

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800210

研究課題名(和文) マクロ振動子のエンタングルメント生成

研究課題名(英文) Entanglement generation of macro oscillator

研究代表者

山崎 歴舟 (Yamazaki, Rekishu)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：00551409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：オプトメカニクスおよびエレクトロメカニクスを用いてマクロ振動子のエンタングルメント状態生成に向けて実験を行った。1,000,000という高いQ値を持つSi₃N₄薄膜振動子を光およびマイクロ波共振器と結合する実験系を構築し振動子の電磁波による操作を行った。光のレーザー冷却では室温の300Kから50mKまで振動モードの冷却が確認された。またマイクロ波では希釈冷凍機温度(10mK)から振動基底状態までの冷却が達成された。マイクロ波の実験ではマイクロ波共振器と薄膜振動子の量子強結合が確認されたほか、異なる振動モード間を共振器を媒介としたパラメトリック結合させることで振動子モード間の強結合も確認された。

研究成果の概要(英文)：We performed the experimental investigation towards the entanglement generation of macro oscillator. Using a stoichiometric silicon nitride membrane (Si₃N₄), with high quality factor of 1,000,000, as a mechanical oscillator, combining with electromagnetic resonators, we constructed optomechanical and electromechanical system. We performed series of experiments to control the state of membrane oscillator via electromagnetic wave. Laser cooling of the membrane, starting from 300K, to 50mK was observed with the optomechanical system. For the electromechanical system, we cooled the oscillator down to the quantum ground state from the dilution temperature of 10mK. In the electromechanical system, we observed quantum strong coupling between the microwave resonator and the mechanical oscillator. We also observed the strong coupling between two mechanical modes through a parametric coupling via a common microwave resonator mode.

研究分野：量子ハイブリッド系

キーワード：オプトメカニクス エレクトロメカニクス 強結合 ハイブリッド量子系

1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年にマクロ振動子の基底状態までの冷却が光およびマイクロ波領域におけるオプトメカニクス・エレクトロメカニクスと呼ばれる実験系を用いて達成された。これによりマクロ振動子の量子操作、いわゆる量子メカニクスが現実のものとなり量子情報処理や量子センサーへの応用、またマクロな物体の量子制御が新たな基礎物理への探求を可能とすることが示唆された。

(2) 日本においては量子メカニクスの研究はまだされておらず、重力波検出のチームがオプトメカニクスの古典領域での研究を進めていた状況である。本研究において日本でさきがけて量子メカニクスの研究を進めていく。

2. 研究の目的

本研究ではマクロ振動子の振動状態を量子操作により初期化・操作することにある。量子情報処理においては計算資源とされるエンタングルメント状態の生成は応用への興味だけではなくマクロ振動子の量子状態という基礎物理にも影響を与える新奇な状態である。近年注目されているオプトメカニクスという実験系を光・マイクロ波の両領域で構築し、電磁波による振動子の操作を行うことでエンタングルメント状態の生成を目指す。オプトメカニクス系では電磁波による振動子（もしくは振動子による電磁波）の操作・制御を行うが、単一量子レベルでの振動子中のフォノンや光子にはレーザー冷却技術による振動子の基底状態までの冷却、電磁波と振動子の強結合などの基礎技術を確立する必要がある。本研究ではこれら基礎技術を通してエンタングルメント状態生成を行い、また同時に量子ナノメカニクスの研究につながる礎の構築に挑む。

3. 研究の方法

(1) オプトメカニクス・エレクトロメカニクス系の構築：約1mmの大きさの Si_3N_4 薄膜を振動子として用いたオプトメカニクス系を構築する。図1a示すようにマイク

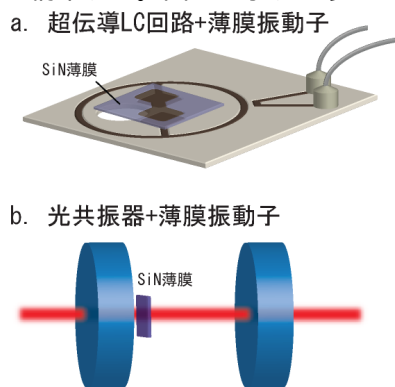


図1 オプトメカニクス・エレクトロメカニクス系の構築

ロ波共振器(LC共振器)の一部である平板コンデンサを薄膜振動子を用いて構成することにより、マイクロ波共振器と振動子が結合したエレクトロメカニクス系を構築する。 SiN 薄膜上の電極やチップ上の回路をアルミ電極でパターンニングすることにより1K以下の低温で非常に損失の少ない超伝導回路が構成される。また光領域のオプトメカニクス系では同薄膜を図1bのように光共振器内に挿入することにより薄膜の変位が光共振器の共振器長を実効的に変えるようなオプトメカニクス系が構築される。次のステップで行うレーザー冷却では高いフィネスの光共振器が求められるが、低温環境でもひずみが小さい共振器母体の素材や接着剤などの選定を考慮して系の構築を行わなくてはならない。

(2) レーザー冷却：各々の系においてレーザー冷却手法の一つであるサイドバンド冷却法を用いて振動子の冷却を行う。オプトメカニクス系では室温からの冷却では振動子の基底状態までの冷却は困難と思われるため、クライオスタットを用いて4Kまで予備冷却の上で実験を行う。この時クライオスタットによる振動や光共振器の低温環境への導入など、テクニカルな問題が伴うことが容易に予想される。エレクトロメカニクスでは希釈冷凍機内の10mKの環境から同様にマイクロ波でのサイドバンド冷却を行う。どちらの実験系においても冷却光もしくはプローブ光が振動子によって変調されたサイドバンドの分光を行うことで、冷却による振動子モードの温度を測定することが可能である。振動子の温度が低下するに伴い信号自体も小さくなるのでSN比の非常に高い測定系を用いて振動子によるサイドバンドを測定する必要がある。

(3) 電磁波を用いた振動子のコヒーレント操作とエンタングルメント状態生成：上記の振動基底までの冷却は振動子の量子状態の初期化にあたる。振動子のエンタングルメント状態生成には、初期化の後にコヒーレントな量子操作が必要となる。まずは電磁波共振器と振動子間でのコヒーレント操作を試みる。基底状態までの冷却を行わないでも、コヒーレント操作の確認が可能なOptomechanically induced transparency (OMIT)と呼ばれる現象があるが、これらの測定を行いコヒーレント操作を評価する。

エンタングルメント生成に用いる振動子と共振器内の電磁波の結合はコントロール光の周波数によって可変である。Blue-sideband (BS)とRed-sideband (RS)と呼ばれるコントロール光は、各々振動子と電磁波の対生成と交換の操作に対応している。エンタングルメント生成の原理を図2に示す。基底状態まで冷却された振動子1と共振器にBS操作をすると、振動子のフォノンが生成さ

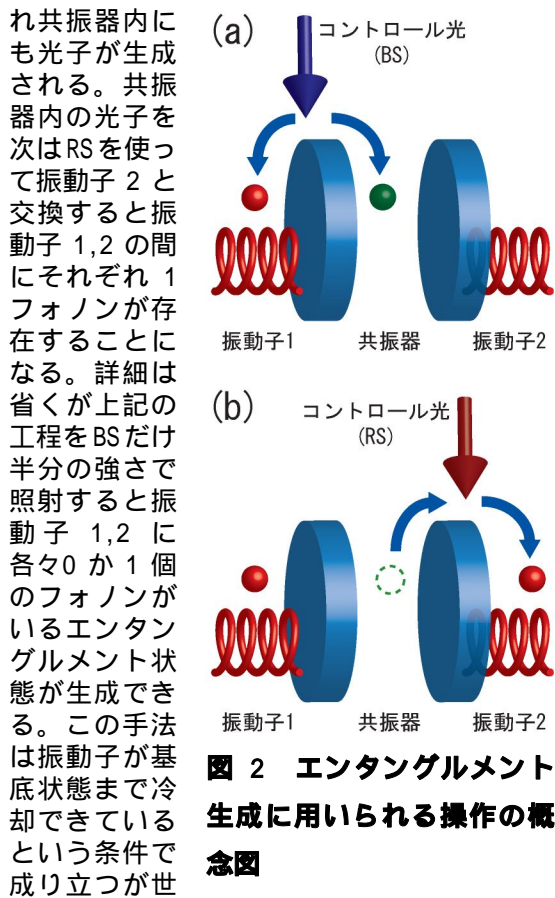


図2 エンタングルメント生成に用いられる操作の概念図

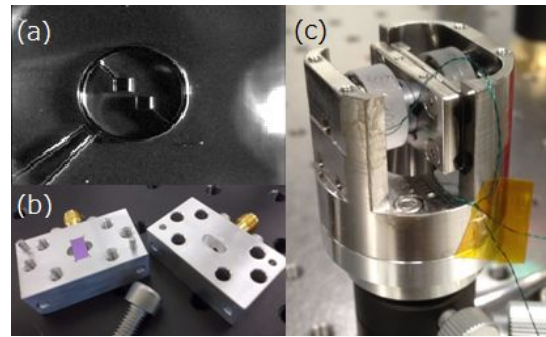


図3 構築されたオプトメカニクス・エレクトロメカニクス実験系

部分にあるように振動子部分をチップ化することでチップ部分だけを交換できるようなモジュール化が可能となりサンプル作成が容易となった。平板コンデンサを構成するチップ電極 薄膜電極間のギャップは300nmと非常に小さいため作製に困難が伴いサンプルの歩留まりは悪いが単一光子あたり7Hzという電磁波と振動子の高い結合強度が得られている。図3cは構築されたオプトメカニクスの一つである。共振器母体にインバーを用い、Stycastという低温環境でもひずみの小さい接着剤を用いて共振器を作製した。光共振器の中心部分にはSiN薄膜が接着してあるインバー治具が挿入してある。光共振器のフィネスは約30,000程度である。

(2) レーザー冷却：各々の実験系でレーザー冷却を行った。オプトメカニクス系では4Kのクライオスタットの振動ノイズの問題が最後にやっと解決したので室温からの冷却しか行えなかった。レーザー冷却時における振動子のノイズシグナルの様子を図4に示す。振動子のサイドバンド分光をレーザー冷却光の強度を変えて行った。冷却光の強度を上げていくにつれて(スペクトラの下の方がレーザー強度が強い)振動子の分光スペクトラの線幅が広がりピーク強度が下がっているのがわかる。線幅の増加は導入された電磁波

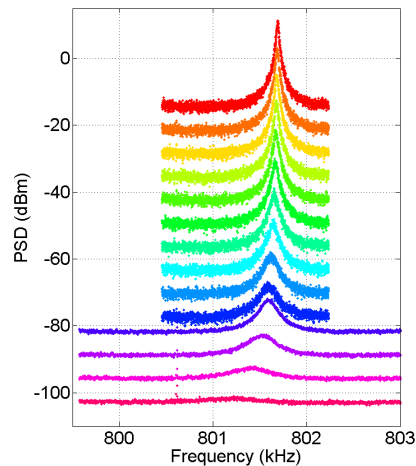


図4 レーザー冷却における振動子のノイズ分光スペクトラ

により振動子フォノンの散逸が増えていることを表し、ピーク強度の低下は振動子の振幅の減少、つまり振動子の冷却を表している。振動子の線幅の変化から冷却後の振動子の温度を見積もることができ、300K から 50mK までの冷却が確認された。クライオスタットで初期温度が 4K にできることでさらなる冷却が可能となるはずで振動基底までの冷却を今後目指したい。エレクトロメカニクスでは高い結合強度と希釈冷凍機内の予備冷却により振動基底までの冷却を確認した。世界で 4 番目の報告となり論文文化を進めている。

(3) 電磁波を用いた振動子のコヒーレント操作とエンタングルメント状態生成：電磁波を用いた振動子のコヒーレント操作には電磁波と振動子間の結合強度が電磁波と振動子の散逸レートよりも高い「強結合」と呼ばれる領域にある必要がある。エレクトロメカニクス系では量子操作に必要な結合強度の 2,000 倍の結合強度を確認している。また図 5a に示すように薄膜振動子には異なる振動モードが存在しこれらは共通の電磁波の共振器モードと結合できる。異なる二つの振動子モードを共通の電磁波モードを介してパラメトリックに結合できること、またこの結合強度が強結合の領域にあることを示した。図 5c は二つの振動モードのエネルギースペクトラが反交差する様子である。反交差の間隔は結合強度を白いスペクトラの幅は散逸レートを表すが、反交差のギャップの方が線幅よりも広く強結合の領域にあることがわかる。この実験で異なる二つの振動モードの強結合は確認されたが、まだ量子操作には結合強度が足りないことが解析から判明した。しかし、異なる二つの振動モードでここまでの強結合が出来ている報告はなく、振動子のエンタングルメント状態生成に非常に近いレベルでの操作が可能となっている。

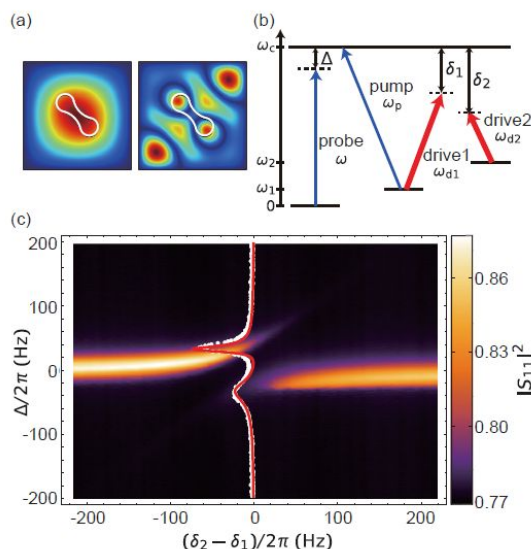


図 5 異なる二つの振動モードの強結合

(4) フォノン結晶および表面弾性波デバイスの開発：上記の主要実験のほか、フォノン結晶や表面弾性波デバイス (SAW デバイス) の構築も試みた。フォノン結晶は共振器ではなく振動子自体の散逸をさらに抑えこむ事が可能となり振動子を用いた量子メモリーなどへの応用が期待される。本研究では SiN 薄膜振動子が張っている Si 基板自体にフォノン結晶構造を彫り込むことで薄膜へのフォノンの流入を防ぐ加工でこれらの作製とシミュレーションとの合致も確認している。今後さらなる振動子の高性能化へ応用が期待される。また表面弾性波を用いたデバイスでは SiN 薄膜振動子の約 100 倍とフォノンの振動周波数を上げることが可能である。振動子の高周波数化は冷却に有利なほか、マイクロ波との結合強度の増加や量子操作の高速化にもつながる。水晶を用いた SAW デバイスでは希釈冷凍機温度で 10^6 の Q 値を観測している。また定量的な観測はまだ行っていないが光弾性の結合強度も比較的強いようで SAW を励起したサンプルの光の透過測定を行うことでサンプル表面における SAW パターンの可視化も実験的に確認できている。また SAW を一点に集中させ光学弾性結合定数を飛躍的に上げる SAW Focusing の技術も確立しつつある。これらの技術革新は本研究の提案当初には予定されていなかったが今後大きく期待される技術と考えている。

(5) まとめ

本研究では当初の目的であった振動子のエンタングルメント生成にはおよばなかったものの、振動子と電磁波結合では世界でもトップレベルの結合強度を観測している。また二つの異なるモード間の結合強度では量子操作まであと一歩と迫っており世界でもリードする位置にまで結合強度を上げることができた。今後の展望としては上記の SAW デバイスを取り入れたさらなる進展や光・マイクロ波両領域での実験系の特色を生かしたハイブリッド量子系の開発や広いエネルギー領域にわたるオプトメカニクス系の物理の進展が望める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

野口 篤史 他、マイクロ波光子と薄膜振動子の強結合の実現、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19-22 日、東北学院大学(宮城県・仙台)

A. Noguchi et al., Electromechanical SiN-membrane inside a 3D microwave cavity, Gordon Research Conference: Mechanical System in the Quantum Regime, March 6, 2016, Ventura (USA)

A. Noguchi, Electromechanical system using a Si₃N₄ membrane inside a 3D microwave cavity, International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2016), January 12-14, 2016, Tokyo(Japan)

R. Yamazaki, Opto-electromechanics for quantum transducer, International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2016), January 12-14, 2016, Tokyo(Japan)

A. Noguchi et al., Electromechanical SiN-membrane inside a 3D microwave cavity, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2015), November 17-20, 2015, Atsugi(Japan)

R. Yamazaki et al., Opto-Electromechanical System as a Quantum Transducer, 28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015), November 16-18, 2015, Tokyo(Japan)

野口 篤史 他、薄膜振動子と超伝導量子回路の結合系の構築、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月21-24日、早稲田大学(東京都・新宿区)

山崎 歴舟 他、薄膜振動子と超伝導量子回路の結合系の構築、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月21-24日、早稲田大学(東京都・新宿区)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.qc.rcast.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 歴舟 (YAMAZAKI, Rekishu)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：00551409