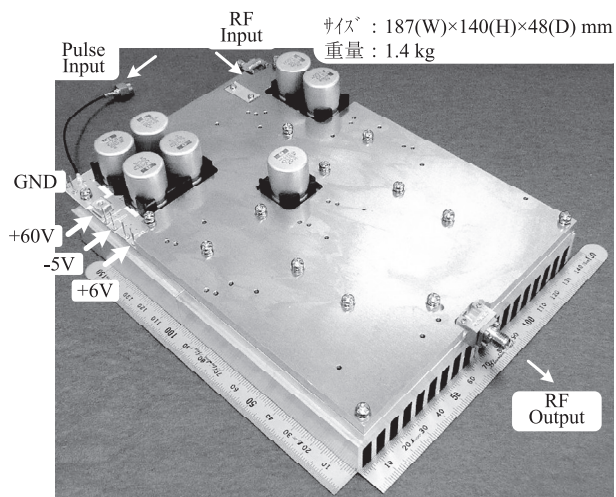


図10 パルス駆動X帯400W固体化増幅器

Fig.10 X-band 400W SSPA under pulse operation

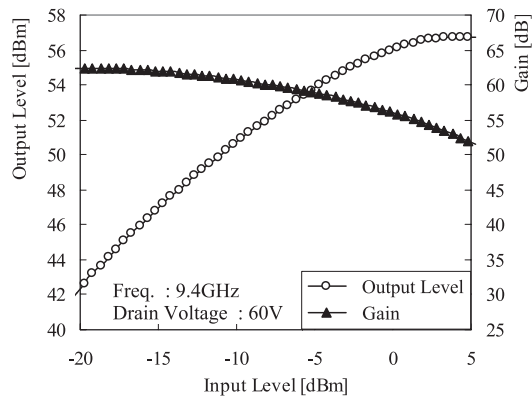


図11 パルス駆動固体化増幅器の入出力特性

Fig.11 IO characteristics of SSPA under pulse operation

表2 パルス駆動固体化増幅器特性

Table 2 Performance of SSPA under pulse operation

項目	特性
周波数	9.4GHz
帯域	200MHz
入力レベル	+4dBm
出力レベル	+56dBm (400W)
印加電圧	-5V, +6V, +60V

5. あとがき

9.4GHzにおいて400Wの電力を出力できるパルス駆動船舶レーダー用小型固体化増幅器を開発した。

この固体化増幅器には従来のGaAs FETを越える高周波/高出力特性をもつGaN HEMTを使用した。熱条件がパルス動作では緩和されるため、高耐圧のメリットを生かすことができ、絶縁破壊電圧レベルを考慮して印加電圧を60Vとした。デバイス単体において148Wの出力電力を確認し、4並列合成することにより400Wの合成出力電力を得た。また試作した固体化増幅器は187(W)×140(H)×48(D)mmと非常

に小型であり、これにより船舶に積載するX帯レーダー装置の小型化が可能となった。

6. 謝辞

本研究は、総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」の一環として実施された。研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた首都大学東京 福地一教授をはじめ、運営委員会の委員の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) Y. Okamoto, *et al.*, "C-band Single-Chip GaN-FET Power Amplifiers with 60-W Output Power", IEEE MTT-S Digest, pp.491-494, June 2005.
- (2) 高田賢治, ほか: "C帯170W出力GaN-HEMTの開発", 信学技報, Vol.105, No.329, pp.39-42, 2005.
- (3) 高木一孝, ほか: "X帯50W級GaN電力HEMT", 東芝レビュー. Vol.62, No.4, pp.42-45, 2007.
- (4) K.Takagi, *et al.*, "X-band AlGaIn/GaN HEMT with over 80W Output Power", IEEE CSIC Symposium, pp.265-268, Nov. 2006.
- (5) T.Yamamoto, *et al.*, "A 9.5-10.5GHz 60W AlGaIn/GaN HEMT for X-band High Power Application", EuMIC Conference, pp.173-175, Oct. 2007.
- (6) K.Takagi, *et al.*, "Ku-band AlGaIn/GaN HEMT with over 30W", EuMIC Conference, pp.169-172, Oct. 2007.

* 1 広いパルス幅にて低出力電力をカバーする技術。距離分解能を向上する場合はパルス幅を短くすればよいが、平均の電力は低下するため探知距離が減少してしまう。このため変調を施した長いパルスを送信に使用して平均電力を確保し、受信時にこのパルスを圧縮して距離分解能を改善することで、この問題を解決している。

用語一覧

GaAs FET: Gallium Arsenide Field-Effect Transistor (ガリウム砒素 電界効果トランジスタ)

GaN HEMT: Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor (窒化ガリウム 高電子移動度トランジスタ)