

## GaN Internally Harmonic Matched High Efficiency Amplifier at 5.8GHz

Koji Yamanaka †    Yoshinori Tsuyama ††    Fuminori Sameshima ††  
Yukihiro Homma ††    Takuro Sasaki ††    Koji Namura ††    Shin Chaki †††

† Mitsubishi Electric Corporation, Information Technology R&D Center,  
5-1-1 Ofuna, Kamakura, Kanagawa 247-8501 Japan

†† Mitsubishi Electric Corporation, Communication Systems Center,  
8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan

††† Mitsubishi Electric Corporation, High Frequency & Optical Device Works,  
4-1 Mizuhara, Itami, Hyogo 664-8641, Japan

**Abstract ---** In this paper, a GaN HEMT high power and high efficiency amplifier is presented, which operates at 5.8GHz. GaN HEMT is considered to be suitable for harmonic tuned high efficiency amplifiers compared with existing GaAs FET amplifiers, due to its high voltage operation and high impedance natures. In this paper, a high efficiency GaN HEMT amplifier is designed and evaluated, which is equipped with fundamental, second and third harmonic matching circuits in a hermetically sealed metal package. As a result, a high power added efficiency of 70% was obtained with associated output power of 7.1W. As the GaN HEMT employed in this work has already passed space qualify tests (SQT), this amplifier will be an important component to realize space solar power systems.

## 5. 8GHz 高調波整合型内部整合 GaN 高効率増幅器

山中 宏治† 津山 祥紀†† 鮫島 文典††  
本間 幸洋†† 佐々木 拓郎†† 苗村 康次†† 茶木 伸†††

† 三菱電機株式会社 情報総合研究所、†† 三菱電機株式会社 通信機製作所  
††† 三菱電機株式会社 北伊丹製作所

あらまし--- GaN(窒化ガリウム) HEMT を用いた 5.8GHz 高効率増幅器の開発成果について報告する. GaN HEMT は GaAs に比べて出力インピーダンスが高いので高調波整合による高効率化の効果が大きく, 高調波整合型高効率増幅器に適している. 今回, 気密封止可能なメタルパッケージ内に入るように基本波および高調波(2, 3倍波)整合回路設計を行い, 試作, 評価を実施した. その結果, 5.8GHz にて電力付加効率(PAE)70%, 出力電力 7.1W の良好な性能が得られた. 本増幅器に使用されている GaN HEMT は人工衛星搭載に必要な信頼性試験をクリア済みのものであり, 宇宙太陽光発電システム(SPS)への適用が期待できる.

連絡先 山中 宏治

Tel. 0466-28-6288

E-mail Yamanaka.Koji@cj.MitsubishiElectric.co.jp

### 1. はじめに

GaN HEMT(Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor)は高電圧動作・高電力密度動作が可能であることから 100W 級のマイクロ波帯高出力増幅器(HPA)の主力デバイスとして期待されている. また出力電力密度が高いので同じ出力を得るのに必要なゲート幅が小さくて済み, かつ高電圧動作であるので出力インピーダンスが高く, 出力整合回路での損失が小さい. さらにインピーダンス変成比が小さいためインピーダンス変成の段数が少なくて済むのでさらに出力整合回路損失を低減することができる. このことから, GaN HEMT は高効率動作の観点からも他のデバイスよりも有利であると考えられている. すでに 5.8GHz 帯で出力電力 2W, 電力付加効率(PAE)71%の F 級 GaN HEMT 増幅器が実現されている[1].

実際に GaN HEMT 増幅器をSPSに適用することを考えた場合, 小型化の観点から基本波整合回路, 高調波整合回路を含めたすべての整合回路をパッケージ内に収納することが望ましい. またSPSは宇宙空間で動作するのでそのパッケージは気密封止可能なメタルパッケージである必要がある. デバイス自体もいわゆるSQT(Space Qualify Test)に合格している必要がある. 弊社ではすでに衛星搭載用 C 帯 GaN HEMT 増幅器を開発済み[2]であり, 弊社の GaN HEMT デバイスはチャンネル温度 150°Cにおいて  $1 \times 10^7$  時間のMTTF(平均故障時間)を有している. また, 素子効率についても 4GHz で最大80%のPAEという高効率な特性を有している. 今回, この GaN HEMT デバイスを使用してSPSでの使用が予定されている 5.8GHz 帯で動作する高調波整合型の内部整合 GaN 増幅器の設計・試作を行い評価した. その結果, 5.8GHz にて PAE70%, 出力電力 7.1W の良好な性能が得られた. この性能は C 帯 GaN 増幅器として世界トップクラスの出力電力・効率である.

### 2. 高調波整合による高効率化

線形動作であるA級動作ではトランジスタの直流電力-高周波電力変換効率(FET の場合ドレイン効率と呼ばれる)は最大でも50%である. 他方, トランジスタで発生する高調波ひずみを積極的に利用するとドレイン効率を向上させることができることが知られている.

図1にトランジスタの入出力に高調波反射プリマッチ回路(ここでは2倍波反射スタブ)を装荷することで効率を向上させる様子を模式的に示す. 2倍波反射スタブがなく, トランジスタがA級動作し

ている場合, トランジスタの出力端における電圧・電流波形は左側のグラフのように逆相の正弦波波形となる. トランジスタで発熱によって消費される電力は

$$\frac{1}{T} \int_0^T I(t) \cdot V(t) \cdot dt \quad \dots (1)$$

( $T$ は電圧・電流波形の周期)

で表されるので, 図中のハッチングで示した領域が熱として無駄に消費される量を示すことになる. 効率を上げるといことは, いわばこの無駄に消費されるエネルギーを減らすことであるから高電圧と高電流が時間領域において同時に存在しないようにすれば効率は向上できる.

図1の右側には2倍波反射スタブを用いて電流波形に2倍波成分を重畳させた様子を示す. 2倍波成分が加わることで電流波形にひずみが生じるが, これにより瞬時的な発熱電力を低減させることができる. この際, 基本波成分には電圧・電流ともに変化はないので基本波の出力電力に変化はない. トランジスタで消費される直流電流成分は電流波形の平均値として計算することができるが, 図1の左側と右側のグラフを比較すると, 右側のグラフでは2倍波成分の影響により平均電流が減少している, すなわち消費電力が低減している. このようにトランジスタで発生する2倍波を積極的に活用することでドレイン効率を向上させることができる(高調波整合). が, 高調波整合により効率を向上させるには基本波と高調波の位相関係を精度よく制御する必要がある.

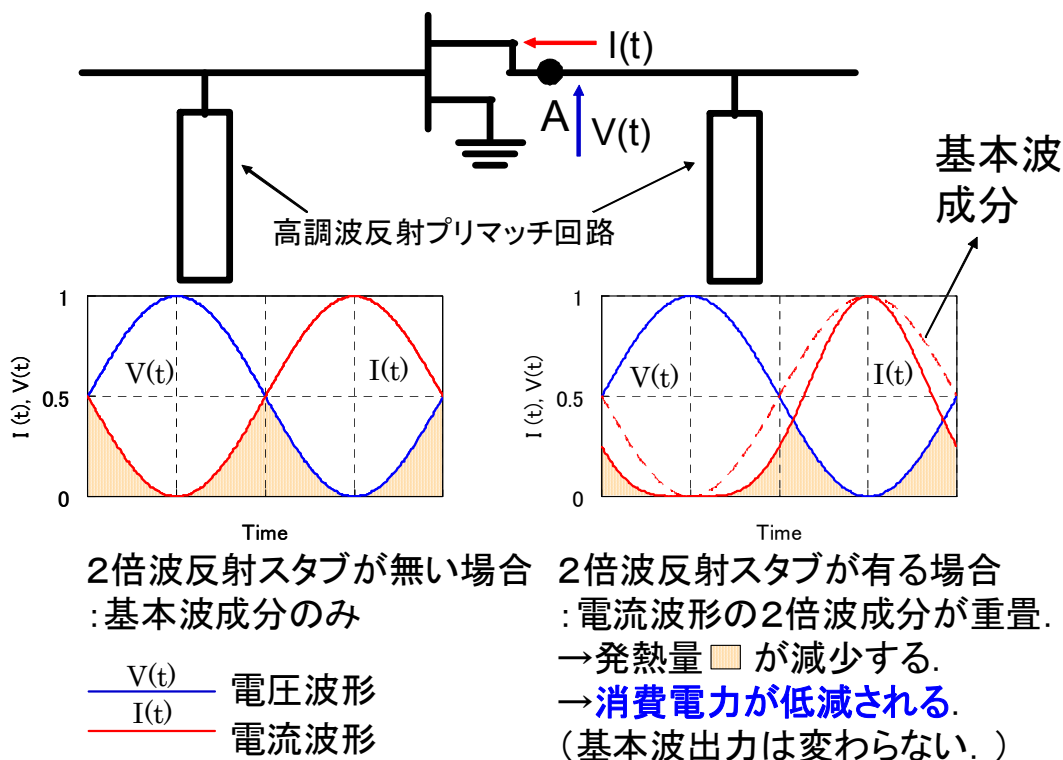


図1 高調波整合による効率向上の模式図

### 3. 試作結果

実際の増幅器設計にあたっては入力側では2倍波まで, 出力側では3倍波まで高調波の反射位相を制御する設計を行った. 図2に今回試作した GaN HEMT 増幅器の外観写真と回路図を示す. GaN HEMT はユニットゲート幅(Wgu)を  $60\mu\text{m}$  とし, 1セル当たりのフィンガー本数は 10 本, すなわち1セル当たりのゲート幅を  $0.6\text{mm}$  とした. このトランジスタセルを4合成して増幅器を構成しているのでトータルゲート幅は  $2.4\text{mm}$  である. 入力整合回路には高誘電率基板を, 出力整合回路には高純度のアルミナ基板を使用した. 実効的な整合回路の回路サイズは  $8.0\text{mm} \times 6.4\text{mm}$  と小さく, すべての整合回路は(バイアス回路を除いて)気密封止可能なメタルパッケージ内に納まっている.

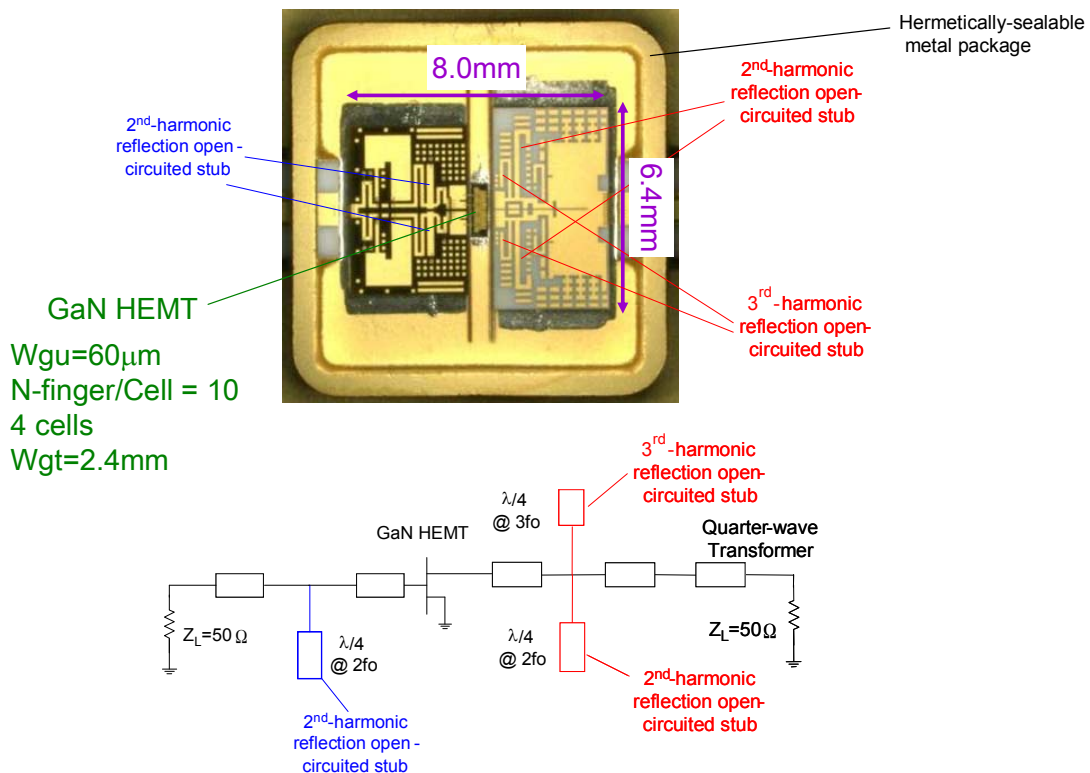


図2 試作した GaN HEMT 内部整合増幅器の外観写真と回路構成

図3には入出力整合回路基板のSパラメータの実測を行い、GaN HEMT から見た入出力負荷インピーダンスを1セルあたりに換算して表示した結果を示す。入力側の2倍波における反射係数および出力側の2倍波、3倍波における反射係数は0.95以上(VSWR=40以上)と非常に大きくできている。このことはトランジスタ内部で発生した高調波ひずみを効果的にトランジスタ近傍に押し込めることができていることを示している。

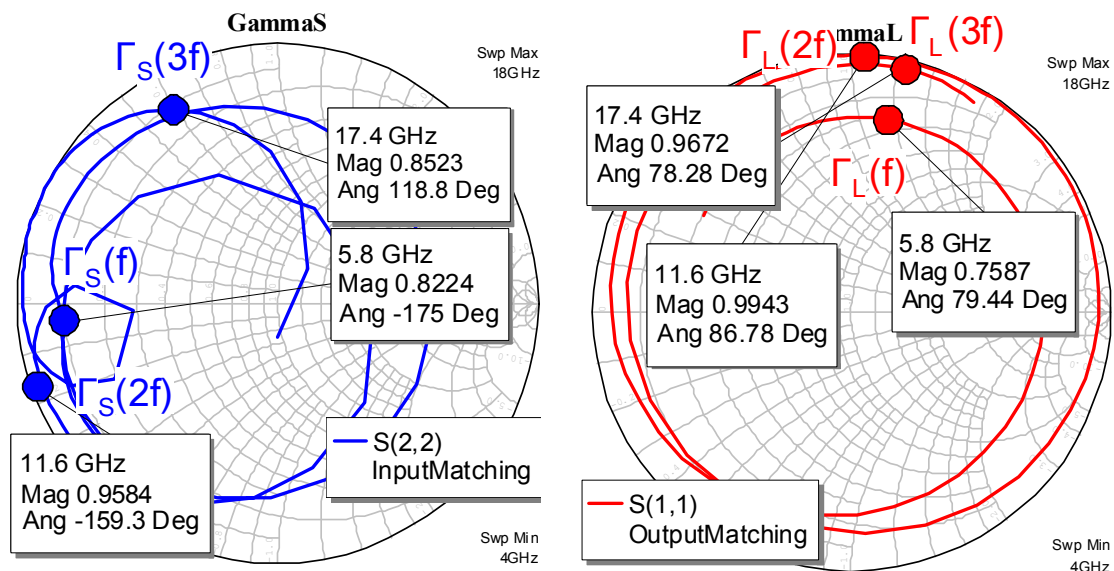


図3 トランジスタから見込んだ入出力負荷インピーダンス(1セルあたり)

図4に図2の GaN HEMT 増幅器の入出力特性の測定結果を示す. 測定はドレイン電圧  $V_d=30V$ , CWで行った. 高調波内部整合の効果により最大PAE70%, そのときの出力電力7.1Wという良好な結果が得られた.

図5には出力信号の高調波スプリアス測定結果を示す. (ただし本測定はバイアス回路を含んだジグフィクスチャーからの出力をモニターしたものである.) 図3に示したように2倍波および3倍波での出力整合回路の反射係数はほぼ全反射であり, トランジスタで発生した2倍波, 3倍波はほとんど出力に含まれていない. 結果として高調波スプリアスはスペクトルアナライザの検出限界(ノイズフロア)以下と低スプリアスであった.

図6には今回の成果をこれまでに報告されているC帯 GaN HEMT 増幅器と比較した結果を示す. 図6から明らかなように本成果はC帯 GaN HEMT 増幅器として世界トップクラスの出力電力・効率である.

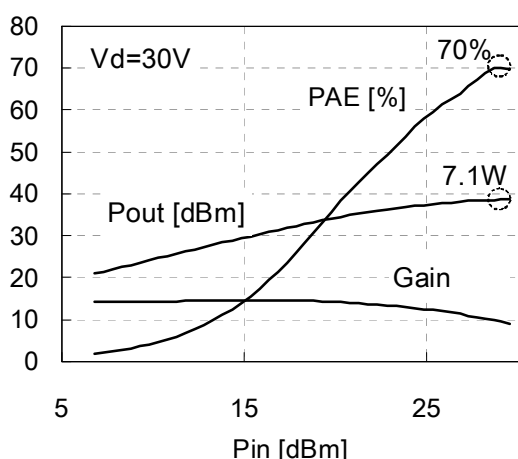


図4 入出力特性測定結果

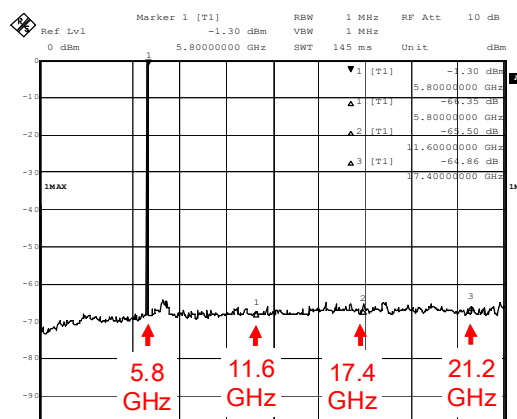


図5 出力スペクトル測定結果

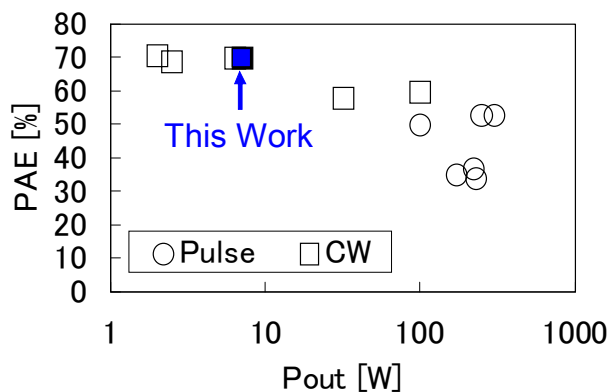


図6 C帯 GaN 増幅器の State-of-the-art

#### 参考文献

- [1] 黒田他, “寄生成分補償された 5.8 GHz 帯 F 級高効率増幅器”, 2010 年信学会総合大会 C-2-30
- [2] T. Yamasaki et al, “A 68% Efficiency, C-Band 100W GaN HEMT Amplifier for Space Applications”, 2010 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. TH3D-1, May 2010