



# 高利得高効率電力増幅器用GaN-HEMT技術

星 真一                      大来 英之  
森野 芳昭                    伊藤 正紀

携帯電話をはじめとしたモバイルコミュニケーションツールの急速な発展とともに、ユビキタスなネットワーク社会が進展、加速している。いつでも、どこでも、何とでも、に加えて、大容量に、さらに移動中でも通信するニーズの高まりがその原動力である。第3世代携帯電話では、すでに開始されている高速通信サービス（HSDPA：High Speed Downlink Packet Access）において、伝送データ量が従来の2Mbit/sから14Mbit/s（静止時）に高められている。また、モバイルWiMAX（Worldwide Interoperability for Microwave Access）では、75Mbit/sの伝送速度でフィールド実験がなされている。さらに第4世代携帯電話では、100Mbit/s以上の高速無線通信と2010年以降の実用化を目指して研究開発が進んでいる。こうした無線伝送レート的高速化および大容量化は、送信電力増幅器の線形性（低歪特性）領域を使用するため、高利得かつ高出力電力特性が重要になる。しかしデバイスの高出力化は、基地局装置の消費電力増大や大型化を招く。さらに、昨今では基地局装置の電力コスト削減や環境負荷低減も求められているため、送信電力増幅器の高効率化が非常に重要な要素となっている。したがって、これらのニーズを満たすためには高利得高出力特性で、かつ高効率なデバイス特性が必要となる。

われわれはGaN-HEMT（High Electron Mobility Transistor）の素子能力に着目し、プロセス技術、デバイス技術を開発してきた。本稿では開発したソースフィールドプレート（SFP）構造を有するGaN-HEMTデバイスとその高利得高効率電力特性について紹介する。

## GaN-HEMT特性

GaN-HEMTデバイスは、ワイドバンドギャップ半導体である窒化ガリウム（GaN）をチャンネルとして使用するため、既存のSiデバイスやGaAsデバイスに比べて、

- 電子走行層となる二次元電子ガス（2DEG）濃度が一桁程度高い（大電流化）
- 走行する電子飽和速度が2倍程度大きい（高周波化）

●絶縁破壊電界が一桁程度大きい（高耐圧化）  
という利点がある。図1は高周波電力デバイスの観点から各種材料別デバイスを比較したものである<sup>1)</sup>。Si、GaAsデバイスのほかに、次世代電力デバイスとして期待されているSiC、GaNデバイスについて、各物性値とそれから概算した特性指数を表している。ジョンソン指数、キー指数はパワートランジスタの性能指数である。電子飽和速度と電子移動度、および $f_{max}$ は高周波特性の指標となる。また絶縁破壊電圧は素子耐圧と、 $1/R_{on}$ は素子効率とそれぞれ関係が深い。GaN-HEMTは高出力性能と高周波化に最も高いポテンシャルを持つ素材であることがわかる。

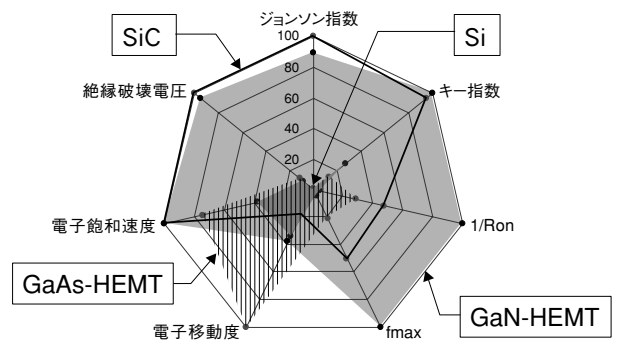


図1 材料別各種デバイスの性能指数

## GaN-HEMTのデバイス構造

開発したソースフィールドプレート構造を有するGaN-HEMTデバイスの断面模式図を図2に示す。熱伝導率の高いSiC基板上に、有機金属気相成長法によってGaN層、AlGaN層を結晶成長させたウエハを用いる。このAlGaN/GaNヘテロ界面に形成される2DEG濃度は分極に起因して約 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ と高く、既存Siデバイスに比べて約10倍の走行電子を生み出すことができる。その結果、大電流密度を実現できるため高出力デバイスの実現可能性が高い。しかし、ワイドバンドギャップ半導体である

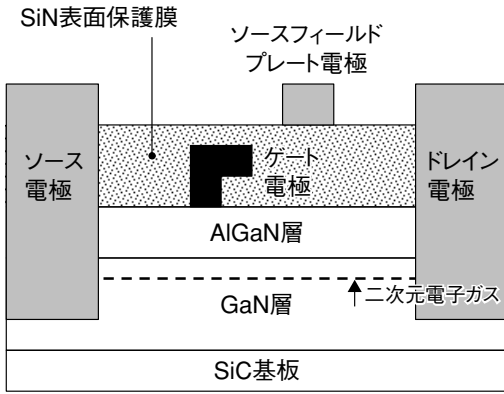


図2 GaN-HEMTデバイスの断面模式図

ためにAlGaIn層を介した2DEG層とオーミック電極（ソース電極、ドレイン電極）との良好な接触（オーミックコンタクト）抵抗特性を得ることが難しかった。オーミックコンタクト抵抗は、デバイス特性に影響するため、極力低いほど望ましい。2DEGとオーミック電極との距離を縮め電子のトンネル確率を向上させるため、ソース電極、およびドレイン電極領域を掘り込むリセスエッチング（オーミックリセス）を行った<sup>2) 3)</sup>。図3にオーミックコンタクト抵抗のオーミックリセス深さ依存性を示す。AlGaIn/GaNヘテロ界面を越えて深くエッチングすることでコンタクト抵抗を1.0Ωmmまで低減することができた。これはオーミック電極端部が2DEG層と直接接触することによって実現されている。

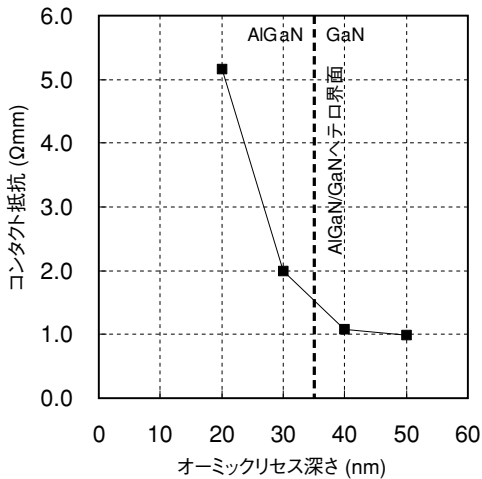


図3 コンタクト抵抗のオーミックリセス深さ依存性

### ソースフィールドプレート電極による効果

絶縁破壊電界が高いGaNの特徴を最大限生かすデバイス

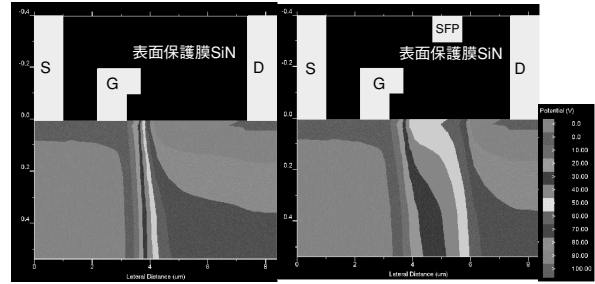


図4 SFP電極の電位分布緩和効果

構造について検討した。ゲート電極がドレイン電極側にせり出した形状（ゲートフィールドプレート電極）は良く用いられる方法の一つである。この構造のデバイスに印加される電位分布をシミュレーションによって解析した（図4左）。ドレイン電圧は100V、ゲート電圧およびソース電圧はそれぞれ0Vである。ゲート電極付近の電位分布が密になり電界集中していることがわかる。強電界の印加される領域が破壊耐圧を決めるため、電界集中を緩和することはFET耐圧を向上させるために有効な手段となる。今回、ゲート・ドレイン間にソース電極と同電位のフィールドプレート（ソースフィールドプレート：SFP）電極を設置した。この場合の電位分布シミュレーション結果を示す（図4右）。密となっていた領域の電位分布が広がり、電界集中の緩和している様子がわかる。これをGaN層チャンネル領域の電界強度分布として示したのが図5である。最大電界強度は $1.3 \times 10^6 \text{V/cm}$ から $0.9 \times 10^6 \text{V/cm}$ に約30%低減している。さらにSFP電極の位置について検討した。ゲート電極上にSFP電極が被覆されているとゲート・ソース間容量が増加し、FETの動作速

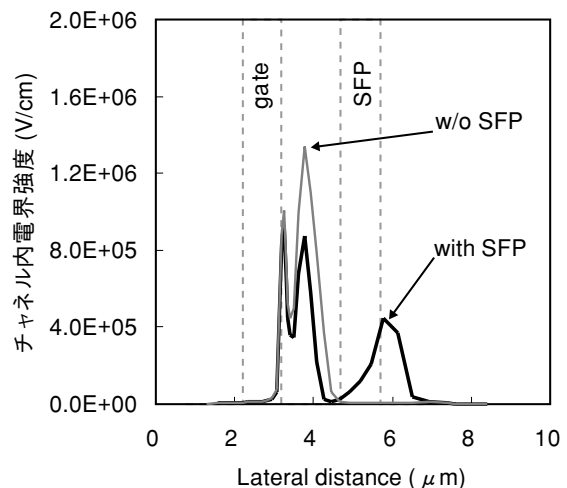


図5 SFP電極によるチャンネル内電界強度分布の変化

度に影響する。SFP電極のドレイン端位置は固定し、SFP電極の長さを変更してゲート・SFP間の距離依存性を調べた。図6にFETの遮断周波数におけるSFP電極位置依存性について示す。従来デバイス（SFP電極の無いデバイス構造）の遮断周波数が10GHzであるから、SFP電極をゲート電極から約1 $\mu\text{m}$ 離せばFETの動作周波数への影響は回避できることが判明した。

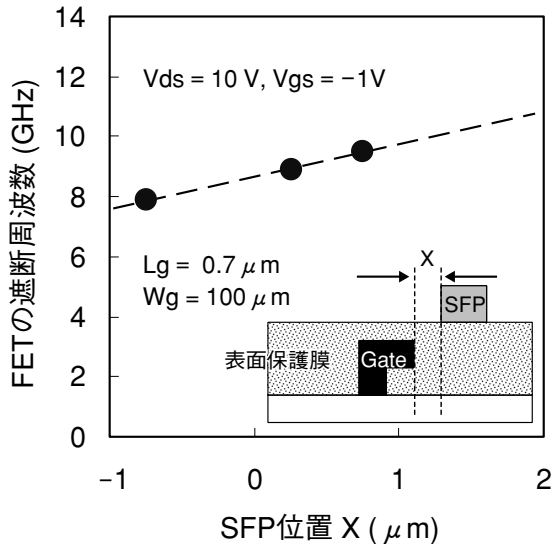


図6 SFP電極の位置とFET遮断周波数との関係

図7に従来構造のGa $\text{N}$ -HEMT（上）と開発したSFP電極を有するGa $\text{N}$ -HEMT（中）の $I$ - $V$ 特性、およびその3端子FET耐圧特性（ $BV_{dsoff}$ ）（下）を示す。 $I$ - $V$ 特性では最大ドレイン電流（ $I_{dmax}$ ）600mA/mm，最大相互コンダクタンス（ $g_{mmax}$ ）180mA/mmで良好なピンチオフ特性を示している。 $BV_{dsoff}$ 特性は300Vを示しており、電界分布緩和の効果によって大幅に向上した（従来デバイスでは200V）。さらに $I$ - $V$ 特性ではドレイン電圧100VまでGa $\text{N}$ -HEMT特有の電流コラプス現象（動作時にドレイン電流が低下する現象）は見られなかった。電流コラプス現象は、半導体表面の電子トラップに起因しており電界集中領域との関係が深い。これも電界集中を緩和したSFP電極の効果である。

### 高利得高効率電力特性

この基本デバイスを基に開発した櫛型ゲート50W級Ga $\text{N}$ -HEMTデバイスのチップ写真と実装パッケージ写真を示す（写真1）。ゲート長，ゲート幅はそれぞれ0.7 $\mu\text{m}$ ，

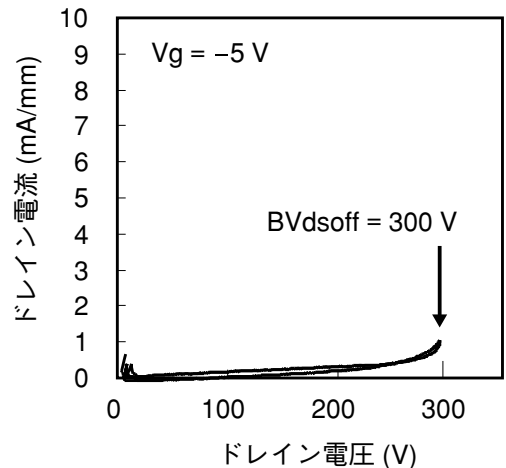
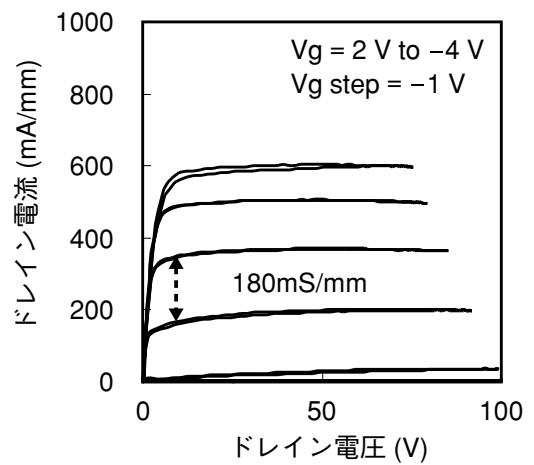
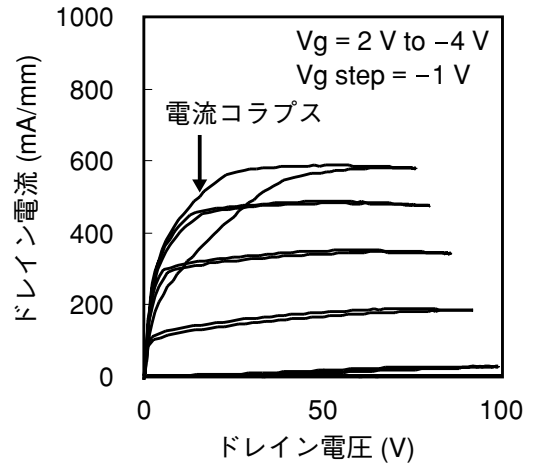


図7 Ga $\text{N}$ -HEMTの電気的特性  
上：従来構造のGa $\text{N}$ -HEMT  
中：SFP電極を最適化したGa $\text{N}$ -HEMT  
下：Ga $\text{N}$ -HEMTの3端子FET耐圧特性

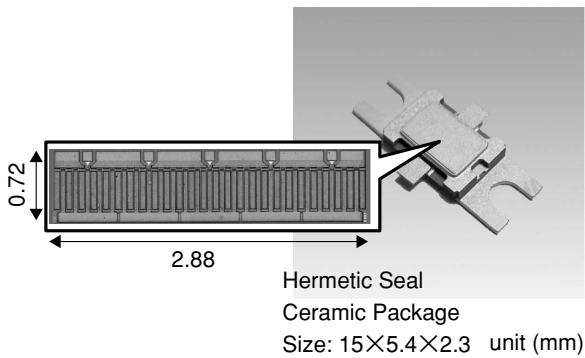


写真1 開発した櫛型ゲート50 W級GaN-HEMTデバイスとその実装パッケージ

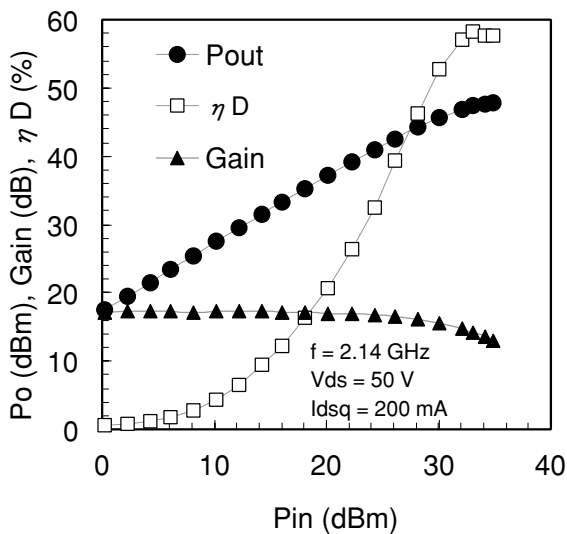


図8 開発した50 W級GaN-HEMTデバイスの入出力電力特性

13.5mmである。図8はその50W級GaN-HEMTの入出力電力特性である。周波数2.14GHz、動作電圧50Vにおいて、出力電力 ( $P_{out}$ ) 47dBm (50W)、線形利得 ( $Gain$ ) 17dB、ドレイン効率 ( $\eta D$ ) 58%と高利得かつ高効率な特性を実現した。なお本デバイスのパッケージ内部には入出力インピーダンス整合回路を含んでいない。

### まとめ

次世代基地局用途の高出力電力増幅器としてソースフィールドプレート構造を有するGaN-HEMTデバイスを開発した。オーミックリセス構造を採用し、 $1.0\Omega\text{mm}$ の低コンタクト抵抗を実現した。これによって、 $I_{dsmax} = 600\text{mS/mm}$ 、 $g_{mmax} = 180\text{mS/mm}$ の優れたデバイス

特性を得た。同時に、ソースフィールドプレート電極をゲート・ドレイン電極間に最適に配置することにより、チャンネル内電界強度分布を緩和し、高周波特性を犠牲にせず、 $BV_{dsoff} = 300\text{V}$ という高耐圧特性を得た。本デバイスを用いて櫛型ゲートGaN-HEMTを試作し、パッケージ実装した入出力電力評価において、50V動作、飽和出力50W、線形利得17dB、ドレイン効率58%という高利得高効率特性を実現した。今後、開発したGaN-HEMTの実用化を進めるのと同時に、さらに高周波大容量化される第4世代携帯基地局に対応できる高効率かつ高利得高出力デバイス開発を進めていく予定である。◆◆

### 参考文献

- 1) 佐野芳明：情報通信を支える次世代高周波電力トランジスタ SEMI News, Vol.22, No.5, p.8, 2006年
- 2) Kaifu *et al.*: AlGaIn/GaN HEMTs with Recessed Ohmic Electrodes on Si Substrates, 208<sup>th</sup>, Electrochem. Soc. Meeting Abstract, 502, 814, 2006
- 3) 大来英之, 他：Si基板上に作製したAlGaIn/GaN-HEMTの高周波特性, 信学技報, Vol.106, No.269, pp.13-18, 2006年

### 筆者紹介

- 星真一：Shinichi Hoshi. 研究開発本部 ネットワークデバイスラボラトリ  
 大来英之：Hideyuki Okita. 研究開発本部 ネットワークデバイスラボラトリ  
 森野芳昭：Yoshiaki Morino. 研究開発本部 ネットワークデバイスラボラトリ  
 伊藤正紀：Masanori Itoh. 研究開発本部 ネットワークデバイスラボラトリ