

令和元年6月10日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06293

研究課題名(和文)高周波非線形弾性波動可視化装置の開発とその応用

研究課題名(英文)Development of fast scanning 2D SAW/BAW laser probe for detecting nonlinear responses

研究代表者

大森 達也(Omori, Tatsuya)

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高周波弾性波動素子内で発生する極めて微細な非線形応答の発生や伝搬の様子を直接観察可能とする、弾性振動可視化装置の開発を目的とした。これを実現するため、主として(1)被測定素子に対する入力信号と異なる周波数で出力される非線形応答のベクトル観察手段の確立、(2)周波数掃引を伴う長時間観察に対応できる制御ソフトウェアの開発ならびに、測定結果の効果的なデータ処理・表示を行うソフトウェアの開発、(3)検出系を見直す事による徹底した低雑音化等により、非線形応答の可視化に関する基礎的な技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、主として移動体無線通信の弾性波素子で発生する非線形応答を、弾性振動可視化装置を用いて複素振動振幅として観察可能とする事を目的とした。この技術が確立すれば、弾性波素子における非線形発生メカニズムを明らかにし、これを制御することで素子の高性能化、更にはこれらの高周波素子を利用する移動体無線通信システムの高度化に寄与するものと考えられる。また、本研究により実現された可視化装置に対する周波数掃引機能の付加などは本研究者の知る限り国内外でも類が無く、弾性波素子の振舞いを理解する上で新たなアプローチ法を与えるものであると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This work aims at development the fast scanning SAW/BAW laser probing system which enables 2D-mapping of non-linear responses as vector data. It is important to know the behavior of such non-linear responses generated and propagating in SAW/BAW RF devices to control them. For this purpose, (1) establishment of vector observation method for non-linear responses using a reference signals of different frequency from that of input signal, (2) development of control software that enables dealing with long-time observation with frequency sweep function and making post-processing utilities for effective presentation of the acquired data, (3) noise reduction by re-design of the detection electronics. Through these works, I have established fundamental technology for visualization of the non-linear response of the SAW/BAW RF devices.

研究分野：電気電子工学

キーワード：弾性表面波 非線形応答 可視化 複素振幅

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

今日の移動体無線通信において、弾性表面波(SAW)やバルク波(BAW)を用いた共振子やフィルタに対する小型化・高性能化は必須の要件となっている。特に、アンテナ共用器（デュプレクサ）は極めて急峻なフィルタ特性に加え、大電力が印加される過酷な環境下でも特性劣化無く動作することが求められる。

従来、弾性表面波フィルタは極めて優秀な線形性を示し、その非線形性が問題視される事は殆どなかった。ところが、近年のキャリアグリゲーションなどに代表される新しい通信方式において、僅かな非線形性による影響も無視できないものとなってきた。

ところで、本研究者の属する研究グループでは、これまでに高周波弾性波動素子の基板表面を伝搬する弾性波の振動分布を直接観察することを可能とする、高周波弾性波動可視化装置を開発してきた[1]。これは、素子表面の極めて微細な高周波振動を、サニャック干渉計を用いた光学系で検出し、素子を平面的に走査することで振動振幅分布を二次元画像として捉えるものである。これまでの検討により、図1の例に示すようなUHF帯の弾性表面波素子上を伝搬する弾性波の複素振幅を捉えることが可能となっている。また、本可視化装置の走査速度は、本研究者の知る限り、国内外を含めて最高レベルである。このため、開発中の本可視化装置は国内外からの研究者のみならず、弾性波動素子開発企業からも使用を求められる存在となっていた。

このような背景において、この弾性振動可視化装置を改良して極めて微小な非線形応答を直接可視化することにより、弾性波素子で発生する非線形応答の発生メカニズムを明らかにすることを最終的な目標とした。

[1] 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 Ultrasonics symposium, pp. 1644-1647 (2009), DOI: 10.1109/ULTSYM.2009.5441688

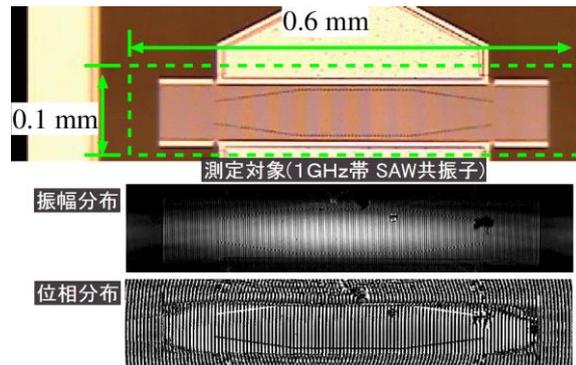


図1. 弾性振動可視化装置による観察例

図1の例に示すようなUHF帯の弾性表面波素子上を伝搬する弾性波の複素振幅を捉えることが可能となっている。また、本可視化装置の走査速度は、本研究者の知る限り、国内外を含めて最高レベルである。このため、開発中の本可視化装置は国内外からの研究者のみならず、弾性波動素子開発企業からも使用を求められる存在となっていた。

このような背景において、この弾性振動可視化装置を改良して極めて微小な非線形応答を直接可視化することにより、弾性波素子で発生する非線形応答の発生メカニズムを明らかにすることを最終的な目標とした。

[1] 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 Ultrasonics symposium, pp. 1644-1647 (2009), DOI: 10.1109/ULTSYM.2009.5441688

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、高周波弾性波素子における非線形応答発生の様子を、可視化装置により直接観察し、非線形応答発生メカニズムを明らかにするとともに、その制御方法に関する知見を与えることである。

これを実現する上で、以下の段階的な項目を目標とした。

- (1) 素子に入力する信号と異なる周波数で出力される非線形応答に対する複素振幅、特に位相の測定方法を確立する。
- (2) 測定時間が長時間となるために必要な、観察装置の自動運転機能の付加、ならびに測定周波数掃引機能の付加などによる高機能化をはかる。
- (3) 微小な非線形応答の観察を可能とするため、可視化装置のダイナミックレンジ向上と、これに必要な検出系の徹底した低雑音化を行う。

3. 研究の方法

上記に示した通り、本研究は高周波弾性波動素子内で発生・伝搬する非線形弾性振動を、これまで本研究者が開発中の弾性振動可視化装置に対する機能付加ならびに構成の見直しによる高性能化を行うことで、可能とするものである。具体的な手順については以下の通り。

- (1) 非線形応答の位相の測定方法について検討する。一般に、意味のある位相情報を得るためには、着目する信号（本研究の場合は非線形応答）に同期した参照信号が必要である。本研究では、被測定素子に対する入力信号に元々含まれる高調波を選択的に取り出して、これを利用することを考える。また、複素情報を検出する手法として、従来から用いている高周波ロックインアンプを用いる方法に加えて、外部に周波数変換を必要としない、クロスドメインアナライザを用いた測定方法についても検討を行う。また、サニャック干渉計の使用に併用してマイケルソン干渉計を用いることで、振動振幅の絶対値測定についても検討を行う。
- (2) 弾性振動可視化装置の制御ソフトウェアを大幅に見直し、予め設定した測定条件に従って無人でもパラメータスイープしながら測定を続けることを可能にする。特に、非線形振動のように極めて微小な信号を捉える場合、検波系で用いているロックインアンプの時定数を大きく取る必要があるため、長時間の測定に対応できるシステム開発を行う。
- (3) 弾性振動可視化装置における検出系を見直す。特に周波数変換部における、検出信号に対する参照信号の漏れの影響を低減するため、参照信号を合成するミキサからの漏れが検出系に混入することを防ぐ。これについて、増幅器の一方向性を利用した漏れ信号

の影響低減を検討する。

4. 研究成果

本研究における主たる研究成果を以下に示す。

- (1) まず、非線形応答のベクトル測定手法を検討するため、可視化装置を使わず、クロスドメインアナライザを用いて800MHz帯弾性表面波共振子が発生する2次および3次の複素応答を測定する手法について検討し、振幅ならびに位相の同時測定が可能であることを確認した。クロスドメインアナライザを使用した場合、ダイナミックレンジは従来から用いているRFロックインアンプを用いる方法に及ばないものの、外部にヘテロダイン方式による周波数変換を用いることなく複素振幅を捉えることが可能であるため、システム全体をシンプルにできることが確認された。なお、ここで検討した方法については、可視化装置への応用以外に、高周波素子において発生する高次非線形応答をベクトル量として、容易に測定する方法として応用可能であることを確認した。

また、サニャック干渉計は本質的に反射面（弾性波素子表面）における変位の時間変化、すなわち速度に相当する量を検出するため、絶対的な振幅を知る事は困難であった。これに対して、マイケルソン干渉計を併用する方法を検討した。マイケルソン干渉計を用いた場合、測定周波数よりも遥かに低い周波数の外部から加わる擾乱や、被測定素子表面の傾きに対しても敏感である欠点がある。このため、測定周波数の信号成分に影響を与えない低い周波数の応答を打ち消すように、干渉計内部の光路長を調整するよう負帰還をかける機構を実装した。この結果、不安定性が残ってはいるものの、サニャック干渉計を用いた場合に比べて半分程度の走査速度で弾性波動の複素振幅測定を可能とすることに成功した。

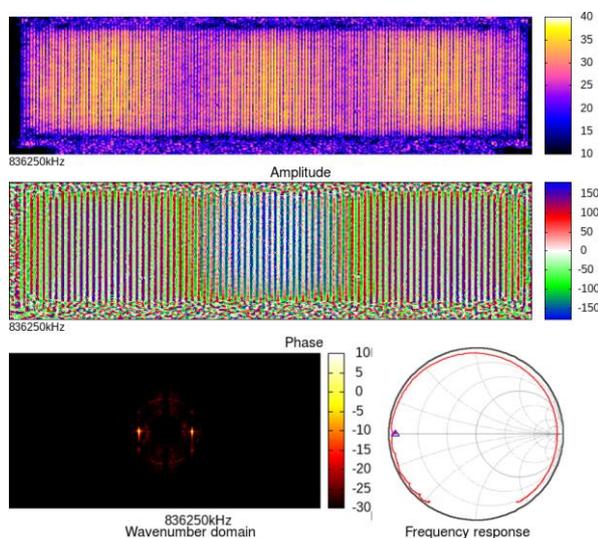
- (2) 弾性振動可視化装置の高機能化として、特に測定周波数の走査機能と、これを実現する長時間無人運転機能の実装について検討を行った。これまで、手動による設定が必要であった、可視化装置を構成する信号発生器、ステージコントローラ、データ収集用アナログ・デジタルコンバータ(ADC)を、統合して制御可能なソフトウェアを新規に作成し、予め設定した測定条件に従って、各構成機器を逐次自動設定しながら複素振幅の二次元分布を取得することに成功した。

一方、このように測定周波数を走査しながら複素振幅の分布を取得した場合、データ量が膨大となる上に、そのデータを効果的に処理した上で、わかりやすく提示する方法が必須となる。この点に関して、新たに専用のデータ処理ソフトウェアを作成した。このソフトウェアにより、複素振幅データから波数空間での分布への変換や、各種の窓関数を組み合わせることで複雑な窓関数を合成し、これを利用した着目する振動モードの切出し、あるいは、不要な応答の除去等を行った上で、再び実空間に逆変換することなどをバッチジョブとして処理することを可能とした。得られた結果は最終的に、図1のように、振幅、位相分布、波数空間での分布、スミスチャート上で測定周波数表示を統合した上でアニメーション表示した。この結果を、超音波国際シンポジウムにて公表したところ、本研究者の予想を超える反響を得た。

ただし、ここで作成したソフトウェアはコマンドラインベースのプログラムであり「誰もが」「簡単に」使えるとは言い難い。この点に関して、ユーザフレンドリなインターフェースを提供することは重要であると考え、今後の研究課題としている。

- (3) 本可視化システムでは、被測定素子表面の高周波弾性振動を光学系で検出し、ヘテロダイン方式とRFロックインアンプを利用して検波系にて振幅と位相を検出し、被測定子を載せたステージの走査に同期してサンプリングする方法を取っている。この系において、主応答に対して極めて微小な非線形応答を観察する場合、参照信号の合成で用いるミキサを貫通した局部発振器からの高周波信号が測定信号をマスクしてしまう事が問題となっていた。この点に関して、測定信号用のミキサと参照信号用ミキサの間に増幅器を置き、増幅器の方向性を利用することで、ロックインアンプの信号入力端において、対策前に-90dBm程度あった漏れ信号を、スペクトラムアナライザによる測定限界(-130dBm)以下に低減させることに成功した。これにより、従来困難なレベルの微小信号の可視化が可能となった。

また、微小な信号を測定する際にロックインアンプの時定数を最適値に設定する必要があり、これに伴う信号遅延時間を補正する遅延補正、およびADCに対するトリガパル



ス生成を行うプログラマブル分周装置について全面的な見直しを行い、新たに回路設計・製作をした。これにより、従来に比べて走査速度などの自由度を上げることが可能となった。

これらの研究成果により、高周波弾性波素子で発生する微小な非線形応答の二次元分布を測定する準備を行ったが、長時間の測定の際に、主として室温変化に伴う光学系の焦点ズレ等の影響があり、安定した測定を行うために、さらなる改良が必要で有ることがわかった。現在、焦点ズレを自動補正するオートフォーカス機構の実装を行うことで問題解決に当たることを考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) H. Yulin, B. JIngfu, L. Xinyi, Z. Benfeng, T. Gonbin, T. Omori and K. Hashimoto, “Influence of coupling between Rayleigh and SH SAWs on rotated Y-cut LiNbO₃ to their propagations”, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics, and Frequency Control, **65**, pp. 1905-1913 (2018), DOI: 10.1109/TUFFC.2018.2832174 (査読有)
- (2) Z. Benfeng, H. Tao, T. Gonbin, L. Xinyi, H. Yulin, T. Omori and K. Hashimoto, “Impact of coupling between multiple SAW modes on piston mode operation of SAW resonators”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, **65**, pp. 1062-1068 (2018), DOI: 10.1109/TUFFC.2018.282011 (査読有)
- (3) G. Masahiro, T. Omori, R. Nakagawa, H. Kyoya and K. Hashimoto, “Vector measurement of nonlinear signals generated in RF SAW/BAW devices”, Proc. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium, DOI: 10.1109/ULTSYM.2017.809195 (査読有)
- (4) 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, DOI: 10.1109/ULTSYM.2017.8091560 (査読有)

[学会発表] (計 1 件)

- (1) T. Omori and K. Hashimoto: “Development of phase-sensitive and fast-scanning laser probe system for RF SAW/BAW devices and its applications”, 7th International symposium on acoustic wave devices for future mobile communication system, 2018 March (Chiba, Japan) (招待講演)
- (2) Y. Huang, J. Bao, G. Tang, T. Aonuma, Q. Zhang, T. Omori and K. Hashimoto, “SAW/BAW band reject filters embedded in impedance converter”, 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2016 Sept. (Tours, France)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし