

研究終了報告書

「光誘起テラヘルツトポロジカル状態の時空間制御」

研究期間:2020 年 11 月～2024 年 3 月

研究者:中田 陽介

1. 研究のねらい

トポロジカル絶縁体表面には金属的な表面状態が現れるが、その特性は電子のバンドが示すトポロジカルな性質によって規定される。こうした状態はトポロジカル状態と呼ばれ、不純物などによる摂動の影響を受けにくく、ロバストな特性を示すことから大きく注目されている。歴史的な理由から、トポロジカル状態は電子系を中心に研究されてきた。研究の進展とともに、こうしたトポロジカル現象が電子の波動性に起因するものであることがわかってきた。このため、電子以外の波動に対しても、トポロジカル状態を発現させることができる。近年、特に、電磁波や音波に対するトポロジカル現象の開拓が進められている。波動のトポロジカル状態を作り出すために、メタマテリアルが広く活用される。メタマテリアルは人工構造体の集まりとして構成される人工材料であるが、構造形状をうまく設計することによりトポロジカル状態を発現させることができる。こうしたメタマテリアルの特性を生かし、トポロジカル状態の基礎学理の究明とその応用が進められている。例えば、申請者らが結晶欠陥周りに局在する欠陥モードに対して示したように、構造の連続変形によって局在状態のトポロジカルな性質を浮かび上がらせることができる[Y. Nakata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 073901 (2020)]。しかしながら、従来の静的メタマテリアルでは一度構造を作りこむと後からその形状を変えることはできず、構造変形に基づくトポロジカル現象開拓の課題となっている。この問題を解決するには高い自由度で構造を変形できる動的メタマテリアルを実現する必要がある。高自由度の動的メタマテリアルが実現できると、構造変形を調べることができるのみならず、トポロジカル状態の時空間制御が可能になる。例えば、トポロジカル状態を空間的に好きな方向に導いたり、時間的に変調したりすることができるようになる。本研究では、高い自由度の構造変形を可能にする動的メタマテリアルを実現し、トポロジカル現象の時空間制御を目指す。このために、テラヘルツ周波数領域の動的メタマテリアルに着目する。波長が 300 μm 程度のテラヘルツ領域におけるメタマテリアル構造は数 mm のスケールになるため扱いやすく、高い自由度で動的変形を引き起こせる可能性がある。テラヘルツ領域はセンシング、および、超高速通信の両方で注目を集めているものの、センシング・通信応用に必須の動的デバイス開発は遅れている。今回、開発する動的メタマテリアルはこうした応用上の要求にも応えようとするものである。

2. 研究成果

(1) 概要

高い自由度で構造の動的変形を可能にする技術の開発を進めた。半導体表面に金属ナノパターンを形成し、そこに光励起を行う手法を考案し、光励起構造体の応答特性の向上を実証した。さらに、構造体の応答を評価するために、光ポンプが可能なテラヘルツ時間領域分光

系を構築した。空間位相変調器の導入により目的形状での光ポンプが可能になった。半導体に対する光ポンプを活用すると、時間的に変化する導波路を実現できる。特に波の伝搬中に導波路を瞬間的に変形すると、効率的な周波数変換が生じる。こうした時変導波路系における周波数変換を伴う波動散乱の理論解を導出し、周波数0のモードが現れる可能性を示した。さらに得られたゼロモードの特異性を分析する過程で、表面プラズモンが自己双対性によって保護されたゼロモードを起源に持つことを発見した。さらに、表面プラズモンのトポロジカルな形成メカニズムについても回路理論によって解明した。

(2) 詳細

研究テーマ A 「金属ナノパターンによる半導体光励起時の応答特性向上」

動的パターンの実現にあたり、半導体の光キャリア励起に着目した。光励起を行う際に構造形状をプロジェクションマッピングすることによって、任意の二次元パターン形状に光キャリアを注入できる。しかしながら、半導体に直接光励起を行うだけでは十分な光励起構造体の応答が得られない。そこで、本研究では半導体表面に金属ナノパターンを形成し、光励起時の応答特性の向上を実証した。

半導体表面に金属パターンを形成すると、通常は金属反射が増大し、入射光を十分に有効利用できない。この問題は金属パターンの大きさを最適化することにより解決可能である。今回、ホンドープシリコンに対して 375 THz（波長 800 nm）での光励起をターゲットとし、その周辺での反射波の抑制を試み、ターゲット周波数近傍で金属パターン導入による反射抑制に成功した。次にこうした金属パターンに電極を取り付け、パルス光励起時の DC 抵抗を測定した。得られた結果より、金属パターンの導入により光励起時の抵抗を大きく下げることができることがわかった。ただし、電極導入により、構造作製の精度が下がり、反射波は完全に抑制できてはいない。にも関わらず、抵抗低下を観察できたのは、ナノギャップの持つ高いアスペクト比によると考えられる。このため、さらなる性能向上の余地があり、現在、最適化を進めている。

研究テーマ B 「目的形状で光ポンプ可能なテラヘルツ時間領域分光系の開発」

光励起構造体の応答評価に必要なテラヘルツ時間領域分光系の立ち上げを行った。テラヘルツ発生にはパルス面傾斜法を用いた。本手法ではニオブ酸リチウムに波面チルトしたフェムト秒パルスレーザーを照射し光整流効果によってテラヘルツ波を発生させる。テラヘルツ電磁波の時間波形の検出には ZnTe 結晶による電気光学検出法を用いた。図 2(a)に構築した光学系を示す。本システムを用いて検出されたテラヘルツ電場を図 2(b)に示す。

上記のテラヘルツ分光系の中に、半導体表面に光パターンをプロジェクションマッピングするための光学系も構築した。図 2(c)に光励起系の写真を示す。空間光位相変調器 (SLM) によって位相変調した光がレンズによりフーリエ変換され、サンプルである半導体表面に照射される。まずはテストとして図 2(d)に示すような平板パターンの照射を試みた。半導体表面に照射されたパターンを図 2(e)に示す。本パターンに対してテラヘルツ波を入射すると期待通りテラヘルツ波の透過が阻止されることを確認した。

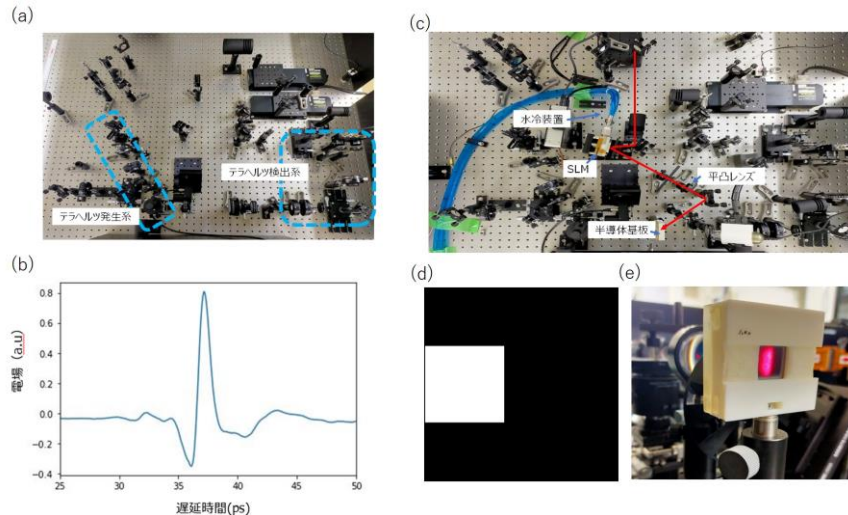


図 1 (a) テラヘルツ時間分光系。(b) 測定されたテラヘルツ時間波形。プロジェクションマッピングを実現する光路 (赤)。(b) テスト用に用いた画像パターン。(c) 実際に基板上に照射されたパターン。

研究テーマ C 「時変導波路における周波数変換」

パルスレーザーによる半導体の光励起は極めて短い時間に生じるため、これを利用して瞬間的に構造が変化する導波路を実現できる。本テーマでは、テラヘルツ波伝搬中に導波路構造が突然変化した際に生じる周波数変換を研究した。図 3(a) に実験のセットアップを示す。底面に金属を蒸着した GaAs (ヒ化ガリウム) は片面金属導波路として動作する。テラヘルツ波がこの導波路を伝搬している最中に、光キャリア励起によって瞬間的に表面を金属化し、両面金属導波路に変化させる。図 3(b) に共同研究先の信州大学の実験系で観測されたテラヘルツ電場波形を示す。光キャリア励起がない場合に比べ、光キャリア励起時にテラヘルツ電場の周波数が高周波数化されていることがわかる。これは時変操作により高い変換効率で周波数変換が生じていることを意味する。報告者は本研究において理論解の導出を担当した。この解析の過程で、図 3(c) に示す周波数 0 のモード(ゼロモード)の存在を考慮に入れると、厳密解をうまく構成できることがわかった。最終的に得られた解から、周波数変換効率を理論的に求めることに成功した。

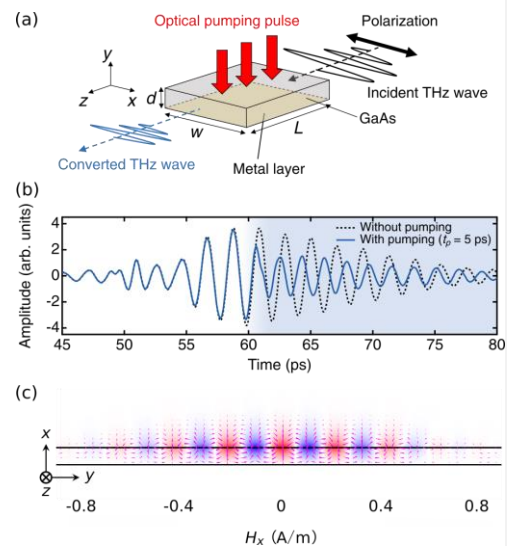


図 2 (a) 実験セットアップ。(b) 光ポンプの有無による波形の変化。(c) 時変導波路に現れるゼロモードの磁場分布。

研究テーマ D「表面プラズモンの起源解明」

研究テーマ C の解析で得られたゼロモードは通常の散乱解析では扱われることがない。こうしたゼロモードにはなんらかの特別な意味がありそうである。そこで、周波数0のモードに着目し、金属表面上に現れる表面波に関する研究も進めた。

金属表面の表面波として最も基本的なものは表面プラズモンである。表面プラズモンは誘電体と金属の界面に形成される。このため表面プラズモンの起源は、界面の持つ対称性と何らかの関係があることが期待される。ただし、誘電体・金属界面は鏡映対称性といった単純な幾何学的対称性は持たない。このため、表面プラズモンの起源と関連する対称性は、幾何学的対称性ではなく、非自明な対称性が関与していると考えられる。カギとなるのは、誘電体と金属の入れ替え操作である。こうした入れ替え操作と鏡映反転の組み合わせに関して、界面は双対性を有する。特に、界面が自己双対になると、表面プラズモンの周波数がゼロに固定される。この観察を一般化し、自己双対性によって保護されたゼロモードが表面プラズモンの起源を与えることを理論的に証明した(図 4)。さらに、図 3(c)に示す時変導波路に現れるゼロモードは TM 表面プラズモンゼロモードの TE 対応物であることも解明された。

上記のように表面プラズモンと隠れた対称性保護との関連が明らかにできた。一方で、表面プラズモンとバンドトポロジーはどのように関連するのであろうか？ この問題に解答を与えるため、我々は表面プラズモン形成を回路モデルによって研究した。電磁気学と電気回路論のアナロジーに着目し、パラメータに応じて誘電体と金属の両方を表せる回路モデルを導出した。この回路モデルを元に考えると、図 5に示すように波の伝搬を特徴付ける分散関係は誘電体・金属界面でねじれていることがわかる。このねじれが表面プラズモンを LC 共振の形で生じさせる。このシナリオを回路応答に関する古典的知見を活用し証明した。さらにプラズモニックなバルク・エッジ対応に一般化した。

以上、まとめると本研究により、表面プラズモンと、隠れた対称性・トポロジーとの関連を解明することができた。こうした知見は今後のプラズモニック結晶などの設計指針を与えるものである。

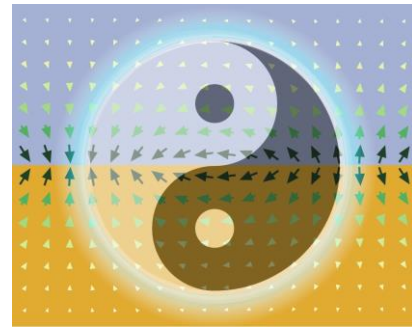


図 3 界面の自己双対性に起因する表面プラズモンゼロモードのイメージ。

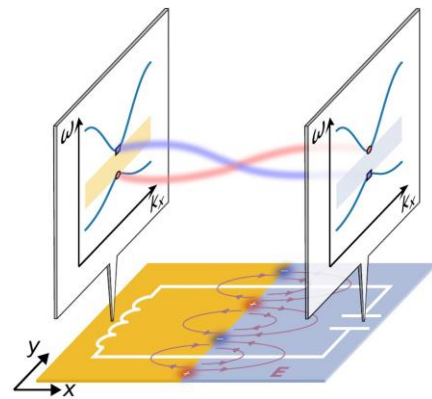


図 4 金属誘電体界面におけるバンド反転。

3. 今後の展開

金属ナノパターンによる半導体光励起特性の向上が実証できたため、これとテラヘルツ系を組み合わせ、自在パターンのテラヘルツ応答評価に早々に進みたい。こうした技術は様々な応用可能性があり、特にセンシング・通信技術に貢献ができる。例えば、テラヘルツ状態変調をロック

イン技術と組み合わせセンシング感度を向上させることができる。他にも動的メタマテリアルでテラヘルツ偏光を変調することで、偏光敏感センシングへの応用が考えられる。さらにこれらセンシング・通信応用の知見を総合するような展開も期待される。環境の状況をセンシングしつつ、それらの情報を元に最適化された構造パターンに動的メタマテリアルを変形し、最適通信環境を実現するような例が挙げられ、第6世代(6G)の通信技術の展開に貢献しうる。こうした応用展開は今後、5～10年程度のスパンでの実現が期待される。

4. 自己評価

ナノパターンによる応答増強やテラヘルツ時間領域分光システムといった要素技術開発は順調に進展し、今後の発展の手がかりを得ることができた。さらに、時変系への展開を進める中で、ゼロモードの存在を予想外に見出した。その理解を深める過程で表面プラズモン理解の新展開が生まれた。当初は連続変形に起因するトポロジカル現象を模索していたが、その枠組みを超えて金属系では誘電体系と異なるメカニズムでトポロジカル現象が生じていることを見出した。これは当初予測していなかった展開である。この結果を形にするために多大な時間を費やした。まとまった理論論文2報はオリジナリティが高く、表面プラズモンの基本理解に関する決定版であると自負している。これらにより表面プラズモンを語る新たな言葉を創り出した。今後こうした言葉を活用し、ナノフォトニクスへ新展開を引き起こせる可能性がある。一方、ナノパターン応答増強とテラヘルツ分光システムの組み合わせについてはまだ十分な時間をかけられておらず、さらなる研究が必要とされる。こうした研究が成功した暁には、光励起メタマテリアルによってリソグラフィフリーにメタマテリアル開発を加速できることに加え、状況に応じてかしこく形を変えるメタマテリアルが実現できる。また、トポロジカルモードを使った光デバイスを通して通信技術への貢献が期待される。さらに、時変系への展開として、高効率な周波数変換やゼロモードを活用したディテクタへの応用が期待できる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:3件

1. Yosuke Nakata, Toshihiro Nakanishi, Ryo Takahashi, Fumiaki Miyamaru, and Shuichi Murakami, “Hidden symmetry protection for surface plasmon polaritons,” *Physical Review Research* **5**, L042027 (2023).

金属表面に現れる表面波である表面プラズモンの起源を隠れた対称性に着目し同定した。界面が自己双対であるとき表面プラズモンは周波数ゼロに固定される。この観察を一般化し、表面プラズモンが自己双対性によって保護されたゼロモードを起源に持つことを理論的に示した。興味深いことに、上記のゼロモードは2つの独立なモードが例外的に融合しており、例外点の物理とも関連付くことがわかった。

2. Yosuke Nakata, Toshihiro Nakanishi, Ryo Takahashi, Fumiaki Miyamaru, and Shuichi Murakami, “Bulk-edge correspondences for surface plasmon polaritons: a circuit approach,” *Physical Review B* **108**, 174105 (2023).

表面プラズモン形成を回路理論に基づくバルク・エッジ対応から説明した。金属と誘電体の間の連続転移の本質を、負屈折率を持つメタマテリアルを記述するミニマルな回路モデルで抽出できることを示した。さらに、回路論のフォスターのリアクタンス定理を通して表面プラズモン形成を波動関数のパリティと関連付けることに成功し、その一般化を行った。

3. Fumiaki Miyamaru, Chihiro Mizuo, Toshihiro Nakanishi, Yosuke Nakata, Kakeru Hasebe, Shintaro Nagase, Yu Matsubara, Yusuke Goto, Joel Pérez-Urquiza, Julien Madéo, and Keshav M. Dani, “Ultrafast frequency-shift dynamics at temporal boundary induced by structural-dispersion switching of waveguides,” *Physical Review Letters* **127**, 053902 (2021).

瞬間的にパラメータが変わる材料は時空中では時間方向に存在する壁として捉えられる。通常の空間的界面と対比し、この時間方向の壁を時間壁という。時間壁における現象を観測するため、我々は表面が瞬間的に絶縁体から金属に変化する導波路に着目した。その結果、時間壁によって生じる周波数変化のダイナミクスを実験的に観測することに成功した。申請者はこの研究で理論解の導出を担当した。この解析の過程で、時間界面において周波数 0 のモード(ゼロモード) が形成されることが予想外にも明らかになった。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数:0 件(特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. (和文解説) 中田 陽介, 浦出 芳郎, 中西 俊博,「材料・光学部品」, 日本赤外線学会誌, Vol.31, No.1, 77-87 (2021).
2. (発表) 中田陽介,「隠れた対称性保護機構:光のサブ波長操作を可能にする表面プラズモンの根源的形成メカニズム」, 2023 年度 CREST/さがけ「トポロジー」領域 連携公開シンポジウム トポロジカルデバイスの現在と未来, オンライン, 2023 年 10 月 2 日.
3. (発表) 中田陽介,「金属におけるトポロジカル応答の本質」, KYOTO AGORA 考工学セミナー(CREST・さがけトポロジー領域合同セミナー共催), 京都, 2022 年 10 月 24 日.
4. (発表) 中田陽介,「双対性とメタマテリアル: 接続・非接続のはざまで」, 量子と古典の物理と幾何, オンライン, 2022 年 4 月 28 日.
5. (発表) 中田陽介,「メタマテリアルのトポロジカルな電磁応答」, 光電相互変換第 125 委員会 第 257 回研究会「光とトポロジー」, オンライン, 2021 年 12 月 17 日.