

令和元年6月10日現在

機関番号：10101
研究種目：基盤研究(A) (一般)
研究期間：2016～2018
課題番号：16H02123
研究課題名(和文) GHzレーザー超音波によるコンピュータ断層撮影法

研究課題名(英文) GHz laser-ultrasonic computed tomography

研究代表者

O・B Wright (Wright, Oliver)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：90281790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,000,000円

研究成果の概要(和文)：この研究はGHz超音波コンピュータ断層撮影法に関するもので、非侵襲な試料内部の音響イメージングをナノスケールにまで拡張するものである。我々は、ナノ構造における最大100 GHzまでの周波数および最大50 nmまでの波長を有するコヒーレントフォノンの光生成を利用して、非常に小さい時間(~1 ps)および空間(~50-500 nm)スケールでバルク音波を測定した。弾性特性イメージング、ナノスケールの音響光学相互作用および欠陥によるフォノン散乱を調べた。この研究は新しいセンシングとイメージング技術につながるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体上のGHz表面波を使用して局所的な微小欠陥のCT画像を作成すること、ならびに自動角度走査時間領域ブリルアン散乱を使用して透明材料に3次元画像を形成することが可能であることを我々は示した。さらに、GHzのバルク縦超音波を使用して画像化するホログラフィック法を開発し、円筒形の試料でサブミクロンGHz超音波CTを達成する方法を提案した。本研究は、3次元GHz超音波イメージングの新しい科学を切り開き、そして将来の生物科学における商業的利用の可能性を含む、ナノスケールの音響センシングにおける多様な用途につながる。

研究成果の概要(英文)：This research concerns GHz ultrasonic computed tomography, which extends the field of non-invasive acoustic internal imaging to the nanoscale. We make use of the optical generation of coherent phonons with frequencies up to ~100 GHz and wavelengths down to ~50 nm in nanostructures to image bulk acoustic waves on very small temporal (~1 ps) and spatial (~50-500 nm) scales. Elastic property imaging, nanoscale acoustic-optic interactions and defect phonon scattering are investigated. This work should lead to new sensing and imaging technologies.

研究分野：超音波物性、光物性、音響メタマテリアル

キーワード：物理計測・制御 GHz超音波 断層撮影法 ピコ秒超音波法 ブリルアン散乱

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ピコ秒超音波は、ポンプおよびプローブフェムト秒レーザーパルスによってナノスケール波長の音響パルスを生成および検出する 30 年前に確立された光による超音波技術であり、ナノ構造材料の非破壊評価および基礎研究に広く応用されている。しかしこの技術は、複数の入射角を使った音響ビーム制御方法が存在しないため、一般的な超音波イメージング用途に対しては使われていなかった。例えば、従来の医療用超音波走査は、様々な角度でトーンバースト信号を生成し検出する圧電トランスデューサのフェーズドアレイや、もしくは試料への複数の入射角による照射を必要とするコンピュータ断層撮影 (CT) の使用に依存している。ピコ秒超音波では様々な角度の超音波発生方法が欠けていたため、産業的な応用分野は、米国において開発された半導体製造における検査装置しか存在しなかった。一般的な超音波 CT の目的は、送信器および受信器を密に並べ、散乱超音波から物体の音響パラメータの幾何学形状および 2 次元-3 次元空間分布を再構成することである。しかしこの高性能な方法は、GHz 周波数帯では試みられたことはなく、その使用範囲としては最大約 25 MHz、最大約 0.5 mm の分解能に制限されていた。

2. 研究の目的

本研究は GHz 超音波コンピュータ断層撮影法を開発し、それにより非侵襲な内部音響イメージングの範囲をナノスケールにまで拡大することを提案する。ナノ構造および生物学的サンプルにおいて ~100 GHz までの周波数および ~50 nm までの波長を有するコヒーレントフォノンを光励起し、~1 ps の時間および ~50-500 nm の空間スケールでバルク音響波を測定する。本研究では、弾性特性イメージング、極限的な音響集束、ナノスケールの音響光学相互作用および欠陥フォノン散乱を調べる。これは産業的応用に繋がる新しいセンシングおよびイメージング技術である。この研究は、周波数 10-100 GHz における GHz 超音波コンピュータ断層撮影の最初の調査と開発となる。以下の項目を実施する。

- ① GHz 超音波コンピュータ断層撮影法の確立：プローブ光もしくはポンプ光の入射角または位置の走査、および逆問題解析アルゴリズムによる画像再構成によって GHz 超音波 CT を確立する。
- ② 生物細胞へ応用可能な透明材料中の定量的な機械的性質サブミクロンイメージング法の開発：透明材料の機械的性質を、光角度走査時間領域ブリルアン散乱法によって定量的に 3 次元イメージングする。
- ③ 無機材料特性およびナノデバイス検査のための、50 nm の横方向分解能での CT 走査：ナノ結晶、ナノパターン化、またはナノ体積サンプルのための 100 GHz までの周波数での GHz 超音波 CT は、50 ナノメートルスケールまでの 3 次元ナノ構造による高周波フォノン散乱の物理学の解明につながる。

本研究の実施過程で、補足的な応用となる、表面弾性波を使用する超音波 CT も考案した。

3. 研究の方法

本研究の実験では、フェムト秒パルスレーザーから出た光を、ピコ秒音波を局所的に励起するためのポンプ光パルスと、試料の表面変位や屈折率変化を検出するためのプローブ光パルスに分け、時間領域で測定した。バルク音響波または表面音響波の伝播の画像を生成するため、試料上のプローブ光スポットは、我々が以前に開発した共焦点走査システムにより 2 次元で走査可能である。図 1 に、表面音響波測定の場合についての実験系を示す。本研究で開発した他の実験系についても、研究結果の部分で簡単に説明する。また試料内で音響波や光波の伝搬を計算するために、PzFlex および COMSOL Multiphysics のシミュレーションソフトを使用した。さらに音響イメージ再構築アルゴリズムの確認も兼ねて、バルク音響波の CT だけでなく表面音響波 CT についても研究を行った。

4. 研究成果

(1) GHz 表面音響波 CT およびトランスデューサを円形に配置した場合の解析法の開発

表面のミクロンスケールの欠陥を調べるために新しい GHz 音響 CT ジオメトリを考案し、数値シミュレーションを使用してこの方法をテストした。この方法は、欠陥を含む平坦な表面の円形領域の周囲で GHz 表面音響波の励起および検出することで実施する。

測定領域を囲う円上の 1 点を表面音響波の励起点とし、同一円周上の複数点において散乱波の測定を行う。検出波を時間フーリエ変換した後、検出点と周波数成分ごとに逆空間上の定め

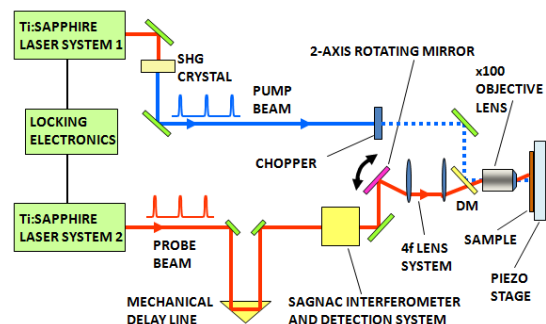


図 1. GHz 表面弾性波測定の場合の光学系の概略図

られた点に値を配置する。この操作を励起点が円周上を一周するまで繰り返すことで逆空間を埋め、空間フーリエ逆変換により表面構造の再構成を実現する。このような再構成の方法は弱散乱体構造に対して用いられることが前提となっている。図2は、有限要素法ソフトウェア PZ-Flex を用いた数値計算によりガラス基板の中心に穴を空けたモデルの再構成画像を取得した例である。測定領域は直径 $40\ \mu\text{m}$ の円内とし、 5° 毎計 72 点を測定点とした。測定点のうちの 1 点を中心に直径 $4\ \mu\text{m}$ の領域を点波源とした。図2は $1.0\text{--}1.1\text{GHz}$ 、波長 $3\ \mu\text{m}$ 程度の表面弾性波から $40\ \mu\text{m}$ 四方領域の減衰率分布を再構成したものであり、直径 $8\ \mu\text{m}$ 深さ $0.2\ \mu\text{m}$ の穴に対応する像を得た。再構成の理論上では波長程度の空間分解能で画像が得られるが、この結果から期待される分解能で弾性特性の再構成が実現可能であると考えられる。本手法により、全体スキャンを必要としない表面イメージングの確立が見込まれる。また深さ方向にも画像再構成ができるよう測定系や解析方法を拡張することで、ミクロスケールでの三次元超音波トモグラフィーの開発が期待できる。

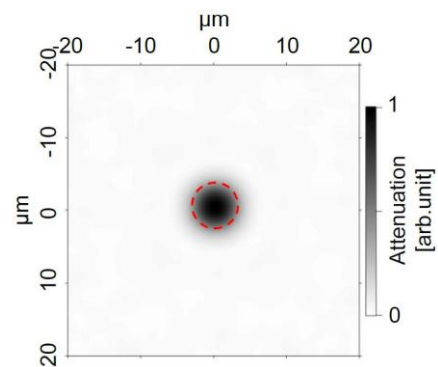


図2. ガラス上に直径 $8\ \mu\text{m}$ 、深さ $0.2\ \mu\text{m}$ の円筒形の穴をあけた際の、表面音響波 CT のシミュレーションによる再構築した減衰のイメージ。破線はもともとの穴の直径を示す。

(2) 表面下イメージングのためのホログラフィ法を利用した GHz 音響バルク波 CT

音響的な性質が既知の様な媒質中に、点欠陥などの超音波散乱体が含まれるような弱散乱構造の試料を考える。試料の形状も既知とする。検出面で時間および位置の関数として音響波を検出することができれば、そこから時間フーリエ変換で単一の周波数成分を取り出し、一様媒質中での伝達関数を逆に解いていくことで、散乱体の位置や形状を予測することができる。この方法はホログラフィ法とも呼ばれる。厚さが約 $3\ \mu\text{m}$ のチタン膜中に、直径 $300\ \text{nm}$ のポリスチレンビーズを埋め込んだ試料を準備した。ポリスチレンビーズの位置は、CT 結果と照らし合わせて確認できるように、試料作製時にあらかじめ別の方法で確認してある。膜の片面からポンプ光で超音波パルスを発生し、反対側からプローブ光で超音波パルスによって引き起こされる反射率変化信号を検出した。この研究は進行中であり、実験が成功したという明確にわかる実験結果はまだ得られていないが、PzFlex による音響波伝搬のシミュレーションを利用して再構築した $10\ \text{GHz}$ の内部音響場の像では散乱体のポリスチレンビーズの位置を明確に表すことができた(図3)。この試料配置は、既存の光学クライオスタット装置内に組み込むことができる。周波数が高くなるにつれて大きくなる超音波減衰の影響を、極低温で実験することで抑え込むことができるので、超音波 CT の高周波数化による高空間分解能化に対する発展が期待できる研究方法である。

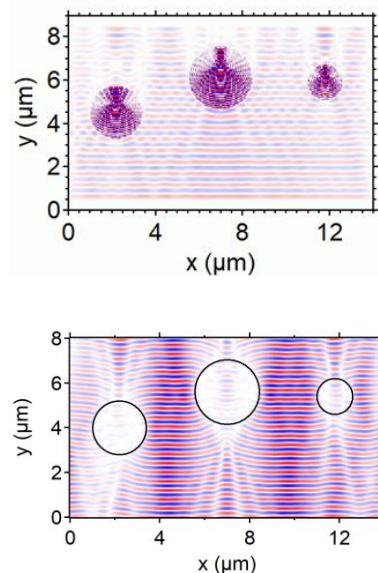


図3. 上：音響波伝搬シミュレーションから得た音響場。下：ホログラフィ法によって再構築した音響場。

(3) GHz 音響バルク波 CT

固体内のサブミクロン構造をまとめてイメージングするため、 $100\ \text{GHz}$ 付近の周波数で超音波 CT を実施した。試料として、サブミクロンスケールの微細な穴が軸に沿って空いているシリカガラスの直径約 $5\ \mu\text{m}$ ミクロン円筒形ナノファイバーを選択した。高融点であるタングステン薄膜でナノファイバーを均一にコーティングし、それぞれサブミクロンサイズのポンプ光とプローブ光のスポット位置を円筒の表面に沿って角度走査し、バルク縦音波を局所的に励起および検出した。ゴニオメータを利用して円筒形の試料軸とそれに垂直な光線の両方を回転させる実験装置を開発した。この実験の主な技術的課題は、過剰な吸収されたレーザーパルスエネルギーによってタングステン膜を損傷することを避けつつ、十分な信号対雑音比で散乱音波を検出することである。この研究は進行中である。

(4) GHz 音響波による透明物質中の機械的性質のイメージング

透明試料中をピコ秒音響波を伝搬すると、その光反射率は、試料の表面や界面で反射した光とピコ秒音響パルスによって反射(ブリルアン散乱)された光の干渉によって、時間領域で振

動する（ブリルアン振動）。その振動数は、物質中の屈折率と音速、プローブ光の波長と試料への入射角に依存する。この振動数から物質中の屈折率を一定値の既知の値と仮定することで、物質中の音速の深さ方向のマッピングをする方法は、時間領域ブリルアン散乱法として 2010 年代からいくつかの研究が発表されてきた。しかし、屈折率も深さ方向にマッピングするためには、複数の入射角度による測定が必要となることが分かっており、それによって測定系が複雑になり測定ごとの光学系の組み換えが必要となっていた。

我々はプローブ光の入射角を走査する新たな簡便な方法を開発した。それは高開口数の対物レンズを使い、プローブ光を細い平行光線にしてその光路を平行移動させ、プローブ光が対物レンズの開口に入る位置を変えることで試料への入射角を変化させる方法である。この方法では、各入射位置での光スポット位置が一致するため、入射角を変化させる度に光軸調整やピント合わせをし直す必要がない。我々はこの方法を使って石英ガラス試料で 0–50 度の入射角範囲でブリルアン振動を測定することに成功し、そこから得られた音速や屈折率は石英ガラスの文献値と一致した。この方法は容易に 3 次元測定にも拡張でき、透明試料内部の音速と屈折率の分布を、深さ方向（超音波の伝搬方向）に数百 nm、横方向（プローブ光のスポットの広がり方向）に数 μm の分解能で得ることが可能な新しい計測手段となる。

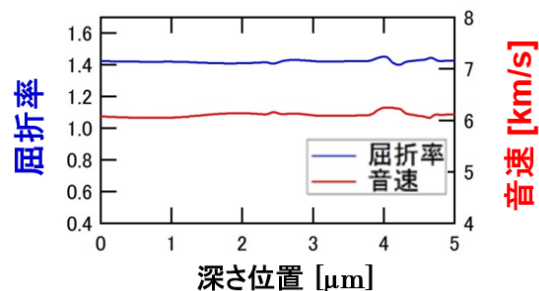


図 4. プローブ光の角度走査時間領域ブリルアン散乱法で測定した、石英ガラス中の屈折率および音速の分布。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 9 件)

- ① Q Xie, S. Mezil, P. H. Otsuka, M. Tomoda, J. Laurant, O. Matsuda, Z. Shen and O. B. Wright, “Imaging gigahertz zero-group-velocity Lamb waves,” *Nature Communications*, Vol. 10, pp. 2228-1-7 (2019) DOI:10.1038/s41467-019-10085-4 (査読あり)
- ② E. Bok, J. J. Park, H. Choi, C. K. Han, O. B. Wright, and S. H. Lee, “Metasurface for Water-to-Air Sound Transmission,” *Physical Review Letters*, Vol. 120, pp. 044302-1-6 (2018) DOI:10.1103/PhysRevLett.120.044302 (査読あり)
- ③ P. H. Otsuka, S. Mezil, O. Matsuda, M. Tomoda, A. A. Maznev, T. Gan, N. Fang, N. Boechler, V. E. Gusev, and O. B. Wright, “Time-domain imaging of gigahertz surface waves on an acoustic metamaterial”, *New Journal of Physics*, Vol. 20, pp. 013026-1-12 (2018) DOI:10.1088/1367-263-/aa9298 (査読あり)
- ④ S. Mezil, K. Fujita, P. H. Otsuka, M. Tomoda, M. Clark, O. B. Wright, and O. Matsuda, “Active chiral control of GHz acoustic whispering-gallery modes”, *Applied Physics Letters*, Vol. 111, pp. 144103-1-4 (2017) DOI:10.1063/1.4994886 (査読あり)
- ⑤ Y. Imade, R. Ulbricht, M. Tomoda, O. Matsuda, G. Seniutinas, S. Juodkakis, and O. B. Wright, “Gigahertz optomechanical modulation by split-ring-resonator nanophotonics meta-atom arrays”, *NANO Letters*, Vol. 17, pp. 6684-6689 (2017) DOI:10.1021/acs.nanolett.7b02663 (査読あり)
- ⑥ R. Ulbricht, H. Sakuma, Y. Imade, P. H. Otsuka, M. Tomoda, O. Matsuda, H. Kim, G. -W. Park, and O. B. Wright, “Elucidating gigahertz acoustic modulation of extraordinary optical transmission through a two-dimensional array of nano-holes,” *Applied Physics Letters*, Vol. 110, pp. 91910-1-5 (2017) DOI:10.1063/1.4977430 (査読あり)
- ⑦ A. A. Maznev and O. B. Wright, “Upholding the diffraction limit in the focusing of light and sound,” *Wave Motion*, Vol. 68, pp. 182-189 (2017) DOI:10.1016/j.wavemot.2016.09.012 (査読あり)
- ⑧ S. Mezil, K. Chonan, P. H. Otsuka, M. Tomoda, O. Matsuda, S. H. Lee, and O. B. Wright, “Extraordinary transmission of gigahertz surface acoustic waves,” *Scientific Reports*, Vol. 6, pp. 33380-1-11 (2016) DOI:10.1038/srep33380 (査読あり)
- ⑨ T. Dehoux, K. Ishikawa, P. H. Otsuka, M. Tomoda, O. Matsuda, M. Fujiwara, S. Takeuchi, I. A. Veres, V. E. Gusev, and O. B. Wright, “Optical tracking of picosecond coherent phonon pulse focusing inside a sub-micron object,” *Light Science & Applications*, Vol. 5, pp. e16082 (2016) DOI:10.1038/lsa.2016.82 (査読あり)

〔学会発表〕（計 59 件）

- ① O. B. Wright, “Quantitative GHz ultrasonic imaging of biological cells and transparent structures,” IEEE International Ultrasonic Symposium, Kobem Japan, Oct. 22-25, 2018（招待講演）
- ② S. Mezil, P. H. Otsuka, K. Miyoshi, M. Tomoda, O. Matsuda, and O. B. Wright, “Picosecond acoustic computed tomography,” 19th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Bilbao, Spain, July 16-20, 2017
- ③ O. B. Wright, “Watching gigahertz acoustic waves confined in cavities,” 5th Joint Meeting of the Acousical Society of America and Acoustical Society of Japan, Hawaii, USA, Nov.28-Dec.2 2016（招待講演）

他：国際学会 41 件（うち招待講演 13 件）、国内学会 15 件

〔その他〕

ホームページ <http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/j-index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：松田 理
ローマ字氏名：(MATSUDA, Osamu)
所属研究機関名：北海道大学
部局名：大学院工学研究院
職名：准教授
研究者番号：30239024

研究分担者氏名：友田 基信
ローマ字氏名：(TOMODA, Motonobu)
所属研究機関名：北海道大学
部局名：大学院工学研究院
職名：助教
研究者番号：30344485

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：Paul H. Otsuka
所属・職名：北海道大学大学院工学研究院・研究員

研究協力者氏名：Sylvain Mezil
所属・職名：北海道大学大学院工学研究院・JSPS 外国人研究員

研究協力者氏名：Theabout Devaux
所属・職名：北海道大学大学院工学研究院・JSPS 外国人特別研究員

研究協力者氏名：Vitalyi E. Gusev
所属・職名：Le Mans 大学（フランス）・教授

研究協力者氏名：Roberto Li Voti
所属・職名：Roma 大学（イタリア）・准教授

研究協力者氏名：Saulius Juodkazis
所属・職名：Swinburne University of Technology（オーストラリア）・教授

研究協力者氏名：Alex A. Maznev
所属・職名：Massachusetts Institute of Technology（アメリカ合衆国）・研究員

研究協力者氏名：Thomas Dehoux

所属・職名: Lyon 第 1 大学 (フランス) ・ 研究員

研究協力者氏名：Sam H. Lee

所属・職名: Yonsei 大学 (韓国) ・ 准教授

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。