

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 21 日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610072

研究課題名(和文)メタマテリアルによる動的カシミール効果の検証

研究課題名(英文)Verification of dynamical Casimir effect with metamaterials

研究代表者

武田 三男 (TAKEDA, Mitsuo)

信州大学・理学部・教授

研究者番号：20115653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：シリコン基板製の鏡の片面にスプリットリングおよびバーからなる2種類の共振器を金蒸着によりメタマテリアル構造を作製した。もう一方の面には圧電体である酸化亜鉛薄膜を塗布し、超音波振動子を設計試作した。テラヘルツ時間領域分光により、電磁波誘起透明化現象により1.2THz付近で群速度遅延が起こっていることを確認した。また、高周波発振器により超音波振動子を励起し、鏡が400MHzで振動していることを確認した。しかしながら、THz領域での電磁波の発生は確認できていなかったため、振動数の見積りとメタマテリアル表面からの電磁波発生効率について考察中である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to demonstrate photon pair generation by means of ultrasonic vibrating mirrors covered with metamaterials that can localize electromagnetic waves. One of surface of silicon mirror was covered with metamaterials constructed with metallic split rings and bars. Piezoelectric ZnO was coated on the other surface of the mirror as an ultrasonic vibrator. By terahertz time-domain spectroscopy, the group velocity delay due to the electromagnetically induced transparency was confirmed. The reflection echo related to the ultrasonic vibration at 400 MHz was confirmed in the ultrasonic waveform. However, generation of the electromagnetic waves was not confirmed. The study is now in progress.

研究分野：光物性

キーワード：動的カシミール効果、メタマテリアル、光の局在、電磁誘起透明化現象、超音波振動子、圧電素子、テラヘルツ時間領域分光

## 1. 研究開始当初の背景

無帯電の金属板2枚を平行において近づけて行くと、金属板間に引力が働く。金属板の間の電磁波はこれらの2枚の平行板の間に板の表面が固定端となる定在波モードの重ね合わせで表現できる。この状態を量子化するとそれぞれのモードに零点振動が存在することになる。この電磁場の量子揺らぎの零点エネルギーは金属板間の距離の関数となる。すなわち、距離が長くなればなるほどエネルギーが高くなる。したがって、金属板が近づけば近づくほどエネルギーは低くなり、金属板の間に引力が働くことになる(図1)。

ここで、金属板を光速に近い速度で振動させると、真空の量子揺らぎの状態で生成と消滅を繰り返している「仮想粒子」が金属板表面で反射される。金属板から運動エネルギーを得て実粒子である光子対が発生する。これが動的カシミール効果である(図2)。

極最近、スウェーデンの研究チームがSQUIDを用いた巧妙な電気回路でマイクロ波の発生を観測したとの報告があるが、実際の金属板を光速に近い速度で動かすことは技術的に不可能であった。本研究では、表面に電磁波モードを局在させることのできるメタ材料を鏡として使い、酸化亜鉛薄膜製の超音波振動素子により振動させて真空から光子対生成することを検証する。

## 2. 研究の目的

平行に置かれた2枚の無帯電状態の金属板を近づけて行くと、金属板の間に引力が働く。この現象は、1948年カシミールとポルダールによって予言された。この「カシミール効果」は1987年にラモーらによって実証されている。しかしながら、1970年にモアーが提唱した金属板の間隔を高速で振動させると真空中から光子対が現れる「動的カシミール効果」の検証はほとんどされていない。今年になって、スウェーデンの研究チームがSQUIDを用いた巧妙な電気回路でマイクロ波の発生を観測したとの報告があるが、実際の金属板を振動させて動的カシミール効果を実証した例はこれまで全くない。本研究は、真空の量子揺らぎに関する長年の懸案課題である「動的カシミール効果」を「メタ材料」と超音波振動素子を用いて検証することが目的である。

## 3. 研究の方法

本研究では、表面に電磁波モードを局在させることのできるメタ材料を一对の鏡として用いる。超音波振動素子は、メタ材料の載っているシリコン基板の反対面に圧電体酸化亜鉛の薄膜を直接蒸着して作製する。この超音波振動素子によりメタ材料製の鏡を振動させ、真空からの光子対生成を検証する。光子対の振動数はGHzからサブTHzと見積もられるため、現有のマーチン・パレットフーリエ分光装置とボロメーターにより検出する。

実際の金属板を光速に近い速度で動かすことは技術的に不可能である。そこで、本研究では金属板間の自由空間に直接電磁波モードを生成するのではなく、鏡の表面に群速度が遅い局在モードを生成し、これを自由空間の伝播モードと結合させる。電磁波を物質内に閉じ込めるためには、フォトニック結晶の欠陥モードやメタ材料の表面プラズモンに起因する局在モードが候補となる。前者の欠陥モードは結晶内部に局在するため、自由空間モードとは結合しにくい。一方、メタ材料の局在モードは表面モードのため自由空間モードと容易に結合できると期待される。共鳴振動数を一致させた、緩和時間の異なる2つの共鳴モードを持つメタ材料に電磁波を透過させると、モード間相互作用(Electromagnetically Induced Transparency)の結果、Bright Modeが出現し透過ピークが現れる。このモードは極めて遅い群速度を持つことに着目した。

高速で鏡を駆動させるために、圧電体酸化亜鉛[ZnO]を用いる。ZnO薄膜を使えば数百MHzから1GHz領域の振動が可能である。メタ材料製の鏡にZnO薄膜を塗布し超音波振動素子を作製する。研究は以下の5つの課題項目を順次遂行する。

(1)数値解析[FDTD]によるメタ材料の形状および格子パラメーターの決定

極めて遅い群速度を持つBright Modeを出現させるために、共鳴振動数を一致させた緩和時間の異なる2つの共鳴モードを持つ条件をFDTDにより決定する。

(2)メタ材料の設計と試作

上記の数値解析の結果に基づき、高抵抗シリコン基板の片面にスプリットリングとバ

ーを組み合わせた金属アレイのパターンを蒸着する。

### (3) Bright Mode の Q 値と群速度の決定

現有のテラヘルツ時間領域分光装置 (THz-TDS) により透過スペクトルを測定し、Bright Mode の Q 値と群速度を求める。THz-TDS では位相シフトスペクトルが直接測定できるため、群速度を求めることが可能である。

### (4) メタマテリアル超音波振動子可動鏡の作製

メタマテリアルを蒸着したシリコン基板の反対側に圧電体 ZnO の薄膜を直接蒸着し高周波用超音波振動子を作製する。特殊な技術が要するため外注する。

### (5) 光子対生成の検出実験

超音波振動子可動鏡ともう一つのメタマテリアル平面鏡により一对の合せ鏡を構成し、高周波発振装置により可動鏡を高速振動させ、光子対生成を現有のポロメーターで検出する。

## 4. 研究成果

本研究では、鏡の表面を電磁波を局在させることの可能なメタマテリアルで覆い、その鏡を超音波振動子により振動させ、光子対生成を実証しようとするものである。超音波振動子はシリコン基板の一方の面にメタマテリアル構造を持たせた金薄膜を蒸着し、反対側に圧電体酸化亜鉛薄膜を塗布したものを設計試作した。メタマテリアルとしては、電磁誘起透明化 (EIT) 現象により電磁波の群速度遅延が起こるスプリットリングとバーの 2 種類の共振器を組み合わせて作製した。生成される光子対の振動数は GHz から THz 領域と見積もられるため、現有のフーリエ分光装置を使用する。

初年度は、数値解析によるメタマテリアルの格子パラメーターの決定、シリコン基板を用いたメタマテリアルの設計と試作 (図 3)、テラヘルツ時間領域分光装置による EIT 現象の確認と群速度の決定 (図 4 & 図 5) および、メタマテリアル超音波振動子可動鏡の設計試作 (図 6) を行った。

次年度は、初年度に引続き ~ を確認するとともに、光子対生成検出のために高周波発振装置を購入し作製した超音波振動子可動鏡の超音波発振状況を測定し、400MHz の超

音波が発振していること、すなわち、可動鏡が 400MHz で振動していることを確認した (図 7)。電磁波の発生については残念ながら確認できなかった。この原因を解明するため、Bright mode が機械的振動によりどの程度自由空間に放出されるかを解析するための有限要素法ツールを購入し解析を試みた。

最終年度は昨年度までに得られた知見を基に、電磁波が確認できない原因を検討した。原因は以下の 2 つが考えられる。光子対の振動数の見積もりが正しくない、メタマテリアル表面からの自由空間への放射効率が低い。昨年度整備した有限要素法ツール等により数値解析を試みたが残念ながら結論が得られていない。今後は、原因を解明し光子対生成により発生した電磁波の実測を行いたい。

## 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)

[その他]

ホームページ等

信州大学学術情報オンラインシステム SOAR

<http://www.shinshu-u.jp/soar/>

Optical Physics Laboratory, Department of Physics

<http://science.shinshu-u.ac.jp/~thz>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武田 三男 (TAKEDA Mitsuo)

信州大学・理学部・教授

研究者番号：20115653

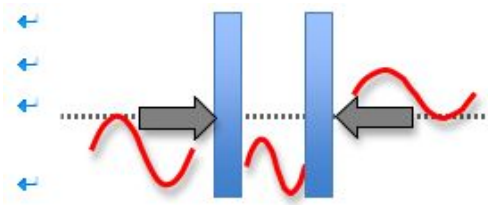


図1 カシミール効果の概念図。金属板の間に引力が働く。

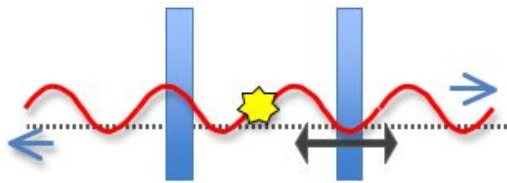
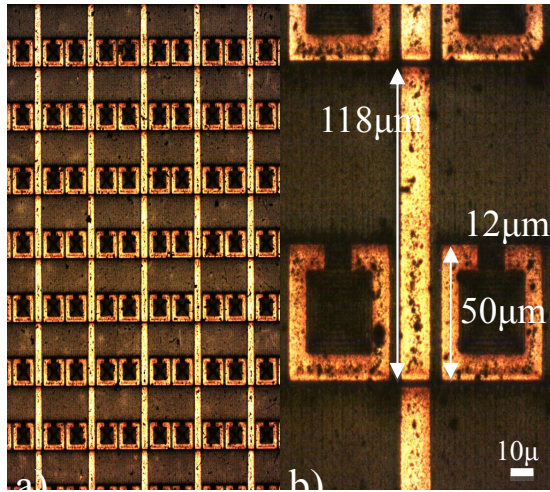


図2 動的カシミール効果の概念図。金属板を高速振動させると光子対が発生する。



(a) (b)

図3 当研究室で設計・試作したメタマテリアル。シリコン基板上に金薄膜の共鳴モードの緩和時間の異なるスプリットリングとバーを組み合わせたアレイが形成されている。格子定数は  $118 \mu\text{m}$ 。

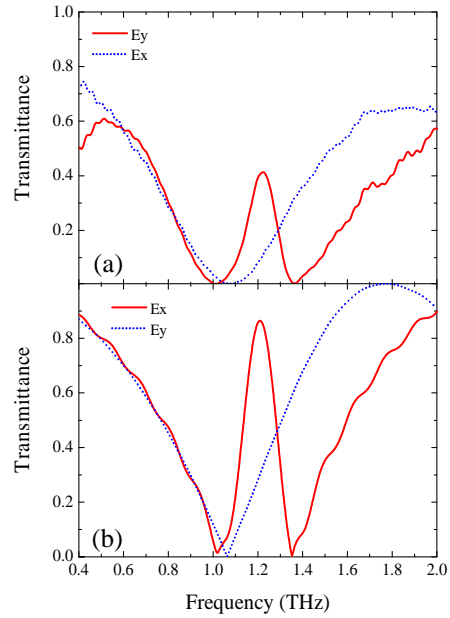


図4 上記メタマテリアルのテラヘルツ透過強度スペクトル。1.2THz に2つの共鳴モードの結合により出現したBright Modeに起因する透過ピークが確認できる。(a)：測定結果、(b)：計算結果。

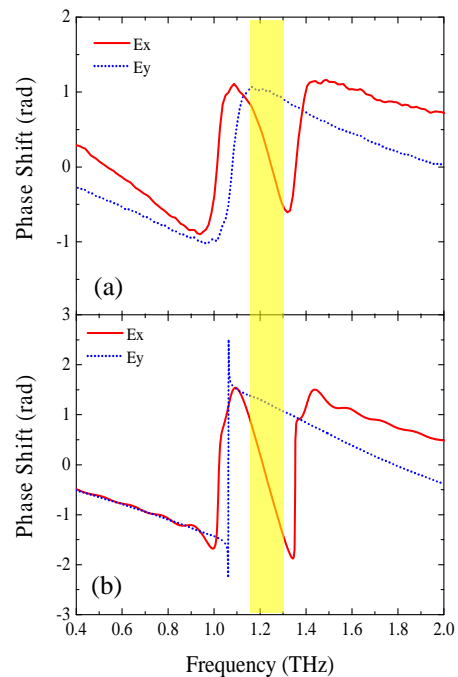
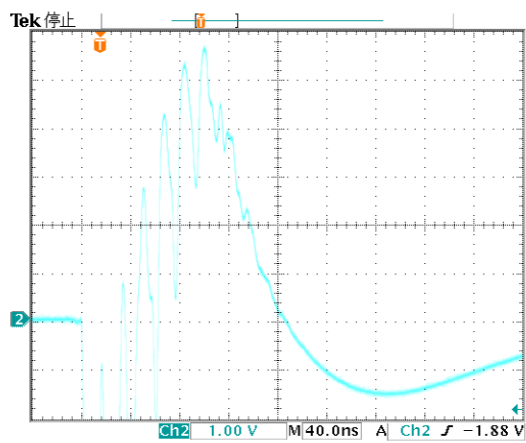


図5 上記メタマテリアルのテラヘルツ透過位相スペクトル。1.2THz に2つの共鳴モードの結合により出現したBright Modeに起因する群速度遅延が確認できる。(a)：測定結果、(b)：計算結果。

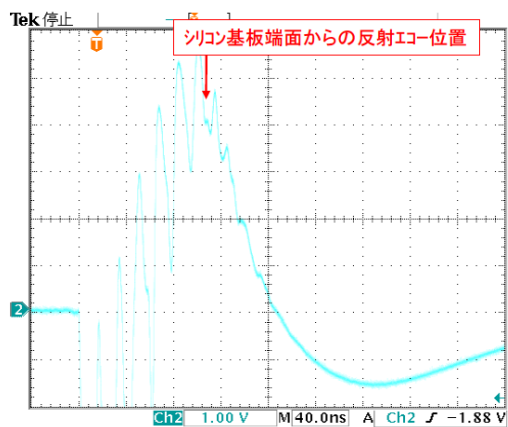


図6 メタマテリアル超音波振動子の外観。シリコン基板の表面には図3に示した様なスプリットリングとバーを組合せた構造が金蒸着されている。裏面には圧電体 ZnO トランスジューサーが塗布されている。

コーが確認できる。



(a)



(b)

図7 測定された超音波時間波形。(a)：励起波形パターン、(b)：受信波形パターン。受信波形の矢印の位置にシリコン基板端面（メタマテリアル構造蒸着側）からの反射エ