

構造設計に基づくHEMTの特性計算とモデリングの検討

工藤, 洋介

九州大学大学院システム情報科学府電子デバイス工学専攻 : 修士課程

中司, 賢一

九州大学工学部電気情報工学科

谷口, 研二

九州大学大学院システム情報科学府電子デバイス工学専攻

<https://doi.org/10.15017/1498347>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 3 (1), pp.107-110, 1997-12-22. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン :

権利関係 :



構造設計に基づくHEMTの特性計算とモデリングの検討

工藤 洋介*・中司 賢一**・谷口 研二***

HEMT Device Characteristics Calculation and Modeling Based on Device Structure

Yousuke KUDOU, Kenichi NAKASHI and Kenji TANIGUCHI

(Received December 22, 1997)

Abstract:Based on device structure, HEMT DC characteristics are estimated by device simulation. Results show quantitative agreement with measured results. To confirm that the device simulation results can be applied to circuit simulation model, a nonlinear HEMT model recently proposed by Hirose and Watanabe, which employs an improved *tanh* function nonlinear fitting model has been investigated to prove its usefulness for our design system. The results are fitted by the nonlinear model better than SPICE MESFET model used in our previous work. These results show that HEMT DC characteristics can be estimated from the device simulation without fabrication to some extent.

Keywords: HEMT, Device simulation, Medici, Nonlinear model, SPICE MESFET model

1. はじめに

HEMT (High Electron Mobility Transistor) は、GaAs系化合物半導体ヘテロ界面に発生する2次元電子ガス (2 Dimensional Electron Gas: 2DEG) を利用した量子効果デバイスである。HEMTは、その高速度、低ノイズ特性のために衛星放送受信装置や光通信装置のフロントエンドアンプの素子や超高速の論理回路用デバイスとして注目されている。

前回、筆者らは量子効果デバイスの1種である共鳴トンネルダイオード (Resonant Tunneling Diode: RTD) とHEMTを組み合わせた複合ゲート構造からなる論理回路とそのPLL回路への応用について報告した¹⁾。この報告の中では、HEMTのモデルとして、実際のデバイスの測定値²⁾とP SpiceのMESFETモデルを使用していた。実際問題として、デバイスシミュレーションによりデバイスの構造から直接その特性を計算したり、あるいは逆に必要な特性を有するデバイスの構造が設計できれば、設計・試作・測定といったルーチンのターンアラウンドタイムが短縮される。また、新しいデバイスの特性の予測も可能となる。しかしながら、デバイスシミュレーションでは、すべての物理モデルを考慮していないために定量的な議論は難しく、定性的な評価に用いるのが妥当である。デバイス特性を計算する方法として、モンテカルロ法³⁾や物理モデルに基づく方法等がある。モ

ンテカルロ法は、電子1個1個の挙動を計算するものであるが、精度良く計算するためには時間がかかるという欠点がある。我々は、構造から直接デバイス特性を計算する物理モデルに基づいた方法を提案している²⁾。この方法は、電子速度のオーバーシュート現象を考慮した集中定数モデルによる計算方法であり、ゲート電圧の中間領域では実測値と良く一致する。しかしながら、2DEGでの電子濃度の飽和を考慮していないために高ゲート電圧側ではドレイン電流を過大評価している。これらに代わるものとして、デバイスシミュレーションがある。これは、電流連続の式とポアソン方程式をセルフコンシステントに解く方法である。

本論文では、2次元のデバイスシミュレータを用いた構造設計に基づくデバイスの特性の計算と、これを反映できかつ従来よりも正確にフィッティング可能なHEMTデバイスモデルの採用による回路シミュレーションの精度の向上を狙った検討結果について述べる。モデルについては、従来のP SpiceのMESFETモデルに代わって非線形HEMTモデル⁴⁾を採用した。

2. デバイスシミュレーション

Fig. 1にHEMTの基本的な構造を示す。GaAs系の化合物半導体のヘテロ界面に生じる2DEGにより電流が流れる。この2DEGは、その電子を供給するドナーの層とヘテロ界面により空間的に分離されており、ドナーによるイオン散乱の影響を受けない。したがって、低ノイズ特性を示す。一方、GaAs系半導体では、シリコン等に比べて電子の移動度が10倍以上大きいため、高速動作が期待される。

平成9年12月22日受付

* 電子デバイス工学専攻修士課程

** 工学部電気情報工学科

*** 電子デバイス工学専攻

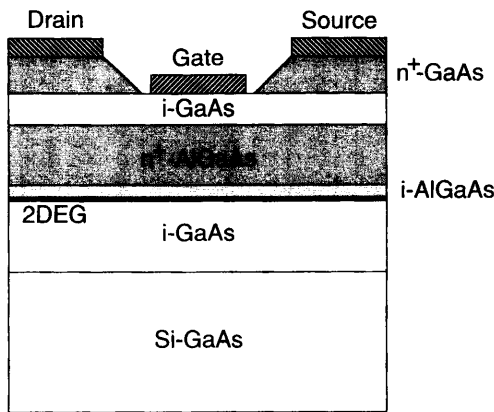


Fig.1 HEMT structure.

2次元デバイスシミュレータとしてMedici (TMA社)を使用した。HEMTはヘテロ構造であるために、従来のヘテロ界面の物理を考慮していないデバイスシミュレータではシミュレーションができないが、Mediciではヘテロ界面を取り扱うための特別なオプションAAM (Advanced Application Module) を有している。しかし、Mediciでは量子効果的な計算を直接的には行っていないことから、低バイアス状態では量子化に伴う効果を取り込まれないために不都合が生じる恐れがある。一方、通常動作での高バイアス状態では、大きな電流が流れるために量子効果的な影響は小さいと考えられる。

2.1 デバイス構造

Fig. 2にシミュレーションに用いた $0.3\mu\text{m}$ ゲート長GaAs系HEMTの構造を示す。基本的なHEMTの構造との違いは、イオン散乱を減らすためのアンドープInGaAs層 (スペーサ層) が電子供給のnドープInGaAs層と電子走行層のGaAs層間に成長させてあることである。また、ドレインとソース電極下では、接合抵抗を下げるために一様に深く掘込んだn-GaAs層のモデルとしてある。

デザインルール $0.3\mu\text{m}$ のデバイスであるために短チャンネル効果が現れ、電子速度のオーバーシュート現象を考慮する必要がある。したがって、飽和速度と臨界電界はバルクの値を使うことはできない。ここでは、オーバーシュートを考慮して、電子速度を $3.5 \times 10^7 \text{cm/sec}$ 、臨界電界は $9 \times 10^3 \text{V/cm}$ ²⁾とした。

2.2 メッシュ構造

Fig. 3に、シミュレーションに用いたHEMTのメッシュ構造を示す。デバイスシミュレーションでは、メッシュの切り方が結果に大きな影響を及ぼすため、注意を要する。HEMTでは、通常のシリコン系デバイスシミュレーションに用いるメッシュと違って、電子が走行するヘテロ界面とGaAs層を小さなメッシュで構成してい

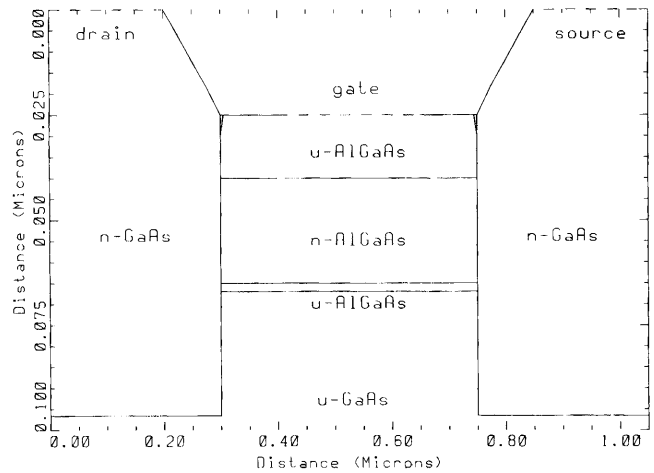


Fig.2 HEMT structure used in simulation.

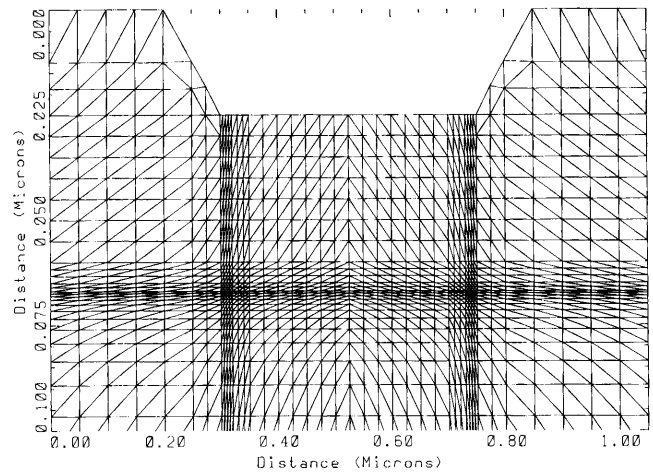


Fig.3 Mesh structure of HEMT used in simulation.

る。電子が走行するGaAs層では、ヘテロ界面のメッシュは厚さ 0.5nm の三角メッシュとしている。

3. 計算結果

Fig. 4に、電流-電圧特性のシミュレーション結果を示す。同一構造のデバイスの実測値も同時に示してある。実線が測定値であり、黒丸が計算値である。デバイスシミュレーションによる電流・電圧特性は、低ゲート電圧領域を除いて実測値とよく一致している。しかし、この結果は、n-AlGaAs層のドーブ量を実際のデバイスの半分の値にして計算したものである。これは、デバイスの設計値のドーブ量で計算した場合、電流が約20%多く計算されたためである。この計算値が大きい理由は、実際のデバイスではドーブされたドナーがすべて活性化されて

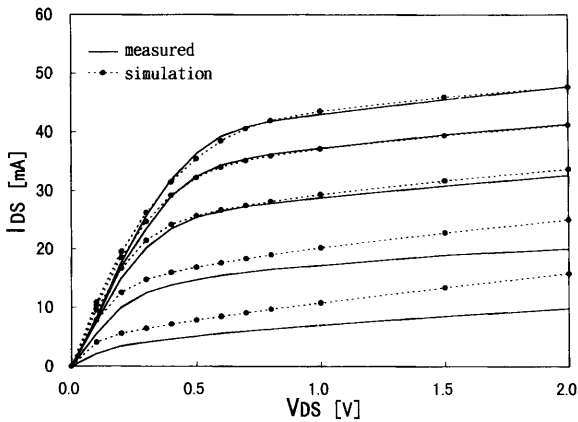


Fig.4 Device simulation result compared with the experiments.

おらず電流が少なくなるのに対して、デバイスシミュレーションではドナー全てが活性化されたものとして計算するためであると思われる。

しきい値に関しては、設計値、すなわち構造のみで決まる以外の要因、例えば界面準位等の影響の比重が大きく計算で求めるのは困難である。実際、同じ製造ロット、さらには同一ウェハ内でもかなりばらついている。今回の場合、実測値と設計値で計算した値はドープ量を半分にした場合にほぼ同じになった。これについては、プロセスシミュレーションによる不純物分布や界面準位の正確な予測が必要である。

4. HEMTのモデリング

回路シミュレーションでは、デバイスのモデルが非常に重要である。回路シミュレーション用のモデルでは、実測データまたは前に述べたデバイスシミュレーションによる計算結果、すなわち特性を比較的簡単に精度良くフィッティングできることが重要である。先に述べたように、従来の回路計算¹⁾は、MESFETモデルを用いていた。このモデルは、通常のSPICEの標準モデルであるため新たにモデルを作成する必要がなく簡便に用いることができることが特徴である。しかし、MESFETモデルをHEMTモデルして使用する場合、線形領域を正確に表現できないという問題が生じる。

Fig. 5に、実測値をMESFETでフィッティングした結果を示す。ドレイン電圧の全領域で誤差が最小になるようにフィッティングした結果である。しかし、通常は線形領域で誤差が大きくなるのに対して今回は飽和領域の誤差が大きくなっている。回路シミュレーションでの電源電圧を1V以下と設定すると、ドレイン電圧が1V以下でほぼ正確にモデル化できていれば良い。したがっ

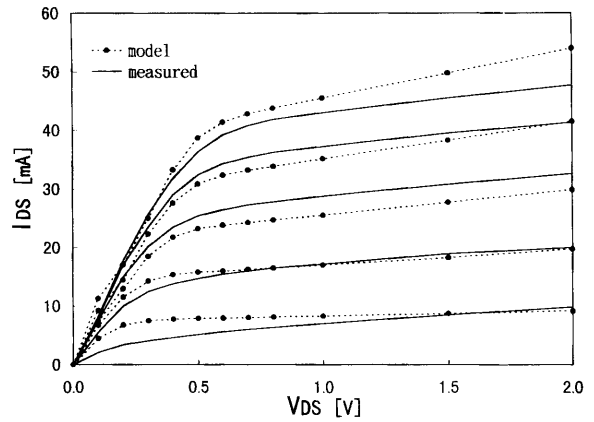


Fig.5 Fitting result of measured HEMT device with conventional MESFET model.

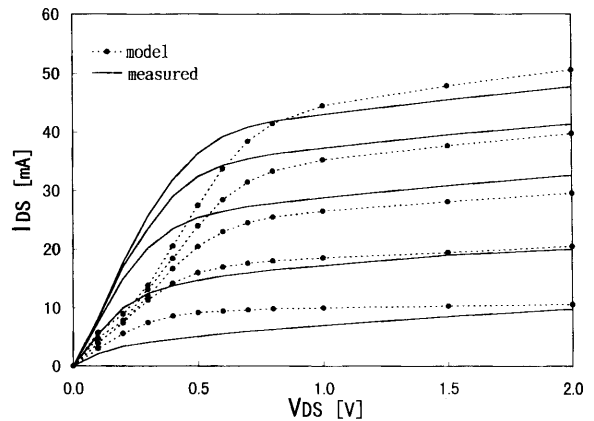


Fig.6 Fitting result of measured HEMT device with MESFET model. Fitted for the best match in the saturation region.

て前回の報告では、このモデルを使用した。この場合の絶対誤差は4.4%である。逆に飽和領域での誤差を小さくするようにフィッティングした場合の結果を、Fig. 6に示す。この場合には、線形領域での誤差が大きくなり、全領域の絶対誤差は9.8%となった。

両者の場合とも、低ゲート電圧側では比較的一致しているが、高ゲート電圧側ではドレイン電流を過大評価している。これは、2DEG以外での平行コンダクションによる電流の減少分を考慮していないためと思われる。

4.1 非線形HEMTモデル

MESFETモデルは、tanh 関数近似を基にしたモデルであり速度の飽和を簡単に表現できるモデルとして

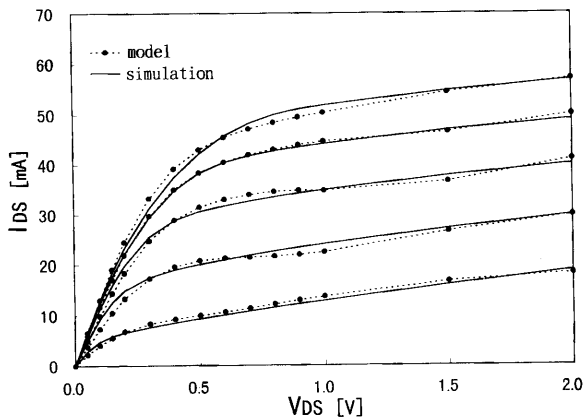


Fig.7 Fitting result for nonlinear HEMT model.

様々な回路シミュレータに導入されている。従来のHEMTモデルもこの \tanh 関数近似モデルを採用しているが、飽和電圧パラメータ α を定数として扱っているためにフィッティング精度に問題があった。この問題を解決するために、非線形飽和電圧パラメータを導入したモデルが提案された⁴⁾。このモデルでは、さらにドレイン電流および相互コンダクタンスのフィッティング精度向上のためとそれらのしきい値電圧依存性を考慮するために漸近線関数法を導入してある。ここでは、実測やデバイスシミュレーションによって求めたデバイス特性を表現できる非線形HEMTモデルの例として上記のモデルを取り上げ、その実用性の確認を行う。

前記非線形HEMTモデルにおいてドレイン電流 I_{DS} は、以下の式で与えられる。

$$I_{ds} = S_f \cdot \left\{ I_{dsds}(V_{ds}, V_{gs}) \cdot I_{dsgs}(V_{ds}, V_{gs}) \right\} \quad (1)$$

ここで、 S_f はスケールファクタであり、 $I_{dsds}(V_{ds}, V_{gs})$ および $I_{dsgs}(V_{ds}, V_{gs})$ は以下の式で与えられる。ここで、 $\alpha(V_{ds}, V_{gs})$ は飽和電圧パラメータであり、ドレイン電圧とゲート電圧に依存する。 $h(f_{lg}, g_g)$ は、漸近線関数である。

$$\begin{aligned} I_{dsds}(V_{ds}, V_{gs}) &= (1 + \lambda \cdot V_{ds}) \cdot \left\{ \tanh(\alpha(V_{ds}, V_{gs}) \cdot V_{ds}) \right\} \\ I_{dsgs} &= I_{subth}(V_{ds}, V_{gs}) \quad (V_{gs} < V_{TEF}) \\ &= I_{DSS} \cdot h(f_{lg}, g_g) \\ &\quad + I_{subth}(V_{ds}, V_{gs}) \quad (V_{gs} > V_{TEF}) \\ \alpha(V_{ds}, V_{gs}) &= \frac{A_X}{1 + \exp(A_D \cdot V_{ds} + A_G \cdot V_{gs} - V_X)} + A_F \end{aligned}$$

Fig. 7は、非線形HEMTモデルにフィッティングした結果を示したものである。実線が計算値で黒丸がモデルによる結果である。この図からMESFETモデルと比較して、精度良くフィッティングできていることがわかる。この場合の絶対誤差は1.6%であった。

5. ま と め

HEMTの構造設計に基づくデバイスの直流特性の計算を2次元のデバイスシミュレータを用いて行った。その結果、ある程度定量的にHEMTの直流特性を求めることが可能となった。これによりデバイス構造が与えられると、デバイスシミュレーションによりその特性を求めることが可能になり、その結果を回路シミュレーションモデルに反映することにより、一連の設計システムを構築できる見通しが得られた。また、回路シミュレーションの精度の向上を図るため、従来使用していたMESFETモデルに代わる非線形HEMTデバイスモデルを採用し、従来よりもフィッティング精度が向上した結果を得ることができた。

今後の課題としては、より定量的な検討ができるようなデバイスシミュレーションモデルの開発と、パラメータ抽出結果を実際の回路シミュレーションに適用することがあげられる。

謝 辞

本研究は、文部省科学研究費・基盤研究の補助を受けて行われたものである。

参 考 文 献

- 1) K. Nakashi, H. Taki, Y. Kudou and K. Taniguchi, "RTD/HEMT Logic Circuits and Their Functional Circuits Application", *Research Reports on ISEE, Kyushu University*, Vol.2, No.1, pp.47-52, March, 1997.
- 2) K. Nakashi, K. Taniguchi, Y. Oka and F. Nakamura, "A Short Channel HEMT Model for Circuit Simulation Based on Physical Structure", *Extended Abstracts of International Conference on SSDM*, pp.422-424, August, 1995.
- 3) C. Jacoboni and P. Lugli, "The Monte Carlo Method for Semiconductor Device Simulation", Springer-Verlag, Wien, 1989.
- 4) 廣瀬 達哉, 渡邊 祐, 「回路シミュレーション用非線形HEMTモデルの検討」, 信学技報, ED94-147, MW94-134, ICD94-209, pp.31-36, January, 1995.