

研究報告書

「マイクロ波・光領域における量子オプトメカニカルシステムの構築」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 26 年 10 月～平成 30 年 3 月

研究者: 山崎 歴舟

1. 研究のねらい

近年勢いを増す量子コンピュータの研究・開発に伴い、量子エレクトロニクスや量子情報処理という分野における量子操作技術も更なる発展を遂げている。一方、マイクロ・ナノメカニクス分野においても様々な微小デバイスの研究・開発が盛んに行われている。本研究では上記二つの「量子」と「メカニクス」という分野を融合することにより、従来型古典デバイスの問題点を克服しその性能を飛躍的に高めるとともに、新たな量子系を創出することを目的とする。

本研究では電磁波とメカニカル振動子が結合したオプトメカニクスという物理系を構築する。ピエゾ効果・光弾性効果・輻射圧など様々な振動子-電磁波間の結合が考えられるが、これらオプトメカニカルな結合を用いることで電磁波による振動子の操作・制御、またその逆が可能となる。また量子領域と呼ばれるような単一光子や単一フォノンで、これらの操作・制御を行うことにより、マクロな大きさを持つメカニカル振動子の新奇な量子状態生成や量子制御が可能である。マクロ振動子の量子状態というのは、量子観測問題など量子物理の原理解明にも新たな知見を与えうため学術的に興味深く、その応用においても新たな機能を持つ量子デバイスの創出が期待される。本研究ではその一つとしてオプトメカニクスを用いた量子トランスデューサの構築を目指す。量子トランスデューサはコヒーレントなマイクロ波・光波長変換を可能とし、多くの量子コンピュータを光配線とつなぐ量子情報ネットワークの基盤技術として必須である。マイクロ波・光両領域の電磁波と振動子が結合したオプトメカニクス系を構築することで、振動子を媒体としたマイクロ波-光間のコヒーレントな双方向波長変換を行うことが可能となる。上記の量子トランスデューサは古典的に言えば電気光学変調器であり、単一量子レベルでのコヒーレント変換が可能な量子トランスデューサは、損失がほぼゼロ、つまり効率 100%の電気光学変調器と言いかえることもできる。振動子の種類や電磁波との結合方式を模索することで、かつてない高効率なコヒーレントマイクロ波・光変換を狙う。

2. 研究成果

(1) 概要

研究開始当初に以下の 3 つの研究テーマを掲げた、1. 振動子の状態初期化、2. 振動子の新奇な量子状態生成、3. 振動子の量子状態操作。これらはマクロ振動子を自由に量子操作するという観点において必要な手順であり、電磁波を駆使してこれらの操作ができることをゴールとしている。研究期間の前半は 1. の初期化に対応する振動子のレーザー冷却に力を入れ、後半は 3. の量子状態操作に含まれる量子トランスデューサの開発に集中し実験を進めて行った。この二つの期間を分けた要因の一つとして実験に用いたメカニクス振動子の選択が挙げられる。幾つかのオプトメカニクスに用いられるメカニカル振動子は多く存在するが、マイクロ波・光両領域において電磁波との結合が可能でその特性が高いものを選ばなく

てはならない。

まず初めに行ったのが Si_3N_4 薄膜を用いたオプトメカニクスの構築である。シリコン基板上に製膜された Si_3N_4 膜は、その内部張力により高い Q 値を持つことが知られている。50nm という薄さではレーザーの吸収も非常に小さい事や、強い張力による高い表面平坦度のため光学特性にも優れている。 Si_3N_4 薄膜振動子(図 1a)を用いたオプトメカニクスを光共振器(図 1b)とマイクロ波共振器(図 1c)で各々作製し、レーザー冷却手法を用いた振動子モードの冷却実験を行った。また同実験では、二つの異なる振動モードをマイクロ波共振器モードを介して結合させることで振動モード間の強結合を観測した。上記の薄膜を用いた実験では世界でも数少ない振動基底状態までの冷却などが達成されたが、薄膜が脆く実験系の構築が困難である、振動モードの周波数の低さが量子ビットの寿命と整合性が無い、などの問題が浮き彫りとなったため異なる振動子を模索した。

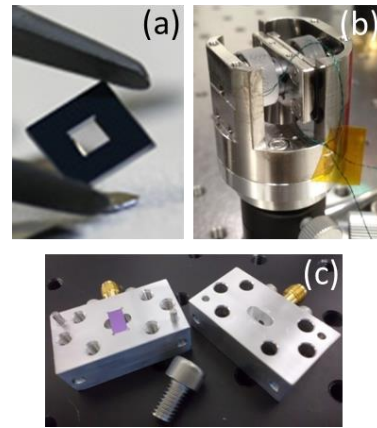


図 1： Si_3N_4 薄膜を用いたオプトメカニクス。

次に固体表面を伝搬する表面弾性波(SAW)を振動子として用いた実験を行った。高い周波数の SAW の励起は比較的容易であり、極低温の実験では水晶において Q 値が 10^6 と非常に高性能な SAW 共振器が作製可能な事がわかった。図 2 にある光共振器と SAW を結合させた SAW オプトメカニクスでは SAW フォーカシングによる結合強度の増大や、光弾性効果に特有なテンソル結合を積極的に用いた、光偏光による SAW-光結合の“スイッチング”を確認した。本実験は SAW を用いた共振器オプトメカニクスの初の実験報告となっている。この実験の発展形として SAW-光結合の増大を図るための、Whispering Gallery モードを用いた実験(図 2c)、及び SAW 基板上に作製した光導波路と SAW を結合させた実験(図 2d)に着手し実験を続けている。

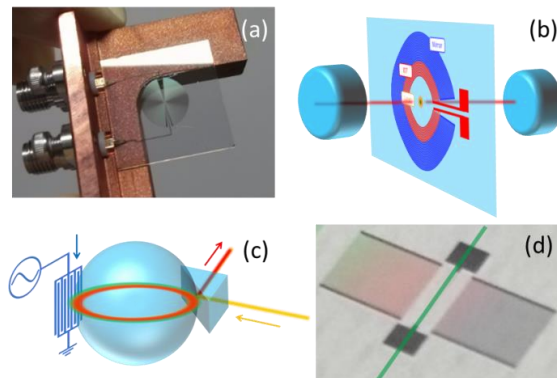


図 2：(a)実際の SAW 共振器と、(b)同回路を用いた SAW オプトメカニクスの概念図。下は各々(c)Whispering Gallery モード、(d)光導波路を用いた SAW オプトメカニクス実験。

(2) 詳細

研究テーマ1「振動子の状態初期化 : メカニカル振動子のレーザー冷却」

量子オプトメカニクスでは振動子と電磁波の間の結合を通して、単一量子レベルでの操作を必要とする。光共振器は常温で、マイクロ波共振器は希釈冷凍機温度で占有数がほぼゼロになるため量子状態として初期化されていると考えられるが、一般的に周波数が低い振動子ではレーザー冷却手法を用いてフォノン占有数を 1 以下まで冷却、振動基底状態を生成することで量子状態の初期化が完了したことになる。 Si_3N_4 薄膜をメカニカル振動子としたオプトメカニクスの系を光・マイクロ波で各々作製し、レーザー冷却の実験を行った。光領域のオプト

メカニクス(図 1b)はファブリペロー型の光共振器内に薄膜振動子を挿入した形になっており、振動子の変位が共振器内の光を変調する、つまり振動子と共振器内の光がエネルギーの交換を行えるようになっている。300K からの基底状態までの冷却には周波数と Q 値の積である fQ 値が 6×10^{12} 以上必要であるが、幾つかの振動モードでこの値を超えていることが確認された。実際のレーザー冷却のデータを図 3 に示す。振動子による光の変調サイドバンドが冷却レーザー強度を増すにつれ著しく下がっているのがわかる。ピーク強度と線幅から振動子のモード温度が見積もれ、光領域のオプトメカニクスではモード温度 300K→50mK の冷却が確認された。光の実験では4Kからの冷却により振動基底状態までの冷却を試みたが、クライオスタットの振動の影響によるレーザーロックの不安定化などの問題で実現できなかった。

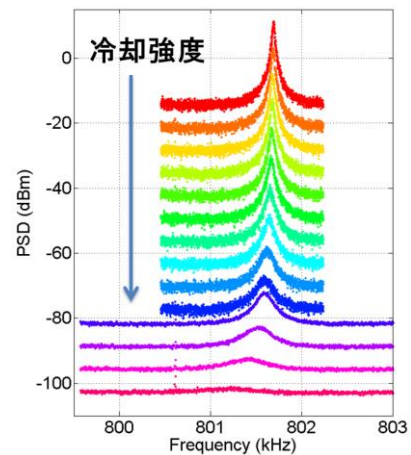


図 3: レーザー冷却による、振動子変調サイドバンドの変化。

同様の実験をマイクロ波オプトメカニクスでも行った。マイクロ波共振器(図 1c)を用いたオプトメカニクスでは 3 次元 LC 共振器の平板キャパシタ部分が、同薄膜振動子で構成されている実験系を構築した。この共振器を希釈冷凍機に設置し極低温下で実験を行った。冷却マイクロ波強度を上げていくにつれ、初期温度の 22mK→20 μ K までの冷却が観測された。冷却後の温度をフォノン数で表すと、フォノン占有数 $n=0.51$ と見積もられ、量子振動基底状態までの冷却が確認された。

研究テーマ2「振動子の新奇な量子状態生成 : 異なる振動子モード間の強結合」

上記の薄膜振動子を用いたマイクロ波オプトメカニクスにおいて、異なる二つのモード間の量子状態制御を行った。薄膜振動子は基本モード以外に、複数の腹を有する高次モードが存在し、異なる複数の振動モードを同じマイクロ波共振器モードに結合することが可能である。本実験では異なる振動子モードを 2 本の駆動マイクロ波により仮想的に結合させた。その結果二つの振動モード間の強結合が確認された。ドレスと状態ともよばれるこの状態は、量子情報のコンテキストでは、振動モード状態に転写された量子情報が散逸するよりも速く二つの振動モード間での情報転送が可能な事を示している。

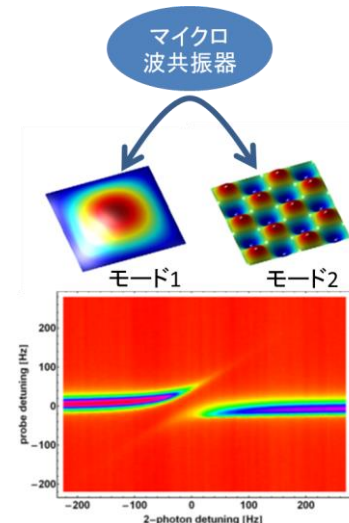


図 4: 異なる振動モードのマイクロ波共振器を介した強結合。

研究テーマ3「振動子の量子状態操作 : 量子トランスデューサの開発」

薄膜振動子から表面弾性波(SAW)にメカニカル振動子を移行し、量子トランスデューサの開発へ向けての実験を行った。通常の SAW 共振器を改良し図 5 にあるような円形 SAW 共振器を作製した。SAW が回路中心に集中されモード体積

が1/10程度に縮小されたことがレーザーイメージング法を用いたSAW空間分布測定で観測された。このSAW共振器を光のファブリペ

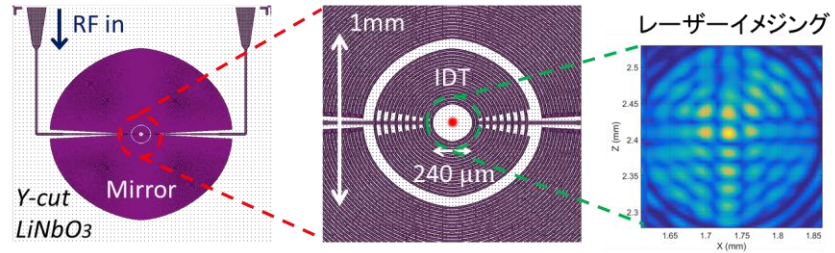


図 5 : SAW 共振器と SAW の空間分布。

ロー共振器に挿入し, SAWによるStokes/Anti-StokesのBrillouin散乱比を共振器により操作することで, SAW共振器オプトメカニクスとして機能していることも実験的に確認した。またSAWと光はこの実験ではテンソル的な光弾性効果により結合しているが, 入射レーザー光の偏光を変えるだけで20dB以上の結合強度差が取れることを示した。

上記の実験ではSAWモードと光共振器モードの空間オーバーラップが悪かったため結合強度が低かった。モードオーバーラップと結合強度の向上のため一つの方向性として光導波路を用いたSAWオプトメカニクスに着手した。NICTとの共同研究によりLiNbO₃基板上にTi拡散光導波路を作製(図6a), SAW共振器と光導波路の結合が確認された。またもう一つのモードオーバーラップの解としてWhispering Galleryモード(WGM)を用いたSAWオプトメカニクスにも着手した(図6b)。SAWも光も非常にQ値の高いWGMが各々過去に観測・報告されているが, これを組み合わせた系になっている。どちらのモードも球の赤道線上にあるだけでなく, 極性方向の閉じ込めが強くモード体積が小さく, 強い結合強度が期待できる。現在LN球を用いた実験で各々の共振器の分光を行っている。SAW-WGM共振器のQ値が 6×10^4 , 光共振器のQ値が 10^8 と非常に高いQ値を観測できている。光共振器のQ値は文献のLNの吸収限界の値であり, 理論上これ以上は出ない非常に高い性能を示している。

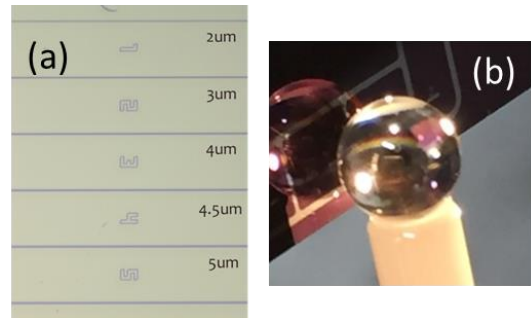


図 6 : (a) Ti:LN 光導波路, (b)WG モード SAW オプトメカニクス用の LN 球。

3. 今後の展開

SAWを用いたオプトメカニクスの構築は興味深い方向に展開していると考えている。光導波路をと光ファイバの相性は良く, 極低温下での実験を容易にする要素が多い。現在極低温下での光導波路のテストを行っている。モード体積の微小化とSAWの高周波数化で約1%の変換効率が可能な事がこの系では見積もられている。既存EOMの最高変換効率が0.1%なので, これを超えるデバイスが可能なのではと考えている。また収束イオンビーム加工(FIB)を用いた光導波路共振器の作製にも着手している。これらが成功すれば極低温でのコンパクトなデバイス作製が可能となり将来が期待される。またWGMを用いたSAWオプトメカニクスでは, デバイス化に少し困難があるかもしれないが, Brillouin物理とオプトメカニクスの狭間にある興味深い系となっている。また基礎物理だけではなく応用面においても期待される。SAWのWGMはセンサー目的として利用されているが, ここに光計測を導入することでその感度を飛躍的に高められる可能性が

あり期待される。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

マクロ振動子の量子操作を伴う量子メカニクスは、量子エレクトロニクスの中でも最も新しい分野の一つである。その分野に日本でいち早く参入できたことは非常に意義が大きい。この数年で世界的にもメカニクスを用いた量子トランスデューサの構築が行われてきたが、変換効率が低い、バンド幅が狭いなどの困難がありまだ発展途上である。我々の SAW を用いたオプトメカニクスは光導波路や光ファイバなどとの相性も良く、極低温デバイスである量子トランスデューサとしてのポテンシャルに期待が持たれる。また SAW は異なる歪結合により他の固体量子系(量子ドット, NV 中心など)とのハイブリッド化が容易に思われる。今後様々な量子系との結合が考えられ多方面への応用可能性があるのではと考えている。振動子の量子操作という意味では、あまり本研究では進められなかったところがある。特に光領域オプトメカニクスでの量子操作には、極低温下での光学実験が大きな障害となっており世界的にもほぼ報告が無い状態である。これらの障害をうまく乗り越えるためには量子エレクトロニクスの技術に加え、材料工学やプロセス技術などによる集積化や微細加工技術が必要と思われる。本領域において、それらの知見に富んだ研究者と交流が持てたことも非常に今後のためになったのではと考えている。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

ナノメカニクスと量子情報操作技術を融合した新しい物理系として、量子オプトメカニカルシステムの構築を狙う一環として、超伝導量子ビットと結合するマイクロ波帯と通信波長帯の光をコヒーレントに結合する量子トランスデューサの実現に挑戦した。

当該研究者はこの量子情報の極めて重要な課題を機械系の振動を介して行うアイデアを考え、マイクロ波と光を結合するオプトメカニクス技術の開発に指針を与えるアプローチをいくつも示した。さらに、研究を通して、オプトメカニクス系を量子トランスデューサに応用する際の様々な課題を明らかにした。具体的には、SiN 薄膜振動子に対してレーザー冷却の手法を用いることで、薄膜の振動子モードを量子基底状態まで冷却することに成功した。また、異なる二つの振動子モードを結合させ、強結合領域を実現した。さらに、同心円状のトランスデューサで表面弾性波(SAW)を中央に集めることに成功し、光共振器と表面弾性波が光弾性効果により結合した系を構築した。構築した系で、光共振器により二つの散乱課程(Stokes と Anti-Stokes)のうち Anti-Stokes 散乱が増強されていることを観測した。また、通常のオプトメカニクスでは報告されていない光の偏光依存による大きな結合強度の変化を観測した。また、SAW とウィスパリギャラリモード(微小球を使用)や光導波路と SAW 回路の集積系を実現し、SAW と光が長く効率的に結合する構造を提案し、微小球に SAW の発振器を載せることにも成功している。当初進めていた SiN 薄膜振動子の問題点を明確にし、SAW を用い

光の変調に方針を変更したことも適切な判断であったと思う。最終目標を達成するために

不可欠な希釈冷凍機内でのオプトメカニクス系の実験は大変であるが、これに向けた研究も着実に進んでいる。

大変チャレンジングな課題であり、マイクロ波帯と通信波長帯の量子トランスデューサを 3 年で完成するのは難しかったが、新しい発想で独創的な研究を進めており、論文発表などはこれからであるが、高度な内容でインパクトのある成果が出ている。当初計画にないアプローチにも挑戦しており、さきがけ研究として高いレベルの成果を得たと評価できる。優秀な研究者であり、当該さきがけ領域が構築した人的ネットワークにおいてハブの役割を果たし、分野を超えた若手研究者のネットワーク作りにも貢献した。

マイクロ波帯と光通信波長帯のオプトメカニクス系を用いたコヒーレント変換は超伝導量子ビットと光通信帯のフォトンの量子トランスデューサとして大変魅力的であり、成功した時の科学技術及び社会・経済へのインパクトは極めて大きい。オプトメカニクスの研究としても大きなインパクトが期待されることから、引き続き挑戦的な課題設定を行い、果敢に研究を進展させて欲しい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Atsushi Noguchi, Rekishu Yamazaki, Manabu Ataka, Hiroyuki Fujita, Yutaka Tabuchi, Toyofumi Ishikawa, Koji Usami and Yasunobu Nakamura, “Ground state cooling of a quantum electromechanical system with a silicon nitride membrane in a 3D loop-gap cavity”, *New J. Phys.*, 2016, 18, 103036
2. Ayato Okada, Fumikazu Oguro, Atsushi Noguchi, Yutaka Tabuchi, Rekishu Yamazaki, Koji Usami, Yasunobu Nakamura, “Cavity optomechanics with surface acoustic waves”, arXiv:1705.04593

(2) 特許出願

特になし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Rekishu Yamazaki, Atsushi Noguchi, Kenji Sato, Yutaka Tabuchi, Toyofumi Ishikawa, Koji Usami, Yasunobu Nakamura, “Opto-Electromechanical System as a Quantum Transducer”, 28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015)
2. 山崎歴舟, 岡田彪利, 野口篤史, 田淵豊, 宇佐見康二, 中村泰信, “表面弾性波オプトメカニクス”, 電子情報通信学会 MWP 研究会, 機械振興会館, 2017 年 11 月 9 日