

GaN HEMT素子の通信用途に向けた 実用化への取り組み

Activities Related to Practical Realization of GaN HEMT Products for Satellite Communication Applications

松下 景一

高木 一考

■ MATSUSHITA Keiichi

■ TAKAGI Kazutaka

マイクロ波半導体の窒化ガリウム (GaN) HEMT (High Electron Mobility Transistor : 高電子移動度トランジスタ) は、従来から用いられているヒ化ガリウム (GaAs) FET (Field Effect Transistor : 電界効果トランジスタ) と比べて高出力電力化が可能であるとともに、HEMT 構造によって優れた高周波特性が得られる。そこで東芝は、C帯 (4 ~ 8 GHz)、X帯 (8 ~ 12 GHz)、及びKu帯 (12 ~ 18 GHz) の各周波数帯の GaN HEMT 素子をラインアップしてきた。高出力電力という特長から、レーダ用途では実用化の広がりを見せているが、通信用途では必ずしも実用化が進んでいないのが現状である。これは通信用途に求められる動作時の入出力特性の線形性に対する懸念がその一因である。

今回当社は、製品化したKu帯のGaAs FETとGaN HEMTについて特性を比較し、使用されるバックオフ条件下で、両者の線形性は同等であるがGaN HEMTのほうが出力電力が高く、利得及び電力付加効率で優れていることを確認した。このように、GaN HEMTは通信用途でも有効な素子となりえることから、実用化に向けた取り組みを進めている。

Compared with conventional gallium arsenide (GaAs) field-effect transistor (FET) products, gallium nitride (GaN) high-electron-mobility transistor (HEMT) products offer higher output power and higher frequency characteristics.

Toshiba has developed and released a lineup of GaN HEMT products targeted at C-band (4-8 GHz), X-band (8-12 GHz), and Ku-band (12-18 GHz) applications. Although GaN HEMT products are in practical use for radar systems due to their high output power capability, they are not widely accepted in the field of communication applications because the gain and efficiency of GaAs FETs is considered to be better than those of GaN HEMTs. Through a comparison of the performance of GaN HEMT and GaAs FET products in the backoff condition for Ku-band satellite communication systems, we have confirmed that the GaN HEMT product achieves not only higher output power but also higher gain and efficiency than the GaAs FET product. Based on this result, we are making efforts to apply GaN HEMT products to satellite communication systems.

1 まえがき

マイクロ波半導体は、衛星通信システムや、地上通信システム、航空機・船舶・気象監視用レーダシステムなどで高周波信号の電力増幅用に広く使われている。従来、これらの用途にヒ化ガリウム (GaAs) FET (Field Effect Transistor : 電界効果トランジスタ) 素子が用いられてきたが、近年、窒化ガリウム (GaN) HEMT (High Electron Mobility Transistor : 高電子移動度トランジスタ) 素子とその材料特性の優位性から新たに注目されている。

GaN HEMTは、絶縁破壊耐圧の高さと使用可能な電流密度の大きさから実現される高出力特性、及びHEMT構造による優れた高周波特性という特長を併せ持つ。特にGaN HEMTは、GaAs FETに比べて高い出力電力が得られることから、高出力電力のレーダシステムへの適用が進んでおり、東芝は、C帯及びX帯をはじめとする気象レーダシステムなどへの適用を進めている。

しかし、Ku帯 (12 ~ 18 GHz) などの通信用途では、GaN HEMT素子の適用例はまだ限られているのが現状である。

これは、飽和出力電力として高出力電力が求められるレーダ用途と異なり、通信用途では信号歪 (ひずみ) が発生しないように入出力特性に線形性が求められることが一因と考えられる。一般にGaN HEMTは、GaAs FETと比べて、電流コラプスと呼ばれる電流の低下現象による信号の歪特性が悪く、飽和出力電力が高くても通信用途ではさほどメリットがないと考えられていた。

ここでは、まずレーダ用途を想定して、X帯のGaAs FETとGaN HEMTの特性比較を行い、GaN HEMTの特長である飽和出力電力の高さを生かした気象レーダへの適用例について述べる。次に通信用途を想定して、Ku帯のGaAs FETとGaN HEMTの特性比較を行い、このような通信用途でもGaN HEMTに優位性があることを示すとともに、この特性を生かした衛星通信システムへの適用例について述べる。

2 X帯レーダ用素子の特性比較

現在、X帯のGaAs FET 1素子の出力電力は最大30 Wであるが、GaN HEMTではより小型のパッケージで50 Wの出力

力電力を得ることができる。ここでは、主にレーダ用途として使用されるX帯の50 W GaN HEMT⁽¹⁾と30 W GaAs FETの特性比較を行う。

それぞれの入出力特性を図1に示す。一般的な素子特性として、入力電力が低い場合は入力電力の増加に比例して出力電力も増えていくが、入力電力が高くなると出力電力は飽和し、入力電力の増加に比例して出力電力が増えなくなる。こうした出力飽和領域で電力増幅素子を使うことで電力付加効率(PAE)がピーク値に近くなる。電力増幅素子の性能を示す指標として、出力飽和付近の入力電力、出力電力、利得、及びPAEを比較した結果を表1に示す。

一般に、レーダ用途では高い出力電力が要求されることか

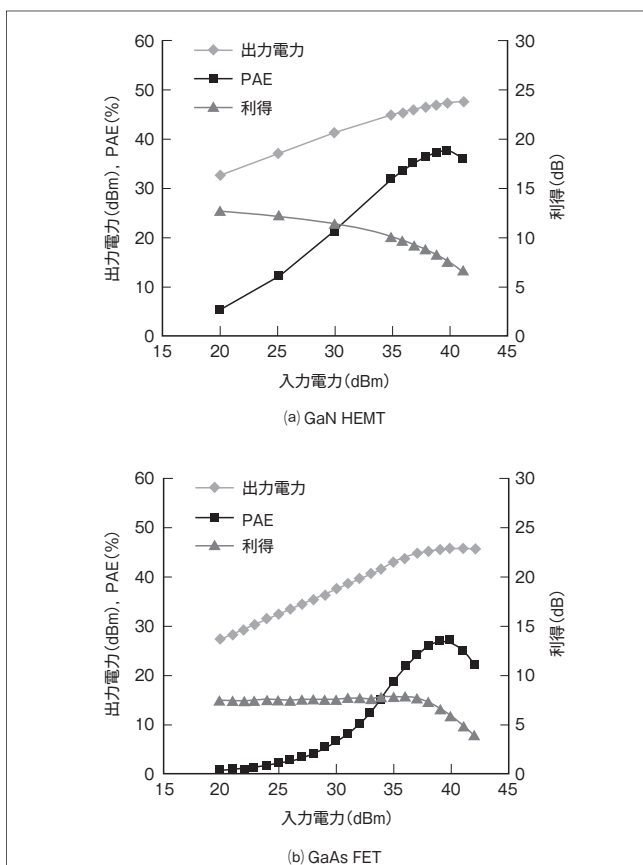


図1. X帯のGaN HEMTとGaAs FETの入出力特性(10 GHz) — レーダ用途では高い出力電力が要求されることから、出力飽和領域付近で素子を動作させる。

Input-output characteristics of X-band GaN HEMT and GaAs FET at 10 GHz

表1. X帯のGaN HEMTとGaAs FETの特性比較

Comparison of performance of X-band GaN HEMT and GaAs FET

素子	入力電力 (dBm)	出力電力 (dBm)	利得 (dB)	PAE (%)
GaN HEMT	40.0	47.4	7.4	37
GaAs FET	37.3	44.7	7.6	24

ら、電力増幅素子を出力飽和領域付近で動作させる。表1から、出力飽和領域付近でのGaN HEMTの出力電力は47.4 dBm(約55 W)とGaAs FETの出力電力44.7 dBm(約30 W)に比べて約2倍の出力電力が得られる。またそのとき、GaN HEMTのPAEはGaAs FETのそれと比べて10%以上高く、消費電力を抑えることができる。これらにより、レーダ用途ではGaAs FETよりもGaN HEMTが有利なデバイスであることがわかる。

3 X帯レーダへのGaN HEMT適用事例

X帯気象レーダは、降水分布や降水域中の風向と風速などを観測して、ゲリラ豪雨と呼ばれる突発的な局地的豪雨などによる気象災害の予測に役だっている。従来、X帯気象レーダの電力増幅器には高い出力電力が得やすい、真空管の一種であるクライストロンを用いていた。固体化すれば高圧電源が不要になることや、スプリアスが小さいこと、更に長寿命などの利点があることから、その固体化が望まれていた。しかしGaAs FETでは、素子を多数並列に接続することで高い出力電力を得ることができるが、電力増幅器のサイズが非常に大きくなってしまいう問題がある。

そこで当社は、GaN HEMTを採用することで小型の固体電力増幅器を実現した。X帯50 W GaN HEMTを4素子合成することで出力電力200 Wの固体電力増幅器⁽²⁾を構成し、これを水平偏波用と垂直偏波用として使用する気象レーダシステム⁽³⁾を開発した(図2)。X帯GaN HEMTの採用により、固体電力増幅器とともにシステム全体の大幅な小型化に成功し、設置場所の制約が少なくなったことでレーダの設置が容易になった。

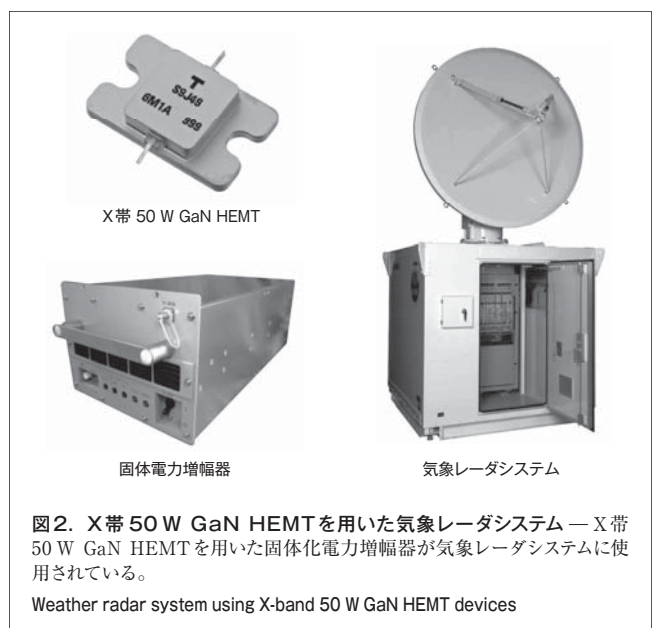


図2. X帯50 W GaN HEMTを用いた気象レーダシステム — X帯50 W GaN HEMTを用いた固体化電力増幅器が気象レーダシステムに使用されている。

Weather radar system using X-band 50 W GaN HEMT devices

4 Ku帯通信用途における素子の特性比較

通信用途として使用されるGaAs FETでは、現在のところ前述のX帯素子の場合と同様にKu帯の30 W素子が高出力電力が高い。ここでは、Ku帯通信用途における使用条件で、その素子とより小型のパッケージ製品であるKu帯の50 W GaN HEMT⁽⁴⁾の特性を比較した。

それぞれの入出力特性を図3に示す。一般に、出力電力が入力電力に比例する線形領域を過ぎて、入力電力が更に増加し出力電力が飽和する領域では、出力信号波形に歪が生じることになる。入力信号として変調信号を増幅する通信用アンプでは、この波形歪を小さくする必要があり、そのため波形歪を評価する3次相互変調歪(IM3)という指標が重要になる。衛星通信用途では一般に、IM3は-25 dBc以下にすることが望ましいとされている。

また、この波形歪を減らすために通信用アンプに組み込む電力増幅素子では、出力飽和領域に達する前の低い入力電力(これをバックオフ条件と呼ぶ)で使用している。一般に、飽

表2. Ku帯のGaN HEMTとGaAs FETの特性比較(飽和時)

Comparison of performance of Ku-band GaN HEMT and GaAs FET at power saturation

素子	入力電力 (dBm)	出力電力 (dBm)	利得 (dB)	PAE (%)	IM3 (dBc)
GaN HEMT	42.0	47.0	5.0	28	-25
GaAs FET	39.0	45.7	6.7	27	-25

表3. Ku帯のGaN HEMTとGaAs FETの特性比較(7 dBバックオフ時)

Comparison of performance of Ku-band GaN HEMT and GaAs FET at 7 dB backoff

素子	入力電力 (dBm)	出力電力 (dBm)	利得 (dB)	PAE (%)	IM3 (dBc)
GaN HEMT	32.0	40.0	8.0	15	-28
GaAs FET	30.5	38.0	7.5	8	-28

和出力電力の1/4以下(6~7 dB)の出力電力となるように入力電力をバックオフしている。

出力飽和領域付近でのGaN HEMT及びGaAs FETの特性を表2に、飽和出力電力から7 dBバックオフした場合のそれぞれの特性を表3に示す。出力飽和領域付近での特性では、GaN HEMTはGaAs FETに比べて出力電力が高いものの利得が小さく、PAEはほとんど差がない。しかし、バックオフ時の特性を比較すると、GaN HEMTのほうが出力電力、利得、PAEのいずれも優れていることがわかる。また、どちらの条件でもIM3の値は同一であり、線形性も同等性能であることがわかった。

これらにより、通信用途で実際に使用されるバックオフ時の特性はGaN HEMTに優位性があり、通信用途のデバイスとして優れていると言える。

5 Ku帯通信へのGaN HEMTの適用事例

衛星通信を使用して放送局の報道やスポーツなどを中継するシステムはSNG (Satellite News Gathering) と呼ばれ、Ku帯の14.0~14.5 GHzの送信周波数が用いられる。当社は、SNG用通信衛星へ送る送信波を電力増幅する固体電力増幅器⁽⁵⁾にKu帯50 W GaN HEMTを採用した(図4)。

従来のSNGでは、高い出力電力を得るため真空管の一種である進行波管(TWT)を用いた電力増幅器が使われてきたが、TWTの寿命が短く、起動時間が長いという欠点から電力増幅器の固体化が望まれていた。これまでのGaAs FETでは出力電力が不足していたため、このような電力増幅器に適用するには能力が不十分であった。しかし、GaAs FETと同等の線形性を持つGaN HEMTの採用で高出力電力化が可

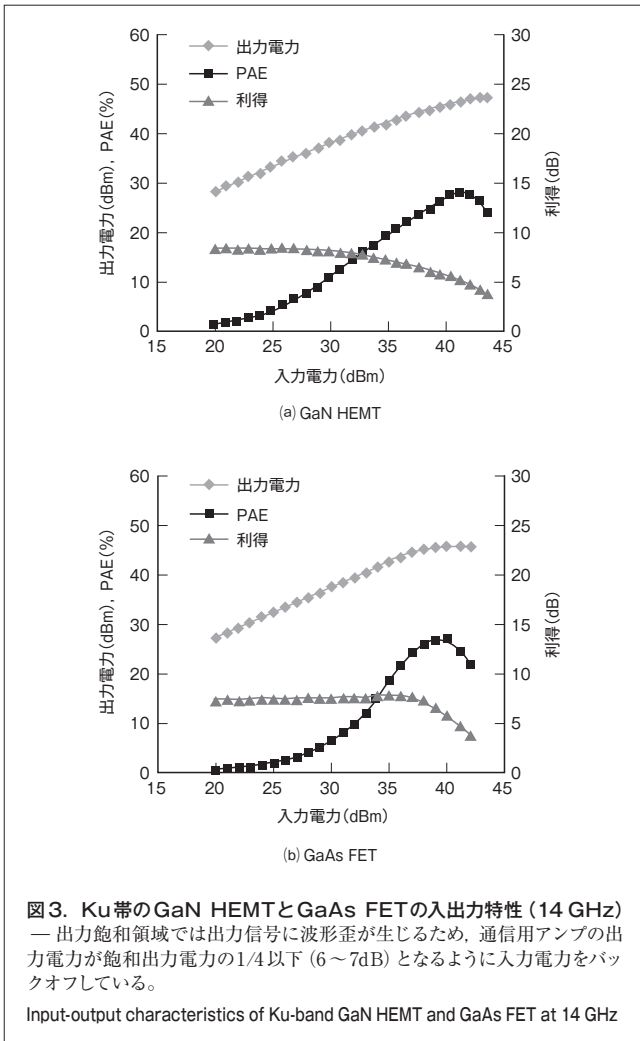




図4. Ku帯 50 W GaN HEMTを用いた移動型の衛星通信車載局
— Ku帯 50 W GaN HEMTを用いた移動型衛星通信基地局に使用されている。

Satellite communication system using Ku-band 50 W GaN HEMT devices

能になり、衛星通信システム用の固体電力増幅器を実現することができた。

6 あとがき

マイクロ波半導体において、GaN HEMT素子は、その材料特性から期待される高出力電力特性の実現を目指して開発が始まり、当社はこれまでにC帯、X帯、及びKu帯の各周波数帯で従来のGaAs FETを上回る高出力電力のGaN HEMTを製品化してきた。

ここでは、製品化したGaN HEMTの特性をGaAs FETと比較することで、レーダ用途だけでなく通信用途でもGaN HEMTが十分な優位性を持つことを示した。GaN HEMTは実用化の歴史がまだ浅く、実績も限られているが、GaN HEMTを既に採用しているレーダシステムや通信システムでは性能向上に貢献している。更に近年、通信情報の大容量化に伴って衛星通信用途ではより高い周波数帯であるKa帯(26~40 GHz)へと移行しつつあり、これに対応してKa帯の衛星通信向けGaN HEMTも開発を進めている⁽⁶⁾。

今後は、GaAs FETでは実現できなかったシステムに対してもGaN HEMTの実績を踏まえて提案し、GaN HEMTの持つ高出力特性や高周波特性を生かしたシステムの小型化及び高性能化に貢献していく。

文献

- (1) 高木一考 他. X帯 50 W級 GaN電力HEMT. 東芝レビュー. 62, 4, 2007, p.42-45.
- (2) 旭 保彰 他. X帯気象レーダ用 GaN固体化電力増幅器. 東芝レビュー. 63, 2, 2008, p.58-61.
- (3) 柏木俊治 他. 局地的集中豪雨を監視するX帯固体化気象レーダ. 東芝レビュー. 66, 4, 2011, p.36-39.
- (4) 高木一考 他. Ku帯 50 W級 GaN HEMT. 東芝レビュー. 63, 5, 2008, p.40-43.
- (5) 望月 亮 他. Ku帯衛星通信用 小型・屋外型SSPA. 東芝レビュー. 65, 11, 2010, p.46-49.
- (6) 松下景一 他. Ka帯 20 W級 GaN電力HEMT. 東芝レビュー. 66, 5, 2011, p.42-45.



松下 景一 MATSUSHITA Keiichi

社会インフラシステム社 小向事業所 マイクロ波技術部主務。
マイクロ波半導体デバイス及び半導体製造プロセスの設計・開発に従事。応用物理学会会員。

Komukai Complex



高木 一考 TAKAGI Kazutaka

社会インフラシステム社 小向事業所 マイクロ波技術部参事。
マイクロ波半導体デバイスの設計・開発に従事。応用物理学会会員。

Komukai Complex