

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06379

研究課題名（和文）量子ナノデバイスの高効率化へ向けた非熱浴的フォノン状態の量子制御

研究課題名（英文）Quantum control of non-thermal phonon states for high efficiency of quantum nanodevices

研究代表者

石川 陽（ISHIKAWA, Akira）

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：10508807

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：マクロなデバイスの動作効率はマクロな環境系（熱浴）への熱散逸過程で決まる。一方、量子ナノデバイスの動作効率はナノスケールの非熱浴的環境系との結合で決まるが、そこでやり取りされるものは一般的な熱とは異なる形のエネルギーである。本研究では、量子ナノデバイスの動作効率向上のために、量子コヒーレントダイナミクスに対する非熱浴的フォノン環境系の効果を解明した。さらに、得られた知見をもとに、コヒーレントフォノンが寄与する新しい原理によって高効率に動作する量子ナノデバイスの基本モデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来考慮されて来なかった非平衡フォノン環境の効果を制御し、量子ナノデバイスにおける新しい動作原理の指針を与えるものである。さらに、新しいフォノン量子物性に関する研究分野の開拓と、ナノスケールにおける熱現象を記述するための基本概念の構築へつなげる学術的意義を持つ。一方、量子ナノデバイスの省エネルギー化や高効率化を実現する足掛かりとなり、将来的には現代社会における重要な課題のひとつであるエネルギー問題への貢献という社会的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：The operating efficiency of macro devices is determined by the process of thermal dissipation to the macro thermal environment (heat bath). On the other hand, the operating efficiency of quantum nanodevices is determined by their coupling with nanoscale non-thermal environments, where different types of energy from macroscopic concept of heat are exchanged. In this study, we have clarified the effect of non-thermal phonon environments on quantum coherent dynamics in order to improve the operating efficiency of quantum nanodevices. Furthermore, based on the obtained knowledge, we have proposed a basic model of quantum nanodevices that operate with high efficiency due to a new principle contributed by coherent phonons.

研究分野：ナノ領域光科学理論

キーワード：量子ナノデバイス 非平衡量子ダイナミクス 励起エネルギー移動 非マルコフダイナミクス 非熱浴的環境 コヒーレントフォノン フォノン制御

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。

## 1. 研究開始当初の背景

エネルギー問題が問われている現代社会において、デバイスの省エネルギー化や高効率化は重要な課題である。それらを実現するために、巨視的な熱浴的環境へ熱として失われるエネルギーの制御に関する研究が盛んに進められてきた。しかし、量子ナノデバイスの基本メカニズムである量子コヒーレンスは、電子系と微視的な非熱浴的環境である量子フォノン系との非熱的エネルギーのやり取りに支配される。したがって、量子ナノデバイスの省エネルギー化や高効率化を目指すためには、従来のように熱浴への熱散逸過程を考慮しただけでは限界があり、ナノ構造における非熱浴的フォノン環境の効果を理解することが重要である。

代表者はこれまで、量子コヒーレンスを介した励起エネルギー移動に対するフォノン効果について研究を進め、非熱浴的フォノン系が励起移動に重要な効果をもたらす可能性を示唆する結果を得ていた [1, 2]。さらに、非熱浴的フォノン効果が励起エネルギー移動に対するエネルギー入出力過程に依存することも明らかにされていた [1, 2]。以上の研究成果は、量子コヒーレンスが非熱浴的フォノン環境に支配され、さらに非熱浴的フォノン環境の状態は電子系の量子ダイナミクスによって制御できることを示しており、非熱浴的フォノン環境が支配する量子ナノデバイスの省エネルギー化・高効率化を実現できる可能性を示しているものである。

## 2. 研究の目的

本研究では、量子ナノデバイスの省エネルギー化・高効率化へ向けて、非熱浴的フォノン環境への非熱的エネルギー散逸の制御を目指す。それを実現するため、以下の研究目的を設定する。

### (1) 「量子コヒーレンスに關与する非熱浴的フォノン環境の解明」

量子コヒーレンスを介した励起エネルギー移動が非熱浴的フォノン効果によって増強・抑制される条件を見出し、その条件下において非熱浴的フォノン環境の量子状態を明らかにする。

### (2) 「非熱浴的フォノン環境によって動作する量子ナノデバイスの制御」

非熱浴的フォノン環境は量子コヒーレンスを介した励起エネルギー移動により誘起され時間的に変化する。そこで、量子測定過程によって量子コヒーレンスを変調させたときの非熱浴的フォノン環境の変化を評価し、量子ナノデバイス制御を実現するための指針を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) 「モデルの設定」

図1のような、励起エネルギー移動の理論モデルを考える。注目系としてナノ構造に閉じ込められた励起子系を想定した二つの二準位系を仮定する。励起子系間は光近接場によって結合しており、量子コヒーレンスが形成されることで励起エネルギー移動が生じる。また、各励起子系はそれぞれ局所的に非熱浴的フォノン環境と結合している。結合した励起子系に対するエネルギーの入出力過程は、励起子系と局所的に結合させたプローブによって行う。一方の励起子系に対して入力されたエネルギーは、励起子系間の量子コヒーレンスによってもう一方の励起子系へ移動し、その励起子系と局所的に結合したプローブによって測定される。プローブは励起子系と共鳴する二準位系と見なす。

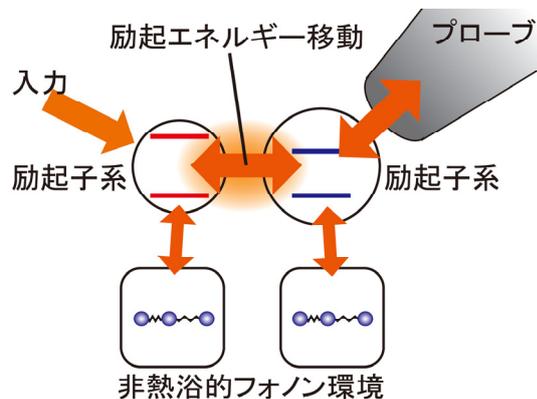


図1. 励起エネルギー移動の理論モデル

### (2) 「非マルコフ型量子マスター方程式の導出」

時間依存射影演算子法を用いて、励起子系と非熱浴的フォノン環境の両者に対する非マルコフ型量子マスター方程式を導出した [3]。さらに、局所プローブによる測定過程の効果、非熱浴的フォノン環境に対する高次相関の効果を取り入れる拡張を行った。

### (3) 「非マルコフ型量子マスター方程式の数値的解析」

励起エネルギー移動が非熱浴的フォノン環境によって増幅・抑制されるための条件を明らかにすること、さらに、局所プローブによる量子測定過程が励起エネルギー移動とそれに対する非

熱浴的フォノン環境の効果へ及ぼす影響を明らかにすること、以上の二つの目的のために、先に導出した非マルコフ型量子マスター方程式の数値的解析を行った。

(4) 「非熱浴的フォノン環境の二次時間相関関数の数値的評価」

励起エネルギー移動が増幅・抑制される条件下における非熱浴的フォノン環境の量子状態を評価するため、フォノンの高次相関を含む拡張された非マルコフ型量子マスター方程式をもとに、フォノンの二次時間相関関数の数値的解析を行った。

(5) 「量子ナノデバイスの基本モデルを用いた考察」

以上の研究成果をもとに、量子コヒーレンスによる励起エネルギー移動を用いた量子ナノデバイスの基本モデルを提案した。そのモデルをもとに、非熱浴的フォノン環境の効果によって動作する新しい量子ナノデバイスの理論設計を行った。

4. 研究成果

(1) 「励起エネルギー移動に対する非熱浴的フォノン環境による増幅・抑制効果の発見 [3, 4]」

非共鳴励起子間（二準位系間）においては、両者の共鳴エネルギーの差が大きくなるほど励起エネルギー移動は起こりにくくなることが知られている。これは、エネルギー保存則を満たさないプロセスとなるからである。しかし、熱浴的フォノン環境と結合している場合は、励起子系間の共鳴エネルギーの差が単一フォノンエネルギーに等しいとき、過不足分のエネルギーを放出または吸収することによってエネルギー保存則を満たすので、励起エネルギー移動が起こる。これは、熱浴的フォノン環境による励起エネルギー移動の増幅効果である。

本研究では、以上で述べたメカニズムとは全くことなる非熱浴的フォノン環境の効果を発見した。図2は非熱浴的フォノン環境による励起エネルギー移動の増幅および抑制の効果を表している。励起エネルギー移動による励起子系のポピュレーションの章動をラビ振動という。非熱浴的フォノンの一つであるコヒーレントフォノンは励起子系のポピュレーションと相互作用しているので、ラビ振動によってコヒーレントフォノンが誘起される。そして誘起されたコヒーレントフォノンは逆にラビ振動へ影響を与える。これはラビ振動とコヒーレントフォノン振動の間で起こる一種の同期現象と見なせる。重要なことは、コヒーレントフォノンの効果が、ラビ振動を増幅させるだけでなく抑制する働きをする状況も存在することを見出した点である。増幅と抑制の両方の効果が現れる理由は、フォノン環境を単にエネルギー源である熱浴としてではなく、非熱浴的環境として扱い、非平衡ダイナミクスに注目したこと起因している。

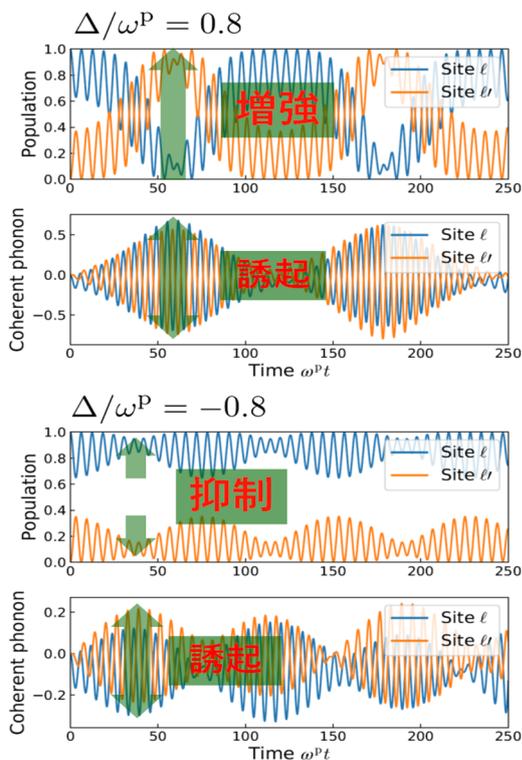


図2. 非熱浴的フォノン環境による励起エネルギー移動の増幅・抑制効果

(2) 「励起エネルギー移動を増幅・抑制させる非熱浴的フォノン環境の量子状態の解明」

非熱浴的フォノン環境の二次時間相関関数  $g^{(2)}(0)$  を数値的に評価した結果を図3に示す。熱浴的フォノン環境が励起エネルギー移動を増幅させる条件下では  $g^{(2)}(0) = 2$  であるのに対して、非熱浴的フォノン環境が励起エネルギー移動を増幅させる条件下では  $g^{(2)}(0) = 1$  であることが分かる。これは、フォノン環境の非平衡状態であるコヒーレントフォノンが

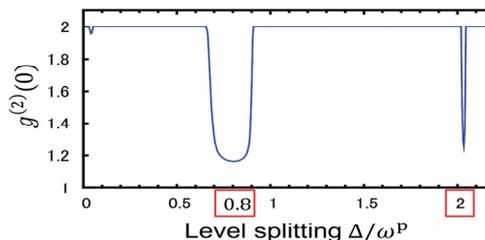


図3. フォノン状態の解析

寄与していることを示している。

さらに、系のパラメータに対する依存性を数値的に解析した結果を図4に示す。二次相関関数の値が励起子間の共鳴エネルギーの差と励起子-フォノン間相互作用の大きさに対して、複雑に依存していることが分かる。この結果は、非熱浴的フォノン環境により動作する量子ナノデバイスを設計するための指針を与えるものである。つまり、この結果から非熱浴的フォノン環境の量子状態が誘起されるパラメータに対する条件を見出し、その条件を満たすようにナノ構造を設計すれば、非熱浴的フォノン環境効果が重要な役割を果たす量子ナノデバイスの実現へつながるものと期待される。

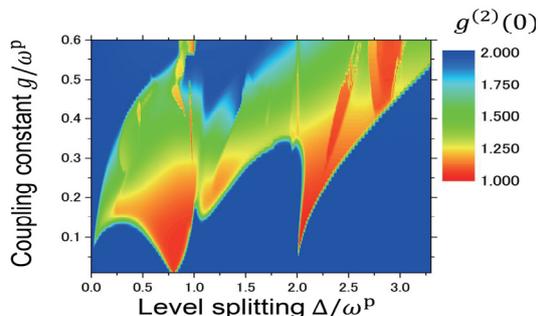


図4. フォノン量子状態の系の各種パラメータに対する依存性

(3) 「局所プローブによる測定過程が非熱浴的フォノン効果へもたらす影響の解明」

図5は、非熱浴的フォノン支援励起エネルギー移動に対するプローブ測定過程の影響を数値的に評価した結果である。縦軸はプローブと励起子系の結合の大きさに相当する。コヒーレントフォノン環境が支援する条件のとき励起エネルギー移動が増幅されることが分かるが、プローブの結合が強すぎると、コヒーレントフォノン環境の効果が消失することが分かった。これは、コヒーレントフォノン-励起子系間の同期ダイナミクスとプローブ-励起子系間の測定過程のダイナミクスの競合によるものであり、測定過程によって非熱浴的フォノン環境の効果を制御できる可能性を示している。

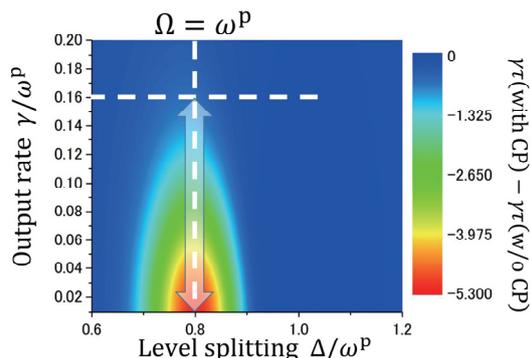


図5. フォノン効果の測定過程依存性

(4) 「励起エネルギー移動ダイナミクスに対する単一フォノン環境効果についての知見獲得」

非熱浴的フォノン環境の高次相関を取り入れた非マルコフ型量子マスター方程式をもとに、フォノンの二次時間相関関数の数値的評価を行った。二体相関関数まで取り入れることでフォノン数の時間変化を取り扱うことができるようになり、単一フォノン環境効果を記述できるようになることを、特定の条件において確認することができた。しかし、相関関数の階層構造を切断する物理的根拠を明らかにする必要があるとされており、新しい課題も見出すことができた。

(5) 「非熱浴的フォノン環境効果により動作する高効率量子ナノデバイスの理論設計」

非熱浴的フォノン効果によって励起エネルギー移動が増幅・抑制されることが明らかとなった。この原理を応用することで、励起エネルギー移動の方向を一方へ制御する整流素子を理論的に提案することができた。さらに、励起子系の個数を3個にすることで、スイッチングと論理演算の機能を持つ量子ナノデバイス実現への指針を示すことができた。

本研究の最終課題である量子ナノデバイスの省エネルギー化・高効率化に関しても、非熱浴的フォノン環境が最大限に効果を発揮する設計条件をフォノン二次時間相関関数に注目して見出す方法を開発することに成功し、今後様々な機能を持つ量子ナノデバイスに対して適用することで、当初想定していた最終的な研究目的の達成へつなげることができる。

(6) 「派生して得られた研究成果」

本研究の基本概念を記述する内因性量子熱力学の理論構築に取り掛かり、相互作用を含む量子孤立系の不可逆過程を記述する近似手法を提案することができた。量子コヒーレンスを起源とする超蛍光の研究も進め、共振器 QED 系における超蛍光とレーザーのクロスオーバーの解明、量子ゆらぎを起源とする量子同期現象の基礎理論の構築を達成することができた。

<引用文献・学会発表等>

[1] A. Ishikawa et al., APNF010 (Hakodate, 2015).  
 [2] R. Okada et al., NF014 (Hamamatsu, 2016).  
 [3] A. Ishikawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 054001 (2018).  
 [4] K. Kobayashi and A. Ishikawa, Prog. Quantum Electron. **59**, 19 (2018).

## 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 K. Kawamura, T. Yoshida, M. Nasu, J. Ishihara, A. Ishikawa, and K. Miyajima	4. 巻 1220
2. 論文標題 Generation processes of superfluorescence of biexcitons in CuCl quantum dots by one- and two-photon resonant excitation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012020/1-4,
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1742-6596/1220/1/012020">https://doi.org/10.1088/1742-6596/1220/1/012020</a>	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 K. Kobayashi and A. Ishikawa	4. 巻 59
2. 論文標題 Quantum coherent nanodynamics by the interplay of localized photons, electron-hole pairs, and phonons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Quantum Electronics	6. 最初と最後の頁 19-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pquantelec.2018.06.001	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 A. Ishikawa, R. Okada, K. Uchiyama, H. Hori, K. Kobayashi	4. 巻 87
2. 論文標題 Quantum Coherent Dynamics Enhanced by Synchronization with Nonequilibrium Environments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054001/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.054001	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 R. Sezaki, A. Ishikawa, K. Miyajima, and K. Kobayashi	4. 巻 123
2. 論文標題 Theory of superfluorescence-laser crossover in a cavity QED system	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics A	6. 最初と最後の頁 690/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00339-017-1301-y	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38件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 矢崎智昌, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 光近接場を介した二準位系間励起移動ダイナミクスにおけるnon-Markov的效果の理論的解明
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
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系における光子場を介した複数分極の同期現象の理論
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山祐樹, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 階層的環境と結合した非平衡開放系の量子散逸ダイナミクス
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武井紗由美, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 散逸を伴う環状離散時間量子ウォーク
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
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 内因性量子熱力学に基づく量子ナノ系の散逸緩和理論
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 櫻井杏梨, 岩本亘平, 石川陽, 堀裕和, 小林潔, 岸野克巳, 酒井優
2. 発表標題 近接場分光によるInGaN量子井戸におけるキャリア輸送現象の解明( )
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
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 Hypo-equilibrium state近似を用いた量子熱力学による量子ナノ系の散逸緩和理論
3. 学会等名 基研研究会 熱場の量子論とその応用2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森下天平, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 量子熱力学に基づく量子ナノ系の散逸緩和理論
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢崎智昌, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 二準位系間のnon-Markov的励起移動ダイナミクス
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋山祐樹, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 階層的環境と結合した非平衡開放系の量子散逸ダイナミクス
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武井紗由美, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 離散時間量子ウォークに基づく量子ダイナミクス
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井杏梨, 岩本亘平, 石川陽, 堀裕和, 小林潔, 岸野克巳, 酒井優
2. 発表標題 近接場分光によるInGaN量子井戸におけるキャリア輸送現象の解明
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019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の理論
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋山祐樹, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 階層的環境と結合した非平衡開放系の量子ダイナミクス
3. 学会等名 第26回ナノオプティクス研究討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武井紗由美, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 散逸をともなった環状経路上の離散時間量子ウォーク
3. 学会等名 第26回ナノオプティクス研究討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢崎智昌, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 局所観測効果を含む光近接場を介したnon-Markov的励起移動ダイナミクス
3. 学会等名 第26回ナノオプティクス研究討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬崎陸, 石川陽, 宮島顕祐, 小林潔
2. 発表標題 輻射場の量子揺らぎによる超蛍光の同期現象の理論
3. 学会等名 第30回光物性研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林潔, 福井萬壽夫, 岡本敏弘, 原口雅宣, 石川陽
2. 発表標題 光近接場の量子化: 再訪
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森下天平, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 量子熱力学に基づく量子ナノ系の散逸緩和理論
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢崎智昌, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 メモリー項のMarkov・non-Markov性に着目した自然放出ダイナミクスの解析
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋山祐樹, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 階層的環境と結合した非平衡開放系の量子散逸ダイナミクス
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019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の理論 - 同期現象としての超蛍光 -
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武井紗由美, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 離散時間量子ウォークに基づく量子ダイナミクス
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Hayakawa, A. Ishikawa, M. Sakai, and K. Kobayashi
2. 発表標題 Spatiotemporal carrier dynamics modified by inhomogeneous potential in a semiconductor nanostructure
3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials, EXCON2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Sezaki, A. Ishikawa, K. Kobayashi, and K. Miyajima
2. 発表標題 R. Sezaki, A. Ishikawa, K. Kobayashi, and K. Miyajima
3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials, EXCON2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森下天平, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 量子熱力学に基づく量子ナノ系の散逸緩和理論
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018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の理論3
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 向後敬志, 石川陽, 小林潔
2. 発表標題 トロイダルモーメントを含む光と物質の相互作用理論：遷移特性
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018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の理論II
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早川祐輔, 石川 陽, 小林 潔
2. 発表標題 空間的に不均一な系における時空間キャリアダイナミクス
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Riku Sezaki, Akira Ishikawa, Kensuke Miyajima, and Kiyoshi Kobayashi
2. 発表標題 Theory of superfluorescence-laser crossover in a cavity QED system
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, APNF011 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoaki Yazaki, Ryo Okada, Akira Ishikawa, and Kiyoshi Kobayashi
2. 発表標題 Foundation of optical near fields from a quantum dynamics viewpoint
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, APNF011 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryo Okada, Tomoaki Yazaki, Kazuharu Uchiyama, Hirokazu Hori, Akira Ishikawa, and Kiyoshi Kobayashi
2. 発表標題 Non-resonant collective quantum dynamics
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, APNF011 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Kougo, Akira Ishikawa, and Kiyoshi Kobayashi
2. 発表標題 Multipolar expansion theory including toroidal moments and its application
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, APNF011 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 矢崎 智昌, 岡田 遼, 石川 陽, 小林 潔
2. 発表標題 光近接場量子ダイナミクスにおけるNon-Markovian過程の理論
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡田 遼, 矢崎 智昌, 内山 和治, 堀 裕和, 石川 陽, 小林 潔
2. 発表標題 局所環境支援励起移動ダイナミクスII
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017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の理論
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 向後 敬志, 石川 陽, 小林 潔
2. 発表標題 トロイダル多重極子を含む光と物質の相互作用理論
3. 学会等名 日本光学会ナノオプティクス研究グループ第24回研究討論会
4. 発表年 2017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 <a href="http://nerdb-re.yamanashi.ac.jp/Profiles/337/0033682/profile.html">http://nerdb-re.yamanashi.ac.jp/Profiles/337/0033682/profile.html</a> 山梨大学工学部先端材料理工学科 - 石川研究室 <a href="https://www.eng.yamanashi.ac.jp/laboratory/aishikawa/">https://www.eng.yamanashi.ac.jp/laboratory/aishikawa/</a>
---

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	小林 潔  (Kobayashi Kiyoshi)  (30397038)	山梨大学・大学院総合研究部・教授   (13501)	削除：2019年3月8日