

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14249

研究課題名(和文)メタマテリアルにおける空気非線形性を利用したモノサイクルパルス電磁波の自励発振

研究課題名(英文) Spontaneous oscillation of monocycle electromagnetic pulse in a metamaterial loaded with air as a nonlinear element

研究代表者

玉山 泰宏 (Tamayama, Yasuhiro)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50707312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：メタマテリアルにおける局所電磁場増強効果を最大限に活かした非線形現象の高効率発生について研究を行った。メタマテリアル中におけるプラズマの生成・消滅を制御することにより、電磁波の周波数混合を発生させられることが明らかになった。また、メタマテリアル中のある部分に発生したプラズマによって異なる部分の絶縁破壊電場を大幅に低下させられるような条件が存在することを発見した。そのような条件下では、メタマテリアルにおける周波数混合の周波数変換効率を100倍程度大きくできるという結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：We investigate efficient generation of nonlinear phenomena induced by maximally utilizing enhancement of local electromagnetic fields in a metamaterial. It is found that frequency mixing of electromagnetic waves can be generated by controlling generation and quenching of plasma in the metamaterial. It is also found that generated plasma in a part of metamaterial greatly reduces breakdown electric field in the other part depending on the experimental condition. Under such a condition, frequency conversion efficiency of the frequency mixing effect can be enhanced by a factor of 100.

研究分野：電磁光学

キーワード：電磁波 非線形現象 メタマテリアル プラズマ

1. 研究開始当初の背景

電磁波の波長に比べて十分小さい構造の集合体であるメタマテリアルを用いた新奇な電磁波伝搬制御について世界中で盛んに研究されている。メタマテリアルの電磁応答はメタマテリアルの単位構造の材質や形状に依存するため、単位構造をうまく設計することにより、所望の電磁応答を示す媒質を得ることができる。

研究代表者は、メタマテリアルを用いた電磁波制御について様々な研究を行っている。その中で、放射モードを介して結合した2種の共振器で構成されるメタマテリアル中において電磁波の極低群速度伝搬が実現できることを見出した。さらに、共振器における局所電場増強と低群速度伝搬に伴う電磁エネルギー密度の増強の相乗効果により、メタマテリアル中で大幅な電場増強現象が発生することも見出した。そして、大幅な電場増強現象を利用することにより、メタマテリアルに比較的低パワーの電磁波を入射させるだけで、メタマテリアル中で局所的な空気の絶縁破壊が発生することを明らかにした。このことは、メタマテリアルを用いることにより、非線形現象を高効率に発生させられることを示唆している。

2. 研究の目的

本研究では、メタマテリアル中で局所的な空気の絶縁破壊を発生させた時に生じるメタマテリアルの電磁応答の瞬間的な変化を利用することによる非線形現象の発生について詳しく調べ、モノサイクルパルス電磁波の自励発振現象の実現につなげる。まずは、入射電磁波の振幅を変調した場合のメタマテリアルの電磁応答について調べ、自励発振実現のために必要な基礎的な情報を得る。それをふまえて、メタマテリアルにおける自励発振現象を実現し、モノサイクルパルス電磁波の発生を試みる。

3. 研究の方法

図1に、本研究で用いるメタマテリアルの構造を示す。この構造は、厚さ1mmのアルミ板に対してワイヤー放電加工を施すことに

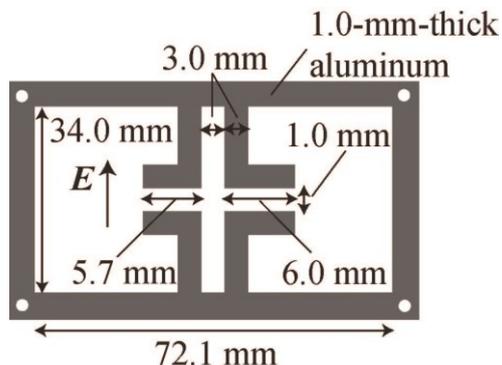


図1: メタマテリアルの構造および、入射電磁波の電場の向き。

より作製した。メタマテリアルは2種のカットワイヤー共振器が放射モードを介して結合したような構造となっている。また、メタマテリアルを導波管中に配置してその電磁応答を評価することを想定して、メタマテリアルと導波管のフランジが融合したような構造となっている。

メタマテリアルの非線形応答を評価するために用いた実験系の概略図を図2に示す。メタマテリアルは導波管中に配置し、導波管はアクリル製の真空容器中に配置した。また、真空容器内にはアルゴンを充填した。メタマテリアルに入射させる振幅が正弦波的に変調された電磁波を生成するために、2つの新号発生器からそれぞれ周波数  $f_1$ ,  $f_2$  の電磁波を発生させ、それらを重ね合わせた。重ね合わせた電磁波はアンプで増幅した後にメタマテリアルへ入射させた。透過した電磁波は広帯域ダイポールアンテナで受信した。受信した信号の一部はオシロスコープへ、残りはスペクトラムアナライザへ入力した。また、メタマテリアル中での局所的な空気の絶縁破壊により発生したプラズマからの発光強度をアバランシェフォトダイオードで検出し、オシロスコープで観測した。

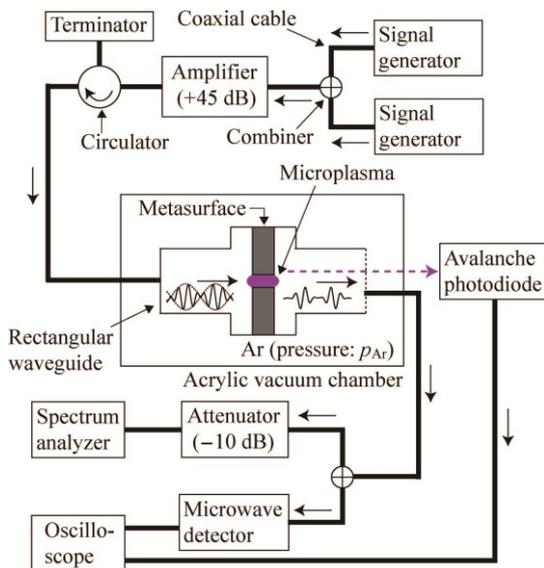


図2: メタマテリアルの非線形応答評価の実験系。

図3はメタマテリアル周囲の気体をアルゴンと空気の混合気体とした場合のメタマテリアルの電磁応答を評価するための実験系である。大部分は図2と同じであるが、真空容器のガス導入部と排気部が異なる。アルゴンは高圧ボンベから導入し、空気は真空容器の漏れを通じて真空容器内に導入した。アルゴンと空気の比率を変化させるために、真空ポンプと真空容器との間にバルブを設けた。バルブの閉じ具合により、真空容器の漏れを通じた空気の導入量を相対的に変化させることができるようにした。

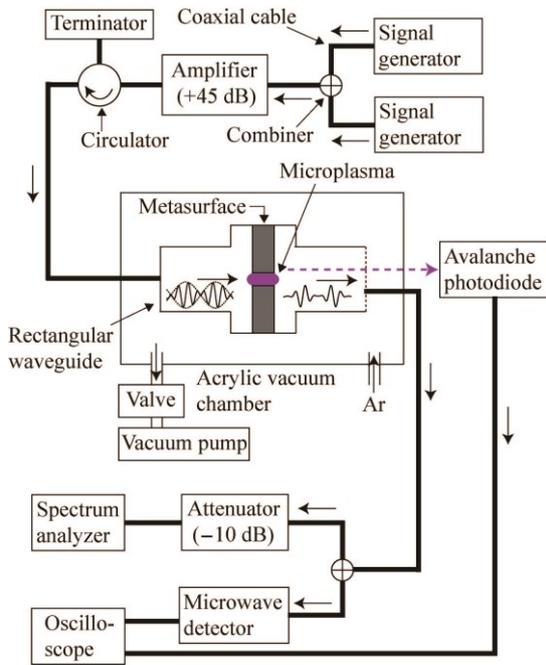


図 3: メタマテリアルの非線形応答の周囲気体依存性の評価のための実験系。

#### 4. 研究成果

まずは図2の実験系を用いることにより得られた結果を示す。図4は  $f_1=3.031$  GHz,  $f_2=3.031$  GHz+10 kHz としたときの透過波の包絡線波形、プラズマからの発光強度の時間変化、および、透過波のスペクトルの測定結果の一例を示したものである。透過波の包絡線波形から見ていく。入射波の振幅が0から大きくなると、透過波の振幅は入射波の振幅の増加に伴って大きくなっていく。ところが、入射波の振幅がある値を超えると、透過波の振幅は急激に減少する。その後、入射波の振幅が増加や減少しても、透過波の振幅はあまり変化しない。そして、入射波の振幅がある値以下になると、再び、入射波の振幅の変化に伴って透過波の振幅も変化するようになる。これをふまえて、プラズマからの発光波形を見ても、メタマテリアルの透過率が低くなっている時間とプラズマからの発光が観測されている時間が一致していることがわかる。このことから、入射振幅の増減に伴ってメタマテリアル中においてプラズマの生成および消滅が起こっていること、および、プラズマの発生によりメタマテリアルの透過率が減少することがわかる。続いて、透過波のスペクトルについて見ていく。入射周波数成分  $f_1$ ,  $f_2$  以外に多数のサイドバンドが発生しており、その周波数間隔は 10 kHz となっている。この周波数間隔は  $f_2-f_1$  に等しい。以上の結果より、メタマテリアル中におけるプラズマの生成および消滅を利用することにより、周波数混合を発生させられると

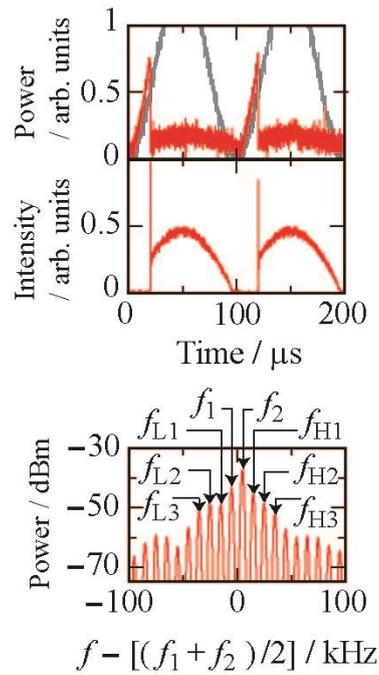


図 4: 図 2 の実験系において  $p_{Ar}=0.8$  kPa,  $P_0=29.1$  dBm としたときの測定結果。(上段) 透過波の包絡線波形、(中斷) プラズマからの発光波形、および、(下段) 透過波のスペクトル。

いうことが明らかになった。

続いて、上で述べた周波数混合の特性について詳しく調べた。真空容器内のアルゴン圧力を 0.8 kPa とした時の、周波数混合の周波数変換効率の入射パワー依存性を測定した結果を図5に示す。ここで、周波数変換効率は  $\eta_{[L,H]n} = P_{[L,H]n} / P_0$  と定義した ( $P_0$  は各入射周波数成分のアンブ直後でのパワー、 $P_{[L,H]n}$  は周波数が  $f_{[L,H]n}$  である成分のパワーである。 $f_{[L,H]n}$  は図4で定義されている。)。各周波数成分の変換効率の入射パワー依存性は異なり、また、入射パワーの増加に対して変換効率は増加したり減少したりすることがわかる。通常の非線形現象であれば、入射パワーの増加

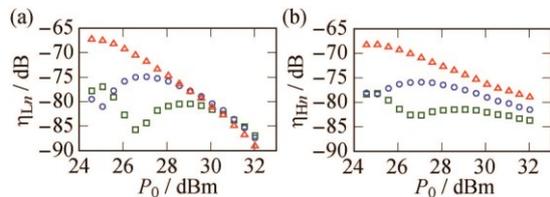


図 5: 周波数混合における周波数変換効率の入射パワー依存性。(a) は低周波数側、(b) は高周波数側のサイドバンドの周波数変換効率を表す。また、三角印、丸印、四角印はそれぞれ  $n=1, 2, 3$  に対応する。

に伴って周波数変換効率は増加するわけであるが、それとは異なる現象が生じているということになる。

ここで得られた周波数混合の周波数変換効率の特性について理解するために、メタマテリアルの応答のモデル化を行った。メタマテリアル中でプラズマが発生すると、メタマテリアルの透過率が大きく低下するので、プラズマの生成、消滅に伴い、メタマテリアルの透過率が  $a_1$ ,  $a_2$  になるという非常に単純化したモデルを考える。すると、メタマテリアルの振幅透過率の時間変化  $a(t)$  は  $a(t) = Da_1 + (1-D)a_2 + \sum [c_n \exp(-i2n\pi t/T) + c.c.]$  のようにフーリエ級数の形で書くことができる。ここで、 $D$  はプラズマの生成継続時間を入射振幅の変調周期  $T$  で割ったもの、 $|c_n| = [(a_2 - a_1)/(n\pi)] \sin[n\pi(1-D)]$ 、 $c.c.$  は前項の複素共役項である。透過波のスペクトルは、入射波形のフーリエ変換と  $a(t)$  のフーリエ変換の畳み込みに等しい。計算を単純にするため、低周波数側（高周波数側）のサイドバンドは、 $f_1$  ( $f_2$ ) 成分と  $a(t)$  のフーリエ変換の畳み込みであると考え、各サイドバンドの大きさは  $D$  のみで表現できるということになる。

上で述べたモデルを検証するために、周波数混合における周波数変換効率を様々な入射パワー、気体圧力について測定した結果をまとめたものを図6に示す。入射パワーや気体圧力を様々な変化させているにもかかわらず、変換効率はおよそ  $D$  のみで決まっていることがわかる。また、測定結果において変換効率が極大値および極小値を取る  $D$  の値は、モデルから予測される値とおおよそ一致している。このことから、メタマテリアル中における周波数混合は、プラズマの生成およ

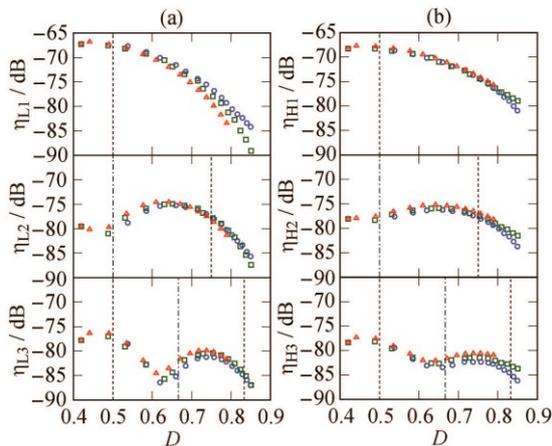


図6: 周波数混合における周波数変換効率の  $D$  依存性。(a)は低周波数側のサイドバンド、(b)は高周波数側のサイドバンドに対するものである。三角印、四角印、丸印は、それぞれ、 $p_{Ar} = 0.4$  kPa,  $0.8$  kPa,  $1.2$  kPa に対応する。

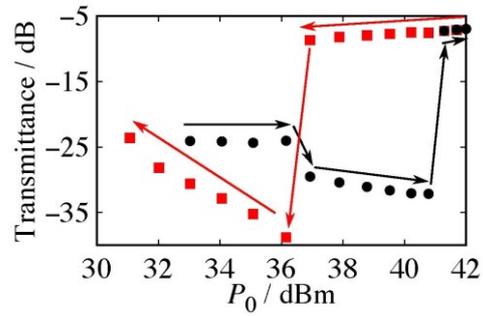


図7:  $p_b = 100$  Pa,  $p_t = 200$  Pa とし、周波数が  $3.031$  GHz の連続波を照射したときのメタマテリアルの透過率のパワー依存性。

び消滅に伴う透過率の2値的な変化によって発生するということが確かめられた。 $D$  が大きい領域で実験とモデルの差がやや大きくなっているが、これは上で述べたモデルが問題を非常に単純化していることによるものであると考えられる。

次に、図3の実験系を用いることにより得られた結果を示す。この実験は当初の予定にはないものであったが、図2の系を用いた実験の最中に偶然発見した現象を解明するために行ったものである。モノサイクルパルス電磁波の自励発振に直接的にはつながらないかもしれないが、メタマテリアルにおける非線形現象の解明という大きな範疇では重要なものであると考えたため、この実験を行うことにした。図7は真空容器の排気バルブを調節して真空容器内の空気圧力を  $p_b = 100$  Pa とした状態で、アルゴンガスを導入し、全圧を  $p_t = 200$  Pa としたときのメタマテリアルの透過率の入射パワー依存性である。入射パワーを低い状態から増加させていくと、 $P_{c1} = 36.9$  dBm を超えたところで透過率が急激に低下する。これは、一方のカットワイヤー共振器のギャップ部分においてプラズマが生成されるために生じる現象である。さらに入射パワーを増加させ、 $P_{c2} = 41.3$  dBm を超え

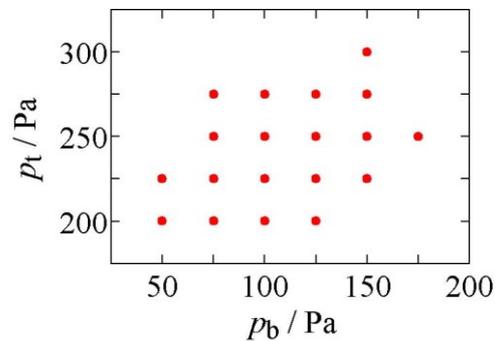


図8: 両方のカットワイヤー共振器でプラズマが生成されるための入射パワーのしきい値が  $42.0$  dBm よりも小さい領域。

ると、透過率が急峻に増加する現象が生じる。これは、両方のカットワイヤー共振器のギャップ部分において同時にプラズマが生成されるために生じる。当初の予測では、 $P_{e2}/P_{e1}$  は120程度と考えていたが、この実験では2.7程度とかなり小さい値となった。この現象は真空容器中にアルゴンだけでなく空気も存在することにより発生するものと考え、 $p_0$  と  $p_a$  を様々に変化させて、両方のカットワイヤー共振器のギャップ部分で同時にプラズマが生成されるための入射パワーのしきい値を調べた。図8はしきい値が42.0dBmより小さい領域を表したものである。 $p_a$  と  $p_0$  の値の組合せがある領域に存在する場合にこの現象が観測されていることから、アルゴンと空気の全圧と分圧比が共に影響する現象であることがわかる。今のところ、気体の全圧と分圧比によって、一方のカットワイヤー共振器に生成されたプラズマからの真空紫外光の放射やプラズマの熱輸送が変化し、他方のカットワイヤー共振器の絶縁破壊電場が大きく低下するような条件が実現されたときに両方のカットワイヤー共振器でプラズマが生成される現象が生じると考えている。メカニズムについてはより詳細に調べられるべきではあるが、気体圧力やその比率を調整することによって比較的大きなパワーの電磁波に対して生じる現象を小さなパワーの電磁波に対しても発生させられるというのは、非線形現象の高効率発生という視

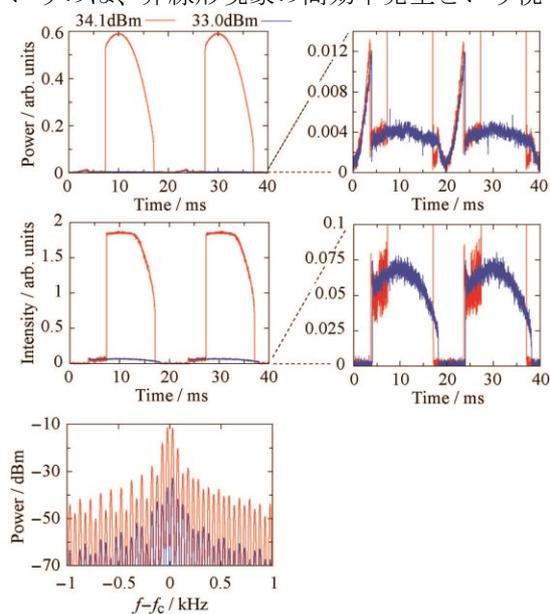


図 9: 一方のカットワイヤー共振器でのみプラズマが生成される場合と両方の共振器でプラズマが生成される場合のメタマテリアルの非線形応答の比較。(上段) 透過波の包絡線波形、(中断) プラズマからの発光強度、および、(下段) 透過波のスペクトル。

点において重要である。

続いて、両方のカットワイヤー共振器で同時にプラズマが生成される現象を利用した周波数混合の発生について評価した。評価法は上で述べた周波数混合の実験と同じである。図9に  $p_0=50$  Pa,  $p_a=225$  Pa,  $f_1=3.031$  GHz,  $f_2=f_1+50$  Hz とし、 $P_0=33.0$  dBm とした場合、および、 $P_0=34.1$  dBm とした場合の透過波の包絡線波形、プラズマからの発光波形、および透過波のスペクトルを示す。 $P_0=33.0$  dBm のときは一方のカットワイヤー共振器においてのみプラズマが生成され、 $P_0=34.1$  dBm のときは両方のカットワイヤー共振器において生成されるような条件になっている。これらの測定結果を比較すると、両方のカットワイヤー共振器において同時にプラズマが生成されている時の方が、プラズマからの発光強度がより強いことがわかる。また、一方のカットワイヤー共振器でプラズマが生成されている時の透過率はプラズマ非生成時の透過率よりも小さいが、両方のカットワイヤー共振器で同時にプラズマが生成されている時の透過率はプラズマ非生成時の透過率よりも大きくなっており、プラズマの生成・消滅に伴う透過率変化は両方のカットワイヤー共振器で同時にプラズマが生成される時のほうが大きくなっている。それに伴い、周波数混合により発生するサイドバンドの大きさも100倍ほど大きくなっている。ここでの両方のカットワイヤー共振器でプラズマが生成される現象は、一方のカットワイヤー共振器で発生したプラズマにより誘起されるものであるため、メタマテリアル中において生成されたプラズマの支援によって大きな非線形効果を生じさせることができたということになる。

研究開始当初の目標であったモノサイクルパルス電磁波の自励発振については実現できていないが、その代わりに、メタマテリアル中に生成されたプラズマによって支援される非線形現象の発生という新しい概念を発見したのは重要な成果であると考えている。今後は、ここでの研究結果をふまえて、モノサイクルパルス電磁波の自励発振やその他の非線形現象の高効率発生、および、電磁波とプラズマの相互作用により発生する新奇な現象の創出に取り組んでいく予定である。

本研究で得られた成果に関して、下記の「5. 主な発表論文等」に記載のものに加えて、2件の論文を発表する予定である。

#### 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)

[雑誌論文] (計 1件)

- ① Y. Tamayama and O. Sakai, Microplasma generation by slow microwave in an electromagnetically induced transparency-like metasurface,

Journal of Applied Physics, vol. 121,  
073303-1-6, 査読有  
DOI: 10.1063/1.4976716

〔学会発表〕（計 2件）

- ① 吉村 拓也, 玉山 泰宏, 安井 寛治, 電磁誘起透明化メタマテリアルにおける放電を利用した四光波混合, 電子情報通信学会信越支部大会 (2016)
- ② 吉村 拓也, 玉山 泰宏, マイクロプラズマの生成及び消滅によって誘起されるメタマテリアルの非線形応答, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

玉山 泰宏 (TAMAYAMA, Yasuhiro)

長岡技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 50707312