

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05304

研究課題名(和文) 時間界面を用いたテラヘルツ波の周波数変換

研究課題名(英文) Frequency conversion of terahertz waves with temporal boundary

研究代表者

宮丸 文章 (Miyamaru, Fumiaki)

信州大学・学術研究院理学系・教授

研究者番号：20419005

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、テラヘルツ波技術の発展は目覚ましいものがあるが、テラヘルツ領域で使うことのできる光学素子はまだまだ多くはなく、とくに周波数を制御する素子は、テラヘルツ領域において開発が遅れている。本研究では、「時間界面」というものを用いることによって、テラヘルツ波の周波数変換を実現することを目的としており、金属導波路構造を用いることにより、フェムト秒パルスレーザーによる光励起によって時間界面を実現し、テラヘルツ波の周波数変換の実証実験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質パラメータの時間的不連続性として実現される時間境界は、波動物理学における最も基本的な概念の一つである。しかし、その重要性にもかかわらず、これまで時間境界での波動ダイナミクスを明確に観測することが困難であった。本研究では、時間境界における電磁波の超高速ダイナミクスを実験的に観測し、構造的分散制御によって生じる時間境界での準解析的な理論式を導出した。本研究の成果は、時間境界における波動の基礎的理解に貢献するとともに、時間変動する系における構造分散制御の可能性を見出したと言える。

研究成果の概要(英文)：Although there have been remarkable developments in terahertz wave technology in recent years, there are still not many optical components that can be used in the terahertz wave region. In this study, we aim to realize frequency conversion of terahertz waves by using a "temporal boundary". We have demonstrated that the temporal boundary can be realized by illuminating a metallic waveguide structure with a femtosecond laser pulse and converted the frequency of input terahertz waves.

研究分野：テラヘルツ波光学

キーワード：テラヘルツ波 時間界面 周波数変換

1. 研究開始当初の背景

(1) テラヘルツ波と光学素子

テラヘルツ領域は、電磁波の周波数軸において光波と電波の中間に位置する電磁波領域であり、他の電磁波領域に比べてその技術的な開発は遅れていたが、テラヘルツ波の発振・検出技術や、応用展開に関する研究はここ数十年の間に急速に発展してきている。しかしながら、テラヘルツ領域で使うことのできる光学素子はまだまだ多くはなく、テラヘルツ技術の発展を妨げている。そのような中、メタマテリアルという人工微細構造物を用いた、テラヘルツ光学素子の研究開発が進められており、振幅、位相、波数などといった電磁波を特徴づけるパラメータを制御可能な、静的及び動的な光学素子の開発が報告されてきている。

(2) テラヘルツ波の周波数変換とその問題点

世界における近年のテラヘルツ領域のメタマテリアルに関する研究・開発は目覚ましいものがあるが、電磁波の基本的な特性の一つである周波数を制御する素子は、テラヘルツ領域において開発が遅れている状態である。テラヘルツ波を発振する際において、所望の周波数を得る技術はすでに存在しているが、一度発振されたテラヘルツ波を、他のテラヘルツ領域の周波数に変化させるような周波数変換技術の実現は非常に困難である。例えば、マイクロ波領域においてダイオードを用いて周波数変換が行われるが、テラヘルツ領域のような高周波数になるに従って変換効率は非常に低いものになってしまう。一方、可視光領域では、周波数変換の手法として非線形性光学結晶が使用されるが、その場合、レーザーのような高強度の光源が必要であり、平均パワーの低いテラヘルツ波では有効な手法ではない。このようにテラヘルツ領域では、従来使用されてきた周波数変換方式をそのまま利用することが出来ないという問題がある。

2. 研究の目的

そこで上記の問題を解決するため、「時間界面」というものを用いることによって、テラヘルツ波の周波数変換を実現することが本研究の目的である。

時間界面を用いて周波数変換を行う原理を説明するために、まず一般的に馴染みのある「空間界面」から考える。空間的に屈折率の異なる2つの媒質が接している界面を空間界面と呼ぶ。電磁波が空間界面を透過する際、電磁波の波数が変化する(図1(a))。これは屈折現象として知られているが、その際、電磁波の周波数は変化しない。それに対し、時間的に屈折率の異なる2つの媒質の界面を時間界面と呼ぶ。この時間界面を透過する場合、空間界面とは逆に、電磁波の波数は変化せず、電磁波の周波数が増加する(図1(b))。このような時間界面は、電磁波が伝搬している領域の屈折率が短時間で変化することに対応している。本研究では、この時間界面を用いることによって、できるだけ高効率なテラヘルツ波の周波数変換を実現することを目指している。

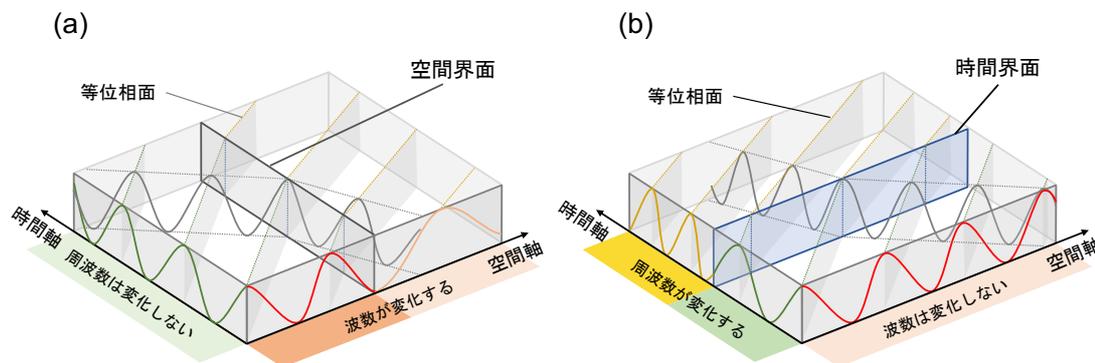


図1. (a)時間-空間面における電磁波の伝搬の様子と空間境界における波数の変化の様子。(b)同電磁波の伝搬の様子と時間界面における周波数の変化の様子。

3. 研究の方法

(1) 時間界面を実現するプラットフォームの決定

時間界面による周波数変換は、マイクロ波やテラヘルツ波及び、近赤外領域においてこれまで報告されている。マイクロ波領域やテラヘルツ波では、ガスプラズマや固体中の電子-正孔対を利用して時間界面を実現している。一方、近赤外領域ではフォトニック結晶導波路のような半導体導波路を光励起することによって時間界面を実現している。後者のような導波路型の方が、構造によって電磁波の伝搬特性を制御することができるため、素子設計の自由度が高いというメリットがある。しかし導波路型をテラヘルツ領域で実現するには一つ問題がある。近赤外領域では波長が短いため、導波路幅が数ミクロン程度となり、その場合励起光が導波路の厚み方向全体に染み込むので、導波路全体の屈折率を変化させることができる。一方、テラヘルツ領域では波長が長くなるため、対応する導波路厚みは数百ミクロンとなる。その場合、励起光は導波路のごく表面にしか染み込まず、導波路のほとんどの部分の屈折率は変化しないという問題が生じる。

(2) 具体的な導波路構造

そこで本研究ではその問題を解決するため、時間界面を実現するプラットフォームとして、金属導波路構造を提案する。提案する金属導波路構造は、ヒ化ガリウム半導体を、幅1mm、厚み0.1mm、長さ1~2.5mmのサイズに加工したものの底面に金属を蒸着したものである(図2(a))。この導波路に、1mm×0.1mmの面からテラヘルツ波を入射させ、長さ方向に導波路内を伝搬させる。このときテラヘルツ波の電場の方向は、導波路の幅方向に平行になるようにする(TE偏光)。テラヘルツ波が導波路内を伝搬しているときに、金属を蒸着した面と反対側の上面に、フェムト秒パルスレーザー(ポンプ光)を照射することにより、表面から1ミクロン程度の厚み部分に、光励起キャリアを生成させる。この光励起キャリアの濃度によってプラズマ周波数が決定される。プラズマ周波数が、対象となるテラヘルツ波の周波数領域(0.3~0.6THz付近)よりも十分に大きい場合、上面も金属とみなすことができるようになり、導波路内を伝搬する電磁波の分散関係が大きく変化する(図2(b))。この分散関係の変化に伴い、入射したテラヘルツ波の周波数が変換される。

本研究で実現する時間界面は、導波路構造の表面のみの物性を外部からの光照射によって変化させ、導波路全体の物性は変化させない。従来のように電磁波が存在するすべての場所の材質の物性を変化させる場合を材料分散の変化と呼び、導波路の一部の物性を変化させることにより、結果として電磁波の分散関係を変化させる場合を構造分散の変化と呼ぶことにする。本研究で提案するのは構造分散による時間界面の実現であり、導波路のサイズがポンプ光の染み込み長よりも非常に大きいようなテラヘルツ領域において、有効な方法であると考えられる。

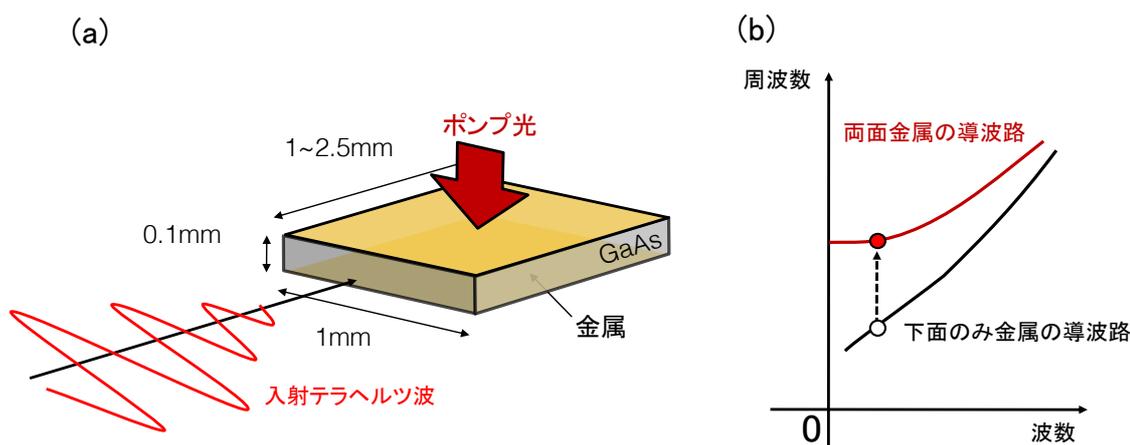


図2. (a)金属導波路の構造と入射テラヘルツ波光学系配置の概念図。(b)下面のみ金属の導波路の分散関係(黒線)と両面金属の導波路の分散関係(赤線)の概念図。

(3) 測定光学系の構築

上記のように作製した金属導波路を用いて、実際にテラヘルツ波の周波数が変換されることを測定する必要がある。そのための光学系として、光ポンプ-テラヘルツプローブ光学系を構築した。この光学系ではフェムト秒パルスレーザーを光源として、テラヘルツパルスを生成・検出することができる。具体的には、フェムト秒パルスレーザーを強度分割し、そのうちの一つの光(テラヘルツ波生成光と呼ぶ)をニオブ酸リチウム結晶に入射する

ことによってテラヘルツパルスを生じた。生成されたテラヘルツパルスは金属導波路を透過後、ZnTe 結晶に入射する。その際、強度分割されたもう一つの光(ゲート光と呼ぶ)を同時に ZnTe 結晶に入射させることによって、テラヘルツ波の振幅に相当する信号を検出することができる。テラヘルツ波とゲート光が ZnTe 結晶に入射する相対的なタイミングを変化させることによって、金属導波路を透過してきたテラヘルツ波の時間波形を測定することができる。

ゲート光のフェムト秒パルスレーザーをさらに強度分割した光(ポンプ光)を用いて、金属導波路の上面を照射できるようにし、時間界面を実現した。金属導波路に入射するテラヘルツ波とポンプ光が照射する相対的なタイミングは、両者の光学距離を調整することによって任意に制御することができる。

さらにテラヘルツ波が金属導波路に入射する前に、バンドパスフィルタを挿入した。テラヘルツ波生成光によって生成されたテラヘルツ波はブロードバンドのパルス波である。その場合、予想される周波数の変換幅よりも、テラヘルツ波のスペクトルの半値幅の方が広く、周波数が変換された様子が明確に確認しづらいという問題がある。そこで、バンドパスフィルタによって、入射テラヘルツ波のバンド幅を、周波数変換幅よりも十分に狭くし、周波数が変換された様子が明確に観測できるようにした。バンドパスフィルタの透過帯域のピーク周波数が異なる、3種類のバンドパスフィルタを作製した。

4. 研究成果

(1) テラヘルツ波の周波数変換の実証実験

本研究において、まずテラヘルツ波の周波数変換の実証実験を行った。その結果の一例として、長さ 2.5mm の金属導波路に 0.48THz を中心周波数とするナローバンドなテラヘルツパルスを入射させ、時間界面による周波数変換を行った。その結果、金属導波路を透過してきたテラヘルツ波の周波数が高周波数側に変換されていることが、測定されたテラヘルツ波の時間波形から観測することができた。また時間波形をフーリエ変換することによってその中心周波数は 0.55THz に変換されていたことがわかった。この変換幅は、入射テラヘルツパルスの周波数領域における半値幅よりも広く、テラヘルツ波の周波数が明確に変換されたことを確認することができるものである。

またこのとき、入射テラヘルツパルスとポンプ光の相対的なタイミングを変化させるに従って、入射テラヘルツ波が変換されるタイミングが変化していることが時間波形において直接観測され、かつそれに対応して変換後のテラヘルツ波の周波数スペクトルが変化した。これらの変化は、時間界面による周波数変換の原理から直感的に予想されるものと一致している。

さらに2種類の異なる中心周波数のテラヘルツパルスを入射波として同様の実験を行った。0.35THz 及び、0.42THz の中心周波数の入射テラヘルツパルスに対して、変換後の中心周波数はそれぞれ 0.47THz 及び 0.51THz となった。上記の結果と合わせると、これらの変換周波数は、理論的に伝搬モードの分散関係から予想される周波数と概ね一致した。

また上記の実験において、ポンプ光がオフのときに金属導波路を透過してきたテラヘルツパルスのパワーに対して、ポンプ光がオンになるときに周波数変換されたテラヘルツパルスのパワーの比を測定すると、最高で 23%程度であった。これはこれまで報告されているテラヘルツ波の周波数変換の効率と比較して、とても高い効率であった。

(2) 変換周波数のポンプ光パワー依存性の測定

本研究では、上記で観測したテラヘルツ波の周波数変換において、ポンプ光のパワーに対する依存性を調べた。具体的には中心周波数が 0.48THz の入射テラヘルツ波に対し、ポンプ光のパワーを 20mW から 0.1mW まで変化させていき、そのときの変換後のテラヘルツ波の中心周波数を測定した。その結果、変換後のテラヘルツ波の中心周波数は、0.55THz から徐々に低周波数側にシフトし、0.1mW のポンプ光パワーでは、0.49THz になった。これは、ポンプ光パワーが減少するのに伴い、半導体表面に励起されるキャリア濃度が減少し、それに伴い伝搬モードの分散関係の変化が小さくなっていったからと考えられ、原理的に予測されるものと一致している。

(3) マルチパルスにおける選択的変換

時間界面による周波数変換の方法では、ポンプ光が金属導波路表面に照射されたときに導波路内に存在しているテラヘルツ波が周波数変換される。これを利用すると、マルチパルス存在下において、選択的にあるパルスのみを周波数変換することができる。本研究では、その一つの例の実証実験を行った。

本研究で用いた金属導波路を透過するテラヘルツ波の時間波形を観測すると、主に3つのテラヘルツパルスが観測される。1つ目のテラヘルツパルスは金属導波路をそのまま透過してきたパルスである(Pulse1)。それに対し2つ目のテラヘルツパルスは、金属導波路を伝搬し、出口の端面で一度反射し入り口方向に戻った後、入り口の端面でもう一度反射

し、最終的に出口を透過してきたパルスである (Pulse2)。3 つ目に観測されるパルスは、Pulse1 が、検出用の結晶として使用している ZnTe 結晶内部で 2 回反射されたために遅れて検出されたパルスである (Pulse3)。このようなマルチパルスが存在する系において、Pulse1 が金属導波路を透過後、Pulse2 が金属導波路内部に存在しているときに、ポンプ光を照射した。その結果、Pulse1 の周波数は入射テラヘルツパルスと同じ周波数であるのに対し、Pulse2 の周波数のみ周波数変換されることが観測された。このとき Pulse3 は、Pulse1 が金属導波路とは関係のない ZnTe 結晶内部での多重反射による結果なので、周波数変換はされない。これらの結果は、マルチパルス存在下において、時間界面を用いることによって、選択的にあるパルスを周波数変換することができることを実証したものである。

(4) 準解析的な理論の構築

本研究で行った、金属導波路と時間界面による周波数変換を理論的に考察するため、準解析的な理論の構築を行った。この理論を用いることによって、入射電磁波のエネルギーの何割が周波数変換された電磁波に移行するかという変換効率を計算することができる。

さらに興味深いことに、周波数変換が行われた直後から、導波路の表面に局在する直流磁場成分が存在するという解が得られた。この直流磁場成分は、有限要素法を用いた電磁界シミュレーションにおいても確認された。

(5) 今後の展望

本研究では、時間界面を用いることによって、これまで高効率で周波数変換を行うことが困難であったテラヘルツ領域において、最大で 23% という効率で周波数変換を行うことができた。テラヘルツ領域におけるこのような高効率な周波数変換は、これまで困難であったものであり、本研究の実験結果は将来のテラヘルツ波応用において有益なものであると考えられる。

本研究で理論的に得られている周波数変換の効率は、例えば 0.48THz の入射テラヘルツ波において 70% 程度である。しかしながら、本実験で得られた 23% という効率は理論値に対して低い値であり、さらに向上させる余地が残されている。今後は、実験における変換効率を理論値までできるだけ近づけることが求められる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Miyamaru Fumiaki, Mizuo Chihiro, Nakanishi Toshihiro, Nakata Yosuke, Hasebe Kakeru, Nagase Shintaro, Matsubara Yu, Goto Yusuke, Perez-Urquizo Joel, Mad'ou Julien, Dani Keshav M.	4. 巻 127
2. 論文標題 Ultrafast Frequency-Shift Dynamics at Temporal Boundary Induced by Structural-Dispersion Switching of Waveguides	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 53902
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.127.053902	査読の有無 有
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3件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 宮丸文章, 水尾千紘, 中西俊博, 中田陽介, 長谷部翔, 長瀬慎太郎, 松原祐有, 後藤祐輔, Joel Perez-Urquizo, Julien Madeo, Keshav M. Dani
2. 発表標題 時間壁を用いたテラヘルツ波の周波数変換
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端VIII（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Miyamaru, C. Mizuo, K. Hasebe, T. Nakanishi, Y. Nakata, J. Madeo, and K. Dani
2. 発表標題 Frequency shift of terahertz waves by changing waveguide modes in time domain
3. 学会等名 The 4th A3 Metamaterials Forum 2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Miyamaru, C. Mizuo, K. Hasebe, T. Nakanishi, Y. Nakata, J. Madeo, and K. Dani
2. 発表標題 Terahertz frequency change by rapidly switching propagation mode in waveguide structure
3. 学会等名 OptX-Nano 2019 conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	中西 俊博 (Nakanishi Toshihiro) (30362461)	京都大学・工学研究科・講師 (14301)	
研究 分担者	D a n i K e s h a v (Dani Keshav) (80630946)	沖縄科学技術大学院大学・フェムト秒分光法ユニット・准教授 (38005)	

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