

令和元年6月4日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14269

研究課題名(和文) 機械学習と非線形回路自動合成に基づく高周波デバイスモデリング

研究課題名(英文) High-frequency device modeling by network synthesis

研究代表者

天川 修平 (Amakawa, Shuhei)

広島大学・先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：40431994

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、測定データをもとに自動回路合成によって回路理論的意味での物理性を備えた高周波回路用デバイスモデルを生成する基礎技術を築くことを目指した。まず、周波数依存性抵抗器を含む1ポート回路網の合成方法について検討し、既存の理論を拡張した。これをCMOS伝送線路のモデリングに適用し、測定データ(Sパラメータ)からモデルを生成するプログラムを作成した。また、モデリング技術を応用して伝送線路の特性インピーダンスを数百ギガヘルツまで見積もる方法を提案した。MOSFETについてはニューラルネットワークでSパラメータから電流電圧特性の近似式を求めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、具体例としては数百ギガヘルツまでの周波数を含むサブテラヘルツ帯を利用した無線通信用集積回路の研究開発に資するものである。事実、研究成果である測定法とモデリング技術を利用して作成したCMOS集積回路上の伝送線路のモデルの一部は、300 GHz帯で動作するCMOSトランシーバ回路の設計に利用した。このトランシーバは、実測で80ギガビット毎秒の高速で通信できることが確認できた。今後もこれ以外の高周波集積回路の研究開発にも役立つものと期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aimed to build a basic technology to generate a device model for high frequency circuits with physical property in the circuit theoretical sense by automatic circuit synthesis based on measurement data. First, the synthesis method of one-port network including frequency dependent resistors was examined, and the existing theory was extended. We applied this to the modeling of CMOS transmission lines and created a program to generate a model from measured data (S-parameters). We also proposed a method to estimate the characteristic impedance of the transmission line to several hundreds of gigahertz by applying modeling technology. For the MOSFET, an approximation formula of current-voltage characteristics was obtained from S-parameters using a neural network.

研究分野：集積回路

キーワード：デバイスモデル 高周波回路 回路合成 伝送線路

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

回路シミュレーション用デバイスモデルは、回路理論的意味で「物理的」でなければならない。従来、デバイスモデリングで「物理的」といえば、デバイス物理を拠り所として式を導出したモデルを指すことが多かったが、真に重要なのはモデルの回路理論的物理性 (circuit-theoretic physicalness, CTP) である。出発点となる式の導出が物理に依拠していても、モデルを実測に合わせるためにアドホックな修正を加えていった結果、モデルの CTP が失われてしまうことがままあった。これは、デバイス特性のある一側面 (たとえば 1 つの端子電圧に対する依存性) だけに着目して特性再現に腐心した結果、全体的な物理性が失われてしまうことがあるということである。では、すべての測定結果を再現でき、かつ物理的なモデルはどのようにしたら作れるかが当初の問いである。

### 2. 研究の目的

本研究では、測定データをもとに自動回路合成によって回路理論的意味での物理性を備えた回路シミュレーション用デバイスモデルを生成する基礎技術を築くことを目指した。モデルの用途として想定するのは、高周波 CMOS 回路設計である。回路理論的意味で物理性とは、1: シミュレーションの実行可能性 (回路方程式の可解性)、2: 電荷量保存則、3: エネルギー保存則、4: 因果律、が守られることである。本研究では、モデルの物理性、回路方程式の可解性を保証するために回路合成でモデルを生成することとし、そのプロセスを機械学習により自動化することを目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) Chua の回路理論の活用

既存の高周波デバイスモデリングとは異なるアプローチとして、Chua の提案した公理的回路理論を活用することを試みた。この理論は非線形回路までカバーするが、まずは線形素子のモデリングから行うこととし、伝送線路のモデリングを行った。伝送線路を 1 GHz 程度から 300 GHz 程度まで実測すると、線路を形成する誘電体 (絶縁体) の誘電率の実部はほぼ周波数に依存しない一方、誘電率の虚部は周波数に依存するという結果が得られる (右図の (b) の特性)。ところが、通常の抵抗器、インダクタ、キャパシタ (RLC) を組み合わせて作ったモデルでそのような特性を再現することは難しい (右図の (a) の特性)。そこで、「周波数依存線形抵抗器」を組み込んでモデル化を行うことを考えた。この素子は抵抗値が周波数に依存する。素子に恣意的な周波数依存性を与えると因果律を破ることが多いが、この素子は理論的に見出された素子であり、そのような問題がない。

#### (2) S パラメータに関する基礎検討

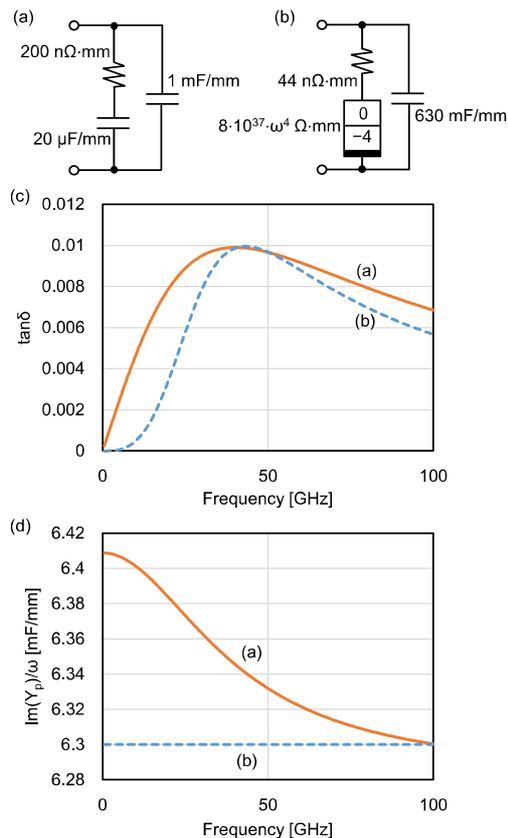
高周波モデリングの基礎となる測定・シミュレーションデータに関する検討として、電磁界シミュレータの算出する S パラメータの定義について考察した。S パラメータには互換性のない複数の定義があり、定義によって意味が異なるので、自分の利用しているシミュレータがどの定義の S パラメータを採用しているか把握していなければならない。ところが、S パラメータに複数の定義があること自体あまり認知されておらず、シミュレータのドキュメントを見て必要な情報が得られることはまれである。

#### (3) 伝送線路測定へのモデリング技術の応用

デバイスモデリングを行うには、モデリングの目標値となる測定データが必要である。測定されたオンチップ伝送線路の S パラメータから目標データの 1 つである伝搬定数を求めるのは容易だが、もう 1 つの目標データである特性インピーダンスを求める確立された方法はない。伝送線路のモデリングを行うにあたり避けて通れないので検討を行った。従来の方法はどれも数十ギガヘルツまでしか適用できないので、モデリング技術と組み合わせて適用周波数範囲をサブテラヘルツまで広げることを考えた。

#### (4) S パラメータから MOSFET の電流電圧特性抽出

ニューラルネットを利用して S パラメータから電流電圧特性のモデリングを行った。プログラムの作成・テストにあたっては、当初の予定通り実測データの代わりに回路シミュレーションで生成した「擬似測定データ」を利用した。



#### 4. 研究成果

##### (1) 周波数依存性抵抗器を利用した高周波デバイスモデリング

通常の RLC とともに周波数依存線形抵抗器を使って伝送線路のモデルを構築し, 65 nm CMOS プロセスで試作した伝送線路 3 品種のモデリングを行ったところ, 実測される周波数依存特性をうまく再現することができた. 今回の試みの結果, 周波数依存線形抵抗器等を含む場合, 既存の線形回路理論で知られている回路合成手法をそのままでは適用できないことがわかったので, 周波数依存線形抵抗器を含む 1 ポート回路網の合成について理論的検討を行い, 既存の抵抗器, インダクタ, キャパシタ (RLC) からなる回路合成理論を拡張した. また, 回路合成にもとづき伝送線路のモデリングをおこなうプログラムを作成した. いくつかの CMOS 伝送線路にこれを適用したところ 結果的には, 多くの伝送線路については, RLC だけからなるモデルで実用上十分な精度で測定結果を再現できることがわかった. 周波数依存性抵抗器を含むモデルは安定性に問題がある場合があり, 回路シミュレータへの組み込みにも課題があるので, RLC だけでモデル化できるのは好ましい. しかし, RLC だけではうまくいかない場合は特殊な回路素子が必要と考えられる.

##### (2) S パラメータに関する基礎検討

伝送線路構造の電磁界解析結果をもとに S パラメータの定義を判別する手法を考案した. この手順にもとづいていくつかの電磁界シミュレータを調べたところ, 異なる S パラメータの定義を採用していることが明らかとなった.

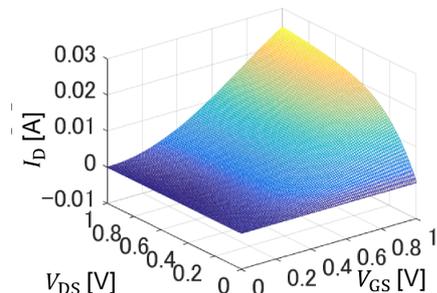
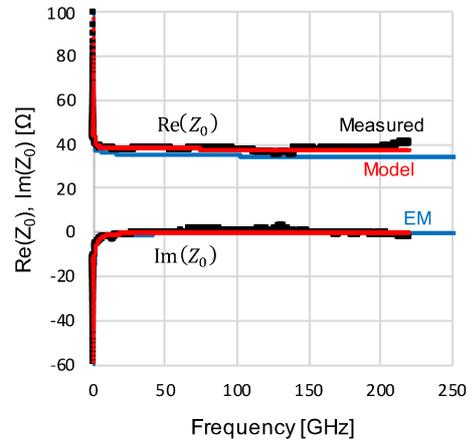
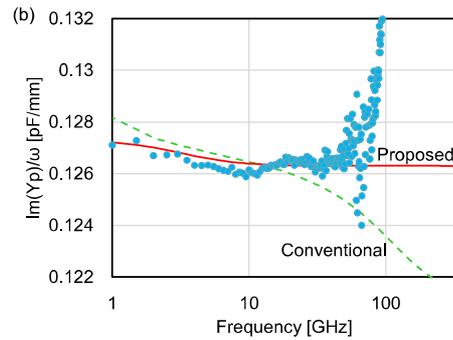
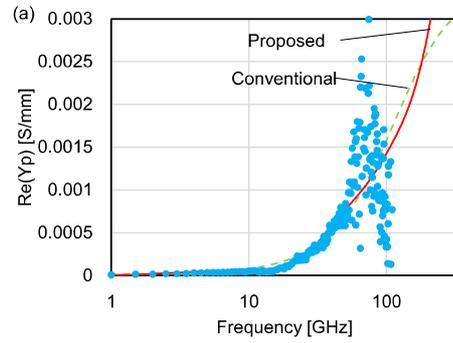
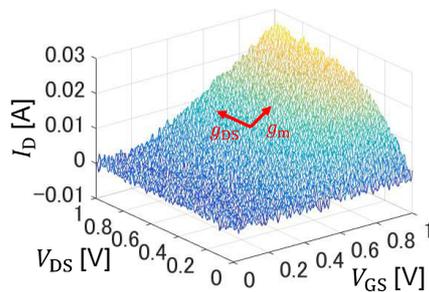
##### (3) 伝送線路測定へのモデリング技術の応用

まず, calibration comparison と称される方法を改良し, S パラメータから伝送線路の特性インピーダンスを求める式を導出した. この式と回路合成によるモデリング技術を組み合わせ, 数百ギガヘルツまで適用できる伝送線路の特性インピーダンス測定方法を考案した. またこの方法で 40 nm CMOS プロセスと 55 nm CMOS プロセスで試作した数品種の伝送線路を測定し, 回路理論的物理性を備えた伝送線路モデルを作成した. これらのモデルの一部は 300 GHz 帯で動作する CMOS トランシーバ回路の設計に利用した. このトランシーバは, 実測で 80 ギガビット毎秒の高速で通信できることが確認できた. そのモデルとサブテラヘルツまで測定した伝搬定数とを組み合わせ, 伝搬定数と同じ周波数範囲で causal な特性インピーダンスを求める方法を提案した. 特性インピーダンス  $Z_0$  の実部と虚部の例を図に示す.

##### (4) S パラメータから MOSFET の電流電圧特性抽出

周波数が非常に高くなると, 非線形部分と線形寄生回路網を組み合わせる必要が生じるため, 今回は数ギガヘルツまでのあまり高くない周波数に限定した. S パラメータは微分値なので, それをそのまま積分しただけではノイジーになり, また結果が積分経路に依存してしまう. ニューラルネットを利用して近似式を出すことで, トランジスタのコアのアクティブ部分を対象とした電流電圧特性の再現に成功した.

電流電圧特性の再現に成功した.



## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- [1] S. Amakawa, “Scattered reflections on scattering parameters—Demystifying complex-referenced S parameters—,” IEICE Trans. Electron., vol. E99-C, no. 10, pp. 1100–1112, October 2016( 査読あり ). <http://dx.doi.org/10.1587/transele.E99.C.1100>

〔学会発表〕(計 4 件)

- [1] S. Amakawa, A. Takeshige, S. Hara, R. Dong, S. Lee, T. Yoshida, M. Fujishima, K. Masu, and H. Ito, “Causal characteristic impedance determination using calibration comparison and propagation constant,” 92nd ARFTG Microwave Measurement Conference, pp. 1–6, January 2019. <https://doi.org/10.1109/ARFTG.2019.8637225>
- [2] S. Amakawa, “How does my microwave/EM simulator define complex-referenced S-parameters?,” Vietnam-Japan Microwave (VJMW), pp. 112–115, June 2017.
- [3] Y. Kobayashi and S. Amakawa, “Prescriptions for identifying the definition of complex-referenced S-parameters in commercial EM simulators,” The 38th PIERS in St Petersburg Abstracts, pp. 264–265, May 2017.
- [4] A. Takeshige, Y. Ito, K. Takano, K. Katayama, T. Yoshida, M. Fujishima, and S. Amakawa, “Causal transmission line model incorporating frequency-dependent linear resistors,” 21st IEEE Workshop on Signal and Power Integrity (SPI), pp. 1–4, May 2017. <https://doi.org/10.1109/SaPIW.2017.7944045>

## 6 . 研究組織

### (1) 研究協力者

研究協力者氏名：藤島 実

ローマ字氏名：(FUJISHIMA, Minoru)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。