

# 低接触抵抗オーミック電極による Ka帯 GaN HEMT 特性の改善

Power Characteristics of Ka-band GaN HEMT Improved by Lowering Ohmic Contact Resistance

森塚 真由美

高田 賢治

松下 景一

■ MORIZUKA Mayumi

■ TAKADA Yoshiharu

■ MATSUSHITA Keiichi

化合物半導体である窒化ガリウム (GaN) を用いた HEMT (High Electron Mobility Transistor : 高電子移動度トランジスタ) は、出力電力密度が高い高周波トランジスタとして、幅広い応用が期待されている。この素子を用いれば、これまで進行波管増幅器が搭載されてきた Ka 帯 (26 ~ 40 GHz) の衛星通信システムにも、固体電力増幅器 (SSPA : Solid State Power Amplifier) を組み込めるようになる。東芝は、この応用を目指した開発を進めており、出力電力 20 W の Ka 帯 GaN HEMT を 2011 年に報告した。

今回当社は、更に特性を改善するために、接触抵抗を低減するオーミック電極形成プロセスを開発した。このプロセスにより、接触抵抗は従来よりも 56 % 低下し、31 GHz での出力電力密度は 11 % 増加した。Ka 帯 SSPA への応用により、衛星通信システムの小型・軽量化が期待できる。

Gallium nitride (GaN) high electron mobility transistors (HEMTs) are expected to become a key technology for high-frequency devices due to their high output power density. GaN HEMT devices make it possible to install solid-state power amplifiers (SSPAs) in Ka-band (26-40 GHz) satellite communication systems as an alternative to conventional travelling wave tube amplifiers (TWTAs).

Toshiba has already developed a 20 W-class Ka-band GaN HEMT device. In order to further improve the Ka-band power characteristics, we have now developed an ohmic contact process for the GaN HEMT device that can reduce the ohmic contact resistance by 56%, and increase the output power density at 31 GHz by 11%. The newly developed device is expected to contribute to reductions in the size and weight of next-generation satellite communication systems.

## 1 まえがき

近年の半導体素子技術の進展により、高周波電力増幅器の多くが、進行波管増幅器 (TWT : Travelling Wave Tube Amplifier) から、半導体素子を用いた固体電力増幅器 (SSPA : Solid State Power Amplifier) に切り替えられてきた。この流れは、通信や放送、レーダシステムなどの小型・軽量化と長寿命化に大きく貢献した。しかし、これまでの半導体素子では出力電力が不十分であるために、現在でも TWT が使用されるシステムがある。Ka 帯 (26 ~ 40 GHz) の衛星通信システムは、その一つである。

窒化ガリウム (GaN) は、シリコン (Si) やヒ化ガリウム (GaAs) などの従来の半導体に比べて、エネルギーバンド構造における禁制帯幅が広い。そのため、耐圧が高く、従来よりも高い動作電圧の電子デバイスを作製できる。また、窒化アルミニウム (AlN) との混晶である AlGaIn と GaN は、良好な接合面を形成でき、この界面に高密度に蓄積する、移動度の高い電子を利用できる。この AlGaIn/GaN 接合を利用した GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor : 高電子移動度トランジスタ) は、出力電力密度の高い高周波トランジスタとして、幅広い応用が期待されている。

東芝は、内部整合型電力 GaN HEMT として、X 帯 (8 ~ 12 GHz) で出力 50 W の素子を 2006 年に、Ku 帯 (12 ~ 18 GHz) で出力 50 W の素子を 2007 年に、更に C 帯 (4 ~ 8 GHz) で出力 120 W の素子を 2009 年に、それぞれ実用化してきた。現在は、更に周波数の高い Ka 帯で、出力が 15 W 以上となる GaN HEMT の研究開発を行っており、出力電力 20 W を確認したことを 2011 年に報告した<sup>(1)</sup>。

Ka 帯の素子は、これまでの C ~ Ku 帯の素子に比べて、電極長や電極間隔をいっそう縮小している<sup>(1)</sup>。また、15 W 以上の出力を得るために、微細化された素子を数多く束ねて動作させる。これらの素子は特性をそろえることが必須であり、素子形状には高い均一性が求められる。このため形状加工には、加工精度が高く均一性に優れた、ドライプロセスを採用した。しかし、このプロセスは半導体表面に強い影響を与えて素子特性を劣化させやすく、Ka 帯 GaN HEMT は、C ~ Ku 帯の GaN HEMT に比べて、接触抵抗が約 4 倍に高くなるという問題が生じていた。

今回当社は、Ka 帯 GaN HEMT に適用できる、接触抵抗が低く、しかも加工精度と均一性に優れたオーミック電極形成技術を開発した。この技術を用いて、ゲート長が 0.2  $\mu\text{m}$  の GaN HEMT を作製し、31 GHz の高周波出力特性を評価し

て、出力電力や電力付加効率、利得の特性が向上したことを確認した。

ここでは、今回開発した新しい電極形成技術と、これを用いたGaN HEMTの特性について述べる。

## 2 従来プロセスの課題と対策

Ka帯のGaN HEMTの断面構造を図1に示す。この素子は炭化ケイ素(SiC)基板の上に、厚さ1.7 $\mu\text{m}$ のGaN層と、15nmの薄いAlGa<sub>0.7</sub>N層が積層されている。AlGa<sub>0.7</sub>N層の表面に、窒化ケイ素(SiN<sub>x</sub>)の保護膜を形成した後、その一部を開口してオーミック電極であるソース電極とドレイン電極、及びゲート電極を形成する。ゲート電極の長さは0.2 $\mu\text{m}$ であり、この電極とソース電極との間隔は1 $\mu\text{m}$ 、また、ドレイン電極との間隔は2.5 $\mu\text{m}$ である。15W以上の出力を得るために、このような構造の、ゲート幅(図1の奥行き方向の幅)が50 $\mu\text{m}$ となる素子を、128本束ねる(図2)。

電極を形成するための、保護膜を開口する工程には、フッ素(F)系のガスを用いたドライエッチング技術を採用してきた。

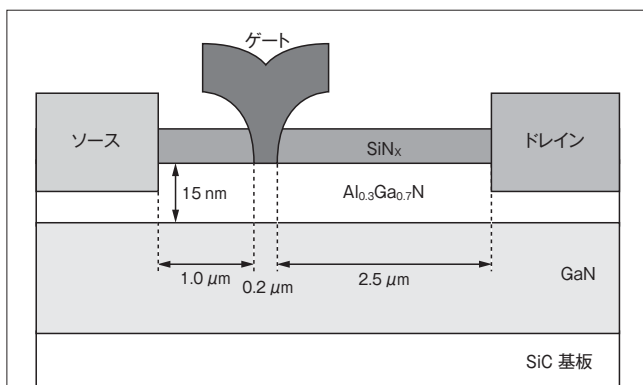


図1. Ka帯GaN HEMTの断面構造 — ゲート長は0.2 $\mu\text{m}$ 、ゲートとソースの間隔は1 $\mu\text{m}$ と微細な構造である。Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N層の厚さは15nmと極めて薄い。

Cross-sectional structure of Ka-band GaN HEMT

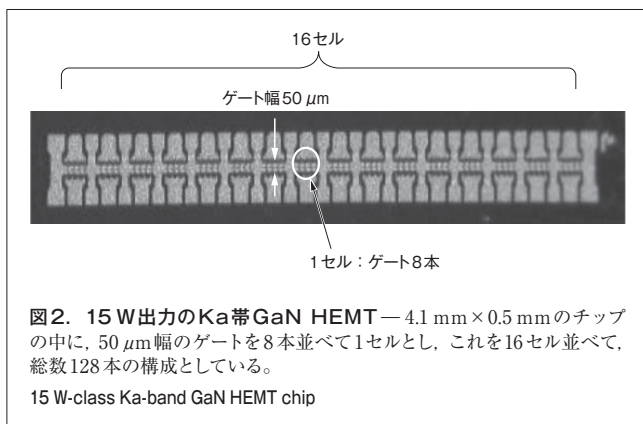


図2. 15W出力のKa帯GaN HEMT — 4.1mm $\times$ 0.5mmのチップの中に、50 $\mu\text{m}$ 幅のゲートを8本並べて1セルとし、これを16セル並べて、総数128本の構成としている。

15 W-class Ka-band GaN HEMT chip

この技術は、これまでのC~Ku帯の素子作製に使われてきたウエットエッチング技術に比べて、開口部の形状を、精度よく、均一に作製できる点で優れている。しかし、この技術を用いた電極の接触抵抗の値は0.87 $\Omega\text{mm}$ と高い値であった。

このドライエッチング技術に類似したF系ガスによるプラズマ処理で、窒化物表面にFが取り込まれ、ドレイン電流のしきい値電圧が上昇することが報告されている<sup>(2), (3)</sup>。また、当社でも、このドライエッチング技術をゲート電極形成のための保護膜開口に使用すると、しきい値電圧が上昇することを確認している。これらのことから、保護膜開口のプロセスで、AlGa<sub>0.7</sub>N表面にFが取り込まれ、F<sup>-</sup>のイオンとなって蓄積することで、オーミック接触抵抗が増大していると考えた。そこで、AlGa<sub>0.7</sub>NのFを含む部分をエッチングすることで、接触抵抗を低減できると予測した。

## 3 AlGa<sub>0.7</sub>N層のエッチング

AlGa<sub>0.7</sub>N層をエッチングするにあたり、接触抵抗を低減するための適切なエッチング深さを知る必要がある。AlGa<sub>0.7</sub>N層の厚さはわずか15nmであるため、このエッチングには精密な深さ制御が必要である。更に、良好なオーミック接触を得るために、エッチング後の表面が平坦であることも必要である。このような条件を満たすエッチング技術として、塩素系のガスを用いたICP-RIE (Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)を採用した。エッチングの速度、エッチング表面の平坦性、及びエッチング後の表面に残る不純物濃度を調査して、最適のエッチング条件を選択した。

エッチング深さに対する接触抵抗を評価した結果を図3に示す。試料は、通常のKa帯GaN HEMTプロセスと同様に、保護膜を形成して、F系ガスでこの保護膜を開口した後、塩素系ガスのICP-RIEでAlGa<sub>0.7</sub>N層をエッチングした。

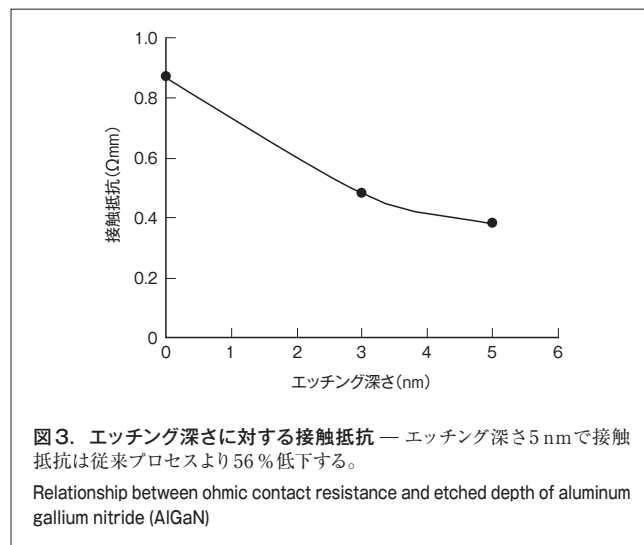
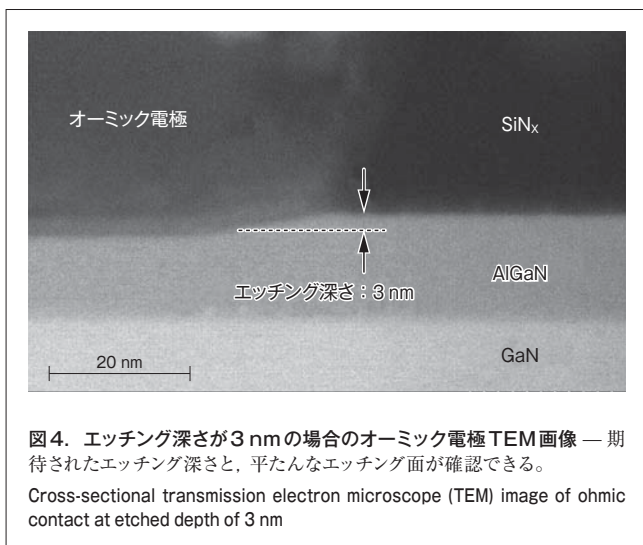


図3. エッチング深さに対する接触抵抗 — エッチング深さ5nmで接触抵抗は従来プロセスより56%低下する。

Relationship between ohmic contact resistance and etched depth of aluminum gallium nitride (AlGa<sub>0.7</sub>N)



エッチング深さは、エッチング時間により制御した。図3に示すように、エッチング深さが3 nmのときの接触抵抗は0.48 Ωmmとなり、従来の値に比べて45%低下した。エッチング深さを5 nmとすると、接触抵抗は更に低下して0.38 Ωmmとなり、従来プロセスより56%低下した。低下の度合いは、この5 nmで飽和の傾向を示しており、適切なエッチング量は5 nmと判断した。

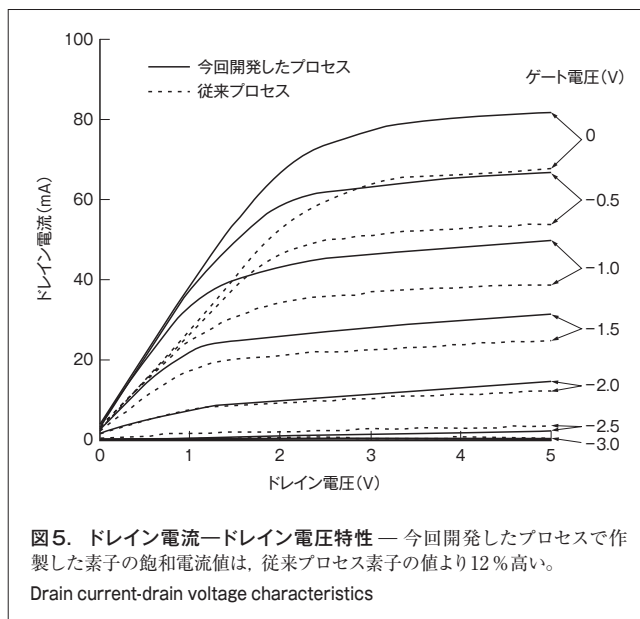
エッチングの深さと平坦性を確認するために、断面を透過型電子顕微鏡 (TEM) により観察した。エッチング深さが3 nmの場合のTEM画像を図4に示す。エッチング深さは期待された値となっており、オーミック電極との接触面も平坦であることを確認した。

#### 4 接触抵抗低減によるGaN HEMT 特性の向上

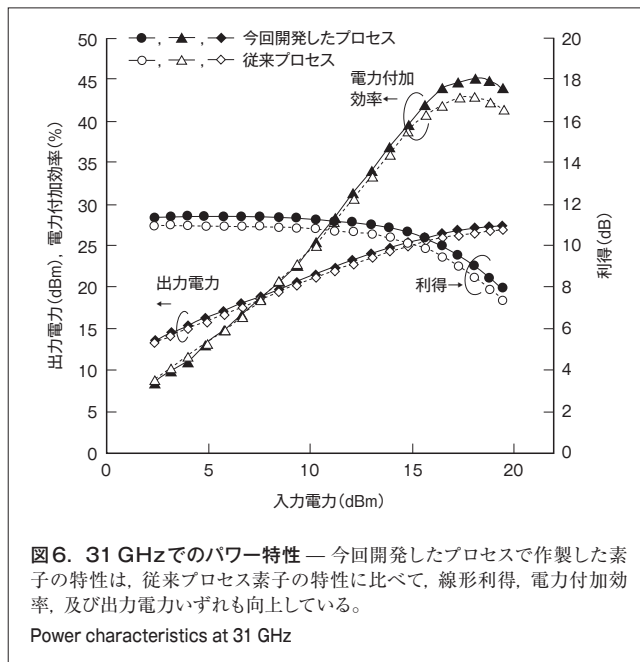
3章で述べたオーミック電極形成技術を用いて、Ka帯のGaN HEMTを作製し、その特性を、従来プロセスで作製した素子特性と比較した。

ドレイン電圧に対するドレイン電流特性を図5に示す。試料は、ゲート幅が50 μmの素子を2本束ねた素子とした。ゲート電圧が0 Vで、ドレイン電圧が5 Vでの電流を飽和電流として、二つの測定値を比較すると、今回開発したプロセスでの値は、従来プロセスの値より12%増大している。また、ドレイン電圧が低い領域の、電流の立ち上がりも急しゅんである。一方、ドレイン電流のしきい値電圧を、ドレイン電圧5 Vの条件で比較すると、どちらも-2.5 Vであり、変動していないことを確認した。

Ka帯での基本的な素子特性を評価するために、素子から見た信号源側のインピーダンスと負荷側のインピーダンスを調整できるソースプル ロードプル評価装置を用いて、31 GHzでの特性を評価した。高周波入力を与えるバイアス点は、ドレ



イン電圧を24 V、ドレイン電流を飽和電流の1/10とした。信号源側のインピーダンスは利得が最大となる条件、負荷側のインピーダンスは電力付加効率が最大となる条件とした。入力電力に対する出力電力、利得、及び電力付加効率を図6に示す。今回開発したプロセスで作製した素子の、入力電力が小さい領域の利得である線形利得は11.4 dBであり、従来プロセスより0.5 dB高い結果であった。また、電力付加効率の最大値は45%であり、従来プロセスの素子より2ポイント上昇した。ゲート幅1 mm当たりの出力電力密度は、電力付加効率最大となる条件で5.1 W/mmであり、従来プロセス素子よりも11%高い値であった。これらの結果から、開発したオーミック



電極形成技術は、Ka帯のパワー特性の向上に効果があることを確認した。

## 5 あとがき

Ka帯のGaN HEMTの特性を向上させるために、新たなオーミック電極形成技術を開発し、接触抵抗を低減した。この技術は、高い加工精度と均一性が不可欠である出力電力を15 W以上とするKa帯GaN HEMTの形成プロセスに、容易に組み込める。このオーミック電極形成技術は、AlGaIn層表面をエッチングするが、エッチング深さに対する接触抵抗を評価し、適切なエッチング深さを明らかにした。この電極形成技術により、接触抵抗を、従来よりも56%低減できた。また、この技術を適用したKa帯GaN HEMTの飽和電流は、従来プロセスの素子より12%増大した。31 GHzでのパワー特性は、線形利得が0.5 dB、電力付加効率が2ポイント、出力電力密度が11%、向上した。これらの結果から、今回開発した電極形成技術は、Ka帯GaN HEMTの特性改善に有効であることがわかった。今後、改善されたKa帯GaN HEMTが、衛星通信用のSSPAに応用され、システムの小型・軽量化に寄与すると期待される。

## 文献

- (1) 松下景一 他. Ka帯20 W GaN電力HEMT. 東芝レビュー. **66**, 5, 2011, p.42 - 45.
- (2) Osvald, J. et al. C-V characteristics of SF<sub>6</sub> plasma treated AlGaIn/GaN heterostructures. *Microelectronic Engineering*. **87**, 11, 2010, p.2208 - 2210.
- (3) Vanko, G. et al. Impact of SF<sub>6</sub> plasma treatment on performance of AlGaIn/GaN HEMT. *Vacuum*. **84**, 1, 2009, p.235 - 237.



森塚 真由美 MORIZUKA Mayumi, D.Eng.  
研究開発センター 電子デバイスラボラトリー主任研究員, 工博。  
化合物半導体電子デバイスの研究・開発に従事。応用物理学  
学会, 電子情報通信学会会員。  
Electron Devices Lab.



高田 賢治 TAKADA Yoshiharu  
研究開発センター 電子デバイスラボラトリー研究主務。  
GaN電子デバイスの研究・開発に従事。応用物理学学会会員。  
Electron Devices Lab.



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。  
マイクロ波半導体及び半導体プロセスの設計・開発に従事。  
応用物理学学会会員。  
Komukai Complex