

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102
 研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
 研究期間：2017～2022
 課題番号：16KK0093
 研究課題名（和文）高空間分解・時間分解イメージング法によるメタマテリアルの新奇な波束伝搬機構の解明（国際共同研究強化）
 研究課題名（英文）Novel wave packet propagation mechanism in metamaterials studied by high spatial- and temporal-resolved imaging methods(Fostering Joint International Research)
 研究代表者
 久保 敦 (Kubo, Atsushi)
 筑波大学・数理工質系・講師
 研究者番号：10500283
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,200,000円
 渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究の成果は主に以下の3つの内容から成る。1. 金属メタマテリアルの典型的メタ原子である金属-絶縁体-金属（MIM）型ナノ共振器に、フェムト秒表面プラズモン波束が入射・透過する様子を時間分解可視化し、見かけの透過速度の実験的決定を行った。2. 表面プラズモン渦に形成されるトポロジカル構造である、トポロジカル・プラズモニック・スピン準粒子を時間・空間分解観察により発見した。3. トポロジカル・プラズモニック結晶に光励起されるエッジ状態、およびバルク状態を顕微的に可視化し、それらの空間的・エネルギー的特性とプラズモニック結晶バンドとの相関を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

全地球的なインターネット網を代表とする現代社会に不可欠な情報インフラには、不断の高速化、小型化、省エネルギー化が求められている。ナノ微細加工技術を用いた新規な光デバイスはこの社会的要請に応え得る。本研究の研究対象である表面プラズモン波は、デバイスの材料に金属と誘電体を用いて構成される電磁波モードであり、ナノスケールの微細構造を駆使する事で、モードの空間的局在性や強度、伝搬方向、伝搬速度、波面形状、偏光、角運動量などの制御が可能になる。本研究は時間・空間分解顕微鏡法を用い、種々の人工ナノ構造において発現する特異な表面プラズモン波について研究を行ったものである。

研究成果の概要（英文）：The results of this study are mainly composed of the following three topics:

1. Time-resolved imaging of the incidence and transmission process of femtosecond surface plasmon wave packets through a metal-insulator-metal (MIM)-type nanocavity, a typical meta-atom in metallic metamaterials, and experimental determinations of the apparent transmission velocity; 2. Examination of the topological structure formed in the surface plasmon vortex, the topological plasmonic spin quasiparticles, by time- and space-resolved observations; and 3. Microscopic visualization of the edge and bulk states of photoexcited topological plasmonic crystals, and their spatial and energetic properties correlated with the plasmonic crystal bands.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：表面プラズモン フェムト秒レーザー メタマテリアル 光電子顕微鏡 超短パルスレーザー プラズモニック結晶 トポロジカル構造 二光子蛍光顕微鏡

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初のプラズモニクス研究の動向として、ナノスケールの試料作製技術の向上に支えられ、人工構造により光の伝搬する「空間の性質」を制御するという概念の、メタマテリアル研究へ向けた総体的な進歩が顕著に生じていた。メタマテリアルによる群速度異常などの興味深い光学物性は、金属-絶縁体積層構造に微細な孔の配列構造を設けた積層型薄膜試料に対し、フェムト秒パルスレーザーを照射して薄膜の「通過速度」を測定する、という方法による報告例がある。しかしながら、この場合計測されたのは光パルスの群速度のみであり、光がメタマテリアルを通過する正にその時間内に、試料中にどのような光学応答が生じているかという問題については不明である。メタ原子の光学応答を解像するには約 10nm の空間分解能が必要であり、通常の光学的顕微鏡法の分解能を大幅に上回る。数少ない例として、エネルギー収差補正機能を付与した光電子顕微鏡 (PEEM) に、励起光源としてフェムト秒レーザーを組み合わせた装置により、数 nm 台の空間分解能と約 10 フェムト秒の時間分解能の両立が成されている。この様な高時間・空間分解顕微鏡法は一つ一つのメタ原子の内部を時間・空間分解観察することができ、人工物質の「階層」を貫く第一原理的なメタマテ物性の解明が可能になるものと想定される。

2. 研究の目的

メタマテリアルによる表面プラズモン波束の伝搬制御を行い、遅い群速度、負の群速度、後退波など、新奇な光学特性を示すメタマテリアル内部における波束伝搬のダイナミクスを、フェムト秒・ナノメートルの時間・空間分解能で詳細観察する。ミクロンメートルスケールにおける波束全体の巨視的な動きと、10-100 ナノメートルスケールにおける個々の「メタ原子」の内部構造の、両方を顕微的に可視化する事により、メタ原子同士の相互作用の出現の様相、および協同的な光学応答が時間・空間的にどのようにビルドアップされていくかを解明する。また、トポロジカルプラズモニック結晶による光のディラックコーン状バンドの形成など、理論研究が先行するトポロジカル物質群に対しても、ナノ人工構造の作製と波束イメージングにより特異的な光学特性の実験的観測を行う。

当研究は、フェムト秒時間領域における光エネルギーの時空間的な展開や損失機構に関する知見を与え、またそれらの人為的な制御に必要な原理の構築に貢献する。当該分野 (プラズモニクス、メタマテリアル、ナノフォトニクス) に対しては、プラズモニックデバイスや新規な光学素子の開発、また表面プラズモンを利用した太陽電池の光電変換効率の改善などの応用研究の進展に対し、波及的な効果を与える。また関連研究分野としては、医療・バイオ系で注目を集める二光子蛍光顕微鏡を始めとする超解像顕微鏡法や、補償光学、光マニピュレーション、発光デバイス、センシングデバイス、レーザー工学等への貢献が考えられる。

3. 研究の方法

当研究では、表面プラズモン波束を「二次元面内に捕捉された光パルス」とみなし、二次元 TM 波に共振するメタ原子を設計することにより、「プラズモン波束に対するメタマテリアル」を作製する。メタマテリアル表面を表面プラズモン波束が伝搬する様子を時間分解顕微鏡法によりフェムト秒時間分解能で動画画像化し、個々の金属ナノ構造の微視的な光学応答が巨視的な波束伝搬を決定するに到るまでの、階層横断的な機構の解明を目指す。表面プラズモンの観察手法には、筑波大学において開発したフェムト秒時間分解二光子蛍光顕微鏡法 (TR-2PFM) および、共同研究によるフェムト秒時間分解光電子顕微鏡法 (TR-PEEM) を用いる。

4. 研究成果

(1) メタ原子を透過する表面プラズモン波束の時間分解可視化

メタマテリアルは、光の波長よりも小さな光共振器や光アンテナなどのメタ原子の配列構造によって構成されており、一つひとつのメタ原子は、入射光と散乱光との間に、特定量の位相、振幅、偏光の変調を与える。これら多数の足し合わせの効果として、異常反射、異常屈折、ベクトルビーム形成、波長フィルター、光加速、超短パルスレーザー整形など、さまざまな機能を持つ光学素子の設計・製作が可能になる。従って、光パルスが、メタ原子の単位構造との相互作用を通じてどのように変形・変調されるのかを観測し評価することが、メタマテリアルの動作原理を根本的に理解するために不可欠である。メタマテリアルの特徴的な光学的性質 (入射光とメタ原子との相互作用) が観察されるのは、メタ原子の共鳴振動数付近の周波数領域に限られる。そのため、微細なメタ原子と限られた領域の光パルスとの相互作用を観測することは困難であり、実験的な評価方法の確立が課題であった。

本研究では、メタ原子として、構造長約 100nm の金属-絶縁体-金属型ナノ共振器 (MIM-NC) を金属表面上に作製し、この試料表面のやや離れた位置で、光パルスを表面プラズモンポラリトン (SPP) の波束に変換して MIM-NC に入射する方法により、単一のメタ原子と光パルスとが相互作用する系を同一平面上に実現した。この試料をフェムト秒時間分解二光子蛍光顕微鏡法 (TR-2PFM) で観察し、SPP 波束が金属表面上を伝搬して MIM-NC に到達し、共鳴的な相互作用を経て通り抜けていく様子を、10 フェムト秒の時間分解能、0.5 μm の空間分解能で、顕微的に可視化することに成功した (図 1)。その結果、MIM-NC を通過した波束には、ピークの位置に数 μm 程度の後方

シフト、あるいは前方シフトが生じることを見いだした(図2)。

MIM-NCの構造長を50~220 nmの範囲で系統的に変化させて同様の観察を行うと、この波束の位置シフトはMIM-NCの持つ共鳴振動数、および、波束のチャープ広がりりと密接に結びついており、波束のスペクトル中心に対して共鳴振動数を高(低)振動数側に離調させた場合には通り抜け波束に後方(前方)シフトが生じ、さらにスペクトル幅内に2つの共鳴振動数が入るように調整した場合には通り抜け波束には2ピークへの分裂が生じるのが明らかになった(図3)。波束の位置シフトと形状変化はMIM-NCの構造長に対し鋭敏であり、数10 nmの変調を加えるだけでシフト方向の前後の切り換えが生じた。

理論的な解析の結果、これらの現象はMIM-NCのファブリー-ペローエタロン型の光学特性と表面プラズモンモードの複素分散関係で解釈できることが示された。さらに、波束のシフト方向の前後の切り換えは、MIM-NCの共鳴振動数を調整しなくても、SPP波束を励起する光パルスに正もしくは負のチャープを外部から加えることによって起こることが分かった。通り抜け波束の位置シフトは、波束がMIM-NCを通り抜ける際の「見かけの群速度異常」を生じる。現実的なチャープ印加で操作できる位置シフト量は+6~-8 μm程度であり、これを見かけの群屈折率に換算すると、-40~+60にも及ぶ巨大な光学効果に相当する。このように大きな光学効果は、メタマテリアルに新たな設計指針を与え得るものである。

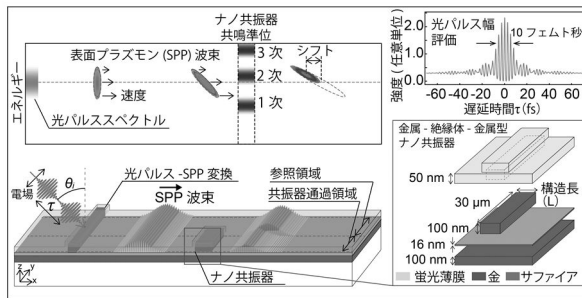


図1.表面プラズモン波束-ナノ共振器(メタ原子)相互作用過程の時間分解可視化実験の概略

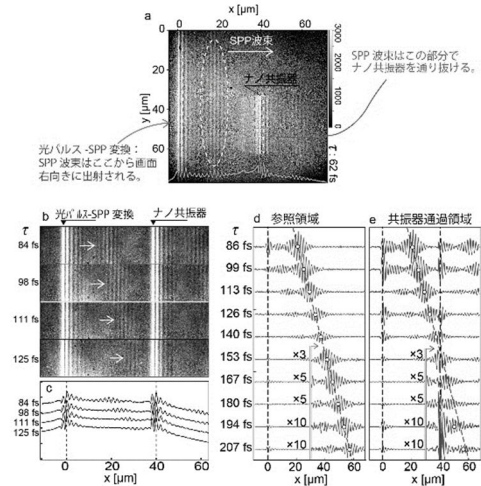
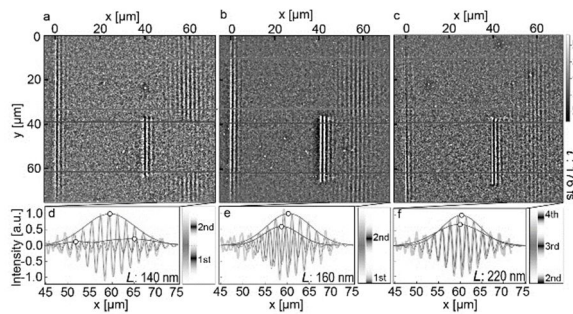


図2. ナノ共振器を通り抜ける表面プラズモン波束の時間分解映像のスナップショット

図3. ナノ共振器の共鳴振動数の「離調」による通り抜け波束のシフトの制御

(2) プラズモニック・トポロジカル・スピン準粒子の時間-空間分解観察

伝搬光には、波数ベクトルと同方向を向く二種類の角運動量：スピン角運動量(ヘリシティ)と軌道角運動量(ラゲール・ガウスビームのモード指数)があることが以前より知られていたが、これらに加え、エバネッセント波や導波路伝搬光、集光光などに於いて、波数ベクトルに対し横(transverse)向きのスピン角運動量が存在することが2010年頃から知られるようになった。SPP波はエバネッセント波の一種であり、同様の横向きスピン角運動量(t -SAM)を持つ(図4(a))。すなわち、SPPはSAMを輸送する波である。金属平面に螺旋状の光-SPP結合構造を形成しSPP波を光励起した場合、螺旋内部のSPP場は結合構造のトポロジカルチャージを反映した軌道角運動量を持ち、時間と共に回転するSPP渦を形成する。渦の中心部に於いては、スピン軌道相互作用を経て、試料面直を向いた局所的偏極スピン状態が形成される。

本研究では、フェムト秒レーザーをSPP渦の励起光源に用いたフェムト秒時間分解・ナノメートル空間分解光電子顕微鏡(TR-PEEM)により、新規なプラズモニック・トポロジカル・スピン準粒子を発見した。この研究ではAg蒸着膜にトポロジカルチャージ $m=2$ のアルキメデス螺旋構造を形成し、直線偏光したフェムト秒レーザーパルスを表面垂直方向から照射することにより、軌道角運動量を有する表面プラズモン波の重ね合わせ状態を生成した。この様にして形成されるプラズモニック渦が、中央部に時間反転対称性の破れたナノスケール偏極スピン構造(スピントクスチャ)を形成する。数10フェムト秒の時間に渡りトポロジカル不変量 $Q=1/2$ (トポロジカル・プラズモニック・スピンメロンに相当)のトポロジカル準粒子の3連結構造が生成さ

れる様子を、TR-PEEMにより捉えた(図4(c,d))。

また同様の手法を用い、Ag表面に形成したマイクロスケール円環構造に円偏光フェムト秒光パルスを照射して励起されるSPP渦を時間分解可視化した。FDTD法による電磁場ベクトルのシミュレーション、および理論解析と併せ、円環構造の内部には面直(z)方向への偏極SAMをもつ、トポロジカル不変量 $Q = 1$ のトポロジカル・プラズモニック・スピンスキルミオンが生成されることが見出された(図4(b))。SAMは円環構造の中央部でz軸の正の向きであり、スキルミオンの境界線上でz軸の負の向きに到るまでの間、動径方向に対し傾きながら倒れ込んでいく、ツイスト状の振る舞いを示す。これは、円環構造の半径がスキルミオン半径と比較して同程度の場合に限って生じる。円環構造の半径の増大と共にSAMの傾きは減少し、増大の極限においてプラズモニック・ツイステッド・スキルミオンはNéel型スキルミオンに収束することが示唆された。

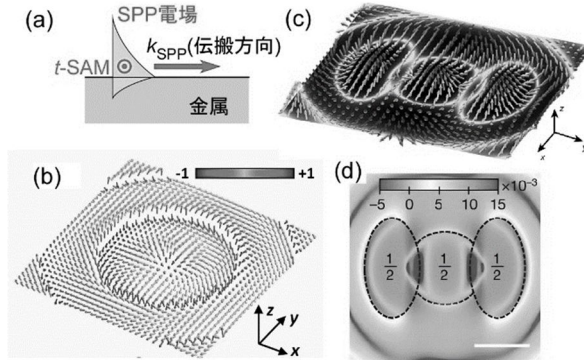


図4. (a) SPPの電場、波数ベクトル、 t -SAM。(b,c) プラズモニック・トポロジカル・スピンスキルミオン(b)、および、トポロジカル・スピンメロン連結構造(c)のスピントクスチャ。(d) (c)のトポロジカルチャージ密度。

(3) トポロジカル・プラズモニック結晶のエッジ/バルク状態の可視化

エッジ状態が光導波路として機能する誘電体材料のトポロジカルフォトリック結晶は、鋭角な曲げや構造欠陥に対する導波のロバスト性や、光の後方散乱が抑制された非相反的な光伝搬、新規発光デバイス/レーザーの構築など、高次の光操作を可能にする。これに対し、金属-誘電体界面における導波モードであるSPPに対しても、同様のエッジ状態を持つトポロジカル・プラズモニック結晶(TPC)が構成される。SPPの伝搬損失により、TPCにおけるSPP波の伝搬距離はフォトリック結晶における導波モードに比べ短く、限定的であるが、フォトリック結晶とは異なる強い光の局在性がTPCに固有の電場増強や非線形光学効果の増大をもたらす。

本研究では、金(Au)TPCへの波長可変フェムト秒レーザーの照射により励起される表面プラズモンの空間的な分布を光電子顕微鏡(fs-PEEM)により顕微的に可視化し、エッジ電場増強の励起光波長依存性を調べた。TPCの設計のため、Au薄膜上にAuナノプリズムを周期配列した構造を対象とし、時間領域差分(FDTD)法によりプラズモニックバンド構造を数値計算した。プラズモニック結晶の構造はAu/Si(Au膜厚:100nm)上に正三角形型Auナノプリズムを三角格子配列した菱形単位格子の C_3 対称性結晶で、格子定数 $a = 500 \sim 680$ nmである。この構造はM-K点において縮退バンドの分離による明瞭なバンドギャップを生じ、ギャップは格子定数の増大に伴って減少した。また、全体的なバンド構造は格子定数に依らない相似形を示し、第一バンドのM、K点のエネルギーは $a = 500$ nm(K点での第1バンドエネルギー:1.41 eV)から680 nm(同:1.05 eV)まで滑らかに減少した。従って、このプラズモニック結晶は格子定数 a の操作により第一バンド頂部のエネルギーが近赤外域(真空中の光波長:約800~1200 nm)で連続的に可変であり、加えて、ヘテロ結晶界面にエッジ状態を生成するために必要なバンドギャップを有する。

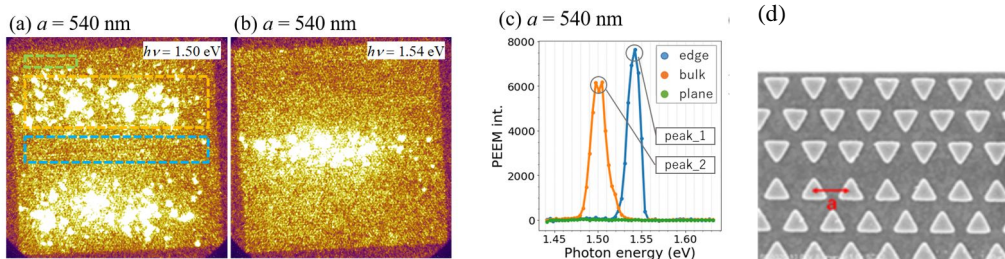


図5. (a,b)トポロジカルプラズモニック結晶(TPC、格子定数 a :540 nm)のfs-PEEM像。励起フェムト秒レーザー光エネルギー:1.50 eV(a)、及び、1.54 eV(b)。(c) fs-PEEM像から得たTPCのバルク部、エッジ部、及び平坦部における光電子放出強度のアクションスペクトル。(d) TPCの電子顕微鏡像。

上記の設計に基づいて作製したプラズモニック結晶を fs-PEEM で観察した。その結果、プラズモニック結晶の PEEM 像は励起光波長に対し非常に敏感であり、各格子定数 a の結晶に対し励起光波長が特定の関係を満たす場合にのみ生じる強い光電子放出が見出された。 $a = 500 \sim 680$ nm のプラズモニック結晶に対し励起光波長を 2 nm のステップで掃引し、一連の PEEM 画像から光電子のアクションスペクトルを求めたところ、全てのプラズモニック結晶に対し、結晶バルク、および境界(エッジ)において狭窄なスペクトル幅を有する共鳴的光電子放出が観測された(図 5)。バルク/エッジの 2 つの共鳴波長は両者とも格子定数の増大に伴い低エネルギー側へシフトし、FDTD 法により評価したプラズモニックバンド構造と良い一致を示した。この結果は、プラズモニック結晶が Au 表面からの多光子光電子放出効率を極端に増大させた事によるものであり、TPC が新規な光励起電子源(フォトカソード)として利用できることを示すものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Naoki Ichiji, Daigo Oue, Murat Yessenov, Kenneth L. Schepler, Ayman F. Abouraddy, Atsushi Kubo	4. 巻 107
2. 論文標題 Transverse spin angular momentum of space-time surface plasmon polariton wave packet	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する
1. 著者名 Ichiji Naoki, Kikuchi Hibiki, Yessenov Murat, Schepler Kenneth L., Abouraddy Ayman F., Kubo Atsushi	4. 巻 10
2. 論文標題 Observation of Ultrabroadband Striped Space-Time Surface Plasmon Polaritons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 374 ~ 382
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.2c00296	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 該当する
1. 著者名 Noguchi Natsumi, Ito Shin-ichi, Hikichi Miwa, Cho Yohei, Goto Kazuho, Kubo Atsushi, Matsuda Iwao, Fujita Takeshi, Miyauchi Masahiro, Kondo Takahiro	4. 巻 27
2. 論文標題 Highly Dispersed Ni Nanoclusters Spontaneously Formed on Hydrogen Boride Sheets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Molecules	6. 最初と最後の頁 8261 ~ 8261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/molecules27238261	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Naoki Ichiji, Atsushi Kubo	4. 巻 1
2. 論文標題 Spectral tuning of SPP reflection by quasi-symmetric metal nano-block arrays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AES 2022, The 8th International Conference on Antennas and Electromagnetic Systems, Proceedings	6. 最初と最後の頁 209 ~ 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Ichiji Naoki, Yessenov Murat, Schepler Kenneth L., Abouraddy Ayman F., Kubo Atsushi	4. 巻 11999
2. 論文標題 Propagation analysis of space-time surface plasmon polariton wave packet excited by light irradiation on nanobeam structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 1199904-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2607690	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 該当する

1. 著者名 Dai Yanan, Zhou Zhikang, Ghosh Atreyie, Kapoor Karan, Dabrowski Maciej, Kubo Atsushi, Huang Chen-Bin, Petek Hrvoje	4. 巻 9
2. 論文標題 Ultrafast microscopy of a twisted plasmonic spin skyrmion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Reviews	6. 最初と最後の頁 011420 ~ 011420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0084482	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 該当する

1. 著者名 Ichiji Naoki, Otake Yuka, Kubo Atsushi	4. 巻 11
2. 論文標題 Femtosecond imaging of spatial deformation of surface plasmon polariton wave packet during resonant interaction with nanocavity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 1321 ~ 1333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2021-0740	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 久保敦、伊知地直樹、大竹祐香	4. 巻 50
2. 論文標題 フェムト秒表面プラズモン波束とMIMナノ共振器の共鳴的相互作用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 36 ~ 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Ichiji Naoki, Kubo Atsushi	4. 巻 47
2. 論文標題 Resonance-order-dependent plasmon-induced transparency in orthogonally arranged nanocavities	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 265 ~ 265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.446534	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ichiji Naoki, Kubo Atsushi	4. 巻 11797
2. 論文標題 Temporal and spatial control of femtosecond surface plasmon polariton wavepackets by eigenmode resonance of metal-insulator-metal nano-cavities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 1179723-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2594424	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 -

1. 著者名 Dai Yanan, Zhou Zhikang, Ghosh Atreyie, Mong Roger S. K., Kubo Atsushi, Huang Chen-Bin, Petek Hrvoje	4. 巻 588
2. 論文標題 Plasmonic topological quasiparticle on the nanometre and femtosecond scales	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 616 ~ 619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-3030-1	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 該当する

1. 著者名 Ichiji Naoki, Otake Yuka, Kubo Atsushi	4. 巻 27
2. 論文標題 Spectral and temporal modulations of femtosecond SPP wave packets induced by resonant transmission/reflection interactions with metal-insulator-metal nanocavities	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 22582 ~ 22601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.022582	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ichiji Naoki, Kubo Atsushi	4. 巻 11278
2. 論文標題 Resonance-enhanced transmission of surface plasmon polariton wave-packets through metal-insulator-metal nanocavities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 1127815-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2544586	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 -

1. 著者名 T. Sugiyama, A. Kubo, T. Nakano	4. 巻 1
2. 論文標題 Plasmonic modulator driven by phase-transition of GST superlattice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Extended Abstracts of the 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials	6. 最初と最後の頁 101~102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 A. Kubo, T. Sugiyama, K. Sato, T. Nakano	4. 巻 1
2. 論文標題 Plasmonic Modulator based on Hybrid Plasmonic Waveguide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 31st Symposium on Phase Oriented Science PCOS 2019	6. 最初と最後の頁 12-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Ueno Kosei, Yang Jinghuan, Sun Quan, Aoyo Daisuke, Yu Han, Oshikiri Tomoya, Kubo Atsushi, Matsuo Yasutaka, Gong Qihuang, Misawa Hiroaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Control of plasmon dephasing time using stacked nanogap gold structures for strong near-field enhancement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Materials Today	6. 最初と最後の頁 159 ~ 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apmt.2018.12.004	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 該当する

1. 著者名 T. Sugiyama, A. Kubo, T. Nakano	4. 巻 1
2. 論文標題 Optical modulator driven by electrical pulse-induced phase transition of [(GeTe) ₂ /(Sb ₂ Te ₃) ₁] ₂₀ superlattice	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 29th Symposium on Phase Oriented Science PCOS 2017	6. 最初と最後の頁 51-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 A. Kubo, T. Sugiyama, T. Nakano	4. 巻 1
2. 論文標題 Active-controlled plasmonic waveguides using GeSbTe superlattice	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 29th Symposium on Phase Oriented Science PCOS 2017	6. 最初と最後の頁 37-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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47件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 伊知地 直樹, 大上 能悟, 久保 敦
2. 発表標題 Space-time SPP 波束に付随するスピン角運動量の伝搬
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会 応用物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 有富 洗人, 久保 敦, 福本 恵紀, Chen-Bin Huang
2. 発表標題 単一指向性・波長依存性を有する伝搬型表面プラズモンビームの生成
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会 応用物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊知地 直樹, 菊池 陽々紀, M. Yessenov, K. L. Schepler, A. F. Abouraddy, 久保 敦
2. 発表標題 Space-time SPP 波束の時間分解観測
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会 応用物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久保 敦
2. 発表標題 表面プラズモン波のスピン、トポロジー、構造化
3. 学会等名 日本光学会 ナノオプティクス研究グループ 第29回研究討論会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊知地 直樹, 菊池 陽々紀, M. Yessenov, K. L. Schepler, A. F. Abouraddy, 久保 敦
2. 発表標題 Diffraction free space-time SPP waveの励起及び観測
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Space-time SPPの顕微観察と光学系開発
2. 発表標題 菊池 陽々紀, 伊知地 直樹, M. Yessenov, K. L. Schepler, A. F. Abouraddy, 久保 敦
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会 応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島 一真, 久保 敦, 福本 恵紀
2. 発表標題 フェムト秒レーザー励起PEEMによるAuプラズモニック結晶の観察
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会 応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Ichiji, H. Kikuchi, M. Yessenov, K. L. Schepler, A. F. Abouraddy, A. Kubo
2. 発表標題 Excitation and observation of the striped space-time surface plasmon polaritons
3. 学会等名 The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNF013) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Ichiji, A. Kubo
2. 発表標題 Spectral tuning of SPP reflection by quasi-symmetric metal nano-block arrays
3. 学会等名 AES 2022, The 8th International Conference on Antennas and Electromagnetic Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保敦, Y. Dai, Z. Zhou, A. Ghosh, R.S.K. Mong, C.-B. Huang, H. Petek
2. 発表標題 トポロジカル・プラズモニック準粒子のダイナミクス
3. 学会等名 第18回プラズモニクスシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Ichiji, M. Yessenov, K. L. Schepler, A. F. Abouraddy, A. Kubo
2. 発表標題 Propagation analysis of space-time surface plasmon polariton wave packet excited by light irradiation on nanobeam structure
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保敦
2. 発表標題 トポロジカル・プラズモニック準粒子の時間・空間分解観察
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第42回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊知地直樹, M. Yessenov, K. L. Schepler, A. F. Abouraddy, 久保敦
2. 発表標題 Space-time 光波束の空間電場分布
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊知地直樹, 久保敦
2. 発表標題 直交配置型ナノスケール共振器構造におけるPIT の共振次数依存性
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Ichiji, A. Kubo
2. 発表標題 Temporal and spatial control of femtosecond surface plasmon polariton wavepackets by eigenmode resonance of metal-insulator-metal nano-cavities
3. 学会等名 SPIE Nanoscience + Engineering, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Ichiji, A. Kubo
2. 発表標題 Resonance-order dependent PIT in orthogonally arranged nanoscale cavities
3. 学会等名 META 2021, the 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊知地直樹, 久保敦
2. 発表標題 ナノ共振器構造の固有モード共鳴によるフェムト秒SPP波束の空間形状変化
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊知地直樹, 久保敦
2. 発表標題 金属-絶縁体-金属型ナノキャビティの固有モード共鳴によるフェムト秒プラズモン波束の時間-空間変調
3. 学会等名 日本光学会ナノオプティクス研究グループ 第27回研究討論会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保敦
2. 発表標題 プラズモニクナノ構造表面における波束伝搬
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊知地直樹, 久保敦
2. 発表標題 ナノ共振器構造によるフェムト秒SPP波束の空間形状変化の実空間観測及び評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊知地直樹, 久保敦
2. 発表標題 ナノキャビティによるスペクトル変調とパルスレーザーチャープを用いたSPP波束の空間分布制御
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Ichiji, A. Kubo
2. 発表標題 Resonance-enhanced transmission of surface plasmon polariton wave-packets through metal-insulator-metal nano-cavities
3. 学会等名 SPIE Photonics West (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保敦
2. 発表標題 近赤外域プラズモニック導波路におけるフェムト秒波束の導波
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第40回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊知地直樹, 久保敦
2. 発表標題 ナノ共振器共鳴によるチャープSPP 波束の時間・空間分布の狭窄化とチャープ量依存性
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 組澤悠真, 宮崎純, 久保敦
2. 発表標題 Time-Resolved Imaging of Femtosecond Telecom-Wavelength Surface Plasmon Polaritons in Dielectric Loaded Waveguides
3. 学会等名 第13回表面・界面スペクトロスコピー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保敦
2. 発表標題 金属ナノ構造による表面プラズモン波の導波制御
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保敦
2. 発表標題 ナノサイズメタ原子とプラズモン波束の相互作用の可視化”, 口頭
3. 学会等名 OCU先端光科学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 組澤悠真, 宮崎純, 久保敦
2. 発表標題 誘電体堆積型導波路における通信波長帯フェムト秒表面プラズモンポラリトンの時間分解観察
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊知地直樹, 久保敦
2. 発表標題 MIM型ナノキャビティの固有モード共鳴による表面プラズモン波束の透過強度変調
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊知地直樹, 久保敦
2. 発表標題 FDTDシミュレーションによる金属-絶縁体-金属積層型ナノキャビティを通過するフェムト秒表面プラズモン波束のスペクトル変調の評価
3. 学会等名 第16回プラズモニクスシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Ichiji, A. Kubo
2. 発表標題 The modulation of femtosecond SPP wavepackets induced by MIM nano cavities
3. 学会等名 The 8th Advanced Lasers and Photon Sources (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Sugiyama, A. Kubo, T. Nakano
2. 発表標題 Plasmonic modulator driven by phase-transition of GST superlattice
3. 学会等名 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保敦, 杉山岳, 佐藤健輔, 中野, 隆志
2. 発表標題 Plasmonic Modulator based on Hybrid Plasmonic Waveguide
3. 学会等名 PCOS 2019, The 31st Symposium on Phase Change Oriented Science (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊知地直樹、久保敦
2. 発表標題 金属-絶縁体-金属型ナノキャビティを透過するフェムト秒表面プラズモンポラリトン波束のスペクトル変調
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Kubo
2. 発表標題 Applications of imaging techniques of surface plasmons to topological plasmonics
3. 学会等名 Third informal workshop "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts"
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊知地直樹、久保敦
2. 発表標題 フェムト秒表面プラズモン波束のナノキャピティ通過に伴う遅延
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉山岳, 久保敦, 中野隆志
2. 発表標題 [(GeTe) ₂ (Sb ₂ Te ₃) ₁] _n 超格子を用いたハイブリッドプラズモニック変調素子
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊知地直樹、久保敦
2. 発表標題 金属/絶縁体/金属(MIM)型ナノキャピティによるフェムト秒表面プラズモン波束の遅延の観測と数値シミュレーションによる評価
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山 岳, 久保 敦, 中野 隆志
2. 発表標題 [(GeTe) ₂ (Sb ₂ Te ₃) ₁] _n 超格子の相転移を用いたハイブリッドプラズモン導波路モードの強度変調素子
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大竹 祐香, 伊知地 直樹, 久保 敦
2. 発表標題 単一ナノキャビティのコヒーレント応答によるフェムト秒表面プラズモン波束の位相変調
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保 敦
2. 発表標題 フェムト秒時間領域における表面プラズモン波束の動的振舞い
3. 学会等名 CPEC seminar (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大竹 祐香, 伊知地 直樹, 久保 敦
2. 発表標題 金属-絶縁体-金属積層型ナノキャビティを配置した金属表面における フェムト秒表面プラズモン波束の伝搬
3. 学会等名 第15回プラズモニクスシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉山 岳, 久保 敦, 中野 隆志
2. 発表標題 Optical modulator driven by electrical pulse-induced phase transition of [(GeTe) ₂ (Sb ₂ Te ₃) ₁] ₂₀ superlattice
3. 学会等名 The 29th Symposium on Phase Change Oriented Science PCOS2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久保 敦, 杉山 岳, 中野 隆志
2. 発表標題 Active-controlled plasmonic waveguides using GeSbTe superlattice
3. 学会等名 The 29th Symposium on Phase Change Oriented Science PCOS2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大竹 祐香, 久保 敦
2. 発表標題 MIM型ナノキャビティを有する金属表面におけるフェムト秒表面プラズモン波束の挙動
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉山 岳, 久保 敦, 中野 隆志
2. 発表標題 [(GeTe) ₂ (Sb ₂ Te ₃) ₁] ₂₀ 超格子の可逆的相転移を用いたプラズモン変調素子
3. 学会等名 2017年第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久保 敦
2. 発表標題 フェムト秒時間領域における表面電磁波の振る舞い
3. 学会等名 第14回原子・分子・光科学(AMO)討論会(招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 日本表面真空学会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 576
3. 書名 図説 表面分析ハンドブック	

1. 著者名 Naohiro Hozumi, Atsushi Kubo, 他156名	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 853
3. 書名 Compendium of Surface and Interface Analysis	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 フォトカソード及びその評価方法	発明者 福本 恵紀、久保 敦、足立 伸一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-086333	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

TRIOS 筑波大学研究者総覧
<https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000000553>
 Researchmap 久保敦
https://researchmap.jp/kubo_atsushi
 筑波大学 数理物質系・物理学域 ナノフォトニクス(久保)グループ
<https://www.u.tsukuba.ac.jp/~kubo.atsushi.ka/>

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ペテック ハルヴォエ (Petek Hrvoje)	University of Pittsburgh・ Department of Physics and Astronomy・Professor	

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		
米国	University of Pittsburgh	CREOL, University of Central Florida	
その他の国・地域	National Tsing Hua University		