

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26790062

研究課題名(和文)固有接合量子メタマテリアルを用いた光制御技術に関する理論研究

研究課題名(英文)Theoretical study on Intrinsic Josephson Junction Quantum Metamaterial for novel optical devices

研究代表者

浅井 栄大(Hidehiro, Asai)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・研究員

研究者番号：00722290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、高温超伝導体固有ジョセフソン接合からなる「固有接合量子メタマテリアル」の電磁場応答特性を理論的に調べ、その特性を活かした新奇な電磁波制御デバイスの提案を目指した。単純化した理論モデルを用いて、量子ビットのカオス的ダイナミクスや集団的な誘導放出といった量子メタマテリアルに特有な現象を見出し、また固有ジョセフソン接合の電磁気学的特性が外部加熱により自在に制御可能である事を明らかにした。

以上の研究成果により、固有接合量子メタマテリアルの基盤理論が構築できただけでなく、固有接合量子メタマテリアルが新しい光学デバイスとして大きな可能性を秘めている事が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In this proposal, we have investigated electromagnetic response of novel metamaterial Intrinsic Josephson Junction Quantum Metamaterial (IJJQM) which utilize intrinsic Josephson junctions in high-Tc superconductors. On the basis of a simple toy model for IJJQM, we found unique characteristics of quantum metamaterial such as the chaotic dynamics of the qubits and the lasing associated with correlated behavior of the qubits. We also clarified that the electromagnetic properties of intrinsic Josephson junctions are highly tunable by external local heating.

Through the above studies, we have constructed basic theory for electromagnetic response of IJJQM and showed that IJJQM is promising as a novel optical device in next generation.

研究分野：計算物理学、物性物理学、材料工学、超伝導工学、半導体デバイス工学

キーワード：メタマテリアル 量子光学 超伝導 国際情報交換

1. 研究開始当初の背景

近年、新たな電磁波制御技術としてメタマテリアルが注目されている。メタマテリアルは対象とする電磁波の波長に比べて十分小さな人工原子と呼ばれる微小構造体から構成される人工物質で、人工原子の形状や配置によって誘電率や透磁率を自在に制御する事ができる。しかし、従来のメタマテリアルは古典電磁気学の限界を超えた電磁波制御を行う事が出来ない。それに対し、近年量子ビットを人工原子とする量子メタマテリアル(QM)が大きな注目を集めている。QMでは人工原子の量子状態を制御する事で、古典メタマテリアルでは達成できない新特性の実現が期待できる。しかし、QMを実現するためには多数の均質な量子ビットの作成とその量子コヒーレンスの維持が不可欠であり、高度な実験技術が求められる。また、量子ビットは動作温度が極めて低い(~100 mK)。そのためQMの実用化には多くの技術的課題が存在する。

そこで申請者が着目したのが、銅酸化物高温超伝導体である。銅酸化物高温超伝導体は超伝導性を示す CuO₂ 層と絶縁体層が積層した結晶構造を持つ。そのため単結晶そのものを、絶縁体を挟んだ超伝導接合(即ちジョセフソン接合)の直列回路、と見なす事ができる。この結晶構造内に内在する接合を固有接合(IJJ: Intrinsic Josephson junction)と呼ぶ。一方、微小ジョセフソン接合は巨視的な量子二準位系とみなす事ができるため、超伝導量子ビットとして広く使用されている[Science 327, 840 (2010)]。そのため、IJJは天然の均質な量子ビット列と考える事ができ、実際に量子性が現れる事は巨視的な量子トンネル現象の観測によって明らかにされている[Phys. Rev. Lett. 95, 107005 (2005)]。そのため、IJJ全体を一つの量子メタマテリアル、固有接合量子メタマテリアル(IJJQM: IJJ quantum metamaterial)と見なす事ができる。図1にその概念図を示す。

IJJQMは従来型のQMと異なり、単結晶を微細加工するだけで容易に作成でき、また高温で動作するなど、性能面においても従来のQMに対して多くの優位性を持つ事が期待される。

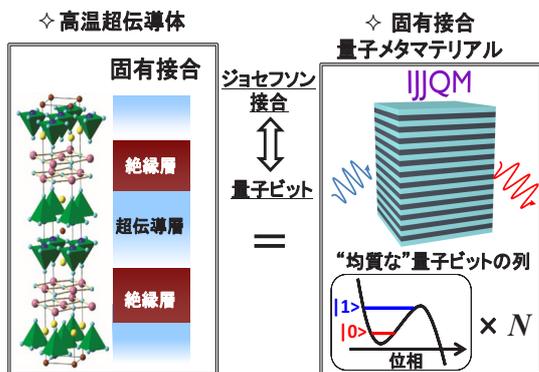


図1 固有接合量子メタマテリアル(IJJQM)

2. 研究の目的

以上のような背景から、申請者は実現可能かつ新奇な量子メタマテリアルとして、固有接合量子メタマテリアル(IJJQM)の提案を行った。そしてIJJQMの電磁波応答特性を理論的に調べ、光技術に応用可能な特異な性質を明らかにする事を目的とした。

様々な量子状態の量子ビットから構成されるIJJQMを想定し、それを伝播する入射電磁波の状態変化を系統的に調べる事で、IJJQMの新奇な光制御技術への応用を探る。また、IJJQMでは電磁気学的結合により各量子ビット同士が強く相互作用しているため、量子ビット間の同期現象が現れる事が予想される。この同期現象についても詳細に調べ、上記の特性に与える影響を明らかにする。以上の研究成果を踏まえ、IJJQMの特性を活かした実用的な光学デバイスの提案を目指した。

3. 研究の方法

まずIJJQMのToyモデルとなる一次元量子メタマテリアルの電磁場応答理論を構築し、その電磁気学的特性を調べるための数値計算プログラムを作成した。その際、計算コストの観点から電磁場を古典的に扱う半古典理論を採用し、量子ビット間の直接的な相互作用を無視した。

次に、固有接合間の電磁気学的相互作用を考慮した、IJJQMの古典的状态を記述するモデルを構築した。そして古典的な状態にあるIJJQMが示す電磁場応答特性を調べるための数値計算プログラムを作成した。

4. 研究成果

まず本研究では、IJJQMのToyモデルとなる一次元量子メタマテリアル(1DQM)に着目し、その電磁場パルスに対する応答を調べた。図2に1DQM内を伝搬する電磁場パルス(左)と1DQM内の人工原子(即ち量子ビット)の励起状態の確率密度分布(右)の時間変化を示す。この図から、電磁場パルスの運動に対して励起状態にある量子ビットが集団的な誘導放出を起こし、パルス強度を増大している事がわかる。またその結果、超伝導量子ビットの状態がカオスのダイナミクスを始めている事もわかる。これは超伝導量子ビットの非線形性に由来しており、この他にも高調波発生やパラメトリック増幅現象やなども現れる事が明らかになった[Asai et al., Phys. Rev. B 91, 134513]。さらに、静磁場下においては1DQM内の量子ビットが静磁場を介して結合し、超伝導量子メタマテリアルが全体として一つの超伝導のように振る舞う事がわかった。その際、量子メタマテリアル内部には特殊な量子渦糸が発生し、従来の超伝導体とは大きく異なる磁場-磁束密度曲線を示す事が明らかになった。解析計算との比較から、この量子渦糸の出現が量子メタマテリアルに特有な「超放射相転移」現象と関

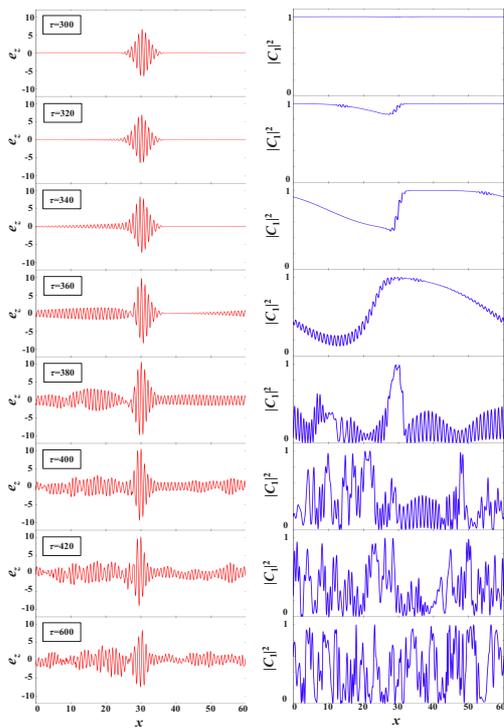


図2 1DQM内を伝搬する電磁場パルスの電場分布(左)と量子ビットの励起状態の分布(右)の時間変化($\tau=300\sim600$)。

連している事を見出した。

次に、IJJQMの量子効果と関連した電磁気学的特性を調べる前段階として、古典的な状態にあるIJJQMの電磁気学的特性を調べた。この研究では、特にデバイス応用において重要となる、外部刺激による特性の可変性に着目した。古典的なIJJQM(即ち固有接合)は電圧を印可する事で、強いTHz電磁波を放射する事が知られており、その特性がデバイスの温度分布に大きく依存する事が近年報告されている。そこで、外部からの局所加熱による放射THz波の変化について、古典的なモデルに基づく解析を行った。図3に局所加熱の場所の違い($\mathcal{B}\sim\mathcal{G}$)による放射THz波の偏光状態の変化を示す。この図から放射電磁波の偏光状態(円偏光度や回転方向)が局所加熱により大きく変化している事がわかる[Asai et al., Appl. Phys. Lett. 110, 132601]。このようなTHz波の円偏光状態に対する高い可変性は従来のデバイスでは困難であり、固有接合デバイスの際立った特徴であるといえる。このように、本研究の成果により固有接合が高い制御性を持った光学デバイスとして応用可能である事が明らかになった。

以上の研究成果により、本研究では固有接合量子メタマテリアルの基盤理論を構築できた。また、固有接合量子メタマテリアルが新しい光学デバイスとして大きな可能性を秘めている事が明らかになった。これらの成果は今後の光学デバイス応用の研究のみならず、量子基礎科学の分野においても重要な知見であると考えられる。

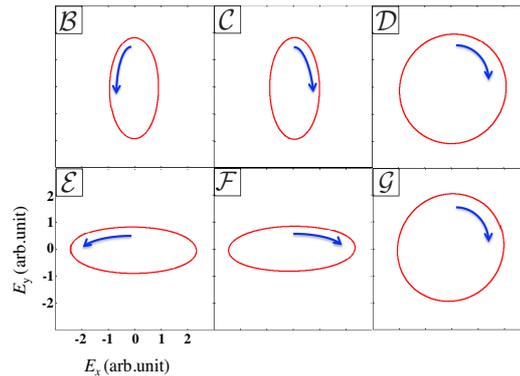
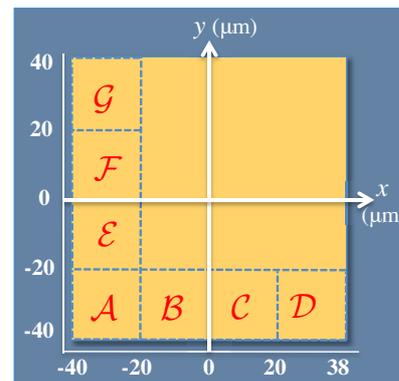


図3 固有接合からの放射THz波の偏光状態の局所加熱の場所($\mathcal{B}\sim\mathcal{G}$)による変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)全て査読付き

(1) H. Asai and S. Kawabata “Control of Circularly Polarized THz Wave from Intrinsic Josephson Junctions by Local Heating” **Applied Physics Letters** **110**, pp. 132601-1~132601-4 (2017) DOI: 10.1063/1.4979317

(2) H. Asai et al., “Effect of lasing in one-dimensional quantum metamaterial” **Physical Review B** **91** pp. 134513-1~134513-7 (2015) DOI:10.1103/PhysRevB.91.134513

(3) K. Delfanzari, H. Asai et al., “Effect of Bias Electrode Position on Terahertz Radiation From Pentagonal Mesas of Superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ” **IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology**, Vol. **5**, No. **3** p. 505~511 (2015) DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2409552

(4) H. Asai and S. Kawabata “Emission of Circularly Polarized Terahertz Wave From Inhomogeneous Intrinsic Josephson Junctions” **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Vol. **26**, No. **3**, pp. 1~4

(2015) DOI:10.1109/TASC.2016.2515853

(5) H. Asai et al., “Two-dimensional macroscopic quantum tunneling in multi-gap superconductor Josephson junctions” **Journal of Physics: Conference Series** **568**, pp. 022006-1~022006-5 (2014) DOI:10.1088/1742-6596/568/2/022006

(6) H. Asai et al., “Theory of macroscopic quantum tunneling with Josephson-Leggett collective excitations in multiband superconducting Josephson junctions” **Physical Review B** **89** pp. 224507-1~224507-7 (2014) DOI:10.1103/PhysRevB.89.224507

[学会発表] (計 17 件)

(1) [招待講演] 浅井栄大「高温超伝導体固有ジョセフソン接合におけるテラヘルツ発振の熱制御理論」日本物理学会春季大会、大阪大学 (2017/3/18)

(2) [招待講演] S. Kawabata, H. Asai et al., “Anomalous Electromagnetic Response of Superconducting Quantum Metamaterials” **The 10th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High-T_c Superconductors (Plasma+ 2016)**, Nanjing/China, (2016/10/9-10/12)

(3) [招待講演] S. Kawabata and H. Asai “Heat engineering of THz Wave from High-T_c Superconducting Emitters” **Superconducting hybrid nanostructures: physics and application**, Moscow/Russia, (2016/9/19-9/23)

(4) [招待講演] S. Kawabata, H. Asai et al., “Anomalous Magnetic Response of Superconducting Quantum Metamaterials” **Quantum Metamaterials and Quantum Engineering 2016 Workshop**, Spetses/Greece (2016/6/19-6/24)

(5) [招待講演] S. Kawabata and H. Asai “Polarization Control of THz Wave from High-T_c Superconducting Emitters” **EMN meeting on Terahertz**, SanSebastian/Spain (2016/5/14-5/18)

(6) [招待講演] S. Kawabata and H. Asai “Theory of high-T_c superconducting THz emitters” **2015 Energy, Materials and Nanotechnology Open Access Week**, Chengdu/China (2015/9/22~9/25)

(7) H. Asai et al., “Effects of Lasing in a One-Dimensional Quantum Metamaterial” **Metamaterials’ Oxford 2015**, Oxford/UK (2015/9/7~9/12)

(8) H. Asai and S. Kawabata “Circularly Polarized Terahertz Wave Generated by

Inhomogeneous Intrinsic Josephson Junctions” **12th European Conference of Applied Superconductivity (EUCAS2015)**, Lyon/France (2015/9/6~9/10)

(9) [招待講演] 浅井栄大「超伝導体を用いた次世代光デバイスの理論研究」博多ワークショップ-数値解析と計算科学の協働を目指して、博多 (2015/6/13)

(10) [招待講演] H. Asai et al., “Unique Electromagnetic Response of Quantum metamaterial Based on Circuit QED” **EMN Phuket Meeting, Energy Materials Nanotechnology**, Phuket/Thailand(2015/5/4~5/7)

(11) 浅井栄大、他 「回路 QED を用いた量子メタマテリアルにおける特異な渦糸状態」日本物理学会 2015 年年次大会、早稲田大学 (2015/3/21~3/24)

(12) 浅井栄大、他 「回路 QED を用いた量子メタマテリアルにおける特異な電磁場応答」第 4 回 QUATUO 研究会、高知工科大学 (2015/1/11)

(13) [招待講演] H. Asai et al., “Peculiar Vortex States in Quantum Metamaterial with Superconducting Charge Qubits” **The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Oscillations in High-T_c Superconductors**, Kyoto University (2014/11/30~12/3)

(14) S. Kawabata, H. Asai et al., “Theory of Quantum Metamaterial with Superconducting Qubits” **2nd Internal Workshop on Superconducting Sensors and Detectors**, Shanghai/China (2014/11/5~11/8)

(15) [招待講演] H. Asai et al., “Unique Electromagnetic Response of Quantum Metamaterial with Superconducting Qubits” **EMN Open Access Week Energy Material Nanotechnology**, Chengdu/China(2014/9/22~9/25)

(16) 浅井栄大、他 「回路 QED を用いた量子メタマテリアルにおける電磁場応答」日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学 (2014/9/7~9/10)

(17) [招待講演] H. Asai et al., “Vortex Magnetic Response of Quantum Metamaterial with Superconducting Qubits” **The Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) 2014**, Moscow/Russia (2014/6/29~7/1)

[図書] (計 1 件)
“The Oxford Handbook of SMALL
SUPERCONDUCTORS” (Chapter 9 を担当)
Oxford University Press (2017/1/19)

[産業財産権]

該当なし

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

該当なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

浅井栄大 (ASAI Hidehiro)
産業技術総合研究所・ナノエレクトロニク
ス研究部門・研究員
研究者番号：00722290