

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：25403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04394

研究課題名(和文)量子ドット結合系の非線形確率常微分方程式による記述と大容量THz無線通信の検討

研究課題名(英文)Representation of coupled quantum dots by nonlinear stochastic ordinary equation and its application to simulation of THz communication system

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) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：時空間コーディングによる高速テラヘルツ(THz)帯通信系を高周波技術の延長線上ではなく量子力学系を応用して実現できるかの可能性を検討する。検討のためのシミュレーションに必要な量子系の数理モデルを確率過程量子化を発展させて構築した。このモデルを用いたシミュレーションとシンボル列誤り訂正の検討により、GaAsやナノカーボン材料からなる円環状に配置された量子ドットを用いて、拡大体LDPC符号列を直交振幅変調した信号に異なる軌道角運動量を与えて多重化したTHz通信システムを実現できる可能性があることを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スマート社会に不可欠なデジタル無線通信はミリ波やテラヘルツ(THz)波の帯域にまで拡大されようとしている。また、スマート機器やIoT機器に内蔵される無線通信モジュールの小型化や省電力化が求められている。これを達成するためには、従来の高周波技術の延長線上ではなく量子力学系を応用したTHz帯送受信系を検討することが重要となる。本研究は、独自の数理モデルを用いたコンピュータシミュレーションにより、100Gb/sに迫るTHz帯域近接通信の可能性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：This research discusses a possibility whether or not quantum mechanical high speed terahertz(THz) communication systems employing spatiotemporal coding can be constructed. Mathematical model of quantum communication units are developed based on the stochastic quantization as an evaluation tool of the communication systems. The receiver units for the communication are designed by arranging GaAs or nano-carbon quantum dots circularly. The results of computer simulation by using the mathematical model imply that quantum mechanical THz communication systems using Galois field LDPC, quadrature modulation, and orbital angular momentum multiplexing can be constructed.

研究分野：通信・信号処理システム，量子系のモデリング

キーワード：通信システム 量子力学系 数理モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ (THz) 帯域の電磁波を用いたセンシング・無線通信の研究が活発に行われている。その研究の大半は、例えば HEMT (高電子移動度トランジスタ) を用いて従来の高周波回路技術を THz 帯域に超高周波化するものと言える。一方、THz 帯域で動作する量子力学的現象に基づくデバイス、例えば、共鳴トンネルダイオード (RTD) を用いた THz 発振回路、カーボンナノチューブ (CNT) を組み込んだ THz 光子/光電子変換トランジスタなどが報告されている。THz 波無線通信系をこれらの量子効果デバイスを用いて構成すれば、通信系の小型・低電力化や受信機の高感度化が期待できる。また、THz 波無線通信にも将来の情報機器間近接通信などを見越した時空間コーディング技術が導入され、通信容量の向上がもたらされると予想される。例えば、送信部は、各々にアンテナが接続された RTD 発振回路の結合系が想定される。しかし、受信部に関しては、検波に応用できるような量子効果デバイスからなる結合回路は見当たらない。

2. 研究の目的

本研究は、THz 帯域無線通信系の小型・低電力化や受信機の高感度化を目指して、高周波技術の延長線上ではなく通信系を量子系として構成し、さらに、大容量通信を可能とする時空間コーディングを導入するための基盤を築くことを目的とする。具体的には、

- (1) 量子ドット結合系を通信性能評価に適した非線形確率常微分方程式により記述し、数理モデル化する。
- (2) 時空間コーディングされた THz 帯電磁波を照射された量子ドット結合系がデコーディング機能を持つように、(1) の数理モデルを援用して、その構造を決定する。
- (3) 量子ドット結合系による検波に適した時空間コーディング方式を考案し、通信性能の推定を行う。

3. 研究の方法

研究は大きく分類して、(Phase 1) 量子ドット結合系のモデリング、(Phase 2) 量子ドット結合系の設計、(Phase 3) 時空間コーディングの検討、の3段階からなる。

(Phase 1) では、続く (Phase 2)、(Phase 3) におけるシミュレーション用の数式モデルを次のように2段階で構築する。

(1-a) 量子ドット結合系内部の電子を表現する波動関数を求める。

(1-b) 確率過程量子化により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。波動関数は数値的にはなく、タイトバインディング法などを用いて解析的に得る。この波動関数に確率過程量子化を適用して得られる非線形確率常微分方程式はコンパクトになり、(2)、(3) におけるシミュレーションを高速化できる。

(Phase 2) では、系の組成・構造などを次のように2段階で検討する。

(2-a) 量子ドットの組成、形状・配置や通信信号の周波数・位相分布等のさまざまなパラメータと量子ドット結合系の状態の関係を(1)のモデルを用いてコンピューターシミュレーションにより把握する。

(2-b) 適切なパラメータが与えられた系が時空符号化された通信信号を復号する機能を持つことを確認する。

(Phase 3) では、量子ドット結合系の出力に含まれる量子雑音・応答遅延等を(1)のモデルを用いたシミュレーションにより定量化し、そのデータと関数解析論を駆使して時空間コード間干渉を推定しながら、最適な時空間コーディング方式を考案する。

4. 研究成果

(Phase 1)

(1-a) 直線状および円環状に配置された量子ドット結合系の電子を表現する波動関数をタイトバインディング法を用いて解析的に求めた[1]。

(1-b) 確率過程量子化により、電子の運動を記述する非線形確率常微分方程式を導出した。常微分方程式として記述したことにより、既存の回路シミュレータ用モデルを作成でき、従来の量子効果デバイスの回路シミュレータモデルと統合して、通信系をモデリングしシミュレーションすることができた[2]。次に、電子のスピンを考慮し、より現実の物理系に近いモデル化を行った[4][9][10][13]。従来の量子系の非線形確率常微分方程式によるモデル化にはスピンの考慮がされておらず、この成果の新規性は高い。さらに、スピン軌道相互作用を取り入れてモデルの改良を行った[15]。

(Phase 2)

(2-a) 量子ドットの組成、形状を検討した。具体的には、シリコンと GaAs を組成とする量子ドット、また、グラフェンに磁界を印加して生成した調和振動ポテンシャルについて、数理モデルを作成し、特性を推定する方法を検討した[6]。グラフェン上のポテンシャル系に対しては、(Phase 1) において構築した理論を適用し、電子の振るまいと、その

パラメータによる差異を解析した。電子の運動はディラック方程式により記述されるが、このような運動を非線形確率常微分方程式でモデル化した従来研究はなく、この成果の新規性も高い[3][7]。

(2-b) 共鳴トンネルダイオード応用結合発振器が円環状結合量子ドットに照射するTHz波のモデリングを行った[5][8][12]。このTHz波モデルを用いたシミュレーションにより、円環結合量子ドットが軌道角運動量(OAM: quantum angular momentum)変調された多重THz波を各モードのOAM波に分離できる可能性を確認した[14]。特に、GaAs系材料を用いた円環結合量子ドットに対して、応答速度等を、OAMモードや変調指数等をパラメータとして、詳細に解析した[16]。その結果、応答はパラメータに依存するが、10ps程度の時間を要することが確認できた。

(Phase 3)

共鳴トンネルダイオードを用いた結合発振器による時空符号化と、それに合わせたシンボルレベルのLDPC符号・復号を検討した。具体的には、シンボルレベルの誤り訂正を理論化し[11]、シンボルが反映された直交性のあるOAM波を多重化するための共鳴トンネルダイオード応用結合発振器を設計した。

円環結合量子ドット中の電子の振るまいはOAMモードによって異なるが、微小電流としてモード別に検波できる可能性を確認した。この、微小電流を分析し、データの拡大LDPC符号化、QAM変調、OAM空間多重化を組み合わせた通信の実現可能性を見出した。しかし、微小電流のスペクトルから周波数多重化と空間多重化の併用は困難であると考えられる。

また、Phase 3の発展研究として、拡大LDPC復号の量子コンピューティングアルゴリズムを開発した。

以上の3段階の研究の結論として、本研究は100Gbpsに迫るTHz帯域近接通信の可能性を示唆した。

文献

- [1] Ibuki Nakamura, Hisato Fujisaka, and Masaru Fukushima, "Long Periodic Walk of a Single-Electron in a Set of Electrically Excited Quantum Dots," International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 2019.
- [2] Shota Hayakawa, Nobuyuki Hirami, Ibuki Nakamura, and Hisato Fujisaka, "Representation of Quantum Waves and Particles in Hybrid Continuous-Discrete Momentum Fields," International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 2019.
- [3] Ibuki Nakamura and Hisato Fujisaka, "Consideration of Quasi-Periodic Behavior of an Electron in Quantum Double-Well," IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, 2019.
- [4] Ibuki Nakamura and Hisato Fujisaka, "Classical Particle Model of an Electron in a Potential Generated by a Magnetic Field," Korean Japan Workshop on Complex Communication Systems, 2020.
- [5] Takahiro Kitagawa, Kyoshi Oyaizu, Tomoya Hamano, Masayuki Yamauchi, and Hisato Fujisaka, "Phase-inversion Traveling on THz Waveband Coupled RTD Oscillators," Korean Japan Workshop on Complex Communication Systems, 2020.
- [6] N. Hirami, I. Nakamura, H. Fujisaka, "Wave-to-particle representation transformation for single-electrons on graphene," Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, Vol.11, No.4, pp.501-516, 2020.
- [7] Nakamura and H. Fujisaka, "On the Invariant Curve of the Poincare Map of Excited Multi-Well Quantum System," International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 2020.
- [8] K. Oyaizu, T. Hamao, H. Fujisaka, and M. Yamauchi, "Circuit simulation of coupled RTD oscillator to generate OAM wave with arbitrary mode," IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, 2020.
- [9] I. Nakamura and H. Fujisaka, "Stochastic spin dynamics of an electron governed by the Pauli Equation," IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, 2020.
- [10] 中村, 藤坂, 「スピン-磁場相互作用を考慮した電子の確率的古典粒子モデル」, 信学技報 (NLP), 2020.
- [11] 山縣, 中村, 藤坂, 「拡大ガロア体 $GF(2^q)$ における離散フーリエ変換に関する考察」, 信学技報 (NLP), 2020.
- [12] 小柳津, 濱尾, 藤坂, 山内, 「位相波伝搬を伴うTHz帯域軌道角運動量通信用RTD結合発振器のシミュレーション」, 信学技報 (NLP), 2020.
- [13] Ibuki Nakamura and Hisato Fujisaka, "A classical particle model equivalent stochastically to Pauli spinor," Journal of Computational Electronics, Vol.21, pp.550-561, 2022.
- [14] Ibuki Nakamura and Hisato Fujisaka, "Behavior of Electrons in Periodic Potentials Excited by OAM Waves," IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks,

2021.

[15] Ren Yamanaka and Hisato Fujisaka, "Spherical Chaos of Electron State: Irregularly Varying Orientation of Spin Interacting with Orbit," IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, 2021.

[16] Ibuki Nakamura and Hisato Fujisaka, "Consideration of Behavior of Single-Electron in Periodic Potential Receiving THz waves," IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Ibuki Nakamura1 and Hisato Fujisaka | 4. 巻 21 |
| 2. 論文標題 A classical particle model equivalent stochastically to Pauli spinor | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Computational Electronics | 6. 最初と最後の頁 550-561 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10825-022-01883-z | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 N. Hiram, I. Nakamura, H. Fujisaka | 4. 巻 11-4 |
| 2. 論文標題 Wave-to-particle representation transformation for single-electrons on graphene | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE | 6. 最初と最後の頁 501-516 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.11.501 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件／うち国際学会 10件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ibuki Nakamura1 and Hisato Fujisaka |
| 2. 発表標題 Behavior of Electrons in Periodic Potentials Excited by OAM Waves |
| 3. 学会等名 2021 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ren Yamanaka and Hisato Fujisaka |
| 2. 発表標題 Spherical Chaos of Electron State: Irregularly Varying Orientation of Spin Interacting with Orbit |
| 3. 学会等名 2021 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 I. Nakamura and H. Fujisaka |
| 2. 発表標題 On the Invariant Curve of the Poincare Map of Excited Multi-Well Quantum System |
| 3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Oyaizu, T. Hamao, H. Fujisaka, and M. Yamauchi |
| 2. 発表標題 Circuit simulation of coupled RTD oscillator to generate OAM wave with arbitrary mode |
| 3. 学会等名 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 I. Nakamura and H. Fujisaka |
| 2. 発表標題 Stochastic spin dynamics of an electron governed by the Pauli Equation |
| 3. 学会等名 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中村伊吹, 藤坂尚登 |
| 2. 発表標題 スピン-磁場相互作用を考慮した電子の確率的古典粒子モデル |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山縣亮太, 中村伊吹, 藤坂尚登 |
| 2. 発表標題 拡大ガロア体GF(2 ^q)における離散フーリエ変換に関する考察 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小柳津恭志, 濱尾知也, 藤坂尚登, 山内将行 |
| 2. 発表標題 位相波伝搬を伴うTHz帯域軌道角運動量通信用RTD結合発振器のシミュレーション |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 早川翔太 中村伊吹 藤坂尚登 |
| 2. 発表標題 ナノカーボン電子の確率的古典粒子モデルに関する考察 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 安田明義 藤坂尚登 神尾武司 |
| 2. 発表標題 GF(2 ^q)LDPC 複合回路の階層化の試み |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Ibuki Nakamura, Hisato Fujisaka, and Masaru Fukushima |
| 2 . 発表標題 Long Periodic Walk of a Single-Electron in a Set of Electrically Excited Quantum Dots Ibuki Nakamura, Hisato Fujisaka, and Masaru Fukushima |
| 3 . 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Shota Hayakawa, Nobuyuki Hiram, Ibuki Nakamura, and Hisato Fujisaka |
| 2 . 発表標題 Representation of Quantum Waves and Particles in Hybrid Continuous-Discrete Momentum Fields |
| 3 . 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Ibuki Nakamura and Hisato Fujisaka |
| 2 . 発表標題 Consideration of Quasi-Periodic Behavior of an Electron in Quantum Double-Well |
| 3 . 学会等名 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Ibuki Nakamura and Hisato Fujisaka |
| 2 . 発表標題 Classical Particle Model of an Electron in a Potential Generated by a Magnetic Field |
| 3 . 学会等名 Korean Japan Workshop on Complex Communication Systems (国際学会) |
| 4 . 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takahiro Kitagawa, Kyoshi Oyaizu, Tomoya Hamano, Masayuki Yamauchi, and Hisato Fujisaka |
| 2. 発表標題 Phase-inversion Traveling on THz Waveband Coupled RTD Oscillators |
| 3. 学会等名 Korean Japan Workshop on Complex Communication Systems (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 桑田 精一 (Kuwata Seiichi) (80275403) | 広島市立大学・情報科学研究科・准教授 (25403) | |

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|-------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 中村 伊吹 (Nakamura Ibuki) | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|