

衛星搭載用 C 帯 100W 高出力・高効率 GaN HEMT パワーアンプ

High-Power and High-Efficiency C-band 100W GaN HEMT for
Space Applications

児玉 晃忠*
Akitada Kodama

大沢 研
Ken Osawa

石山 重行
Shigeyuki Ishiyama

久保田 幹
Miki Kubota

GaN HEMT^{*1}を用いた衛星搭載用高出力・高効率内部整合型増幅器^{*2}パワーアンプを開発した。今日の無線通信技術は、インターネット、携帯電話のコミュニケーションに加えて、電子マネー決済にも利用されており、日常生活に欠かせないものとなっている。世界的な情報網の拡大と、自然災害の影響を受けにくい衛星通信の必要性が高まっている。

今回開発したパワーアンプは、衛星通信の主力周波数である C 帯 ($f=3.7\sim 4.2\text{GHz}$) において、CW 動作条件下で出力電力 100W、電力付加効率 60% を達成した。開発に使用した GaN HEMT は長期信頼性の実績があり、性能および信頼性の両面において、業界トップクラスの製品である。

We have developed a high-output, high-efficiency internally matched power amplifier for satellites using gallium nitride high electron mobility transistor (GaN HEMT). Today's wireless communication technology has become indispensable in our lives, not only for Internet and mobile phone communications, but also for electronic payment. Therefore, it has become indispensable in our lives. Therefore, global information network is growing and the need for satellite communications is increasing as these are less susceptible to natural disasters. The newly developed power amplifier achieves an output power of 100 W and power added efficiency of 60% under CW operation conditions in the C band ($f = 3.7$ to 4.2 GHz), the main frequency for satellite communications. The GaN chip used in the development has a confirmed long-term reliability. In terms of both the performance and the reliability, this is an industry-leading device.

キーワード：GaN HEMT、高効率、高出力、衛星搭載、100W

1. 緒 言

近年、携帯電話の主流は 5G へ移行し、モバイル機器のデータ伝送はより高速化され公共インフラの利便性を飛躍的に向上させた。モバイル機器と通信を行う基地局は地上に固定設置されているため、自然災害や人為的災害等で破壊された場合、復旧まで時間を要し、大規模かつ長期間、通信が遮断する恐れがある。それに対し、衛星通信システムは、宇宙空間に打ち上げられた衛星と、地上に設置した地球局間で通信が行われる。地球局は車両搭載することが可能なため、必要な場所に移動し、いち早く通信を確保、復旧することができる。また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することができる。この様に通信手段に対して種々のメリットがあり、欠くことができないものとなっている。

衛星に搭載される通信システムは、搭載スペースや電池容量の制限から軽量、小型、高出力、高効率に加え、長期信頼性が要求される。

当社は、衛星から電波を増幅し送信する、送信出力部に搭載されるパワーアンプの開発・製造を行っている。パワーアンプはコスト削減や消費電力低減のため、高出力化・高効率化・小型化や、より高速にデータ通信を行うための高

周波化、および高い信頼性が要求されている。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）で構成されたマイクロ波集積回路^{*3}（以下、MIC）が注目されている。

今回、衛星搭載用 C 帯（3.7～4.2GHz）100W GaN HEMT パワーアンプ（以下、C 帯 100W）を開発したので、本稿では、その結果について報告する。

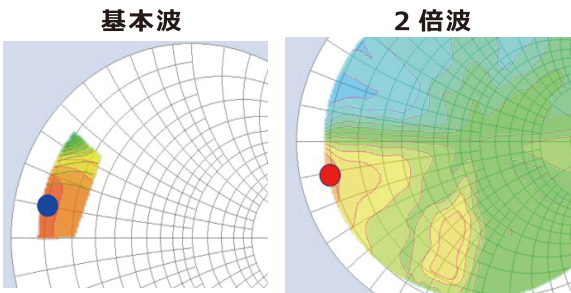
2. GaN HEMT 基本特性

本開発に使用した GaN HEMT は、飽和最大ドレイン電流 I_{max} は 780A/mm と高い飽和電流が得られている。一方、ピンチオフ状態における 3 端子耐圧 BV_{dsx} は 300V が得られており、動作電圧 50V 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。

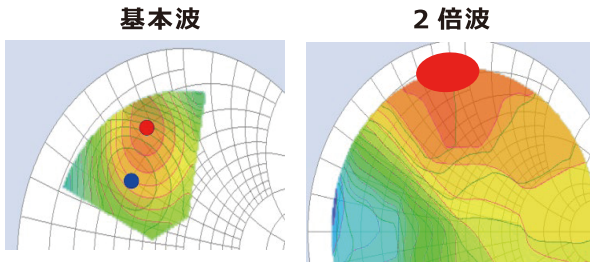
図 1 に、4.2GHz においてパルス条件（パルス幅 12 μs 、デューティ 10%）で測定した GaN HEMT のソース/ロードプル^{*4}測定結果を示す。

GaN HEMT のソース/ロードプル結果は、2 次高調波を含め入出力インピーダンスを効率整合した時の効率最適負

ソースプル測定結果 (f=4.2GHz)



ロードプル測定結果 (f=4.2GHz)



●:出力最適点 ●:効率最適点

図1 GaN HEMTのソース/ロードプル結果

3. 内部整合回路設計

表1にパワーアンプの目標仕様を示す。動作条件は電源電圧40V、電源電流800mA。線形利得16dB、出力電力51dBm (125W)、電力付加効率60%である。パッケージは、耐湿や耐塵のためセラミック気密パッケージを使用する。

表1 パワーアンプの目標仕様

バイアス条件	$V_{DS} = 40V$
	$I_{DS} = 800mA$
周波数	3.7~4.2GHz
出力電力	51dBm
線形利得	16dB
電力付加効率	60%
適用パッケージ	気密セラミックパッケージ

パワーアンプの内部整合回路は、非線形GaN HEMTモデルと、図1に示したソース/ロードプル結果で得られた基本波・2倍波に対して効率最適点になるように設計した。

写真1に、パワーアンプの回路内部の写真を示す。回路構成は、入出力共に、ローパス型整合を採用し、4:2:1のトーナメント型同相分配/合成を行っている。入出力整合回路はアルミナ基板および高誘電体基板を使用している。

荷を示している。GaN HEMTに接続する外部整合回路をこの負荷と同じ位置に設計することで、パワーアンプの効率を最大限に高めることができる⁽¹⁾。

図2に、GaN HEMTのインピーダンスを効率最適負荷に設定した場合の、入出力特性を示す。出力特性は41dBm (12.6W)、効率特性は70%が得られた。この結果を基に、GaN HEMT実装チップでの出力特性は、100Wを実現できる。効率特性は、周波数帯域、GaN HEMTの発熱、パワーアンプ回路構成時のロス等により、ロードプル値に対して10ポイント程度下がること、これまでの実績よりわかっている。この点を考慮しても効率60%は達成可能と考えられる。

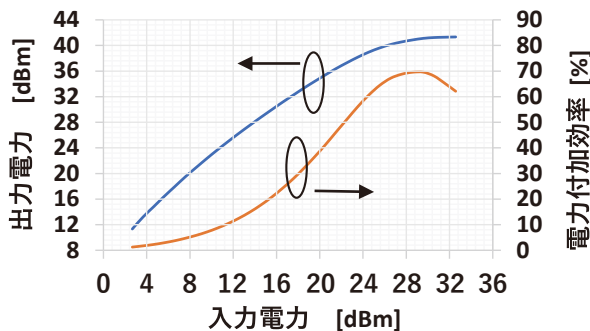


図2 GaN HEMTのRF特性 (f=4.2GHz)

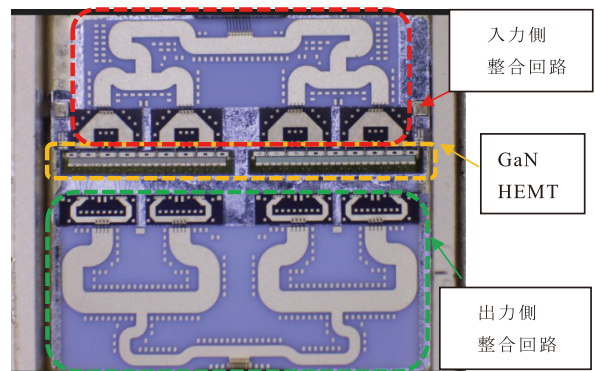


写真1 C帯100W 内部整合回路

写真2にC帯100Wの外観写真を示す。パッケージの全体サイズは、24mm×17.4mmである。写真3は評価用治具で、アルミナ基板上に50オームラインが形成され、入力側、出力側共に治具外部にバイアス回路を設けている。

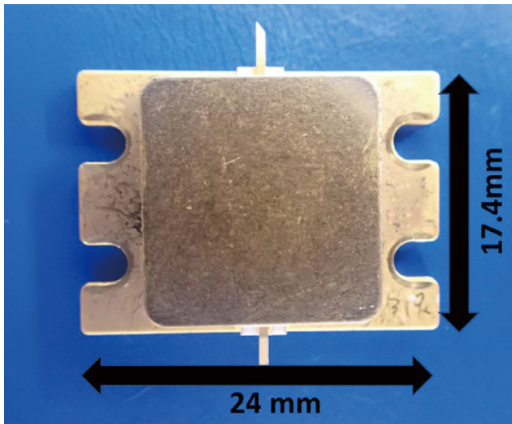


写真2 C帯 100W 外形写真

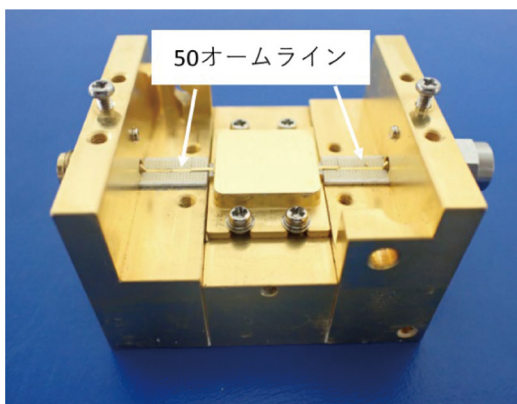
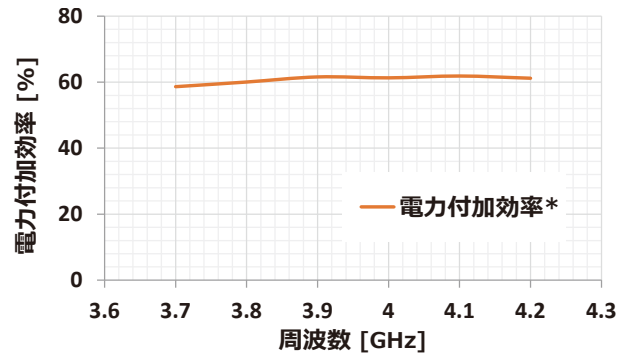


写真3 C帯 100W 評価用治具写真



*) 4dB利得圧縮時の電圧付加効率

図4 電力付加効率の周波数依存性に対するシミュレーション結果

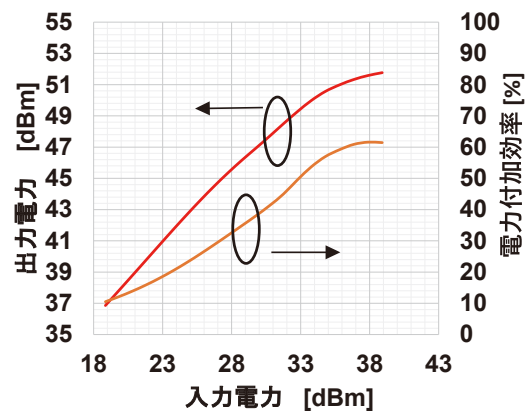
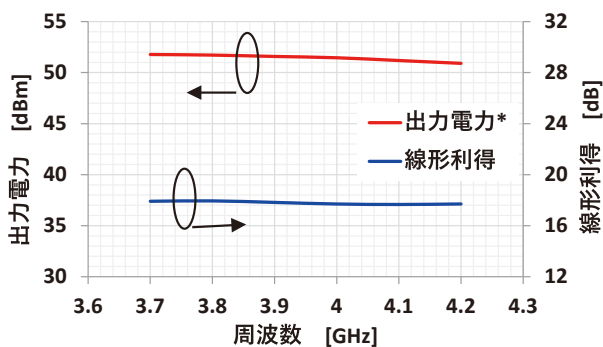


図5 出力電力と電力付加効率の入力電力依存性に対するシミュレーション結果 (f = 3.9GHz)

図3、4にシミュレーションによる出力電力および電力付加効率の周波数依存性（設計結果）を示す。周波数 $f = 3.7 \sim 4.2$ GHzにおいて、出力特性 ≥ 50 dBm、電力付加効率 $\geq 60\%$ が得られている。図5に帯域の中心周波数である $f = 3.95$ GHzでの入出力特性と効率特性を示す。

4. 試作結果

図6～8に本設計を基に試作したパワーアンプの特性結果を示す。電源電圧、電源電流は、表1に示す条件に設定した。試作結果から、出力電力50～51dBm (100W) 電力付加効率60%が得られ、目標仕様を満足した。



*) 4dB利得圧縮時の出力電力

図3 出力電力の周波数依存性に対するシミュレーション結果

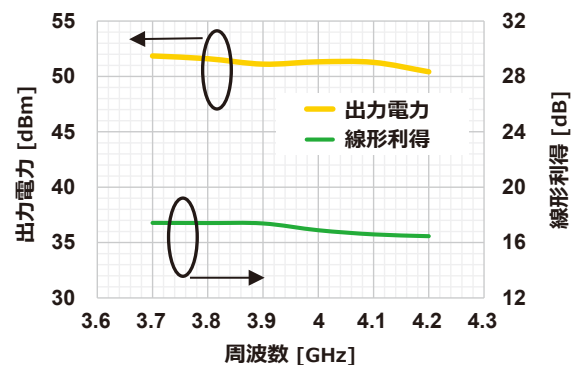
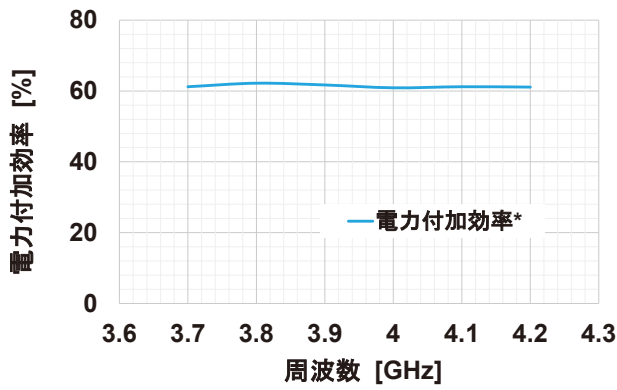


図6 出力電力の周波数依存性結果



*) 4dB利得圧縮時の電力付加効率

図7 電力付加効率の周波数依存結果

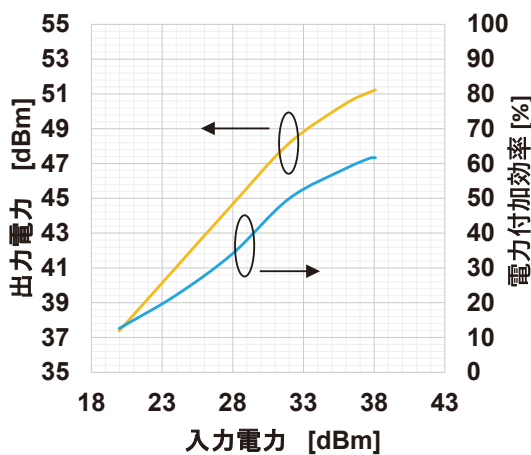


図8 出力電力と電力付加効率の入力電力依存結果 (f=3.9GHz)

5. 信頼性試験

5-1 衛星搭載用認定試験 (SQT)

本製品に使用されている GaN HEMT に対して、世界標準 MIL-PRF-19500 に基づいた標準衛星搭載用認定手順に従って、衛星搭載用認定試験 (SQT) を実施した。表2は、耐放射線試験を除いた SQT の実施項目を示す。DC 高温動作寿命試験 (DC HTOL)、RF 高温動作寿命試験 (RF

表2 衛星搭載用認定試験 (SQT)

カテゴリ	試験項目	
寿命試験	DC HTOL ($V_{DS} = 60V$, $T_{ch} = 250, 275, 300, 315^{\circ}C$)	
	RF HTOL ($V_{DS} = 55V$, $T_{ch} = 270, 290, 310^{\circ}C$, P4dB)	
	RF ステップストレス ($V_{DS} = 60V$, $P_{in} = P3dB \sim P13dB$, 各2時間)	
環境試験	熱環境	熱衝撃 温度サイクル
	機械環境	衝撃・振動 定加速度

HTOL) および RF ステップストレス試験を実施し、長期信頼性を確認している。また環境試験として、熱環境 (熱衝撃、温度サイクル) および機械環境 (衝撃・振動、定加速度) 試験を実施し、全てにおいて問題なき結果が得られた。DC HTOL および RF HTOL により求められた活性化エネルギー (E_a) は、それぞれ $2.10eV$ 、 $2.21eV$ である。これら E_a が非常に近いことから、DC HTOL と RF HTOL の故障モードは同一と考えられる。図9、10はチャネル温度 $200^{\circ}C$ における平均故障時間 (MTTF) を示す。DC HTOL については 2.34×10^7 時間 (2671年)、RF HTOL については 1.18×10^7 時間 (1347年) と予測される。これらの MTTF は、一般的に15年を寿命とする衛星搭載用途には十分である。

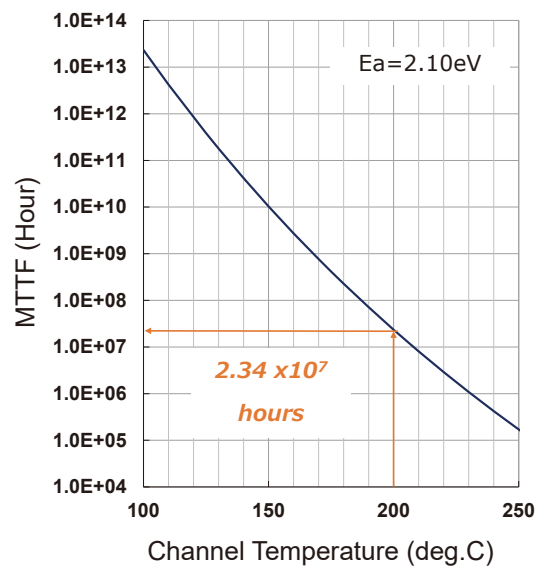


図9 DC HTOLのMTTF

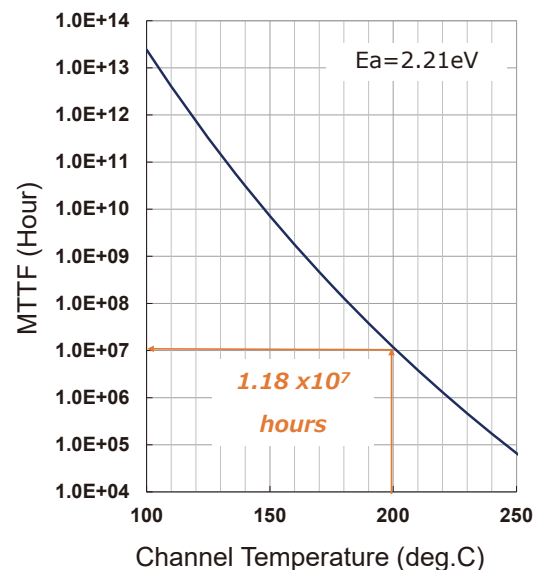


図10 RF HTOLのMTTF

5-2 耐放射線試験

耐放射線性は、宇宙空間で使用される上で重要な要素である。一般的に、シングルイベント効果 (SEE^{*5})、トータルドーズ効果 (TID^{*6})、陽子線照射の3種類の放射線試験がある⁽²⁾。これらの試験の中で、GaN HEMT に対して最も重要と考えられる SEE を実施した。S 通常バイアス条件において RF 動作させた状態 (条件 A) とピンチオフさせて RF 信号を入力しない状態 (条件 B) の2つの条件で試験を実施した。SEE の試験結果を表3に示す。条件 A では、GaN HEMT に壊れは発生しなかった。条件 B では図11に示す安全動作領域 (SOA) を得ることができた。GaN HEMT の焼損が $V_{DS} = 195V$ 以上で発生していることがわかる。これは $V_{DS} = 50V$ の3倍以上であり、通常動作に十分な値である。これらの結果から、当社の GaN HEMT 技術は放射線に対して十分な信頼性を有することを確認した。

表3 シングルイベント効果 (SEE)

条件A. RF動作時

線種	^{132}Xe
エネルギー [MeV]	650
フルエンス [個/cm ²]	~ 3×10^5
フラックス [個/cm ² /sec]	~ 3000
LET ^{*7} (Si) [MeV·cm ² /mg]	66.3
ドレイン電圧 V_{DS}	~ 53V
ドレイン電流 I_{DS} (DC)	250mA
出力レベル	~ 4dB利得圧縮点

条件B. ピンチオフ動作、RF入力なし

線種	^{132}Xe	^{124}Xe
エネルギー [MeV]	650	420
フルエンス [個/cm ²]	~ 3×10^5	
フラックス [個/cm ² /sec]	~ 3000	
LET (Si) [MeV·cm ² /mg]	66.3	67.7
ドレイン電圧 V_{DS}	~ 225V	
ゲート電圧 V_{GS}	-6V	

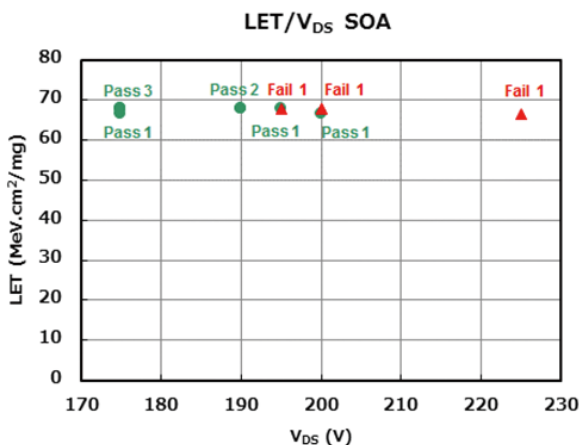


図11 RF入力なしでのSEEによる安全動作領域

6. C帯100W、200W ラインナップ

C帯100Wの評価結果と現在並行して開発を進めているC帯30Wモジュールとの組合せを図12に示す。トータル利得40dBで出力100Wのラインナップを実現し、100W デバイスを並列に構成することによって、200Wのラインナップも可能となる。

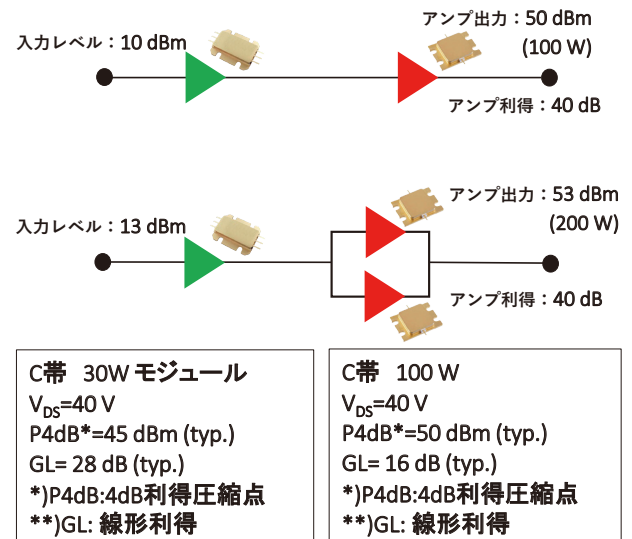


図12 C帯100W、200Wラインナップ構成

7. 結 言

本稿では、当社が開発した高信頼性 GaN HEMT テクノロジを適用した、C帯100Wパワーアンプの設計および試作した結果について報告した。得られた特性は、C帯パワーアンプとして業界トップクラスの性能を達成し、フルバンド (f = 3.7~4.2GHz) での電力付加効率60%は業界初である。C帯100Wパワーアンプに適用した GaN HEMT は、衛星搭載用認定試験・耐放射線試験に合格しており、宇宙空間においても十分な信頼度が得られていることを確認した。以上の結果から、我々は衛星搭載用 GaN HEMT SSPA の実現可能性を実証した。また並行して開発を行っているC帯30Wモジュールとの組合せにより、トータル利得40dB、C帯100W、200W級のラインナップが、衛星搭載用として実現可能となる。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・低コスト化の GaN HEMT テクノロジ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 内部整合型増幅器

トランジスタと共に整合回路用の基板をパッケージ内に実装し、互いにワイヤーで結線した高周波増幅器用デバイス。基板の素材や形状及びワイヤーの長さは、トランジスタや周波数に合わせて適切に調整される。

※3 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。

※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ている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 SEE

Single Event Effect : 1個の高エネルギー粒子 (陽子・重イオンなど) が半導体デバイスに入射し、電離作用により高密度の電荷が生成されることにより一時的な誤動作や永久的な故障が起こる効果をいう。

※6 TID

Total Ionizing Dose Effects : 宇宙放射線によって発生した電子・正孔のうち、正孔が集積回路の絶縁物に蓄積することにより素子特性が少しずつ変化し、ついに特性が劣化して故障していくもので、積算線量効果と呼ばれる。

※7 LET

Linear Energy Transfer : 線エネルギー付与。粒子が物質中で単位体積密度、単位長さ当たりどのくらいのエネルギーを周囲に与えるかを表す量。

参考文献

- (1) F. V. Rijs et.al, "Efficiency improvement of LDMOS transistors for base stations: towards the theoretical limit," 2006 IEDM Digest
- (2) Mantech Digest
H. Yoshikoshi et.al, "Radiation Hardness Tests for Space Qualified X-band AlGaIn/GaN HEMTs," 2015 Reliability of Compound Semiconductor Workshop

執筆者

児玉 晃忠* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



大沢 研 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 主席



石山 重行 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 課長



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