

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：25403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06075

研究課題名(和文) 量子力学的光・テラヘルツ波受信回路の非線形確率微分方程式による記述とモデリング

研究課題名(英文) Description of light and tera-hertz wave quantum-mechanical receiver circuits by nonlinear stochastic differential equation and building their circuit simulator models

研究代表者

藤坂 尚登 (Fujisaka, Hisato)

広島市立大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：30305784

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)：光・テラヘルツ波通信のための量子力学的現象を基にした受信回路を例示し、回路シミュレータモデルを作成するために量子力学的受信回路の検波・弁別部を古典力学的確率常微分方程式で記述した。これにより、検波・弁別部における電子の振るまいを波動の伝搬ではなく、単電子トンネリングデバイスからなる復号部と同様に粒子の不規則な動きとして表現でき、受信回路全体を統一的にシミュレーションするための回路モデルを構築できた。周波数変調とスペクトル拡散を組み合わせたテラヘルツ通信の品質を事前評価することを想定し、回路モデルを用いたシミュレーションを行った。これにより回路モデルの有用性を確認できた。

研究成果の概要(英文)：We exemplified a quantum mechanical receiver for Tera-hertz communications and described the detection and discrimination circuits in the receiver by classical mechanical stochastic ordinary differential equations. As a result, we represented the behavior of electrons in the circuits not by wave propagation but by random particle motion like that of electrons in a decoder circuit built of single-electron tunneling devices. It enabled to model all the circuits in the receiver consistently and simulate whole the receiver circuits simultaneously. To validate the usefulness of the models, we estimated communication quality of a tera-hertz spread spectrum communication system.

研究分野：量子効果を基にした非線形通信回路のモデリング

キーワード：量子効果デバイス 非線形回路 通信 シミュレータモデル

1. 研究開始当初の背景

近年、未開の周波数帯域であるテラヘルツ(THz)帯を活用したセンシングや通信が注目されている。THz帯域は微量な物質を同定できるセンシングや、秘匿性の高い高指向性短距離通信を可能とする。また、THz帯域の電磁波を光子として検出して電子の流れ(ストリーム)に変換する半導体量子井戸やカーボンナノチューブ応用デバイスが研究され、検波器への応用が期待されている。研究代表者は、信号形態を1ビット・ストリームとし、各ビットを単一電子や単一磁束量子により表現して信号処理を行う回路の設計を試みてきた。さらに、運動エネルギーに応じて電子を弁別する電子波フィルタの解析・設計も開始している。

これらのデバイスを用いた検波器と弁別器に単一電子信号処理に基づく復号器を加えて受信機を構成すれば、通信システムの高性能化、省電力化に寄与できるであろう。しかし、検波器と弁別器では電子を波動として、単一電子復号器では電子を粒子として表現し、それらがモデリングされている。これは、例えば通信品質の事前解析のための受信機全体の動作シミュレーションを困難にする。

この問題を解決するためには、検波器、弁別器、復号器における電子の表現を統一し、モデリングの一貫性を得る必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的の1つは、検波器と弁別器内部の電子を復号器に合わせて確率的な古典的粒子と見なし、電子の運動を記述する非線形確率常微分方程式を導出することである。ただし、導出する方程式は電子間相互作用を表現できる形式とする。目的の2つめは、導出した方程式から検波器、弁別器の回路シミュレータ用モデルを作成し、復号器と統合した受信機のシミュレータを制作することである。

量子力学的原理に基づくデバイスや回路を記述する非線形確率常微分方程式を立てることは、それらを確率的集中定数系にモデリングすることであり、このようなモデリング手法は本研究独自のものであり、現在の汎用回路シミュレータに適したデバイス・回路モデルとなりうる。よって、本研究が目指す方法が確立されれば、汎用回路シミュレータを用いて量子力学的原理に基づくデバイスから構成されるTHz帯センシング・通信システムの正確な性能推定が可能となる。

3. 研究の方法

研究を次の4段階に分けて進める。

- Phase 1: 量子系を等価な古典的確率系に変換する理論の構築
シュレディンガー方程式により記述さ

れる1粒子量子系をフォッカープランク方程式やランジュバン方程式により記述される古典的確率系に変換する確率過程量子化理論を多粒子量子系に適用できるように発展させる。また、確率セルラーオートマタを基にディラック方程式により記述されるナノカーボン上の電子の運動も古典的確率系で表現することを試みる。

- Phase 2: 検波器、弁別器の古典的確率モデルの作成と数値実験

検波器、弁別器を各々複数種類考案し、それらの内部電子の振るまいを表現する確率常微分方程式を Maple を援用して導出し、Matlab を用いて方程式の数値積分を行い、電子軌道の標本を算出する。

- Phase 3: 単電子復号回路の設計とシミュレーション

周波数変調とスペクトル拡散を組み合わせた THz 通信を想定し、単電子トンネリング素子を用いた復号器の回路を設計し、単電子回路シミュレータ SIMON を用いて機能を検証する。

- Phase 4: 受信器シミュレータの構築

検波器と弁別器のモデルを記述した Matlab プログラムと復号回路が記述された SIMON の実行ファイルをスキマティック・シミュレータ Simulink 上で統合し、受信機全体のモデルを構築する。

4. 研究成果

各段階ごとの成果を述べ、最後に総括する。

- Phase 1 では、多粒子量子系を記述するシュレディンガー方程式から古典多粒子確率系に変換する理論を確立した(5. 主な発表論文等に示すリスト中の⑬)。

また、グラフェン上の電子の運動を記述するディラック方程式が示す確率流に乗って動く電子の軌道サンプルを算出する方法を確立した(同⑭)。図1に算出した電子軌道サンプルとディラック方程式の波動関数を対比して示す。波束である波動関数の伝搬に対応した電子軌道が算出されていることが分かる。

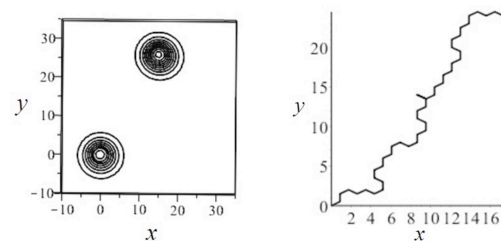


図1: グラフェン上の電子の波束と軌道

さらに、グラフェンにおける電子の動作を巨視的に解析するための非線形応答理論を

確立した(同⑦).

□ Phase 2 では, 半導体量子ドットを用いた検波器(同④, ⑥), カーボンナノチューブをチャネルとする単電子フォトトランジスタを用いた検波器(同⑧)とシリコンおよびグラフェン上のスタブ付電子波フィルタを用いた弁別器(同③, ⑤)の数理モデルを構築した. すなわち, これらの検波器, 弁別器内部の電子の軌道サンプルを与えるランジュバン型確率常微分方程式等を導出した.

方程式の数値積分により検波器内部の電子軌道のサンプルを算出した例として, 図2にさまざまなエネルギー準位に励起された場合の電子軌道(同⑩)を示す. 波動関数の対称性が電子軌道サンプルにも現われている.

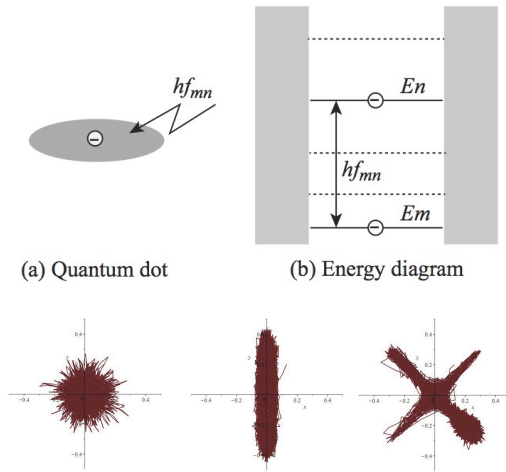


図2: 量子ドットの模擬図(上)とさまざまな励起状態における電子の軌道(下)

また, 図3に結合電子波線路とスタブ付電子波線路を組合せた弁別器(同②)の内部電子軌道のサンプルと波束である波動関数の伝搬を対比して示す. 入射された電子の運動エネルギーによって, 電子がスタブ付電子波線路の右または結合電子波線路の左に振り分けられ, 弁別機能が示されている.

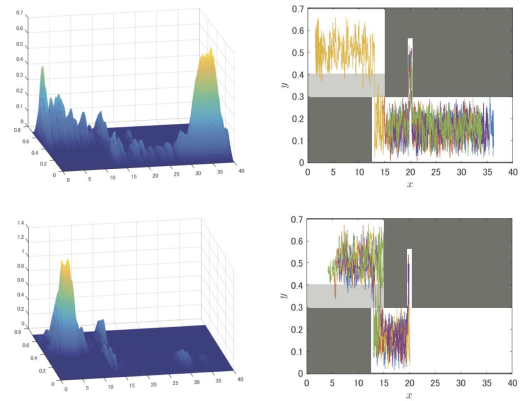
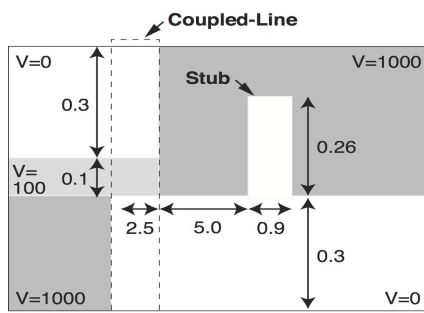


図3: 弁別器の構造(左下), 内部の電子波束(左)と電子軌道サンプル(右)

□ Phase 3 では, 周波数変調とスペクトル直接拡散方式を組み合わせた THz 通信, および周波数ホッピングスペクトル拡散方式による通信を想定し, それぞれの通信に用いる復号器を設計した(同⑨, ⑩).

前者の通信に用いる復号器を単電子トンネリングデバイスを用いて設計した例を図4に示す. 送信機における符号化に対応した弁別器からの電子のストリームが与えられた場合の復号器の動作をシミュレーションし, 設計した復号器の機能を確認した.

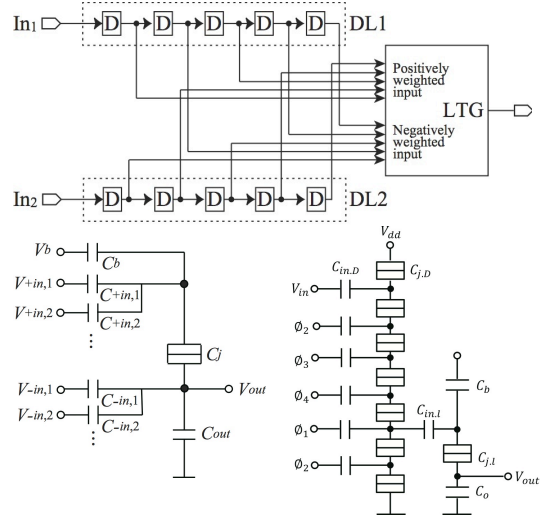


図4: 復号器(上)とその構成要素であるLTG(左下)とUnitDelay(右下)

□ Phase 4. 検波器から出力される単一光電子の運動エネルギーは照射された THz 帯電磁波の周波数に比例する. 検波器からの光電子を弁別器が受けて, 運動エネルギーにより振り分けられ, 周波数変調された THz 波を復調できる. 弁別器が振り分けた光電子のストリームパターンを復号器が解析し, 送信デ

ータを推定する．例えば，図3の弁別器の Output 1, 2 は図4の復号器の In 1, 2 に接続される．

このように検波器が出力する光電子が弁別器を通り，復号器に入力されるように受信機のモデルを構成した．モデルを用いて量子揺らぎによる受信機の誤りを評価するシミュレーションを行い，モデルの機能を確認した(同⑨，⑩)．

量子効果デバイスは，電子の運動を波の伝搬として表現して機能が解析されるデバイスと，電子の運動を確率的粒子の動きとして表現して解析されるデバイスに分かれていた．本研究では，内部電子の運動がシュレディンガー方程式により記述されるナノメートルスケールの半導体デバイスやディラック方程式により記述されるナノカーボンデバイスに対して，内部電子の動作を確率的古典粒子と見て，確率常微分方程式で記述した．これにより，さまざまな量子効果デバイスから構成されるシステム（本研究では THz 波帯通信系）を統合してシミュレーションできる道を切り開いた．本研究が今後考案されるさまざまな量子システムの解析に重要な道具を提供することを期待する．

当初予期していなかった成果として，量子ドットに電磁波が照射されたとき，内部電子の動きにカオス性が内在していることを明らかにし(同①)，古典カオスの検証法をそのままの形で量子カオスに導入できる可能性を示すことができた．今後，これが物理学や数理学分野において検討され，発展することも期待したい．

今後の課題としては，5. に示す国際会議の論文を充実させて学術論文にまとめ，本研究成果を普及させることに努めたい．

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 13 件)

- ① K. Matsuura, H. Fujisaka, et.al., “An Indication of Quantum Chaos Based on Stochastic Quantization,” Int'l Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications, 2018.
- ② S. Hayakawa, H. Fujisaka, et.al., “A Probabilistic Cellular Array Model of Three-Port Electron Wave Filter,” Int'l Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications, 2018.
- ③ S. Hayakawa, H. Fujisaka, et.al., “A Stub-Structured Graphenic Frequency discriminator for THz Communication,” IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, 2017.

- ④ K. Matsuura, H. Fujisaka, et.al., “Behavior of the Classical Model of Quantum Multi-particle System in the Rabi-Oscillatory State,” IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, 2017.
- ⑤ S. Hayakawa, H. Fujisaka, et.al., “A Numerical Model of a Frequency Discriminator for Terahertz Sensing and Communication Using Photoelectric Detectors,” Int'l Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications, 2017.
- ⑤ K. Matsuura, H. Fujisaka, et.al., “Behavior of Excited Interacting Particles Confined in a Quantum Dot,” Int'l Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications, 2017.
- ⑦ S. Kuwata and H. Fujisaka, “Nonlinear Response Theory of Electronic Transport in Graphene,” Int'l Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications, 2017.
- ⑧ I. Nakamura, K. Matsuura, H. Fujisaka, et.al., “Stochastic Quantization of a One-Dimensional Multi-Particle System for the Circuit Simulator Model of Photoelectric Terahertz Wave Detectors,” Int'l Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications, 2017.
- ⑨ J. Sato, A. Setsuie, H. Fujisaka, et.al., “Single-Electron Decoder Circuits for Communication Systems Using Photoelectric Effect and Electron Wave Frequency Discrimination,” Int'l Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications, 2017.
- ⑩ K. Matsuura, H. Fujisaka, et.al., “Excitation-Frequency-Dependent Symmetry of Probabilistic Trajectory of A Particle on A Circular Disc,” Taiwan Japan Joint Workshop on Circuits and Systems, 2017.
- ⑪ A. Setsuie, J. Sato, H. Fujisaka, et.al., “Single-Electron Decoder Circuits for communication Systems Based on Quantum Mechanics,” IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, 2016.
- ⑫ S. Hamano, H. Fujisaka, et.al., “A Probabilistic Model of Nano-Carbon Materials Based on Probabilistic Current,” Int'l Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications, 2016.
- ⑬ T. Murakami, H. Fujisaka, et.al., “Stochastic Quantization for Quantum Systems of

Multiple Particles,” IEEE Workshop on
Nonlinear Circuit Networks, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤坂 尚登 (FUJISAKA, Hisato)
広島市立大学・大学院情報科学研究科・
教授
研究者番号：30305784

(2) 研究分担者

桑田 精一 (KUWATA, Seiichi)
広島市立大学・大学院情報科学研究科・
准教授
研究者番号：80275403

田中 輝雄 (TANAKA, Teruo)
広島市立大学・大学院情報科学研究科・
教授
研究者番号：80227149