

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K13987

研究課題名（和文）量子変換器ための微小モードフォノン-フォトン結合共振器の開発

研究課題名（英文）Development of small mode volume phonon-photon coupled resonator for quantum transducer

研究代表者

佐々木 遼（SASAKI, Ryo）

国立研究開発法人理化学研究所・量子コンピュータ研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：70890276

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：光接続された分散型超伝導量子コンピュータを実現するための、マイクロ波と光の間の信号の変換器の開発を行った。マイクロ波と光信号をフォノンが仲介して変換する方式において、変換器の高効率化のために、フォノン共振器の微小モード化が効果的である。本研究で収束型の波面を持つ圧電薄膜上の表面弾性波共振器を開発し、膜厚方向および面内での弾性波共振モードの閉じ込めを実現し、微小モード化を達成した。また共振器のデザインや薄膜材料の特性を調べ、共振モードとの結合制御や低損失化の方法を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

汎用な大規模量子コンピュータを実現するために、超伝導回路を含めた多くの方式において、光通信による接続方法が検討されている。本研究ではフォノンを利用した新しいデバイス構造に基づく変換器の開発を行い、変換器の高効率化のための要素技術の開発と、性能を制限している物理的な要因を明らかにした。ここで得られた知見は、特に圧電薄膜を用いた表面弾性波共振器の変換器への応用に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：We have developed a microwave-optical signal transducer to realize an optically connected distributed superconducting quantum computer. In a method in which microwave and optical signals are converted using phonons as an intermediary, reducing the mode volume of phonon resonance is an effective way to increase the efficiency of the transducer. In this study, we developed a surface acoustic wave resonator on a piezoelectric thin film with a focusing wavefront. We achieved confinement of the surface acoustic wave resonance mode in the film thickness direction and within the surface, thereby achieving a small mode volume. We also investigated the design of the resonator and the properties of the thin film material. We clarified methods for controlling coupling with the resonance mode and reducing losses of the resonator.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：量子変換器 オプトメカニクス 表面弾性波 量子コンピュータ 光変調器

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータは古典コンピュータを超える計算能力を持つと期待され、超伝導回路やイオンなど様々な物理系を用いた方式が研究されている。汎用的な計算が可能な大規模量子コンピュータを実現するには、100 万個程度の量子ビットの制御が必要と考えられている。しかし「単一の装置」内で量子コンピュータを完結するのは容易ではない。例えば超伝導回路を用いた方式では、量子ビットや制御に必要なマイクロ波配線、サーキュレータやアンプといったマイクロ波素子を、単一の希釈冷凍機の内部に全て格納するのは困難である。

それを解決する方法の一つとして、光ファイバーを用いた冷凍機間の接続が研究されている。これは極低温環境下におけるマイクロ波の信号を量子変換器と呼ばれるデバイスを通じて、室温環境でも堅牢な光周波数領域にアップコンバートし、光ファイバーを使って通信を行う方法である。ここで重要な指標の一つが量子変換器の変換効率であり、この値が現状非常に小さいために、実用には至っていない。

高い変換効率をもつ量子変換器を実現するために、様々な方式に基づく変換器が研究されているが、その中の一つとしてフォノン（音波）を仲介した方式がある。特に表面弾性波というフォノンモードは、超伝導量子ビットとの結合が実現されており[1]、変換器への応用の研究も行われている[2]。しかし 先行研究[2]では、高い変換効率を実現されておらず、その原因の一つとして、変換器の中で使用されている表面弾性波共振器のモード体積が大きいことが挙げられていた。高い変換効率を達成するには、損失を抑えつつモード体積の小さい表面弾性波共振器を実現することが重要であった。[1] M. V. Gustafsson *et al.*, *Science* **346**, 207–211 (2014).[2] A. Okada *et al.*, *Opt. Express* **29**, 14151–14162 (2021).

2. 研究の目的

本研究では、高効率な量子変換器を実現するため、モード体積の小さいフォノン共振器の開発を行う。変換器のために適した材料や構造、適切なデバイス構造を総合的に検討する。また光共振器との結合を考慮したデバイス開発を行う。

3. 研究の方法

バルク材料に関する音速などの物性値は先行研究で典型的な物質においては明らかになっているが、薄膜など複合材料ではその膜厚や用いる波長によって特性が変化するために、個々の構造に応じた特性の理解が必要となる。そのために、実際にデバイスを作製して評価するのに加えて COMSOL Multiphysics®を用いたシミュレーションを用いた。音速の薄膜方位依存性や、実際のデバイス形状が共振器の Q 値に与える影響を調べるためなどに利用した。

実験ではバルク圧電基板や圧電薄膜を用いた弾性波共振器、光共振器の設計と作製を行い、その性能評価を行った。マイクロ波測定系と通信波長帯の測定系、走査型の光学イメージング系を構築し、それらを用いたフォノン共振器や光共振器のスペクトル測定、フォノン共振モードのデバイス表面におけるモード分布の測定を行うことでデバイス性能や設計指針の効果を評価した。その結果を再度デバイス設計にフィードバックして高性能化を行った。

4. 研究成果

まず本研究を通して、圧電物質である LiNbO_3 (LN)の薄膜とサファイア基板の接合材料を選択し研究を行った。この系は マイクロ波と強い圧電効果を介して結合できる。弾性波と光の両方を薄膜内に閉じ込めることができる、という高効率な変換器のために有用な特徴を持つことから選択した。

COMSOL によるシミュレーションを行ったところ、図 1 に示すように LN 基板を用いた場合と LN 薄膜を用いた場合を比較すると、基板の場合はフォノンモードが深さ方向に長く伸びているのに対し、薄膜ではサファイア基板の方に侵入せず、薄膜内部に閉じ込められていることが確かめられた。

このシミュレーションから、薄膜モードは Love モードと呼ばれる伝搬方向に垂直で面内方向の変位を持つ表面弾性波モードであることがわかった。電気信号と機械振動の結合強度を表す電気機械結合定数 (electromechanical coupling) K^2 も 25%と非常に大きい値を持つことがわかった。これにより表面弾性波共振器に用いる電極のブラッグミラーの反射係数を見積もることができ、非常に大きい反射を持つことが明らかになった。これは表面弾性波のブラッグミラー内部へのフォノンモードの侵入長が小さくなることで、デバイスのサイズを小さくできるというメリットがある。一方で、大きい反射係数は反射の際に音響インピーダンス不整合によるバルク方向への散逸につながり共振器の

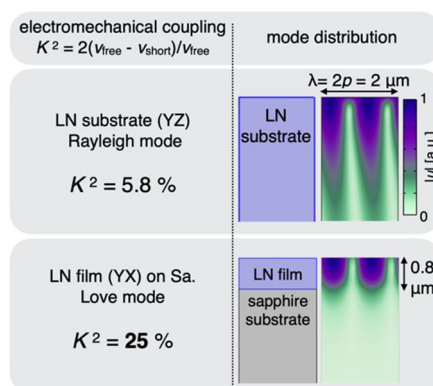


図 1 LN 基板と LN 薄膜におけるフォノンモード分布。

損失の原因となることが、実際にデバイスを作製して得られた実験結果と複合的に考察することで明らかになった。低い損失をもつ共振器を作製するためには、この強い圧電性を起源とするバルク方向への散逸を抑制する構造や基板方位選択が重要であることがわかった。

微小モードのフォノン共振器を実現すべく、本研究では上記の薄膜材料を用いて収束型の表面弾性波共振器と、リング型のフォノン共振器の開発を行った。

収束型の表面弾性波共振器は図2のような構造を持ち、通常の表面弾性波共振器と異なり、曲がった電極を持つ。これは回折による損失を抑えながらモード体積を小さくする目的で設計したもので、光共振器におけるガウシアンモードと同様の構造をしている。

電極の曲率を系統的に変えた共振器を作製しマイクロ波による測定を行うと、周波数が曲率に応じて変化する共振ピークがいくつかみられた(図2右)。これはガウシアンモードにおける高次の横モードに対応すると考えることで、周波数の曲率依存性を説明できることがわかった。この横モードとの結合はデバイスの解析を困難にするため、デバイス設計の時点で結合を排除できることが望ましい。本研究で励起ポートの長さを調整することで、この横モードとの電気的な結合を抑制し、メインの基本モードとの結合のみを持つ共振器のデザインを考えた。作製したデバイスでは確かに結合をコントロールできることを明らかにした(図2左)。

共振モードのデバイス表面における閉じ込めの様子を測定するために、弾性波の分布を光学的にイメージングできる系を構築し(R. Hisatomi, K. Taga, *RS et al.*, Phys. Rev. B **107**, 165416 (2023).), モード体積の評価を行った。測定によって、モードの広がりが確かに設計通りに押さえ込まれていることを明らかにし、実験では波長(2 μm)程度の幅をもつ表面弾性波共振器を作製することができた(*RS et al.*, APS March meeting 2024)。

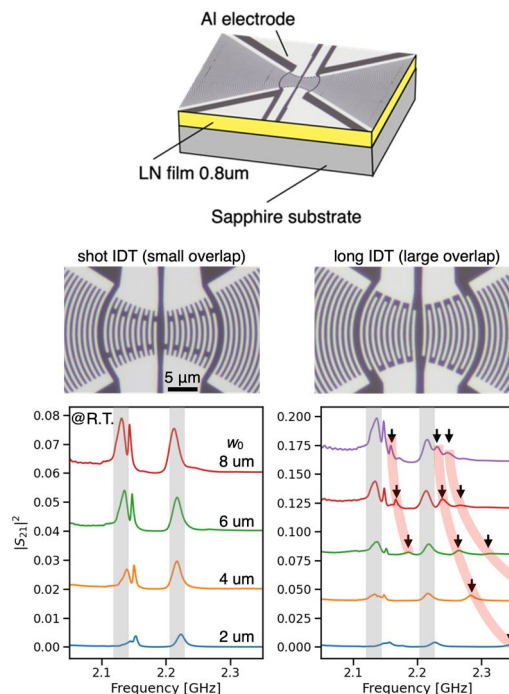


図2 収束型の表面弾性波共振器。IDTの長さによる共振モードとの結合の違い。

モード体積の評価を行った。測定によって、モードの広がりが確かに設計通りに押さえ込まれていることを明らかにし、実験では波長(2 μm)程度の幅をもつ表面弾性波共振器を作製することができた(*RS et al.*, APS March meeting 2024)。

リング型のフォノン共振器は、上記の圧電薄膜材料を用いて作製した。光導波路と同様のリッジ型の導波路構造を圧電薄膜上に作製することで、フォノンモードを導波路内部に閉じ込めることができる。この導波路構造をリング型に作製することにより、光共振器と同様のフォノン共振器を実現することができる。この新しいタイプのフォノン共振器は、ブラッグミラーを持たないために、バルク方向への散乱を抑えることが期待できる。また導波路幅を波長ほどに狭めることでシングルモードの導波路を実現でき、モードの微小化も可能になる。

研究初期に作製した共振器はQ値が300程度とそこまで良いものではなかった(図3(上))。その原因の一つとして導波路の側壁部分の荒さがあることが判明した(図3(下)左図)。そこでマスクや加工時のサンプル固定方法、加工プロセス条件、後処理の過程を改善することで、従来よりも滑らかな側壁を持つ導波路構造を作製することに成功した(図3(下)右図)。

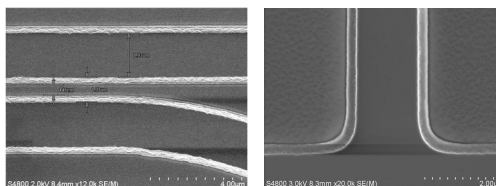
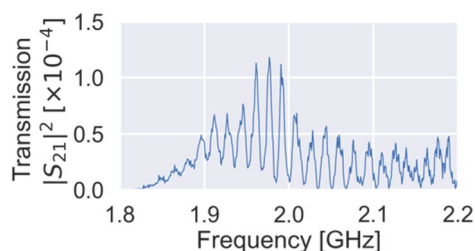


図3(上)リング型フォノン共振器のスペクトル。(下)導波路構造のSEM画像

また本研究で開発したフォノン共振器と結合させるべく、同じLiNbO₃薄膜を用いた光共振器の作製と評価も行った。チップ上の光導波路に光信号を導入する方法としては、冷凍機内での利用を想定して低温環境下でのアライメント不要なグレーティングカプラを用いた方式を採用し、その透過信号の波数依存性を調べた。デバイス性能評価のための通信波長帯の測定系を構築するところから行い、実際に作製した光リング共振器では10万オーダーのQ値を達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Hisatomi Ryusuke, Taga Kotaro, Sasaki Ryo, Shiota Yoichi, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 107
2. 論文標題 Quantitative optical imaging method for surface acoustic waves using optical path modulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165416-1, 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.107.165416	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 Kato Keisuke, Sasaki Ryo, Matsuura Kohei, Usami Koji, Nakamura Yasunobu	4. 巻 134
2. 論文標題 High-cooperativity cavity magnon-polariton using a high-Q dielectric resonator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 083901-1, 6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0164545	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryo Sasaki, Rekishu Yamazaki, Yuya Yamaguchi, Ryusuke Hisatomi, Koji Usami, Yasunobu Nakamura
2. 発表標題 Small-mode-volume surface acoustic wave resonator in LiNbO3 film on Sapphire
3. 学会等名 Quantum optics meets acoustics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤真幸, 佐々木遼, 松浦康, 山崎歴舟, 宇佐見康二, 中村泰信
2. 発表標題 フォトン・フォノン間非古典相関観測に向けた光ファイバー内ブリルアン散乱の定量的評価
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 佐々木遼, 山崎歴舟, 久富隆佑, 山口祐也, 野口篤史, 中村泰信
2. 発表標題 集束型シングルモード表面弾性波共振器の設計と集束特性
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryo Sasaki, Rekishu Yamazaki, Ryusuke Hisatomi, Yuya Yamaguchi, Atsushi Noguchi, Yasunobu Nakamura
2. 発表標題 Small-mode-volume surface-acoustic-wave resonators with focused Gaussian beam modes
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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