

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25246030

研究課題名(和文) GHz帯音響メタマテリアルの創成とその応用

研究課題名(英文) Construction and application of GHz acoustic metamaterials

研究代表者

O・B Wright (Wright, Oliver)

北海道大学・工学(系)研究科(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) 33,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、GHz音響メタマテリアル中で周波数1-100GHzで波長100nm以下のコヒーレントフォノンを光励起し、超短時間(1ps)で微小スケール(20-50nm)でバルク音響波と表面音響波を制御することである。この研究は音響メタマテリアル分野をナノスケールサイズに拡張し新しいナノスケールの音響顕微鏡への開発に結びつくものである。GHz音響メタマテリアルの設計や、GHz異常透過やメタマテリアル共振器、サブ波長集束、GHz光機械メタマテリアルについての研究を行った。さらにこの研究を通してより低周波数での音響に関する多数の付属的な成果も得られた。

研究成果の概要(英文)：We investigate gigahertz acoustic metamaterials, extending them to the nanoscale and thus facilitating the development of new nanoscale acoustic microscopies. The aim is to optically generate coherent phonons with frequencies ~1-100 GHz and wavelengths down to ~100 nm in nano-metamaterials to control bulk and surface acoustic waves on very short temporal (~1 ps) and spatial (~20-50 nm) scales. Applications include solid-state super-lensing, extraordinary transmission, negative refraction, surface acoustic wave cloaking, metamaterial resonators and hybrid opto-mechanical materials. We concentrate on three main topics: 1. Design of GHz acoustic metamaterials, 2. GHz extraordinary transmission, metamaterial resonators, and deep-sub-wavelength focusing, 3. Hybrid GHz opto-mechanical metamaterials. During the course of this work a number of supplementary applications were conceived at lower frequencies.

研究分野：フォノン物性、光物性

キーワード：音響メタマテリアル ピコ秒超音波 フォノン 異常透過 負の質量密度 負の弾性率 イメージング
音響顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

GHz 音響メタマテリアルの研究を行い、それによって音響メタマテリアルの分野をナノスケールまで拡張することを目的とする。ナノ構造をもつメタマテリアル中に、100GHz までの周波数と 100nm 以下までの波長をもつコヒーレントフォノンを光励起し、今までにない時間 (約 1 ps)・空間 (約 20~50 nm) スケールで、バルク音響波と表面音響波を制御する。この研究は、新しいナノスケール音響顕微鏡の開発に直接結びつくものである。

2. 研究の目的

GHz 音響メタマテリアルを創成し、それらを固体の音響レンズや、異常透過、負の屈折、表面音響波のクローキング、メタマテリアル共振器、ハイブリッド光学機械材料に応用し、最終的にはナノスケール音響顕微鏡の新しい展望に発展させることである。特に以下のトピックに着目する。

(1) GHz 音響メタマテリアルの設計 :

1 GHz 周波数での新しい 2 次元ナノ構造の表面音響メタマテリアルの開発を狙った。この音響メタマテリアルでは、負の屈折やサブ波長 (サブ λ) 集束をさせるため、有効密度が負、有効体積弾性率と有効ずれ弾性率が負、有効密度と有効弾性率の両方が負 (ダブルネガティブ)、両方が正 (ダブルポジティブ) を実現する。

(2) GHz 音響異常透過 :

GHz の固体のシステム中に縦波 ($\lambda \sim 300$ nm) と表面音響波 ($\lambda \sim 10\mu\text{m}$) の両方において、著しく大きく (1000 倍以上)、 $\lambda/10$ 以下の領域に音響エネルギーを集中させることに最終的な目標を置く。これは音響顕微鏡や近接場センシングへの応用が考えられる。

(3) ハイブリッド GHz 光学機械メタマテリアルとその拡張 :

スプリットリングデバイスを含むハイブリッド電磁音響メタマテリアルの開発を目標とする。これは、表面音響波や板波の GHz クローキングや非等方的な GHz 音響メタマテリアルへの応用が考えられる。

(4) 低周波数音響メタマテリアル

更に、より低い周波数帯にも使えるいくつかの付随的な研究成果も期待される。

3. 研究の方法

高周波数の音響実験を、ピコ秒超音波を励起する光パルス (ポンプ光) と、表面変位や屈折率変化を検出する遅延させた検出光パルス (プローブ光) を使って行う。試料上のプローブ光のスポットは、我々が以前に開発

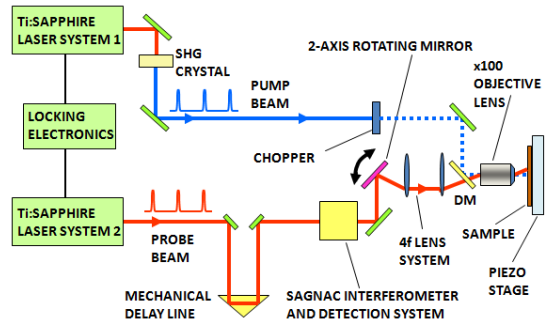


図1 音響メタマテリアルの GHz 表面波イメージングシステム概念図

した表面音響波測定用の共焦点の走査システムを使って 2 次元走査され、試料の表面音響波や曲げ振動波のイメージを生み出す。このシステムの概念図を図 1 に示す。

また音響や光学の商用ソフトウェアである PZFlex や COMSOL Multiphysics を使ってシミュレーションも行う。

さらに高周波数の実験に加え、低周波数での音響メタマテリアルの研究も行う。

4. 研究成果

(1) GHz 音響メタマテリアルの設計 :

① GHz 曲げ振動メタマテリアル

板の曲げ振動に対して、負の有効密度と負の弾性率を併せ持つ音響メタマテリアルを考案した。解析的な手法を用いて板の表面に共振要素を並べた構造を発表した [雑誌論文

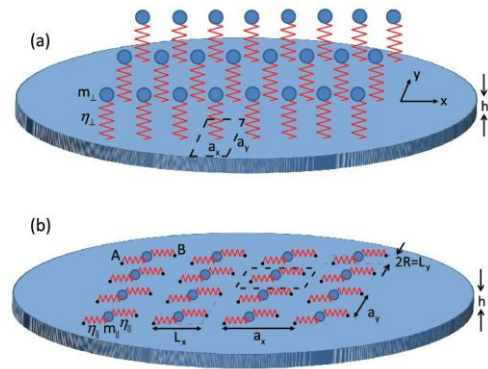


図2 曲げ振動波について (a) 負の有効密度と (b) 負の有効弾性率をもつ質点とバネからなる構造。

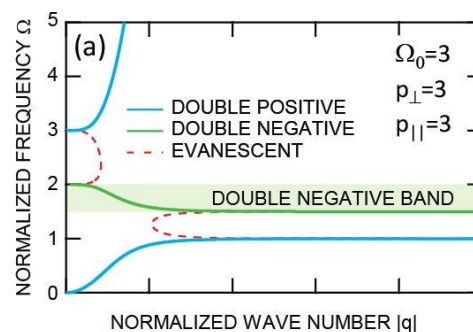


図3 図2で示した構造を組み合わせた場合の分散関係。ダブルネガティブバンドとなる周波数帯が存在する。

⑨]. 負の有効密度は板に対して垂直に振動する共振要素によって達成でき、負の弾性率は板の面内方向の力に対して回転するような共振要素によって実現される。この研究は板の曲げ振動波を制御するようなダブルネガティブ音響メタプレートの実現に結びつくであろう。

図2(a)と(b)に、それぞれ負の密度と負の弾性率をもつための基本的な構造を示す。図3にそれぞれの構成要素を合わせた場合の規格化した分散関係を示す。

さらに、シミュレーションによって実際にGHz領域で実現可能と思われる構造を設計した場合についての分散関係を求めた。現在は、より容易に製作可能な構造の設計と、シミュレーションや実験から得られた分散関係から有効密度と有効弾性率を求める方法を模索している。この研究の応用としては、新しいタイプの音響吸収素子が考えられる。

② GHz 表面音響波メタ材料

ガラス基板上に直径 $1\ \mu\text{m}$ のガラス球が1層で敷き詰められたシステムの研究を行った。このGHz音響メタ材料上を伝搬する表面音響波の伝搬を時間空間領域でイメージし、結果を時空間フーリエ変換することで分散関係を初めて得た。この際に、新たに開発した任意周波数イメージングの手法を使った[雑誌論文④⑫]。

図4に実験で得た分散関係を示す。3つのメタ材料ギャップが観測された。これらのギャップを説明できるモデルを現在考察しているところである。この研究の応用としては、定量的なメタ材料評価の技術が考えられる。

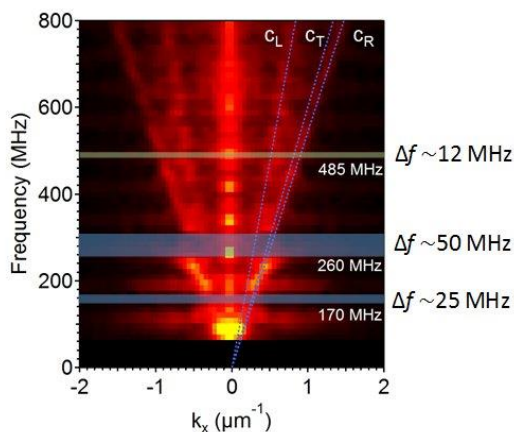


図4 ガラスマイクロ球が敷き詰められたGHz音響メタ材料を伝搬する表面音響波の動画を時間空間フーリエ変換して得た分散関係。

(2) GHz 音響異常透過:

波動の異常透過、すなわち単純に開口部分の幾何構造から予測されるよりも、はるかに大きな量が透過することは、今まではバルクの内部でしか研究されていなかった。2次元的に平坦な表面に閉じ込められた波についての新しいタイプの異常透過現象について

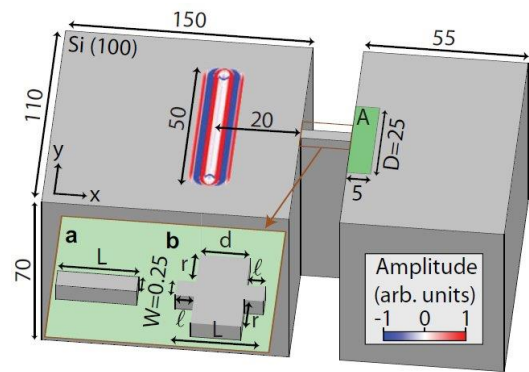


図5 表面音響波の異常透過についてシミュレーションした構造の概念図。挿入図(a)は共振器なしの直線の橋の場合、挿入図(b)は共振器を付けた場合である。

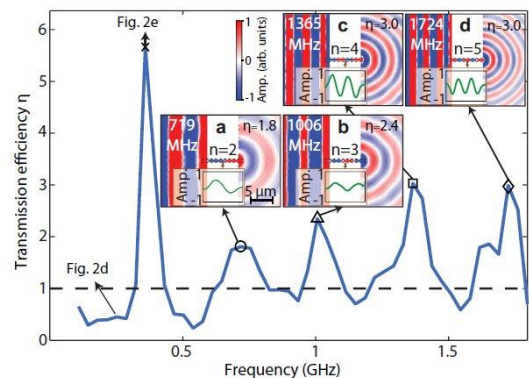


図6 数値計算で求めた直線の橋の場合の透過効率スペクトル。橋の長さ $L=7\ \mu\text{m}$ 、幅 $w=0.25\ \mu\text{m}$ で計算した。挿入図は各周波数でのある瞬間の面外方向への表面変位のプロットである。

研究を行った。GHz領域(音響波の波長にしておよそ $5\ \mu\text{m}$)の音響数値シミュレーションを使って、2つのシリコンのブロックを繋ぐ細い橋を伝わる表面音響波の伝搬をたどった。この橋は、幅を波長よりもはるかに細くしており、長さや、共振器を付けた場合や付けなかった様々な場合を試みた。この構造におけるいくつかの共振モードでは、音響異常透過現象が観測され、その場合には透過係数(増幅強度)はある2つのケースではそれぞれ10や17にも上ることが分かった。

図5にこの計算で使った構造を、図6に結果の一例として単純な細い橋の構造の場合の透過係数を周波数の関数として示す。

我々はどういうようにして共振器形状と橋の大きさが異常透過係数に影響を与えるかを示した。この応用としては、新しい音響メタ材料やサブ波長イメージングが考えられる。この研究結果は、現在 Scientific Reports 誌へ投稿され審査中である(Extraordinary transmission of gigahertz surface acoustic waves, S. Mezil et al.)。

我々はまた、100 GHz周波数においてバルク縦波の音響異常透過についてもシミュレーションで研究を行った。円形の穴があいた薄膜構造での初期的な結果を得ており、それでも異常透過が起こることを確認した。

(3) ハイブリッド GHz 光学機械メタマテリアルとその拡張：

図7に設計と電子顕微鏡像を示す金でできた厚み 60 nm のスプリットリング共振器 (SRR) 列を作製し、実験を行った。この構造は光学的共鳴が、我々が所有するフェムト秒レーザーの波長 800 nm 付近の近赤外線に対して起こるように設計されている。

時間領域測定での反射率変化の結果を図8に示す。これはポンプ光の波長 400 nm、プローブ光の波長 800 nm でそれぞれ垂直入射で、それぞれの直線偏光の向きを試料の軸に合わせて変えた場合において、SRR の共振を明らかにするためフーリエ変換を行ったものである。

プローブ光が X 方向の場合により強い反応が観測できた。これはこの方向の偏光が SRR の電磁モードに対してより強く結合するからである。10 GHz 以下の共振振動を解釈するために、COMSOL および PZFlex を使ってシミュレーションを行い、実験で得られた振動と良い一致を得た。この研究の応用としては、高周波数の音響光学変調器が考えられる。この研究は現在、Applied Physics Letters 誌へ投稿するための最終準備段階にある。

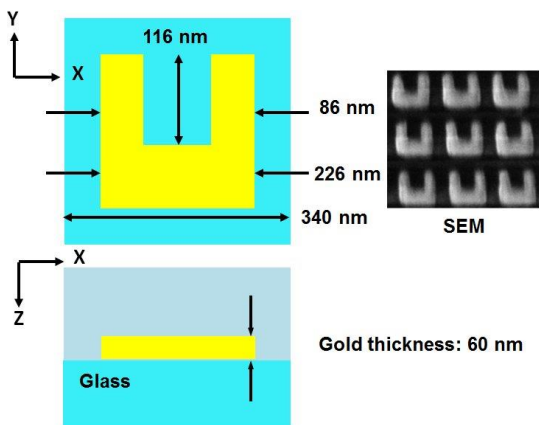


図7 作製したスプリットリング共振器の単位構造と、電子顕微鏡像

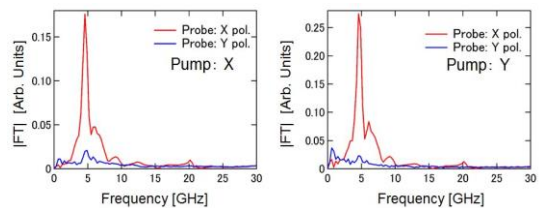


図8 ポンプ光とプローブ光の直線偏光の方向をそれぞれ変えて測定した場合の反射率変化のフーリエ振幅

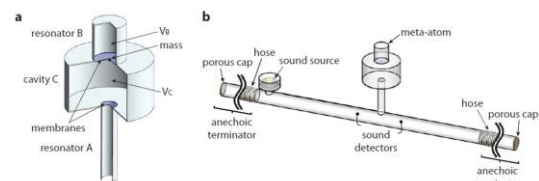


図9 (a) 2つの波長以下のサイズの膜からなる共振器でできた音響メタ原子 (b) 透過係数とパルス遅延計測のための実験装置図

(4) 低周波数音響メタマテリアル：

① メタ原子を伝搬する波束の非連続性

メタ表面における位相の非連続性によって新しいタイプの反射や屈折が起こる。波長以下の厚みをもつメタ原子における波束の非連続性伝搬の理論と実験を行った。

図9に実験装置の概念図を示す。電磁誘導透過に基づく音源用と吸収用の音響発信器からなる調節可能な設計によって、室温でのメタマテリアルシステムにおいて -55 ms から 40 ms の範囲の群遅延、 $-28 < t_g/l < 20$ の規格化した時間シフトが観測された。ここで t_g は群遅延、 l は音響波の波長である。この結果は Scientific Reports 誌に掲載された[雑誌論文⑩]。応用としては、薄型音響メタ表面レンズが考えられる。

② 負の有効密度を持つ低周波数メタマテリアルの実現

目視で動きが観察できる低周波数で負の有効密度を持つブロックとバネからなる音響メタマテリアルを作製した。その写真を図10に載せる。

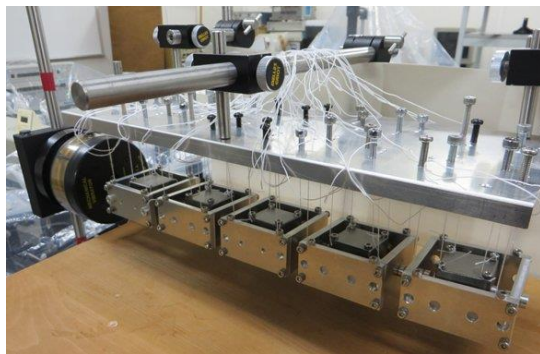


図10 3 Hz程度の低周波数で負の有効質量をもつように動作する音響メタマテリアルの写真

③ 音響メタマテリアルのレビュー論文

音響メタマテリアルの単純で新しい視点に基づく理論を紹介する論文を発表した[雑誌論文③]。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計15件)

① A. A. Maznev and O. B. Wright

Upholding the diffraction limit in the focusing of light and sound

<http://arxiv.org/abs/1602.07958> [physics.optics] 2016

② 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 Sci. Appl. 査読有 5, 16082 (2016)

DOI: 10.1038/lsa.2016.82

③ S. H. Lee and O. B. Wright, ‘On the origin of negative density and modulus in acoustic

metamaterials', Phys. Rev. B 査読有 **93**, 024302 (2016) DOI: 10.1103/PhysRevB.93.024302

④ O. Matsuda, S. Kaneko, O. B. Wright, and M. Tomoda, 'Time-resolved gigahertz acoustic wave imaging at arbitrary frequencies', IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 査読有 **62**, 584-595 (2015)

DOI: 10.1109/TUFFC.2014.006369

⑤ S. Mezil, P. H. Otsuka, S. Kaneko, O. B. Wright, M. Tomoda and O. Matsuda, 'Imaging arbitrary acoustic whispering-gallery modes in the GHz range with ultrashort light pulses', Opt. Lett. 査読有 **40**, 2157-2160 (2015)

DOI: 10.1364/OL.40.002157

⑥ O. B. Wright and O. Matsuda, 'Watching surface waves in phononic crystals', Phil. Trans. Roy. Soc. A 査読有 **373**, 20140364 (2015)

DOI: 10.1098/rsta.2014.0364

⑦ P. H. Otsuka, R. Chinbe, M. Tomoda, O. Matsuda, I. A. Veres, J. H. Lee, J. B. Yoon and O. B. Wright, 'Effect of excitation point on surface phonon fields in phononic crystals in real- and k-space', J. Appl. Phys. 査読有 **117**, 245308-1-6 (2015) DOI: 10.1063/1.4922350

⑧ O. Matsuda, M. C. Larciprete, R. Li Voti and O. B. Wright, 'Fundamentals of laser picosecond acoustics', Ultrasonics 査読有 **56**, 3-20 (2015)

DOI: 10.1016/j.ultras.2014.06.005

⑨ V. E. Gusev and O. B. Wright, 'Double negative acoustic flexural metamaterial', New. J. Phys. 査読有 **16**, 123053-1-12 (2014)

DOI: 10.1088/1367-2630/16/12/123053

⑩ I. Yoo, C. K. Han, D. S. Shin, K. J. B. Lee, J. W. Wu, H. S. Moon, O. B. Wright and S. H. Lee, 'Spatiotemporal path discontinuities of wavepackets propagating across a meta-atom', Sci. Rep. 査読有 **4**, 4634-1-6 (2014)

DOI: 10.1038/srep04634

⑪ M. Tomoda, S. Matsueda, P. H. Otsuka, O. Matsuda, I. A. Veres, V. E. Gusev and O. B. Wright, 'Imaging waves in microscopic wedges', New. J. Phys. 査読有 **16**, 103029-1-9 (2014)

DOI: 10.1088/1367-2630/16/10/103029

⑫ S. Kaneko, M. Tomoda, and O. Matsuda, 'A method for the frequency control in time-resolved two-dimensional gigahertz surface acoustic wave imaging', AIP Adv. 査読有 **4**, 017124 (2014) DOI: 10.1063/1.4863195

⑬ P. H. Otsuka, K. Nanri, O. Matsuda, M. Tomoda, D. M. Profunser, I. A. Veres, S. Danworaphong, A. Khelif, S. Benchabane, V. Laude and O. B. Wright, 'Broadband evolution of phononic-crystal waveguide eigenstates in real-

and k-spaces', Sci. Rep. 査読有 **3**, 3351-1-6 (2013) DOI: 10.1038/srep03351

⑭ O. Matsuda, M. Tomoda, T. Tachizaki, S. Koiwa, A. Ono, K. Aoki, R. P. Beardsley, and O. B. Wright, 'Ultrafast ellipsometric interferometry for direct detection of coherent-phonon strain pulse profiles', J. Opt. Soc. Am. B 査読有 **30**, 1911-1921 (2013)

DOI: 10.1364/JOSAB.30.001911

⑮ J. J. Park, K. J. B. Lee, O. B. Wright, M. K. Jung and S. H. Lee, 'Giant acoustic concentration by extraordinary transmission in zero-mass metamaterials', Phys. Rev. Lett. 査読有 **110**, 244302-1-5 (2013)

DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.24302

[学会発表] (計 26 件)

① O. B. Wright, 'Watching waves confined in phononic cavities', The 4th International Workshop on Microcavities and Their Applications, Sapporo, Japan, Dec. 1-4, 2015 (invited)

② O. B. Wright, 'Extraordinary applications of acoustic metamaterials', Proc. ISOT 2015, International Conference on Optomechatronic Technologies, Neuchatel, Switzerland, Oct. 14-16, 2015 (invited)

③ O. B. Wright, 'Imaging acoustic waves on complex phononic and metamaterial surfaces', Proc. 18th International Conference Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Novi Sad, Serbia Sept. 6-10, 2015 (invited)

④ O. B. Wright, 'Acoustic waves on complex surfaces and in metamaterials', Ecole de Physique des Houches, Son et Lumiere 2015, Phononics and Photonics at the Nanoscale, Les Houches, France, Feb. 16-17, 2015 (invited)

⑤ O. B. Wright, 'Watching surface waves in phononic crystals', Proc. Spatial transformations: from fundamentals to applications, Theo Murphy International Scientific Meeting, Milton Keynes, U.K., Jan. 26-27, 2015 (plenary presentation)

⑥ O. B. Wright, 'Using ultrafast optics to watch surface waves in phononic crystals and acoustic metamaterials', Proc. 15th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan, Dec. 16-17, 2014, pp. 43-44 (plenary presentation)

⑦ O. B. Wright, 'Optoacoustic animation of surface acoustic waves', Proc. ISOT 2013, International Conference on Optomechatronic Technologies, Jeju Island, Korea, Oct. 27-30, 2013, pp. 11-12 (plenary presentation)

⑧ O. B. Wright, 'Ultrafast imaging of confined

surface acoustic waves in real space and k-space',
Proc. 17th International Conference
Photoacoustic and Photothermal Phenomena,
Suzhou, China, Oct. 20-24, 2013, p. 45 (plenary
presentation)

他 18件

〔図書〕(計2件)

① O. Matsuda and O. B. Wright, 'Optical
characterization of phononic crystals in the time
domain' in "Phononic Crystals, Fundamentals
and Applications", 査読有 Ch. 7, eds. A. Khelif
and A. Adibi, pp.191-213 (Springer, 2015)

② O. Matsuda and O. B. Wright, 'Generation
and observation of GHz-THz acoustic waves in
thin films and microstructures using optical
methods', in "Frontiers in Optical Methods", 査
読有 Ch. 7, eds. K. Shudo, I. Katayama, and S.
Ohno, Springer Series in Optical Sciences 180,
pp.129-151 (Springer, Heidelberg, 2014)

〔その他〕

ホームページ

<http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

O・B Wright (WRIGHT, Oliver B.)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：90281790

(2) 研究分担者

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

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) 研究協力者

Paul Otsuka
北海道大学・大学院工学研究院・研究員

Sylvain Mezil
北海道大学・大学院工学研究院・研究院

Vitali Gusev
Maine University (フランス)・教授

Sam Hyeon Lee
Yonsei University (韓国)・教授

L. Kobus Kuipers
FOM-institute AMOLF (オランダ)・教授