

令和元年5月27日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19034

研究課題名(和文)メタマテリアルとMEMSの融合による量子浮上の検証

研究課題名(英文)Verification of quantum levitation by MEMS metamaterials

研究代表者

富田 知志(TOMITA, Satoshi)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：90360594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：量子浮上を実現するためのメタマテリアルのデザイン及びそれを融合するカンチレバーの仕様を検討した。これに際して金属構造や磁性膜での予備実験及び数値計算を行った。更に微細加工や評価に用いる要素技術についても検討した。そして負屈折率を実現するダブルフィッシュネット(DFN)型メタマテリアルを、片持ち梁のカンチレバーに融合するデザインに決定した。微小電気機械システム(MEMS)で用いられる微細加工技術を駆使し、試料の作製を行った。様々なプロセス条件を試した結果、銀のDFN型メタマテリアル融合カンチレバーの作製には至らなかったが、アルミニウムフィッシュネットを持つカンチレバーの試作に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではメゾスコピック領域で働くカシミール・リフシッツ(CL)斥力を実現するために、メタマテリアルを融合した微小電気機械システム(MEMS)カンチレバーをデザインし、数値計算を行ったうえで作製した。CL斥力は量子揺らぎを用いて物体の重力を中和することによる浮上(量子浮上)をもたらす。その結果、MEMSデバイスでの摩擦を低減させ、低エネルギー駆動による省エネルギー化を可能にすると期待される。また同時に極限微小力センサーの開発にも繋がるなど技術的にも意義深い研究の第一歩を踏み出すことができた。

研究成果の概要(英文)：For realizing quantum levitation, we conducted a feasibility study of metamaterial-integrated micro-electro mechanical systems (MEMS) cantilevers. Designs of the cantilevers were discussed based on preliminary experiments and numerical simulation for metallic structures and magnetic films. We decided fabrication of single-beam cantilevers integrated with double-fishnet-type metamaterials having a negative refractive index. We prepared samples using micro-fabrication processes utilized in MEMS. While fabrication of the single-beam cantilevers integrated with silver double-fishnet-type metamaterials has not yet achieved, we have succeeded in preparing a cantilever integrated with aluminum fishnet-type metamaterials.

研究分野：メタマテリアル科学

キーワード：メタマテリアル ダブルフィッシュネット 負屈折率 MEMS カンチレバー 微細加工 量子浮上 量子真空効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

物体に働く力、およびその力学への理解は自然科学全般の根幹を支える。巨視的領域と微視的領域の中間領域であるメゾスコピック領域では、サブミクロン程度の距離で隔てられた物体間にカシミール力と呼ばれる力が働くことが知られている。最近ではメゾスコピック領域へ実験的なアクセスが可能となり、そこでの技術が実用段階を迎えている。よってカシミール力への理解、そしてそれに基づく応用がますます重要となっている。例えば微小電気機械システム (MicroElectro Mechanical Systems: MEMS) では、カシミール力の積極的利用によりデバイスの性能が著しく向上することが期待される。

1948年にオランダのカシミールは、電磁場のゼロ点振動(量子的揺らぎ)のエネルギーが物体の存在により変化を受ける静的カシミール効果の帰結として、完全導体平行平板間には引力が発生することを導いた[1]。言葉を変えるとカシミール力は、光速が有限であるが故の、仮想的な光子が長距離伝播したことによる遅延効果を取りこんだ多体間のファン・デア・ワールス力とも言える。これに対してロシアのリフシッツは、ある誘電率を持つ現実の物質を対象とし、物質の位置揺らぎを考慮に入れて電磁場モードの境界条件の問題を解き、カシミールの結果を一般化した[2]。つまりリフシッツの考えた力の極限は、カシミールが考えた力と同じであった。よってカシミール力を、ここではより正確にカシミール・リフシッツ (CL) 力と呼ぶ。

CL力は通常は引力である[3]。しかし物質の誘電率がある特殊な条件を満たす場合には、反発する斥力として働くことが知られていた。CL斥力は、物体の重力を「中和」することによる浮上をもたらすと考えられる。これは量子揺らぎによる浮上であり、量子浮上と呼べる。CL斥力による量子浮上は、MEMSデバイスの摩擦を減少させ、低エネルギー駆動を可能にすると期待されていた。にもかかわらず、必要な誘電率の条件があまりにも特殊であるため、その実現は極めて困難であった。例えば金/プロモベンゼン/シリカという液相を含む系でCL斥力が働くことが、原子間力顕微鏡を用いた実験で報告されていた[4]。しかしこのような系は液相を含むため、MEMSへの応用が難しかった。つまり固相でのCL斥力の実現は喫緊の課題であった。

2. 研究の目的

本研究では誘電率や透磁率などの特殊な組み合わせを、メタマテリアルを用いることで実現することを目指した。メタマテリアルは光の波長よりも十分小さな人工構造で構成され、自然界では困難な物性を実現する人工構造物質である。誘電率と透磁率を独立制御することで、これまで負屈折率や不可視化クローク(隠れ蓑)を実現してきた。本研究の目的は、特殊な誘電率や透磁率を実現するメタマテリアルをMEMSに融合することで、固相でのCL斥力による量子浮上を実証することであった。なおMEMS研究の観点からは、本研究は極限微小力センサーの開発とも言え、技術的にも重要であることは特筆に値した。

3. 研究の方法

最終的な目的に到達するために、(イ)どのようなメタマテリアルを用いるか、(ロ)それをどのようにMEMSデバイスに組み込むか、(ハ)メタマテリアル融合MEMSをどのように作製するか、(ニ)どのように評価するか、などの課題を解決しなければならなかった。これら未解決かつ挑戦的な諸課題を、メタマテリアルの専門家(代表者)とMEMSの専門家(分担者)が緊密にタッグを組み、ひとつひとつ解決した。

4. 研究成果

まず光学応答、及び作製可能性を考慮し、どのようなメタマテリアル融合MEMSを作製するかを検討を行った(図1a)。その際に、CL斥力をどのように評価するかも重要な検討事項であった。またさまざまな金属構造や磁性膜で光を用いた予備実験を行い、検討の際の材料とした。検討の結果、過去に赤外領域で負の屈折率を示すと報告[5]されている、図1(b)のようなダブルフィッシュネット(二重漁網:DFN)型メタマテリアルを採用した。材料は文献[5]にならって銀(Ag)とフッ化マグネシウム(MgF₂)を用いて、Ag/MgF₂/Agの三層構造とした。そしてそれを片持ち梁MEMSカンチレバーに融合することに決定した。このカンチレバーのDFN部分に赤外光(波長1.4μm程度)を照射することで、DFN部分の屈折率を負にできる。また赤外光照射を止めることで、屈折率は正に戻る。すなわち赤外光照射のオン/オフで、カンチレバーの屈折率の負/正を切り換えができる。そして空気層を隔てた下側にあるAg膜(正の屈折率)との相互作用で、カンチレバーに働く力が変化すると考えた。

このようなメタマテリアル融合MEMSカンチレバーの作製自体が挑戦的であった。特に、Agを用いたカンチレバー作製プロセスは、これまで他に類を見ない。またDFN構造作製後に、その下部の犠牲層をエッチングで除去し、中空にすることも挑戦的であると予想された。しかしながらこれまで積み重ねてきたMEMS微細加工のプロセスを用いれば、実現可能であると考えられた。また評価手法に関しては、カンチレバー先端部

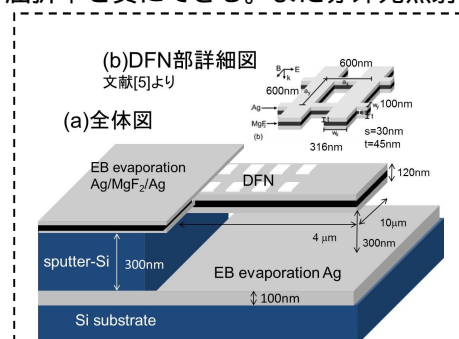


図1 MEMS融合メタマテリアル

に可視光を照射して高周波ドップラー計 (UHF-120) やマイクロシステムアナライザ (MSA-500) でカンチレバーの振動数を見積もることで、CL 斥力の影響を観測する方針を立てた。

上記の検討と並行して、数値計算による DFN 型メタ材料の光学応答の予測を行った。図 2 に数値計算で用いたモデルを示す。図 2 (a) に示すように長さは 645nm で、幅 318nm と幅 173nm の帯を十字に交差させた構造を、 x と y 方向に周期境界条件で並べることでフィッシュネット構造を計算機空間で再現した。フィッシュネット構造内では二枚の Ag 膜で MgF_2 スペースをサンドウィッチしており、これで DFN 構造となる (図 2 (b))。

数値計算には COMSOL マルチフィジクスシミュレータの波動光学モジュールを用いた。図 3 に数値計算で得られたスペクトルを示す。赤が透過、青が反射、緑が吸収スペクトルに対応する。図 3 (a) から、同様の構造を計算した文献 [5] で得られているスペクトルを再現することを確認した。この構造を用いれば近赤外の領域で負の屈折率が得られると期待される。

なお後述するが、MEMS 作製の過程において、 MgF_2 の代わりに酸化シリコン (SiO_2) を用いる方が、プロセスが容易であることが明らかになった。そこで MgF_2 を SiO_2 に置き換えた計算も行った。その結果を図 3 (b) に示す。図 3 (a) の $Ag/MgF_2/Ag$ のスペクトルと比較して、 $Ag/SiO_2/Ag$ でも光学応答はほぼ同じであった。よってスペース層に SiO_2 を用いることも可能であり、プロセスの互換性を向上できることが明らかになった。

次に MEMS の作製手法を用いて、DFN 型メタ材料を融合したカンチレバーの作製を行った。まず電子線リソグラフィ (EBL) 法で DFN のレジストパターンを作製し、その上に Ag、 MgF_2 、Ag の順番に蒸着し、その後、リフトオフで DFN 構造を作製した。そして最後に DFN の下の犠牲層をエッチングすることで、DFN が融合した片持ちカンチレバーの作製を試みた。図 4 (a) に EBL 法で作製した、DFN 構造のレジストパターンの走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を示す。この上に $Ag/MgF_2/Ag$ を蒸着後、リフトオフを行った結果が図 4 (b) である。リフトオフによって膜が崩壊する、もしくは膜質が著しく劣化していることがわかる。この後もさまざまなプロセス条件を試したが、結果として本研究の時間内では Ag を用いた DFN 構造の片持ち梁カンチレバーの作製には至らなかった。より詳細なプロセス条件の検討が必要であることが明らかになった。

一方で図 5 に示すように、アルミニウム (Al) を用いた Al/SiO_2 二層膜 (膜厚は Al が 30nm、 SiO_2 が 60nm) ならばプロセスを最後まで通すことができた。ただし犠牲層エッチングによってリリースした箇所が反ってしまった。この反りが SEM 観察中に大きくなることから、熱の影響を受けやすいことが考えられる。よって機械的強度を上げるために、両持ち梁構造カンチレバーが適していると考えられる。このように本研究は CL 斥力による量子浮上を実現するために、メタ材料が融合した MEMS カンチレバーの実現に向けた重要な一歩となりうる貴重な成果が得られた。

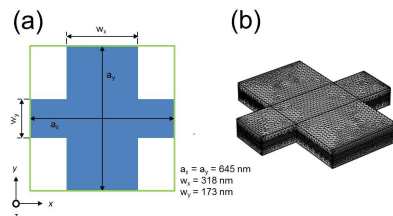


図 2 計算モデルの (a) 上面、(b) 鳥瞰図

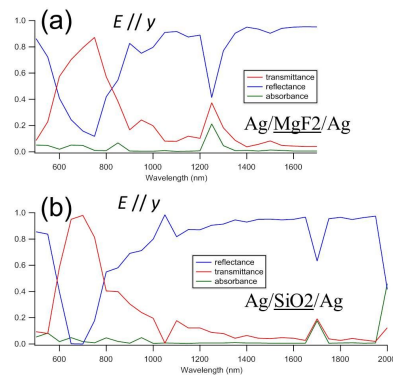


図 3 数値計算で得られたスペクトル。赤：透過、青：反射、緑：吸収。
(a) $Ag/MgF_2/Ag$ 三層膜の DFN、(b) $Ag/SiO_2/Ag$ 三層膜の DFN

(a) レジストパターン (b) $Ag/MgF_2/Ag$ リフトオフ後

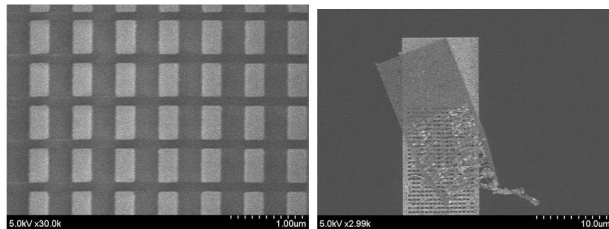


図 4 $Ag/MgF_2/Ag$ でのプロセス結果：(a) レジストパターン、(b) 成膜リフトオフ後

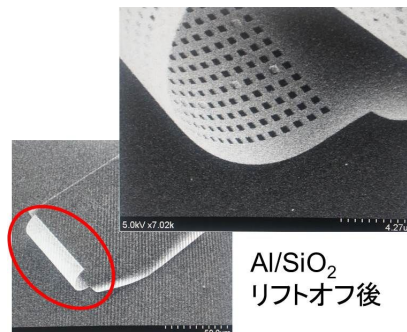


図 5 Al/SiO_2 二層膜でのプロセス結果。中空構造が作製できている。

< 参考文献 >

[1] Casimir, Proc. K. Ned. Akad. Wet (1948). [2] Lifshitz, J. Exp. Theor. Phys. (1956).

[3] Lamoreaux, Phys. Rev. Lett (1997). [4] Munday et al., Nature (2009). [5] Dolling et al., Opt. Lett. (2006).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

"Enhanced Magneto-Optical Activities of Modulated Fe-Pt Multilayer Metamaterials", Satoshi Tomita*, Patricia Riego, Tomomi Suwa, Andreas Berger, Nobuyoshi Hosoi, Hisao Yanagi, *Physical Review Applied*, accepted, 印刷中. 査読有

Topical Review "Metamaterials with magnetism and chirality", Satoshi Tomita*, Hiroyuki Kurosawa, Tetsuya Ueda, and Kei Sawada, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 51, No. 8, 083001, February 2018. 査読有 DOI: 10.1088/1361-6463/aa9ecb <http://hdl.handle.net/10061/12208>

"Microwave analog of Stern-Gerlach effects using nonuniform chiral metamaterials", Satoshi Tomita*, Kei Sawada, Shotaro Nagai, Atsushi Sanada, Nobuyuki Hisamoto, and Tetsuya Ueda, *Physical Review B*, Vol. 96, 165425, October 2017. 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.96.165425 <http://hdl.handle.net/10061/12137>

[学会発表](計20件)

招待講演 "Ag/Bi ラシユバ界面を伴う磁性膜の磁気光学効果", 富田知志, 日本磁気学 第220回研究会 / 第36回光機能磁性デバイス・材料専門研究会, 「光・熱・電気伝導に関する磁気物理の進展」, 2018年11月22日、中央大学駿河台記念館(東京都千代田区)

"Fabrication of movable MIM metamaterial with air gap structures", Shota Sekiguchi, Yoshiaki Kanamori, Kazuhiro Hane, 31th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018), 15 November 2018, Sapporo Park Hotel, Sapporo, Japan

"単一メタ分子によるマイクロ波領域での増強磁気カイラル効果", 富田知志、黒澤裕之、澤田桂、上田哲也, 2018年 第79回 応用物理学会秋季学術講演会, 2018年9月21日、名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

"エアギャップ構造をもつ可動MIMメタマテリアルの製作", 関口 将太、金森 義明、羽根 一博, 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 2018年9月20日、名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

"Rashba 界面を有する強磁性多層膜のダンピング定数", 妹尾駿一、富田知志、加藤剛志、大島大輝、岩田聡、細糸信好、柳久雄, 2018年 第79回 応用物理学会秋季学術講演会, 2018年9月18日、名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

"銀/ピスマス界面を伴うパーマロイ薄膜の磁化ダイナミクス", 富田知志、妹尾駿一、加藤剛志、大島大輝、岩田聡、細糸信好、柳久雄, 第42回 日本磁気学会学術講演会, 2018年9月13日、日本大学理工学部・駿河台キャンパス(東京都千代田区)

"Magneto-optical Properties of Fibonacci-modulated Fe-Pt Multilayer Metamaterials", Satoshi Tomita, Tomomi Suwa, Patricia Riego, Andreas Berger, Nobuyoshi Hosoi, Hisao Yanagi, The 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials'2018), 30 August 2018, Aalto University, Espoo, Finland

"Interplay between Chirality and Magnetism in Microwave Metamaterials", Satoshi Tomita, Hiroyuki Kurosawa, Kei Sawada, Tetsuya Ueda, The 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials'2018), 29 August 2018, Aalto University, Espoo, Finland

招待講演 "Interplay between chirality and magnetism in metamaterials"(I11), Satoshi Tomita, Third A3 Metamaterials Forum, 14 August 2018, POSTECH, Pohang, South Korea

招待講演 "Microwave analog of Stern-Gerlach effects using nonuniform chiral metamaterials", Satoshi Tomita, 40th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 4 August 2018, Toyama, Japan

"Interplay between magnetism and chirality in photonic metamaterials", Satoshi Tomita, 40th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 3 August 2018, Toyama, Japan

"Generalized magneto-optical ellipsometry of Py layers with Ag/Bi interfaces", Satoshi Tomita, Tomomi Suwa, Patricia Riego, Andreas Berger, Nobuyoshi Hosoi, Hisao Yanagi, 日本物理学会 第73回年次大会, 2018年3月23日、東京理科大学・野田キャンパス(千葉県野田市)

"Ag/Bi 二層膜のコヒーレントフォノン分光", 妹尾駿一、矢野敬祐、鈴木頼乙、富田知志、香月浩之、細糸信好、柳久雄, 第65回 応用物理学会 春季学術講演会, 2018年3月18日、早稲田大学・西早稲田キャンパス(東京都新宿区)

"Py/Ag/Bi 三層膜での時間分解磁気光学 Kerr 効果", 妹尾駿一、富田知志、諏訪智巳、加藤剛志、大島大輝、岩田聡、細糸信好、柳久雄, 第65回 応用物理学会 春季学術講演会, 2018年3月17日、早稲田大学・西早稲田キャンパス(東京都新宿区)

"Magnetic Properties of quasi-periodic Fibonacci Fe-Au Multilayers", Tomomi Suwa, Satoshi Tomita, Nobuyoshi Hosoi, Hisao Yanagi, 第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会, 2018 年 3 月 17 日、早稲田大学・西早稲田キャンパス (東京都新宿区)

"Generalized magneto-optical ellipsometry of quasi-periodic Fibonacci Fe-Pt multilayers", Tomomi Suwa, Satoshi Tomita, Patricia Piego, Kazuyuki Nakayama, Andreas Berger, Nobuyoshi Hosoi, Hisao Yanagi, 第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会, 2018 年 3 月 17 日、早稲田大学・西早稲田キャンパス (東京都新宿区)

"光学活性メタマテリアルでのスピン軌道相互作用によるビーム分裂", 富田知志、澤田桂、真田篤志、上田哲也, 第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会, 2018 年 3 月 17 日、早稲田大学・西早稲田キャンパス (東京都新宿区)

"Generalized magneto-optical ellipsometry of Py films with Ag/Bi Rashba interfaces", Tomomi Suwa, Satoshi Tomita, Patricia Piego, Andreas Berger, Nobuyoshi Hosoi, Hisao Yanagi, 第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会, 2018 年 3 月 17 日、早稲田大学・西早稲田キャンパス (東京都新宿区)

招待講演 "Metamaterials with magnetism and chirality", Satoshi Tomita, 第 8 回電磁メタマテリアル講演会・若手招待講演, 2018 年 3 月 16 日 東京農工大学・小金井キャンパス・グリーンホール (東京都小金井市)

"カイラルメタマテリアルを用いた光のシュテルン・ゲルラッハ効果", 富田知志, 輻射科学研究会 12 月例会, 2017 年 12 月 19 日、滋賀県立大学・産学連携センター (滋賀県彦根市)

〔図書〕(計 1 件)

マグネティクス・イントロダクション 2 (編集: 日本磁気学会) 「光が感じる「磁石」 - メタマテリアルとベリー位相 - 」、富田知志、澤田桂、共立出版、印刷中

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ http://sspp.phys.tohoku.ac.jp/tomita/jpn/index_j.htm

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 金森 義明

ローマ字氏名: KANAMORI, Yoshiaki

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 工学研究科

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 10333858

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。