

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01843

研究課題名(和文) MEMSキラルメタマテリアルによるテラヘルツ分光方法の研究

研究課題名(英文) Study on THz Spectroscopy Using MEMS Chiral Metamaterial

研究代表者

菅 哲朗 (Kan, Tetsuo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30504815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：THz周波数帯における振動円偏光二色スペクトル計測の実現のために、円偏光と強力に共鳴する3次元形状のキラル光共鳴体構造をMEMS可変メタマテリアルを形成した。目的達成には、MEMS可変メタマテリアルを大変形する必要があるため、従来課題であった安定的な大変形方法の生成に中心的に取り組んだ。安定的な大変形方法の実現のために、変形方法由来の不安定性の除去とシリコンの優れた変形特性に着目し、シリコン基板に製作したらせん構造を機械的に引っ張り上げる駆動方法を着想した。大変形を可能とする構造の設計製作、そして、機械的駆動法による変形量と変形形状について検証し、製作した構造での応答を計算により明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

THz周波数帯は、近年大きな注目を集めている電磁波の周波数帯である。THz周波数帯には多くの分子の振動吸収が存在するが、とくに左右円偏光に対する吸収特性の差である振動円偏光二色性スペクトル(VCD)は、ヘリックス構造など分子構造のキラル構造の情報をもたらすことが知られている。したがって、THz周波数帯において、物質の振動円偏光二色スペクトル計測技術が確立すれば、THz光の長い波長を生かして、タンパク質など大型の3次元分子構造を、結晶化せずに計測できることが期待される。本研究は、これまで微弱であり計測が難しかったTHz VCDの信号増強を行う素子の作製であり、優れた分光方法の確立に貢献する。

研究成果の概要(英文)：To realize vibrational circularly polarized light dichromatic spectroscopy in the THz frequency band, a MEMS tunable metamaterial was formed with a three-dimensional chiral optical resonator structure that resonates strongly with circularly polarized light. In order to achieve the goal, the MEMS tunable metamaterial needs to be deformed significantly, so we focused on the generation of a stable large deformation method, which has been a problem in the past. In order to realize a stable large deformation method, we focused on the elimination of instability from the deformation method and the excellent deformation characteristics of silicon, and came up with a driving method that mechanically pulls up the helical structure fabricated on a silicon substrate. We designed and fabricated a structure that enables large deformation, verified the amount and shape of deformation by the mechanical driving method, and clarified the response of the fabricated structure by calculation.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMS キラルメタマテリアル THz

1. 研究開始当初の背景

THz 周波数帯は、近年大きな注目を集めている電磁波(光)の周波数帯であり、その波長は赤外光よりも長い数 100 μm である。THz 周波数帯には多くの分子の振動吸収スペクトルが存在するが、とくに左右円偏光に対する吸収特性の差である、振動円偏光二色性スペクトル (Vibrational Circular Dichroism) は、ヘリックス構造など分子構造の三次元キラリ構造の情報をもたらすことが知られている。したがって、THz 周波数帯において、物質の振動円偏光二色スペクトル計測技術が確立すれば、THz 光の長い波長を生かして、タンパク質など大型の 3 次元分子構造を、結晶化せずに計測できることが期待される。この分光法はタンパク質の薬理刺激による形状変化などを *in situ* で把握できる、例のない性能をもたらすので、基礎応用両方で大きなポテンシャルを有する。ただし、THz 振動円偏光二色性スペクトル計測は未確立の技術である。これは自然物質の左右円偏光の振動吸収率差がモル吸光度の $10^{-4} \sim 10^{-6}$ と非常に小さいうえに、波長の 4 乗に反比例して減少するため、波長が長い THz 光では信号が微弱となるためである。計測を可能とするためには光源・受光素子・サンプル調整などの点で機能向上が必須だが、とくに、光と物質の相互作用を強め、信号そのものを増強することが最も重要といえる。

このような中、実験室レベルの光源で大きい電場強度を形成可能な、円偏光近接場を用いる方法が有力視されている。金属ナノ微粒などのサブ波長の光共鳴構造で光を回折限界以下のスポットに局所化し、自由空間を伝搬する光の 10^6 倍もの強度の電場を形成できる。円偏光近接場形成には、光共鳴構造体がキラリ構造であることが要求されるので、人工的なサブ波長の金属共鳴体構造である、2 次元メタマテリアルが利用され、可視光領域で振動吸収率差が 10^6 上がった例が報告されている。しかし、THz 周波数帯での同様の試みはまだなされていない。またさらに、キラリメタマテリアルは通常硬い構造なので、自身のキラリティを動的に切り替えることができず、完全な円偏光二色スペクトル計測には、改めてもう片側のキラリ構造を別途用意して計測を行う必要があり、計測の *in situ* 性が失われるという制約がある。このような背景の中、本提案では THz 周波数帯で強力に円偏光と共鳴するキラリ構造の探求について取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究は、THz 周波数帯における振動円偏光二色スペクトル計測の実現のために、強力な円偏光近接場を生む 3 次元キラリ光共鳴体構造により、左右円偏光に対する分子の振動吸収を増強する方法をとる。円偏光と強力に共鳴する 3 次元形状のキラリ光共鳴体構造を MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 可変メタマテリアルで形成し、その近傍に分光対象キラリ分子を配置する。計測時に、メタマテリアルのキラリティを動的に切り替えて、同一試料に対して円偏光近接場光を左円偏光・右円偏光切り替えながら作用させる。このときの透過光を計測し、分子の振動円偏光二色性スペクトルを計測する方法を検討する。強力な円偏光近接場の生成には、MEMS 可変メタマテリアルを大変形する必要があるため、従来課題であった安定的な大変形方法の生成に中心的に取り組んだ。

この背景には、申請者らが実現した、同一の光共鳴構造で、キラリティを対称性良く、なおかつ動的に切り替え可能な MEMS メタマテリアルの技術が存在する。Fig. 1 に示すのは、厚さ 300 nm の薄膜シリコンで形成した、直径 150 μm の平坦渦巻き型の MEMS メタマテリアルである。外部から構造に力がかかることで、上側変形で右ネジ 3 次元構造、下側変形でそれと対称的な左ネジ 3 次元構造を形作る。さらに、本構造の特長として、2 次元のキラリメタマテリアルと比較して、円偏光二色性が 30° と約 10 倍高い値を示し、円偏光との相互作用が桁違いに強いことが

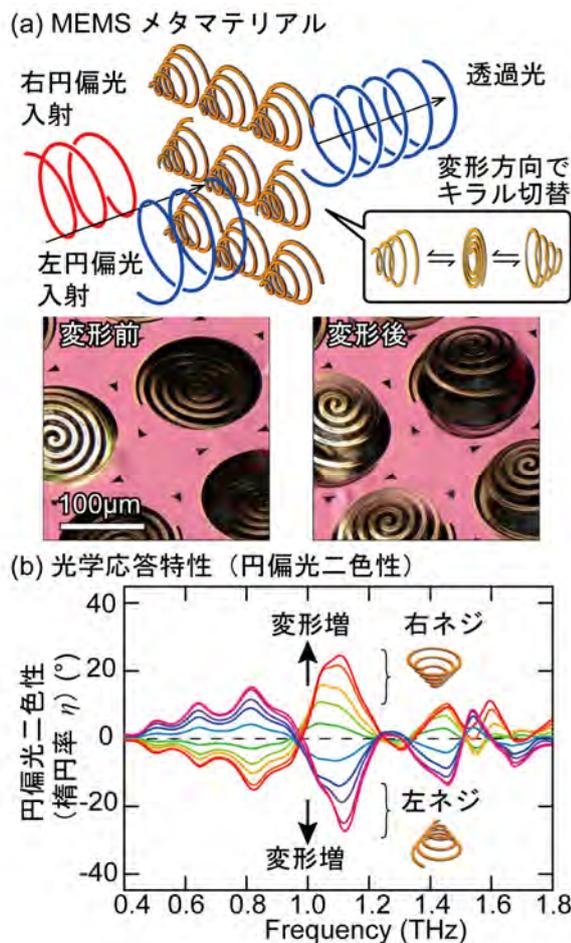


Fig. 1 MEMS メタマテリアル

わかっている (Fig. 1(b))。計算的な検証から、渦巻き構造が高さ方向に $300\ \mu\text{m}$ 程度伸びた構造になると、強い円偏光応答性が得られることが分かっているが、研究スタート時点では安定的に変形できる大きさが $60\ \mu\text{m}$ 程度であったため、安定的な大変形方法の実現が重要な研究課題となる。

3. 研究の方法

安定的な大変形方法の実現のために、変形方法由来の不安定性の除去とシリコン (Si) の優れた変形特性に着目し、Si 基板上に製作したらせん構造を機械的に引っ張り上げる機械的駆動方法を提案し、 $300\ \mu\text{m}$ の面外変形の実現を目指した (Fig. 2(a))。具体的には、らせん構造の中心のみを他の基板に接合し、らせん構造を製作した基板ともう一方の基板との間隔を広げることによって、らせん構造をフラットな状態から、面外方向に連続的に変形させるデバイス構成である。提案方法はらせん構造を直接引っ張り上げる変形方法であるため、変形方法由来の不安定性が無く、らせん構造が破断しない範囲で安定した変形が見込める。また、Si は鋼と同程度のヤング率でありながら、引張強度は鋼の3倍以上と優れた変形能力を持っていることから、提案方法においてらせん構造の安定的な大変形が期待できる。そこで、大変形を可能とする構造の設計製作、そして、機械的駆動法による変形量と変形形状について検証し、製作した構造での応答をシミュレーションにより明らかにした。また、最適な変形構造を探索するために、GHz 帯でのラージスケールでの構造試作を行い、らせん構造の改善方法についても検証を行った。

4. 研究成果

本研究で試作したらせん構造の寸法は Fig. 3(a)のとおりである。この場合、接合対象であるもう一方の基板を Fig. 2(a)から排除し、らせん構造が見えるようにして寸法を記載している。Fig. 2(b)は引っ張り上げ用のもう一方の基板を含めた単一のらせん構造の断面図であり、Fig. 2(a)の A-A 断面に相当する。らせん形状はアルキメデスのらせんを用いた。らせんの平面形状は $r(\theta) = R_{\max} (\theta_n - \theta) / \theta_n$ の数式で定義される。ここで、 r が動径、 θ は方位角、 R_{\max} はらせんの最大半径、 θ_n はらせんの回転数を示す。

試作したアルキメデスのらせんは、 $R_{\max} = 75\ \mu\text{m}$ 、 $\theta_n = 10\pi\ \text{rad}$ とした。最大半径 R_{\max} は 0 。8 THz 付近で大きな偏光効果を示すように設計したものである。 $6\pi\ \text{rad} < \theta < 10\pi\ \text{rad}$ の構造は、 $0\ \text{rad} < \theta < 6\pi\ \text{rad}$ の構造に比べ、らせんの半径が小さく、らせん構造の各断面がねじれることで生じる面外変形が非常に小さい。そのため $6\pi\ \text{rad} < \theta < 10\pi\ \text{rad}$ の構造は光学応答への寄与が見込めない。また、らせんの中心部には、もう一方の基板と接合するための選択的接合領域として、Si 製のディスク部分を設ける必要があった。そこで方位角 θ は $0\ \text{rad} < \theta < 6\pi\ \text{rad}$ ($=\theta_{\max}$) とし、残りの領域は接合領域として直径 D は $36\ \mu\text{m}$ で設計した。らせんを構成する腕のビーム幅 b は $5\ \mu\text{m}$ 、Si の厚さ t は $2.5\ \mu\text{m}$ である。らせん部分には表面に伝導層としてクロム (Cr) / 金 (Au) の薄膜を形成した。Au の膜厚は $60\ \text{nm}$ 、Cr の膜厚は $10\ \text{nm}$ で

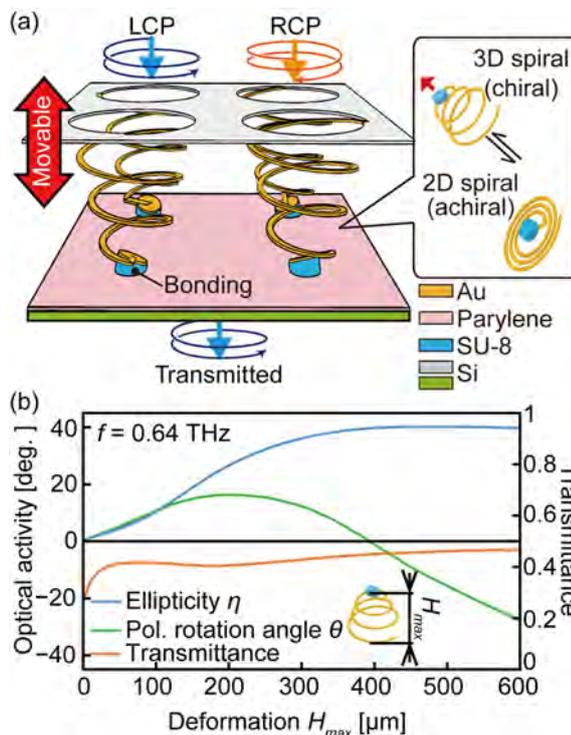


Fig. 2 大変形を可能にする MEMS 構造

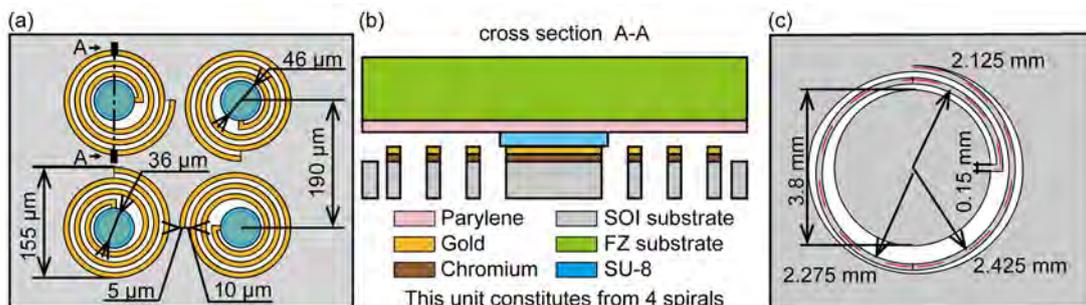


Fig. 3 大変形を可能にする MEMS 構造、(a) Fz-Si 基板を除いたらせん構造の寸法、(b) (a) における A-A 断面の断面図、(c) 上下のチップを拘束するバネの寸法。

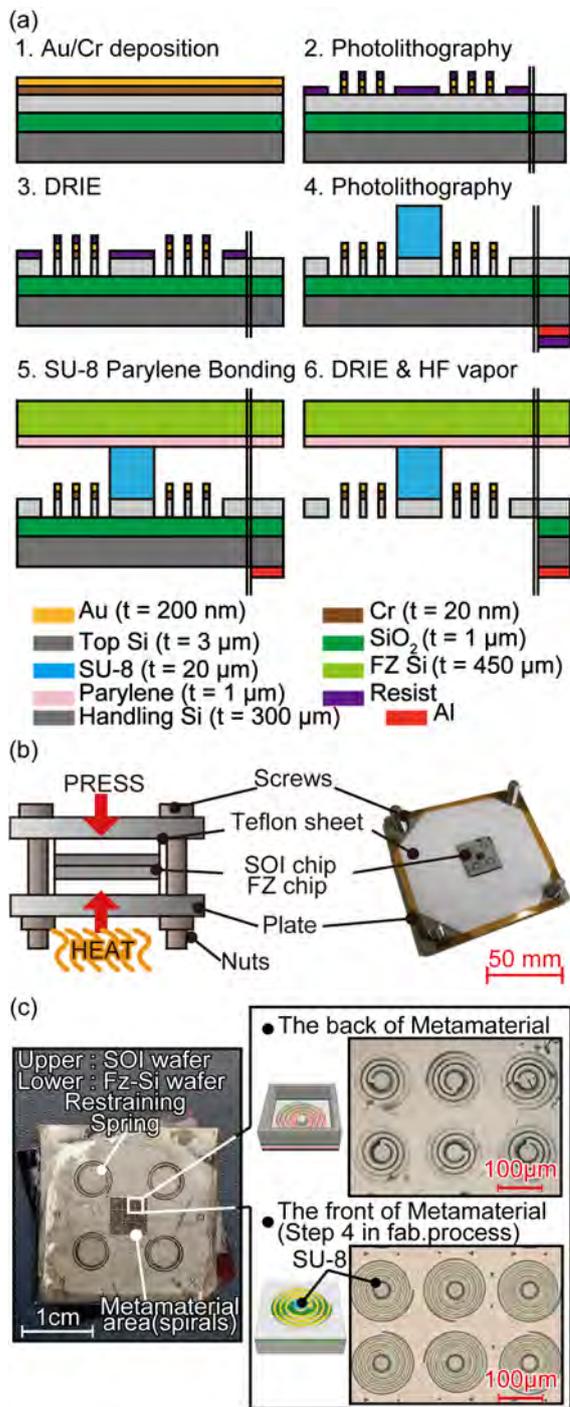


Fig. 4(a) 作製方法、(b) SU-8 とパリエンをを用いた低温接合の接合方法、(c) 製作したスパイラルメタマテリアルとその顕微鏡画像。

断応力は 2.6 [GPa] と報告されており、サイズ効果の影響により本構造においてせん断応力は低下することが考えられる。最大せん断応力は断面積 $2.6 \mu\text{m}^2$ における単結晶 Si のせん断応力の 1/6 と十分に小さいため、サイズ効果の影響を加味しても、最大せん断応力はせん断強さよりも小さいと考える。そのため、300 μm の変形を許容することが見込める。次に接合強度について検討を行った。接合部にかかる圧力 $P = 2.2 \times 10^{-2}$ [MPa] と算出された。SU-8 とパリエンの接合強度は参考文献より 0.07 [MPa] と報告されており、SU-8-パリエン接合は十分な接合強度を持つことがわかった。以上の計算から、設計したらせん構造は 300 μm の変形においても十分に機能することが試算された。

構造の試作方法について詳細に述べる (Fig. 4)。まず、SOI 基板上に Cr と Au を蒸着した (Fig. 4(a.1))。この SOI 基板上にフォトリソグラフィと RIE を用いてらせん構造を作製し (Fig. 4(a.3))、各マイクロスパイラルと拘束バネの中心に SU-8 接着剤層を形成した (Fig.

ある。設計したらせん構造は Fig. 2(a) のように C₄ 配置したらせん構造を単位構造とし、周期的に配置した。金属共鳴構造を Cr と Au で作っているため、これらの金属と構造体の Si が合金を形成させないように 200°C 以下の低温で接合を行う制約があった。そこで本研究では低温で接合可能な SU-8 とパリエン C によるポリマー接合を用いた。SU-8 はフォトリソグラフィにより高アスペクト比のマイクロサイズの構造を容易にパターンニング可能かつ SU-8 のガラス転移温度以下で接合が可能であるため、接合時に接合部材が変形することで生じる意図しない接合を避けることが可能である。また、SU-8 とパリエンは耐薬品性が高いという利点をもつことから SU-8-パリエン接合は本デバイスに適している手法である。なお、パリエンには複数種類が存在するが、パリエン C は最もスタンダードな種類なので、今回採用した。そのため、選択的接合領域として設けた Si 製ディスクの上に接着層として機能する SU-8 膜のディスクを直径 46 μm で構成した。その際、SU-8 の膜厚は 20 μm とした。このディスク部が Fig. 3(b) に示すように、パリエン膜がコートされたもう一方の基板と接合することで、らせん構造の選択的引っ張り上げを可能とした。

目標である 300 μm の変形を起こしたときに、らせん構造を構成する Si が破断せずに耐えられるか、そしてその際の引っ張り力に対して SU-8 とパリエンの接合強度が十分であるかの 2 点について理論的検討を行った。単結晶 Si を等方性材料と仮定した時、アルキメデスのらせんの面外変形は変形時に各断面がねじれる。このとき印加荷重により生じる長方形断面での最大ねじりモーメントは $\tau_{\text{max}} = 0.445$ [GPa] と試算された。断面積 $2.6 \mu\text{m}^2$ において単結晶 Si のせん断

4(a.4)。また、別の Fz-Si 基板の全面には、パリレンを塗布した。ボルト止め鋼板間に熱と圧力を加えて SOI 基板と FZ-Si 基板に接着した (Fig. 4(a.5)、Fig. 4(b))。印加圧力は 10 MPa、温度は 180°C、工程時間は 40 分であった。最後に、標準的なバルク微細加工によりらせん構造を解放した (Fig. 4(a.6))。

Z 軸ステージと治具を用いて 2 枚の基板間の間隔を広げると、この間隔の拡大により微小らせん構造が面外方向に変形することが確認できた (Fig. 5(a, b))。らせん構造を変形させた時、顕微鏡での観察においてらせん構造の根本の焦点位置が Z 方向に移動し、Si ディスクとらせん構造の根本の焦点位置の距離が広がる。この焦点位置の Z 方向の距離かららせん構造の最大変形を検証した (Fig. 5(c))。らせん構造の上端から下端までの焦点距離が最大で 536 μm になるように変形した。さらにらせん構造を変形させようとしたところ、各らせん構造の根元が破断した。破断はらせん構造の根本で生じる応力によるものであり、らせん構造の厚さ (SOI ウエハの TOP 層) を薄くすることで、より大きな変形が可能になると考えられる。以上のように、目標とする 300 μm の変形を実現した。

光学特性について有限要素解析を行う場合、実デバイスでの変形したらせん構造のモデルが必要となる。コンフォーカル顕微鏡 (オリンパス社製、OLS5000) により、製作したらせん構造の方位角に対するらせん構造の変形量を測定した。らせん構造の面外変形は 67 μm 、150 μm 、215 μm において計測を行った。その結果、各点における変形量を最大変形量で割り正規化した場合、変形量に依存せず、同じ変形形状を取ることが確認できた。

コンフォーカル顕微鏡で計測したらせん構造の立体形状について電磁応答の有限要素解析を行った (Fig. 6)。解析には COMSOL Multiphysics 5.5 を用いた。コンフォーカル顕微鏡により計測をしていない変形量のモデルは 150 μm のノルム化した変形形状に対して最大変形量をかけたデータを用いて計算を行った。その結果、300 μm の変形した時の光学応答は 0.62 THz において透過率 0.48、楕円率 33.5° と実用に十分な光学特性を示すことを確認した。最終的に、実測で強い円偏光二色性を確認するところまでは到達できなかったが、現状の MEMS キラルメタマテリアルの性能を、大幅に向上する技術に目途が付いたと言える。

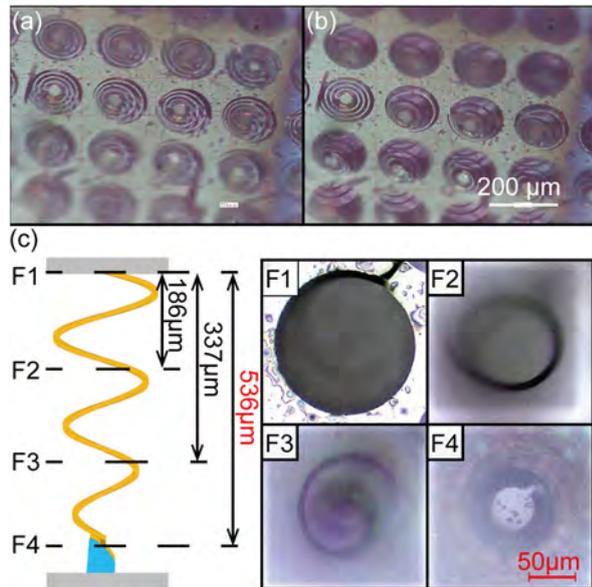


Fig. 5 らせん構造の変形前(a)と変形後(b)を斜めから撮影したマイクロscopeによる画像。(c) 536 μm 変形したらせん構造の各焦点位置における顕微鏡画像。

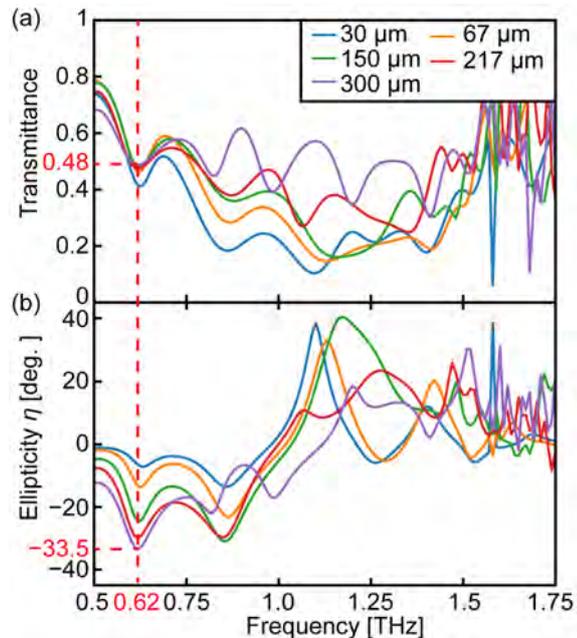


Fig. 6 コンフォーカル顕微鏡で計測をした実際のらせん構造の変形形状をモデル化した構造に対して有限要素解析により計算した透過率(a)、楕円率(b)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0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 Konishi Kuniaki, Kan Tetsuo, Kuwata-Gonokami Makoto	4. 巻 127
2. 論文標題 Tunable and nonlinear metamaterials for controlling circular polarization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 230902 ~ 230902
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0005131	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 Kosuge Takuya, Kan Tetsuo	4. 巻 140
2. 論文標題 Mechanically Deformable 3D Chiral THz Metamaterial	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 170 ~ 176
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejsmas.140.170	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tetsuo Kan
2. 発表標題 MEMS Reconfigurable Chiral Metamaterial for Terahertz Frequency
3. 学会等名 2018 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 徐奔馳, 岩瀬英治
2. 発表標題 平面らせん構造の垂直変形量測定, Vertical Deformation Measurement of Planner Spiral Structure
3. 学会等名 日本機械学会 関東学生会 第58回学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 丸山晃平, 小菅拓也, 菅哲朗
2. 発表標題 らせん状キラルメタマテリアルにおいて一様な立体変形をもたらす構造の研究
3. 学会等名 日本機械学会 関東支部 第27期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Kosuge, Tetsuo Kan, Kuniaki Konishi, Mizuho Matoba, Natsuki Kanda, and Makoto Kuwata-Gonokami
2. 発表標題 Mechanical Large Deformation 3D Chiral THz Metamaterial
3. 学会等名 The 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小菅 拓也, 菅哲朗
2. 発表標題 機械的変形可能な3DキラルTHzメタマテリアル
3. 学会等名 電気学会第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田湧希, 岩瀬英治
2. 発表標題 平面らせん構造の垂直変形特性評価, Vertical Deformation Characterization of Planar Spiral Structure
3. 学会等名 本機械学会 第10回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

菅研究室 http://ms.mi.uec.ac.jp

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	小西 邦昭 (konishi kuniaki) (60543072)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教 (12601)	
研究分担者	神田 夏輝 (kanda natsuki) (60631778)	東京大学・物性研究所・助教 (12601)	
研究分担者	岩瀬 英治 (iwase eiji) (70436559)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	
研究分担者	高橋 英俊 (takahashi hidetoshi) (90625485)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・講師 (32612)	

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