

# 埋め込みソースフィールドプレートを有する AlGaIn/GaN MIS-HEMT デバイスの小信号 AC 特性モデルの開発

澁谷 将平<sup>†\*</sup> 青木 均<sup>†</sup> 坂入 寛之<sup>‡</sup> 黒田 尚孝<sup>‡</sup> 築地 伸和<sup>†</sup> 栗原 圭汰<sup>†</sup>  
近松 健太郎<sup>‡</sup> 東野 将史<sup>†</sup> 高橋 莉乃<sup>†</sup> 小林 春夫<sup>†</sup> 中原 健<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 群馬大学大学院 理工学府電子情報部門 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1

<sup>‡</sup> ローム株式会社 〒615-8585 京都府京都市右京区西院溝崎町 21

## Developments of AC Model for AlGaIn/GaN MIS-HEMT with Embedded Source Field Plate

Shohei Shibuya<sup>†\*</sup>, Hitoshi Aoki<sup>†</sup>, Hiroyuki Sakairi<sup>‡</sup>, Naotaka Kuroda<sup>‡</sup>, Nobukazu Tsukiji<sup>†</sup>, Keita Kurihara<sup>†</sup>,  
Kentaro Chikamatsu<sup>‡</sup>, Masashi Higashino<sup>†</sup>, Rino Takahashi<sup>†</sup>, Haruo Kobayashi<sup>†</sup>, Ken Nakahara<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Electronics and Informatics Division, Gunma University, 1-5-1, Tenjin-cho, Kiryu, Gunma, 376-8515 Japan

<sup>‡</sup> Rohm Corporation, 21 Saiinmizosakicho, Ukyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 615-8585 Japan

In the field of power semiconductors, GaN based high electron mobility transistor (HEMT) devices take a lot of attention to develop high-speed switching and high voltage circuits. Development of a device model for simulation is an urgent task in order to improve the efficiency of circuit design using new devices. In this paper, we develop AC characteristic model using small signal equivalent circuit of AlGaIn / GaN Metal-Insulator-Semiconductor (MIS)-HEMT with embedded source field-plate.

キーワード： AlGaIn/GaN -HEMT, 小信号等価回路, デバイスモデル, シミュレーション

(Keywords, AlGaIn/GaN MIS-HEMT, small signal equivalent circuit, device model, simulation)

## 1. はじめに

近年、パワー用半導体分野において GaN デバイスが注目されている。AlGaIn/GaN は Si と比較して同程度の電子移動度を持ちながら、バンドギャップ、飽和電子速度、ブレイクダウン電圧において優れている (表 1) <sup>(1)</sup>。そのため従来のパワー MOS に対し高速スイッチング、高耐圧化ができるた

め、新規開発が進められている。新規デバイスを用いた回路設計の効率化のためには、シミュレーション用のデバイスモデル開発が急務となる。コンパクトモデルにおいて、最も重要な非線形ドレイン電流モデルについては、昨年国際学会において発表した <sup>(2)</sup>。本稿では、<sup>(2)</sup>を元に embedded

表 1. Si、SiC、AlGaIn/GaN の材料特性<sup>(1)</sup>

Table.1 Material properties of Si, SiC, and AlGaIn/GaN

特性[単位]	Si	SiC	AlGaIn/GaN
バンドギャップ[eV]	1.1	3.26	3.49
電子移動度@300K [cm <sup>2</sup> /Vs]	1500	700	1500 - 2200
飽和(ピーク)電子速度 [× 10 <sup>7</sup> cm/s]	1.0 (1.0)	2.0 (2.0)	1.3 (2.1)
ブレイクダウン電界 [MV/cm]	0.3	3.0	3.0

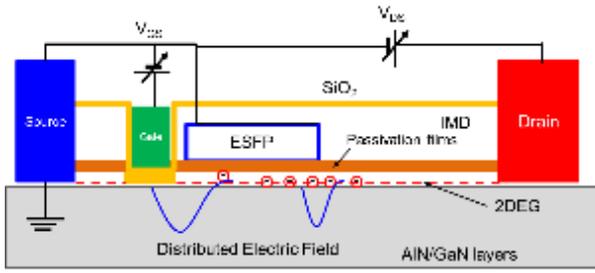


図 1. ESFP 構造をもつ AlGaIn/GaN MIS-HEMT のデバイス構造<sup>(2)</sup>

Fig.1 Device structure of AlGaIn/GaN MIS-HEMT with ESFP<sup>(2)</sup>

source field-plate (ESFP) 構造を有する AlGaIn/GaN metal-insulator-semiconductor (MIS)-high electron mobility transistor (HEMT) に対し、小信号等価回路を用いて高周波特性解析のため AC 特性のモデルを開発し、実素子の S パラメータ測定結果との比較を行い、提案モデルの有効性を確認した。

## 2. ESFP 構造をもつ AlGaIn/GaN MIS-HEMT

図 1 に ESFP 構造をもつ AlGaIn/GaN MIS-HEMT の単一デバイスの構造を示す<sup>(2)</sup>。有機金属気相成長法による SiN の表面不活性化成長のエピタキシャル層をもち、シートキャリア濃度、シート抵抗、2次元電子ガス(2DEG)の移動度はそれぞれ  $1.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ,  $382 \text{ W}/\square$ ,  $1203 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}/\text{s}$ 。SiO<sub>2</sub>膜は金属間誘電体(IMD: Inter-metal dielectric)としてモリブデン膜上に、ゲート電極を延長するように表面不活性化成長膜 SiN と ESFP と 2次元電子ガスの上に形成する。

マスクのチャンネル長は  $1 \mu\text{m}$ 、幅は  $90 \text{ mm}$  ( $750 \mu\text{m} \times 120$ ) T<sub>1</sub> は  $40 \text{ nm}$  以内の SiO<sub>2</sub>、T<sub>2</sub> は  $3 \sim 5 \text{ nm}$  の酸化された AlON の 2層構造のマスクを形成している<sup>(3)</sup>。

ゲートにバイアスをかけた場合、MOSFET のようにゲート絶縁膜における電子濃度は大きくなる。逆に ESFP 下の電子濃度は負のバイアスがかかるため、ESFP によって右ゲート端の最大電界は ESFP の右端の電界に拡散する。この効果によりゲートのブレイクダウン電圧を上げることができる。

## 3. 小信号等価回路と容量モデルの開発

ESFP 構造をもつ MIS-GaN HEMT の等価回路モデルを図 2 に示す。図 2 は GaN HEMT のモデルの一つである MIT-virtual source model<sup>(3)</sup> をもとにし、GaN MIS-HEMT の真性トランジスタと ESFP によるフィールドプレートトランジスタの 2 つのトランジスタに分けた等価回路である。

図 3 に今回提案する図 2 の小信号等価回路モデルを示す。図 2 の等価回路に対し、

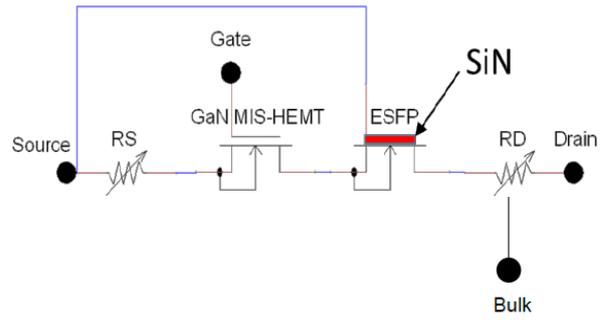


図 2. ESFP 構造をもつ AlGaIn/GaN MIS-HEMT の等価回路<sup>(2)</sup>

Fig.2 Equivalent circuit of AlGaIn/GaN MIS-HEMT with ESFP<sup>(2)</sup>

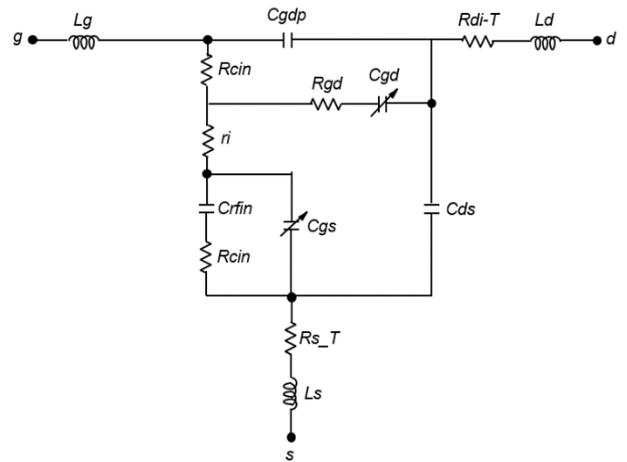


図 3. ESFP 構造をもつ AlGaIn/GaN MIS-HEMT の小信号等価回路

Fig.3. Small signal equivalent circuit of AlGaIn/GaN MIS-HEMT with ESFP

- 各端子の寄生インダクタンス成分  $L_G, L_D, L_S$
- 各端子間の寄生容量  $C_{gs}, C_{gd}, C_{gs}$
- 入力の分散特性回路  $R_{cin}, C_{rfin}$
- ゲートソース間の内部抵抗  $r_i$

を追加し、高周波特性のシミュレーション用の等価回路とした。

また、ゲートドレイン間、ゲートソース間の容量  $C_{gd}$ 、 $C_{gs}$  に関して、MIS ゲート構造の電荷計算を MOSFET と同様に行い、電圧で微分することで導出した ((1)-(5)式)。

$$Q_{gd} = W \cdot L_{eff} \cdot NF \cdot Q_d \quad (1)$$

$$Q_{gs} = W \cdot L_{eff} \cdot NF \cdot Q_s \quad (2)$$

$$Q_{inv} = \frac{2}{3} W L_g \left( \frac{Q_{invso}^2 + Q_{invdo}^2 + Q_{invso} Q_{invdo}}{Q_{invso} + Q_{invdo}} \right) \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{2}{15} W L_g \left( \frac{2Q_{invs0}^3 + 3Q_{invd0}^3 + 4Q_{invs0}^2 Q_{invd0} + 6Q_{invs0} Q_{invd0}^2}{Q_{invs0}^2 + Q_{invd0}^2 + Q_{invs0} + Q_{invd0}} \right) \quad (4)$$

$$Q_d = Q_{inv} - Q_s \quad (5)$$

#### 4. モデルパラメータ抽出・シミュレーション

ローム社製 AlGaIn/GaN MIS-HEMT デバイスを用いて、入力をゲート:G、出力をドレイン:Dとした場合の小信号交流特性を測定し S パラメータの測定データとした。この際のゲート、ドレインのバイアス電圧は  $V_{gs}=1.5V$ 、 $V_{ds}=1.5V$  周波数の掃引範囲は  $f=10MHz \sim 26GHz$  である。

図4から図6までは、測定した S パラメータと提案した等価回路モデルを HSPICE 上の verilog-A で記述した。モデルパラメータを抽出・最適化したシミュレーション結果との比較である。今回の測定は、ベクトル・ネットワーク・アナライザと、高周波プローバを用いて、オンウエハーでの測定を実施した。各測定端子は、ground-signal-ground のパッドを TEG に作成し、パッドを測定基準面としてキャリブレーションしている。このため、パッド以降、デバイス側の寄生コンポーネントは取り除かれていないので、図4から図6の測定データには、パッド・グラウンド間容量、デバイス端子までのストリップライン・インダクタンスと抵抗が含まれている。

図4に  $S_{11}$  (入力の反射係数もしくは入力インピーダンス) と  $S_{22}$  (出力の反射係数もしくは出力インピーダンス) のスミスチャートを示す。 $S_{11}$  は低周波領域で (図4上、右端) パッド寄生容量の影響でずれが見られるが、その他ではシミュレーション結果と測定値がおおむね合致して、低抵抗、容量性のカーブをシミュレートできている。 $S_{22}$  では、先に述べた寄生コンポーネントの影響で、1次、2次の共振が起きている。このため 3.3GHz 以降の測定データは、使用できないので、シミュレーションは、それ以前の測定データと比較することで、高精度に合致していることが分かる。

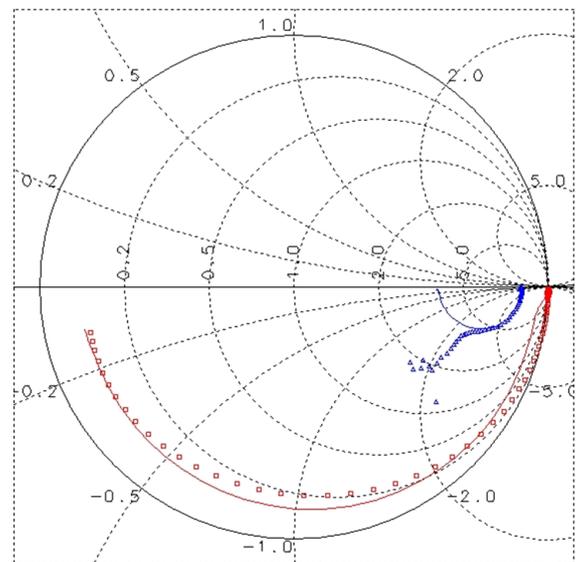
図6に周波数に対する  $h_{21}$  (入力・出力の電流利得) を示す。回路設計で用いるのは、 $f_t$  までの周波数特性であるが、それ以降の周波数特性まで高精度にシミュレートできている。

図6に  $S_{12}$  (出力・入力の伝達特性) の極座標プロットを示す。 $S_{12}$  においても、測定データは  $S_{11}$  と同様に、高周波領域 (図6の中心近傍) で1次共振が起こっており、シミュレーションデータは、比較的影響を受けにくい、低周波領域で最適化している。表2に今回のシミュレーションによって抽出されたパラメータの値を示す。

表2 抽出したモデルパラメータ

Table2. Extracted model parameters

パラメータ名	値
LG	3.715u
LD	1.000f
LS	50.23f
RI	1.714p
RGD	1.422n
RCIN	859.0
CRFIN	154.9n
CGDPE	2.649p
CDS	8.453p
CGSPI	77.30f
CGS0	29.11f
CGDPI	580.8f
CGD0	218.8f
RSS	1.600
RDD	174.2



□  $S_{11}$  の測定値      —  $S_{11}$  のシミュレーション値  
 △  $S_{22}$  の測定値      —  $S_{22}$  のシミュレーション値

図4.  $S_{11}$ 、 $S_{22}$  のシミュレーション、測定値比較  
 Fig.4 Comparison of simulation and measurement results ( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ).

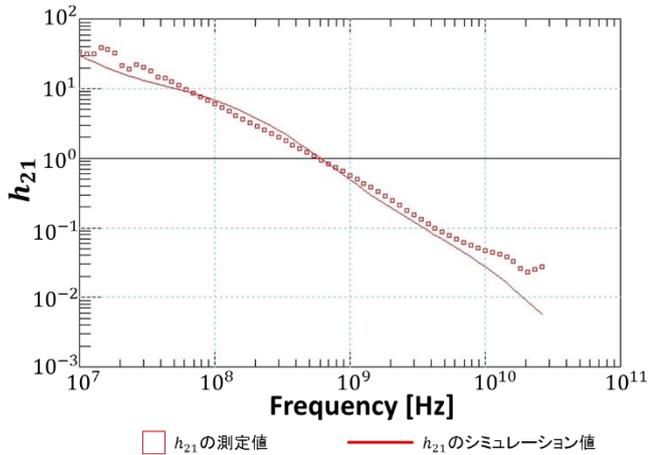


図 5.  $h_{21}$  のシミュレーション、測定値比較  
 Fig.5 Comparison of simulation and measurement results ( $h_{21}$ ).

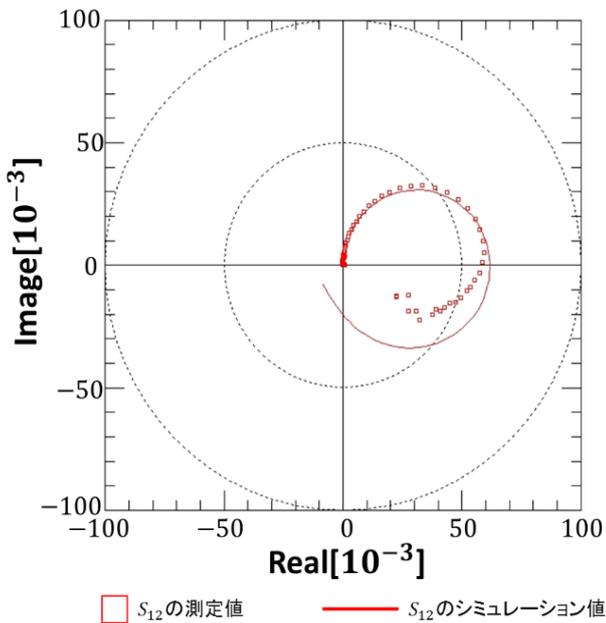


図 6.  $S_{12}$  のシミュレーション、測定値比較  
 Fig.6 Comparison of simulation and measurement results ( $S_{12}$ ).

## 5. まとめ

本論文では、GaN HEMT の等価回路を用い、ESFP 構造をもつ AlGaIn/GaN MIS-HEMT 小信号 AC 特性のモデルを提案した。それを用いたシミュレーション結果と実際のデバイスを使った測定結果を使った比較を行った。

新規構造の MIS-HEMT に対し、従来の GaN-HEMT の等価回路と、MOSFET の構造を応用することで、測定結

果の S パラメータとよく一致することが確認できた。

今後は、開発した等価回路でバイアス条件を変更したときにも適用可能かどうか検討していく。

## 文 献

- (1) 'Compact transport and charge model for Gallium Nitride-based HEMTs for radio-frequency applications' U.Radhakrishna, MIT, Jun.-2013, Citable  
 URI: <http://hdl.handle.net/1721.1/82394>
- (2) H. Aoki, N. Tsukiji, H. Sakairi, K. Chikamatsu, N. Kuroda, S. Shibuya, K. Kurihara, M. Higashino, H. Kobayashi, and K. Nakahara, "Electron Mobility and Self-Heat Modeling of AlN/GaN MIS-HEMTs with Embedded Source Field-Plate Structures," 2016 IEEE Compound Semiconductor IC Symposium, Oct. 23-26, 2016, Austin, Texas, U.S.A.
- (3) K. Chikamatsu, M. Akutsu, T. Tanaka, S. Takado, K. Sakamoto, N. Ito, and K. Nakahara, "Embedded Source Field-Plate for Reduced Parasitic Capacitance of AlN/GaN MIS-HEMTs on Si Substrate," *SSDM2015 Conf. Dig.*, pp. 122-123, Sept., 2015.
- (4) U. Radhakrishna, L. Wei, D. S. Lee, T. Palacios, D. Antoniadis, "Physics-based GaN HEMT Transport and Charge Model: Experimental Verification and Performance Projection," *IEEE IEDM, Dig.*, pp. 13.6.1-4, Dec. 2012.