

# GaNマイクロ波帯増幅器技術

中山正敏\* 塚原良洋\*\*  
 山中宏治\* 平野嘉仁\*  
 内田浩光\*

## GaN Microwave High Power Amplifiers

Masatoshi Nakayama, Koji Yamanaka, Hiromitsu Uchida, Yoshihiro Tsukahara, Yoshihito Hirano

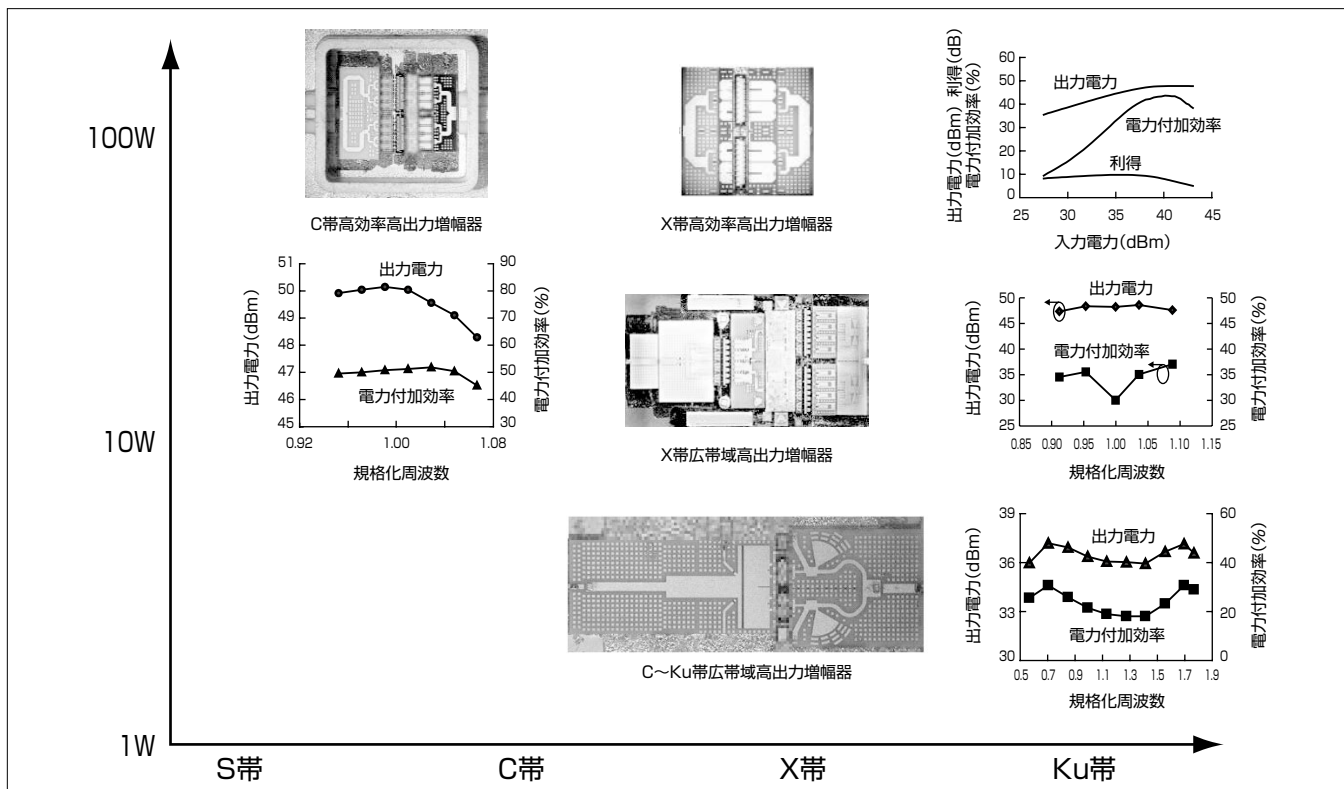
### 要旨

近年、マイクロ波帯の高出力増幅器としてGaN HEMT (Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor)を用いた増幅器が本格的に使われてきている。GaN HEMTは従来のGaAs HEMTに比べ高電圧で動作し比較的インピーダンスも高いことから、高出力増幅器の高出力化、高効率化、広帯域化に寄与することが期待されている。一方、小さな半導体チップで大きな電力が発生するため、より高効率化が求められている。動作周波数や帯域、出力に応じた回路技術を用いて高出力増幅器を構成することが必要である。三菱電機は、C帯、X帯<sup>(注1)</sup>での高効率高出力増幅器、ならびにC~Ku帯<sup>(注1)</sup>での広帯域増幅器を開発した。本稿

ではこれらの回路技術と得られた性能について述べる。

C帯では高調波に対する整合回路の反射位相(インピーダンス)を最適化することによって高効率を実現し、100Wクラスの出力電力増幅器で50~60%の電力付加効率を実現している。X帯では非対称形状の整合回路とすることで単位トランジスタへの不等分配合成を防ぐ回路構成を用い高効率高出力特性を実現した。また広帯域特性を実現するために2段増幅器で段間整合回路を帯域通過フィルタ型構成とした増幅器についても述べる。20%の帯域で出力50W以上が得られている。C~Ku帯で3倍帯域を実現する広帯域増幅器では、トランジスタ素子に含まれる容量を回路構成要素の一部として利用した整合回路を構成することで、3倍という非常に広い周波数範囲で高出力高効率を実現した。

(注1) 周波数帯の名称は、マイクロ波の周波数をそれぞれ以下の範囲で分類し呼称されているものである。  
 S帯(2~4GHz)、C帯(4~8GHz)、X帯(8~12GHz)、  
 Ku帯(12~18GHz)



### GaNマイクロ波帯高出力増幅器

各周波数帯用に開発したGaN増幅器の写真と代表的な特性を示す。横軸方向の位置は周波数帯、縦軸方向の位置は出力を表している。

### 1. ま え が き

従来、マイクロ波帯の出力電力が1 W程度から100W以下の高出力増幅器ではGaAs系のFET(Field Effect Transistor)素子が広く用いられてきたが、近年、より高電圧で動作し数倍の高電力密度が得られるGaN HEMTによる増幅器が本格的に使われてきている。GaN HEMTは高出力化への期待はもちろん、高電圧で動作するためGaAs素子に比べて相対的に素子のインピーダンスが高く、これを50Ωに変換する整合回路のインピーダンス変換比も小さくなるため、広帯域化や整合回路損失低減による効率向上が期待されている。一方では小さなチップ面積から大きな出力電力が得られるということはGaAs素子と同じ効率であっても発生する熱も大きくなり、放熱や素子信頼性の面からも、高効率化が望まれることとなる。このような特徴を考慮し、動作周波数や帯域、出力に応じた回路技術を用いて高出力増幅器を構成することが必要である。

当社では、GaN HEMTによるC帯、X帯での高効率高出力増幅器、ならびにC~Ku帯での広帯域増幅器を開発した。本稿ではこれらの回路技術と得られた性能について述べる。

### 2. GaN HEMT素子

GaN HEMTでは、パルス条件で電流電圧特性(パルスIV特性)を測定した場合に、静的な条件で測定した場合に比べドレイン電流が少なくなる現象が観測されることがある。これは電流コラプスと呼ばれ、この現象が発生すると実効的なニー電圧(飽和領域と線形領域の境界電圧)が高くなり、ドレインに流れる電流の最大値も小さくなるため効率や出力電力が低下する。この現象はデバイス表面のトラップ(一時的に電子が捕らえられる準位)が大きな原因と考えられており、この影響を小さくするデバイス構造が検討されている。

当社製のGaN HEMT素子ではCat-CVD(Catalytic Chemical Vapor Deposition)法を用いた表面保護膜形成技術を応用して、デバイス表面のトラップを減少させることで電流コラプスを抑制し、パルスIV特性の改善ひいては素子効率の向上を実現している<sup>(1)</sup>。またドレイン電極部分にSiイオンを注入して接触抵抗を小さくすることでドレイン効率の改善、さらにSiC基板にVia Holeを設けることで利得の改善によってトランジスタ素子としての電力付加効率を向上させた<sup>(2)</sup>。この素子を用いて以下の各種マイクロ波高出力増幅器を開発した。

### 3. C帯高効率高出力増幅器

C帯は各種レーダや衛星通信、固定通信などで広く用いられており、この周波数帯における高出力増幅器の高効率

化要求は強い。我々は高調波反射回路によって高効率化を実現したC帯高効率高出力増幅器を開発した(図1)。マイクロ波高出力増幅器の高効率化手法としてトランジスタで発生した高調波を反射して効率を向上させる方法がF級増幅器などとして知られている。特に2倍波を反射させることによる効率向上の効果は大きいですが、一般にトランジスタ素子から見た2倍波の反射位相によって得られる効率は変化するため、反射位相を最適化する必要がある。そこで増幅器回路設計にあたって素子特性評価用の小さなサイズ(ゲート幅)のGaN HEMT素子について高調波に関するロードプル・ソースプル(インピーダンスを変えて特性を測定する手法)を行い最適な反射位相条件を決定した。高効率化のためには出力側整合回路についてはもちろんのこと入力側整合回路についても2倍波反射位相を最適化する必要がある。図2に小ゲート幅素子について測定した入力側の2倍波反射位相に対する電力付加効率の依存性を示す。反射位相によって最大12%程度の効率の違いがあり、入力側整合回路についても2倍波反射位相を考慮した回路設計が必要なが分かる。さらに、ある程度の広帯域特性を要求されるアプリケーションでは2倍波反射回路の周波数特性を考慮することが必要である。図3は開発したC帯高効率高出力増幅器の入力側整合回路の構成を模式的に表したものである。この増幅器は高出力電力を得るために1チップの中に単位トランジスタを8個並列に並べた構造になっているが、整合回路基板には各単位トランジスタに対して2倍波の反射回路を持つ構成としている。素子近傍で反射回路を設けるこのような回路構成とすることで、周波

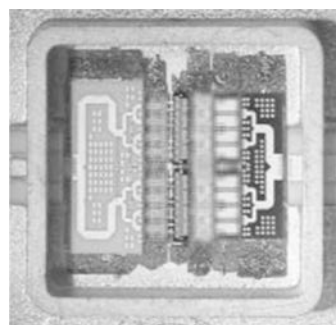


図1. C帯高効率高出力増幅器

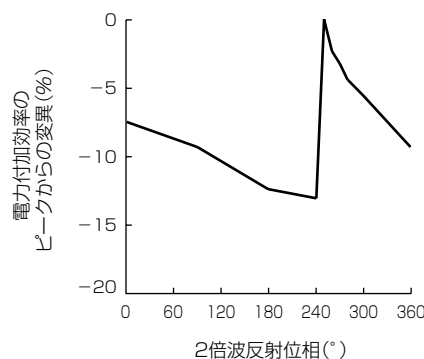


図2. 入力側2倍波反射位相と効率

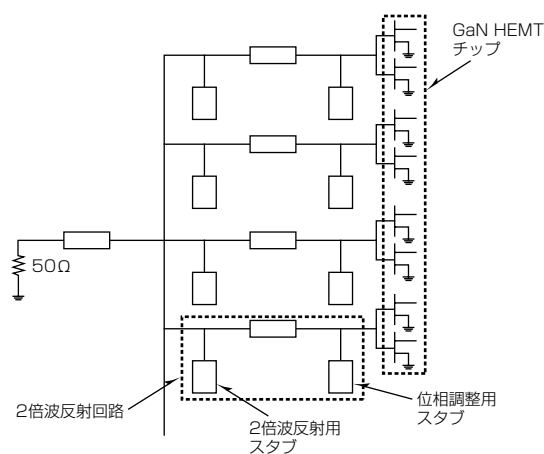


図3. C帯高効率高出力増幅器の入力整合回路

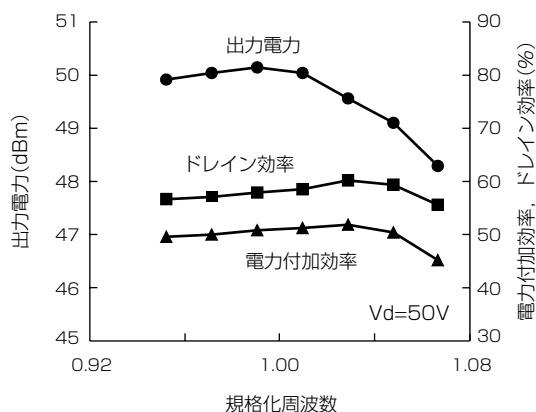


図4. C帯高効率高出力増幅器の周波数特性

数による反射位相変化を低減し、かつ各単位のトランジスタが均一に動作することが可能になっている。図4にパルス動作時のこの増幅器の周波数特性(測定結果)を示す。10%程度の帯域にわたって高効率を得られている。なお図1に示す増幅器回路の実効的なサイズは8×7(mm)である。

また、当社は4GHz帯の衛星搭載用として、連続波動作で出力電力100Wクラスの高効率増幅器(内部整合FET)も開発している。この増幅器の設計でも最適な2倍波反射位相を実現しつつ、出力側の整合回路損失を低減することで高効率化を図り、電力付加効率60%を実現した。この増幅器は衛星搭載用としても十分な信頼性が確認されている<sup>(4)</sup>。

#### 4. X帯高出力増幅器

X帯は高分解能の各種レーダに用いられており、この周波数帯でもGaN HEMTを用いた高効率高出力増幅器が望まれている。我々はX帯で動作する2種類の高出力増幅器を開発した。より高い周波数での動作を実現するためにゲート長を短ゲート化し、ゲートフィンガ長さも小さくしたGaN HEMTトランジスタ素子を用いている。

X帯増幅器でも、高効率化のためには高調波の反射位相を最適化することは重要である。しかしながらX帯の2倍

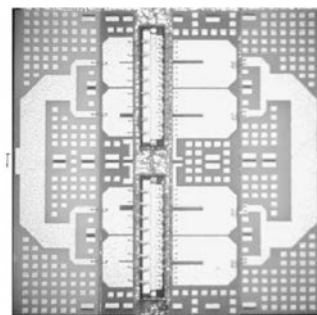


図5. X帯高効率高出力増幅器

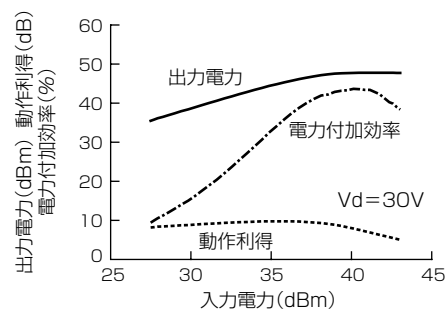


図6. X帯高効率高出力増幅器の特性



図7. X帯広帯域高出力増幅器

波は準ミリ波帯となるために、トランジスタから出力される2倍波の絶対値も小さく、その影響もC帯などの低い周波数に比べれば相対的に小さい。一方、波長が短いため、分配合成回路を兼ねる入出力整合回路で、整合回路の給電点(入出力点)から各単位トランジスタまでの経路差によって発生する不等分配合成が問題となってくる。この不等分配合成による影響は、単に各単位トランジスタから得られる出力電力の合成損になるだけではなく、各単位トランジスタから見た負荷インピーダンスが不均一になり最適インピーダンスが実現できないという問題も発生させる。この問題を解決するために、分配合成回路を兼ねる入出力整合回路をあえて非対称形状とすることで、各単位トランジスタへ電氣的には等振幅・等位相で分配・合成され、かつトランジスタから見たインピーダンスが最適となるように回路を設計した。この技術によって開発したX帯高効率高出力増幅器を図5に示す<sup>(5)</sup>。写真に示されている増幅器の大きさは7×7.1(mm)である。図6に出力電力・電力付加効率・動作利得を示す。飽和電力は60.3W、このときの電力付加率は43.4%を実現しており、この出力電力を持つ増幅器としては世界トップクラスの効率を得られた。

X帯で広帯域で高出力を得る増幅器も開発した<sup>(6)</sup>。図7

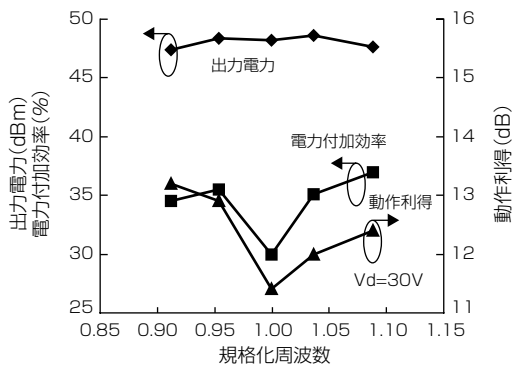


図8. X帯広帯域高出力増幅器の周波数特性

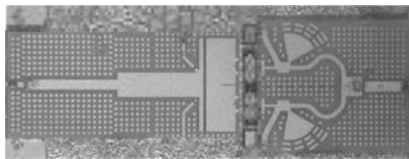


図9. C~Ku帯広帯域高出力増幅器

に写真を示す。広帯域化のために段間の整合回路を帯域通過フィルタ型構成とした2段増幅器を構成している。段間のインピーダンスは必ずしも50Ωではなく、入出力が50Ωに整合された単段の増幅器を2段縦列接続する場合よりも広帯域な特性が得られる。図8に出力電力、動作利得、電力付加効率の周波数特性を示す。X帯で20%程度の帯域にわたって50W以上の高出力特性を実現している。

### 5. C~Ku帯3倍帯域増幅器

比帯域が100%，すなわち2倍帯域を超える様な非常に広い帯域の増幅器はGaN HEMTの高電力密度特性を活用できる増幅器の一つである。GaAs HEMTでは困難であった高出力広帯域の増幅器を構成することが可能である。当社は図9に示すC帯からKu帯の3倍帯域を持つ高出力増幅器を開発した<sup>(7)</sup>。GaN素子の高インピーダンス特性は広帯域な整合回路を実現するためには有利であるが、より広帯域に高出力高効率な特性を得るためには、素子に含まれる容量を考慮した上で整合回路を設計する必要がある。GaN HEMTの出力側等価回路は近似的には抵抗と容量の並列回路で現されるが、このことに注目し整合回路をインダクタと容量の並列共振回路と分布定数線路からなる帯域通過フィルタ型構成にすることで広帯域に最適な負荷インピーダンスを実現する回路構成としている(図10)。これによって、図11に示す広帯域に高効率な増幅器を実現することができた。

### 6. む す び

マイクロ波増幅器の高出力化・高効率化が期待されるGaN増幅器の開発例を述べた。C帯，X帯での高効率高出

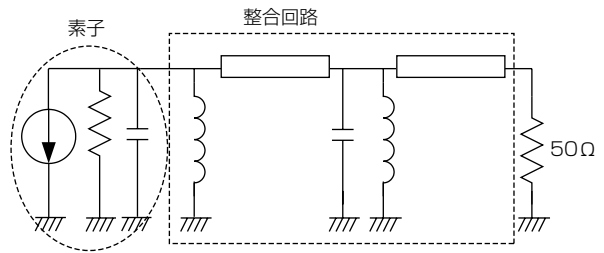


図10. 広帯域整合回路

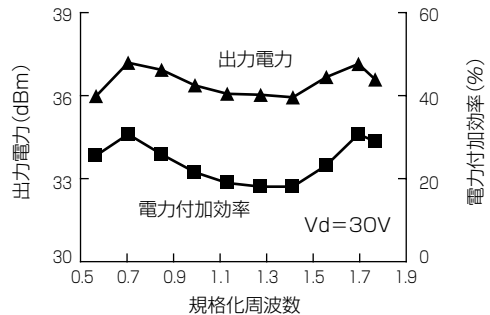


図11. C~Ku帯増幅器の周波数特性

力増幅器，及びC~Ku帯での広帯域増幅器の回路構成とその性能について述べた。いずれも従来のGaAs素子を用いた増幅器では得られない大きな出力電力を実現できた。また各増幅器の効率も世界トップレベルの性能が得られた。

### 参 考 文 献

- (1) 加茂宣卓，ほか：Cat-CVD法によって保護膜形成したC帯100W超級GaN-HEMT，三菱電機技報，80，No.5，333~336 (2006)
- (2) 山本佳嗣，ほか：60W出力C帯広帯域高効率GaN-HEMT，三菱電機技報，82，No.6，385~388 (2008)
- (3) Otsuka, H., et al.: Over 57% efficiency C-band GaN HEMT High Power Amplifier with Internal Harmonic Manipulation Circuits, 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 311~314 (2008).
- (4) Yamasaki, T., et al.: A 68% Efficiency C-Band 100W GaN Power Amplifier for Space Applications, 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1384~1387 (2010)
- (5) 木村実人，ほか：X帯60W高効率GaN内部整合FET，電子情報通信学会ソサイエティ大会，C-2-27 (2008)
- (6) 内田浩光，ほか：X帯50W内部整合GaN-FET-BPF設計思想に基づく広帯域インピーダンス整合回路，電子情報通信学会ソサイエティ大会，C-2-21 (2010)
- (7) 桑田英悟，ほか：C-Ku帯GaN HEMT 3倍帯域高効率高出力増幅器，電子情報通信学会技術研究報告，MW-109，205~208 (2009)