

一般セッション(口頭講演) | 1 応用物理学一般: 1.6 超音波

■ 2023年9月22日(金) 13:30 ~ 17:45 | ■ B202 (市民会館)

■ [22p-B202-1~16] 1.6 超音波

近藤 淳(静大)、鈴木 雅視(山梨大)

13:30 ~ 13:45

[22p-B202-1] [講演奨励賞受賞記念講演] カゴメ格子積層型の3次元フォノンニック結晶における高次トポロジカル弾性波伝播

○秦 佑介¹、三澤 賢明²、鶴田 健二¹ (1.岡山大院電気電子、2.福工大工)

◆ 奨励賞エントリー

13:45 ~ 14:00

[22p-B202-2] ウシ大腿骨骨梁の光音響特性

○服部 大志¹、黒岩 丈琉¹、松川 真美¹ (1.同志社大理工)

14:00 ~ 14:15

[22p-B202-3] サブMHz表面波を用いたレーザ超音波法による硬化層厚さ測定の検討

○李 英根¹、北澤 聡¹ (1.日立研開)

◆ 奨励賞エントリー

14:15 ~ 14:30

[22p-B202-4] 試料形状に制限がない超音波共鳴法の開発

○足立 寛太¹、高橋 渚叶¹、脇 裕之¹ (1.岩大理工)

14:30 ~ 14:45

[22p-B202-5] 振動板を利用した霧化メカニズムの解析と霧化に伴うマイクロプラスチックの拡散プロセスに関する研究

○松浦 寛¹、古川 祐光²、近藤 篤史³、谷川 民生²、橋本 秀紀⁴ (1.愛知工科大、2.産総研、3.日工大、4.中央大)

14:45 ~ 15:00

[22p-B202-6] 複数の音源を用いた音響放射力のパッシブ制御

○田中 宏哉¹、舟山 啓太¹、田所 幸浩¹ (1.(株)豊田中央研究所)

◆ 奨励賞エントリー

15:00 ~ 15:15

[22p-B202-7] 弾性表面波デバイスへの局在表面プラズモン共鳴センサの集積化-液体に与える音響流の影響の検討-

○喜田 敦也¹、近藤 淳¹ (1.静大工)

◆ 奨励賞エントリー

15:15 ~ 15:30

[22p-B202-8] 横波型弾性表面波センサの有限要素法での評価

○(M2)太田 雄大¹、近藤 淳¹ (1.静岡大)

15:45 ~ 16:00

[22p-B202-9] 水晶二層構造厚みすべり振動子の高次モードの温度特性評価

○大橋 雄二¹、野口 太生²、横田 有為²、村上 力輝斗²、黒澤 俊介¹、鎌田 圭¹、堀合 毅彦¹、山路 晃広¹、吉野 将生¹、吉川 彰^{2,1} (1.東北大NICHe、2.東北大金研)

16:00 ~ 16:15

[22p-B202-10] 薄板 $\text{LiNbO}_3/\text{SiC}$ 構造における板波共振特性の解析○渡邊 紀之¹、垣尾 省司¹ (1.山梨大院)

◆奨励賞エントリー

16:15 ~ 16:30

[22p-B202-11] RFスパッタリングにより成膜された $(\text{K},\text{Na})\text{NbO}_3$ 膜のBAW伝搬特性の基板温度依存性○中山 雄太¹、鈴木 雅視¹、垣尾 省司¹ (1.山梨大)

◆奨励賞エントリー

16:30 ~ 16:45

[22p-B202-12] $\text{LiNbO}_3/\text{SiC}$ 構造上の縦型漏洩弾性表面波伝搬特性の解析○武居 諒¹、鈴木 雅視¹、垣尾 省司¹、山本 泰司² (1.山梨大、2.山本エイデック)

◆奨励賞エントリー

16:45 ~ 17:00

[22p-B202-13] LiNbO_3 /水晶接合構造上の縦型リーキーSAW三次高調波の共振解析○(M2)森田 響生¹、鈴木 雅視¹、垣尾 省司¹、水野 潤² (1.山梨大、2.早稲田大)

◆奨励賞エントリー

17:00 ~ 17:15

[22p-B202-14] 中間電極挿入構造 YbAlN 薄膜/高音速基板上を伝搬するセザワモードRSAW特性解析○福永 慶¹、鈴木 雅視¹、垣尾 省司¹ (1.山梨大学)

◆奨励賞エントリー

17:15 ~ 17:30

[22p-B202-15] 周期的空隙を用いた弾性表面波伝搬特性の制御○鈴木 涉志¹、鈴木 雅視¹、垣尾 省司¹ (1.山梨大)

◆奨励賞エントリー

17:30 ~ 17:45

[22p-B202-16] ラブ波型弾性表面波における圧電基板分割による不要伝搬モードの抑圧○(M2)原 尚斗¹、鈴木 雅視¹、垣尾 省司¹、山本 泰司² (1.山梨大、2.山本エイデック)

カゴメ格子積層型の 3 次元フォノンニック結晶における 高次トポロジカル弾性波伝播

Propagation of Higher Order Topological Elastic Wave with Stacked Kagome Lattice Three-dimensional Phononic Crystals

岡山大学院電気電子¹, 福工大工² ○(D) 秦 佑介¹, 三澤 賢明², 鶴田 健二¹

Dept. of Electrical and Electronic Eng., Okayama Univ.¹,

Faculty of Eng., Fukuoka Inst. of Technol.²,

○Yusuke Hata¹, Masaaki Misawa², Kenji Tsuruta¹

E-mail: tsuruta@okayama-u.ac.jp

基板と垂直な方向に素子を積層させる 3 次元集積化技術は高速化・省電力化が期待できるため、集積回路において盛んに研究が行われている。一方、表面弾性波フィルタに代表されるような弾性波デバイスでは弾性波を基板と垂直な方向に伝播させることが難しく、3 次元集積化技術は開発されていない。近年、従来のトポロジカル絶縁体よりさらに低次元の境界にロバストな状態を有する高次トポロジカル絶縁体が注目を集めており、電子系や古典系において実証がなされている [1-3]。本研究では、高次トポロジカル絶縁体の特徴を有するカゴメ格子状のフォノンニック結晶 [4] を 3 次元方向に積層させることで、積層方向にトポロジカルヒンジモードが現れることを数値計算によって明らかにし、Fig. 1(a) に表されるような 3 次元方向への導波路設計が可能であることを示す。

本研究で提案する構造を Fig. 1(b) に示す。6 角形の各副格子をつなぐボンド幅がトポロジーを決めるパラメータであり、 $w_1 < w_2$ においてトポロジカルに非自明となる。ボンド幅を $w_1 = 0.6 \text{ mm}$, $w_2 = 1.8 \text{ mm}$ にすることで、17 kHz 付近に完全バンドギャップが発生した。次に、 4×4 のスーパーセル構造での z 方向の分散関係を解析したところ、16.5 kHz から 17.1 kHz のバルクバンドギャップ中に 3 重縮退したヒンジモードが現れることがわかった (Fig. 1(c))。さらに、 $4 \times 4 \times 10$ 構造の角の格子に圧力を加えると、ヒンジに沿った格子のみが著しく振動した (Fig. 1(d))。以上の結果より、 z 方向へ伝搬する弾性波導波路設計が可能であることが示唆される。講演では、その後の進展として 2 層構造を用いた面内の選択的な弾性波輸送についても報告する。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金（課題番号 JP21H05020）の支援のもとで実施された。

参考文献：[1] B. Xie *et al.*, *Nature Rev. Phys.* **3**, 520 (2021). [2] W. A. Benalcazar *et al.*, *Science* **357**, 61 (2017).

[3] M. Ezawa, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 026801 (2018). [4] Q. Wu *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **14**, 014084 (2020).

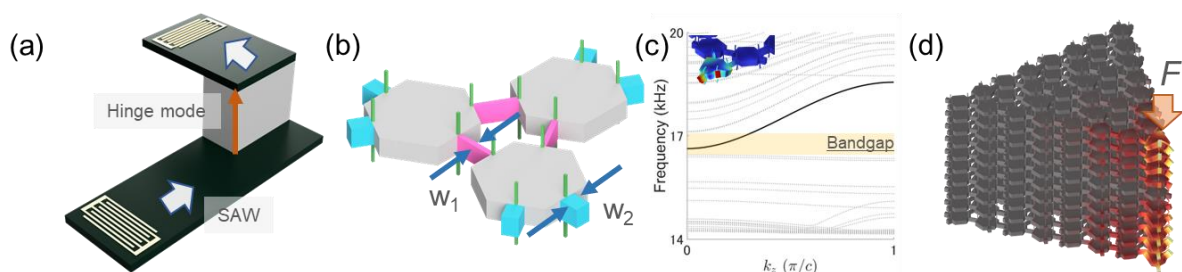


Fig. 1 (a) Schematic figure of elastic device with waveguide perpendicular to substrate. (b) Unit cell structure of stacked Kagome lattice. (c) Dispersion relation of a 4×4 supercell. Black lines (triply degenerated) represent topological hinge modes in the supercell. Inset shows displacement field of a hinge mode at $k_z = 0.2(\pi/c)$. Yellow area shows bulk bandgaps. (d) Displacement field when pressure at 16.7 kHz is applied to corner site.

ウシ大腿骨骨梁の光音響特性

Photoacoustic properties in a small trabecula of bovine femur

同志社大理工, °(M2)服部 大志, (M1)黒岩 丈琉, 松川 真美

Doshisha Univ., °Taishi Hattori, Takeru Kuroiwa, Mami Matsukawa

E-mail: ctwh0314@mail4.doshisha.ac.jp

1. はじめに

骨粗鬆症の初期症状は骨梁部の変化から現れる. このため骨梁形状の評価がX線CTで行われているが, 骨梁の物性変化は不明である. Lashkari や Yang らは光音響法を用いて皮質骨中の音速計測を報告している^[1,2]が, 海綿骨は検討されていない. そこで本研究では集束光を用いて小さな骨梁 1 本中の微小領域の光音響特性を実験的に検討した.

2. 実験方法

骨梁試料を 28 月齢のウシの右大腿骨近位部から採取した. 試料の厚みを $250\text{ }\mu\text{m} \pm 10\text{ }\mu\text{m}$ とし, 試料表面を光学顕微鏡 (KS-1100, KETENCE) で観測した. Fig.1 に光音響計測の実験系を示す. 脱気水中 (19.8°C) に設置した試料の上部に中空 PVDF トランスデューサ (直径 20mm, 東レ) を設置し, パルスレーザ (Tortm XS, Cobolt, 波長 1064 nm, パルス幅 $2.5\text{ ns} \pm 1.0\text{ ns}$, 繰り返し周波数 780 Hz, 出力 17.7mW) の光をレンズで集束して試料に照射した. 試料を $20\text{ }\mu\text{m}$ 間隔で移動させ, 各部位で生じた超音波の波形を増幅 (46 dB) し, オシロスコープ (DPO7254C, Tektronix) で観測した.

3. 結果と考察

Fig. 2 に波形の振幅のピークピーク値の分布と光学顕微鏡画像を示す. 部位により値が大きく変化した. Fig. 3 に Fig. 2 中の 5 点での波形と周波数スペクトルを示す. 振幅の増大に伴いスペクトルもわずかに高周波側にシフトした. これらは骨孔や骨マトリクスの不均一性によるものと考えられる. 今後は各部位のカルシウム量や微細構造等を詳細に計測し, 光音響特性との比較検討を行う必要がある.

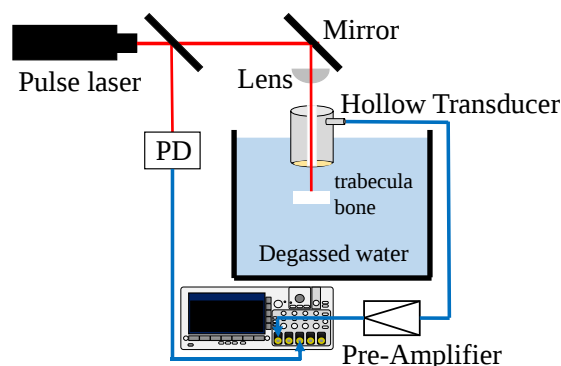


Fig. 1 Experimental system.

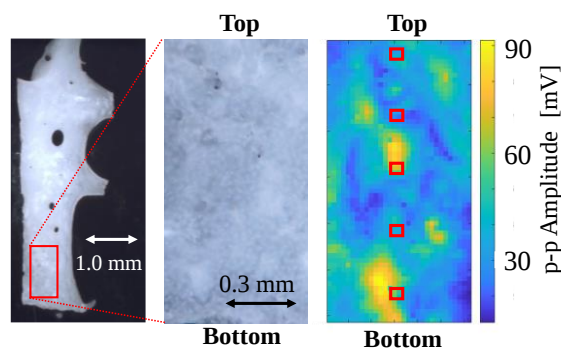


Fig. 2 Distribution of amplitudes.

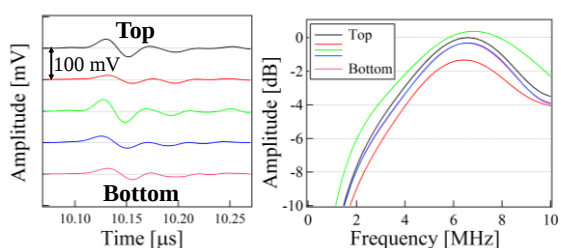


Fig. 3 Waveforms and frequency spectra.

参考文献

- [1] B. Lashkari, et al., Proc. SPIE, Vol.8207, 82076K (2012).
- [2] L. Yang, et al., J. Biomed. Opt., 20 (7), 076016 (2015)

サブ MHz 表面波を用いたレーザ超音波法による硬化層厚さ測定の検討

Measurement of hardened layer thickness by sub-MHz laser ultrasonic surface waves

Hitachi, Ltd. R&D Group, °Yong Lee and So Kitazawa

E-mail: yong.lee.ak@hitachi.com

1. はじめに

レーザ超音波技術は、非接触超音波検査技術として注目されている[1]。以前我々は、浸炭焼入れ法によって形成された硬化層厚さの非破壊検査法として、レーザ励起表面波（超音波）を用いた周波数フィルタリング法を検討し、その有効性について報告した[2]。今回は、より厚い（厚さ 3 mm 程度）硬化層の厚さ測定を目的として、サブ MHz のレーザ励起表面波を用いた硬化層厚さ測定について検討したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

超音波の表面波速度と硬化層厚さ間の相関性から、硬化層厚さを測定することができる[3,4]。高精度で硬化層厚さを測定するためには、硬化層厚さに対する表面波速度の変化率をより大きくする必要があり、硬化層厚さ程度の波長（周波数）を有する表面波を用いることが必要である。このことから、厚さ 3 mm 程度の硬化層の厚さを高精度に測定するには、サブ MHz の表面波を用いる必要がある。

しかし、一般にレーザ超音波法で用いられる励起用レーザのパルスエネルギーは 10 mJ 程度（パルス幅は 10 ns）であり、励起される表面波の中心周波数は数 MHz 程度で、サブ MHz 表面波の信号強度は弱く観測できない。そこで今回、観測可能な強度を有するサブ MHz の表面波が発生できる高出力のレーザ (>50 mJ) を用いた。検出器として、安価で小型かつ高ロバストを特長とするスペックルナイフエッジ光検出器 [5]を用いた。また、電気ローパスフィルタとして、カットオフ周波数が 0.5 MHz と 1 MHz の 2 種類のフィルタ (0.5MHz-LPF (Low pass filter) と 1 MHz-LPF) を用いた。測定に用いたサンプルは、鋼鉄に浸炭焼入れにより硬化層（厚さ：2～3 mm）を形成したものである。

3. 実験結果

Fig. 1 に各ローパスフィルタを用いた場合の表面波の時間波形（伝搬距離(L)依存性）を

示す。表面波速度は、表面波の時間波形の最大ピーク値の伝搬速度より求めた。

Fig. 2 に実験で得られた表面波速度の硬化層厚さ依存性を示す。サブ MHz の表面波速度を用いることで、比較的厚い（3 mm 程度）硬化層に対して、硬化層厚さに対する表面波速度の変化率が大きくなっていることが分かる。

4. 参考文献

- [1] C. B. Scruby and L. E. Drain, "LASER ULTRASONICS", Adam Hilger, (1990).
- [2] 李等, 2021 年秋季応用物理学会 11p-S401-1
- [3] Y. Lee et al., Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 072002 (2021).
- [4] Y. Lee et al., Appl. Opt. **61**, 3223 (2022).
- [5] S. D. Sharples et al., J. of Physics: Conference Series **520**, 012004 (2014)

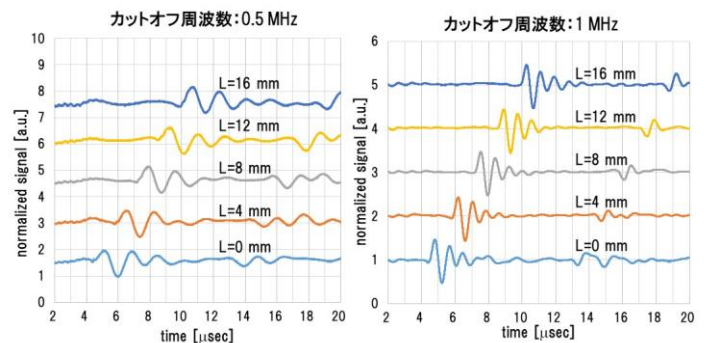


Fig. 1 Temporal waveforms of surface waves as a function of the propagation distance for 0.5MHz-LPF and 1 MHz-LPF.

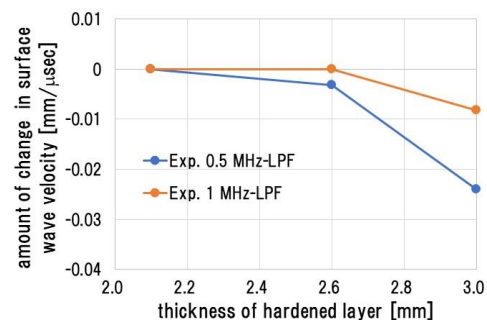


Fig. 2 Amount of change in surface wave velocities as a function of hardened layer thickness.

試料形状に制限がない超音波共鳴法の開発

Development of a FEM-based resonant ultrasound spectroscopy for irregularly shaped crystals

岩大理工 [○]足立 寛太, 高橋 渚叶, 脇 裕之

Iwate Univ. [○]Kanta Adachi, Nagito Takahashi, Hiroyuki Waki

E-mail: kadachi@iwate-u.ac.jp

弾性定数は材料の弾性変形の形態を定める量であり、構造材料の実用化において、その材料が持つ全ての弾性定数を正確に計測することは必須である。また、弾性定数は自由エネルギーのひずみに関する 2 階微分により定義されるため、ひずみ感受率に相当し、結晶中の構造変化に対して極めて敏感である。その結果、弾性定数は相転移点近傍において通常の線形的な変化とは異なる特異な変化を示す。これらの変化挙動は秩序変数とひずみを用いて定式化されており、各相転移に関連するひずみ結合の強さや機構を解明する上で最も重要な手がかりとなる^[1]。このように弾性定数は工学的にも学術的にも重要であるが、直方体や球などの規則形状を持たない材料に対してはその計測は容易ではない。例えば、近年の付加製造 (Additive Manufacturing) 技術の進歩に伴い、ラティス構造を持つ金属構造体が次世代ものづくりにおける新たな構造材料として盛んに研究されているが、その弾性特性の評価法は確立されておらず、実用化へ向けた大きな障壁となっている。また、興味深い相転移を示す物質の多くは高脆性かつ微小であり、規則形状に加工した試料を得ることは難しい。そのような場合、既存の手法では相転移点近傍における各弾性定数の変化挙動を正確に計測することは困難である。

超音波共鳴法は、共鳴周波数の計測・逆解析により一つの微小試料から全ての弾性定数を高精度に決定可能な手法であり、既存の弾性定数計測法の中でも特に優れた手法として知られる^[2]。しかし、逆解析で用いる理論が規則形状の試料を前提とすることに起因して、既存の超音波共鳴法は規則形状を持たない試料に対しては適用することができない。

そこで本研究では、有限要素法による共鳴周波数の計算を組み込んだ新たな逆解析の理論を考案し、試料形状に制限がない超音波共鳴法の開発に取り組んだ。本手法の確立は、付加製造技術により作成した金属構造体の弾性特性の系統的な評価を可能にし、トポロジー最適化による設計と付加製造技術による造形の妥当性の検証に繋がると期待される。また、規則形状への加工が困難な高品質 Cu_2OSeO_3 単結晶試料における磁気スキルミオンとひずみの相互作用機構の解明にも本手法を応用する予定である。本講演では、試料形状に制限がない超音波共鳴法の概要とその有用性について述べる。

引用文献：1. Carpenter, J. Phys.: Condens. Matter 27, 263201 (2015), 2. Migliori, Physica B 183, 1-24 (1993)

振動板を利用した霧化メカニズムの解析と 霧化に伴うマイクロプラスチックの拡散プロセスに関する研究

Analysis of atomization mechanism using a diaphragm and study on diffusion process of
microplastics associated with atomization

愛知工科大¹, 産総研², 日本工大³, 中央大⁴

○松浦 寛¹, 古川 祐光², 近藤 篤史³, 谷川 民生², 橋本 秀紀⁴

Aichi Univ. of Technol.¹, AIST², Nihon Inst. of Technol.³, Chuo Univ.⁴

○Hiroshi Matsuura¹, Hiromitsu Furukawa², Atsushi Kondo³, Tamio Tanikawa², Hideki Hashimoto⁴

E-mail: matsuura-hiro@aut.ac.jp

1. 研究の背景と目的

超音波振動子が開発されて以来、超音波霧化の研究は 60 年以上の歴史をもつが、霧化メカニズムには未解明な点も残されている。我々は、振動板を利用した新しい霧化方式を開発する事により、霧化メカニズムの解明を目指している。さらに、霧化現象を利用し、近年地球規模で懸念されている、マイクロプラスチックの拡散プロセスの 1 つの可能性について検討する。

2. 実験方法

超音波による霧化メカニズムを解明する為、図 1 に示す様に、振動板を利用した超音波霧化装置を開発した。この装置の振動板表面において、霧化が生じる直前の霧化領域の温度をマイクロ熱電対によりその場計測した。また、振動板に設置した高感度マイクにより、霧化発生時と停止時における振動板の振動音の変化をその場計測した。これら温度計測や音響解析、そして準高速度カメラ撮影の結果から、超音波霧化の発生メカニズムを検証した。

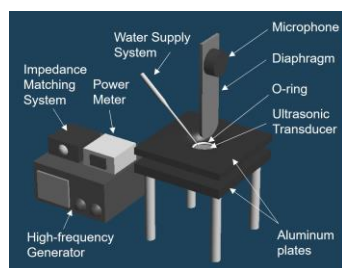


図 1. 超音波霧化発生装置

3. 実験結果および解析

図 2a および 2b に、振動板表面上で計測した、5 つの霧化領域の温度分布を示す。もし、超音波霧化がキャビテーションを主要因とし

て発生するならば、霧化の発生領域が多い場所ほど水温の上昇は大きいはずである。しかし、実際には、霧化の発生領域が多い場所の方が、水温の上昇は小さかった。

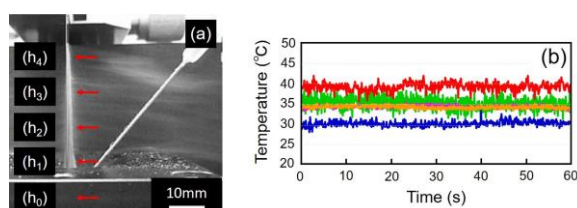


図 2. 霧化発生時の温度計測

図 3 に、振動板表面で計測した霧化音のフーリエ変換（霧化音の周波数特性）を示す。図 3 a および 3 b は、霧化が発生する前後の周波数特性であり、霧化の発生に伴い、ピーク幅の変化やピークシフトが観測され、振動板と板上の水膜との相互作用が大きく変化している事を示している。

上記の実験結果および霧化発生時の準高速度カメラ測定から、振動板を利用した超音波霧化は、キャビテーションや水温の上昇に起因するのではなく、表面波による霧化の誘起が主要因であると考えられる。

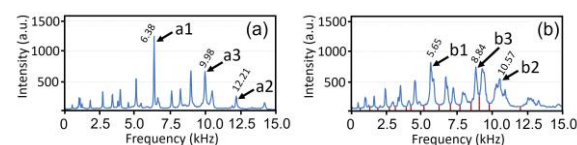


図 3. 霧化音の周波数解析

謝辞

本研究は、日本学術振興会 科研費、助成番号 JP21K04856 の支援をいただき実施しました。

複数の音源を用いた音響放射力のパッシブ制御

Passive Control of Acoustic Radiation Force Using Multiple Sound Sources

(株)豊田中央研究所 ○田中 宏哉, 舟山 啓太, 田所 幸浩

Toyota Central R&D Labs., Inc. ○Hiroya Tanaka, Keita Funayama, Yukihiro Tadokoro

E-mail: tanak@mosk.tytlabs.co.jp

【はじめに】 音響インピーダンスが異なる媒質の境界を音波が透過する際、境界面で力（音響放射力）が生じる[1]。音響放射力は、微小粒子の捕捉や分離などを非接触で実現する技術として期待されている。本報告では発振周波数が異なる複数の音波により生じる音響放射力の振る舞いを調べる。

【方法】 複数の音源からの音場により、微小物体で生じる音響放射力は時間的に変動しない成分と数 Hz の基本周波数の高調波成分の和として表現される[2]。この特性を用いると、音響放射力の時間的な応答を複数の音源で制御できる。制御の一例として、合成音場による音響放射力の周期的なオン/オフの切り替えを実験的に実証する。実験では深さ 180 μm 、幅 6.41 mm、長さ 32 mm の流路の中の粒子の運動を観察した。流路基板の両端に圧電振動子を取り付け、微粒子（直径 10.57 μm ）を 0.0025% w/v の濃度で含む水を流路に満たした。複数の音源から放射される音波を模擬するため、信号発生器を用いて電圧 $V_n \sin(\omega_n t + \eta_n)$ ($n=1,2,\dots,6$) を圧電素子に印加した。ただし、 $\omega_n = \omega_0 + (n-1)\delta\omega$ 、 $\omega_0/(2\pi) = 117 \text{ kHz}$ 、 $\delta\omega/(2\pi) = 0.25 \text{ Hz}$ 、 $V_1/V_0=1.0$ 、 $V_2/V_0 = 15.1$ 、 $V_3/V_0 = 25.3$ 、 $V_4/V_0 = 18.2$ 、 $V_5/V_0 = 1.9$ 、 $V_6/V_0 = 5.0$ 、 $\eta_1=\dots=\eta_5 = 0$ 、 $\eta_6 = \pi$ とした。信号発生器の出力電圧をパワーアンプで増幅し、アンプ出力の peak-to-peak 電圧が 40 V となるように V_0 を設定した。粒子の軌跡を、CMOS カメラを搭載した光学顕微鏡を用いて観測した。

【結果】 一粒子に注目し、 $t=0$ の位置を基準とした粒子の変位を図 1 に示す。粒子は約 4 秒間隔で急峻に移動している。この変位は、周期的に変動する音響放射力によって引き起こされることが考えられる。

【まとめ】 音響放射力のうなりによる音響放射力のオン/オフ切替を実証した。音場の振幅と位相の調整により、音響放射力の操作の自由度の更なる向上が期待される。

【参考文献】

- [1] 野村英之他, 非線形音響 - 基礎と応用 -, 鎌倉友男 (編), コロナ社, 東京, 2014.
- [2] H. Tanaka et al., *Sci. Rep.* 12, 15029 (2022).

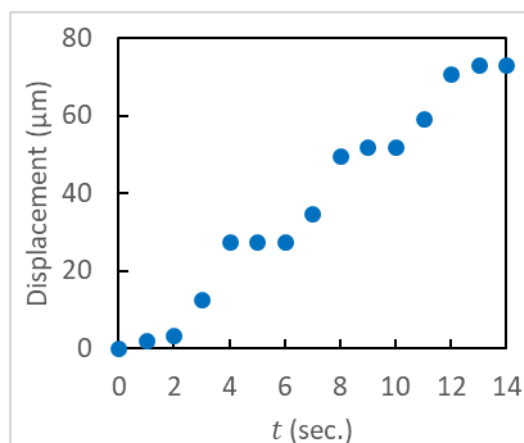


Fig. 1 Displacement of the particle.

弾性表面波デバイスへの局在表面プラズモン共鳴センサの集積化
Integration of localized surface plasmon resonance sensor on surface acoustic wave device

静岡大学大学院総合科学技術研究科 (M2) 喜田敦也 近藤淳

Shizuoka Univ., A. Kida and J. Kondoh

E-mail: Kondoh.jun@shizuoka.ac.jp

1. 序論

医療・バイオ分野における液体検査では、液体の搬送・計測が1枚の基板上でできるシステムが求められている。そこで、液滴の搬送・攪拌が可能である弾性表面波(SAW)デバイスと液滴の検査を可能にする局在表面プラズモン共鳴(LSPR)センサを1枚の基板上に集積化させた新たなデバイスの実現を目指している。本研究では基板の集積化による影響を解析する第一歩として、SAW 励振によって生じた音響流が LSPR にどのような影響を与えるかを実験的に検討した。

2. 実験系

本研究で用いた実験系を図1に示す。結晶上に SAW 励振のためのくし型電極 (IDT) を作製し、その後、金薄膜の蒸着と短時間アニーリングと急冷により金ナノ粒子(AuNPs)を形成した²⁾。白色光源からの光を AuNPs に照射し、その反射光を分光器で検出することにより LSPR 特性を得た。また、交流電圧を IDT に印加して SAW を励振させた。

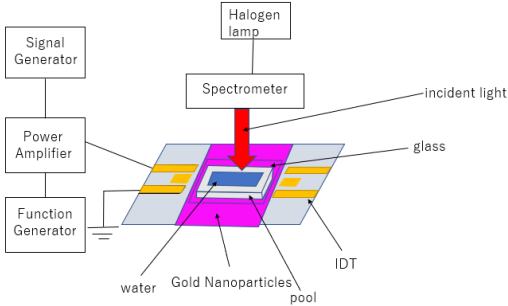


Fig. 1 Experimental system in this study.

3. 結果と検討

実験には液滴に含まれる気泡の影響を考察するために蒸留水と超純水がそれぞれ用いられた。それぞれの励振時間と LSPR の関係を図2, 3に示す。図2の結果より、蒸留水を用いた場合にピーク波長の増減が大きいことが確認できる。一方、図3の結果より、超純水を用いた場合にはピーク波長の増減が小さいことが確認できる。これは液滴中の気泡の影響を取り除いたことが原因である。周辺媒質の誘電率と

LSPR の関係を図4に示す。水、空気の誘電率はそれぞれ1.77と1となる。よってこれらの結果より、超純水を用いることで、音響流によって生成された気泡の影響によるピーク波長の変化を小さくできることが分かった。

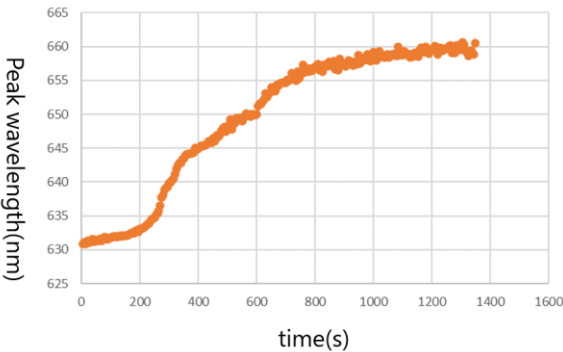


Fig. 2 Change in LSPR peak wavelength with increasing temperature of distilled water.

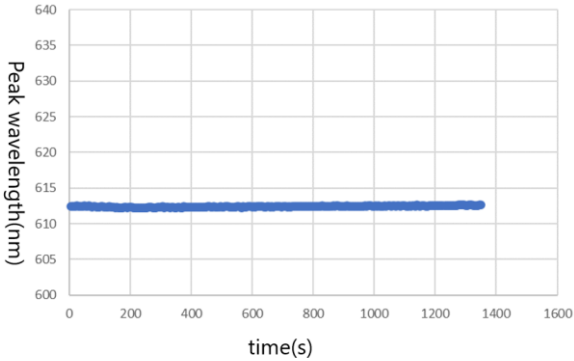


Fig. 3 Change in LSPR peak wavelength with increasing temperature of ultrapure water.

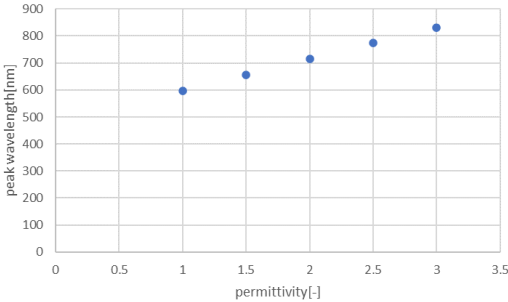


Fig. 4 Relation between the dielectric constant of the surrounding medium and the LSPR peak wavelength

横波型弾性表面波センサの有限要素法での評価

Evaluation of Shear Horizontal Surface Acoustic Wave Sensor by Finite Element Method

静岡大¹ ○(M2)太田 雄大¹, 近藤 淳¹

Shizuoka Univ.¹, °Yudai Ota¹, Jun Kondoh¹

E-mail: kondoh.jun@shizuoka.ac.jp

1. 序論

圧電結晶表面にエネルギーを集中して伝搬する横波型弾性表面波(SH-SAW)は伝搬面と接する媒質の物理化学的変化により摂動を受ける。これにより生じる伝搬特性の変化を利用することで媒質の粘度、密度、誘電率、導電率を測定するセンサが実現できる。従来、数値解析法や摂動法による SH-SAW センサの評価が行われてきた。[1] これらの手法はセンサ構造に対する評価が難しい。有限要素法(FEM)モデルでの評価が可能になれば、センサ構造の最適化が容易になる。本稿では FEM モデルでの SH-SAW センサの評価の妥当性を、数値解析法と比較した結果について述べる。

2. SH-SAW センサと評価

SH-SAW センサは圧電結晶上に交流信号を印加するための楕型電極(IDT)を2つ作製することで構成されている。IDT の間にあるスペースが伝搬面であり、媒質の密度や粘度を測定する際には金属膜を装荷する。この膜厚を変化させると機械的摂動の一つである質量負荷効果により共振周波数における位相が変化するので、SH-SAW の伝搬速度の変化が得られる。

FEM ソフトを使用して SH-SAW センサのモデルを作成した。36YX-LiTaO₃ 上に金で IDT 電極を作製した。電極の間隔は共振周波数が 155[MHz]になるように設計した。はじめに基準として伝搬面に金を 200 [nm] 装荷した。このモデルで調和解析を行うことで S パラメータを取得し、振幅と位相が得た。金の膜厚を 210, 230, 250, 300, 400 (nm)と変化させて FEM 解析を行い、基準との位相差を求めた。この値から速度変化を計算した。

SH-SAW の数値解析は Campbell らの手法[2]を拡張した Yamanouchi らの手法[3]により行うことができる。これは圧電方程式と粒子の運動方程式、マクスウェル方程式を連立して数値的に解く手法

である。数値解析法により各膜厚での SH-SAW の伝搬速度を求めた。FEM と数値解析法により得られた速度変化を金膜厚の関数として表した結果を図 1 に示す。2 つの手法により得られた速度変化は一致することが確認できた。

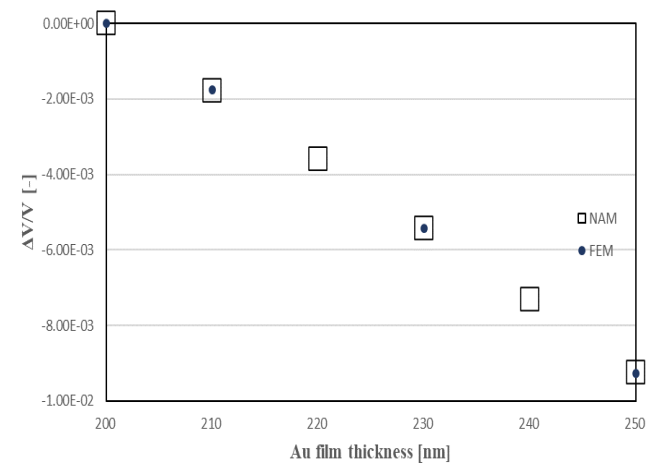


Fig.1 Velocity change as a function of gold thickness.

3. 結論

本研究で得られた結果から、FEM による SH-SAW センサの評価が可能であることを明らかにした。今後、圧電結晶の種類、接合構造の検討など、センサ構造の最適化を行う。また、電氣的摂動についても FEM での評価が可能か検証する。

参考文献

[1] 近藤淳, 工藤すばる: 弾性表面波・圧電振動型センサ, コロナ社 (2019)
[2] J. J. Campbell and W. R. Jones, IEEE Trans Sonics and Ultrason., Vol. SU-15, p. 209 (1968)
[3] K. Yamanouchi and K. Shibayama, J. Appl. Phys, Vol 43, p. 856(1972)

水晶二層構造厚みすべり振動子の高次モードの温度特性評価 Evaluation of temperature dependence of higher-order mode for quartz double-layered thickness-shear resonator

東北大 NICHe¹, 東北大金研²

○大橋雄二¹, 野口太生², 横田有為², 村上力輝斗², 黒澤俊介¹,
鎌田圭¹, 堀合毅彦¹, 山路晃広¹, 吉野将生¹, 吉川彰^{1,2}

NICHe Tohoku Univ.¹, IMR Tohoku Univ.²

○Yuji Ohashi¹, Taisei Noguchi², Yuui Yokota², Rikito Murakami², Shunsuke Kurosawa¹,
Kei Kamada¹, Takahiko Horiai¹, Akihiro Yamaji¹, Masao Yoshino¹, Akira Yoshikawa^{1,2}

E-mail: yuji.ohashi.b8@tohoku.ac.jp

【緒言】原子層堆積法(ALD法)は、3次元構造のようなより複雑な構造での高集積化が進む半導体製造において重要な成膜技術の一つとしての役割を担っている。ALD法においては原子レベルでの高品質膜を得るために高温化も含めた最適温度の探索の要求がある。この要求に対応するため、筆者らは圧電基板を直接接合した二層構造により温度依存性の無い成膜モニタ用の厚みすべり振動子の実現を目指して検討を進めてきた。前回の報告で、水晶二層構造振動子の基本モードの温度依存性が、各基板単体の温度依存性を接合境界での反射係数を考慮した各基板内の総歪量の比で重み付けした計算モデルで求められることを理論的、実験的に明らかにした[1]。本報告では、同計算モデルを拡張して高次モードに対する温度特性について理論的、実験的に検討する。

【実験方法】

試料として、#1層に厚さ 0.1215 mm の 129.55°Y-cut、#2層に厚さ 0.1120 mm の 0°Y-cut の水晶基板を厚さ比 0.520 で、X方向(偏波方向)を揃えて貼り合わせた二層構造厚みすべり振動子を取り上げる。本試料の 1stモード、2ndモード、3rdモードについて共振周波数の温度特性を 100～300℃の範囲で測定した。各基板単体での共振周波数変動を $df_{\#1}$ 、 $df_{\#2}$ 、接合境界での反射係数を考慮した各基板内の総歪量の比を Rs として、下記の式で求めた計算値と比較した。

$$df_{DL} = df_{\#1} \cdot Rs + df_{\#2} \cdot (1 - Rs), \quad (1)$$

【結果と考察】

Fig. 1 に結果を示す。1stモードの測定値の結果[1]は右下がりの温度特性であったが、2ndモードでは反転して右上がりの特性となった。それに対し、3rdモードは 1stモードと近い右下がりであるが、わずかに 2ndモードの勾配に近づく方向にずれた。(1)式による計算結果も実験値と同様の傾向が得られた。このことから、(1)式で表現された計算モデルは、基本モードだけでなく高次モードの温度特性の予測にも適用できる計算モデルであることが明らかとなった。

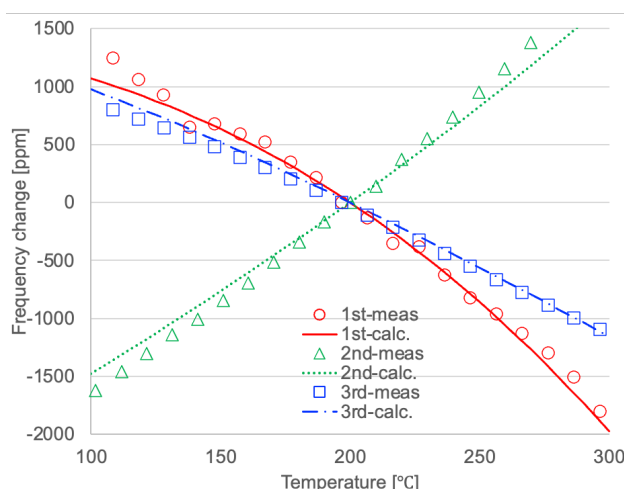


Fig. 1 Temperature dependence of each mode resonance frequency for the quartz double-layered thickness shear resonator.

[1]大橋雄二、野口太生、吉川彰、他、”接合境界での反射波を考慮した水晶二層構造厚みすべり振動子の設計方法”，第 70 回 応用物理学会春季学術講演会, 17p-D505-7 (2023 年 3 月)。

薄板 LiNbO₃/SiC 構造における板波共振特性の解析

Analysis of Plate Acoustic Waves Resonance Properties on Thin LiNbO₃/SiC Plate

山梨大 ○(D)渡邊 紀之, 垣尾 省司

Univ. of Yamanashi, °Noriyuki Watanabe and Shoji Kakio

E-mail: g20dtsa2@yamanashi.ac.jp

1. はじめに 次世代通信システムには、高周波、広帯域、高 Q 等の高い性能を有し、さらにハイパワーに対応できる弾性波デバイス RF フィルタが要求されている。近年、弾性波デバイスでは、圧電基板表面にエネルギーを集中させるため基板の薄板化が注目されている。また、その薄板化技術の進歩により、様々な板波モードの応用が研究報告されている。本報告では、LiNbO₃ (LN) とハイパワー半導体で注目されている SiC とを直接接合した薄板構造における板波共振特性向上の可能性について検討した。

2. FEM 解析 複合基板の薄板化技術の発展に伴い、圧電材料、例えば LN などを薄板化した構造(a)で板波モード共振子について研究されてきた[1]。本報告では、新構造として圧電基板 LN の裏面側に 3C-SiC を接合した構造(b)を提案し、板波として SH₀ mode や S₀ mode の共振特性について有限要素法(FEM)により解析した。圧電基板表面に Al すだれ状 IDT 電極対を無限周期とし、全て波長 $\lambda=4.444 \mu\text{m}$ とした。各材料の機械損、誘電損は考慮していない。

構造(a), (b)について、27.5°YX-LN 薄板における SH₀ mode 共振特性を Fig. 1 に示す。横軸は周波数に λ を乗じた位相速度である。Fig. 1 における各層厚は、(a) Al:0.04 λ /LN:0.05 λ , (b) Al:0.03 λ /LN:0.18 λ /SiC:0.05 λ とした。Fig. 2 に構造(b)における LN 規格化板厚に対する実効的電気機械結合係数 K_{eff}^2 と位相速度 V を示す。新構造(b)では、LN 単薄板(a)より高速・高周波になるが、 K_{eff}^2 は(a)44%より約3割減少し $K_{eff}^2 = 29.1\%$ を得た。

同様の構造で X36°Y-LN 薄板における S₀ mode 共振特性を Fig. 3 に示す。Fig. 3 における各層厚は、(a) Al:0.04 λ /LN:0.05 λ , (b) Al:0.02 λ /LN:0.18 λ /SiC:0.05 λ とした。Fig. 4 に構造(b)における LN 規格化板厚に対する K_{eff}^2 と V を示す。S₀ mode でも同様に、新構造(b)では、LN 単薄板(a)より高速・高周波になるが、 K_{eff}^2 は(a)30%より約3割減少し $K_{eff}^2 = 21\%$ を得た。

参考文献

[1] M. Kadota *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 07HD04 (2013).

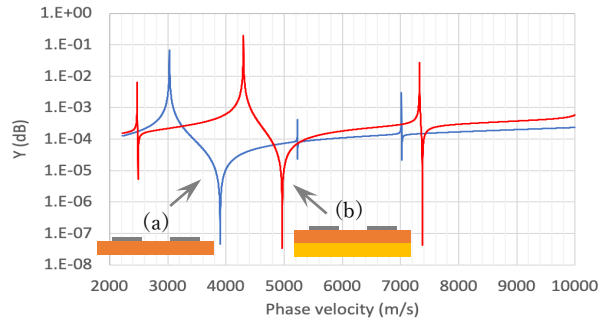


Fig. 1 Simulated resonance properties of SH₀ mode on (a) Al/27.5°YX-LN in blue, and (b) Al/27.5°YX-LN/SiC in red.

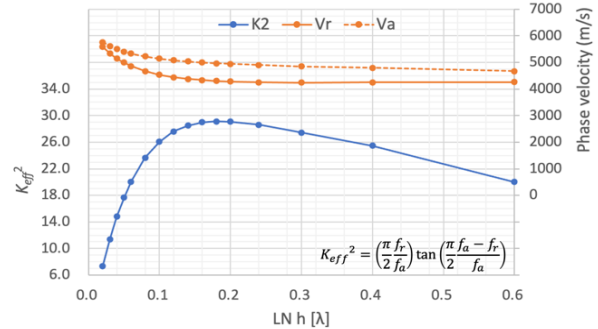


Fig. 2 Simulated K_{eff}^2 and V of SH₀ mode with respect to the LN thickness on the structure (b) Al/27.5°YX-LN/SiC.

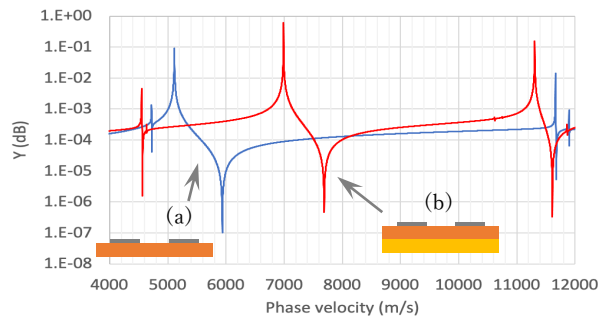


Fig. 3 Simulated resonance properties of S₀ mode on the structure of (a) Al/X36°Y-LN in blue, and (b) Al/X36°Y-LN/SiC in red.

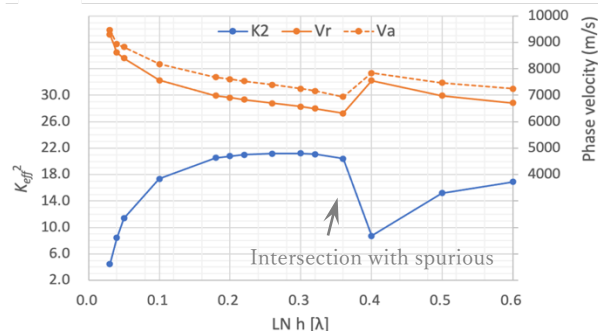


Fig. 4 Simulated K_{eff}^2 and V of S₀ mode with respect to the LN thickness on (b) Al/X36°Y-LN/SiC.

RF スパッタリングにより成膜された (K, Na)NbO₃ 膜の BAW 伝搬特性の 基板温度依存性

Substrate Temperature Dependence of BAW Propagation Properties on (K, Na)NbO₃ Films Deposited by RF Sputtering

山梨大 ○(M1) 中山 雄太, 鈴木 雅視, 垣尾 省司

Univ. of Yamanashi ○Yuta Nakayama, Masashi Suzuki, and Shoji Kakio

E-mail: g23te020@yamanashi.ac.jp

1. はじめに 圧電薄膜共振子には, 高い電気機械結合係数(k_t^2), 高い位相速度, 低い伝搬損失, 安定した温度特性を持つ圧電材料が要求されている. 当研究グループは, 高周波(RF)スパッタリングにより Ti 密着層上に成膜された (K,Na)NbO₃ (KNN)膜^[1]のバルク弾性波(BAW)特性を評価し, 7.3%の k_t^2 を得た^[2]. 本報では, RF スパッタリングにより ZnO 密着層上に成膜した KNN 膜の BAW 伝搬特性の成膜温度依存性を評価した結果について述べる.

2. BAW 伝搬特性の評価 SiO₂/(100)Si 基板上に密着層として ZnO (膜厚: 25 nm) を, 下部電極として Pt(111) (膜厚: 200 nm) をそれぞれ成膜した. KNN 膜の組成比 Na/(K+Na)が 0.65 となるよう調製されたセラミックターゲットを用いた RF スパッタリングにより, 400~740°Cの基板温度で Pt 上に(001)配向 KNN 膜 (膜厚: $t=2.0\ \mu\text{m}$)を成膜した. 上部電極として Au 膜を真空蒸着し, 基板付き薄膜共振子(HBAR)を作製, ネットワークアナライザにより変換損失を測定し, Mason の等価回路より求めた理論値とのフィッティングから, k_t^2 , バルク波速度 V_L を求めた. 各試料につき 4 点ずつ測定した.

Fig. 1 に変換損失の測定値と理論値の例を示す. 成膜温度 500°Cの試料では 1.1 GHz の一次モードの応答が 2.4 GHz の二次モードよりも大きい(変換損失が小さい)のに対して, 740°Cの試料では二次モードの応答が一次モードよりも大きい. これらの試料の X 線回折曲線を Fig. 2 に示す. 740°Cの試料において KNN(110)ピーク強度が 500°Cの試料よりも大きいことがわかる. 成膜温度の上昇に伴い KNN 膜が多結晶化し, 異なる分極軸を持つことが HBAR の変換損失に影響していると考えられる.

Fig. 3 に KNN 膜の成膜温度に対する k_t^2 を示す. 成膜温度 460°Cにおいて 6.0%の最大値を示した. また, 440°C以下において k_t^2 が低減する傾向が確認された. 成膜温度 580°C以上の試料の k_t^2 は, 上述のように一次モードより二次モードの応答が大きい特性に対してフィッティングされた値であり, KNN 膜の多結晶化を抑制することで高い k_t^2 を示す可能性がある.

今後は, さらに高い k_t^2 を得るために KNN 膜の作製条件を検討する. また, KNN 膜を用いて支持基板を持たない圧電薄膜共振子を作製し, 共振特性を評価する.

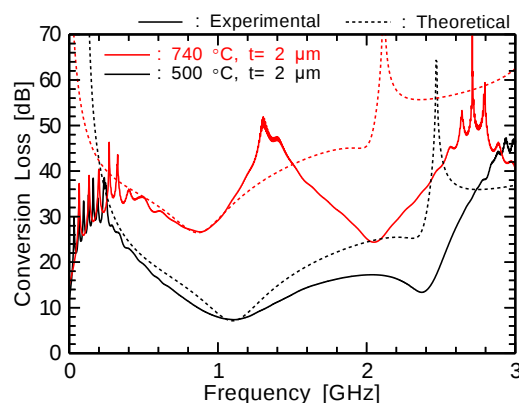


Fig. 1 Examples of conversion loss of HBAR.

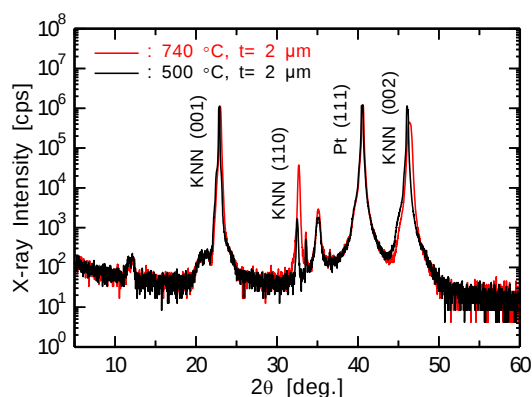


Fig. 2 $2\theta/\theta$ XRD patterns of KNN films.

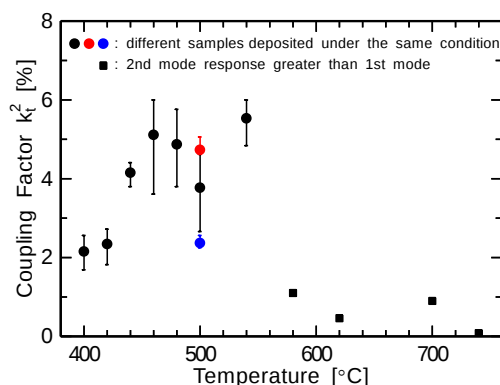


Fig. 3 Temperature dependence of k_t^2 .

参考文献

- [1] K. Shibata *et al.*, JJAP **50** (2011) 041503.
- [2] K. Yoshizawa *et al.*, JJAP **61** (2022) SG1077.

LiNbO₃/SiC 構造上の縦型漏洩弾性表面波伝搬特性の解析

Analysis of propagation properties of longitudinal leaky SAW on LiNbO₃/SiC structure

山梨大¹, 山本エイデック² ○(M1)武居 諒¹, 鈴木 雅視¹, 垣尾 省司¹, 山本 泰司²

University of Yamanashi¹, Yamamoto-ADEC LLC.²

○Ryo Takei¹, Masashi Suzuki¹, Shoji Kakio¹, and Yasushi Yamamoto²

E-mail: g23te016@yamanashi.ac.jp

1. はじめに 高音速な縦型漏洩弾性表面波 (LLSAW) は SAW デバイスの高周波化に有利であるが, LiTaO₃(LT) や LiNbO₃(LN) の単体基板では伝搬減衰が大きく, SAW デバイスへの利用は困難である. 炭化ケイ素(SiC)は高音速, 高熱伝導率であるため, LLSAW の支持基板^[1]として利用できれば高周波, 高耐電力の SAW デバイスが期待できる. 前報では, SiC を支持基板とし LN 薄板と接合させた X36°Y-LN/4H-SiC 上の LLSAW 共振特性を解析し, 波長 λ で規格化した LN 板厚 h/λ が 0.30 のとき, 9% の比帯域幅と高い Q 値を得た^[2]. その位相速度は 6,200~6,900 m/s であり, SiC の高い音速が活かされていない. 本報では, h/λ が 0.20 以下の X36°Y-LN/4H-SiC 上の LLSAW 伝搬特性, 共振特性を解析した結果を報告する.

2. 伝搬特性 Fig. 1 に h/λ に対する LLSAW の位相速度と伝搬減衰の解析解を示す. 短絡表面では $h/\lambda=0.045, 0.161$ において小さな伝搬減衰を示し, それぞれの位相速度は 11,350 m/s, 7,800 m/s であった. また, LLSAW の位相速度が 4H-SiC 単体のバルク横波速度(7,126 m/s)より遅い h/λ において, 伝搬減衰が消失する非漏洩領域となることがわかった.

3. 共振特性 X36°Y-LN/4H-SiC において, 波長 $\lambda=10 \mu\text{m}$ の Al 製すだれ状電極(IDT)を無限周期とした場合の共振特性を有限要素法(FEM)により解析した. 各材料の材料 Q , 誘電損は考慮していない. Fig. 2 に $h/\lambda=0.161\sim 0.20$ における, 規格化 Al 膜厚 h_{Al}/λ に対する LLSAW の共振 Q 値(Q_r)を示す. $h/\lambda=0.161$ では, $h_{\text{Al}}/\lambda=0.001$ で最大値を示し, 上述の Al 膜厚を考慮していない伝搬解析と同様の結果を示した. h/λ の増加に伴い, 最大値を示す h_{Al}/λ が増加した. $h/\lambda=0.045$ においては, h_{Al}/λ の増加に伴い, Q_r , 反共振 Q 値(Q_a)は減少し, 例えば $h_{\text{Al}}/\lambda=0.03$ のとき, Q_r と Q_a はいずれも約 110 以下の値を示した.

$h/\lambda=0.19$ における, h_{Al}/λ をパラメータとしたときの共振特性を Fig. 3 に示す. 横軸は, 周波数に λ を乗じた位相速度である. $h_{\text{Al}}/\lambda=0.03$ において, 7,200~7,800 m/s の範囲で LLSAW の応答を示し, 7.6 % の比帯域幅, 112 dB のアドミタンス比, 30,000 以上の高い Q_r を示した.

参考文献

- [1] P. Zheng, *et al.*, Proc. IEEE MEMS, p. 1030 (2022).
- [2] 武居, 他, 応物春, 17p-C505-3 (2023).

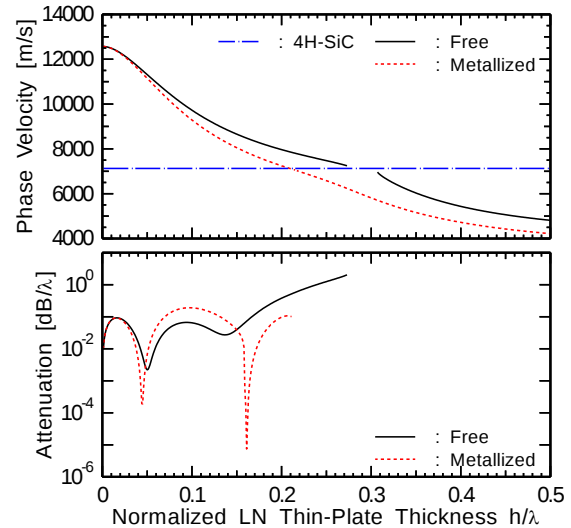


Fig. 1 Calculated phase velocity and attenuation of LLSAW on X36°Y-LN/4H-SiC.

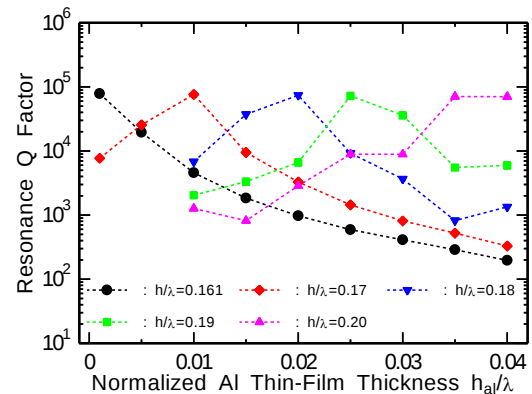


Fig. 2 Simulated resonance Q factor of LLSAW on X36°Y-LN/4H-SiC.

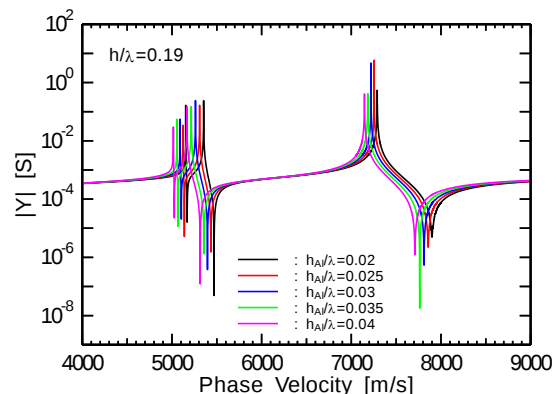


Fig. 3 Simulated resonance properties on X36°Y-LN/4H-SiC.

LiNbO₃/水晶接合構造上の縦型リーキーSAW 三次高調波の共振解析

Resonance Analysis of Longitudinal Leaky SAW Third Harmonic on Bonded LiNbO₃/Quartz Structure

山梨大¹, 早稲田大² ○(M2) 森田 響生¹, 鈴木 雅視¹, 垣尾 省司¹, 水野 潤²

Univ. Yamanashi¹, Waseda Univ.² ○Hibiki Morita¹, Masashi Suzuki¹, Shoji Kakio¹, and Jun Mizuno²

E-mail: g22te026@yamanashi.ac.jp

1. はじめに 弾性表面波(SAW)デバイスの高周波化のアプローチとして SAW 高調波の利用がある. 高調波の励振強度は, すだれ状電極(IDT)の電極幅 a とピッチ p の比(メタライゼーション比= a/p)に依存する^[1]. 当研究グループでは, LiTaO₃(LT)/水晶(Qz)接合構造によるリーキーSAW(LSAW)三次高調波の強勢励振を実験的に明らかにした^[2]. 本報では, LiNbO₃(LN)/Qz 構造上, LSAW より位相速度が速く, 高周波動作が期待できる縦型 LSAW(LLSAW)の三次高調波の共振特性と周波数温度係数(TCF)を有限要素法(FEM)により解析した結果を報告する.

2. 共振特性 LLSAW を強勢励振させるために薄板に X36°Y-LN を, 基板に X35°Y-Qz を採用した^[3]. FEM のモデルでは, IDT のギャップを一般に SAW デバイス製造で限界とされる 0.3 μm に設定し, 波長 λ を高調波励振に必要な $a/p=0.8$ から求められる 3 μm とした. また, 基本波には $a/p=0.5$, 三次高調波には $a/p=0.8$ の無限周期構造とした. 急峻な応答を得ることを目的として, 基本波には $h_{\text{Al}}/\lambda=0.03$, $h_{\text{LN}}/\lambda=0.08$ を, 三次高調波には基本波の約 1/3 である $h_{\text{Al}}/\lambda=0.01$, $h_{\text{LN}}/\lambda=0.027$ を設定した. LN の材料 $Q(Q_m)$ を 1,000 に設定した.

Fig. 1 に X36°Y-LN/X35°Y-Qz 上の基本波, 三次高調波の最適条件におけるアドミタンス特性を示す. 2~2.5 GHz 付近の応答が基本波, 6~7 GHz 付近の応答が三次高調波であり, 10~11 GHz 付近に五次高調波の応答も現れた. $a/p=0.5$ における基本波のアドミタンス比, 比帯域幅, 共振 Q , 反共振 Q の解析値はそれぞれ 74.1 dB, 6.1%, 470, 760 であった. Fig. 2 に X36°Y-LN 単体と LN/Qz 構造の三次高調波アドミタンス特性の拡大図を示す. LN/Qz 構造のアドミタンス比, 比帯域幅, 共振 Q , 反共振 Q の解析値はそれぞれ 70.4 dB, 2.0%, 1,620, 2,200 であり, LN 単体の 2.4 dB, 9.3%, 10, 10 よりも大きく急峻な値を示した.

3. 温度特性 X36°Y-LN/X35°Y-Qz 上の基本波における TCF の h_{LN}/λ 依存性の解析を行った. 27°C を基準温度として Al, LN, Qz それぞれに 30°C から 80°C まで仮想的に温度を上昇させたときの膨張を考慮した. TCF 解析値は, 温度変化に対する基本波の共振, 反共振周波数 f_r , f_a の変化率より求めた. Fig. 3 にその解析値を示す. 基本波の最適条件($h_{\text{Al}}/\lambda=0.03$, $h_{\text{LN}}/\lambda=0.08$, $a/p=0.5$)における TCF は, f_r で -55.7 ppm/°C, f_a で -53.7 ppm/°C であり, 一般的な SAW デバイスの TCF である -30~-40 ppm/°C よりも大きな絶対値を示した.

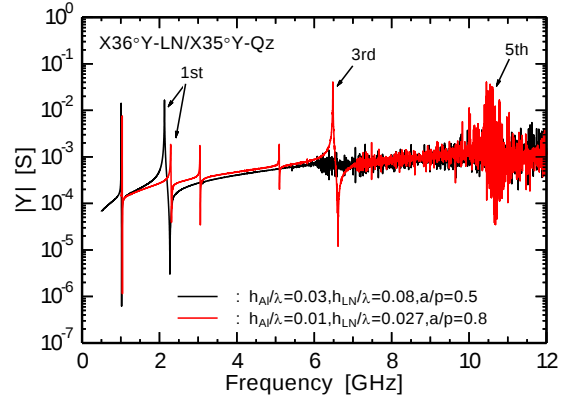


Fig. 1 Simulated admittance properties of LLSAW on X36°Y-LN/ X35°Y-Qz.

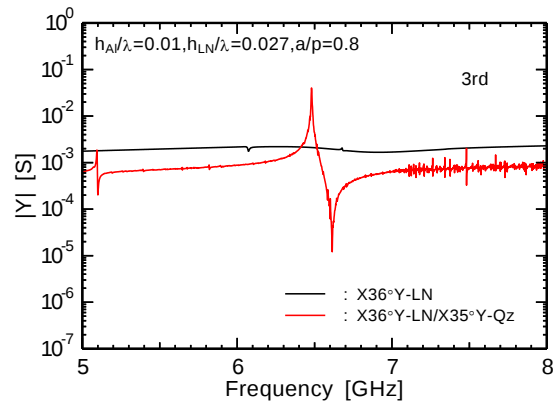


Fig. 2 Simulated admittance properties of LLSAW 3rd harmonics on single LN and LN/Qz.

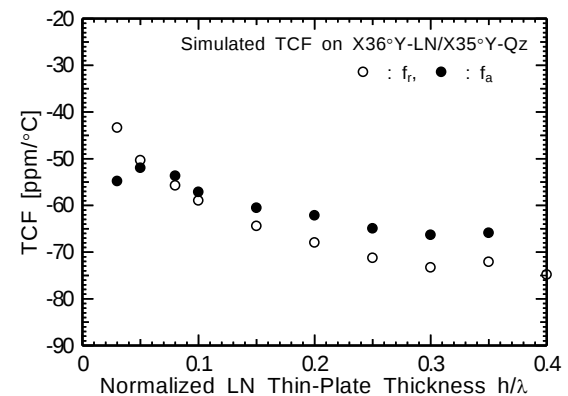


Fig. 3 Simulated TCF of fundamental LLSAW.

謝辞 本研究の一部は科研費基盤研究(B) 20H02181 の補助を受けた.

参考文献

- [1] H. Engan, IEEE Trans. **ED-16** (1969) 1014.
- [2] S. Asakawa, *et al.*, JJAP **60** (2021) SDDC07.
- [3] J. Hayashi, *et al.*, JJAP **58** (2019) SGGC12.

中間電極挿入構造 YbAlN 薄膜/高音速基板上を
伝搬するセザワモード RSAW 特性解析

Analysis of Sezawa mode RSAW on intermediate electrode insertion structure
with YbAlN thin films/high velocity substrates

山梨大 ○(M1)福永慶, 鈴木雅視, 垣尾省司

Univ.of Yamanashi, ○Kei Hukunaga, Masashi Suzuki, and Shoji Kakio

E-mail: g23te021@yamanashi.ac.jp, masashis@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

AlN 薄膜/高音速基板を用いた SAW デバイスは高
位相速度を持つため高周波動作が実現できるが、電
気機械結合係数 K^2 が小さいという問題がある。一方
で、圧電性が上昇する金属 (Sc, Yb 等) ドープ AlN
膜[1]を用いた SAW デバイスでは K^2 が大きくなるこ
とが分かっている。近年、我々は分極反転構造膜を
用いることなく、 $\text{Sc}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{N}$ 薄膜/高音速基板の薄膜
内部に中間電極を挿入した構造上を伝搬するセザワ
モード RSAW において単層薄膜/高音速基板構造と
比較して約 1.4-1.7 倍の K^2 が得られることを報告し
た[2]。本研究では、Farnell と Adler の SAW 伝搬特
性解析および FEM を用いて中間電極挿入構造
 $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ 薄膜/高音速基板上のセザワモード RSAW
伝搬特性を解析した。

2. 解析方法

Fig. 1 (a)に中間電極挿入 $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ 薄膜/高音速基
板構造の解析モデルを示す。 $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ 単層薄膜/高
音速基板構造において K^2 が最大となった膜厚で全
体膜厚 h_1/λ を固定し、 h_1/λ 内の下部膜厚 h_2/λ を増加
させた際の位相速度と K^2 を解析 (Fig. 2) した。基
板には $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ 薄膜よりも RSAW 伝搬速度が速い
Diamond, 6H-SiC, AlN, Al_2O_3 , Si を用いた。また、
FEM でも Fig. 1 (b)の無限周期構造モデルを用いてア
ドミタンス周波数特性解析 (Fig. 3) を行った。

3. 結果

Fig. 2 に示すようにすべての高音速基板との組み
合わせにおいて、 h_2/λ 増加に伴い K^2 が増加、Table I
に示す最適 h_2/λ で K^2 が最大となり、単層薄膜構造
の約 1.4-1.7 倍となった。最も高結合化したのは 6H-
SiC 基板との組み合わせ ($K^2=9.58\%$) であり、中間
電極挿入 $\text{Sc}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{N}$ 薄膜/Diamond 基板構造
($K^2=8.21\%$) よりも大きな K^2 となった。また最適
 h_2/λ 以上では K^2 はゼロに収束した。Fig. 3 に示す中
間電極挿入 $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ 薄膜/6H-SiC 基板構造での周
波数特性では、 $f^*\lambda=5,700\text{-}6,000\text{ m/s}$ 付近にセザワモ
ード RSAW の大きな共振ピークが現れた。この共振ピ
ークから求めた $V(=5,960\text{ m/s})$, $K_{\text{eff}}^2(=9.27\%)$ は Fig.
2 に示す理論解析結果とおおよそ一致している。単層
 $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ 薄膜/6H-SiC 基板構造と比較するとほぼ
同じ周波数帯で共振し、より大きな帯域幅が得られ
た。以上より、 $\text{Sc}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{N}$ 薄膜/高音速基板構造と同
様に $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ 薄膜に中間電極を最適な位置に挿入
することで位相速度を維持したまま K^2 を増幅でき
ることが分かった。

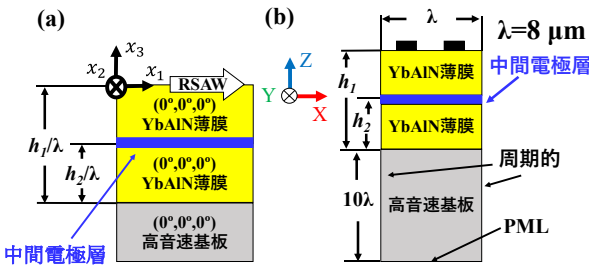


Fig. 1. (a) Analysis model and (b) FEM model of $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ thin film with intermediate electrode /high velocity substrate.

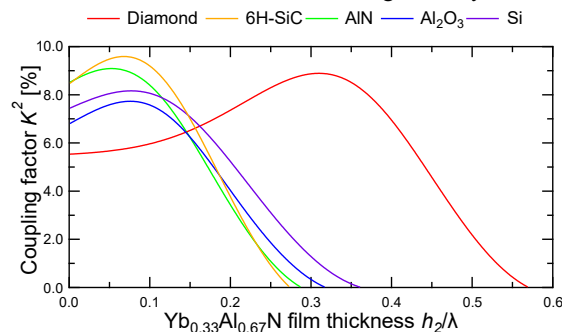


Fig. 2. K^2 of Sezawa mode RSAW on $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ film with intermediate electrode /high velocity substrates as a function of h_2/λ .

Table. I Phase velocity, and maximum K^2 of Sezawa mode RSAW on $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ film with intermediate electrode /high velocity substrate.

薄膜材料	基板材料	膜厚 h_1/λ	膜厚 h_2/λ	位相速度 (自由表面) [m/s]	K^2 [%]
$\text{Sc}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{N}$	Diamond	0.565	0.308	6,820	8.21
$\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$	Diamond	0.570	0.310	5,420	8.88
	6H-SiC	0.274	0.068	5,940	9.58
	AlN	0.288	0.053	5,640	9.08
	Al_2O_3	0.318	0.076	5,500	7.72
	Si	0.362	0.077	5,140	8.15

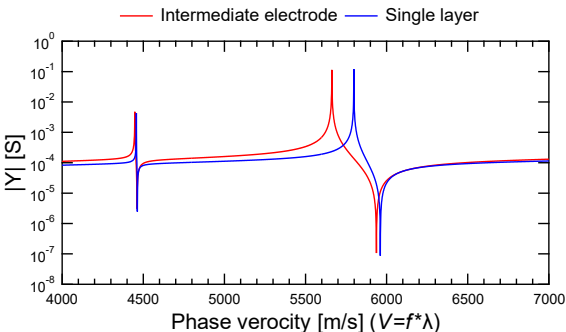


Fig. 3. Admittance frequency characteristics of Sezawa-mode RSAW resonators with $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ film with intermediate electrode or single-layer $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}$ film/6H-SiC substrate.

参考文献

[1] J. Jia et al., Phys. Rev. Appl. 16, 044009 (2021).
[2] 福永慶 応用物理学会 17a-D505-8 (2023)

周期的空隙を用いた弾性表面波伝搬特性の制御 Control of SAW Propagation Properties Using Periodic Voids

山梨大 ◯(M2) 鈴木 渉志, 鈴木 雅視, 垣尾 省司
University of Yamanashi ◯Takashi Suzuki, Masashi Suzuki, and Shoji Kakio
E-mail: g22te017@yamanashi.ac.jp

1. はじめに 弾性表面波(SAW)デバイスには高周波化, 広帯域化等の高性能化が要求されている. 前報において, LN 薄板と水晶接合構造において, 周期的空隙から成るグレーティングを接合境界面に設けた構造のリーキークSAW(LSAW)の伝搬特性を解析し, 空隙周期によりバンドギャップ周波数が制御できることを明らかにした^[1]. 本研究では, 周期的空隙を用いた SAW 伝搬特性の制御を検討するために, Z-cut X-propagation LN (ZX-LN)基板内部に空隙を設けた構造の周波数特性を解析した.

2. 周期的空隙を有する構造の伝搬特性

レイリー型 SAW(R-SAW)と LSAW に対して同等の K^2 を有している ZX-LN^[2]を用いて, 基板内部に周期的空隙を設けた構造において, 波長 $\lambda=4.0 \mu\text{m}$ の入出力 Al 製すだれ状電極(IDT)間の周波数特性を解析した. 支持基板の厚みを 10λ , 薄板の板厚 h を 0.15λ , IDT の膜厚を 0.04λ , 対数を 25 対, 伝搬路長を 25λ に設定した. Fig. 1(a), (b)に解析モデルを示す. 伝搬路下の空隙周期を Λ とし, その凹部と凸部の幅を同一とした. まず, 空隙を設けない場合(without voids)の周波数特性を解析した結果を Fig. 2 に示す. $0.90 \text{ GHz} \sim 0.98 \text{ GHz}$ にメインローブを有する R-SAW と, $1.00 \text{ GHz} \sim 1.18 \text{ GHz}$ にメインローブを有する LSAW の応答が観測された.

次に, Fig. 1(a)に示すモデルにおいて, LN 薄板と LN 支持基板の境界面に深さ $d=0.01\lambda$ の空隙を $\Lambda/2$ の周期で IDT 下と伝搬路下に設けた場合の周波数特性を, Fig. 2 中 Voids under IDT and propagation path($\Lambda=2.0 \mu\text{m}$)として示す. LSAW の最小挿入損と応答が現れる周波数はほとんど変わらず, R-SAW の応答が低周波側にシフトすることがわかった.

また, Fig. 1(b)に示すモデルにおいて, 深さ $d=0.01\lambda$ の空隙を $\Lambda=3.5 \mu\text{m}$ の周期で伝搬路下のみ空隙を設けた場合の周波数特性を Fig. 2 中 Voids under propagation path($\Lambda=3.5 \mu\text{m}$)として示す. LSAW の最小挿入損は 12.4 dB であり空隙を設けていないとき(11.5 dB)と同等の値を示し, R-SAW の応答のみ損失が増大した. また, Fig. 2 中に示す Voids under propagation path($\Lambda=1.9 \mu\text{m}$)では, R-SAW, LSAW とともに損失が増大した.

Fig. 1(b)のモデルにおいて, $\Lambda=3.5 \mu\text{m}$ としたときの伝搬路長 L 依存性を Fig. 3 に示す. L を短くすることによって LSAW の最小挿入損には大きな変化は観測されなかったが, R-SAW の損失は L を短くすることで低減した. これは, R-SAW に対する反射係数が小さくなったことによるものと考えられる.

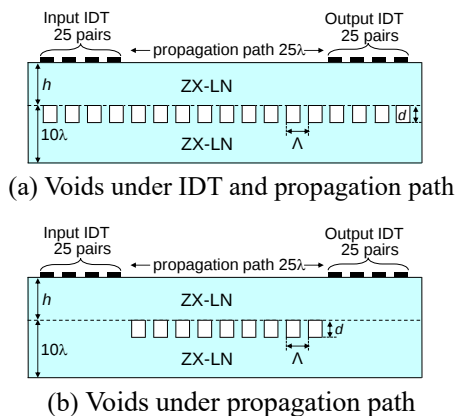


Fig. 1 Analytical model.

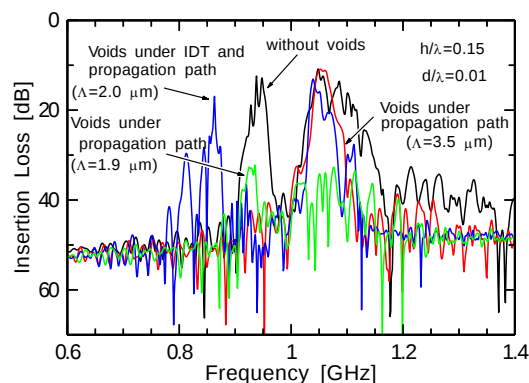


Fig. 2 Frequency responses between input and output IDTs.

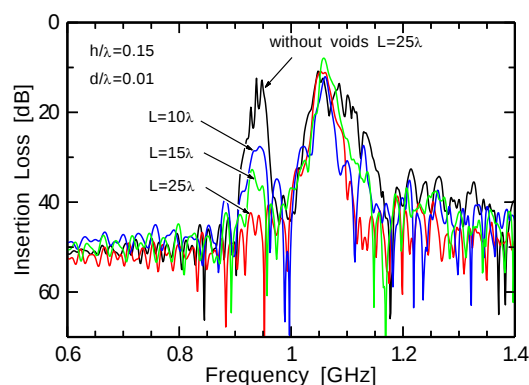


Fig. 3 Propagation path length L dependence on frequency response ($\Lambda=3.5 \mu\text{m}$).

謝辞

本研究の一部は科研費基盤研究(B)23H01443の補助を受けている.

参考文献

- [1] 鈴木, 他, 応物春, 17a-D505-7, 2023.
- [2] “弾性波デバイス技術,” pp. 94-95, 2004.

ラブ波型弾性表面波における圧電基板分割による不要伝搬モードの抑圧

Suppression of Spurious Propagation Modes on Love Wave-Type SAWs by Divided Piezoelectric Substrates

山梨大¹, 山本エイデック² ○(M2) 原 尚斗¹, 鈴木 雅規¹, 垣尾 省司¹, 山本 泰司²

University of Yamanashi¹, Yamamoto-ADEC LLC²,

○Naoto Hara¹, Masashi Suzuki¹, Shoji Kakio¹, and Yasushi Yamamoto²

E-mail: g22te020@yamanashi.ac.jp

1. はじめに ラブ波型弾性表面波(SAW)は非漏洩の伝搬モードであり, Cu-grating/15°YX-LiNbO₃(LN)構造上を伝搬するラブ波型SAWにおいて, 約30%の大きな電気機械結合係数 K^2 を有する^[1]ことから, SAWデバイスの広帯域化に有利である. しかし, レイリー型SAW(R-SAW)も同時に励振されスプリアス応答となるため, 電極膜厚やLNオイラー角に制約がある.

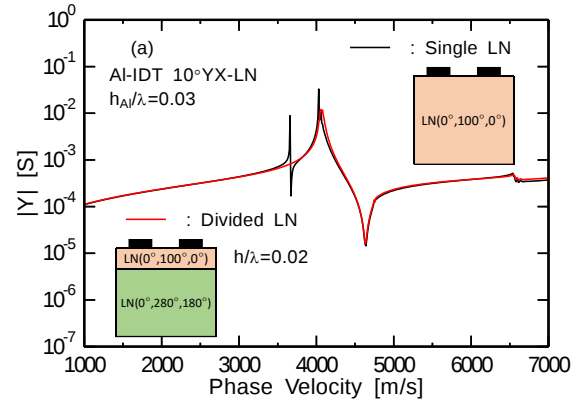
本研究では, R-SAWに起因する不要応答を抑圧させる方法として, 半無限の圧電基板をオイラー角の異なる薄板と支持基板に分割, 接合させた構造を提案し, 有限要素法(FEM)により解析した結果を報告する.

2. ラブ波型SAWにおける基板分割構造 圧電基板として10°YX-LNを用い, オイラー角(0°, 100°, 0°)のLN薄板と, オイラー角(0°, 280°, 180°)のLN支持基板に分割し接合させた構造のラブ波型SAWの共振特性を解析した. 支持基板の厚さ10波長, その下部に完全整合層(PML)を設けて, 圧電薄板上に波長 $\lambda=10\mu\text{m}$ の無限周期Al製すだれ状電極(IDT)を設けた場合と, 高密度な無限周期Cu製IDTを設けた場合の二通りで解析した. Al-IDTの規格化膜厚を $h_{\text{Al}}/\lambda=0.03$, Cu-IDTは $h_{\text{Cu}}/\lambda=0.08$ とした.

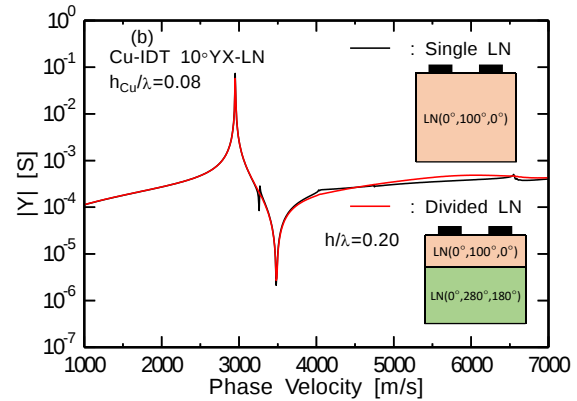
Fig. 1(a), 1(b)にAl-IDT, Cu-IDTにおける共振特性をそれぞれ示す. 横軸は周波数に λ を乗じた位相速度である. 薄板の規格化板厚をR-SAWによる不要応答が最も抑圧された, Al-IDTでは $h/\lambda=0.02$, Cu-IDTでは $h/\lambda=0.20$ とした共振特性をそれぞれ示している. Al-IDT, Cu-IDTともに, ある板厚においてR-SAWによる不要応答が抑圧されることがわかった.

次に, 波長 $\lambda=10\mu\text{m}$ のCu-IDTを設けた場合について, 共振特性のCu-IDTの規格化膜厚依存性, およびLN第2オイラー角依存性を解析した. オイラー角(0°, 0°, 0°)の薄板, オイラー角(0°, 180°+0°, 0°)の支持基板を設定した. Fig. 2にR-SAW不要応答が生じない $h_{\text{Cu}}/\lambda=0.09$, $\theta=105^\circ$ のLN単体の共振特性と, LN分割構造において最大の比帯域幅を示す $h_{\text{Cu}}/\lambda=0.06$, $\theta=95^\circ$ の共振特性を示す. 分割構造における薄板の規格化板厚はR-SAW不要応答が抑圧される $h/\lambda=0.30$ に設定した. LN単体の比帯域幅は13.9%, LN分割構造の比帯域幅は16.2%であり, 単体と比べて2.3%大きい.

これらの結果より, 提案した分割構造によってラブ波型SAWのより大きな比帯域幅を示す条件でR-SAW不要応答を抑圧できることを明らかにした.



(a) Al-IDT.



(b) Cu-IDT.

Fig. 1 Simulated resonance properties of Love wave-type SAW on single LN and divided LN.

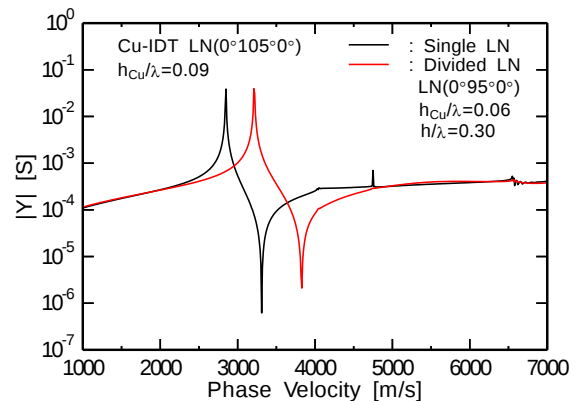


Fig. 2 Simulated resonance properties of Love wave-type SAW on single LN for $h_{\text{Cu}}/\lambda=0.09$ and $\theta=105^\circ$ and divided LN for $h_{\text{Cu}}/\lambda=0.06$ and $\theta=95^\circ$.

参考文献

- [1] K. Hashimoto, *et al.*, IEEE Ultrason. Symp., p. 1330, 2004.