

田中メタマテリアル研究室 Metamaterials Laboratory

准主任研究員 田中 拓男 (工博)
TANAKA, Takuo (Ph.D)



キーセンテンス：

1. 光の限界を超える
2. 光を思いのままに操る
3. ナノの世界を光で観る
4. 光を閉じ込める
5. ナノスケールの3次元構造を光で作る
6. 超大容量光メモリを開発する

キーワード：

プラズモニック・メタマテリアル, メタマテリアル, 光, 光学, 光子, フォトニクス, プラズモニクス, ナノフォトニクス, 近接場光学, 電磁気学, 自由電子, 表面プラズモン, エバネッセント場, ナノ金属共振器, レーザー, ナノファブリケーション, レーザー物理, レーザー加工, フェムト秒レーザー, 光機能デバイス, 大容量光メモリ, 3次元光メモリ, 光電変換デバイス, メタフォトニクス

研究概要

当研究室では、「メタマテリアル」と呼ばれるナノスケールの金属構造体で構成された人工光機能物質を研究している。従来の光学理論では、物質の光学特性は物質固有のものであり、物質が決まれば自動的に決まってしまうというのが常識であった。これは物質が決まればその物質中での光の振る舞いが一意に決定されてしまう事を意味していた。メタマテリアルは、この物質固有と考えられてきた誘電率や透磁率を、ナノ構造体を用いて人工的に制御し、全く新しい機能をもつ光学材料を作り出す技術である。このメタマテリアルを使えば、例えば、光周波数の磁場に直接応答する物質や、屈折率がゼロ、負、もしくは何百万といった巨大屈折率物質など、「あり得ない」物質を生み出すことができ、このような物質は、物質境界面で発生する光の反射を完全に除去したり、光を空間中に止めるといった全く新しい光現象を発現させる。我々は、この人工物質を活用して、光（フォトン）を自由自在に操ることができる新しいフォトニクス技術の開拓を目指している。これ以外にも、ペタバイトクラスの記録容量を持つ超大容量光メモリの開発や、ナノスケールの3次元構造を光で加工するレーザー加工技術、大規模電磁場シミュレーションソフトウェアの開発を行っている。

1. ダークモードプラズモンデバイスとその励起モードの直接観察 (横田, 田中)

湾曲金ナノロッドと直線ナノロッドを近接させたハイブリッド金ナノ構造では、伝搬光と直接結合しないダークモードのプラズモンが励起されることを明らかにした。ダークモードプラズモンは放射ロスがないため、その寿命はプライとモードプラズモンの寿命と比較して長くてQ値も高いという特徴がある。このようなQ値が異なるプラズモンが共鳴結合すると、その相互作用の結果、特定の周波数において光波が金属構造に吸収されずにそのまま透過するプラズモン誘起透明化現象が起きる。実験では、電子ビームリソグラフィやリフトオフ法を用いて実際にこのハイブリッド金ナノ構造を作製し、ダークプラズモンモードの励起に伴うプラズモン誘起透明化現象を実際に観測するとともに、光では見ることができないダークプラズモンモードを光電子顕微鏡法を用いて直接観察することに成功した。

2. アルミニウムメタマテリアル吸収体を用いた構造発色 (Mudachathi, 田中)

大きさの異なるアルミニウムのナノ正方形パッチ構造を二次元格子状に配列させたメタマテリアル吸収体を用いて、赤色から紫色までの可視光全域をカバーする発色構造を作った。電子線ビームリソグラフィによってアルミニウムのナノパッチ構造を試作し、この構造の反射光を分光測定したところ、パッチのサイズに応じて紫から赤色までの純度の高い色を発色させることに成功した。実験では、構造のサイズ等を制御することで、色相、明度、彩度などを制御できることを確認した。また、このメタマテリアルを用いた発色構造では、異なる色を発する構造を集積化することで混色できることを示し、赤、緑、青を発する構造を混ぜることで黒色を作ることに成功した。

3. 等方性中赤外完光吸収メタマテリアル (Mudachathi, 田中)

電子線ビームリソグラフィ法や反応性イオンエッチング法, リフトオフ法などを利用して, 金属ミラー構造の上に透明誘電体層を介して三次元リング共振器が装荷されたメタマテリアル吸収体を作製した. 加工プロセスの条件を最適化することで均一な曲率を持つ3次元共振器構造を大量に作製することに成功した. 赤外分光器を用いてその光学特性を計測したところ, 波長3~5 μm 帯域の赤外光を選択的に吸収していることを明らかにした.

4. ファノ共鳴メタマテリアルを用いた表面増強赤外分光法の開発 (石川, 田中)

ファノ共鳴メタマテリアルのプラズモニックモードと有機分子薄膜の赤外振動モードとの共鳴結合を利用して, 赤外分光法の高感度化に取り組んだ. 特に, 赤外分光法において問題となる強い背景光を, メタマテリアル構造によって光波の偏向を制御することで抑制し, 高い Signal-to-background (S/B) 比を獲得することに成功した. 実際に非対称な共振器構造で構成されるメタマテリアルを試作し, 表面増強赤外分光実験を行ったところ, ゼプトモルレベルの検出感度を実現した.

5. ボトムアップ的手法によるプラズモニック・ダイマー構造の作製 (武安, 田中)

ボトムアップ的手法を用いて金ナノ粒子2量体 (プラズモニック・ダイマー) を高選択的に大量に合成する技術の開発を行った. Langmuir-Blodgett 膜を利用して, 金ナノ粒子表面の1点だけが疎水修飾されたパッチナノ粒子を大量に作製した. このパッチナノ粒子をエタノール溶液中に分散させると, 紫色の溶液が得られた. その溶液の消光スペクトルを計測することにより, 元来金ナノ粒子が持つピークに加え, 金ナノ粒子同士が結合したと考えられるピークを観測できた.

Key Sentence :

1. Transcend conventional light theory
2. Control the light as we want
3. Observe the nano-world by the light
4. Confine the photons in the nano-scale space
5. Create nano-scale 3D structure by the light
6. Create extremely large capacity optical data storage

Key Word :

plasmonic metamaterials, metamaterials, light, optics, photons, photonics, plasmonics, nanophotonics, near-field optics, electromagnetics, free electrons, surface plasmon, evanescent field, nano metal resonator, laser, nano fabrication, laser physics, laser fabrication, femto-second laser, functional optical devices, large capacity optical memory, three-dimensional optical memory, photoelectric transducer, metaphotonics

Outline

In this research laboratory, we are intensively investigating the breakthrough science and techniques that can artificially control the electro-magnetic properties of the materials by using metal nano-structures. We collectively call these artificial materials "metamaterials". In the past, it has been believed that the electro-magnetic properties of materials such as permittivity and permeability are determined by the intrinsic property of the materials itself and no one can alter them. This suggests that the propagation of the light inside the material is uniquely determined by the material itself and it can only be controlled by modifying the shapes/structures of the materials. Metamaterial technology can control the permittivity and permeability of the materials and can create unprecedented optical materials such that it can interact directly with the magnetic components of the light, in which the refractive index can be zero, negative or tremendously giant values. These kinds of materials can create the extraordinary optical phenomena such that it can eliminate the light reflection at the materials boundary, can confine the photons in the nano-scale space. We also intensively extend the application of metamaterials to develop novel and functional photonic devices that can manipulate the photons with complete control. In addition, other active studies for the development of peta-byte optical data storage system, the development of novel laser fabrication technology of nano-scale three-dimensional structures, and the development large-scale

electro-magnetic simulation software are running concurrently.

1. Dark-mode Plasmon Excitation on Gold Hybrid Nanostructures and direct observation of its excited modes (Yokota, Tanaka)

We clarified that the gold hybrid nanostructures composed of curvilinear nanorod and straight nanorod with narrow gap can support dark-mode surface plasmons, which do not couple with the propagation light. Since the dark-mode plasmons do not have radiation loss, its lifetime is longer than that of bright-mode plasmons and their Q-value becomes high. When the high Q and low Q plasmons are resonantly coupled, the light absorption of the metal structure is suppressed and the light can pass through the metal structure it without any absorption. This phenomena is called “plasmon induced transparency” (PIT). We fabricated gold hybrid nanostructures using an electron beam lithography and lift-off techniques, and observed the PIT phenonema experimentally. Moreover, we applied the photo emission electron microscope (PEEM) technique to observe the dark-mode plasmons that never be seen by the light.

2. Structural Coloration Based On Aluminum Metamaterials (Mudachathi, Tanaka)

The research was mainly focused on the optimization of full colour plasmonic pixels. By using aluminum (Al) nano square patch structures, we demonstrated the high quirity color generation. We fabricated 2-dimensional periodic arrangement of Al nano squares of varying size by e-beam lithography. These pixels produce intense narrow reflection peaks in the far field that could directly view. We evaluated the purity of the colors, and simply varying the pixel size linearly has produced all colours from violet to red. We demonstrated that hue, brightness, and saturation of colors can be controlled by tuning the size of aluminum structures. Moreover, colors can be mixed by integrating the structures that have different color, and black color was created by integrating the structure of red, green, and blue.

4. Wavelength Tunable Perfect Light Absorber in the Near and Far Infrared Region of the Electromagnetic Spectrum (Mudachathi, Tanaka)

We fabricated metamaterials absorber that consists of metal thin film, transparent dielectric spacer, and 3D spilt ring resonators (SRRs) by the use of e-beam lithography, metal thin film deposition, liftoff and dry etching. To decrease the working frequency down to several micron in wavelength, metamaterial structures are down sized and finally the resonant absorption at 3~5 μm was demonstrated.

5. Fano-Resonant Metamaterials for Surface-Enhanced Infrared Absorption Spectroscopy (Ishikawa, Tanaka)

A high-sensitive surface-enhanced Infrared (IR) absorption spectroscopy is experimentally demonstrated by utilizing the resonant coupling of plasmonic modes of a Fano metamaterial and IR vibrational modes of an organic thin film. The Fano-resonant metamaterial consisted of 2D array of asymmetrical Au nanostructures was fabricated on a Si substrate. Infrared spectrum of the metamaterial was measured by using a FT-IR to demonstrate a clear Fano resonance at $\sim 1750 \text{ cm}^{-1}$, which spectrally overlapped with C=O stretching vibrational modes. To improve the signal to background ratio (S/B ratio) by suppressing the unwanted high intensity background, we introduced the polarization control metamaterial structure. In the measurements, the C=O stretching mode was clearly observed as an anti-resonance peak within a broad plasmonic absorption of the metamaterial. The sensitivity was estimated to be 9.1 zepto mole.

5. Fabrication of Plasmonic Dimer Structures by Bottom-up Approach (Takeyasu, Tanaka)

We developed highly selective fabrication of gold nano-particle dimer structures with the bottom-up approach. We fabricated patchy gold nano-particles, where the surface of the nano-particle is partially decorated with hydrophilic molecules. The patchy gold nano-particles were dispersed in ethanol, which resulted in change of color from red to purple. The extinction spectrum was measured, and the extinction peak due to assembly of the gold nano-particles was observed additionally to the original peak of the gold nano-particles.

Principal Investigator

田中 拓男 Takuo Tanaka

Research Staff

横田 幸恵 Yukie Yokota

ムダチャティ レニルクマール Renilkumar Mudachathi

Assistant and Part-timer

栗野 佳子 Keiko Awano

Students

藤原 太郎 Taro Fujiwara

池上 志穂 Shiho Ikegami

坂本 裕輝 Yuki Sakamoto

松方 妙子 Taeko Matsukata

中村 祐希 Yuki Nakamura

池田 龍太郎 Ryutaro Ikeda

Visiting Members

石川 篤 Atsushi Ishikawa

武安 伸幸 Nobuyuki Takeyasu

雨宮 智宏 Tomohiro Amemiya

竹澤 晃弘 Akihiro Takezawa

陳 哲勤 Che-Chin Chen