

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18786

研究課題名（和文）次世代通信6G用弾性波デバイスに適した低減衰圧電材料の開発

研究課題名（英文）Development of low-damping piezoelectric material suitable for acoustic wave devices for next-generation communication 6G

研究代表者

大橋 雄二（Ohashi, Yuji）

東北大学・未来科学技術共同研究センター・特任准教授

研究者番号：50396462

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：単結晶基板にトランスジューサ基板を金属接合した構成により、GHz帯の高周波帯で単結晶基板中の伝搬減衰測定を行う手法を開発した。結晶欠陥を多く含むと考えられるコングルエント組成のLN単結晶に比べ、MgをドーピングしたMg:LN単結晶の方が、結晶欠陥を低減する効果があり、結果として高周波帯での超音波の伝搬減衰を低減できる効果があることを示唆し、高周波帯での低減衰材料の設計指針を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代通信システム6Gで利用が検討されている6-40 GHz帯対応の弾性波デバイスの開発が急務となっているが、高周波化に伴う材料の粘性に起因する本質的な吸収損失の低減がデバイス実用化の鍵の一つであり、本研究成果はその実現に向けて低減衰の材料開発の指針を与える重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：We have developed a method for measuring propagation attenuation in a single crystal substrate at high frequencies in the GHz band using a configuration in which a transducer substrate is metal bonded to a single crystal substrate. Compared to LN single crystals with a congruent composition, which are thought to contain many crystal defects, Mg-doped Mg:LN single crystals are more effective in reducing crystal defects, and as a result, the propagation attenuation of ultrasonic waves in high frequency bands is reduced. We suggested that this material has the effect of reducing the loss of energy, and developed design guidelines for materials with low attenuation in high frequency bands.

研究分野：超音波計測

キーワード：伝搬減衰 次世代無線通信 結晶欠陥

1. 研究開始当初の背景

次世代通信(6G)における高速大容量低遅延通信の実現に向けますます電波周波数の枯渇化問題は加速し高周波化は避けられなくなっている。スマートフォンや自動運転など移動を伴う通信デバイスでは不可欠な弾性波フィルタは、アンテナから入力された信号の周波数弁別を行うデバイスであるが、高周波化の流れに向けてより高効率・低損失・高安定なデバイスが要求されている。近年、6GHz～数十GHzの超高周波帯の弾性波フィルタを実現できる可能性を秘めた異種圧電単結晶接合基板 (Hetero Acoustic Layer: HAL) の新規構造が提案され、基板中へ漏洩していた弾性波エネルギーを効率よく表面にあるいは圧電基板中に集中させることで損失を低減する技術等について活発な研究が展開されている。しかし、単結晶材料内の吸収減衰を改善するための材料設計を見直すというアプローチはなかった。材料中を伝搬する音波の減衰は一般に周波数のおおよそ2乗で増加するため、現在の更なる高周波化の流れの中ではもはや無視できない重要な問題となっている。弾性表面波(SAW)フィルタ周波数特性の通過帯域の挿入損失は最大で3dB程度あり、入力電力の約半分が失われている。この挿入損失を0.7dBでも改善できれば、電池消費を16%も削減できることから僅かな減衰の改善でも非常に大きな省エネルギー化に貢献できる。しかしながら、現状は材料自身の吸収減衰がどの程度であるかわからず、それを計測する技術も無い状況にある。高周波化する6Gシステムにおいて周波数の2乗で大きくなる減衰の影響はもはや無視できない段階に入ってきている。そして、どのように材料を改善すれば減衰が低減できるのかを解明することが重要課題となっている。

2. 研究の目的

前述のような背景を踏まえ本研究では、これまで報告例の無い6GHzを超える超高周波帯での圧電材料の吸収減衰を計測する手法を開発するとともに、結晶構造(特に結晶内欠陥)と吸収減衰の関係を解明し、高周波帯でも低減衰な弾性波フィルタ用材料の開発に貢献することを目的とする。

SAWデバイス用の材料として主流のLiNbO₃(LN)、LiTaO₃(LT)はほとんどがコングルエント組成で、Li:Nb、Li:Taの比が48.5:51.5近傍にあることが知られている。このため、結晶格子内にわずかながらも結晶欠陥が存在する。その欠陥を何らかのドーパントを添加することで埋め合わせし、減衰係数を小さくすることができるかについて実験的な検討を行う。

3. 研究の方法

圧電基板として利用されているLiNbO₃(LN)を取り上げ、下記の方法で研究を実施する。

6GHz超の高周波帯ではIDTの耐電力と製造技術の限界から、SAWを効率よく励振すること自体が困難であることから、より励振が容易なバルク波(平面波)による計測法を拡張した新構造による手法を実施する。図1(a)は、圧電膜を電極で挟んだトランスジューサ(Tr)をバッファロッドの片端面に形成し、ロッドとカプラを介して試料に音波を入射して計測する手法だが、この手法は伝搬路の途中に減衰の大きいカプラを介しており～1GHz帯までが限界である。また、図1(b)のようにバッファロッドを介さない方法でも、Trと試料を接着剤で接着するためその減衰が問題となる。そこで、本研究では図1(c)のように、6GHzを超える高周波での超音波励振を実現するため圧電基板の分極方向を反転させた圧電薄板を直接接合したTrを試料に直接金属拡散接合する構成を試みる。電極膜厚は数十nm程度と薄いため超音波の減衰を最小限に抑えて試料への超音波入射が可能になる。また、圧電基板は接合後にサブミクロンオーダーまで研磨して薄板化するため難易度は高いが、分極反転状態で接合することで同じ基板厚さでも2倍の高調波の励振が可能になるため高周波化に有利となる。

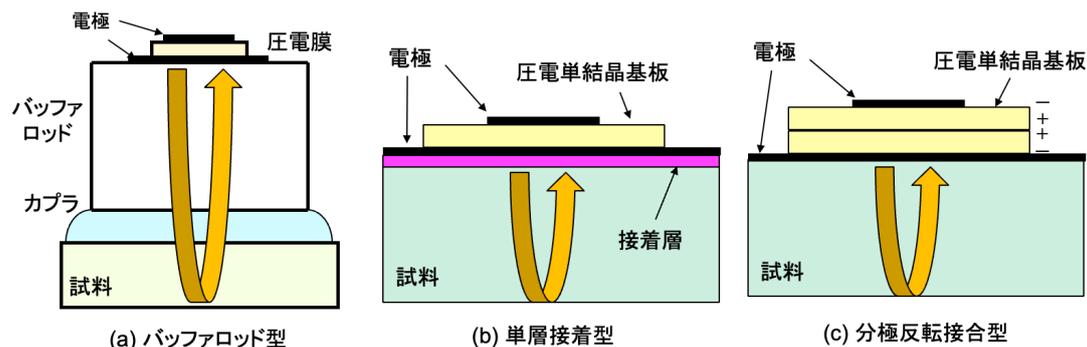


図1 各種バルク波伝搬特性測定法の構成。

5mol%程度の MgO をドープした LN (Mg:LN) はコングルエント組成(融液組成と育成結晶組成が一致)になることが知られており、Mg が LN 内の結晶欠陥を補償する効果が期待される。そこで、LN および Mg:LN 基板に、縦波超音波励振用の 36°Y-cut の LN トランスジューサを形成し、高周波用プローバーとネットワークアナライザで構成した GHz 帯計測装置を用いて、縦波超音波の伝搬特性の計測を行い、LN と Mg:LN の伝搬減衰を比較する。また、弾性波特性との比較のため、コングルエント組成の LN および Mg:LN それぞれについて、光の吸収特性を測定し結晶欠陥の違いを評価する。以上の測定結果を元に、ドーパントの吸収減衰低減効果を検証する。

4. 研究成果

まず、6 GHz 超の周波数帯域の減衰係数測定を実現するために、20 GHz まで対応するベクトルネットワークアナライザと、高周波計測対応のプローバーと組み合わせて、装置のキャリブレーション法も含めて検討し、高周波帯の計測基盤を構築した。

次に計測用サンプルについて検討した。高周波用の弾性波フィルタは、高周波動作のために圧電基板を薄くする必要があり、破損しやすく研磨が難しくなるため、できるだけ高音速となる縦波超音波を用いた構成とする場合が多い。そこで、測定対象としては縦波励振用で利用される 36°Y-cut LN 単結晶基板を選択した。通常の LN 基板は、コングルエント組成であるため均一ではあるもの酸素欠陥などの結晶欠陥が内在すると考えられている。その欠陥を補償する可能性がある Mg をドープした Mg:LN を比較対象として選択し、同じ方位の 36°Y-cut Mg:LN 基板を準備した。また、トランスジューサとしても、縦波を励振するための圧電単結晶基板として 36°Y-cut の LN 基板を選択した。これら基板中を伝搬する縦波音波の伝搬減衰を計測するために、3 mm 厚さの各試料基板上に Au 電極を介してトランスジューサ用圧電基板(6×6×0.5 mm³)を金属接合し、さらにその接合したトランスジューサ用圧電基板を厚さ 1 μm 程度まで極薄に研磨して、高周波励振ができるようにした。試料の写真を図 2 に示す。Mg:LN 試料では、トランスジューサ基板は厚さ分布があるもののおおよそ 1 μm 程度まで研磨することに成功したが、LN 試料の方は約 40 μm のところで元基板側にクラックが入ってしまい(図 2(b)参照)トランスジューサ基板の研磨を途中で断念することとなった。また、Mg:LN 試料においても、単層のトランスジューサ研磨をした段階で膜厚分布が大きくなってしまっており、この上にさらに分極反転基板を接合することは困難であったため、図 1(c)のような分極反転構造のトランスジューサ形成は断念し、単層トランスジューサのみで計測を行うこととした。

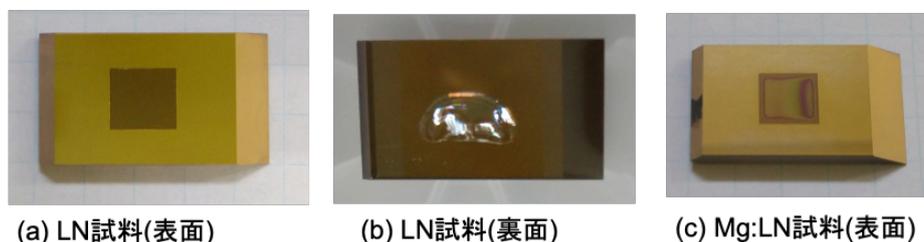


図2 トランスジューサ用 LN 基板を金属接合して薄板化研磨を行った試料基板。

図 2 に示した研磨後の試料の表面に Au 膜を蒸着して上部電極を形成し、超音波を励振・検出して GHz 帯の縦波伝搬特性評価を行った。LN 試料は基板中にクラックがあるため、トランスジューサ基板の端の方でクラックの影響が無さそうな部分を選択して測定した。図 3 に LN 試料の結果、図 4 に Mg:LN 試料の結果を示す。図 3(d)の結果から、LN 試料のトランスジューサの基本周波数は 0.86 GHz 近傍で、その奇数次の高次モードの励振が 2 GHz 辺りまで複数確認でき、また、図 3(c)の結果からそれらの高次モードの波が基板中を 1、2、3 往復する時間波形が観測された。また、図 4(d)の結果から、Mg:LN 試料のトランスジューサの基本周波数は 1.1 GHz で、3 次モードが 3.7 GHz 近傍に観測された。5 次モード以降の高周波成分はノイズレベルに埋もれて観測できなかった。図 3(d)および図 4(d)の 1 往復と 2 往復のレベル差、2 往復と 3 往復のレベル差から基板中の 1 往復の伝搬減衰を周波数ごとに算出した伝搬係数の結果を図 5 に示す。図 3(d)の結果は、横波モードと考えられる励振も発生していて干渉しているためか、ピーク形状にかなりばらつきが発生していたため、比較的正常的なピーク形状だったものだけを抽出してプロットした。図 5 の結果を見ると、LN 試料の減衰係数が全体的に高く、Mg:LN 試料の減衰係数の方が小さい傾向が捉えられた。この結果から、測定精度上の問題はあっても、Mg をドープした効果により Mg:LN 基板の方が減衰係数が小さくなる傾向にあることが実験的に確認された。

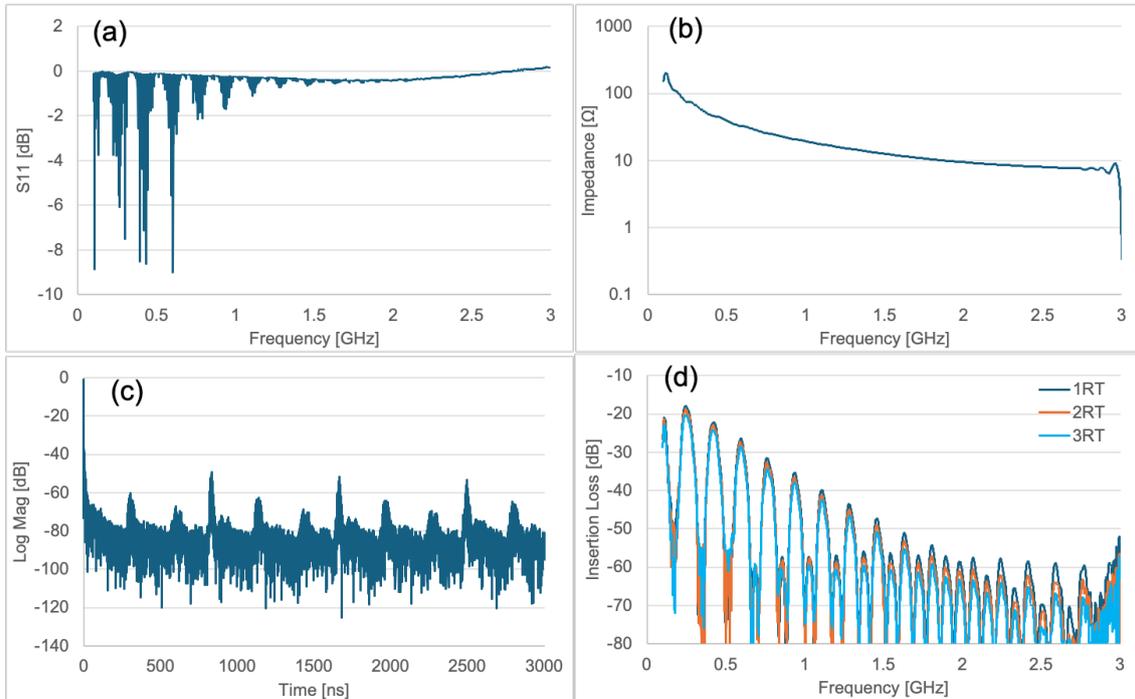


図3 LN 基板試料に対する周波数応答、時間応答測定結果. (a) S11 周波数応答. (b)インピーダンス周波数応答. (c)時間応答. (d)タイムドメイン機能を用いて抽出した基板中の1往復、2往復、3往復成分の周波数応答.

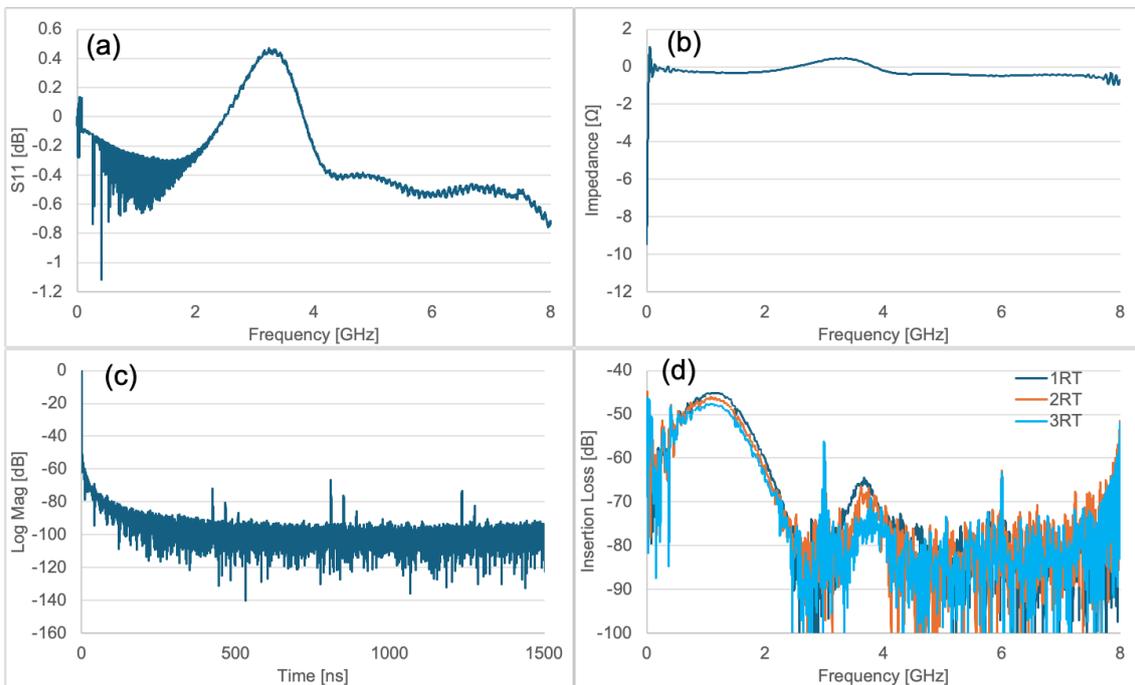


図4 Mg:LN 基板試料に対する周波数応答、時間応答測定結果. (a) S11 周波数応答. (b)インピーダンス周波数応答. (c)時間応答. (d)タイムドメイン機能を用いて抽出した基板中の1往復、2往復、3往復成分の周波数応答.

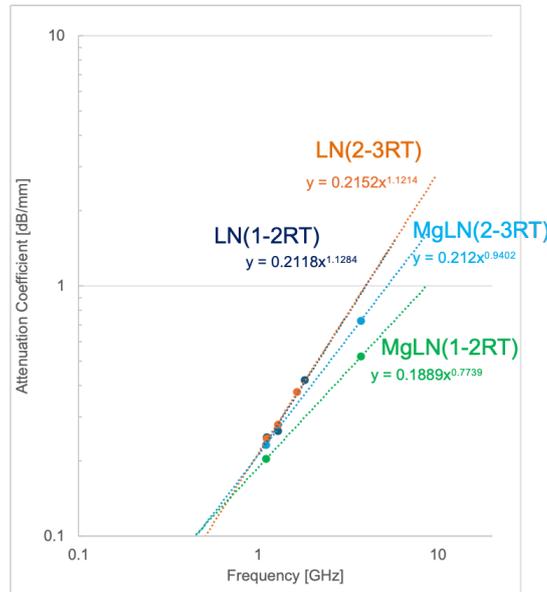


図5 LN 基板試料および Mg:LN 基板試料に対する減衰係数の測定結果.

また、結晶の欠陥評価として、光の透過率、反射率の測定から吸収係数の算出を行った。結果を図 6 に示す。図 6(c)の吸収係数の結果を見ると、320 nm 近傍の吸収係数の立ち上がりが見られ、Mg ドープの LN の方が短波長側へシフトしているのが観測された。これは、結晶内の欠陥の減少により 320 nm 近傍の波長成分の吸収が減少したことを示している。コングルエント組成の LN 単結晶が化学量論組成からずれていることで生じている酸素欠陥や Li と Nb のアンチサイト欠陥などの結晶欠陥が多く存在しているのに対し、Mg をドープすることでこれら欠陥が低減している可能性を示唆していると考えられる。

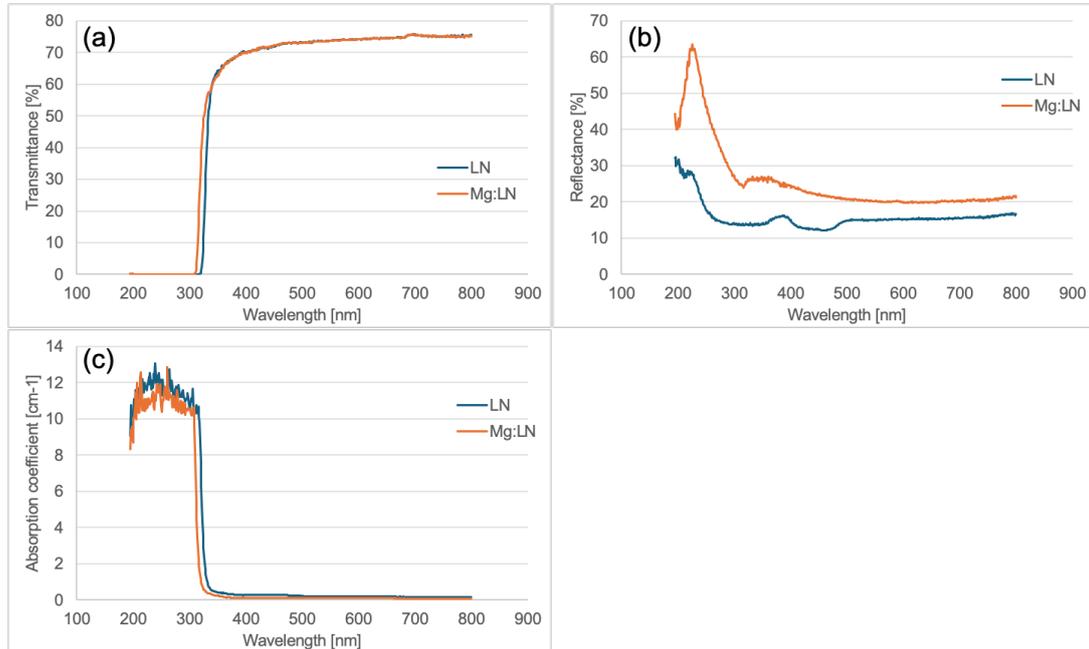


図6 LN 基板試料および Mg:LN 基板試料に対する光学特性の測定結果.

以上の結果から、接合基板のサブミクロンまでの極薄研磨が難易度が高く分極反転構造の高周波励振は実現できなかったが、単層トランスジューサ接合・研磨には成功し、数 GHz 帯の超音波励振と伝搬減衰測定のデモンストレーションを行うことができた。結晶欠陥を多く含むと考えられるコングルエント組成の LN 単結晶に比べ、Mg をドープした Mg:LN 単結晶の方が、結晶欠陥を低減する効果があり、結果として超音波の伝搬減衰を低減できる効果があることを示唆する結果を得ることができた。本研究成果が、今後の次世代通信高周波弾性波デバイスの実現への一助となれば幸いである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------