

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04307

研究課題名（和文）局在光子場による単一フォノン操作を利用した量子ナノデバイスの極限的熱散逸制御

研究課題名（英文）Extremely precise control of thermal dissipation in quantum nanodevices using single-phonon manipulation by localized photon fields

研究代表者

石川 陽（ISHIKAWA, Akira）

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：10508807

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：量子ナノデバイスの動作性能の向上を目指し、局在光子場による単一フォノン操作にもとづく極限的熱散逸制御の理論的提案を目指し研究を行った。その結果、（1）局在光子場を介したナノ構造間における相互作用の起源の解明、（2）ナノプローブによる局在光子場の制御手法の提案、（3）ナノスケールの熱概念を記述するための理論構築、（4）局在光子場を介した励起移動にともなう単一フォノン状態変化の解明に成功し、学術的に重要な成果を上げるとともに、単一フォノン操作による熱散逸制御の実現へ向けた知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子ナノ系に対してマクロな系での熱力学的概念をそのまま適用できるかは未解明であるが、量子ナノ系がやり取りする熱の最小単位と考えられる単一フォノン状態について深く研究した本研究の成果は、ナノスケールの量子熱力学という新規学術分野の開拓へつながる意義を持っている。また、その成果を応用することで、単一フォノン操作にもとづく熱に対する量子ナノ工学の創成へつながるものと期待されるが、近年、デバイスの省エネルギー化や高効率化は重要な課題のひとつであり、エネルギー問題への貢献という社会的意義も持つ。

研究成果の概要（英文）：To improve the operational performance of quantum nanodevices, I have conducted research to theoretically propose an extremely precise thermal-dissipation control based on single-phonon manipulation by a localized photon field. As a result, we succeeded in (1) elucidating the origin of interaction between nanostructures via localized photon fields, (2) proposing a method to control localized photon fields using nanoprobe, (3) constructing a theory to describe the concept of nanoscale thermodynamics, and (4) clarifying the change of a single-phonon state associated with excitation transfer via localized photon fields. We have achieved important academic results and obtained knowledge for the realization of thermal-dissipation control by single-phonon manipulation.

研究分野：光物性理論

キーワード：近接場光学 量子熱力学 フォノン物性 量子制御

1. 研究開始当初の背景

従来デバイスは、電流、光、磁化などマクロな量で機能し、動作性能はマクロな熱制御で決まる。一方、量子ナノデバイスは、電子、光子、スピンなど最小量子単位で機能し、単一量子レベルの熱制御が必要である。しかし、ナノスケールの熱の概念は曖昧であり、熱の最小量子単位である単一フォノンを精密操作する手法は確立されていない。従来は、熱浴的フォノン系へのマクロな熱散逸が研究されてきており、応用物理学会や日本熱物性学会ではフォノンエンジニアリングやナノフォノン物性のセッションが開かれるなど、ナノスケールの熱現象やフォノン制御が注目されている。一方、近年、量子ナノ系において、コヒーレント状態や単一量子状態にある非熱浴的フォノン系も注目されている。しかし、フォノンの波動性に関する研究と比べて粒子性に関する研究は少なく、ナノ機械共振器による単一フォノン操作等に限られており、量子ナノデバイスの熱散逸制御に対しては実装できない。つまり、量子ナノデバイスに誘起されるフォノンを、直接、単一量子レベルで操作するための普遍的原理を見出すことが課題となっていた。

研究代表者は、量子ダイナミクスにおけるコヒーレントフォノン効果の重要性と、単一フォノンを操作できる可能性を見出していた。一方、ナノ構造近傍における光近接場や局在表面プラズモンなど局在光子場を介して電子・フォノン相互作用が増強されることも知られていた。したがって、ナノ構造を最適設計すれば、局在光子場を用いた単一フォノン操作が可能となり、量子ナノデバイスの精密な熱散逸制御へつなげることが期待された。

2. 研究の目的

本研究では、量子ナノデバイスを構成するナノ構造自体に単一フォノン操作の原理を組み込むことでデバイス動作性能を向上させることを目指し、

(1) 局在光子場を用いたナノ構造における単一フォノン操作の理論的提案

(2) 量子ナノデバイスの極限的熱散逸制御の理論的提案と新機能の探求

を目的とした。(1)では、ナノ構造の特性に依存した局在光子場の状態変化にともなう電子・フォノン間相互作用の変調を利用した単一フォノン操作の基本原則を理論的に提案することを目指した。(2)では、最適なナノ構造において局在光子場を制御することで単一フォノンを操作し、それを利用した量子ナノデバイスの極限的熱散逸制御を理論的に提案するとともに、電子・光子・フォノンのハイブリッド量子効果による革新的な新機能の探求を目指した。以上のような目的に対する研究成果をまとめ、ナノスケールの熱という概念を如何に定義すればよいかを考察することで、熱の量子論を新規開拓し、単一フォノン量子エンジニアリングへつなげる知見を得ることを最終目標として見据えた。

3. 研究の方法

研究目的である局在光子場を用いたナノ構造における単一フォノン操作の理論的提案と量子ナノデバイスの極限的熱散逸制御の理論的提案と新機能の探求を目指し、以下のような方法で研究を進めた。

(1) ナノ構造近傍に形成される局在光子場の起源と、ナノプローブによる測定がもたらす局在光子場に対する効果を、非平衡量子ダイナミクスの理論をもとに評価した。局在光子場と電子やフォノンとの相互作用による励起移動における非マルコフ性の大きさを数値的に評価し、局在光子場の起源と局在光子場制御へつなげる知見をまとめた。

(2) ナノスケールの熱概念に対する理論を量子熱力学にもとづき構築した。熱浴を仮定せず散逸過程を記述する量子マスター方程式を導出し、数値的に解くための近似手法を開発した。さらに、局在光子場および非熱浴的フォノン系と結合した量子ナノ系へ適用し、局在光子場を介した励起移動にともなう非熱浴的フォノン系の量子効果を評価した。

(3) 量子ナノデバイスに対して非熱浴的フォノン系がもたらす新しい機能を探索した。具体的には、局在光子場を介して結合した2つのナノ構造を想定し、励起移動にもとづく情報伝達あるいはエネルギー伝達に対する新しい機能について注目し、非平衡量子ダイナミクスの理論手法を用いて評価した。

(4) 量子ナノ系における熱的現象に対する基本的な概念体系の構築へ取り組んだ。さらに、単一フォノンを操作する技術の実現が、熱に対する量子ナノ工学の創成へつなげる可能性につい

て検討を進めた。

(5) 本研究を遂行するにあたり新しく派生した課題について考察を進めた。特に、光子場を介して結合した複数ナノ構造の集合系における超放射現象を、同期現象の数理解物理的手法をもとに評価することで、光子場の量子揺らぎを起源とする新機能を探索した。

4. 研究成果

本研究によって得られた成果を以下の4項目に整理して説明する。

(1) 局在光子場を介したナノ構造間の相互作用は、ナノ構造と非共鳴な仮想光子を介して起こるため、伝播光とナノ構造との相互作用の時間スケール (G^{-1}) よりも短時間スケールで生じる。そのため、局在光子場を介した相互作用は非マルコフ的な時間特性を示すことが予想された。そこで、図1のような、ナノ構造間における仮想光子を介した励起移動ダイナミクスの時空間ダイアグラムを用いた表現方法を提案し、ナノ構造が近接した場合の局在光子場を介した相互作用の空間特性が、短時間スケールの非マルコフ型な時間特性に起因することを示すことができた [1, 2]。本研究成果における時空間ダイアグラムを用いた評価をもとにすれば、例えば、局在光子場を介した相互作用が最も増強されるナノ構造に対する最適条件などを見出すことができる。

(2) ナノ構造の表面近傍に形成される局在光子場を観測するためには、ナノプローブを近接させる必要があり、局在光子場を介した量子ナノデバイスに対する影響を無視できない。そこで、局在光子場を介したナノ構造相互作用の非マルコフ性に及ぼすナノプローブ測定の効果を解明するため、密度行列のトレース距離から非マルコフ性の定量指標を導入した。その結果、図2のように、ナノプローブ測定の効果が局在光子場を介した非マルコフ的な量子コヒーレントダイナミクスにおいて重要な役割を果たすことが明らかとなり [3]、ナノプローブを用いてナノ構造間における局在光子場を介した相互作用を制御できる可能性を示すことができた。

(3) ナノスケールの熱概念を記述するための理論を量子熱力学にもとづき構築し、その結果として得られた量子マスター方程式を数値的に解くための近似手法を開発した。この理論を、局在光子場を介して結合した2準位系における励起移動へ適用することで、図3のような非熱浴的フォノン数の時間変化と、フォノン系の緩和時間とナノ構造間の励起移動における散逸過程の関連性を評価することができた [4, 5]。これらの研究成果にもとづけば、量子ナノデバイスの熱散逸制御を実現するために必要な単一フォノン操作とデコヒーレンス制御へつなげる知見を得ることができると期待される。

(4) 局在光子場を介して結合したナノ構造間の励起移動によって情報あるいはエネルギーを伝達する量子ナノデバイスを想定し、非平衡量子ダイナミクスの理論手法を用いて新しい機能を探索した。その結果、図4のように、非熱浴的フォノン系の効果によって励起移動の方向が非対称になることを見出し、情報・エネルギー伝達に対して整流作用を持つ量子ナノデバイスの実現可能性を示すことができた。

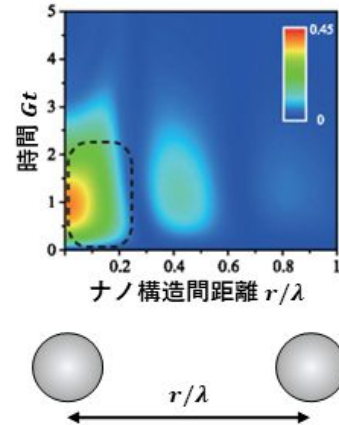


図1. 励起移動における非マルコフ性のナノ構造間距離に対する依存性 [1]

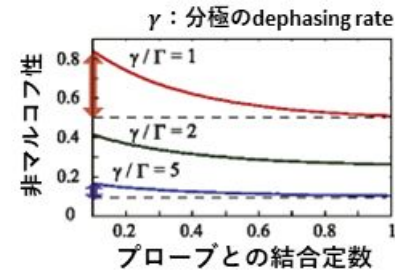


図2. 励起移動の非マルコフ性に対するナノプローブの効果 [3]

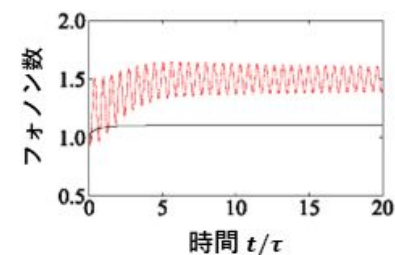


図3. 励起移動にともなうフォノン数の時間発展. τ は励起移動の散逸時間. [4]

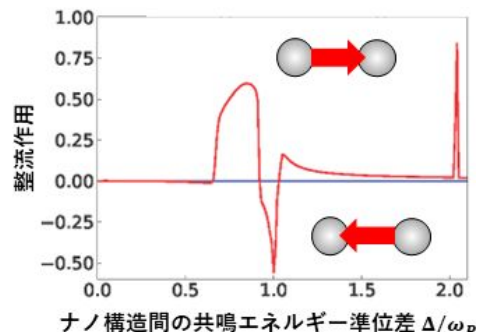


図4. 非熱浴的フォノン効果による励起移動に対する整流作用. ω_p はフォノン振動数.

(5) 本研究課題から派生して得られた研究成果として、光子場を介して結合したナノ構造における超放射の起源が光子場の量子揺らぎであることを、同期現象に対する蔵本モデルをもとに明確に示すことができた。さらに、超放射とは反対に位置する現象として非放射が存在するが、超放射と非放射を制御するための指針となる図5のようなパラメーターダイアグラムを明らかにした [6]。

以上のように、量子ナノデバイスの極限的熱散逸制御の確立という応用的な研究目標に対しては未だ達することができていないが、学術面においては当初の計画よりも多数の重要な成果を上げることができ、量子ナノデバイスにおいて、非熱浴的フォノン系の効果による新しい機能が発現する可能性を示すことができた。

【参考文献】

- [1] T. Yazaki, K. Kobayashi, and A. Ishikawa, Spatio-temporal description of the origin of optical-near-field interactions, *Jpn. J. Appl. Phys.: Rapid Commun.* **62**, 010904 (2023).
- [2] T. Yazaki, K. Kobayashi, and A. Ishikawa, Theory of the optical-near-field interaction originating from non-Markovian processes, *International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics* (online, 2021).
- [3] Y. Tomoaki, K. Kiyoshi, and A. Ishikawa, Quantum non-Markovian dynamics controlled by a local nanoprobe in nanosystems coupled via optical near fields, *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**, 122008 (2021).
- [4] T. Morishita, K. Kobayashi, and A. Ishikawa, Quantum nano-system dynamics based on the steepest-entropy-ascent quantum thermodynamics, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 024001 (2023)
- [5] T. Morishita, K. Kobayashi, and A. Ishikawa, Relaxation dynamics of non-resonant excitation transfer phenomena based on steepest-entropy-ascent ansatz, *The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics* (Hokkaido, 2022).
- [6] S. Riku, K. Kiyoshi, M. Kensuke, and I. Akira, Synchronization phenomena originating from quantum effects of photon fields, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 034401 (2022).

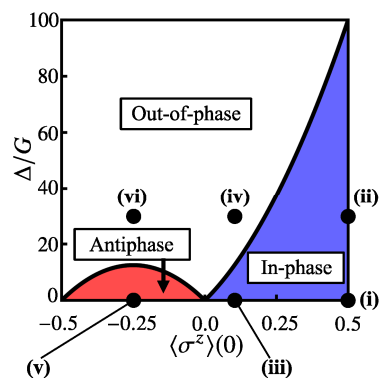


図5 . 超放射 (In-phase) と非放射 (Antiphase) に対するパラメーターダイアグラム . 横軸 : 初期励起密度、縦軸 : ナノ構造間の共鳴エネルギー差 . [6]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tenpei Morishita, Kiyoshi Kobayashi, and Akira Ishikawa	4. 巻 92
2. 論文標題 Quantum Nano-System Dynamics Based on the Steepest-Entropy-Ascent Quantum Thermodynamics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024001/1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.92.024001	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 Tomoaki Yazaki, Kiyoshi Kobayashi, and Akira Ishikawa	4. 巻 62
2. 論文標題 Spatio-Temporal Description of the Origin of Optical-Near-Field Interactions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics: Rapid Communication	6. 最初と最後の頁 010904/1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acaade	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 Yazaki Tomoaki, Kobayashi Kiyoshi, Ishikawa Akira	4. 巻 60
2. 論文標題 Quantum non-Markovian dynamics controlled by a local nanoprobe in nanosystems coupled via optical near fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 122008/1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac3523	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 Sezaki Riku, Kobayashi Kiyoshi, Miyajima Kensuke, Ishikawa Akira	4. 巻 91
2. 論文標題 Synchronization Phenomena Originating from Quantum Effects of Photon Fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034401/1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.034401	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 -

[学会発表] 計17件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Tenpei Morishita, Kiyoshi Kobayashi, and Akira Ishikawa
2. 発表標題 Relaxation dynamics of non-resonant excitation transfer phenomena based on steepest-entropy-ascent ansatz
3. 学会等名 The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNF013) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Kogo, Kiyoshi Kobayashi, and Akira Ishikawa
2. 発表標題 Spatiotemporal carrier dynamics in semiconductors with energy bands split by Rashba effect
3. 学会等名 The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNF013) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Kogo, Kiyoshi Kobayashi, and Akira Ishikawa
2. 発表標題 Spatiotemporal carrier dynamics in inhomogeneous electron-hole systems under the Rashba effect
3. 学会等名 The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 櫻井杏梨, 岩本亘平, 三輪嘉彦, 石川陽, 堀裕和, 内山和治, 小林潔, 岸野克巳, 酒井優
2. 発表標題 2次元半導体のメゾスコピック領域における走査型近接場分光とキャリア輸送に基づく解析
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 花形優斗, 小林潔, 宮島顕祐, 石川陽
2. 発表標題 量子ドットの空間分布依存性に注目した超蛍光の全量子論
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千葉涼太郎, 石原淳, 宮島顕祐, 石川陽
2. 発表標題 CuCl量子ドットからの単一超蛍光パルスの偏光測定II
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬崎陸, 小林潔, 宮島顕祐, 石川陽
2. 発表標題 光子場を介した複数分極系における同期現象の全量子論
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢崎智昌, 小林潔, 石川陽
2. 発表標題 Non-Markov性を起源とする光近接場相互作用の理論的研究
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Yazaki, K. Kobayashi, and A. Ishikawa
2. 発表標題 Theory of the optical-near-field interaction originating from non-Markovian processes
3. 学会等名 International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮島顕祐, 千葉涼太郎, 大谷祐樹, 石原淳, 石川陽
2. 発表標題 半導体量子ドット集合系から生じる超蛍光の偏光度シングルショット測定
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森下天平, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 超平面から見たLindblad型マスター方程式の定性的評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森下天平, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 内因性量子熱力学に基づく量子ナノ系の散逸緩和ダイナミクス
3. 学会等名 基研研究会・熱場の量子論とその応用2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬崎陸, 小林潔, 宮島顕祐, 石川陽
2. 発表標題 光子 - 電子結合系における複数分極集団の同期現象に対する全量子論
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森下天平, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 無限状態数を持つ量子ナノ系における内因性量子熱力学
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬崎陸, 石川陽, 宮島顕祐, 小林潔
2. 発表標題 共振器QED系における光を介した複数分極間の同期現象
3. 学会等名 第27回ナノオプティクス研究討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢崎智昌, 小林潔, 石川陽
2. 発表標題 光近接場を介した非マルコフ的励起移動に対する局所プローブ効果の理論的評価
3. 学会等名 第27回ナノオプティクス研究討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬崎陸, 石川陽, 宮島顕祐, 小林潔
2. 発表標題 共振器QED系における超蛍光-レーザークロスオーバーを用いた新奇発光特性の理論的解明
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

山梨大学研究者総覧 - 石川 陽 http://nerdb-re.yamanashi.ac.jp/Profiles/337/0033682/profile.html 山梨大学工学部・研究活動紹介・石川研究室 https://www.eng.yamanashi.ac.jp/laboratory/aishikawa/
--

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

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
---------	---------