

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
7. 光の教科書を書きかえる

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리케이션, 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開発している。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. 磁場による3次元メタマテリアルの自己組織的形成（青木，田中）

メタマテリアルは電磁波に対する透磁率を人為的に操れることが特徴であり、近接場光では波長程度の光スポットしか得られないのに対し、メタマテリアルで作製したレンズは、光の波長以下に光スポットを絞ることができるなど、従来不可能であった光学現象を実現できる。そのような現象を発現するには、目的波長の1/2から1/10程度の大きさの共振器構造を無数にメタマテリアルの媒質中に埋め込む必要がある。この共振器構造を精度良く、大量に媒質中に形成する技術として、外部磁場印加による微粒子自己組織化法を開発した。磁性流体中に磁性ビーズおよび金微粒子を分散し、これに外部磁場を印加すると、磁性ビーズの赤道上に金微粒子が配列し、リング構造を形成した。このような金のリング構造はメタマテリアルの単位共振器として利用できる。本年度は直径250 nmの金微粒子を用い、直径2.7ミクロンのリング構造を一様に形成する段階まで達成した。

2. 自己組織化を利用したメタマテリアルの作製（玉木，田中）

量産性の高いナノ構造作製手法である自己組織化を応用し、メタマテリアルの素子となる金属のナノリング構造を作製することを目指した。前田バイオ工学研究室で開発されたDNAテンプレートを用いて金ナノ粒子を円環状につなげる手法により、直径20 nmの金ナノ粒子からなる三量体リングのコロイド溶液を作製

した。この金ナノ粒子三量体リングの偏光や入射角に依存した光学特性を調べるために、石英基板上への固定化を試みた。DNAテンプレートの構造の安定性に課題があったが、架橋反応によるDNAテンプレート間の結合の強化や、固定化プロセスの最適化により、三量体リングの構造を保ったまま基板上に固定化することに成功した。金ナノ粒子三量体リングの透過スペクトルを測定し、530 nmと590 nm付近に吸収があることを確認した。単量体と二量体との比較を行い、構造によるスペクトルの違いを検討した。

3. メタマテリアルにおける新規な量子電磁力学効果の探索 (石川, 田中)

誘電率と透磁率の両方に様々な波長分散を有するメタマテリアル中に、量子ドットや蛍光分子などの発光体を導入した際の、量子電磁力学効果について理論解析を行った。具体的には、電気双極子の自然放出確率を記述するフェルミの黄金律において、その状態密度と真空場に波長分散を厳密に考慮することで、メタマテリアル中での自然放出の変化を評価した。メタマテリアルを用いると、所望の分散関係と状態密度を有する伝搬あるいは非伝搬モードを生成できるため、これに伴う自然放出も自由に制御できることがわかった。また、メタマテリアル中では、電界と磁界のエネルギー密度の比が自由空間のそれと比べて大きく異なり、これに伴う真空場も大きく増減することで、自然放出確率が変化することを見いだした。さらに、これらの物理現象を応用したナノサイズの発光デバイスを考案し、その利得媒質としてPbS量子ドットやナノカーボン材料を検討した。

4. ギャップ構造を有する金二重ナノピラーアレイの作製と光機能性材料への展開 (久保, 田中)

金属ナノ構造体はプラズモン特性を有し、周囲の屈折率に応じて鋭敏に共鳴波長を変化させるプラズモンセンサーとして機能することが知られている。本研究では、金属ナノ構造体のサイズ・形状・配置を精密に設計・制御し、その機能の拡大を図った。具体的には、ナノ構造体に同心型の二重ナノピラー構造を作製し、各ピラー間にギャップ構造を導入した。ギャップの形成によって、より強い電場増強効果が誘起され、結果的にセンサー感度の向上に繋がった。また、ギャップ構造によって誘起されるより強い電場増強効果を効果的に利用するため、ギャップ電極アレイ構造の作製を試みた。作製したギャップ電極構造のプラズモン応答特性の評価を行い、光の閉じ込め効果について検討を行った。

5. 強相関系電子メタマテリアルのためのVO₂基礎物性 (島崎, 玉木, 田中)

メタマテリアルは他の材料と機能的に複合化することでその応用範囲が広がり、とくに能動的な共鳴制御などの期待も大きい。そのような材料として強相関電子系物質を選択した。この物質系は絶縁体-金属相転移(MITs)を示し、それに伴う大きな光学定数の変化を示す。今回、我々は検討材料としてVO₂を選び、基礎的な物性について調べた。最初に温度変化に伴うMITsを確認した。電気抵抗は60-70 °C付近で急峻に変化し、MITsの発現を示した。また、室温で電圧を印加していくと、ある電圧で急激に電流が増加し、これによってもMITsが発現することを確認できた。そしてこの物質において光誘起による現象を確認した。レーザー光を照射すると弱い光によっても電気抵抗値が敏感に変化した。この変化は、白熱灯の光を照射した際の変化と比較して非常に急峻であった。白熱灯照射による電気抵抗変化は赤外線吸収による温度効果と考えられるが、レーザー光照射はなんらかの光誘起現象を含むと考えられる。このような光誘起現象をメタマテリアルで制御することはデバイス応用としてたいへん興味深い。

6. 3次元大容量光メモリ技術の開発 (田中)

ローダミンB色素分子/金イオン複合材料を記録材料に用いた10層の記録層を持つWrite-Once型多層光ディスクの耐久性を検証した。実験では、試作した多層光ディスクにチタンサファイアレーザーを光源とする記録システムで単一マーク長データを2光子記録し、これを緑色レーザーを光源に用いた共焦点蛍光ピックアップで再生した。そして、再生回数と、再生信号強度との関係性を評価した。その結果、全記録層に対する記録・再生実験において、光照射による記録材料の損傷と再生信号の低下は見られるものの、10万回の再生を行っても、初期状態から80%以上の光信号が取得できることが明らかになり、大容量光ディスクとして十分な再生耐久性があることを実証できた。

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 light
6. Create extremely large capacity optical data storage
7. Rewrite the conventional textbook of optics and photonics

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. Magnetic self-assembly of 3D metamaterials (Aoki, Tanaka)

Metamaterial has a potential to revolutionize conventional perception on optics. For example, metamaterial lens can confine light in a region smaller than a wavelength of light, whereas, near-field light spot is limited to the same range of wavelength. Metamaterial's controllability of magnetic permeability originates from numerous numbers of unit resonators embedded in a medium, which feature sizes ranges from 1/2 to 1/10 of working wavelengths. We have developed magnetic self-assembly technique for bulk fabrication of such unit resonators with high structural precision level. We applied external magnetic field to paramagnetic beads and gold particles dispersed in ferrofluid. Gold particles gathered around an equator of a paramagnetic bead to form a ring structure around a paramagnetic bead. Such ring structure can work as an unit resonator for a metamaterial. We have succeeded in assembling a 2.7 μm ring structure with with 250 nm gold particles.

2. Self-assembly for fabrication of metamaterials. (Tamaki, Tanaka)

We applied self-assembled nanostructures for fabrication of a nanoring structure of metal, which can act as a metamaterial element. Self-assembly is advantageous with respect to mass-productivity. Bioengineering Laboratory developed a facile method to prepare gold nanoparticles circularly binding with DNA templates. We employed this method and prepared colloid solutions of trimer rings consisting of gold nanoparticles with a 20-nm diameter. To investigate the optical properties of the gold trimer ring depending on the polarization and the incident angle, we tried to immobilize the trimer

rings on quartz substrates. However, the DNA-templates had a problem on the stability of the structure. By introducing cross-linkages between DNA templates and optimizing the immobilization procedure, we finally succeeded to obtain the gold trimer ring immobilized on a quartz surface without a serious destruction of the structure. The transmission spectrum of the gold trimer rings indicated absorptions at around 520 nm and 590 nm. The spectral differences caused by the structures were discussed by comparing monomers, dimers, and trimers.

3. Quantum Electrodynamics in Metamaterials. (Ishikawa, Tanaka)

We have theoretically investigated quantum electrodynamics of an emitter, such as quantum dot or fluorescence molecule, embedded in metamaterials with unique dispersions in their permittivity and permeability. Specifically, to study spontaneous emission (SE) rate change of electric dipole transition in metamaterials, we re-described Fermi's golden rule by accurately considering the dispersion in its photon density of state (PDOS) and vacuum field fluctuation. Since any propagation and localized modes with desired dispersion and PDOS can be designed in metamaterials, we found that the resulting SE rate can be engineered freely. We also found that the ratio of the electric to magnetic energy density in metamaterials is very different from that in vacuum and its vacuum field fluctuation is dramatically modulated, and thereby SE rate can be considerably changed. Additionally, we planned the newly development of a nano-scale light-emitting devices based on the aforementioned physical phenomena and investigated PbS quantum dot and nano-carbon materials for their gain medium.

4. Fabrication of double nanopillars with gap and its application to functional optical materials (Kubo, Tanaka)

Metal nanostructure has the plasmon resonance, which sharply responds to the environmental refractive index changes. In this study, we fabricated the double nanopillar arrays with nanogaps, and developed them to the plasmonic sensor. Introducing the gap configuration generated stronger electromagnetic fields, resulting in the increase of the sensor sensitivity. We tried to fabricate the gap electrode arrays for the purpose of effective use of the plasmon properties. We also measured the plasmon resonance of the structure, and discussed the photon confinement effect resulting from the plasmon resonances.

5. Basic Properties of VO₂ for Strongly Correlated Electron Metamaterials (Shimazaki, Tamaki, Tanaka)

When the metamaterials are functionally composed with other materials, application field should expand, prospecting active resonance control and so on. Here we select strongly correlated electron materials (SCEM) as such material so that they exhibit dramatic optical property change accompanied by the insulator-to-metal transition (MITs). At this moment, we selected VO₂ as a candidate and investigated basic properties. At first, we confirmed the MITs within temperature variation. The electric resistance showed rapid change around 60-70 °C which corresponds to the MITs. The electric current showed steep variation by applying some voltage at the room temperature, which also directs it. We have observed photon-induced phenomena with this material. The electric resistance showed very sensitive variation by irradiating small amount of laser beam. For the change was steeper than the case of a light bulb irradiation, which is assumed to be heating effect by Infrared absorption, some kind of photon-induced effect would exist. It would be attractive for devise application if such photon-induced phenomena could be controlled by the metamaterials.

6 . Development of three-dimensional high-capacity optical storage technology (Tanaka)

We developed multilayered optical disk that has 10 recording layers stacked on the glass substrate and examined the fatigue resistance of the memory material for light irradiations. As the recording material, rhodamine-B and Au(III)-ions doped PMMA material was used. Using the recording system with femto-second Ti:Sapphire laser as a light source, we recorded monotonic mark length signal bit-data onto the multi-layered 3D disk. Recorded data were retrieved using by confocal readout pick-up with green CW laser and we measured the decay properties of the intensity of read-out signals as a function of reading cycles. From the result, the intensity of the read-out signal decreases as

increasing the read-out cycles, but even after 0.1 million times read-out, more than 80% signal intensity was preserved. The multilayered optical disk was also found to be stable at room temperature and does not show any noticeable changes in the reading signal intensity for over a year..

Principal Investigator

田中 拓男 Takuo Tanaka

Research Staff

青木 画奈 Kanna Aoki

玉木 亮子 Ryoko Tamaki-Watanabe

Xu Fang

石川 篤 Atsushi Ishikawa

久保 若奈 Wakana Kubo

Assistant and Part-timer

小林 裕紀 Yuki Kobayashi

Students

Zheng Gaige

Visiting Members

島崎勝輔 Katsusuke Shimazaki

Shyh-Shii Pai