

# 衛星搭載用C帯高効率100W GaN増幅器

三輪真一\*  
加茂宣卓\*  
山崎貴嗣\*

High Efficiency, 100W GaN Power Amplifier for C-band Space Applications

Shinichi Miwa, Yoshitaka Kamo, Takashi Yamasaki

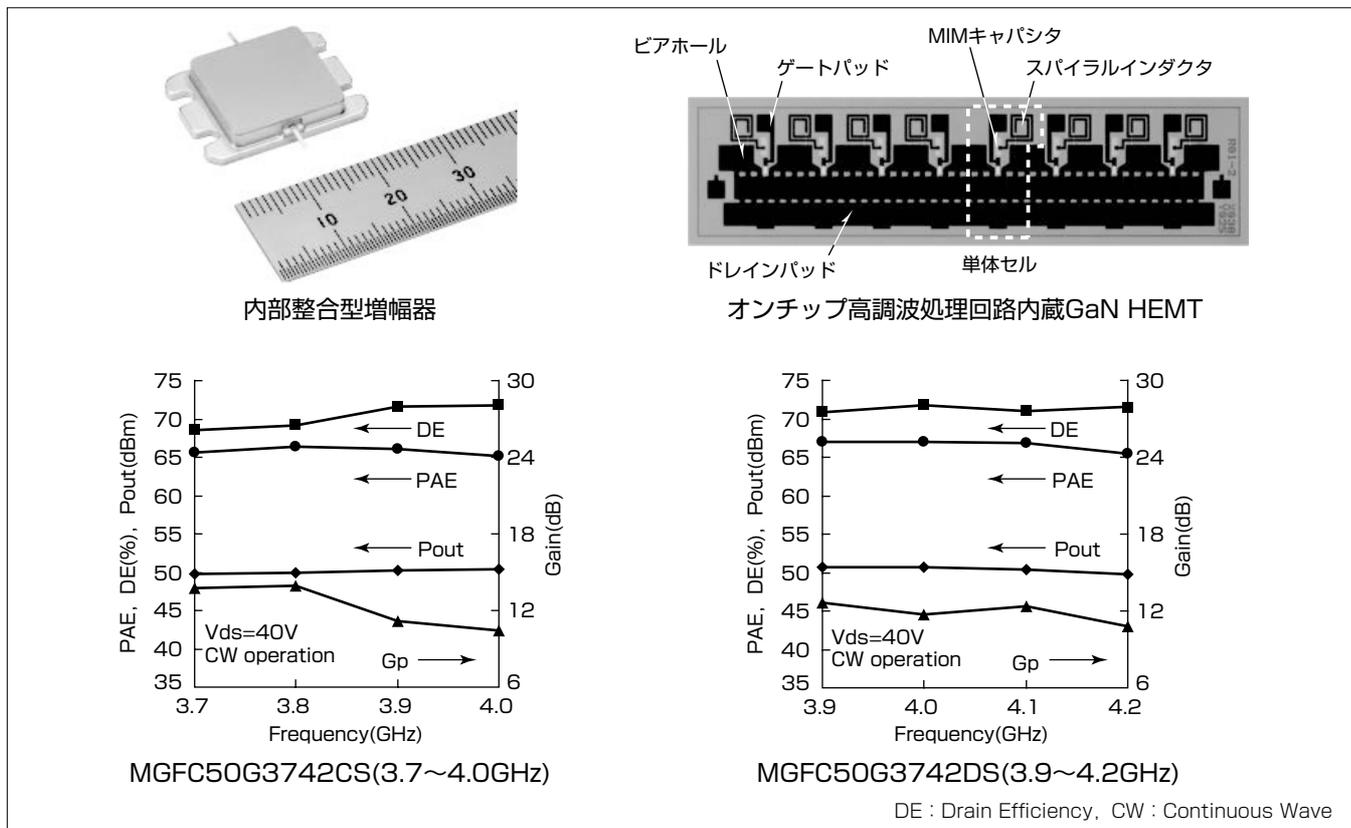
## 要旨

近年、通信衛星は寿命到来による更新需要が増加傾向にあり、新たに打ち上げられる通信衛星に搭載される送信機用増幅器の高性能化が求められている。特に衛星搭載用高出力増幅器で効率は、システム全体の小型・軽量化による衛星の打ち上げコストの低減及び省電力化による環境負荷低減という点で最も重要な特性である。現状、衛星用マイクロ波増幅器として高効率である進行波管増幅器(TWTA)が広く使われているが、近年、GaN固体素子増幅器(SSPA)の製品化に伴い、TWTAからSSPAへの置き換えが期待されている。しかし、本格的な置き換えの実現には増幅器の更なる高効率化が必須となっている。

今回、従来製品“MGFC50G3742AS/BS”の電力付加効率(Power Added Efficiency : PAE)60%から更なる高効率化を目指して、効率への影響が大きく、制御が容易では

なかったGaN HEMT (High Electron Mobility Transistor) の入力側で生じる2倍波の制御のため、当社のMMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) プロセス技術によってスパイラルインダクタとMIM (Metal Insulator Metal) キャパシタからなるLC共振回路をGaNチップ上に単位セルごとに一体化し、全てのGaN HEMTに対して入力2倍波を高精度に制御する回路構成を開発した。この回路構成によって、周波数帯域内(3.7~4.2GHz)でPAE $\geq$ 65%と、従来製品よりも5ポイント以上高効率な内部整合型増幅器“MGFC50G3742CS/DS”を実現した。

これによって、通信衛星搭載用送信機の小型・軽量化による衛星打ち上げコスト低減及び省電力化による環境負荷低減に貢献する。



## 衛星搭載用C帯高効率100W GaN増幅器の製品外形と周波数特性及びオンチップ高調波処理回路内蔵GaN HEMT

当社で開発した衛星搭載用C帯高効率100W GaN 増幅器“MGFC50G3742CS/DS”の製品外形と周波数特性及び新規に開発したオンチップ高調波処理回路内蔵GaN HEMTを示す。増幅器の外形寸法17.4×24.0×4.3 (mm)で、周波数帯域内(3.7~4.2GHz)で出力100W、電力付加効率 $\geq$ 65%という特性を実現した。

### 1. ま え が き

近年、通信衛星は寿命到来による更新需要が増加傾向にあり、新たに打ち上げられる通信衛星に搭載される送信機用増幅器の高性能化が求められている。特に衛星搭載用高出力増幅器で効率、システム全体の小型・軽量化による衛星の打ち上げコストの低減及び省電力化による環境負荷低減という点で最も重要な特性である。現状、衛星用マイクロ波増幅器として高効率である進行波管増幅器(TWTA)が広く使われているが、近年、GaN固体素子増幅器(SSPA)の製品化に伴い、TWTAからSSPAへの置き換えが期待されている。しかし、本格的な置き換えの実現には増幅器の更なる高効率化が必須となっている。

前回開発したC帯100W増幅器(PAE=60%)<sup>(1)</sup>から更なる高効率化(PAE≧65%)を目指して、今回、入力2倍波処理回路をGaNチップ上に単体セルごとに一体化した100W内部整合型増幅器を開発した。

### 2. オンチップ高調波処理回路内蔵GaN HEMT

#### 2.1 トランジスタの特性

製品に適用している当社製GaN HEMTは、2つの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<sup>(2)</sup>。②ソース電極及びドレイン電極下へのSi(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<sup>(3)</sup>。図1に単体セルトランジスタの入出力特性を示す。評価は周波数 $f_0=3.7\text{GHz}$ 、ドレイン電圧 $V_d=40\text{V}$ 、ドレイン電流 $I_d(\text{RFoff})=60\text{mA}$ 、CW(Continuous Wave)動作で実施し、外部チューナーによって、入出力負荷インピーダンスは基本波及び2倍波、3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。これらの条件で、当社製GaN HEMT素子は、素子単体でPAEが82%、出力電力密度が $3.4\text{W}/\text{mm}$ と優れた性能を持っていることを実験で確認した。

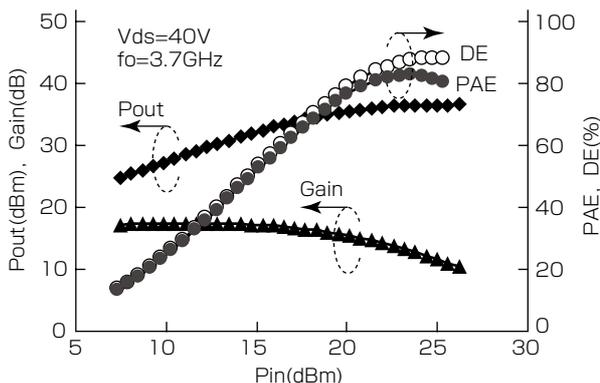


図1. 単体セルGaN HEMTの入出力特性

#### 2.2 オンチップ高調波処理回路

高出力かつ高効率な増幅器を実現するためには、先に述べたGaN HEMTに接続される整合回路で、高調波まで含めたインピーダンス制御が必須となる。図2に、図1と同一の単体セルGaN HEMTの2倍波及び3倍波ロード/ソースプル結果を示す。測定条件は $f_0=3.7\text{GHz}$ 、 $V_{ds}=40\text{V}$ 、CW動作で実施し、各コントアは全て電力付加効率を示している。図2の結果から分かるとおり、高調波の中でも特に入力2倍波インピーダンスは効率への影響が極めて大きく、かつ高効率な特性が得られるインピーダンス領域が極めて小さいため、より高精度なインピーダンス制御が必要となる。今回、この入力2倍波インピーダンスに着目した新規回路構成の開発を実施した。

図3に従来回路構成と今回新たに採用した回路構成を示す。従来製品では、外部整合基板上に設置したオープン

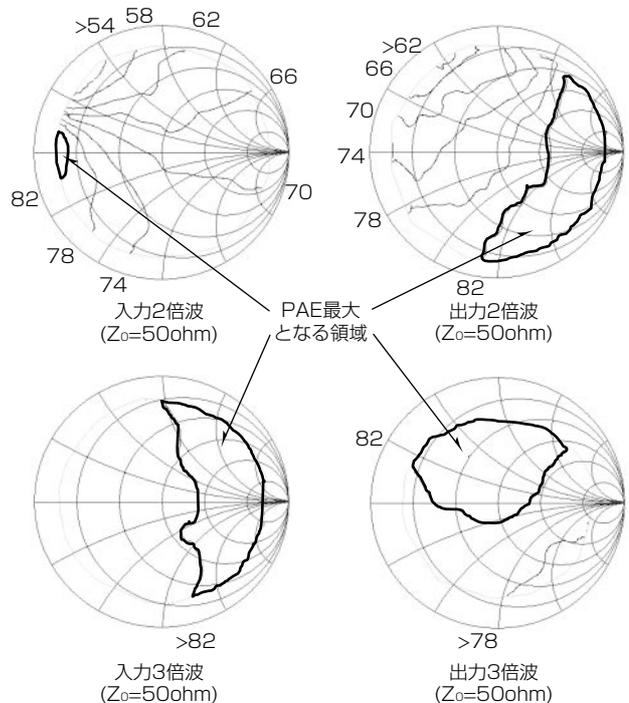


図2. 単体セルGaN HEMTのPAEの高調波負荷依存性

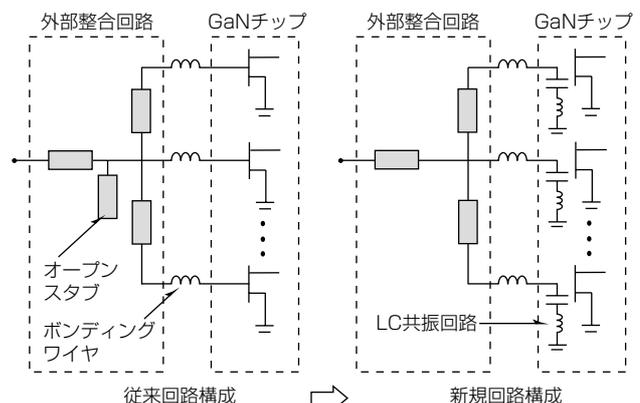


図3. 従来回路構成と新規回路構成の比較

スタブによって入力2倍波を制御していた。しかし、ボンディングワイヤやオープンスタブの損失によって反射量が低下するという問題、及びレイアウトの制限から複数セルを1つのオープンスタブで制御するため、セルごとにオープンスタブまでの電気長に差異が生じることによって位相が変動するという問題から、全てのセルに対して入力2倍波インピーダンスを高精度に制御することは容易ではなかった。今回、これらの問題を解決するための、GaN HEMTの入力側にスパイラルインダクタとMIMキャパシタから成るLC共振回路を単体セルごとに配置し、GaNチップ上に一体化したことで、全てのセルで入力2倍波インピーダンスをショート付近に高精度に制御するオンチップ高調波処理回路を内蔵したGaN HEMTを開発した。

図4に今回開発したオンチップ高調波処理回路だけのイ

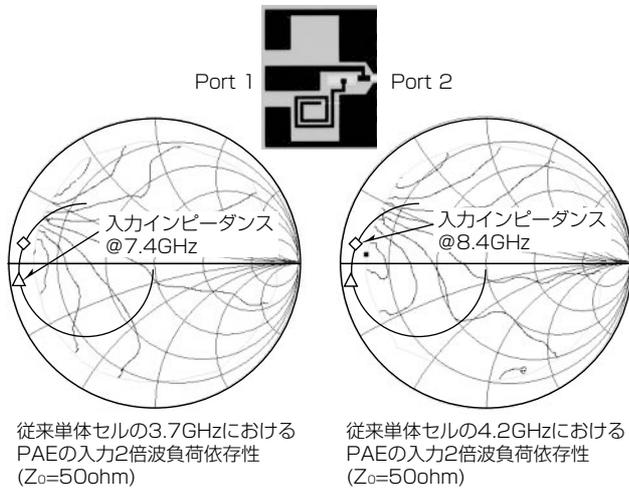


図4. オンチップ回路のSパラと各周波数での単体セルGaN HEMTのPAEの入力2倍波依存性の比較

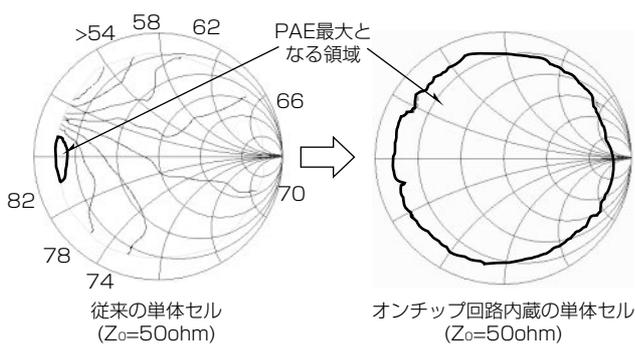


図5. オンチップ回路内蔵単体セルのPAEの入力2倍波依存性

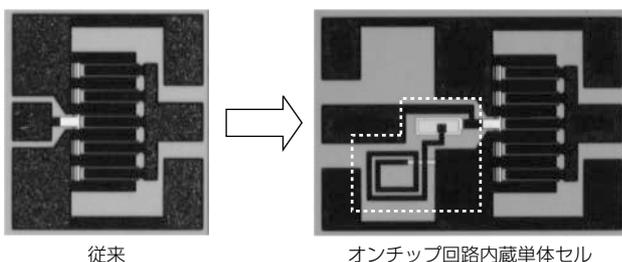


図6. オンチップ回路内蔵単体セル

ンピーダンスを実測した結果と単体セルGaN HEMTの3.7GHz及び4.2GHzでの入力2倍波ソースプル結果を重ねて示す。インピーダンスはトランジスタから回路側を見込んだインピーダンス(S22)を表示している。この回路構成は入力2倍波インピーダンスの広帯域化という点でも大きな効果を発揮する。今回開発したオンチップ高調波処理回路は周波数帯域3.7~4.2GHzをカバーするように設計しており、各周波数で入力2倍波インピーダンスが電力付加効率最大となる領域にきていることが分かる。

図5にこの回路構成の効果を検証するために実施したオンチップ高調波処理回路内蔵単体セルGaN HEMTの入力2倍波ソースプル結果を、また、図6に測定に使用した単体セルGaN HEMTの写真を従来と比較してそれぞれ示す。測定条件は $f_0=3.7\text{GHz}$ ,  $V_{ds}=40\text{V}$ , CW動作で実施した。従来のオンチップ回路なしの単体セルGaN HEMTの場合、高効率な特性が得られる入力2倍波インピーダンス領域が極めて小さかったのに対し、オンチップ回路内蔵の単体セルGaN HEMTではほぼ全ての領域で高効率な特性が得られていることが分かる。したがって、高出力を得るためにマルチセル化した際にこの回路をセルごとに設置することによって、全てのセルで入力2倍波が最適化されるため、従来よりも更なる高効率化が期待できる。

### 3. 出力100W内部整合型増幅器

図7に試作した出力100W内部整合型増幅器“MGFC50G3742CS/DS”とオンチップ高調波処理回路内蔵のマルチセルGaN HEMTチップの写真を、図8に回路構成を示す。

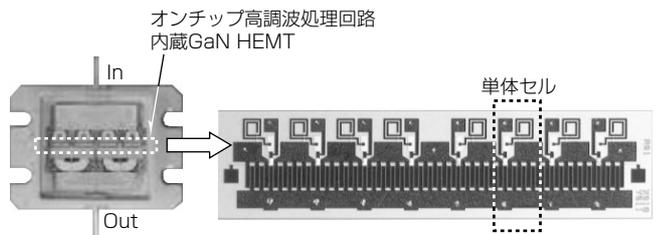


図7. MGFC50G3742CS/DS(100W品)の内部

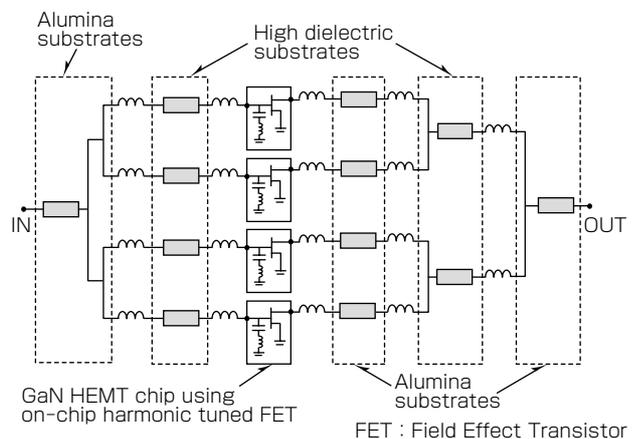


図8. MGFC50G3742CS/DS(100W品)の回路構成

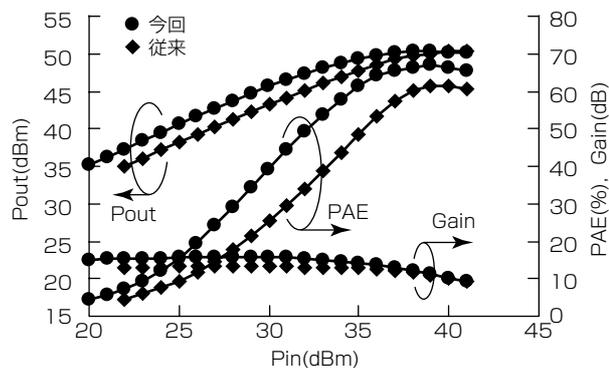


図9. 100W品の従来と今回の入出力特性比較

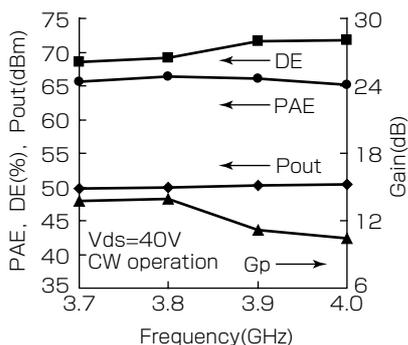


図10. MGFC50G3742CS(100W品)周波数特性(3.7~4.0GHz)

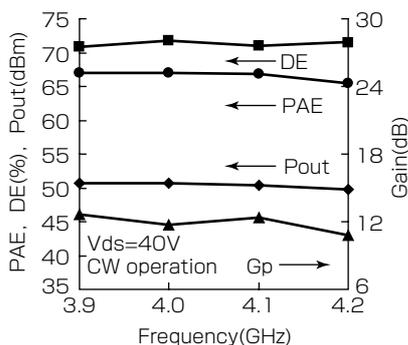


図11. MGFC50G3742DS(100W品)周波数特性(3.9~4.2GHz)

パッケージ内実装寸法は従来製品と同一の14.3×15.2 (mm)である。気密封止パッケージ内には、GaN HEMTと整合基板を実装しており、GaN HEMTは、今回開発したオンチップ高調波処理回路内蔵GaN HEMTで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段構成であり、従来製品と回路構成は同一であるが、オンチップ高調波処理回路内蔵GaN HEMT用に各整合基板のインピーダンスを最適化した。図9に、従来と今回開発した増幅器の周波数3.7GHzでの入出力特性を重

ねて示す。評価は、 $V_{ds}=40V$ 、CW動作で実施した。常温で出力電力107.6W、電力付加効率67% (ドレイン効率72.4%)で、従来製品と比較して5ポイント以上の効率向上を実現した。また、図10及び図11に今回開発した増幅器の周波数特性を示す。周波数帯域は、低域仕様を3.7~4.0GHz、高域仕様を3.9~4.2GHzとして2バンドに分割した。両仕様ともオンチップ高調波処理回路内蔵GaN HEMTは共通のものを使用し、外部整合回路だけを各帯域で最適化している。オンチップ高調波処理回路の適用によって帯域内で出力電力100WかつPAE $\geq$ 65%の良好な特性を得た。

#### 4. む す び

当社製GaN HEMTを用いた高効率な衛星搭載用C帯高出力増幅器を開発した。従来製品より更なる高効率化を実現するために、GaN HEMTの入力側にスパイラルインダクタとMIMキャパシタからなるLC共振回路を単体セルごとに配置し、GaNチップ上に一体化して、入力2倍波を高精度に制御する回路構成を開発した。この回路構成適用によって、CW動作条件で周波数帯域内(3.7~4.2GHz)で出力100W、電力付加効率 $\geq$ 65%で、従来製品よりも5ポイント以上の高効率化を実現した。現在、この回路構成を適用した増幅器の衛星搭載用信頼性試験を各種実施しており、実用化に向けて開発を進めている。この製品は、高出力・高効率の点で優位に立つTWT A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) Yamasaki, T., et al.: A 68% Efficiency, C-Band 100W GaN Power Amplifier for Space Applications, 2010 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. (MTT), TH3D-1 (2010)
- (2) Kamo, Y., et al.: A C-Band AlGaIn/GaN HEMT with Cat-CVD SiN Passivation Developed for an Over 100W Operation, 2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., WE1E-4 (2005)
- (3) Nanjo, T., et al.: Drivability Enhancement for AlGaIn/GaN High-Electron Mobility Transistors with AlN Spacer Layer Using Si Ion Implantation Doping, Applied Physics express 2(3), 031003-1~031003-3 (2009)