



Title	Perfect Absorbing Dielectric Metasurfaces by Degenerate Critical Coupling
Author(s)	Xu, Rongyang
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/89605
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (XU RONGYANG)

Title	Perfect Absorbing Dielectric Metasurfaces by Degenerate Critical Coupling (縮退臨界結合による完全吸収誘電体メタサーフェス)
-------	--

Abstract of Thesis

A perfect absorber is a device that can completely absorb incident electromagnetic waves at operating wavelengths. Perfect absorbers can be used in applications, such as bolometers in thermal cameras, thermal emitters in gas sensing, imaging pixels, thermophotovoltaics, and passive radiative cooling. A metasurface is a subwavelength-thick film composed of artificial periodic nanostructures, so the optical properties of the metasurface can be engineered. However, if a free-standing subwavelength-thick metasurface supports only one resonant mode, the maximum absorption of that metasurface is only 50%. A few years ago, it is found that the absorption limit of metasurfaces can be overcome and perfect absorption is achieved by using a dielectric metasurface based on degenerate critical coupling (DCC).

In this dissertation, we mainly study all-dielectric perfect absorbers based on the DCC. Dielectric resonators can support Mie-type multipole modes. We can obtain the collective response of the resonators by arranging them into an array. Perfect absorption based on the DCC requires that the resonators support both an even mode and an odd mode at a wavelength and each mode is critically coupled. We propose narrowband perfect absorption can be achieved by a combination of different resonant modes, such as electric and magnetic dipole modes, electric and magnetic quadrupole modes, toroidal electric dipole and magnetic dipole modes, and toroidal electric dipole and electric quadrupole modes.

We also propose DCC-based broadband perfect absorbers. The DCC-based perfect absorption rapidly attenuates the incident light, which leads to strong field confinement and suppressed interaction between the resonators. Thus, we can stack nanopillar Mie resonators made of different materials or include multi-size resonators in a unit cell to achieve broadband perfect absorption.

In addition to dielectric materials, lossy metallic materials, such as graphene and vanadium dioxide, can be combined with resonators made of lossless crystalline silicon (c-Si) to achieve perfect absorbers. The incident light is completely absorbed by graphene or vanadium dioxide. Thus, the DCC-based perfect absorbers provide an excellent platform to enhance light-matter interactions.

Finally, in addition to achieving perfect absorption, c-Si Mie resonators can also be used for refractometric sensing. We control the geometry of the Mie resonators so that the enhanced field extends outside the Mie resonator to improve sensitivity. The sensitivity of the Mie resonators can be as high as 440 nm/RIU. The lossless material properties of c-Si allow us to obtain a figure of merit of up to 1100 RIU⁻¹.

Our proposed perfect absorbers can achieve narrowband or broadband absorption with different materials. Our ultra-thin perfect absorbers have great potential to be used in thermal emitters, imaging pixels, photodetection and photovoltaic applications to improve efficiency, reduce material costs, and eventually contribute to solving the global warming problem. In addition, our study on metasurface-based sensors helps to realize highly sensitive and inexpensive biosensors for personal healthcare and medical diagnosis.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (XU RONGYANG)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主査 教授	高原 淳一
	副査 教授	Prabhat Verma
	副査 教授	藤田 克昌
	副査 教授	原口 雅宣 (徳島大学 大学院社会産業理工学研究部)

論文審査の結果の要旨

本論文は XU RONGYANG 氏が大阪大学大学院工学研究科に在籍中に行った研究の成果をまとめたものである。

本論文は序論と 5 つの章および結論から構成されている。序論では本研究の背景と目的に統いて本論文の構成が示される。1 章ではミー共振器の概念の説明と多重極子の基本的な性質が示されている。一様媒質中の単一誘電体球におけるミー共振の多重極子の電磁場分布と各モードの散乱断面積が数値計算により導出されている。また、電磁界シミュレーションにより周期系におけるスペクトルマップを実験結果と比較している。2 章から 4 章までは様々な構造の完全吸収体について述べている。2 章では単結晶シリコン (Si) を用いたミー共振器における電気双極子と磁気双極子を構造により制御することで、縮退臨界結合による完全吸収体の実現が可能であることを提案し、これを実験により実証している。また、この理論を四重極子に拡張し、電気四重極子と磁気四重極子の縮退によっても完全吸収体ができるることを理論的に示し、橢円型ミー共振器によるメタサーフェスを用いて実装し、その実現に成功した。さらに、トロイダルモードの完全吸収体の構造を理論的に提案している。3 章は 2 章の結果をもとに応用上重要な完全吸収体の広帯域化について述べている。Si と Ge という異なる材料のミー共振器を縦方向に重ね合わせることで広帯域化が実現できる原理を新しく提案し、素子を試作している。また、サイズの異なるミー共振器を横方向に組み合わせることで広帯域化が実現できることを実証した。これらの広帯域完全吸収体は太陽電池の高効率化に応用できる。4 章では Si ミー共振器に金属・絶縁体相転移材料である二酸化バナジウム (V₂O₅) やグラフェンを付加することにより、光との相互作用を増強できることを理論的に見出している。5 章は誘電体ミー共振器を用いた屈折率センシングへの応用について述べている。共振器周囲の溶媒の屈折率変化に対する共振周波数の変化を最大化する構造を探索し、薄型ディスクにおける磁気双極子共鳴の感度が既存の素子より大幅に向上去できることを理論的に見出し、これを実験的に実証している。結論では、これらの成果をまとめている。

完全吸収体の研究はこれまで金属を利用したプラズモニック完全吸収体により行われてきた。最近、完全吸収体の構成原理である縮退臨界結合の理論が提案された。本研究はこれを誘電体ミー共振器に適用することで誘電体のみの完全吸収体を実現し、プラズモニック吸収体より狭帯域の完全吸収体を可視光全域において実現することに成功した。また、これを複数組み合わせて広帯域化する方法を提案し、それを実証した。また、ミー共振器上に V₂O₅ やグラフェン層を付加することにより吸収率を向上できることを理論的に示した。特に光との相互作用が弱く 2% の吸収率しかもたないグラフェンにミー共振器を付加することで完全吸収化できることを示したことは特筆できる。

本成果は応用上重要な Si を高屈折率媒質として用いたミー共振器の光学特性をシミュレーションと多重極子展開を併用して系統的に解明するとともに、様々な誘電体メタサーフェスを実際に作製して、完全吸収体の光学特性を実証した。また、それを屈折率センシングに応用し、従来技術に比べて感度を大幅に向上去することに成功した。本研究は完全吸収体誘電体メタマテリアルという新しい分野を切り開き、ナノフォトニクスとメタマテリアルの発展に大きく貢献するだけでなく、シリコンフォトニクスにも大きく貢献するといえる。本成果は応用物理学、特に誘電体メタサーフェスの新しい応用の可能性を切り開いた点で高く評価される。よって本論文は、博士論文として価値あるものと認める。