

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04527

研究課題名(和文) 弾性振動可視化装置の自動化とその応用

研究課題名(英文) Development of fast-scanning phase-sensitive laser probing system and its applications

研究代表者

大森 達也 (Tatsuya, Omori)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60302527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：SAW共振子に代表される高周波弾性波動素子内部を伝搬する弾性波動の様子を可視化できる弾性振動可視化装置の高性能化・多機能化に関する研究を行った。まず、可視化装置に自動焦点合わせ機構を付加することに成功した。これにより周波数スキャンなど長時間に亘る自動測定を安定して可能とした。次に、検波系を見直した。素子駆動、周波数変換用局部信号発生、参照信号発生用の各発振機を、基準信号を共通化した別個のものとする事で、極限まで信号漏洩の影響を除去した高ダイナミックレンジ・ベクトル検波の実現に成功した。最後に、非線形性評価用試料として分数調波を発生できるSAW共振子試料の作製に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高周波弾性波動素子は、今日の高度化する無線通信システムを支える高周波アナログ回路の性能を左右するキーデバイスの一つである。本研究成果は、このような弾性波動素子の研究・開発において、他の方法で得難い知見を、容易な操作で収集できる方法を提供できるものである。また、本研究で検討された、高ダイナミックレンジかつ柔軟性の高いベクトル検波方式は、本可視化システム以外にも広範に応用できるものである。今後、各種高周波素子の分数調波調波発生などを含む非線形性測定などで有効に利用されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The SAW/BAW laser probing system that can visualize the distribution of acoustic vibration in UHF-SHF range devices with very high scanning speed was extensively improved. At first, we introduced the autofocus function using the Energy-of-Laplacian (EOL) as an evaluation function of the state of focusing. The mechanism has enabled us to stable measurement requiring long term such as frequency scanning. Next, the leakage-free vector signal detection system was developed using separate oscillators. The developed method can apply not only to the laser probing system but also to general vector signal measurement requiring an extremely high dynamic range, such as detecting the nonlinear responses.

Through these works, the newly developed high-performance SAW/BAW laser probing system offers to prepare attractive and useful 2D SAW/BAW distribution images.

研究分野：電気電子工学

キーワード：弾性波 弾性振動可視化装置 高周波デバイス 非線形応答

1. 研究開始当初の背景

高機能・高性能化する無線通信システムで用いられる通信機器の高周波フロントエンドにおいて、その性能を左右する弾性表面波(SAW)や弾性バルク波(BAW)を用いる共振子やこれを組み合わせた高周波フィルタに対しても極限までの高性能化が求められている。一般にこのようなRF SAW/BAW素子の開発場面では、その現象を理解するため、計算機シミュレーションが用いられるが、この方法だけでは理解する事が難しい現象なども数多く報告されている。こうした現象を解明しようとするため、極めて強力なツールとなることを期待される、弾性振動可視化装置が古くから提案されてきた[1]。弾性振動可視化装置はSAW/BAW素子表面を伝搬する弾性波動を光学的方法などを用いて、直接観察するものであり、素子内で生じる弾性波の散乱や漏れといった現象の直接評価を可能とする。筆者らのグループでも2005年頃から、RF SAW/BAW素子用の弾性振動可視化システムを開発してきた[2,3]。筆者らの開発している弾性振動可視化システムの特長として、光学系にSagnac干渉計を用い、A/D変換のトリガとしてステージに取り付けられたリニアエンコーダからのパルス信号を使うことで、数百MHz~数GHz帯のRF SAW/BAW素子用可視化装置として、他の同種システムに比べて圧倒的な高速スキャンを可能としている。また、信号検出に高周波ロックインアンプを用いたベクトル検波を行うことで、素子表面を伝搬する弾性波動の振幅情報のみならず位相情報を含めた複素振幅を記録することが可能となっている。これにより波数空間での解析が可能となり、特定モードの抽出など幅広い解析が可能である。また、最近ではMichelson干渉計との組合せによる絶対振幅測定や、測定周波数をスキャンしながら多数の2次元弾性波動伝搬画像を蓄積しアニメーション化して出力するなど高機能化についても広く検討を行っている。こうした特長をもつ本装置は、国内外の研究機関や企業の研究者・素子開発者に使用されるなど、高周波弾性波動素子開発の分野で高い評価を得ている。

その一方で、装置開発者と使用者が必ずしも一致しなくなることから、「より簡単に」使う事ができるよう求める声も多く出されていた。加えて、多数のデータを一度に取得する周波数スキャン測定のように、測定開始から終了まで数日を要するような長時間連続測定においては、測定の無人化と、この間の室温に代表される環境変化に対応する自動調整機能の付加が必須要件となっていた。また、近年特に問題となっている、RF SAW/BAW素子において生じたわずかな非線形性を捉えるために、より高感度化・低雑音化が求められていた。

2. 研究の目的

本研究提案の目的は、開発中の高周波弾性振動可視化装置の高機能化・高性能化をはかりつつ、誰でも簡単に使えることを目指した高いユーザビリティを実現し、高周波弾性波動素子の開発に貢献することにある。特に、自動化された焦点調整機能の実装や、これによる周波数スキャン機能、絶対振幅測定機能の実用化は大きなインパクトをもたらすと考えられる。また、近年話題となっているSAW素子にわずかに存在する非線形性による応答を可視化できれば、これまでにはない知見が得られるものと思われる事から、極めて微小な信号を検出できる信号検波系についての検討も行うこととした。

具体的には、(1)適切な評価関数を用いるオートフォーカス機能の実装、ならびに測定制御プログラム刷新によって、操作性の大幅改善をはかるとともに、これらの機能を最大限利用した周波数スキャン機能などの実用化を行う。(2)信号検出系を抜本的に見直す事によるダイナミックレンジの大幅な向上と測定の自由度向上をはかり、特に非線形応答など極めて微小な信号検出を可能なものとする。(3) SAW/BAW素子で発生する非線形性応答、特に、これまでほとんど議論されてこなかった分数調波による応答を観察するための試料準備を行う。以上3項目を重点的な目標とした。

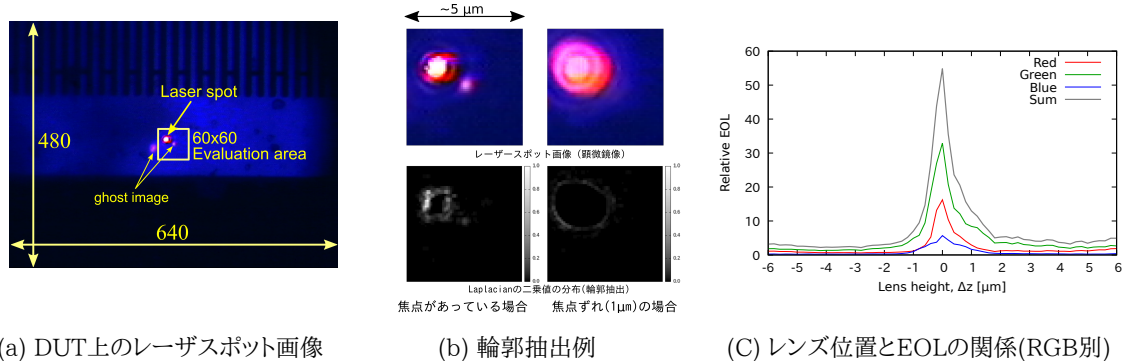


図1 オートフォーカス機能の実装

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するための手法として、主に以下の3項目について研究方針をたてた。

#### (1) オートフォーカス機能の実装

本研究者の開発している弾性振動可視化装置は、素子表面の傾きを動的に補正するために、素子表面にレーザを照射し、表面からの反射を捉えるレンズ鏡筒に、ステッピングモータによる上下動機構が実装されている[4]。更に、測定状態を確認するため、この鏡筒内同軸に測定表面モニタ用のCCDカメラが取り付けられている。図1(a)は、このCCDカメラで撮影した被測定対象のSAW素子表面とその表面に照射されたレーザスポットのイメージである。

本研究では、この画像より輪郭の鋭さの指標としてしばしば用いられる離散ラプラシアンを計算し、これを評価関数としてレンズ位置を制御することで、付加的な装置なしに、オートフォーカス機能の実現をはかることとした。

#### (2) 信号検出系の見直しによる高ダイナミックレンジ化

従来用いているベクトル信号処理系は図2(a)に示すように、信号検出系と参照信号生成系をほぼ対称としたヘテロダイン方式であり、両信号を中間周波数(典型的には10.7 MHz)に変換した後、高周波ロックインアンプにより、振幅と位相を検出している。この手法により、比較的高いダイナミックレンジで、安定した光プローブ出力信号のベクトル検波を可能とされていた。しかし、極めて微小な非線形応答を検出しようとする場合など、図2(a)の破線で示した、参照信号系を通る信号の、信号検出系に対するわずかな漏洩が、検波系全体のダイナミックレンジを悪化させていた。

本研究では、検波系を見直し、漏洩信号を本質的に生じないようにロックインアンプの参照信号を独立して用意した発振機で生成する方法を提案する。一般には、これにより漏洩は原理的に無くなるが、位相相関をとる事が出来なくなる。この問題に対して、全ての発振機の基準信号源を共通化することで、実用レベルの位相相関がとれるか検証することとした。

#### (3) 分数調波発生の基礎的検討

これまで、ほとんど検討されてこなかった、分数調波についてその基本的な振舞いを調べるため、高周波SAW共振子の表面に、素子欠陥を模擬したダイヤモンド微粒子を分布させて、その応答を観測する。この際、塗布する微粒子の固有振動周波数が、対象とするSAW共振子の共振周波数のおよそ1/2付近となるよう粒子径を選択する。また、簡単な数理モデルを考え、実験結果の定性的な解釈を行う事とした。

### 4. 研究成果

研究目的に沿って計画した手法により、主として以下の3項目に関する成果が得られた。また、これに加えて実用に耐えうる弾性振動振幅の絶対値評価についても検討を行い雑誌論文にて公表した。

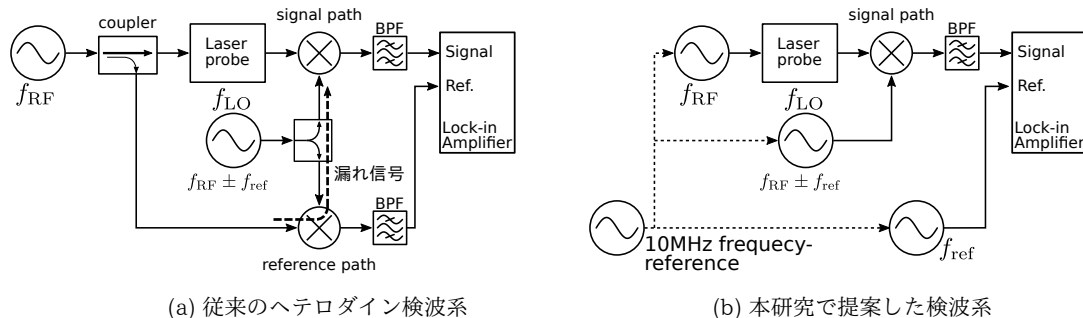


図2 信号検波系の改善による高ダイナミックレンジ化

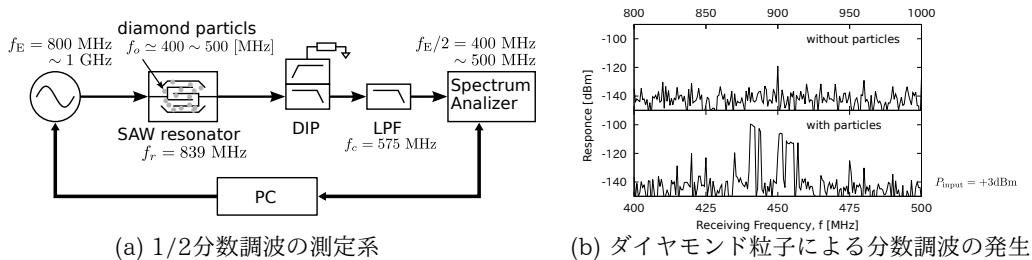


図3 分数調波発生に関する研究

### (1) オートフォーカス機能の実装とその応用

図1(b)に示すように、CCD画像から計算したレーザースポット周辺の離散ラプラシアン(図は二乗した値)の分布は、レーザースポットの輪郭の鋭さに対して敏感に変化する事を確認した。これより、離散ラプラシアンの二乗和であるEOL(Energy Of Laplacian)を求めると、図1(c)に示すように、ちょうど焦点があったレンズ位置で最大値を示す鋭い単峰性ピークを示すことが確認された。この性質は焦点ズレを表す評価関数として適しており、ステッピングモータによりEOLが最大となるよう、レンズ位置を自動調整することでオートフォーカスの実装が可能であることを示した。

このオートフォーカス機構を実装した制御系を構築した結果、数十時間に及ぶ測定周波数をスキャンさせながらの連続測定でも、室温変化など外乱による焦点ズレの影響を受けることなく、可視化を続ける事が可能であることを確認した。さらに、このオートフォーカス機能に加え、Micelson干渉計を用いた測定系を含めて統合的に制御できるようにしたコンピュータプログラムを作成し、従来に比べて極めて使い勝手のよい環境構築を行うことに成功した。これらの成果は、学会での研究発表ならびに、雑誌論文にて公表された。

### (2) 漏れ信号による影響を受けない検波系の構築

図2(b)に示すように、ロックインアンプの参照信号を個別に用意した発振機で生成する新しい検波系を考えた。一般に、このように測定信号系と参照信号系で独立した発振機を用いると、個々の発振機間に相関が無いことから、位相の測定が不可能になると考えられているが、本研究では、10 MHzの周波数基準信号を全発振機に共通した基準とすることで、同期が可能であることを実験により実証した。従来の方法(図2(a))と詳細な比較をしたところ、測定結果に含まれる分散は、振幅測定についてはほぼ同等であり、位相測定については数倍大きくなることがわかった。しかし、この程度のばらつきが本可視化装置による観察に与える影響は軽微であり、さらに中～長期の安定性についても、測定環境、特に室温を一定に保つことで、実用上問題ないレベルに抑えられることがわかった。

この検波系を採用することにより、従来よりも微小な信号を安定して測定することが可能となり、さらに副次的効果として、周波数設定の自由度が高くなることから、高次あるいは分数調波の非線形信号を測定する上でも従来よりも有利であることがわかった。これらの成果は、学会での研究発表ならびに、雑誌論文にて公表された。

### (3) 分数調波の発生実験結果

900 MHz付近に共振周波数を持つSAW共振子を作製し、その表面に伸縮振動の固有振動周波数がおよそ450 MHzとなるダイヤモンドパウダーを分散させた試料を試作し、図3(a)に示した測定系により1/2分調波応答の発生を観察した。その結果、図3(b)に示すように、2次の非線形性によるものと推測される分数調波の観察に成功した。本研究者の知る限り、高周波SAW素子を本来の駆動周波数で動作させた時に発生する分数調波を明瞭に観測した例は無く、本研究の成果は、これまで見過ごされてきた現象に着目するきっかけとなった。これらの成果は、学会での研究発表として公表されるとともに、今後、発生メカニズムの理論的検討を加えて国際学会での発表および論文誌への投稿を予定している。今後、ここで用意した素子を弾性振動可視化装置で観察することで、分数調波発生のメカニズムを詳細に検討することを計画している。

### <参考文献>

- [1] (たとえば)R. Adler, A. Korpel and P. Desmares, "An instrument for making surface waves visible", IEEE Trans. sonics and ultrasonics, Vol. 15, pp. 157-160 (1968)
- [2] H. Kamizuma, L. Yang, T. Omori, K. Hashimoto and M. Yamaguchi "High-speed laser probing system for surface acoustic wave devices based on knife-edge method", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No. 6B, pp. 4535-4538 (2005)
- [2] T. Omori, K. Kashiwa, K. Hashimoto and M. Yamaguchi, "Time-delay compensation in detection electronics of fast scanning 2D SAW/BAW laser probe", Proc. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, pp. 1644-1647 (2009)
- [3] T. Omori, T. Suzuki and K. Hashimoto, "Implementation of frequency scanning function in phase sensitive laser probe system for RF SAW/BAW devices", Proc. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium, pp. 1-4 (2017)
- [4] N. Wu, K. Kashiwa, K. Hashimoto, T. Omori and M. Yamaguchi, "Focus adjustment system for fast-scanning and phase-sensitive laser probe for radio frequency surface and bulk acoustic wave devices.", Proc. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, pp. 830-834 (2009)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Hashimoto Ken-ya, Li Xinyi, Bao Jingfu, Qiu Luyan, Omori Tatsuya	4. 巻 67
2. 論文標題 Perturbation Analysis of Nonlinearity in Radio-Frequency Bulk Acoustic Wave Resonators Using the Mass-Spring Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control	6. 最初と最後の頁 1479 ~ 1484
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TUFFC.2020.2969165	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 Yaginuma Toru, Omori Tatsuya, Hashimoto Ken-ya	4. 巻 60
2. 論文標題 A detection electronics enabling ultimate suppression of leakage signals in high-speed and phase-sensitive laser probe for radio frequency surface and bulk acoustic wave devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDC05 ~ SDDC05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf092	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 Takahashi Hikaru, Omori Tatsuya, Hashimoto Ken-ya	4. 巻 60
2. 論文標題 Development of a high-speed, phase-sensitive laser probe system for RF surface acoustic wave/bulk acoustic wave devices with an absolute vibration amplitude measurement function	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDC10 ~ SDDC10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abef12	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 Iyama Akihiro, Li Xinyi, Bao Jingfu, Matsuoka Naoto, Omori Tatsuya, Hashimoto Ken-ya	4. 巻 -
2. 論文標題 Full 3D FEM Analysis of Scattering at a Border Between IDT and Reflector in SAW Resonators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 2019 IEEE Ultrasonics symposium	6. 最初と最後の頁 1235 ~ 1238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ULTSYM.2019.8925826	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 Kawai Kazuki, Takahashi Hikaru, Omori Tatsuya, Hashimoto Ken-ya	4. 巻 61
2. 論文標題 Development of a high-speed, phase-sensitive laser probe system for RF surface/bulk acoustic wave devices with an autofocus function for long-time continuous operation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1012 ~ SG1012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac481f	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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 柳沼 達, 大森 達也, 橋本 研也
2. 発表標題 究極的な漏れ信号抑圧が可能な RF SAW/BAW レーザプローブ用受信回路
3. 学会等名 第41回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 輝, 大森 達也, 橋本 研也
2. 発表標題 RF SAW/BAW デバイス用高速・位相感応型レーザプローブに対する絶対振幅測定機能の実装
3. 学会等名 第41回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川井一輝, 大森達也, 橋本研也
2. 発表標題 弾性振動測定用 Michelson 干渉計の安定化に関する一検討
3. 学会等名 圧電材料・デバイスシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野直大, 井山明洋, 高橋輝, 高橋輝, 大森達也, 橋本研也
2. 発表標題 新規弾性振動可視化システムによる絶対振幅測定
3. 学会等名 圧電材料・デバイスシンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋輝, 小野直大, 大森達也, 橋本研也
2. 発表標題 絶対振幅測定機能を有する弾性振動可視化システムの構築
3. 学会等名 圧電材料・デバイスシンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川井一輝, 大森達也, 橋本研也
2. 発表標題 弾性振動可視化システムに対するオートフォーカス機能の実装とその周波数掃引測定への応用
3. 学会等名 圧電材料・デバイスシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大森達也
2. 発表標題 弾性波素子における分数調波非線形応答に関する一考察
3. 学会等名 弾性波素子技術コンソーシアム第4回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Yamamori, T. Omori and K. Hashimoto
2. 発表標題 Nonlinear generation of subharmonic signal by small particles of RF SAW resonators
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonics Symposium 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川井一輝, 大森達也, 橋本研也
2. 発表標題 高周波弾性波素子用レーザプローブの長時間連続運転を目的とした自動焦点機能の実装
3. 学会等名 第42回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山守一輝, 大森達也, 橋本研也
2. 発表標題 SAW共振子における分数調波非線形信号の観測
3. 学会等名 弾性波素子技術コンソーシアム第3回研究会
4. 発表年 2021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
---------	---------