

京 都 大 学	博士（工学）	氏名	李潤植
論 文 題 目	Hybrid photonic systems consisting of dielectric photonic crystals and plasmonic meta-atoms for nanoscale light manipulation (誘電体フォトニック結晶とプラズモニックメタ原子結合系におけるナノスケール光制御)		
(論文内容の要旨)			
<p>This doctoral dissertation contains 7 chapters to study how light can be manipulated in a tiny space via cavity me-a-atom interaction.</p> <p>As an essential technical progress towards the nanometric functionality, obtaining nanoscale controllability for radiative photons where sub-diffraction-limited region will pave the way for extended photon controllability, and have various applications in a broad range of research fields. Although several methods have been devised to control polarizations and angular momentum of light using dense arrays of plasmonic nano-antennae, so far, they have not been effective in the nano-region due to the weak polarizability along single nano-elements. However, nanocavity-assisted architecture that can boost the interaction strength to a nano-element could play an important role in overcoming this problem and realizing nano-scale functionality. One promising approach that can increase interaction strength to nano-elements is modifying the local optical density of state of their surrounding environment. Dielectric-based photonic crystals can provide such a successful photonic platform to modify and concentrate photonic density of state into a point - defect. Accordingly, combining photonic crystals and plasmonic meta-atoms which can provide sub wavelength electric/ magnetic resonance is an inevitable step to introduce microscopic-functional devices. Thus, we investigate hybrid photonic architectures that consist of photonic crystal nanocavity (PCNC) and plasmonic meta-atoms to attain nanosclae controllability.</p> <p>In chapter 1, we briefly introduce our research aims to extend manipulation degree of freedom into a nanoscale region, and suggest the possible approach with fundamental concept of nanosclae light manipulation.</p> <p>In chapter 2, as the starting point for our discussion, theoretical background and numerical method are discussed here. In an optical point of view, we provide a brief historical overview of metallic study, and we derive general properties of plasmonic modes and scattering resonance for dispersive gold material by assuming simple geometric case with Drude-Lorentz form.</p> <p>In chapter 3, we suggest the elements of the composite system, and investigate optical characteristics of the each element. Electric and magnetic resonant element using plasmonic meta-atoms and a PCNC are chosen for the components of hybrid photonic system. Single BAR/ SRR (Split ring resonator) structure has shown an induced electric/magnetic polarizability owing to their collective charge oscillation in response to geometric linear/circular shape, respectively. Resonant features at optical frequency regime associated with geometric parameters are discussed through the numerical calculation.</p>			

In chapter 4, we design a hybrid photonic system, and fabricate it. Structural design is suggested based on numerical calculations. Particularly, the perturbation effect of meta-atoms are severe enough when it directly attached on high refractive index material (Si  $n=3.4$ ). We introduce low- refractive-index space layer such as Silica ( $n=1.45$ ) to attain a resonant matching condition between meta-atoms and PCNC. In the case of fabrication part, SOG (Spin on glass) thickness was discussed to precisely control the thickness of the intermediate layer.

In chapter 5, we investigate cavity meta-atom responses. We have demonstrated local magnetic response as well as electric response using composite systems consisting of PCNC+BAR and PCNC+SRR. We measured quality factor of composite systems to validated cavity meta-atom response: PCNC+BAR showed  $\Delta Q \sim 9.1$  dB changes and PCNC+SRR showed  $\Delta Q \sim 7.4$  dB as a function of meta-atom position. The location dependence of the interaction shows sub wavelength scale locality based on electric and magnetic field coupling by enhancing meta-atom radiation.

In chapter 6, we suggest methods that can design arbitrary polarizations by controlling the intensity and the radiation phase from the meta-atom-loaded PCNC. In the case of circular polarization, we use two meta-atoms within sub-diffraction-limited range where the each radiation element can be simultaneously excited. Because of BAR and SRR has orthogonal radiation pattern, circular polarization from a PCNC can be achieved by phase controlled excitation. Furthermore, wavelength selective LHC (Left hand circular polarization) and RHC (Right hand circular polarization) has been experimentally demonstrated at an on-chip level by taking advantage of integration with photonic-crystal-based circuit.

In chapter 7, we investigate further design concept, and suggest an overall conclusion. Practically, we combine photonic band edge mode and meta-atoms to extend our concept. We discuss the possible methods for selective excitation of guided resonance mode by showing numerical results, and summarize our work and present future outlook of this research.

Finally, it is notable that our manipulation concept using a cavity meta-atom interaction of the local electric/magnetic fields is applicable to any types of photonic-crystal cavity structure, and not only provides the control of simple polarization states, but also has expandability such as control of more complex polarization state (vector beams), and arbitral molding of near-field distribution. In addition, this technique can be used in a reverse way to collect light with specific polarization states into photonic circuits. Therefore, a photonic crystal cavity that combines meta-atoms may invite new functionality in nanosystems and stimulate wide optical applications from photonics, chemistry, and biology.

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、誘電体 2 次元フォトニック結晶と金属メタ原子の結合系において、電界および磁界の近接場カップリングを制御することにより、ナノ領域での光特性を制御した結果を纏めたものである。ナノ領域における回折限界を超えた人為的な光の制御は、光素子の極小化、集積化だけではなく光制御技術の自由度を極限まで高めることにつながり、極限的な光機能を実現する方法になると考えられる。光制御の自由度を高めるため、これまで主に、光の波長程度の周期的な屈折率分布をもつフォトニック結晶技術、あるいは波長約 1/10 の大ききで電界/磁界共振特性をもつメタ原子から構成したメタマテリアル技術が応用されている。しかし、メタマテリアルの場合、個々のメタ原子の応答は微弱であるため多数のメタ原子が必要になることにより、またフォトニック結晶構造の場合、回折限界により、波長あるいはそれ以下のナノ領域での光制御の自由度が制約されている。そこで本研究では 微弱な電磁界の応答をもつメタ原子と光の状態密度が高いフォトニック結晶共振器を融合した系を用いることで、ナノ領域でメタ原子と光の間相互作用を増強させてナノ光制御を行っている。以下、本研究において得られた主な成果をまとめる。

1. ナノ領域で光を制御するメタ原子として、電界および磁界の共振特性をもつ BAR/SRR 構造のナノ金属共振器を設計しその後、理論検討を行い、メタ原子とフォトニック結晶共振器の結合系を提案し最適な構造を設計した。その結果、確かに波長設計帯域において、低屈折率の薄膜層を導入することにより、フォトニック結晶スラブの高屈折率影響を避け結合系の設計自由度を確保した。
2. 設計通りの結合系を製作した後、近接場カップリングの制御度を高めるため、電界、磁界の共振をもつ 2 種類のメタ原子をフォトニック結晶共振器内の様々な場所に配置して結合系の応答の変化を測定した結果、結合系の共鳴線幅がナノスケールの局所性を示し、配置場所の違いにより 10 倍程度変化したことを示した。これはフォトニック結晶共振器の電界および磁界の腹部分に、それぞれ電界および磁界の共振を持つメタ原子が配置されたときに、両者の結合が強くなってエネルギーがメタ原子を介して放射されていることを実証した。
3. 上記の電磁界局所結合特性に基づいたナノスケール素子の実現に向けて、フォトニック結晶共振器からの放射を任意の偏光状態に制御することを提案し、それを実現した。さらに、フォトニック結晶光回路にこの技術を導入して、微小光チップから右および左円偏光をオンデマンドに発生させることを実現した。

以上のフォトニック結晶共振器とメタ原子の結合系を用いることで極限的な光の操作が可能になり、偏光分割多重通信や偏光依存型生物化学センシング等の技術的に幅広い分野で応用可能になると考えられる。さらに、本研究で開発された円偏光制御技術は、従来の光子スピン制御、光角運動量制御などとも関連があり、物理的にも興味深いと言える。また、これらの技術を拡張して、フォトニック結晶バンド端の大面积共振モードと結合することにより、フォトニック結晶レーザの放射パターンなどの設計など高効率と高機能性をもつ光学素子の実現も期待される。よって、本論文の成果は、学術上、応用上、重要なものと評価でき、学位論文の審査に値するものと認める。また、平成 24 年 1 月 30 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第 1 4 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、(平成 27 年 3 月 24 日までの間) 当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 2014 年 06 月 24 日以降