

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654103

研究課題名（和文） メタマテリアルを用いたカシミール力の人工制御

研究課題名（英文） Artificial control of Casimir force using metamaterials

研究代表者

大道 英二 (OHMICHI EIJI)

神戸大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：00323634

研究成果の概要（和文）：

本研究ではメタマテリアルを用いたカシミールの人工制御に向け、カンチレバーの微小変位計測技術の開発ならびにカスタムカンチレバーの作製に向けたプロセス開発を行った。Fabry-Perot 干渉計を用いた計測システムを開発し、リアルタイムで 10 pm オーダーの変位検出感度を実現した。また、両面マスクアライナーを自作し、SOI 基板を用いたカンチレバー作製プロセスを確立した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, a sensitive detection technique of cantilever displacement and fabrication process of customized cantilevers are developed in order to control Casimir force using metamaterials. A detection system using Fabry-Perot interferometer is constructed and a real-time sensitivity on the order of 10 pm is realized. A home-built double-sided mask aligner is constructed to establish a fabrication process of microcantilever based on SOI wafers.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理・物性 I

キーワード：表面・界面

## 1. 研究開始当初の背景

カシミール力は 1948 年にカシミールによって理論的に提唱された、2 つの巨視的な金属板の間に働く、電磁場のゼロ点エネルギー密度の粗密によって生じる引力のことである。二つの物体の幾何学的な配置と光学応答関数によって決まる物理量であり、一對の完全導体平板の場合には単位面積あたり  $F_c = (ch/480)d^{-4}$  ( $d$ : 距離) という式で表される。ゼロ点エネルギーが最も顕著に物理現象に現れる例として知られている。量子電磁気学の基礎研究として理論研究が先行していたが、1997 年に初めてラモレーにより実験的に観測された (Lamoreaux, PRL 78(1997)5)。

この報告を皮切りに複数のグループで実験的な研究が開始し、最近では有限温度、有限伝導度などの補正項に関して、理想的条件下における理論的検証の実験が主流となっている。

一方、将来的に実用化が期待されるナノマシンにおいてはスイッチなどといった可動部分が非常に近接した配置をとるため、デバイスの機械的特性においてカシミール力の影響が無視できなくなると考えられている。そのため、ナノマシンの実用化に向けカシミール力の重要性が指摘されているが、現時点でそのような試みが系統的に行われた例はほとんどない。

## 2. 研究の目的

カシミール力が物体の誘電応答、磁気応答により決まっていることに着目すると、カシミール力を人工的に制御するためのヒントが見えてくる。特に光学領域（サブミクロン波長領域）においては磁気応答を示すバルク物質が存在しないことから、これまでカシミール力の評価にはその影響が無視されてきた。しかし、近年、微細加工技術の進歩により、メタマテリアルと呼ばれる人工構造を用いた物質の巨視的な誘電応答、磁気応答の制御が可能になりつつある。当初はマイクロ波領域での制御が中心であったが、現在では微細化に伴いその動作範囲が光学領域へと拡張しつつある。

本課題ではこの点に着目し、メタマテリアルを用いたカシミール力の人工制御を最終的な目的とし、研究を推進する。この目的のため、マイクロカンチレバーを用いたカシミール力を高感度に検出するための微小力計測装置を作製する。

本研究ではカシミール力という量子電磁気学の基礎問題が最先端のデバイス応用と密接に関連している点が特色に挙げられる。メタマテリアル技術を用いたカシミール力の制御はこれまでも研究例がない。ナノマシンなどの極微デバイスではスティッキング（張り付き）と呼ばれる現象がプロセス上大きな課題となっているが、本研究はこれに対し新しい解決策を与えるものとして期待できる。

## 3. 研究の方法

カシミール力の検出においてカギとなるのはナノメートルレベルの精密位置制御とピコニュートンレベルの精密力検出技術である。本研究ではカンチレバーに金属薄膜を蒸着した微小ポリスチレン球を取り付け、これを平板状の金属板へとアプローチすることでカンチレバーに働く力を測定する。本研究ではFabry-Perot 干渉計を用いた高感度検出法によりカンチレバーの微小変位を検出する手法を開発する。また、真空チャンバー内で動作可能なナノ駆動ステージを作製し、カシミール力測定装置を構築する。

カンチレバーの変位を高感度に検出するため 1.5  $\mu\text{m}$  帯波長可変レーザーを用いて Fabry-Perot 干渉計を作製する。波長可変光源は波長を自由に定めることが可能であり、後述するように Fabry-Perot 干渉計の共振器長を波長掃引により実効的に変化させることができる。Fabry-Perot 光学系は高い検出感度ならびにコンパクトな測定系を構築することが可能であるため、カシミール力の検出に適した測定系である。

また、将来的により高い感度を実現するた

めにカンチレバーを自作することが必要になる。MEMS 技術と呼ばれる 3 次元微細加工技術を用いることで数  $\mu\text{m}$  程度の精度でカンチレバーを作製することができる。本研究では MEMS 加工に必要な酸化膜形成、陽極接合、両面露光などの装置開発ならびにプロセスの条件だしを行う。最終的にはこれらの技術を統合して、独自のカンチレバー作製を行う。

## 4. 研究成果

測定装置はカンチレバーを対向極板に位置制御しながらアプローチする部分とカンチレバーにはたらく微小な力を検出する部分からなる。前者についてはモーターによる粗動機構とピエゾ素子による微動機構から構成される。粗動機構に用いた高精度モーターは 10 nm の位置分解能を持ちつつ、約 10 mm の範囲を移動することができる。また、ピエゾ素子は再現性よく位置制御を可能にするため、クローズドループ機構を備えている。そのため移動距離は 15  $\mu\text{m}$  程度であるが  $\sim 0.1$  nm という高い位置再現性を有している。測定系全体は真空チャンバー内に設置し、ターボ分子ポンプを用いて  $10^{-3}$  Pa 程度まで真空にした。これは音や温度変化といった外部擾乱を遮断するためである。また、測定系全体をエアダンパー付き除震台上に設置し、床振動の影響を排除した。こういった測定系は原子間力顕微鏡の測定系と多くの部分で共通している。

カンチレバーにはたらく力はカンチレバーのたわみとして検出される。カンチレバーのたわみは Fabry-Perot 干渉計により検出する。Fabry-Perot 干渉計ではカンチレバー背面と光ファイバー端面からなる 2 つの面を共振器として利用し、それぞれの面からの反射光の干渉強度として変位を検出する。感度のよい測定を行うためには変曲点と呼ばれる位置に共振器長を調整する必要がある。本研究では波長可変レーザーを用いることで実効的に共振器長を変化させた。また、カンチレバー自身は幅が 50  $\mu\text{m}$  程度しかないため、光ファイバーとカンチレバーの位置合わせが必要になる。そのため、位置合わせ用の小型ピエゾステージが必要であり、自作した。

自作したピエゾステージは stick-and-slip 機構と呼ばれる原理を利用したものである。ガラスでできたレールとピエゾ素子のついた駆動ステージからなる。ピエゾ素子にノコギリ状の電圧を印加することで駆動ステージがレールに対して少しずつ変位していく。このステージを用いて真空中で光ファイバーとカンチレバーの位置合わせを行った。

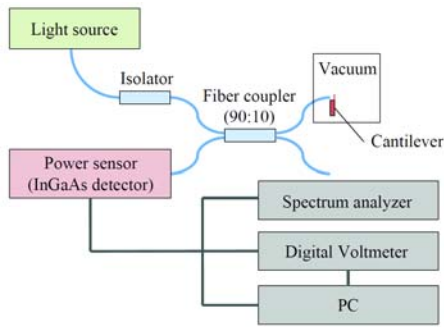


図 1 : 光学系の概略

変位検出のための光学系の概要について説明する(図 1)。波長可変レーザーから出た光はアイソレーターを通った後、光カプラーと呼ばれる光学素子に入る。光カプラーは入射光を 2 つの出力に分岐するための素子であり、出力の一方を Fabry-Perot 干渉計へと導く。Fabry-Perot 干渉計からの戻り光は再び光カプラーに入り、一方はレーザーに、もう一方は検出器へと入る。本研究では分岐比が 90:10 の光カプラーを用いることでレーザー側への戻り光を 1/100 程度に低減している。また、後方反射による不用干渉を低減するため全ての接続部分は APC (angled physical contact) コネクタと呼ばれるコネクタを用いている。さらに、光ファイバー自身の振動や熱収縮/膨張に起因する強度変化を低減するため bend-insensitive ファイバーという特殊なファイバーを用いた。

まず、作製した Fabry-Perot 干渉計の性能評価を行った。Fabry-Perot 干渉計の共振器長を変化させると予想されたようにサイン波的な応答が観測された(図 2)。次に共振器長を変曲点に固定し、検出器の雑音を評価したところリアルタイムで 10 pm 程度まで雑音レベルを下げることに成功した(図 3)。実際にカンチレバーを対向極板として Fabry-Perot 干渉計の信号を測定すると、カンチレバーの熱雑音に起因するスペクトルが約 5 kHz 付近

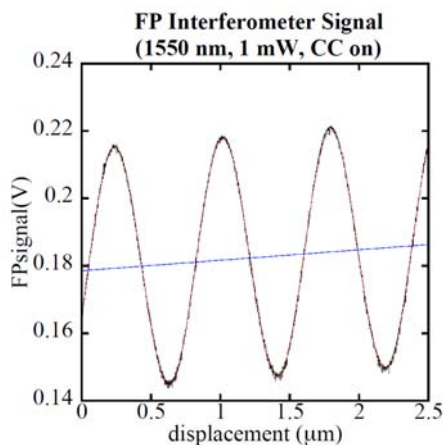


図 2 : 共振器長の変化に対する Fabry-Perot 干渉計の応答

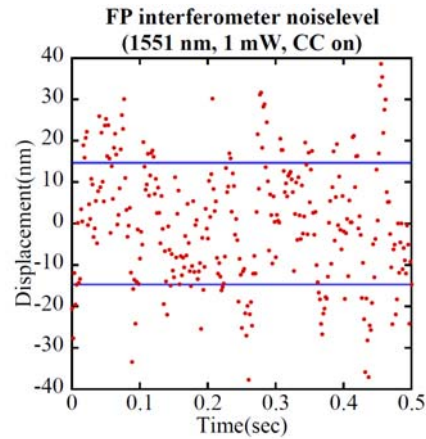


図 3 : Fabry-Perot 干渉計のノイズ測定

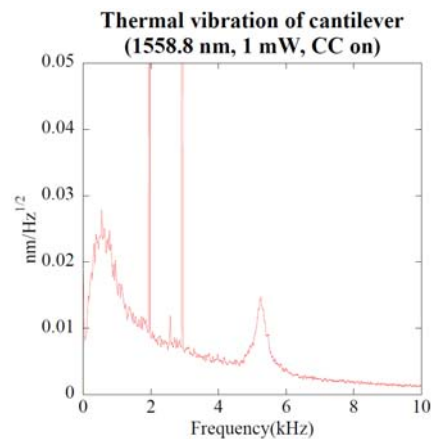


図 4 : Fabry-Perot 干渉計の熱雑音スペクトル

に観測された(図 4)。カンチレバーの熱雑音の大きさは理論的に予想される大きさとほぼ一致しており、作製した Fabry-Perot 干渉計が高い変位検出能力を有していることがわかった。

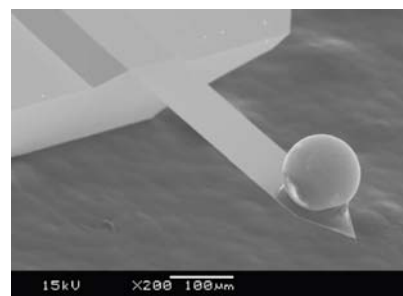
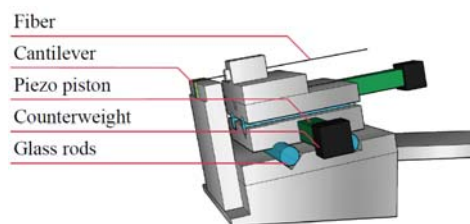


図 5 : 作製したピエゾステージ (上) と微小球を貼り付けたカンチレバー (下)

カシミール力を評価する際はカンチレバー上に金属球を貼り付け、これを平面上の金属板に近づけながら測定を行う(図5)。一方を金属球にする理由は、カンチレバーがたわみ、カンチレバーの角度が変化しても球と平面の相対的な配置は変化しないためである。真空蒸着装置を用いて直径 50 μm のポリスチレン球をカンチレバーに貼り付け、真空蒸着装置で球全体に金を 100 nm の厚さで蒸着した。また、対向金属板と金属球の間には仕事関数の違いなどによる残留電圧差が生じる。そのため定電圧電源を用いて適当な印加することでこの電圧差を補償した。

作製した測定装置を用いてカシミール力の測定を開始おこなったところ、極板間距離に対してカンチレバーにはたらく力が変化する振る舞いが観測された。しかし、定量的には予想する値から大きくずれていた。カンチレバーと金属球の電氣的接触が不十分のため電圧補償が不十分であった可能性がある。この点を今後、改良する必要がある。

カシミール力測定装置の作製と並行して、カンチレバーの最適化に向け3次元微細加工に必要な装置群の作製ならびにプロセス条件だしを行った。MEMS プロセスではTMAHによるシリコンウェットエッチングの際、保護膜となるシリコン酸化膜が必要になる。そこで本研究はSOG (spin-on-glass) という手法を用いて、酸化膜の作製を行った。焼成温度とスピンの回転を変えながら酸化膜厚を調整し、TMAH に対するエッチングレート求めた。酸化膜厚は光学干渉型膜厚計により評価した。その結果、900°C以上の焼成温度で作成すればTMAH 溶液に対し、シリコンのエッチング選択比が1000以上になることが分かった。

また、MEMS プロセスではシリコン基板をガラス基板上に固定しパッケージ化することがしばしば行われる。そこで陽極接合と呼ばれる装置を自作し、陽極接合の条件だしを行った。ホットプレート上にガラス基板とシリコン基板を置き、上部から高圧電源で電圧印加を行うことで陽極接合を行う。本研究では陽極接合装置を自作し、接合温度 400°Cの、印加電圧 400 V で良好な接合を得ることができた。

また、カンチレバーの作製ではシリコン基板を両面からエッチングしていく工程が必要不可欠である。そのため異なるマスクを基板の両側から位置合わせして露光する必要がある。本研究では紫外線ランプ、高倍率実体顕微鏡、位置合わせステージを組み合わせる両面マスクアライナーを自作した。位置合わせステージは xyz・ステージを組み合わせる作製した。ウェハがない状態で2枚のマスクを位置合わせした後、ウェハをマスクで挟み込んで固定し、片面ずつ逐次露光する。この装置では2インチ角のマスクが一度の露光で可

能である。この装置を用いて 10 μm の精度で位置合わせが可能になった。これらの装置の自作により研究室内で MEMS 加工プロセスが可能になり、自作カンチレバーの作製が可能になった。今後は SOI 基板と呼ばれる3層構造の基板を用いることで、カシミール力の測定に最適化されたカンチレバーの作製を行う。

## 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)

[学会発表] (計4件)

(1)小西鷹介他, 自作両面マスクアライナーを用いた高感度 MEMS カンチレバーの作製, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013. 3. 26, 広島大学

(2)E. Ohmichi他, Microfabrication of a MEMS cantilever for mechanically detected high-frequency ESR measurement, 19th International Conference on Magnetism, 2012. 7. 10. Bexco, Busan, Korea,

(3)D. Tsubokura 他, A fiber-optic Fabry-Perot interferometer for cantilever displacement measurement, Advanced ESR Studies for New Frontiers in Biofunctional Spin Science and Technology, 2011. 11. 13, Kobe University

(4)坪倉大地他, カンチレバーを用いた微小力測定とその応用, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011. 9. 21, 富山大学

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

大道 英二 (OHMICHU EIJI)

神戸大学大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 00323634