

衛星通信の地球局向け GaN MMIC 電力増幅器

GaN MMIC Power Amplifier for Very Small Aperture Terminal in Satellite Communications

岡田 徹*
Toru Okada

高橋 雅和
Masakazu Takahashi

廣川 勝登
Katsuto Hirokawa

四田 泰代
Yasuyo Yotsuda

水野 慎也
Shinya Mizuno

久保田 幹
Miki Kubota

現代の必須無線通信手段のひとつとして衛星通信が挙げられる。その小型地球局に搭載される電力増幅器には、消費電力やコスト削減などの理由から、高出力化・高効率化・小型化・低歪み化の要求が高まっている。当社は、これらの要求に最適な窒化ガリウム（以下、GaN）の高電子移動度トランジスタ（以下、HEMT）テクノロジーを新規に開発し、衛星通信の地球局向けKu帯48W GaN MMIC 電力増幅器を開発した。小信号利得は32.5dB、最大出力電力は46.9dBm（49W）、電力付加効率は32.8%、3次相互変調歪は-25.6dBcと、業界トップクラスの性能を達成した。

Satellite communication is one of the essential wireless communication means today. Power amplifiers mounted on the Very Small Aperture Terminals (VSAT) are increasingly required to be smaller and have higher output, higher efficiency, and lower distortion for reduced power consumption and costs. Sumitomo Electric Industries, Ltd. has developed a gallium nitride (GaN) high electron mobility transistor (HEMT) that meets these requirements, and has developed a Ku band 48W GaN MMIC power amplifier for VSAT used in satellite communication. It has achieved industry-leading performance with a small signal gain of 32.5 dB, maximum output power of 46.9 dBm (49 W), power added efficiency of 32.8%, and third order inter-modulation distortion of -25.6 dBc.

キーワード：Ku帯、VSAT、GaN、MMIC、電力増幅器

1. 緒 言

近年、携帯電話網の高速化には目覚ましい発展があり、社会や企業、個人の利便性を飛躍的に向上させてきた。スマートフォンとの通信を行う基地局は、陸上に固定設置されているため、自然災害や人為的災害等により、破壊されると、大規模かつ長期間の通信障害が発生する恐れがある。一方で、衛星通信は、宇宙空間に打ち上げられた人工衛星に搭載された衛星局と、地上に設置した地球局間で行われる。規模の小さな地球局 Very Small Aperture Terminal（以下、VSAT）は、自動車等に搭載できるため、必要な場所に移動し、いち早く通信を確保できる。更に、基地局の設置が難しい洋上においても、広範囲に通信経路を確保できるため、欠くことができない通信手段のひとつとなっている。

当社では、VSAT用無線出力ブロックに搭載される重要部品のひとつである、電力増幅器を開発している。電力増幅器は、コスト削減や消費電力低減のため、高出力化・高効率化・小型化の要求や、より高速にデータ通信を行うため、低歪み化への要求も強くなっている。それらの要求に対応するために、窒化ガリウム（以下、GaN）材料を用いた高電子移動度トランジスタ（以下、HEMT^{*1}）で構成されたモノリシック・マイクロ波集積回路^{*2}（以下、MMIC）が注目されている。

本稿では、VSAT用Ku（13.75～14.5GHz）^{*3}帯48W GaN MMICの電力増幅器を開発したので、その結果につ

いて報告する。

2. GaN HEMTテクノロジー

2-1 基本構造、DC特性及び信頼性

高周波電力増幅器向けに開発したGaN HEMTは、100 μ m厚のSiC基板上に積層されたAlGaIn/GaNエピタキシャル層と、0.15 μ m長のゲートで構成される。

代表的なドレイン電流（ I_{ds} ）ードレイン電圧（ V_{ds} ）特性を図1に示す。飽和最大ドレイン電流 I_{max} は1.1A/mmと、高い飽和電流が得られている。一方、ピンチオフ状

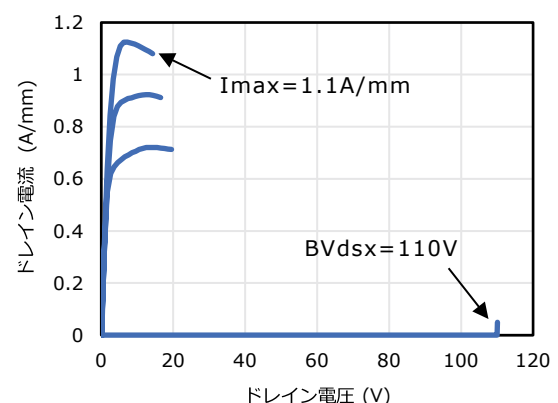


図1 開発したKu帯GaN HEMTの I_{ds} - V_{ds} 特性

態における3端子耐圧BVd_{sx}は110Vが得られており、動作電圧24Vに対し3倍以上を達成し、安定的に高い出力電力を得ることが期待できる。その他の代表的な特性値を、表1にまとめる。

この開発したGa_{0.5}N HEMTの平均故障時間 (Mean To Time Failure) は、接合温度200℃において、100万時間以上が得られており、高い信頼性が確保されている。

表1 Ga_{0.5}N HEMTの代表特性一覧

項目	I _{max}	BV _{d_{sx}}	f _t	f _{max}
単位	A/mm	V	GHz	GHz
値	1.1	110	34	190

2-2 RF特性

表1のとおり、今回開発したGa_{0.5}N HEMTは、遷移周波数f_tが34GHz、最大発振周波数f_{max}が190GHzと、Ku帯の周波数で十分に動作できる性能を達成している。

図2に、ロードプル^{※4}試験にて得られた1500μmのユニットHEMTの大信号特性評価結果を示す。出力電力が最大となる負荷において、周波数13GHzにおける小信号利得15.3dB、最大出力電力38.4dBm (電力密度は4.6W/mm)、最大電力付加効率は46.4%が得られた。

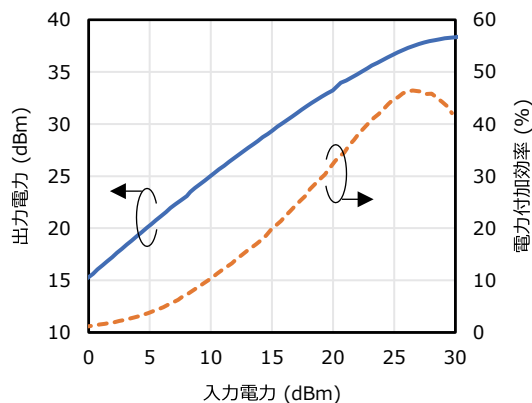


図2 出力電力、効率の入力電力依存性 (13GHz)

3. チップ設計

3-1 目標性能

周波数13.75~14.5GHzにおいて、出力電力が46.8dBm (48W)、小信号利得が32dB以上、電力付加効率が30%以上、3次相互変調歪^{※5}が-25dBc以下を目標とする、Ku帯48Wの電力増幅器MMICの開発を目標とした。

3-2 電力増幅器の構成

図3に、電力増幅器MMICの構成を示す。25W出力の電力増幅器を2並列に合成して、48Wの出力電力を得る構成

とした。図中の点線で囲んだ箇所は、それぞれ25W出力の電力増幅器を示す。

以下、25W出力の電力増幅器の構成について説明する。3-1の目標利得を確保するために、増幅器段数は3段構成とした。終段のHEMTサイズは、出力電力によって決定され、2-2のロードプル試験で用いたユニットHEMTを4並列合成とした。初段、二段目のHEMTサイズは、次段のHEMTを線形的に増幅できるように、それぞれ800μmのユニットHEMTを2並列、1200μmのユニットHEMTを4並列合成とした。

更に、信号の反射や損失を低減し、入力された電力を次段のHEMTへ効率良く伝達するための整合回路を、入力、出力及び各段間に配置した。また、各段HEMTのゲート及びドレイン端子に、バイアスを供給する回路も具備した。

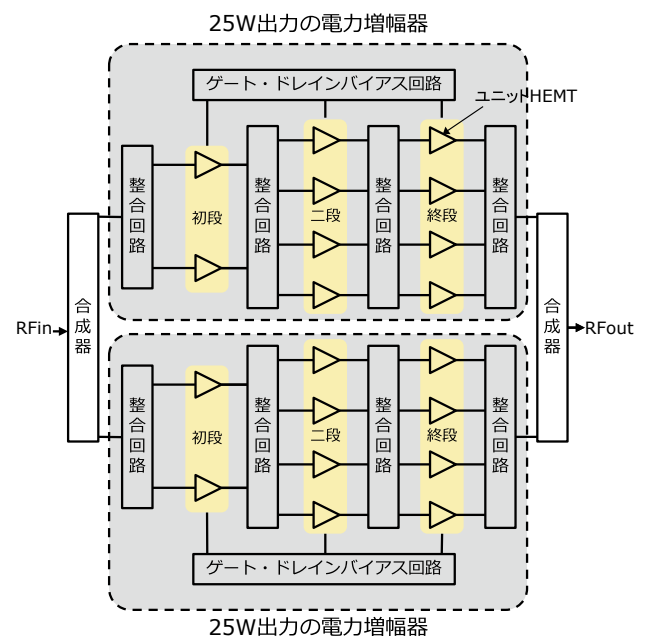


図3 Ku帯48Wの電力増幅器MMICの構成図

3-3 熱設計

増幅器を構成するユニットHEMT間を近接に配置すると、互いの発熱が相互に影響を与え、HEMTの接合温度が高温になる恐れがある。そのため、最大動作温度200℃を超えないように、熱シミュレーションによって、HEMTの配置を最適化した。

図4に、ケース温度85℃において、出力電力46.9dBm (49.0W) で動作しているときの、電力増幅器MMICの温度分布を表すシミュレーション結果を示す。結果、終段の中央部に配置したHEMTの接合温度は166.2℃であり、最大動作温度以下で動作しているため、十分な寿命を確保できる。

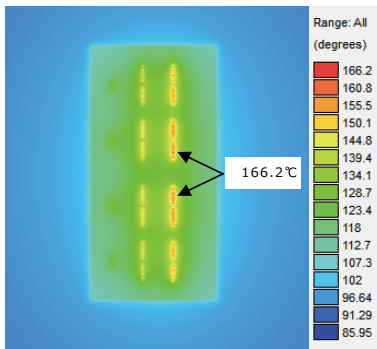


図4 Ku帯48Wの電力増幅器MMICの温度分布

3-4 整合回路の設計

回路設計は、2つのステップで行った。最初に25W出力電力増幅器を設計し、次に25W出力電力増幅器を2合成する設計を行った。

まず、25W出力電力増幅器において、2-2で示した大信号特性を得るために、各段のユニットHEMTの負荷を、ターゲット負荷に合わせるように整合回路を調整した。さらに、帯域内の利得の絶対値の確保、利得偏差の低減、不要な帯域の利得の減衰などを考慮し、全体の整合回路を調整した。電力増幅器MMICのチップサイズを小さくするために、回路を構成する素子同士を近接に配置すると、電磁界の相互作用が強くなり、設計結果に誤差が生じる。そのため、電磁界を解析するシミュレーターを活用し、素子配置や形状を最適化した。

次に、四分の一波長 ($\lambda/4$) ウィルキンソン・タイプのインピーダンス変換器を用いて、2つの25W出力電力増幅器を合成した。

設計結果として、目標帯域13.75~14.5GHzにおいて、小信号利得は33.5dB、最大出力電力は46.8dBm (48W)、電力付加効率は30.0%の性能を得た。

4. 試作結果

写真1に、開発したKu帯48Wの電力増幅器MMICのチップ写真を示す。チップサイズは7.65×3.73mm²である。

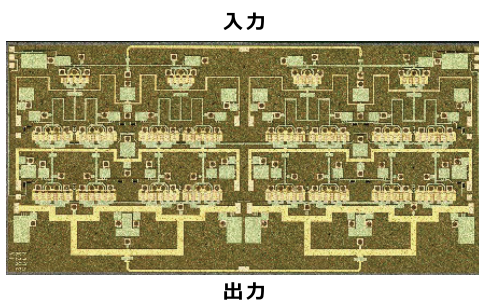


写真1 Ku帯48Wの電力増幅器MMICのチップ

以降、得られた代表的な電気的特性を示す。増幅器への印加電圧は24V、電流は100mA/mmになるよう調整した。

図5に、小信号利得の周波数依存性を示す。点線内は必要な帯域を示し、帯域内の利得を32.5dB確保し、帯域外の利得は、回路設計により減衰されている。

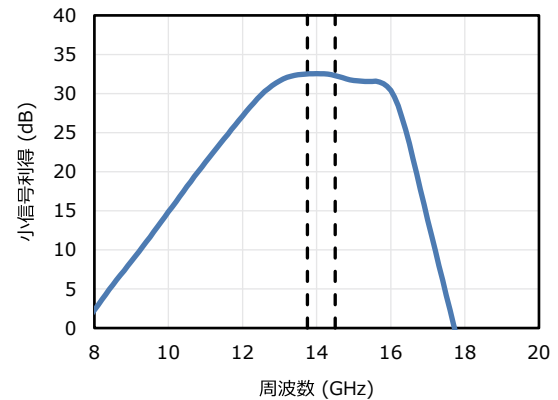


図5 小信号利得の周波数依存性

図6に、出力電力と電力付加効率の周波数依存性を示す。動作周波数である13.75~14.5GHzにおいて、最大出力電力46.8dBm (48W)、電力付加効率30%以上が得られ、目標性能を満足する結果が得られた。

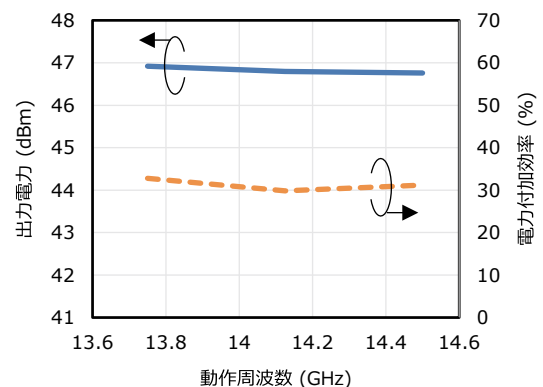


図6 出力電力、電力付加効率の動作周波数依存性

図7に、合計出力電力39.5dBmにおける、3次相互変調歪の動作周波数依存性を示す。動作周波数において、3次相互変調歪-25dBc以下が得られ、目標性能を満足する結果が得られた。

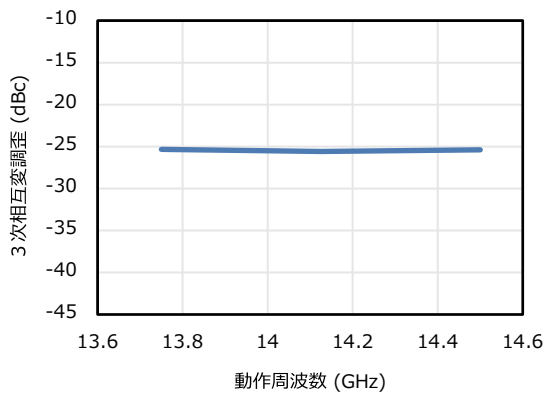


図7 相互変調歪の動作周波数依存性

5. 結 言

本稿では、当社が開発した高周波向け GaN HEMT テクノロジーを適用した、Ku 帯 48W 電力増幅器 MMIC の設計及び試作結果について報告した。得られた特性は、Ku 帯電力増幅器 MMIC として、業界トップクラスの性能を達成した。

今後も、市場の要求に応えるため、当社は高出力化・高効率化・小型化・低歪み化の GaN HEMT テクノロジー及び製品開発を継続する。

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 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 (HMIC)、後者の半導体基板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。

※3 Ku 帯

マイクロ波の周波数による分類において、12~18GHz の帯域を指す。VSAT システムには13.75~14.5GHz が割り当てられ、波長が短くアンテナの小型化が可能であることから、機動性に優れるが、降雨・降雪の影響を受けやすい。

※4 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。

※5 3次相互変調歪

周波数が近接する異なる2つの基本波を入力した場合、増幅器などの非線形性によって、一方の基本波と他方の基本波の2次高調波との間に不要波が発生する。この不要波と基本波との電力差を3次相互変調歪と呼び、より小さいことが望ましい。

執 筆 者

岡田 徹* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



高橋 雅和 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



廣川 勝登 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



四田 泰代 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



水野 慎也 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 主席



久保田 幹 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 部長



* 主執筆者