

X帯50 W級GaN電力HEMT

X-Band 50-W Class GaN Power HEMT

高木 一考

柏原 康

松下 景一

■ TAKAGI Kazutaka

■ KASHIWABARA Yasushi

■ MATSUSHITA Keiichi

衛星通信基地局やレーダなどで用いられるマイクロ波固体化増幅器向けの高周波・高出力素子として、X帯(8~12 GHz帯)において出力50 Wを超える、窒化ガリウム(GaN)電力HEMT (High Electron Mobility Transistor : 高電子移動度トランジスタ)の開発に成功した。

これは、既開発のC帯(4~8 GHz帯)150 W級GaN電力HEMT用プロセス技術に加え、発生する熱の分散と利得の確保を両立させたチップの構造設計技術と、長年のガリウムヒ素(GaAs)FET (Field Effect Transistor) 開発で培ってきた電力合成技術を駆使することによって、9.5 GHzにおいて最高81 Wの出力を達成したものである。これによってマイクロ波GaN電力HEMTのいっそうの高周波化が期待できる。

Toshiba has developed an X-band gallium nitride (GaN) HEMT of over 50 W. This was achieved by the optimum use of our GaN technology bases in the C-band, our expertise in semiconductor process technology, our in-depth knowledge of thermal design and internal matching. This paper reports a peak output power of 81 W at 9.5 GHz. This HEMT was used in the X-band, a frequency range used for radar and satellite communications. We are also developing a Ku-band GaN HEMT that will draw on the technology featured in the X-band GaN HEMT.

1 まえがき

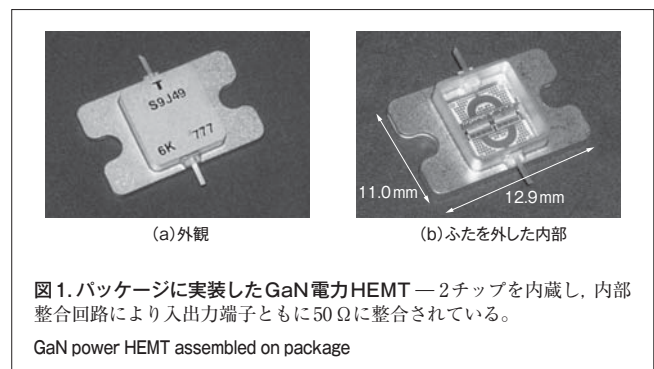
これまでX帯(8~12 GHz帯)における出力100 W級の固体化増幅器は、ガリウムヒ素(GaAs)電力FET (Field Effect Transistor)を並列接続することにより作られている。しかし、並列接続するFETを増やしていくと合成効率が下がっていくため、出力200 W級ではマグネトロンやクライストロンなどによる真空管式増幅器が用いられてきた。これら真空管式増幅器は、線形性の悪さや寿命の短さに問題があり、固体化が望まれていた。

窒化ガリウム(GaN)は、近年、青色発光ダイオードの材料として注目を集めているが、材料特性としてGaAs以上に高い飽和電子速度と絶縁破壊耐圧を持っており、マイクロ波帯以上の周波数で使用できる高出力増幅素子用材料としても有望視されている。加えて、バンドギャップ(半導体の禁制帯幅)の大きさを生かしGaAsよりも高い動作温度で動作させられるため、電力密度の限界に近づいたGaAs系材料に替わる次世代材料として期待されている。L帯(1~2 GHz帯)では200 Wを超えるものも数多く発表されているが、C帯(4~8 GHz帯)以上の周波数帯では、高出力増幅素子に関する発表は少ない。

ここでは、X帯50 W級GaN電力HEMT (High Electron Mobility Transistor : 高電子移動度トランジスタ)の概要、技術課題と解決方法、及び特性例について述べる。

2 X帯50 W級GaN電力HEMTの概要

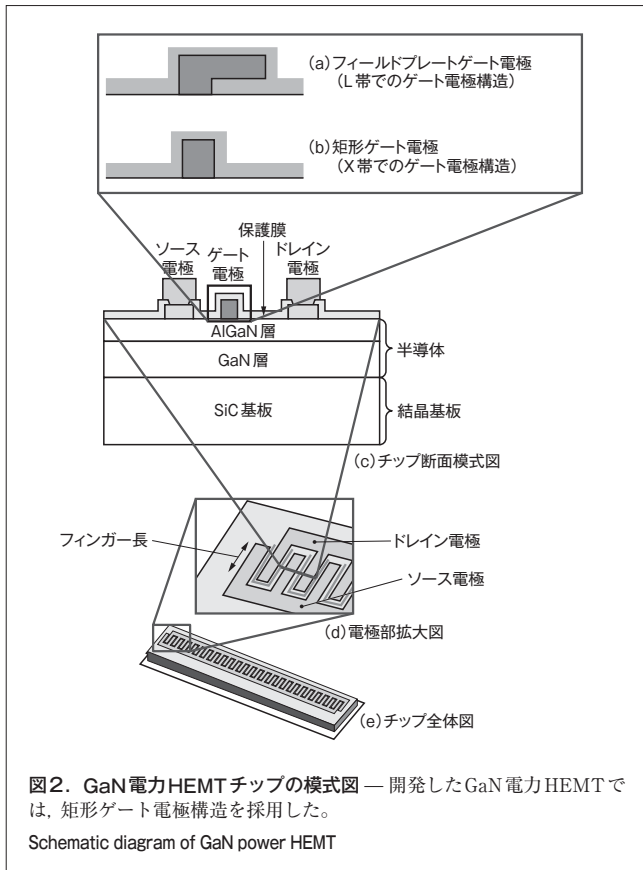
今回開発したX帯GaN電力HEMTと、そのふたを外した内部写真を図1に示す。12.9×11.0 mmのパッケージにGaN電力HEMTチップが二つ実装されている。内部整合回路により入出力端子ともに50 Ωに整合されている。



3 技術課題と解決方法

X帯での開発のポイントは利得の確保である。周波数が高くなるにつれて、寄生容量や位相差の影響を強く受けるようになり、利得は下がる。

図2はGaN電力HEMTチップの模式図である。素子の利得に余裕があるL帯では図2 (a)のようなフィールドプレー



トと呼ばれるゲート構造を用いている。この構造は電界集中を緩和し、後述の電流コラプスという現象を抑制するためのものであるが、大きな寄生容量を持つのでX帯には適用が難しい。X帯では、フィールドプレートに代わる新たな方策を見出すことが課題である。

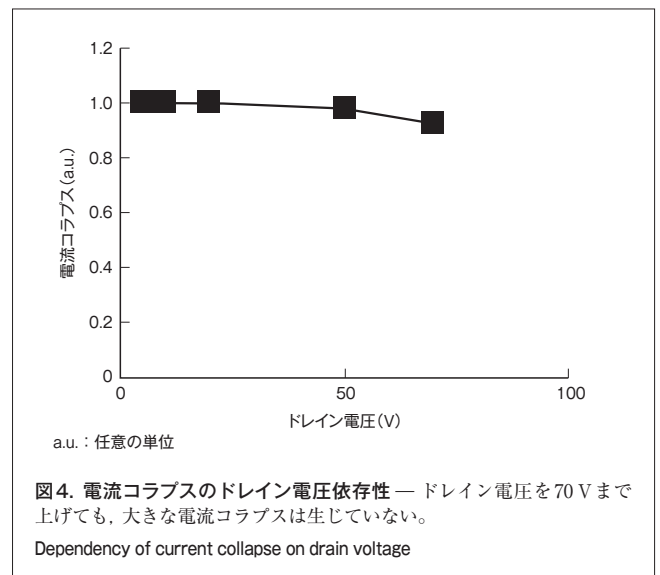
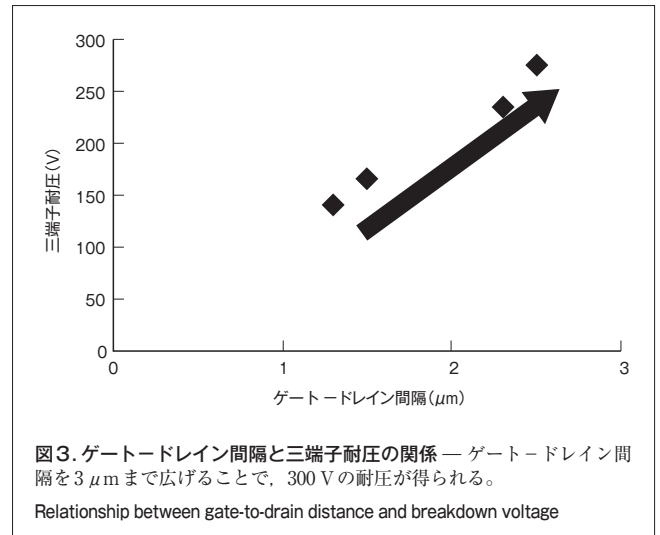
また、L帯では電力付加効率(PAE: Power Added Efficiency)^(注1)が70%と高いため問題にならないが、PAEが低いX帯では高周波信号に変換されなかったエネルギーは熱に変わるため、素子の放熱が課題である。

3.1 電界集中の緩和

図2(b)のような寄生容量の小さい矩形(くけい)ゲート構造において電界集中を緩和する方法として、電極間隔と電界強度の関係に着目した。図3に示すように、ゲートドレイン間隔を2倍(1.3 μmから2.5 μm)に広げることで三端子耐圧も2倍(140 Vから275 V)となった。言い換えれば、同じ電圧が印加されているときの電界強度が1/2に緩和されたことになる。

3.2 電流コラプスの抑制

GaN電力HEMTでは、電流コラプスと呼ばれる電流の低下現象がしばしば観測される。これは、ドレイン電圧が上昇していくとドレイン電流が減少する現象で、この現象が生じると電流振幅が小さくなるため、高い出力が得られない。電流コラプスについては、まだ原因が特定されていないもの



の、電界集中によって発生した高いエネルギーを持つ電子が、半導体中のトラップ^(注2)に捕獲されることが関係していると考えられている。

電流コラプスを抑制するために、東芝は、ゲートドレイン間隔を広げることで電界集中を緩和することに加え、半導体中のトラップの発生を抑えることを検討した。トラップの発生には、プロセス中のダメージによる窒素(N)原子の放出や不要な元素の混入が関係している。そこでゲート電極形成前及び表面保護膜形成時に、半導体へのダメージを抑えるプロセスを実験的に見いだした。電流コラプスのドレイン電圧依存性を図4に示す。70 Vまで電圧を上げても著しい電流コラプスは発生していない。高周波動作時のピーク電圧はドレイン電圧の約2倍になるので、この結果から、

(注1) 電力素子に供給された電力が出力信号として電力に変換される効率で、変換されなかった電力の多くは熱になる。

(注2) 電子やホールをつかまえる半導体結晶や半導体表面の欠陥で、電荷が固定されることでポテンシャルがひずみ、電流が流れにくくなる。

今回開発したGaN電力HEMTは、35 V程度のドレイン電圧までは電流コラプスの影響を受けずに動作できることが確認できた。

これにより、X帯においてGaN電力HEMTの高出力化が可能になった。

3.3 放熱設計

GaN電力HEMTの構造は、サファイア、炭化シリコン(SiC)、シリコン(Si)などといった結晶基板を下地として、その上にGaN層や窒化アルミニウムガリウム(AlGaIn)層などをMBE法(Molecular Beam Epitaxy：分子線エピタキシー法)やMOCVD法(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition：有機金属気相成長法)を使って、動作層として形成する。これらの結晶基板材料には表1に示すような得失があるが、高出力電力素子を実現するため、熱伝導性と成長層の結晶品質を重視してSiCを結晶基板として採用した。SiCの熱伝導率は3.0～3.8 W/(cm・K)であり、この値は熱拡散材料として用いられる銅に近い。

結晶基板	熱伝導性	成長層結晶品質	基板結晶品質	価格	大口径化
サファイア	×	○	○	○	◎
SiC	◎	◎	○	△	△
Si	○	△	◎	◎	◎

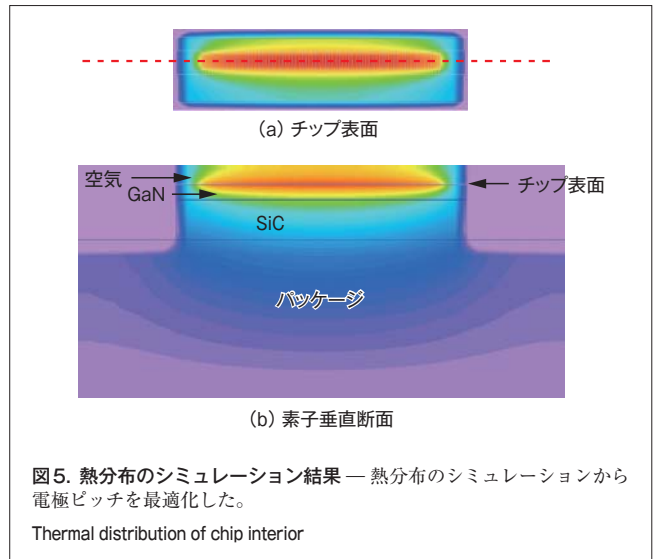
電流が流れる層となるGaInNの熱伝導率は2.2 W/(cm・K)である。GaAsは0.5 W/(cm・K)であるので、GaInNは放熱における大きなメリットを持っている。

また、GaInNはバンドギャップが広いいため高温動作においてもリーク電流が少なく、GaInN電力HEMTはチャネル温度200℃でも動作できる。GaAs電力HEMTの動作が実用上チャネル温度150℃以下に限定されたことに比べると、このことも熱設計におけるメリットとなる。

GaN電力HEMTは優れた材料特性を持っており、GaAs電力FETの10倍以上の出力電力密度で動作させることができる。しかし、PAEはGaAs電力FETと同程度なので、電力密度の高さに比例して大量の熱が発生する。このためGaInN電力HEMTでは放熱設計が重要となる。

放熱性を高める有効な方法の一つは、熱源の分散である。図2(d)で示したように、GaInN電力HEMTはフィンガーと呼ばれるソース電極とドレイン電極が交互になった配置をとりながら数十組の電極を並べている。電極ピッチを広げることによって放熱性は改善できるが、チップサイズが大きくなる。高い周波数では、空洞共振の問題からパッケージサイズに制限があり、チップサイズもおのずと制限される。

このため、限られたスペースの中で放熱性を考慮しながら



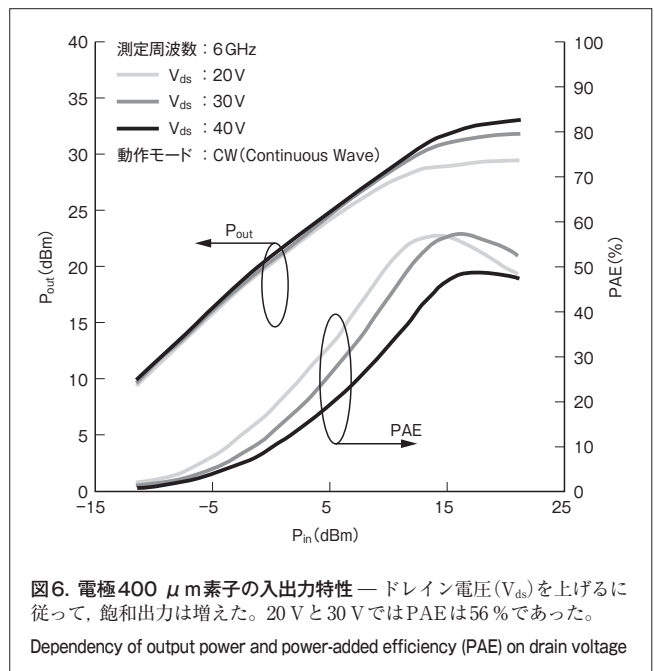
ら、熱分布シミュレーションにより最適な電極配置を求めた。熱分布シミュレーション結果の一例を図5に示す。

4 開発したGaInN電力HEMTの特性例

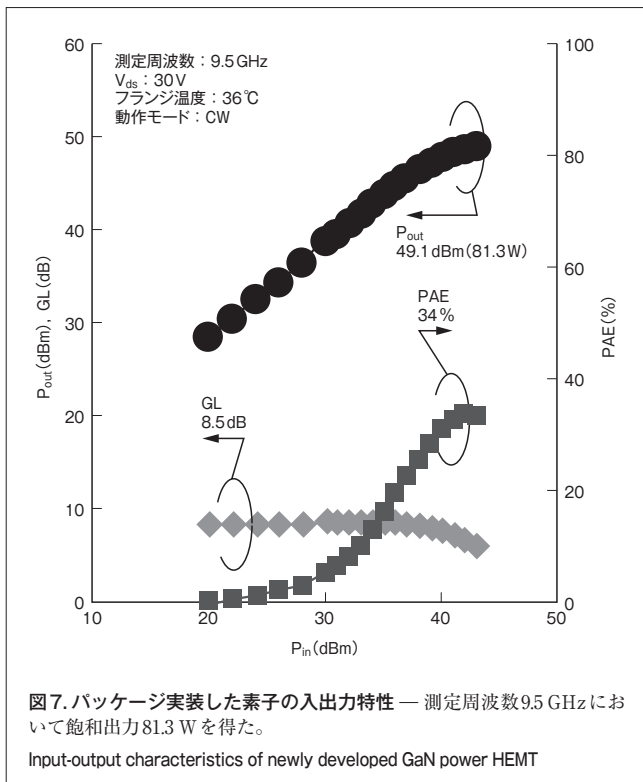
今回開発したGaInN電力HEMTのオンウェーハ測定結果と、2チップのパッケージ実装評価結果の一例を図6、図7に示す。

4.1 オンウェーハ測定

小さな電極幅の素子をウェーハ状態でloadpull測定器^(注3)



(注3) 任意のインピーダンス状態を作るチューナと、チップに直接高周波信号を送れるプローブを持つ装置で、整合回路の影響を受けずに素子の性能を評価できる。



を用いて評価した。

図6は、フィンガー長 $100\ \mu\text{m}$ の電極4組から成る小さな素子の入力電力(P_{in})に対する出力電力(P_{out})及びPAEの測定例である。ドレイン電圧を20 Vから40 Vまで上げると、飽和出力は29.3 dBm (0.9 W)から32.9 dBm (1.9 W)まで線形に増えた。ドレイン電圧が20 Vと30 Vでは、PAEは56%に達した。40 Vでは電流コラプスの影響が出始め、PAEは48%に低下している。

4.2 パッケージ実装測定

パッケージに実装したGaN電力HEMTの入出力特性を図7に示す。ドレイン電圧は、loadpull測定の結果で高い効率と飽和出力が得られていることを基に30 Vとした。その結果、測定周波数9.5 GHzで飽和出力49.1 dBm (81.3 W)を得た。このときの線形利得(GL: Linear Gain)は8.5 dB, PAEは34%であった。

5 あとがき

今回、9.5 GHz帯において目標出力である50 Wを超える、GaN電力HEMTの開発試作に成功した。今後、この成果を基に高周波帯に向けていっそうの開発を進めていくが、そこでもGaNが高いポテンシャルを示すものと期待している。

文献

- (1) 木村英樹, ほか. C帯90 W電力FET. 東芝レビュー. 60, 6, 2005, p.48-51.
- (2) 高木一考, ほか. Ku帯30 W電力FET. 東芝レビュー. 60, 11, 2005, p.49-52.
- (3) Matsushita, K., et al. "Gate Leakage Current of AlGaIn/GaN HEMTs Device Influenced by Substrate Defects". CS MANTECH Conference 2005 digest of papers. 2005, p.71-73.
- (4) 松下景一, ほか. C帯150 W級GaN電力HEMT. 東芝レビュー. 60, 12, 2005, p.32-35.
- (5) Takagi, K., et al. "X-band AlGaIn/GaN HEMT with over 80 W Output Power" 2006 IEEE CSIC Sympo. 2006, p.265-268.



高木 一考 TAKAGI Kazutaka

社会システム社 小向工場 マイクロ波技術部参事。マイクロ波半導体のデバイス設計・開発に従事。応用物理学会会員。Komukai Operations



柏原 康 KASHIWABARA Yasushi

社会システム社 小向工場 マイクロ波技術部主務。高周波モジュールの開発及びマイクロ波素子の回路設計に従事。Komukai Operations



松下 景一 MATSUSHITA Keiichi

社会システム社 小向工場 マイクロ波技術部主務。マイクロ波半導体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 Operations