

衛星搭載用GaN HEMT高出力増幅器の製品化

山崎貴嗣*
南出啓信*
蓮池 篤*

GaN HEMT Amplifier for C-band Space Applications

Takashi Yamasaki, Hiroaki Minamide, Atsushi Hasuike

要 旨

近年、衛星通信機能の多様化、通信情報量の増加に伴い、衛星に搭載する増幅器の高出力・高効率化の必要性が高まっている。一般的に、衛星搭載用の増幅器ではTWTA (Traveling Wave Tube Amplifier)やGaAs(砒化(ひか)ガリウム)系FET(Field Effect Transistor)を使用したSSPA(Solid-State Power Amplifier)が広く用いられているが、C帯(4GHz帯)以上の周波数では、出力・効率の観点からTWTAがシステムに使用される場合が多い。しかし、SSPAの高出力・高効率化が実現できれば、小型・軽量・高信頼性を持つといった点から、TWTAからSSPAへの置き換えが期待される。

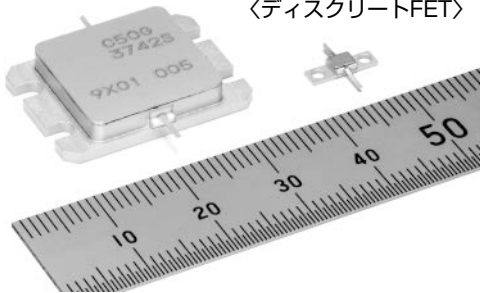
三菱電機では、これらのニーズに対応するため、通信衛星に搭載するC帯の送信機に使用される窒化ガリウム(GaN)を用いた出力100Wの高出力HEMT(High Electron

Mobility Transistor)増幅器“MGFC50G3742S”を開発した。

これまでは、GaAs系FETを用いた増幅器が使用されていたが、今回、飽和電子速度や絶縁破壊耐圧が高く、電力付加効率も良いGaN HEMTを採用したことに加え、トランジスタ構造の最適化や整合回路の回路構成及び基板レイアウトパターンの最適化を実施することで、外形寸法が当社製25W出力GaAs増幅器“MGFC44C3742S”と同じままで、出力100W、電力付加効率60%という業界トップレベルの高周波性能を持ち、衛星搭載用としての高信頼度を確保した増幅器を実現した。さらに、製品ラインアップ拡充のため、100W増幅器技術を生かして出力電力が20W、40Wの増幅器を開発した。これによって、通信衛星搭載用送信機の小型・軽量化と省電力化に貢献する。

〈内部整合FET外形〉

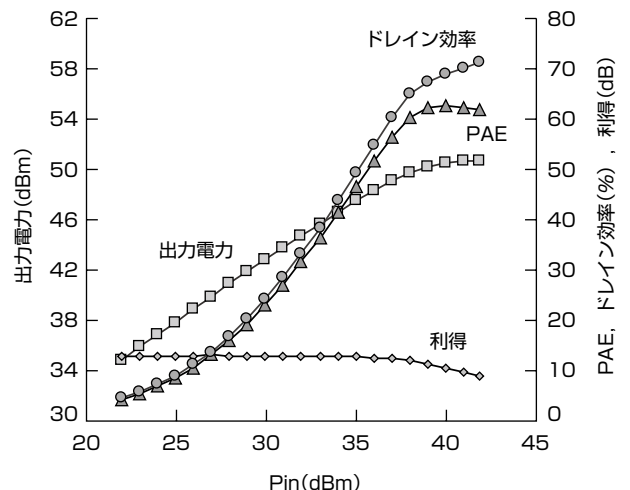
〈ディスクリートFET〉



製品型名	MGFC-	50G3742S	46G3742S	43G3742S
推奨条件	Vds	40V	40V	40V
	Ids(RFOff)	2.0A	1.0A	0.5A
	Rg	10Ω	25Ω	50Ω
周波数	Freq.	3.7~4.2GHz ^(注1)	3.7~4.2GHz ^(注1)	3.7~4.2GHz
2dB利得	P2dB	100W	40W	20W
圧縮点電力	(typ.)			
線形電力利得	Glp	13dB	14dB	14dB
(typ.)				
電力付加効率	PAE	60%	60%	60%
(typ.)				
外形寸法(mm)		17.4×24.0×4.3		

(注1) 周波数帯域としては、2バンドに分割

〈100W出力品 入出力特性@4GHz〉



PAE : Power Added Efficiency

衛星搭載用GaN HEMT増幅器の製品外形と製品ラインアップ

当社で開発した衛星搭載用C帯GaN HEMT増幅器MGFC50G3742Sの製品外形と製品ラインアップ、及び出力100W品の周波数4GHzでの入出力特性を示す。外形寸法17.4×24.0×4.3 (mm)というサイズで、出力100W、電力付加効率 (PAE) 60%という特性を実現した。さらに衛星搭載用として、チップ温度175℃、動作電圧45Vで、寿命100万時間の高信頼性を持つ。

1. ま え が き

近年、衛星通信機能の多様化、通信情報量の増加に伴い衛星に搭載する増幅器の高出力・高効率化の必要性が高まっている。一般的に、衛星に搭載される増幅器では、TWTAやGaAs系FETを使用したSSPAが広く用いられているが、高出力・高効率という点でTWTAがシステムに使用される場合が多い。一方、SSPAの高出力・高効率化が期待される高周波デバイスとして、GaN HEMTが挙げられる。GaN HEMTは、その材料物性から、高電圧動作が可能で、高い電力密度が得られることから、SSPAの高出力・高効率化が期待される高周波デバイスである。近年では、各研究機関にて、GaN HEMTを使用した高出力増幅器の開発が進められている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

今回、当社製GaN HEMTを用いて、高出力・高効率な性能を持つ増幅器トランジスタを開発し、衛星搭載用として十分な信頼性を持つことを確認した。

2. GaN HEMT高出力増幅器

2.1 トランジスタ特性

今回開発した高出力増幅器で使用している当社製GaN HEMTは、次に挙げる構造上の特長を持つ。①Cat-CVD (Catalytic Chemical Vapor Deposition)法による表面保護膜形成技術を適用することで電流コラプス現象の抑制と良好なパルスIV特性を実現した⁽⁵⁾。②Si(シリコン)イオン注入によってオーミックコンタクト抵抗を低減させ、低オン抵抗を実現した。

次に、図1に単体セルトランジスタの入出力特性を示す。評価素子はゲート長0.6 μ m、ゲート幅1.2mmのサイズで、評価条件はC帯周波数(4GHz)、ドレイン電圧V_d=40V、ドレイン電流I_d(RFOff)=50mA/mm、CW(Continuous Wave)動作とした。また、入出力負荷インピーダンスは基本波及び2倍波周波数で電力付加効率(PAE)が最大となるインピーダンスに設定した。以上の条件で、当社製GaN HEMT素子は、素子単体でPAEが80%、出力電力密度が3.3W/mmと優れた性能を持っていることを確認した。

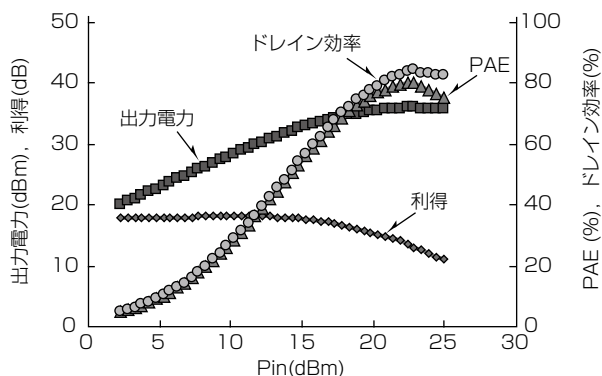


図1. 単体セルトランジスタの入出力特性

2.2 内部整合回路設計

高性能なトランジスタを用いて高出力・高効率増幅器を開発するには、整合回路の最適化が重要となる。製品では、整合回路自体の損失を最小限に抑え、基本波及び高調波(特に2倍波)を最適に処理するように回路設計を実施した。図2に、C帯100W出力内部整合FETの回路構成を示す。高利得化のために、短ゲート幅のGaN HEMTを4チップ並列合成し、広帯域化のために、入出力ともに2段の1/4波長インピーダンス変成器によって整合回路を構成した。効率への影響が大きい入力側の2倍波負荷についてはチップ直近にある開放端スタブによって最適化し、出力側については、整合回路損失が低減されるようにパターンを最適化した。

同様な手法で1チップ20W出力品、1チップ40W出力品の内部整合回路設計を行った。

2.3 電気特性の評価結果

図3に試作した出力100W内部整合FET“MGFC50G3742S”の内部写真を示す。

パッケージ内実装寸法は14.3×15.2(mm)であり、当社製GaAs 25W増幅器と同様のパッケージ寸法を適用した。気密封止パッケージ内には、GaN HEMTと整合基板が実装されており、GaN HEMTは、トータルゲート幅9.6mm

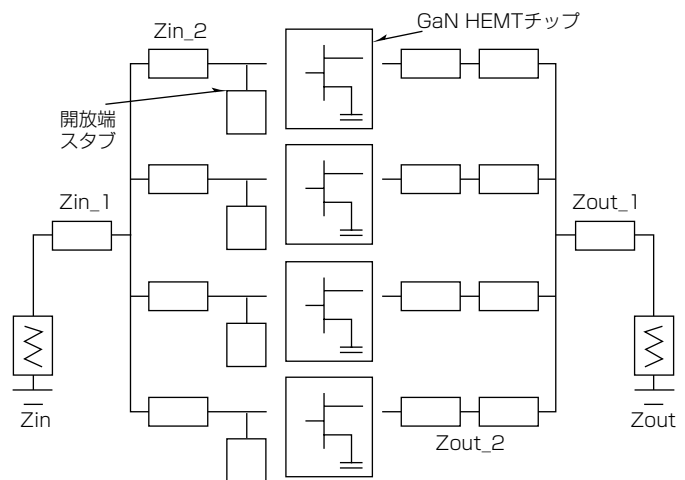


図2. C帯100W出力内部整合FETの回路構成

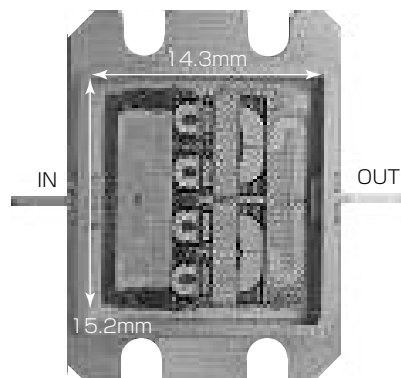


図3. MGFC50G3742S(100W品)の内部

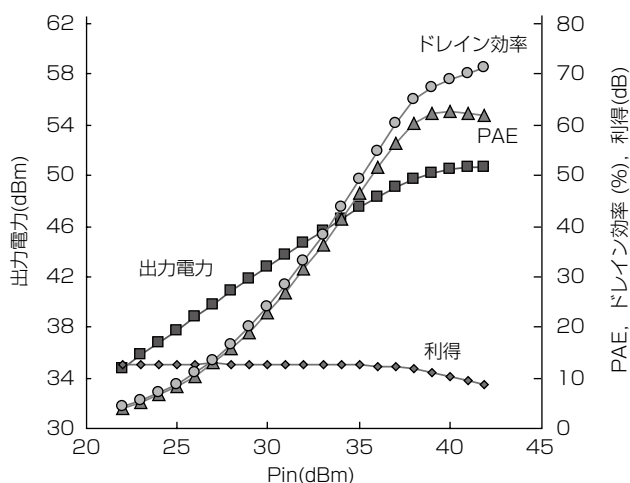


図 4. MGFC50G3742S(100W品)の入出力特性

表 1. C帯GaN内部整合FET製品のラインアップ

製品型名：MGFC-		50G3742S	46G3742S	43G3742S
推奨条件	Vds	40V	40V	40V
	Ids (RFoff)	2.0A	1.0A	0.5A
	Rg	10Ω	25Ω	50Ω
周波数	Freq.	3.7~4.2GHz (注2)	3.7~4.2GHz (注2)	3.7~4.2GHz
2dB利得圧縮点電力	P2dB (typ.)	100W	40W	20W
線形電力利得	Gp (typ.)	13dB	14dB	14dB
電力付加効率	PAE (typ.)	60%	60%	60%
外形寸法 (mm)		17.4×24.0×4.3		

(注 2) 周波数帯域としては、2 バンドに分割

の4チップ並列合成，入力側整合基板は，アルミナ基板と高誘電率基板の2段構成，出力側整合基板は，アルミナ基板と高誘電率基板の3段構成とした。

図 4 に周波数 4 GHz での入出力特性を示す。評価条件は， $V_{ds}=40V$ ， $I_d(RFoff)=2A$ ，CW 条件とした。常温で 2 dB 利得圧縮点での出力電力 $P_{2dB}=50dBm$ ，動作利得 $G_p=11.4dB$ ，電力付加効率 $PAE=62\%$ と業界トップレベルの性能を実現した。表 1 に製品化した C 帯 GaN 内部整合 FET の製品仕様をまとめて示す。

3. 衛星搭載用信頼性試験

衛星搭載用として使用する場合，宇宙空間での使用を想定した信頼性の確認が最も重要となる。一般的に，信頼性試験では，長期寿命確認試験や機械試験などを実施する。当社では表 2 に示す条件で信頼性試験を実施した。

宇宙空間での物理負荷を想定した機械試験では， $-65^{\circ}C/175^{\circ}C$ の温度サイクル試験や 1,500G の振動試験といった項目を実施し，故障がないことを確認した。

製品の寿命を数値で表す MTTF (保全を伴わない部品の故障までの平均時間) 算出では，20W 出力品を使用し， $V_{ds}=47V$ の条件でチャネル温度 (T_{ch}) $250/260^{\circ}C$ の温度加速試験を実施した。算出した結果，活性化エネルギー (E_a) は $1.62eV$ となり， $T_{ch}=175^{\circ}C$ ， $V_{ds}=45V$ の使用条件でも，寿命 100 万時間という高信頼性を持つことを確認し

表 2. 信頼性試験項目一覧

分類	表記	試験条件	判定
機械試験	Mechanical	温度サイクル 振動・衝撃 定加速 など	故障なし
寿命試験	MTTF (C.L.90%)	$T_{ch}=250^{\circ}C$ $V_{ds}=47V$	2,000hrs
		$T_{ch}=260^{\circ}C$ $V_{ds}=47V$	1,000hrs
		$T_{ch}=270^{\circ}C$ $V_{ds}=45V$	832hrs
	RF Life	$T_{ch}=230^{\circ}C$ $V_{ds}=45V$ @P2dB	故障なし
		1,000hrs	
	DC Life	$T_{ch}=230^{\circ}C$ $V_{ds}=45V$	故障なし
放射線試験	シングルイベント バーンアウト	(RF) $V_{ds}=45V$ $P_{out}=P_{2dB} \rightarrow P_{13dB}$ (DC) $V_{ds}=175V$ ， $V_{gs}=-5V$ 各試験とも Br イオン LET：31.2MeV/(mg/cm ²) Fluence： 1×10^6 ions/cm ²	故障なし
	トータルドーズ 効果	Co60 γ 線，12Mrad $V_{ds}=45V$ DC 動作	故障なし

LET：Linear Energy Transfer

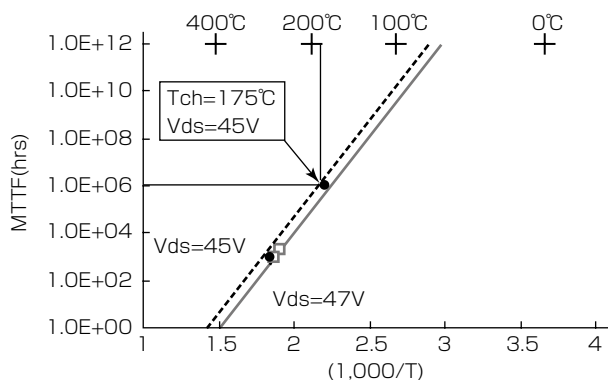


図 5. MTTF の算出結果

た。図 5 に MTTF の算出結果を示す。

長期寿命試験では，DC (直流) 通電試験と RF (高周波) 通電試験も実施した。図 6，図 7 に通電試験結果 (P_{2dB} のみ記載) を示す。図中，横軸が時間，縦軸がデバイス特性変動量を示す。試験では， P_{2dB} の劣化判定基準は ± 1 dB としている。DC 通電試験では， $T_{ch}=230^{\circ}C$ ， $V_{ds}=45V$ の条件で実施し，5,000 時間後での P_{2dB} 変動量が 0.5 dB 以下の良好な結果を得た。RF 通電試験では， $T_{ch}=230^{\circ}C$ ， $V_{ds}=45V$ ， P_{2dB} となる入力電力の条件で実施し，1,000 時間後での P_{2dB} 変動量が 0.2 dB 以下で十分小さい。

放射線試験では，高エネルギー重イオンが半導体素子に入射することで，瞬時的に電極の電位が変動して FET に過電圧，又は過電流が流れて焼損するシングルイベントバーンアウトや電離放射線の蓄積による半導体素子の劣化 (トータルドーズ効果) について調べた。前者については，出力電力を 2 dB 利得圧縮点から 13 dB 利得圧縮点まで変動させる RF 動作時と DC (ピンチオフ) 動作時の両方で Br イオンを照射したが，素子の故障はなかった。また，後者につ

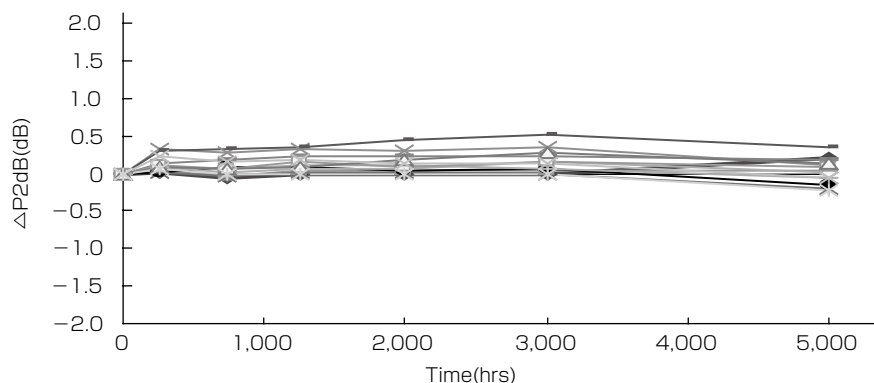


図 6. DC通電試験結果(P2dB変動量)

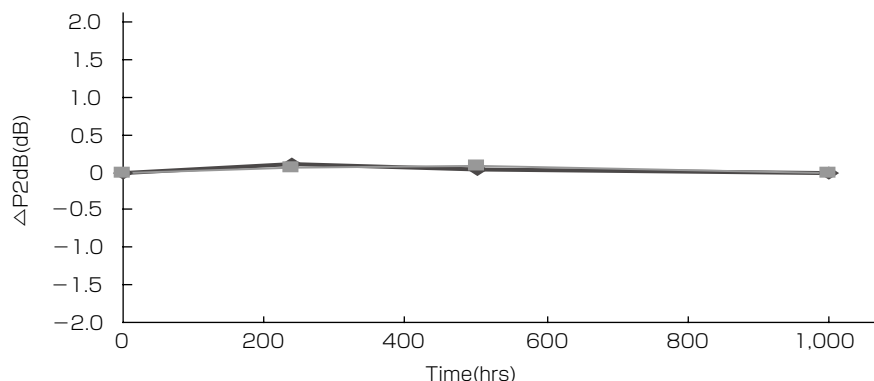


図 7. RF通電試験結果(P2dB変動量)

いても、DC動作時にコバルト60 γ 線の照射を実施したが、照射による素子の故障はなかった。

いずれの信頼性試験結果も良好で、宇宙用デバイスとして十分な信頼性を示している。

4. む す び

当社製GaN HEMTを用いた衛星搭載用C帯高出力増幅器を開発した。整合回路自体の損失を最小限に抑え、基本波及び高調波(特に2倍波)を最適に処理する回路構成を適用することによって、CW動作条件で出力100W、電力付加効率62%という業界トップレベルの性能を実現した。また、衛星搭載用信頼性試験も各種実施し、衛星搭載用として十分使用可能であることも確認した。

今回、GaN HEMTを用いた増幅器でC帯周波数帯では、出力20/40/100Wの内部整合FETと出力2WのディスクリットFETのラインアップを製品化した。これらの製品は、高出力・高効率の点で優位に立つTWTAに匹敵する性能を持ち、小型で軽量のSSPAの開発に貢献できる。

参 考 文 献

- (1) Iyomasa, K., et al.: GaN HEMT 60W Output Power Amplifier with Over 50% Efficiency at C-Band 15% Relative Bandwidth Using Combined Short and Open Circuited Stubs, 2007 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., TH1A-3 (2007)
- (2) Otsuka, H., et al.: Over 57% Efficiency C-band GaN HEMT High Power Amplifier with Internal Harmonic Manipulation Circuits, 2008 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. WE1E-03 (2008)
- (3) Shigematsu, H., et al.: C-band 340-W and X-band 100-W GaN Power Amplifiers with Over 50% PAE, 2009 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. 1265~1268 (2009)
- (4) Yamasaki, T., et al.: A 68% Efficiency, C-Band 100W GaN HEMT Amplifier for Space Applications, 2010 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. TH3D-1 (2010)
- (5) 加茂宣卓, ほか: Cat-CVD法により保護膜形成したC帯100W超級GaN HEMT, 三菱電機技報, **80**, No.5, 333~336 (2006)