

無線通信用 GaN HEMT の開発

GaN HEMT for Wireless Communication

佐野 征吾*
Seigo Sano

蛸原 要
Kaname Ebihara

山本 高史
Takashi Yamamoto

佐藤 富雄
Tomio Satoh

宮澤 直行
Naoyuki Miyazawa

近年、GaN HEMTは、優れた物性より携帯電話基地局などの高出力、高周波通信機に広く使われている。本報告では、当社が世界に先駆けて市場投入したGaN HEMTについてその特徴と主要特性について述べる。また、携帯電話基地局用途においては、広く使われている出力電力400WのDoherty増幅器を、その基地局間通信においては広帯域特性を有するGaN HEMTのデバイス構造、特性を示す。衛星通信用途においては、地球局用および衛星搭載用の高信頼性Ga_N HEMT、更に気象観測レーダー等に用いられる高出力GaN HEMTについても示す。当社の開発したGaN HEMTが今後の無線通信の小型化、軽量化、低消費電力化に大きく貢献することを期待する。

Gallium nitride (GaN) high-electron-mobility transistors (HEMTs) have been widely used for cellular base stations and other high-power and high-frequency applications owing to their superior material properties. This paper describes the features and characteristics of the world's first commercialized GaN HEMTs. Specifically, it introduces our 400W GaN HEMT Doherty amplifier for cellular base stations and 20W broad band GaN HEMT for fixed wireless communications. For satellite communications and weather radars, we have also developed a high-power and high-reliability GaN HEMT. These GaN HEMTs contribute to the creation of small-form-factor, light-weight, and power-efficient transmitters for wireless communication.

キーワード：Ga_N HEMT、無線通信、携帯電話基地局、衛星通信、レーダー

1. 緒 言

窒化ガリウム (Ga_N) は、シリコン (Si) や砒素ガリウム (GaAs) と比較して、バンドギャップが大きく、飽和電子速度も大きいことから、高出力かつ高速の電子デバイスへの応用が期待されている。当社は、放熱性に優れた炭化ケイ素 (SiC) 基板上の窒化ガリウム高電子移動度トランジスタ (GaN HEMT^{*1} : Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor) の開発および製品化を2000年頃より進めてきた⁽¹⁾。

図1に通信インフラ網を示す。光通信幹線網をコアとしメトロ、アクセス系光通信網とともに、無線通信網では、携帯電話通信、携帯電話基地局を結び基地局間通信、衛星通信がある。これらの無線通信網で使われる周波数は、1GHz帯から30GHz帯のいわゆるマイクロ波帯が中心であり、マイクロ波無線通信とも言われている。従来これら無線通信網に使われてきた電力増幅素子は、GaAs、Siを使ったデバイスが主であったが、近年では、通信速度の高速化にともなう高出力化要求より、高出力特性に優れたGaN HEMTが注目されている。また、航空管制、船舶監視、気象観測などのレーダー通信網においては、GaN HEMTの登場にともない、従来の真空管からの置き換え要求が増加している。

本稿は、無線通信向けに開発した高出力Ga_N HEMTについて報告する。

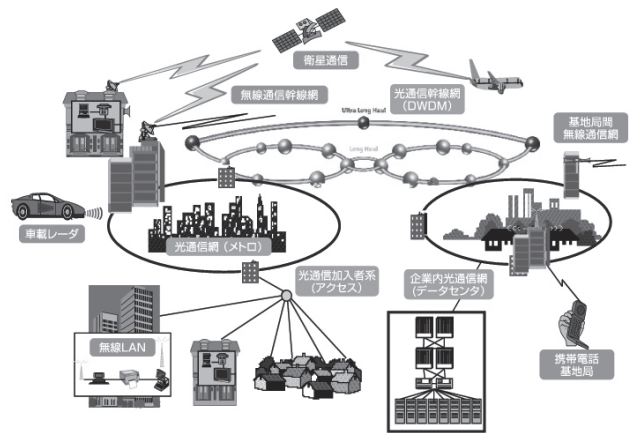


図1 通信インフラ網

2. GaN HEMT 技術

2-1 材料物性

表1にマイクロ波帯の増幅器に用いられる代表的な半導体材料の物性値を示す。GaNはSiやGaAsと比較して2倍以上の飽和電子速度 (v_{sat}) と、Siの10倍、GaAsの7.5倍の絶縁破壊電界強度 (E_c) を有する。高周波、高出力素子の性能比較には飽和電子速度と絶縁破壊電界強度に対して、 $v_{sat} \cdot E_c / 2\pi$ を指標とするJohnson性能指標が用いられる。

このJohnson性能指標で比較すると、GaNはSiと比較して27倍、GaAsと比較しても約15倍と圧倒的な優位性を有している。これがGaNが期待される主要因である。

表1 主要な半導体材料物性一覧

	Si	GaAs	GaN
バンドギャップ (eV)	1.1	1.4	3.4
飽和電子速度 ($\times 10^7$ cm/s)	1.0	1.3	2.7
絶縁破壊電界強度 (MV/cm)	0.3	0.4	3.0
電子移動度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1300	6000	1500
熱伝導率 ($\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$)	1.5	0.5	1.5
Siを1としたときのJohnson性能指数	1.0	1.7	27

図2は、表1の材料物性より推定できる周波数と増幅デバイスの出力の関係を示したものである。また、最近の各無線通信網が求める出力もあわせて示した。GaNが望ましい材料であることがわかる。

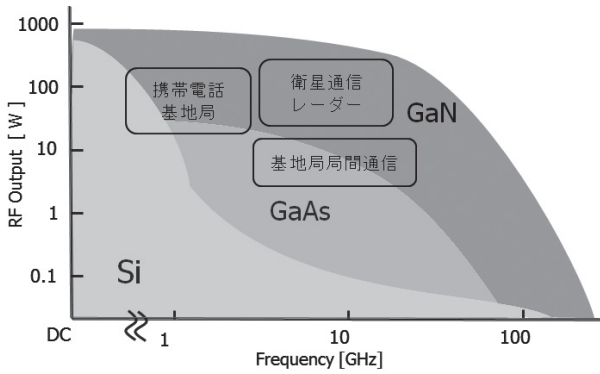


図2 材料物性と増幅器出力の関係

2-2 GaN HEMTの構造と基本特性

図3は、GaN HEMTの断面構造である。GaNはAlGaNとの異種接合によって大きなバンド不連続を形成することができ、その接合界面には高濃度の2次元電子層が発生する。さらにGaNの結晶の性質から窒化物半導体の自発分極とピエゾ分極によって高電子濃度を実現でき、非常に大きい電流密度を駆動できる。更なる高耐圧特性を得るため、電界緩和を目的とするフィールドプレート構造を採用した。なお、支持基板には、熱伝導性の高いシリコンカーバイド(SiC)基板を使用した。また各通信網に適した電力増幅利得を得るため、ゲート長などの電極構造の最適化を図った。

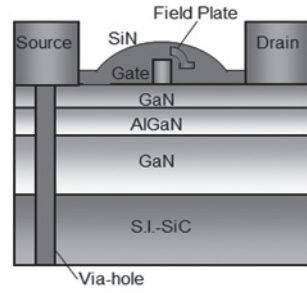


図3 GaN HEMT断面

図4はGaN HEMTのドレイン電流－ドレイン電圧 (I_{ds} - V_{ds}) の一例である。 $V_{gs} = +2.0\text{V}$ における飽和ドレイン電流は1.1A/mmと高い電流能力が得られた。また、ピンチオフ状態における3端子耐圧 BV_{dsx} は290Vが得られた。高周波動作時のドレイン－ソース間の電圧は最大で動作電圧の3倍以上が必要であり、当社GaN HEMTは50Vの動作電圧に対して十分に高い破壊耐圧を有している。

GaN HEMTの平均故障時間 (Mean Time To Failure, 略称MTTF) を図5に示す。高温通電試験結果から求めたも

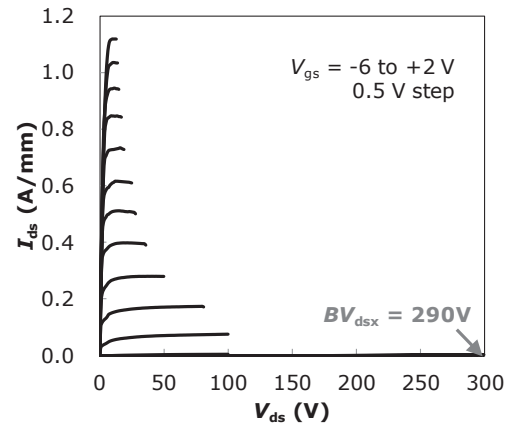


図4 GaN HEMTの I_{ds} - V_{ds} 特性の一例

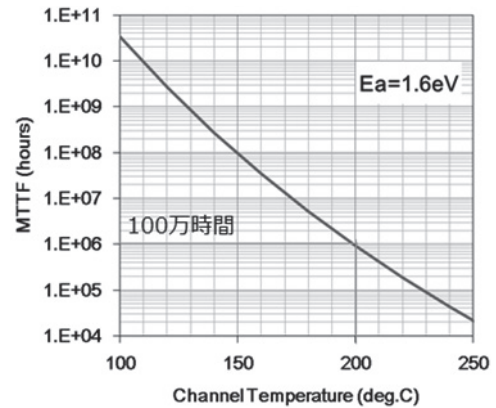


図5 GaN HEMTのMTTF

ので、チャンネル温度200℃において、100万時間のMTTFが得られている。

3. 携帯電話基地局用 GaN HEMT

現在、第4世代の携帯電話通信方式が運用されている。周波数は、概ね1GHz～3GHzのL帯が用いられる。高速な通信を実現するため、信号にはデジタル変調方式が採用されており、実際のアンテナ出力に対し約6dBから10dBほど大きい出力の電力増幅デバイスが必要となる。一般的な携帯電話基地局のアンテナ平均出力は約40Wであることから飽和電力出力400Wの電力デバイスが要求される。また、平均出力において電力損失の少ない電力増幅方式が必要となることから、Doherty増幅方式が多く採用されている。この方式は、1936年にBell研のW. H. Dohertyが提唱したもので、図6に示すようなAB級動作するメインデバイスとC級動作するピークデバイスを並列動作させることにより実現され、飽和電力出力から6dBバックオフした出力点で効率ピークをとる。6dB以上のバックオフ動作に対応するため非対称Doherty増幅方式も検討されている⁽²⁾。写真1には開発した飽和電力出力200Wの携帯電話用基地GaN HEMT EGN21C210I2Dの外観写真、写真2に本デバイスを用いたDoherty増幅器を示す。また、表2に本Doherty増幅器の主要特性を示す。飽和電力出力400W、6dBバックオフ出力時効率54%と高効率を実現している。なお、当社GaN HEMTは国内外の基地局に多く採用され、基地局の小型化、低消費電力化に寄与している。

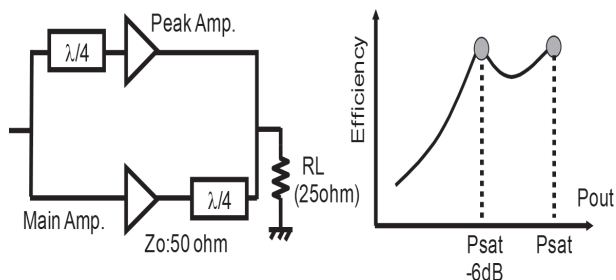


図6 Doherty増幅方式の概要



写真1 GaNHEMT EGN21C210I2Dの外観 (サイズ12.9mm×21.0mm)

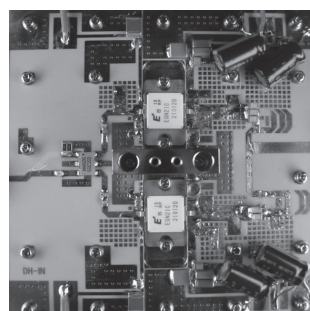


写真2 Doherty増幅器の外観

表2 EGN21C12Dを用いたDoherty増幅器特性

項目	特性	単位
周波数	2.11 ~ 2.17	GHz
ドレイン電源電圧	50	V
飽和出力電力	56 (400)	dBm (W)
6dBバックオフ時利得	16	dB
6dBバックオフ時効率	54	%

4. 基地局間通信用 GaN HEMT

3項で述べた携帯電話基地局間を結ぶ無線通信網を基地局間通信と呼ぶ。周波数は概ね6GHz～28GHzのマイクロ波帯を用いることより地上マイクロ波通信とも呼ばれている。用いられる信号はデジタル変調方式であり、近年の第4世代携帯電話通信に対応するため多値化が進んでいる。そのため、使用する増幅デバイスには高出力、高線形が求められており、従来のGaAs FET^{*2}より高出力なGaN HEMTへの要求が高まっている⁽³⁾。

写真3、表3には、それぞれ20W GaN HEMTデバイスSGK5872-20Aのパッケージ外形と主要特性を示す。パッケージ内部にはGaN HEMTに加え、外部回路のインピーダンス50Ωに整合させるためのセラミック基板上に形成した整合回路を備えている。また、GaN HEMTの特徴の一つに高電圧動作による広帯域特性がある。GaAs FETの動作電圧10Vと比較し2倍以上の24V動作を可能にするこ

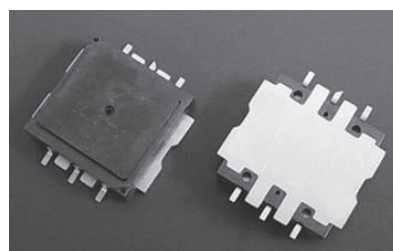


写真3 GaN HEMT SGK5872-20Aの外観 (サイズ12.9mm×13.0mm) (左：表面、右：裏面；サイズ12.9mm×13.0mm)

一つの重要な要素であり、表5に示すシングルイベント効果(SEE^{*3})放射線試験を実施し、当社のGaN HEMT技術が放射線に対しても十分な信頼性を有することも確認した⁽⁴⁾。

表5 シングルイベント効果(SEE)(RF動作時試験)

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 ^{*8} (Si) (MeV/(mg/cm ²))	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

7. レーダー用GaN HEMT

近年、航空監視、船舶監視、気象観測に用いるレーザー用送信機に求められる出力電力は数kW~数十kWにも達するため、従来これらの用途には高出力動作が可能なマグネトロンやクライストロンといった真空管による素子が主に用いられてきた。しかしながら、真空管の信頼性、また信号の雑音が大きく、占有帯域幅が広いため、周波数が近い他の無線通信システムと干渉しやすいという問題がある。このような理由から近年、固体素子であるGaN HEMTが注目されている⁽⁵⁾。

写真6は開発したレーザー用GaN HEMTの実装写真を示

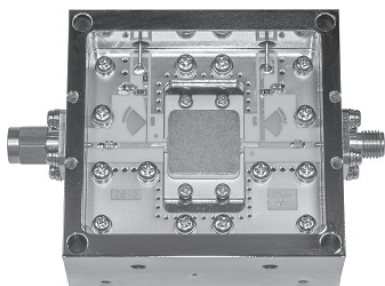


写真6 レーダー用GaN HEMTの実装写真

表6 レーダー用GaN HEMTの主要特性

項目	S帯 600W SGN2729-600H-R	X帯 200W SGC8598-200A-R
ドレイン電圧 V _{ds}	50 V	50 V
パルス幅	200 μsec	100 μsec
デューティサイクル	10%	10%
周波数(帯域全体)	2.7-2.9 GHz	8.5-9.8 GHz
飽和出力電力 P _{sat}	680 W	250 W
パワーゲイン G _p	13.2 dB	10.0 dB
電力付加効率 PAE	59%	38%

す。また、表6に、航空管制用S帯600W GaN HEMTおよびゲリラ豪雨のような局所的な気象変動を検知できるX帯気象観測用レーザー用GaN HEMTの主要特性を示す。

これらの特性は世界最高水準の特性であり、多くのレーザーに使用されている。

6. 結 言

2000年頃より研究・開発を進めてきたGaN HEMTもようやく製品化のフェーズに入り、近年では携帯電話基地局をはじめとする各種無線通信機に多く採用されている。本報告では、当社が開発した高出力GaN HEMTの特徴とその高周波特性を中心に示した。なお、これらの開発に対し平成25年度に「第2回技術経営・イノベーション賞」において「文部科学大臣賞」を受賞した⁽⁶⁾。

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 GaAs FET

Gallium Arsenide Field Effect Transistor：素材にガリウム砒素を用いた電界効果型トランジスタ。シリコンに比べ、電子が5倍近いスピードで移動できることから、マイクロ波など高周波増幅用途に適している。

※3 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。

参 考 文 献 -----

- (1) H. Sano et.al, "A 40W GaN HEMT Doherty Power Amplifier with 48% Efficiency for WiMAX Applications," 2007 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium Digest
- (2) H. Deguchi et.al, "A 2.6GHz Band 537W Peak Power GaN HEMT Asymmetric Doherty Amplifier with 48% Drain Efficiency at 7dB BO," 2012 IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest
- (3) S. Mizuno et.al, "A 5.9-8.5GHz 20Watts GaN HEMT," 2010 Asia-Pacific Microwave Conference
- (4) H. Yoshikoshi et.al, "Radiation Hardness Tests for Space Qualified X-band AlGaIn/GaN HEMTs," 2015 Reliability of Compound Semiconductor Workshop
- (5) K. Kikuchi et.al, "An 8.5-10.0 GHz 310 W GaN HEMT for Radar Applications," 2014 IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest
- (6) URL
http://www.sei.co.jp/news/press/14/prs010_s.html

執 筆 者 -----

佐野 征吾* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部 部長



蛭原 要 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部 担当部長



山本 高史 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部 担当部長



佐藤 富雄 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部 担当部長



宮澤 直行 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部 担当部長



*主執筆者