

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月8日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13713

研究課題名(和文) 2次元撮像素子を用いたGHz表面弾性波の超高速時間分解イメージング

研究課題名(英文) Time-resolved imaging of GHz surface acoustic waves using two-dimensional imaging devices

研究代表者

松田 理 (Matsuda, Osamu)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：30239024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：光励起されたGHz表面音響波を2次元撮像素子を用いて高速で時間分解2次元イメージングすることを目的として以下の研究を行った。1)音響振動による表面変位の2次元イメージをカメラの撮像面に2次元光強度イメージとして転送する干渉光学系を試作し、この動作を検証した。2)フォトリフレクティブ結晶を用いた自己補償型干渉計を検討した。3)高速CCDカメラを利用する際に必要となる高速画像転送およびデータ処理ソフトウェアを開発した。また派生研究として、4)音響波による光反射率の変調を定量的に扱う光散乱理論の構築、および5)ナノメートルスケールの金属回折格子構造を持つ試料における音響波の光学的励起検出を行った。

研究成果の概要(英文)：To achieve the fast time-resolved two-dimensional imaging of GHz surface acoustic waves using two dimensional imaging device, we performed the following studies. 1) The interferometer optics which transfers images of surface displacement caused by the acoustic vibration to the imaging plane of the camera as the intensity images has been prototyped, and its functionality has been confirmed. 2) Self-adopted interferometer setup using photo-refractive crystal has been considered. 3) The software for the fast transfer and analysis of images for high-speed CCD camera has been developed. As the secondary studies, 4) the light scattering theory for the quantitative handling of the modulation of the light reflection by the acoustic waves has been developed, and 5) the optical generation of detection of acoustic waves using nano-scale metal grating structure has been studied.

研究分野：フォノン物性、光物性、超高速分光

キーワード：表面音響波 時間分解イメージング ポンププローブ法 2次元撮像素子 GHz音響波 フルフィールド

## 1. 研究開始当初の背景

近年、異なる音響特性を持つ物質の組み合わせにより構成されるフォノン結晶やフォノンメタマテリアルと呼ばれる人工物質が注目されている[1]。これらは弾性波の伝播様態を人為的に制御することができ、弾性波の負屈折、スーパーレンズングなどの興味深い現象や、高性能のフィルタデバイス、防音材、熱電素子や熱伝導制御への応用などが期待されている。これらの研究において、弾性波の伝播形態の詳細な観測・解明は極めて重要である。

このような要請に応える測定手法として、光学的手法を用いた時間分解 2 次元音響波イメージングが挙げられる。これはピコ秒～サブピコ秒の時間幅を持つ超短レーザーパルスを試料に照射することで弾性波を励起し、その伝播の様子を遅延された光パルスを用いて検出するものである。遅延時間の走査および検出光の照射位置の空間的走査によって、時間分解 2 次元イメージングが実現される。我々は独自に開発した光干渉計[2]と 4f 光学系に基づく光学スキャナとを用いて、GHz 周波数領域の表面弾性波伝播をマイクロスケール空間分解能・ピコ秒時間分解能で測定できる装置を開発した[3]。この技術はフォノン結晶における弾性波分散関係の直接測定や、フォノンバンドギャップの検証などの大きな成果を上げてきた[4]。しかしながら従来方法は、1 セットあたり数時間以上と長時間の測定を要し、これが当該手法の幅広い活用を妨げていた。

[1] M. S. Kushwaha et al., Phys. Rev. B 49, 2313 (1994), Z. Liu et al., Science 289, 1734 (2000).

[2] D. H. Hurley and O. B. Wright, Opt. Lett. 24, 1305 (1999).

[3] Y. Sugawara et al., Phys. Rev. Lett. 88, 185504 (2002), T. Tachizaki et al., Rev. Sci. Inst. 77, 043713 (2006).

[4] D. M. Profunser et al., Phys. Rev. Lett. 97, 055502 (2006).

## 2. 研究の目的

音響波を活用したデバイス開発等において、表面弾性波の伝播を時間分解 2 次元イメージングとして観測する実験手法は極めて有効である。しかしながら従来のこの方法では、測定に長時間を要するという問題があった。本研究では近年急速に高性能化している高速 CMOS カメラを用いることを念頭に、表面音響波の 2 次元イメージング法の高速度化技術を模索する。これにより同手法の適用範囲がさらに広がると期待される。

## 3. 研究の方法

2 次元撮像素子を使用したピコ秒領域のポンププローブ・イメージング測定は、T. Pezeril らによって金属試料における過渡的反射率測定の結果が報告されている (Opt. Exp. 22, 4590 (2014))。本研究では、これに干渉計による表面変位検出系を組み合わせた装置を開発し、光励起された表面音響波を時間分解 2 次元イメージングすることを目的としている。このために、単一プローブスポットを用いる既存の表面弾性波の時間分解 2 次元イメージング測定系を元にする。この装置では、繰り返し周波数 76MHz、パルス時間幅 100fs のモードロック Ti サファイアレーザーを光源として用いる。光パルス列の一部から非線形光学結晶を用いて第 2 高調波を生成し、光学遅延を介して弾性波生成のためのポンプ光とする。弾性波伝播による試料の表面変位を検出するためにプローブ光の光学系は干渉計を構成する必要がある。従来の光学系では、この部分に我々が独自に開発した共通光路型干渉計を用いていた。この干渉計は、わずかに異なる時刻 (時間差～300 ps) の表面変位の差、すなわち表面変位速度を光強度に変換するもので、能動的な安定機構なしに試料表面の変位速度を極めて安定に検出可能なものである。本研究においては、この干渉計部分を改造して、表面変位の 2 次元イメージをそのままカメラの撮像面に 2 次元光強度イメージとして転送する干渉光学系を構築する。

さらに干渉計の別のアプローチとして、フォトリフラクティブ結晶を用いた自己補償型の干渉計も検討した。これは試料からの光と参照光をフォトリフラクティブ結晶上で干渉させてホログラムを記録し、音響波伝播による微小な光位相変化を高感度・高安定度で検出することが可能である。

また CCD カメラを用いた高速画像測定装置の構築に備えて、高速画像転送と高速画像処理を行うコンピュータソフトウェアの開発も行った。

さらに派生研究として、光パルスによる音響波の効率的な生成および検出条件を探るために、金属グレーティング構造を用いた光励起音響波の伝播研究および光学的手法による音響波検出の定量的解析のための一般理論の構築を行った。

## 4. 研究成果

2 次元撮像素子を用いた時間分解表面音響波イメージングを実現するために、試料面上での音響波による表面変位イメージを撮像素子のイメージングプレーン上に投影するイメージング干渉計を試作した。その構成例を図 1 に示す。既に運用実績のある共通光路型干渉計にリレー光学系を組み合わせた。図中下方から入射したプローブ光パルスは中央のビームスプリッターで腕の長さの異なる二つの光路に進む。各腕の端に設置された

鏡で反射された光は  $\lambda/4$  板によって偏向方向が縦から横、もしくは横から縦に変換され、中央ビームスプリッタから試料に向かう。この時点で、光パルスは数 100 ps の時間間隔で隔てられた二つのパルスとなっている。試料表面で反射された光は再びビームスプリッタから 2 本の腕に進む。この時、各光パルスは往路に通過した腕と異なる腕に進むようになっており、最終的に一つのパルスに再合成され、CCD カメラのイメージングプレーンに進む。イメージングプレーン上では、試料上での時分割されていた二つの光パルスが干渉し、試料表面の変位速度に相当するコントラストを生じる。リレー光学系の働きにより、試料表面のイメージが CCD カメラのイメージングプレーンに結像するようになっている。

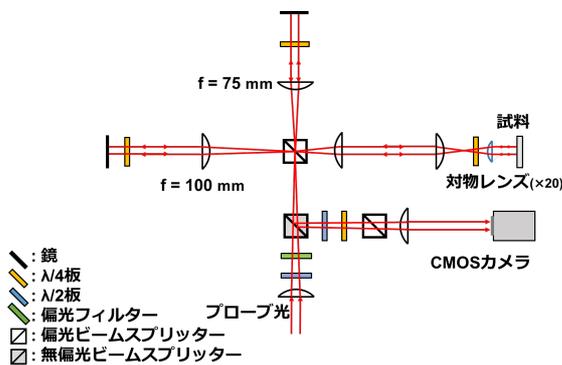


図 1: イメージング干渉計の実装例

構築した干渉計の動作確認のために、電気パルスで駆動されるバルク音響波フィルターデバイスの表面変位速度イメージを観測した。試料の形状を図 2 に示す。

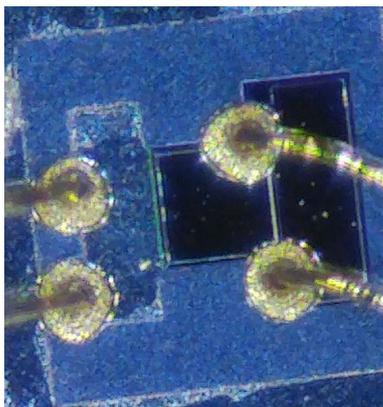


図 2: バルク音響波フィルターデバイスの顕微鏡写真。中央正方形部分 (160 x 160 $\mu\text{m}^2$ ) が電気パルス印加によって振動する。

プローブ光パルスに同期した電気パルス (時間幅 < 1 ns) で試料を励起し、その直後および 1 ns 経過後のイメージを取得した。また、電気パルスを印加しない場合のイメージも取得し両者を比較した。(図 3) まだ最適化はされていないが、音響振動による表面変

位イメージを観測可能なことが示された。イメージの不鮮明さの主な原因はレーザースペckルによるものと考えられ、画質を向上させるためには、これを解決する必要がある。

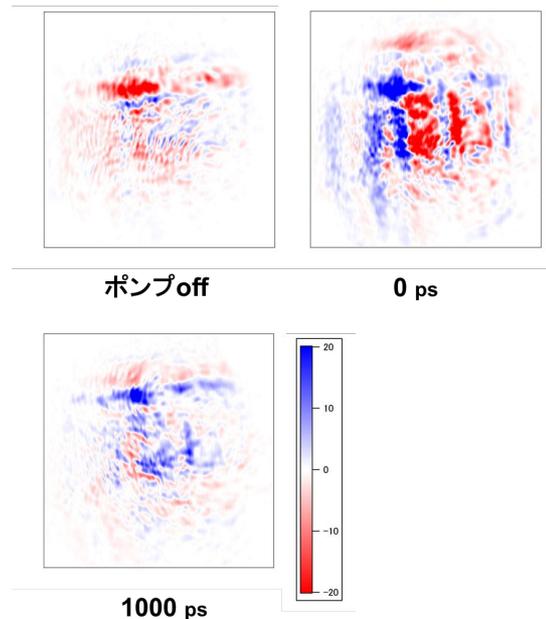


図 3: イメージング干渉計による測定イメージ例。測定領域は図 2 の中央正方形部分。「ポンプ off」は励起パルスを入力しない場合のイメージ。「0ps」は励起パルス印加直後のイメージ。「1000ps」は励起パルス印加後 1ns 経過後のイメージ。

この問題に対処するために二つの方法を検討中である。一つ目は、フォトリフラクティブ結晶を用いた自己補償型干渉計を用いるものである。試料が平衡状態にある時の試料表面で反射したプローブ光と参照光をフォトリフラクティブ結晶上で干渉させてその干渉縞を結晶に記録する。次に試料に振動が励起されている状態での試料からの反射光を、干渉縞の記録された結晶に入射することにより、試料の表面変位による位相変化をイメージングする。二つ目は、イメージング素子のピクセルによるナイフエッジ効果を利用して、試料表面の変位による光散乱方向の変化を検出する。この方法により、干渉計の構成が大幅に簡略化される。上記二つのアプローチは研究期間内に完成させることはできなかったが、研究は継続中である。

高速 CCD カメラは当初の予算では購入できなかったが、その後デモ機の借用などにより、高速イメージ取得のためのソフトウェア開発を行った。

派生研究として、光励起によって生成された音響波の光学的な検出を量的に取り扱うための、一般化された光散乱理論を構築した。これは任意の多層膜構造中を任意方向に伝播する音響波によって、任意入射角、任意偏向のプローブ光の反射率がどのように変調されるかを計算することができる。(JOSAB

2016) また、光パルス照射による音響波の生成・検出の効率改善のために、金属グレーティングを試料表面に形成し、これに光パルスを照射した際に生成される音響波の伝播様態を調べた。この方法は単一の測定から透明試料の屈折率と音速とを同時に取得することが可能で、音響波による試料の物性測定にも広く活用されることが期待される。(PRB 2018)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Osamu Matsuda, Thomas Pezeril, Ievgeniia Chaban, Kentaro Fujita, and Vitalyi Gusev, Time-domain Brillouin scattering assisted by diffraction gratings, Physical Review B 97, 2018, 064301-1-11. 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevB.97.064301

② M. Kouyate, T. Pezeril, V. Gusev, and O. Matsuda, Theory for optical detection of picosecond shear acoustic gratings, Journal of the Optical Society of America B 33, 2016, 2634-2648. 査読有  
DOI: 10.1364/JOSAB.33.002634

[学会発表](計6件)

松田 理, Thomas Pezeril, Ievgeniia Chaban, 藤田健太郎, Vitalyi Gusev, グレーティング構造によるピコ秒音響波の光学的励起・検出, 日本物理学会年次大会, 2018.

② Osamu Matsuda, Time-resolved two-dimensional imaging of gigahertz acoustic waves in phononic crystals and related structures, Photonics West 2018, San Francisco, California, USA, 2018. (招待講演)(国際学会)

Osamu Matsuda, Hiroki Nishita, Hiroaki Koga, Paul H. Otsuka, Motonobu Tomoda, Oliver B. Wright, Time-resolved Imaging of Surface Acoustic Waves Propagating in Two-dimensional Phononic Crystals, Phononics 2017, the 4th international conference on phononic crystals/metamaterials, phonon transport/coupling and topological phononics, Changsha, China, 2017.(招待講演)(国際学会)

Osamu Matsuda, Thomas Pezeril, Ievgeniia Chaban, and Vitalyi Gusev, Optical detection of picosecond acoustic waves generated in grating structures, 19th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena (ICPPP19), Bilbao, Spain, 2017.(招待講演)(国際学会)

O. Matsuda, T. Pezeril, I. Chaban, K. Fujita and V. E. Gusev, Time-domain Brillouin scattering assisted by diffraction gratings, 2017 International Congress on Ultrasonics (ICU), Honolulu, Hawaii, USA, 2017. (招待講演)(国際学会)

松田 理, Thomas Pezeril, Ievgeniia Chaban, Vitalyi Gusev, グレーティング構造によるピコ秒音響波の光学的励起および検出, 第38回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム(USE2017)、多賀城市文化センター, 2017.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者  
松田 理 (MATSUDA, Osamu)  
北海道大学大学院・工学研究院・准教授  
研究者番号: 30239024

(2)研究分担者  
オー・ビー ライト (WRIGHT, Oliver B.)  
北海道大学大学院・工学研究院・教授  
研究者番号: 90281790

友田 基信 (TOMODA, Motonobu)  
北海道大学大学院・工学研究院・助教  
研究者番号: 30344485

(3)連携研究者  
なし

(4)研究協力者

トマ ペツリル ( PEZERIL, Thomas )

藤田 健太郎 ( FUJITA, Kentaro )