

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンに代表される移動体通信機器には、高い周波数選択性を持ち、小型で低損失な弾性表面波(SAW: Surface Acoustic Wave) やバルク弾性波(BAW: Bulk Acoustic Wave)素子が多用されている。これらの素子開発を支援するツールとして、弾性振動分布を光学的に検出する光プローブが有用である。

本申請者らは、Sagnac干渉計を用いた弾性振動可視化システムを開発している。これはSagnac干渉計が高域通過特性を持つため、高周波振動に対して高感度を持ちながら、床等からの低周波振動に鈍感なことに着目したものである。即ち、被測定素子(DUT)表面でレーザビームを高速に機械的走査することにより、弾性振動の2次元分布を高感度に短時間(10分程度)で観測できる。なお、検出回路等の見直しを進めた結果、現在では最高周波数5 GHzに達している。

ただし、Sagnac干渉計を用いた弾性振動可視化システムでは、外乱に対する鈍感さから高速測定を実現できるが、振動振幅の定量評価が容易ではない。そのため、このシステムにより得られたデータの評価は同一画像内の相対値を対象とするもののみにとどまっていた。弾性振動の振幅の定量化がなされれば、同一デバイスに周波数・電力の異なる信号を入力した際の応答の直接的な比較や、材料・構造が異なるデバイス間の特性の比較等、より広範囲な応用への展開が期待される。

一方、Michelson干渉計を用いる場合、比較的容易に絶対振幅を求めることができるが、試料の傾きや X-Y ステージ駆動モータの振動に代表される外乱の影響が顕著であり、高速走査が難しい。

これらの干渉計の長所と短所は互いに相反する関係にあるため、両者を併用することでそれぞれの欠点を補えると考えた。

2. 研究の目的

本研究ではSagnac干渉計とMichelson干渉計を併用することにより高速性を損なわずに絶対振幅を測定可能なシステムを構築することを目的とした。

3. 研究の方法

弾性振動可視化システムにおける光学系の構成を図1に示す。Sagnac干渉計、Michelson干渉計及び CCDカメラが同軸で組み込まれた構成となっている。LD波長はSagnac干渉計で635 nm、Michelson干渉計で532 nmと異なり、ダイクロミックミラーで波長ごとに分離することで一方ビームが他方の干渉計に入射することを阻止し、同時照射が可能となっている。またレーザ照射中でも CCDカメラを使用可能であり、試料の観察や掃引範囲の

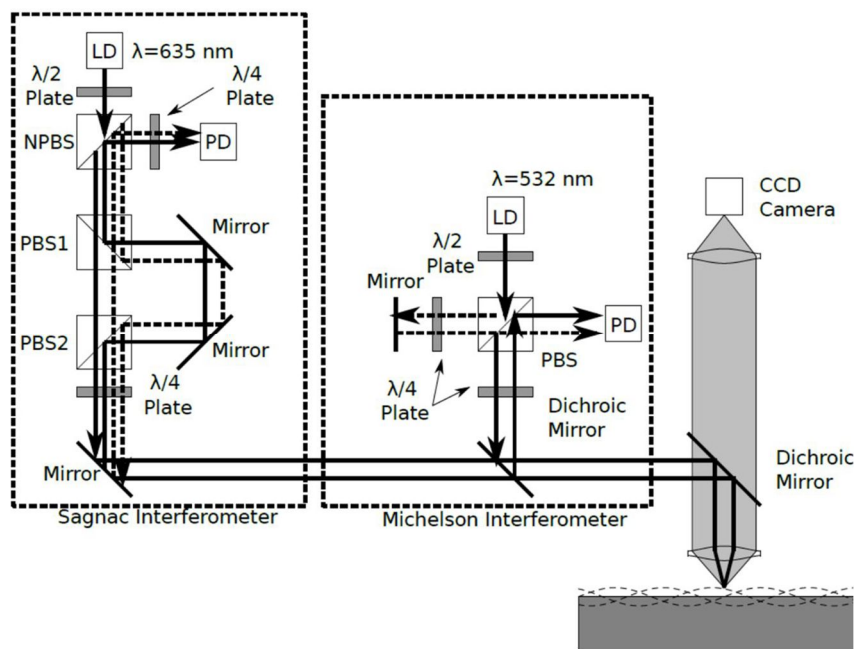


図1 光学系の構成

決定、焦点位置の計測等に利用できる。受信機の構成を図2に示す。ヘテロダイン方式と直交検波方式を用いている。まず、発信機1(SG1)からの RF 信号を方向性結合器(coupler)により二分割する。一方の信号は被測定デバイス(DUT)の入力信号として、他方は直交検波器(LIA)の参照信号として用いる。

DUTの弾性振動は光検出器(PD)で検出され、出力された振幅・位相情報を持つ信号は、低雑音増幅器(LNA)で増幅された後、発信機2(SG2)からの局部発信 f_{LO} との混合によって、差分である中間周波数10 MHzまで引き下げられる。一方、参照信号 f_{RF} も局部発信 f_{LO} との混合によって、差分である中間周波数まで引き下げられる。2つの信号はLIAに入力され、参照信号を基準として、測定信号の同相(I)成分および直交(Q)成分が検出され、A/D変換器(ADC)により計算機に取り込まれる。Sagnac

干渉計とMichelson干渉計の同時測定のため、これらが二系統独立して設けられている。理想的には、参照信号 f_{RF} はミキサで局部発信 f_{LO} と混合された後、LIA方向のみに通過していく。

しかし、実際にはミキサから光学系の測定信号側への漏洩があり、それを徹底的に抑制する必要がある。そこで、増幅器と共に減衰器(ATT)を挿入することによりアイソレーションを改善している。また、パワースプリッタの分岐数を増やしたこともATTと同様な効果を示し、従来の70 dB程度から130 dB程度までアイソレーションが改善された。

DUT 上の2次元振動

分布観測のため、DUT をX-Y ステージ上に設置し、それを機械的に2次元走査している。座標位置と測定位置の同期は、X-Y ステージの座標信号を元にADC トリガを駆動することにより実現される。X-Y ステージにはリニアエンコーダが内蔵されており、40 nmの移動ごとにパルスが出力される。ただし、検波系は主にLIAのフィルタ時定数に応じて数ms程度の遅延を持つため、その補償が必要である。本システムでは、エンコーダパルスを遅延させ、座標信号と検波出力を同期させたのち、適切な分解能となるようパルスを分周し、ADCのトリガとして利用する。この構成によりX-Y ステージを自由走行させつつ連続的に測定値を取得することが可能となり、測定の高速度化に寄与している。なお、パルス入力を一定時間後に再生するデジタルディレイを採用しており、SNR確保のためにLIAのフィルタ時定数を変更した場合でも設定の変更のみで対応できる。

Michelson 干渉計の参照ミラーにはピエゾアクチュエータ(PZT)が設置されており、出力が最大となる最適動作点に調整するとともに、ミラー位置に出力変化を用いて電圧出力を振動振幅の絶対値に換算することができる。なお、ただし PZT の応答速度の限界から、参照ミラー位置の掃引は十分に低速でなければならない。本システムにおける PZT のカットオフ周波数はおおよそ数 kHz であると見積もられている。

4. 研究成果

開発した光プローブを用いて、DUT 表面全体を両干渉計にて同時観測した結果を図3に示す。DUTには $42^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ 基板上的 SAW 共振子を使用し、Rayleigh波共振付近の振幅が極大となる678.8 MHzにおいて測定を行った。印加電力は10 dBmである。この時Michelson干渉計の安定化の

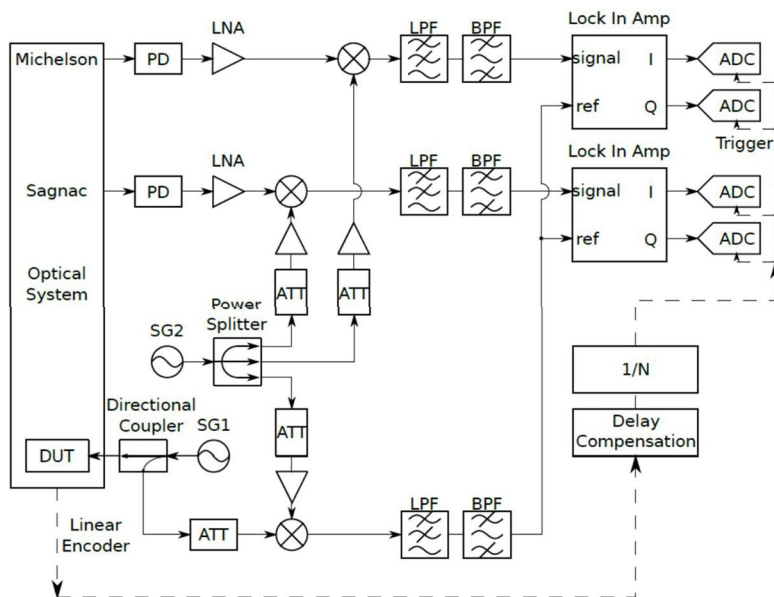
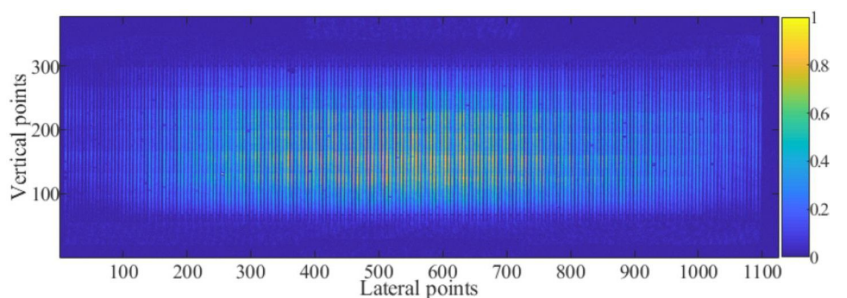
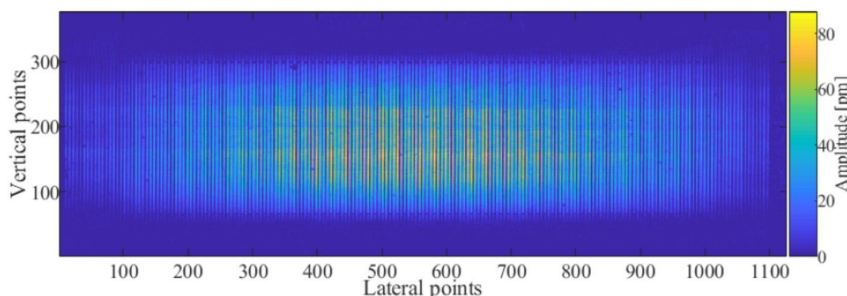


図2 受信機の構成



(a) Sagnac 干渉計による観測結果



(b) Michelson 干渉計による観測結果

図3 開発された光プローブによる同時観測の結果

ため走査速度はSagnac干渉計の場合の1 mm/sから0.25 mm/sまで引き落とされている。これらの測定結果は非常に似通っている。ただし、詳細に調べると横方向にずれがあることが判った。これは両干渉計の光軸の僅かな不一致による。このずれは、試料の取り付けや気温の変動等の影響により0~300 nm程度の範囲で変動すること判明した。そのため測定ごとにその補正が必要である。

図4に同一測定点におけるSagnac干渉計とMichelson干渉計の出力分布を示す。相関係数は $R = 0.95$ が得られ、比例関係にあることが確認された。このことから、Sagnac干渉計の校正はMichelson干渉計との比例係数を求めることで十分であり、さらにその比例係数は測定領域内の一部分において算出した値を全体に適用可能であることを意味する。

以上の結果から、絶対振幅測定は以下の手法を用いることが妥当であると考えられる。

1. 代表点においてPZTを走査し、Michelson干渉計出力と絶対振幅の関係を求める。外乱の影響を考慮すると複数回測定し平均することが望ましい。
2. 代表点を含む狭い領域においてSagnac干渉計とMichelson干渉計を用いた同時測定を行い、両者出力間の比例係数を算出する。複数本の電極を横切るように領域を設定すると、振幅が周期的に変化するためずれ量の算出が容易になる。一方向への走査は加減速時間を考えると移動距離が変化しても所要時間に大きな差がないため、この手順は1ラインの掃引範囲で行う。
3. 測定領域全体をSagnac干渉計を用いて走査し、得られたデータを先ほどの比例係数を用いて校正し絶対振幅を得る。

ちなみに図3に示したSagnac干渉計の結果にはこの手順に基づいた比例係数が乗じてあり、Michelson干渉計のスケールに基づく絶対振幅とみなすことができる。

ところで、筆者らは光プローブの観測結果の位相を用いて様々な情報が得られることを示しているが、試料固定のパッケージやプリント基板、ケーブル等の影響を受けてしまう。そのため、光プローブにおいては、位相の絶対量計測はそれほど重要でない。

そのことに直目して、図5に示す新たな受信機を開発した。これまでの図2に示したものに比べて構成が簡素で、SG2内蔵の基準発振(10 MHz)をSG1と共用し、LIAの参照信号として供給している。これは現行のRF発振器がPhase Locked Loop (PLL)に基づくシンセサイザ方式を利用しており、基準発振の共有により発生周波数間の相対位相が安定化されることによる。現行の商用RF発振器には基準発振の出力・入力機能をされている。もちろん、電源投入のタイミングによりロック

する位相が変動するため、絶対位相まで制御することはできない。

この構成の場合、図2の構成で問題となっていた参照信号側から検出信号への漏洩経路がなくなる。事実、実際の測定系では漏洩信号が雑音レベル以下であることを確認している。ただし、図2の場合、検出信号側と参照信号側がほぼ対称の構成のため、室温変動によるケーブル内の位相変化が相殺され問題とならない。一方、図5の構成の場合、非対称のため、位相変化が現れてしまうことが判った。現在、この抑圧を検討している。

また、Michelson干渉計はSagnac干渉計よりも焦点ボケの影響が大きい。一度の2次元掃引であればその影響はまだ小さいが、掃引を重ねると共に焦点ずれが大きくなり、測定結果への無視できなくなる。そのため、装置付属のCCDカメラからの画像を利用した自動焦点調整機構を開発した。これを筆者ら

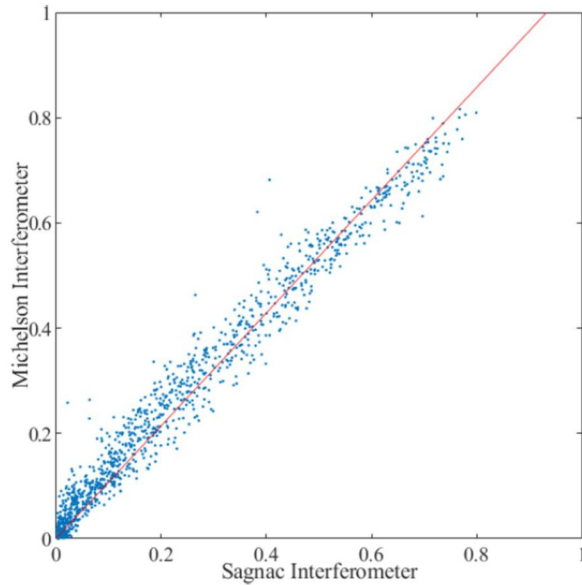


図4 両干渉計測定結果の相関

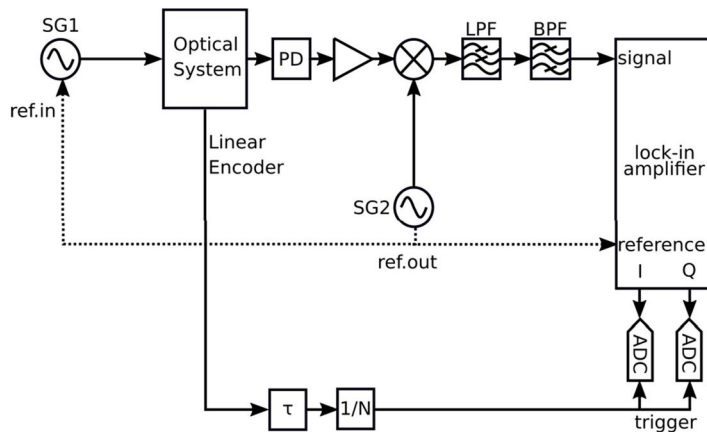


図5 新たな受信機の構成

が開発した試料傾斜補正機構と組み合わせることにより、長時間安定動作が可能となった。現在では、周波数掃引機構も実装され、複数日に渡る長時間連続測定が可能となっている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4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 T.Kimura, H.Kyoya, H.Okunaga, M.Omura, and K.Hashimoto	4. 巻 58
2. 論文標題 Observational and theoretical validation of longitudinal type surface acoustic wave devices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SGGC04-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab0ad5	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 T.Kimura, M.Omura, Y.Kishimoto, and K.Hashimoto	4. 巻 67
2. 論文標題 Comparative Study of Acoustic Wave Devices Using Thin Piezoelectric Plates in the 3 to 5 GHz Range	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques	6. 最初と最後の頁 915-921
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMTT.2018.2890661	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 T.Omori, T.Suzuki and K.Hashimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Implementation of Frequency Scanning Function in Phase Sensitive Laser Probe System for RF SAW/BAW Devices	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. IEEE Ultrason. Symp.	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ULTSYM.2017.8092793	査読の有無 無
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 T.Yaginuma, T.Omori, and K.Hashimoto	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 SDDC05-1-5
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 H.Takahashi, T.Omori, and K.Hashimoto	4. 巻 60
2. 論文標題 Development of High-Speed and Phase-Sensitive Laser Probe System for RF SAW/BAW Devices with 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 SDDC10-1-7
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 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 T.Kimura, H.Kyoya, H.Okunaga, M.Omura, and K.Hashimoto
2. 発表標題 Observational and theoretical validation of longitudinal type surface acoustic wave devices
3. 学会等名 USE2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Kimura, M.Omura, Y.Kishimoto, and K.Hashimoto
2. 発表標題 Comparative Study of Acoustic Wave Devices Using Thin Piezoelectric Plates in the 3 to 5 GHz Range
3. 学会等名 IEEE International Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Omori, T.Suzuki and K.Hashimoto
2. 発表標題 Implementation of Frequency Scanning Function in Phase Sensitive Laser Probe System for RF SAW/BAW Devices
3. 学会等名 IEEE Ultrason. Symp. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T.Omori, and K.Hashimoto
2. 発表標題 Development of phase-sensitive and fast-scanning laser probe system for RF SAW/BAW devices and its applications
3. 学会等名 Seventh Inth Symp. on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm. Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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 Toru Yaginuma, Tatsuya Omori and Ken-ya Hashimoto
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 超音波エレクトロニクスシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hikaru Takahashi, Tatsuya Omori, and Ken-ya Hashimoto
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 超音波エレクトロニクスシンポジウム
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

〔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
研究分担者	大森 達也 (Omori Tatsuya) (60302527)	千葉大学・大学院工学研究院・准教授 (12501)	

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