

研究トピックス



高周波高出力半導体の現状動向 および応用例

Current status trends and applications of high-frequency and high-power semiconductor devices

三菱電機株式会社 情報技術総合研究所

Masatake Hangai /Kazuhiro Iyomasa/Shintaro Shinjo

半谷 政毅

弥政 和宏

新庄 真太郎

〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1,

e-mail: hangai.masatake@cw.mitsubishielectric.co.jp

1. はじめに

高周波技術は、携帯電話等の無線通信や種々のレーダ、マイクロ波加熱など様々なシステムに応用されている。これらのシステムでは、直流電力を大電力の高周波信号に変換する高出力増幅器が広く用いられる。高出力増幅器は、出力電力・消費電力・線形性など、システム性能を決定づける最重要コンポーネントの一つである。高出力増幅器を構成するデバイスは、真空電子管と半導体とに大別できる。図 1-1 に、高周波高出力増幅器用デバイスの棲み分けを示す。同図において、半導体の出力電力は SSPA (Solid State Power Amplifier) としての値である。

クライストロンや TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier) に代表される真空電子管は、およそ 1920 年代から 1970 年代における高出力増幅器の主流であった。後述する半導体に比べて短寿命であることに加え、装置が大型であるといった問題があるが、その高出力・高効率特性ゆえ、数 10kW を超える出力電力範囲においては、未だ真空電子管の独壇場である。

一方の半導体であるが、トランジスタの実用化が 1960 年頃に始まるや否や、長寿命・小型であるという特長と、真空電子管のような高電圧を必要としない取り扱い易さ等から、急速にその適用範囲を拡げていった。特に、近年盛んに研究・開発がなされている窒化ガリウム (GaN) は、その広いバンドギャップと高い電子移動度により、従来の半導体であるシリコン (Si) やガリウム砒素 (GaAs) では実現できなかった高出力特性が得られるようになった。これにより、一部のシステムにおいては、kW 級の真空電子管を半導体に置き換える動きが始まっている。

本稿では、現在の高周波高出力半導体の主役である GaN を中心に、その高周波数化・高出力化についての現状動向を示す。また、システムへの応用例として、携帯電話基地局向け高出力増幅器、気象レーダ向け高出力増幅器およびマイクロ波加熱向け SSPA の概要を述べる。

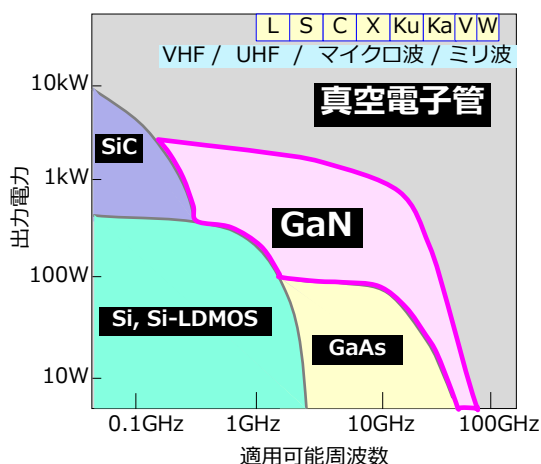


図 1-1 高周波高出力増幅器用デバイスの棲み分け
(半導体の出力電力は SSPA としての値)

2. 高周波高出力半導体の現状動向

GaN を用いた高周波高出力増幅器の、性能上の主たる課題は高周波数化と高出力化であり、図 1-1 において右上の方向へとその適用範囲を広げることである。ここでは、これらの課題に対する現状動向を示す。

2-1. 高周波数化

高周波数特性を表す指標として、遷移周波数 f_T (Transition Frequency) が広く用いられる。 f_T はトランジスタが増幅動作可能な上限周波数の一つの目安であり、概ねそのゲート長に反比例することが知られている。図 2-1 に、GaN トランジスタの発表年に対するゲート長および f_T の関係を示す。最近 20 年の間にゲートの微細化が進み、 f_T は飛躍的な向上を遂げていることが読み取れる。現状、HRL Laboratories により、ゲート長 $0.02\mu\text{m}$ の GaN トランジスタで $f_T=454\text{GHz}$ という研究室レベルでの報告例がある[1]。

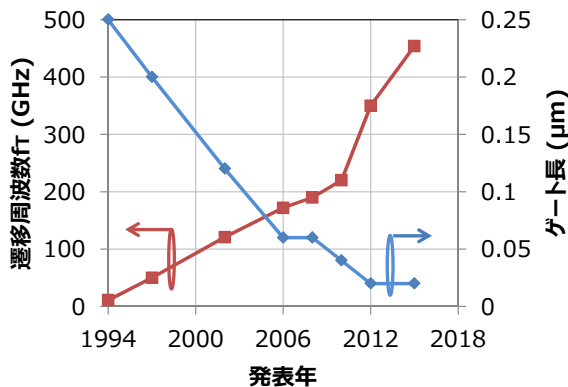


図 2-1 GaN トランジスタの発表年に対するゲート長および f_T の関係

2-2. 高出力化

出力電力を増加させる手段として一般的なのは、SSPA 化である。本項において SSPA とは、半導体高出力増幅器を複数組み合わせ、さらなる高出力化や高機能化を実現する増幅器システムのことを指す。例えば、半導体高出力増幅器を N 個並列合成することで、理想的には N 倍の出力電力が得られる。これは、位相コヒーレント性を有する半導体ならではの長所である。図 2-2 に、GaN SSPA の動作中心周波数と出力電力の

関係を示す。現状、S 帯において 10kW 超[2]、Ku 帯において 2.5kW 級[3]、Ka 帯において 500W 級[4]の報告例、製品化例がある。

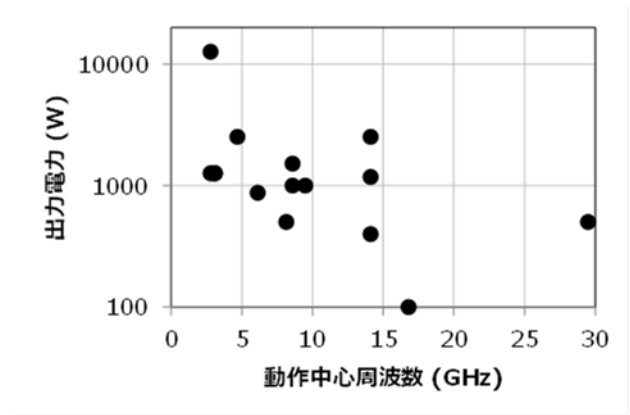


図 2-2 GaN SSPA の動作中心周波数と出力電力の関係

3. 高周波高出力半導体の応用例

GaN を用いた高周波高出力半導体の応用例を述べる。まず、携帯電話基地局向け高出力増幅器において、Si から GaN への置き換えによって、高周波数化・広帯域化を実現した例について述べる。次に、真空電子管から半導体への置き換えとして、気象レーダ向け高出力増幅器の例を述べる。最後に、マイクロ波加熱向けに、低コスト化のために GaN on Si を用いた SSPA の応用例について述べる。

3-1. 携帯電話基地局向け高出力増幅器

携帯電話基地局向け高出力増幅器には、従来 Si-LDMOS (Lateral Double diffused Metal Oxide Semiconductor) が用いられてきたが、携帯電話システムで扱う高周波信号の高周波化および広帯域化の流れを受け、GaN が台頭している。

図 3-1 に、第 4 世代携帯電話基地局向け 3.5GHz 帯 GaN 高出力増幅器[5]を示す。デジタル変調された高周波信号の平均出力電力時に高効率な特性を実現するためにドハティ増幅構成を採用し、平均出力電力 4W 時に効率 51.2% を達成している。本増幅器は、Si-LDMOS では困難な 3.5GHz 周波数帯での高出力増幅器の高効率特性を、GaN を活用することにより実現した一例である。

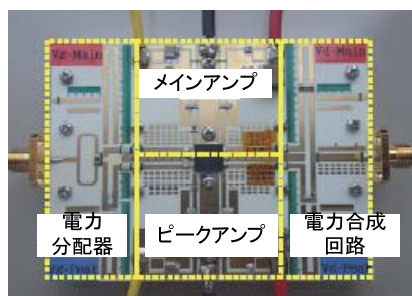


図 3-1 第 4 世代携帯電話基地局向け 3.5GHz 帯 GaN 高出力増幅器[5]

さらに近年では、GaN の有する特徴を生かした高出力増幅器のさらなる広帯域化の開発が進められている[6]-[9]。図 3-2 に、2 セル分散型広帯域 GaN 高出力増幅器[6]を示す。2 つの GaN 高出力増幅器を並列配置し、各周波数帯で基本波および 2 倍波インピーダンスの最適化をはかることにより、0.85GHz から 2.7GHz の広帯域にわたり出力電力 20 W 以上、効率 46%以上を達成している。このように、従来 Si-LDMOS が独占していた携帯電話基地局向け高出力増幅器において、今後 GaN の適用領域がますます拡大していくものと考えられる。

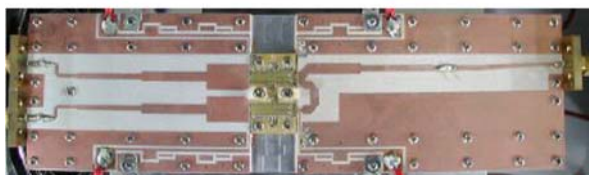


図 3-2 2 セル分散型広帯域 GaN 高出力増幅器[6]

3-2. 気象レーダ向け高出力増幅器

C 帯気象レーダ向け高出力増幅器には、従来クライストロンが用いられていたが、電波資源有効利用の観点から、低雑音化が必要となっている。ここでいう低雑音化とは、レーダ帯域外への不要放射を低減し他システムへの干渉を抑えることであり、高周波信号を高精度に波形整形することが可能な半導体でしか実現し得ない要求である。

図 3-3 に、C 帯気象レーダ向け GaN 高出力増幅器[10]を示す。本増幅器は、4 つの GaN チップからの出力電力を低損失に合成するための非対称トーナメント型回路を採用しており、出力電力 250W、効率 56%を

実現している。増幅器単体としての出力電力レベルは真空電子管のそれに比べて見劣りするものであるが、SSPA 化によって、レーダシステムとして 10kW 級の出力電力を得ることが可能である。

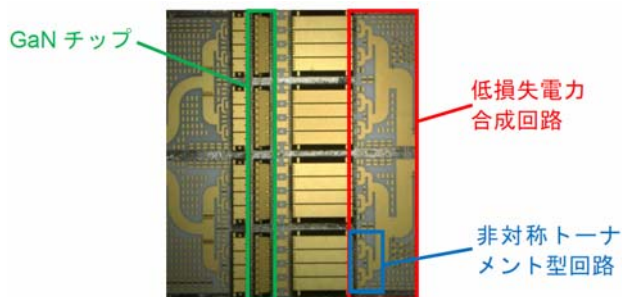


図 3-3 C 帯気象レーダ向け GaN 高出力増幅器[10]

3-3. マイクロ波加熱向け SSPA

マイクロ波を用いた産業用加熱（マイクロ波加熱）は、食品や印刷物のインク等を乾燥する手段として、すでに実用化されている。また、化学反応装置においては、マイクロ波加熱を用いることで試料を内部から加熱でき、従来の外部加熱方式に比べ収率が劇的に改善されることが知られており、そのような分野での製品出荷も始まっている。

図 3-4 に、マイクロ波加熱炉のイメージを示す。従来、マイクロ波加熱源には、その高出力電力特性ゆえ、真空電子管であるマグネトロンが主に用いられていた。一方、半導体である GaN SSPA は、増幅器単体の出力電力はマグネトロンに劣るものの、その位相コヒーレンス性を活用することで、位相制御による空間電力合成が可能である。これにより、合成した出力電力はマグネトロンに遜色ないレベルまで引き上げることができる。上述の特長に加え、この位相制御技術を応用することにより、加熱炉内におけるマイクロ波の分布を制御し、加熱効率を高めることも可能となる。

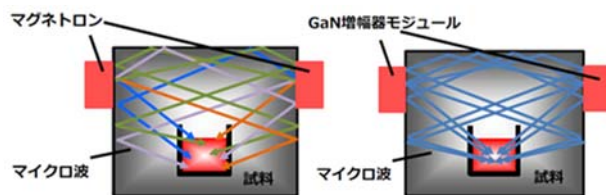


図 3-4 マイクロ波加熱炉のイメージ (左：マグネトロンを用いた場合、右：GaN SSPA を用いた場合)

このように、GaN SSPAは多くのメリットがあるが、真空電子管に比べて出力電力当たりのコストが高いというデメリットもある。これを解決する一つの手段として、通常 GaN SSPA に用いられる SiC 基板を、安価な Si 基板に置き換える方法 (GaNonSi) がある。Si 基板は SiC 基板に比べて高周波信号の損失が大きいが、S 帯などの比較的低い周波数帯においては、実用上問題のないレベルである。図 3-5 に、GaNonSi を用いたマイクロ波加熱向け 2.45GHz 帯 GaN SSPA[11]を示す。本 SSPA は 190W 級高出力増幅器を 4 合成することで出力電力 500W を得ており、高周波高出力半導体増幅器として、低コストと高出力を同時に実現している。



図 3-5 マイクロ波加熱向け 2.45GHz 帯 GaN SSPA[11]

本節への謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「クリーンデバイス社会実装推進事業/省エネルギー社会を実現する高効率高出力マイクロ波 GaN 増幅器」の成果である。

4. むすび

本稿では、近年盛んに研究されている GaN を中心に、高周波高出力半導体の現状動向を示すとともに、その応用例として携帯電話基地局向け高出力増幅器、気象レーダ向け高出力増幅器およびマイクロ波加熱向け SSPA の概要について述べた。

参考文献

[1] Y. Tang, K. Shinohara, D. Regan, A. Corrión, D. Brown, J. Wong, A. Schmitz, H. Fung, S. Kim and M. Micovic, "Ultrahigh-Speed GaN High Electron

Mobility Transistors With f_t/f_{max} of 454/444 GHz," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 36, No. 6, June 2015.

[2] G. Solomon, D. Riffelmacher, R. Snyder, M. Tracy and T. Treado, "The VSS3605, a 13-kW S-band GaN power amplifier," *Phased Array Systems & Technology Symposium* 2013.

[3] *PB-SAPPH-Ku-2500-13155 Data Sheet*, Advantech Wireless.

[4] *PB-MENTOR-Ka-500-13325 Data Sheet*, Advantech Wireless.

[5] 藤原、小坂、岡村、長明、堀口、佐々木、井上、片山、"3.5GHz 帯小型基地局用 GaN HEMT ドハティ増幅器"、2016 年電子情報通信学会総合大会、C-2-11

[6] C. M. Andersson, E. Kuwata, Y. Kawamura, S. Shinjo and K. Yamanaka, "A 0.85-2.7 GHz two-cell distributed GaN power amplifier designed for high efficiency at 1-dB compression", *Proceeding of the European Microwave Week* 2015.

[7] J. Shao, R. Ma, K.H. Teo, S. Shinjo and K. Koji, "A Fully Analog Two-Way Sequential GaN Power Amplifier with 40% Fractional Bandwidth", *Proceeding of the IEEE International Wireless Symposium* 2016.

[8] J.J. Yan, Y-P Hong, S. Shinjo, K. Mukai and P.M. Asbeck, "Broadband High PAE GaN Push-Pull Power Amplifiers for 500MHz to 2.5 GHz Operation", *Proceeding of the IEEE International Microwave Symposium* 2013.

[9] R. Ma, S. Goswami, K. Yamanaka, Y. Komatsuzaki and A. Ohta, "A 40-dBm High Voltage Broadband GaN Class-J Power Amplifier for PoE Micro-Basestations", *Proceeding of the IEEE International Microwave Symposium* 2013.

[10] 三菱電機広報発表「5GHz 帯高効率高出力 GaN デバイスを開発」, 2014 年 2 月.

[11] 三菱電機広報発表「GaN 増幅器モジュールを加熱源とする産業用マイクロ波加熱装置を開発」, 2016 年 1 月.