



# Eバンド通信用GaN HEMT実現に向けた 低容量ゲート技術

## Low Capacitance Gate Process for E-Band GaN HEMTs

市川 弘之\*  
Hiroyuki Ichikawa

眞壁 勇夫  
Isao Makabe

河内 剛志  
Tsuyoshi Kouchi

中田 健  
Ken Nakata

井上 和孝  
Kazutaka Inoue

窒化ガリウム (GaN) は高耐圧かつ高速性に優れ、高電子移動度トランジスタ (HEMT) の材料として適している。幹線通信網のバックホールとして、広帯域・大容量の無線通信が可能なミリ波Eバンド (70~80GHz) の活用が期待されており、この用途に対応したGaN HEMTの実現を目指した。マイクロ波 (~16GHz) を中心とした既存製品と比べて要求周波数が著しく高いため、周波数特性の大幅な改善が必要であった。そこで、高い相互コンダクタンスが得られるよう電子供給層の材料にInAlNを選択すると共に、周波数特性改善の要となる低容量ゲート技術の開発に着手した。ゲート容量 ( $C_{gs}$ ) を低減するために、ゲート長を100nmまで微細化して、ゲート電極をY型としたゲート技術を開発した。本技術開発により、既存製品を凌駕する0.58pF/mmの低い $C_{gs}$ を得て、電流利得遮断周波数は110GHzまで改善し、Eバンドをカバーする優れた周波数特性を有するGaN HEMTを実現した。

Gallium Nitride (GaN) is superior in breakdown voltage and RF performance and is suitable for high electron mobility transistors (HEMTs). Since wireless communication using millimeter-wave E-band (70-80 GHz) features wide bandwidth and large capacity, this system has been expected as backhaul communication. Therefore, we decided to develop E-band GaN HEMTs. The HEMT we aimed to develop required exclusively high frequency compared to that of current products which use mainly micrometer-wave (up to 16 GHz). So we had to improve RF performance remarkably. We chose InAlN as a barrier of GaN HEMTs for high transconductance and developed low capacitance gate process, a key technology of RF performance improvement. To reduce gate capacitance ( $C_{gs}$ ), Y-shaped gate process with short gate length of 100 nm was developed. With this process, we have obtained extremely low  $C_{gs}$  of 0.58 pF/mm and current gain cutoff frequency of 110 GHz and realized high RF performance E-band GaN HEMTs.

キーワード：Eバンド、InAlN、GaN、HEMT、Yゲート

## 1. 緒言

窒化ガリウム (GaN) は砒化ガリウム (GaAs) やシリコン (Si) と比べて、バンドギャップが大きく高耐圧であることから、電子飽和速度が大きく高速性に優れることから、高電子移動度トランジスタ (HEMT\*) の材料として優れている。今日では、GaNを用いたHEMTは、無線通信インフラを支えるデバイスとして欠かせないものとなっている。

無線通信用GaN HEMTは、携帯電話・スマートフォン市場の著しい成長と共に発展を続けている。当社は、世界で初めて携帯電話基地局向けの無線通信用GaN HEMTを製品化して<sup>(1)</sup>、これまで600万個を超える製品を出荷してきた。携帯電話端末と基地局の通信は、2GHz付近の周波数帯を利用している。一方で、バックホールと呼ばれる末端基地局等と基幹通信網との通信には30GHz以上のいわゆるミリ波が用いられることが多いが、今後のトラフィック増加に対応するためには、より広帯域・大容量化が可能な70~80GHzのEバンドと呼ばれる周波数帯の活用も期待されている。しかしながら、基地局向けの無線通信と比較して周波数が著しく高いことから、Eバンド通信用GaN HEMTの実現には周波数

特性の大幅な改善が必要だった。

周波数特性を示す指標の1つとして、電流利得遮断周波数 ( $f_T$ \*) が用いられる。 $f_T$ が高いほど電子の追従できる周波数が高く、高速動作が可能なことを意味する。 $f_T$ はHEMTの増幅率を示す相互コンダクタンス ( $g_m$ ) とゲートの容量 ( $C_{gs}$ ) で関連付けられ、 $f_T = g_m / 2\pi C_{gs}$ と示される。これより、 $f_T$ の向上には、 $g_m$ の増加と、 $C_{gs}$ の低減が効果的であることがわかる。そこで当社では、高 $g_m$ を確保できるエピ成長技術の開発に取り組むと共に、周波数特性改善の要となる $C_{gs}$ を低減できるゲートプロセス技術の開発に取り組んだ。

本論文では、このエピ成長技術について述べた後、低容量ゲートプロセス技術の詳細を述べる。そして、これらの技術を元に作製した、Eバンドをカバーする高い周波数特性を有するGaN HEMTの特性について報告する。

## 2. 高 $g_m$ エピ成長技術の開発

GaN HEMTの電子供給層の材料として、AlGaInが広く用いられている。AlGaInとGaNのヘテロ接合により生ずる

バンド不連続によって、接合界面に高濃度の2次元電子ガス(2DEG)が発生する。自発分極と共に、GaNとの格子定数差に起因したピエゾ効果による分極が加わることで、2DEGのキャリア濃度( $N_s$ )を高めた構造である。 $g_m$ はプロセスに依存する面も多いが、エピの $N_s$ にも強く依存し、高 $g_m$ を得るためには $N_s$ を高めることが有効である。AlGaInのAl混晶比を高めれば $N_s$ を高めることができるが、その到達度には限界があった。

AlGaIn以外の電子供給層の材料として、InAlNを用いた報告がされている<sup>(2)</sup>。混晶比を $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ に設定することでGaInと格子整合して、AlGaInと比べて自発分極の効果が大きいためにAlGaInの限界を打破でき、AlGaIn比で $N_s$ を2倍程度高めることが可能になる<sup>(3)</sup>。高周波化のためにはゲートの電子走行時間を短くするためにゲート長( $L_g$ )を短縮する必要があるが、それに併せて電子供給層の薄層化が必要である。一般に薄層化することで $N_s$ が低下するものの、InAlNは薄層でも高い $N_s$ を維持できることから、AlGaInと比べて高い $g_m$ が得られることが期待できる。これより本開発では、Eバンド通信用GaIn HEMTの電子供給層の材料としてInAlNを選択することにした。

InAlNはAlGaInと比べて上述のメリットがあるものの、エピ成長が困難であり、表面平坦性が悪い、リーク電流が大きいなど課題があった。しかし、エピ成長に用いる有機金属気相成長(MOCVD)法において、低温成長技術の開発と成長シーケンスの最適化により、上記課題を克服することができた<sup>(4)</sup>。

4インチの高抵抗Si基板を用いて、その上に、MOCVD法でバッファ層、GaInチャンネル層、AlNスペーサ層、InAlN電子供給層を積層した。一般にエピの最表面にはキャップ層が必要だが、キャップ層の適用は $N_s$ が低下するデメリットもある。本研究の中で最適化した低温成長条件では、キャップ層がなくてもリーク電流を低く抑えられるため、今回は $N_s$ を重視してキャップ層は形成しなかった。高周波化のために電子供給層をnmオーダーまで薄層化したが、それでも $N_s$ は $1.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ と高い値を確保し、高 $g_m$ が期待できるエピとなった。

### 3. 低容量ゲートプロセスの開発

開発したゲートプロセスの詳細を述べる前に、ゲート構造における $C_{gs}$ の成分について説明する。図1に2種類のゲート構造の断面模式図を示す。図1(a)は電極の断面がT型のゲート構造である。 $C_{gs}$ の成分としては、ゲート直下の部分で生ずる容量(真性容量)と電極フリッジ部分で発生する容量(寄生容量)に大別される。真性容量を低減するためには $L_g$ の短縮が有効であるが、 $L_g$ をある程度まで短縮すると、フリッジ容量が相対的に大きくなり、ゲート容量を支配することになる。フリッジ容量を低減するには、図1(b)に示す電極とエピの間を低誘電率の材料で挟む構造が有効である。そこで本

検討では、 $L_g$ を細くすると共に、図1(b)に示す電極断面がY型のゲート構造(以下、Yゲート)を検討することにした。

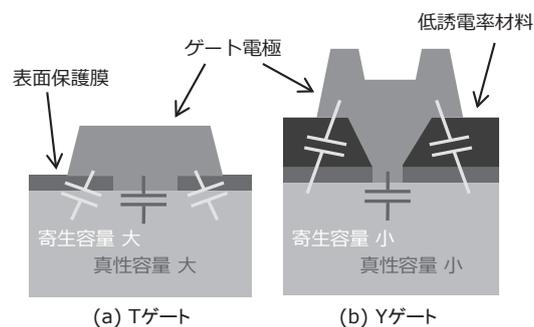


図1 ゲート断面構造の比較

真性容量に影響する $L_g$ は、リングラフィの露光プロセスで殆ど決定される。露光プロセスでは、水銀ランプのi線(365nm)を光源としたステッパが一般的に用いられている。ステッパの解像度は、光源の波長及びレンズの開口率により決定され、解像限界を超える微細化には電子ビーム(EB)露光装置が用いられることが多い。EB露光装置は電子線を走査して露光するため、電子線のサイズまで微細化が可能である。ただし、ステッパと比べてプロセスが複雑であり、製造コストを増大させる一因となり得るものであった。本開発では、低容量化だけでなく、量産性も加味して低コストのプロセス確立を目指している。そのためEB露光装置を用いず、i線ステッパを使いこなし、Yゲートを形成するプロセスの開発を目指した<sup>(5)</sup>。

Yゲートのプロセスフローを図2に示す。まず、表面保護膜として、スパッタリングでSiNを成膜した(図2(a))。i線ステッパにより、幅300nm程度のレジストパターンを形成して(図2(b))、 $\text{O}_2$ プラズマにより、レジストパターンの形状を縮めた(図2(c))。次にスパッタリングで $\text{SiO}_2$ を成膜した後、レジスト側壁の $\text{SiO}_2$ を緩衝フッ化水素酸(BHF)で除去した(図2(d))。その後、リフトオフを行い、ゲートの反転パターンを形成した(図2(e))。

次に、オーミック電極を形成する部分の $\text{SiO}_2$ を反応性イオンエッチング(RIE)でエッチングした。エッチング初期はパワーを大きく段階的に小さくする多段階のエッチング方法とウエット処理で仕上げることで、エッチング時の底面へのダメージを抑えた(図2(f))。SiNをRIEでエッチングした後、ソース電極とドレイン電極を蒸着して、リフトオフにより電極を形成し、合金化アニールを施した(図2(g))。同様に、ゲート部分のSiNをRIEでエッチングした後、ゲート電極を蒸着して、リフトオフによりゲート電極を形成した(図2(h))。

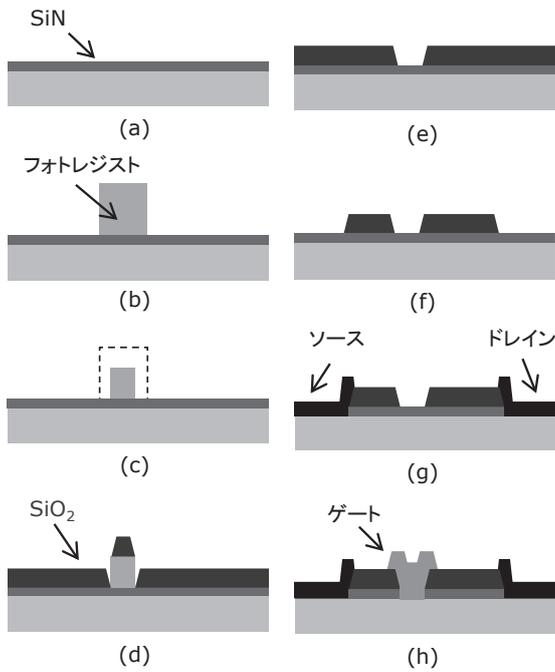


図2 Yゲート プロセスフロー

完成したGaN HEMTのゲート断面の透過顕微鏡 (TEM) 像を図3に示す。 $L_g$ は100nmとi線ステッパとしては極めて細かい値を得た。またゲート電極は、裾が広がる様子が見られたものの、裾の部分を除いた電極幅 ( $L_{og}$ ) は340nmと細かい値を得た。ゲートの側壁に注目すると、SiNとSiO<sub>2</sub>の間で段差がない、スムーズな順テーパ形状が得られていることがわかった。これは、ゲート開口プロセスにおいて、SiO<sub>2</sub>とSiNのエッチング選択比がない様に成膜条件を制御したためである。テーパの角度はゲート容量やゲート端の電界集中に影響して、重要な構造パラメータとなる<sup>(6)</sup>。今回、本用途向けにSiO<sub>2</sub>の膜厚とRIE条件の調整により角度を制御して、60°となるようにした。

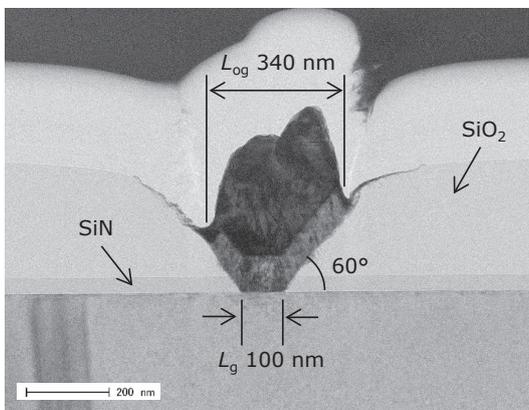


図3 Yゲート断面 TEM像

#### 4. 評価結果

作製したGaN HEMTのDC特性を評価した。評価したパターンは $L_g$ が100nm、 $L_{og}$ が340nm、ゲート幅 $W_g$ が80 $\mu$ mのものである。 $I_d$ - $V_d$ 特性を評価した結果を図4に示す。ゲート電圧 $V_g$ を-3Vから3Vまで、0.5V間隔でスイープし、最大電流で1.35A/mmの高い値を得た。次に $I_d$ - $V_g$ 特性と $I_g$ - $V_g$ 特性を評価した結果を図5に示す。2章で述べたように、リーク電流抑制に効果的なキャップ層を用いていないエピであるものの、 $V_g$ が-5Vのピンチオフした状態で、 $4.9 \times 10^{-5}$ A/mmの十分低いゲートリーク電流を得た。また $g_m$ は、ピーク値で550mS/mmとAlGaIn電子供給層では到達困難な極めて高い値を得た。

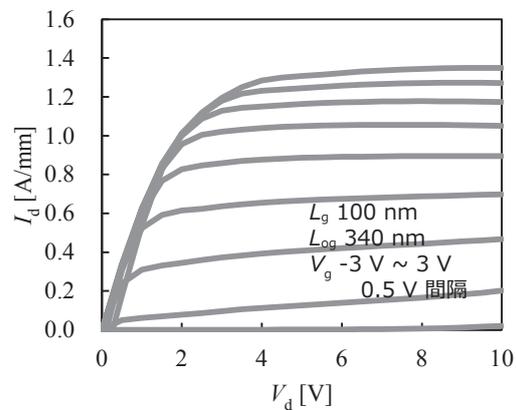


図4  $I_d$ - $V_d$ 特性

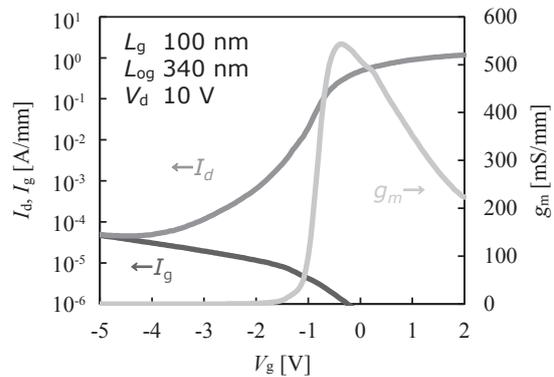


図5  $I_d$ - $V_g$ 特性と $I_g$ - $V_g$ 特性

次に周波数特性を評価するため、Agilent 製ネットワークアナライザ8510Cを用いてSパラメータを評価した。評価には $W_g$ が50 $\mu$ m $\times$ 2本のパターンを用いて、10GHzから80GHzの周波数範囲で評価した。電極パッド容量を差し引いた後、等価回路モデルを用いてSパラメータ評価結果から $C_{gs}$ 及び $g_m$ を抽出した。

$C_{gs}$ と $g_m$ の $L_g$ 依存性を図6に、 $L_{og}$ 依存性を図7にそれぞれ示す。 $g_m$ が最も高くなるのは $L_g$ が220nmのときであり、Sパラ評価から求めた $g_m$ のピーク値は490mS/mmとなった。ただし、それ以上に $L_g$ を短縮すると、ショートチャネル効果により $g_m$ は低下した。一方、 $C_{gs}$ は $L_g$ 短縮に伴い単調に低減した。 $L_g$ が150nm付近で $C_{gs}$ 低減に飽和傾向が見られるのは、真性容量よりフリンジ容量が支配的になったためと考えられる。次に $L_{og}$ 依存性を示した図7を見ると、 $L_{og}$ 短縮が $C_{gs}$ 低減に効果的であり、単調に低減する傾向が確認できた。結果、 $L_g$ が100nm、 $L_{og}$ が340nmで $C_{gs}$ が最も低い値となり、0.58pF/mmと低い値を得た。

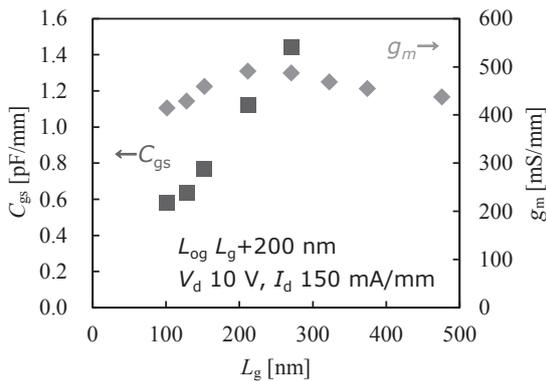


図6  $C_{gs}$ と $g_m$ の $L_g$ 依存性

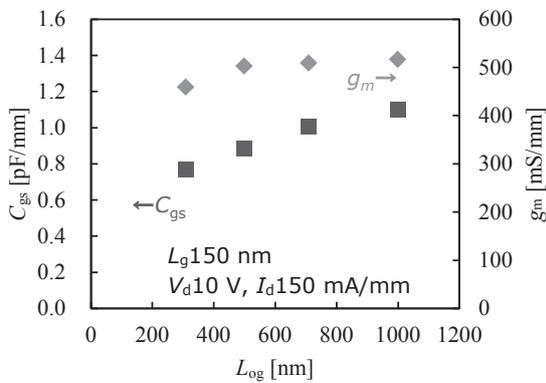


図7  $C_{gs}$ と $g_m$ の $L_{og}$ 依存性

次にSパラメータから見積もった小信号ゲイン特性を図8に示す。評価パターンは $L_g$ が100nm、 $L_{og}$ が340nmで、評価条件は $V_d$ を10V、 $I_d$ を300mA/mmとした。図中の点線は直線領域を-6dB/oct.の傾きで外挿したものである。 $f_T$ は110GHzとEバンドを上回る周波数特性を得た。また、動作できる最大の周波数を示す最大発振周波数 ( $f_{max}$ ) は140GHzの値を得た。図8の結果では、 $f_T$ に対して $f_{max}$ が1.3程度と低い値にとどまった。今回用いたプロセスは $L_{og}$ が細いことに

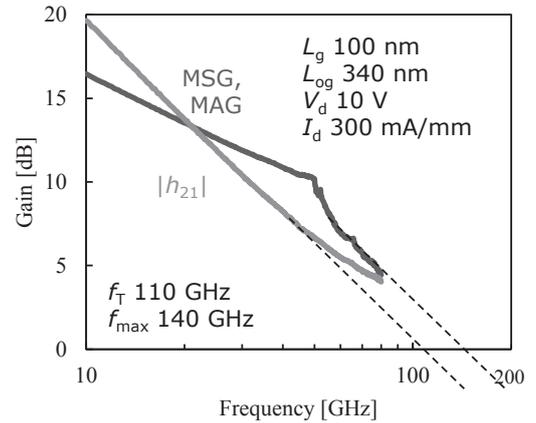


図8 小信号ゲイン特性

加えて、メッキプロセスを経ていないためゲート断面積が小さくゲート抵抗が高い。メッキプロセスの適用により、 $f_T$ の3倍程度まで $f_{max}$ を向上可能と考えている。

## 5. 結 言

Eバンド通信用GaN HEMT実現のため、電子供給層にInAlNを用いたエピを開発すると共に、低容量ゲート技術の開発に取り組んだ。そして、 $L_g$ が100nmと極めて短く、かつゲート断面をY型として寄生容量を低減したゲートを、i線ステッパをベースとしたプロセスで開発した。これにより、既存製品を凌駕する0.58pF/mmの低い $C_{gs}$ を得て、 $f_T$ は110GHzまで改善し、Eバンドをカバーする優れた周波数特性を有するGaN HEMTを実現した。

## 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 $f_T$

Transition frequency：電流利得遮断周波数またはカットオフ周波数ともいう。トランジスタの高周波性能を表す指標の1つ。

参 考 文 献 -----

- (1) 井上和孝 他、[携帯電話基地局用窒化ガリウム電力増幅器 (GaN HEMT) の開発]、SEIテクニカルレビュー第177号、pp. 97-102 (Jul. 2010)
  - (2) J. Kuzmic et al., "Power electronics on InAlN/ (In) GaN: Prospect for a record performance," IEEE Electron Device Lett., Vol. 22, pp. 510-512 (Nov. 2001)
  - (3) S. Guo et al., "AlInN HEMT grown on SiC by metalorganic vapor phase epitaxy for millimeter-wave applications," Phys. Status Solidi A, Vol. 207, No.6, 1348-1352 (Jun. 2010)
  - (4) I. Makabe et al., "Improvement of RF performance of GaN-HEMT on silicon substrate," Proc. International Workshop on Nitride Semiconductors, No. TuEP12, Wroclaw, Poland (Aug. 2014)
  - (5) H. Ichikawa et al., "InAlN/GaN HEMTs with over 100-GHz  $f_T$  using an improved Y-gate process by an i-line stepper," Proc. International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, No. 11.4, Arizona, US. (May 2015)
  - (6) K. Kobayashi et al., "Improved breakdown voltage and RF characteristics in AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors achieved by slant field plates," Appl. Phys. Express, Vol. 7, 096501 (Aug. 2014)
- 

執 筆 者 -----

市川 弘之\* : 伝送デバイス研究所 主査  
                  博士 (工学)



眞壁 勇夫 : 伝送デバイス研究所



河内 剛志 : 伝送デバイス研究所 主査



中田 健 : 伝送デバイス研究所 グループ長



井上 和孝 : 伝送デバイス研究所 グループ長



\*主執筆者