

Title	Structural color generation with Silicon-based Mie resonators
Author(s)	長崎, 裕介
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/72371
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、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (長崎 裕介)

論文題名

Structural color generation with Silicon-based Mie resonators
(シリコンMie共振器を用いた構造色生成に関する研究)

論文内容の要旨

Structural color is produced by light scattering or interference in micro- and nanostructures even in the absence of specific colored materials; this phenomenon is widely observed in nature. As nanofabrication technology has developed, structural color has been controlled using artificially created nanostructures such as dielectric multilayers and gratings. In the past several years, the variety of colors that can be produced has been extended by metallic (i.e., plasmonic) nanostructures. However, improving their color purity is challenging because of their low quality factor (Q-factor) resonance properties, which arise from the high inherent losses of metals in the visible wavelength region. In this dissertation, structural color generation using silicon (Si) Mie resonators was proposed. As the spectral change of Mie resonators appears in the visible wavelength region, producing color, Mie resonators were able to be used as color elements. The relatively small loss of Si as compared with metals enabled higher Q-factor resonance characteristics, resulting in improved color printing properties. The high refractive index of Si allowed incident light to be confined inside the structure and suppressed light leakage to the outside. Thereby, color pixels without color mixing were able to be realized, even at pixel sizes comparable to the diffraction limit.

First, the guidelines for the design of a Mie resonator were described from an engineering viewpoint using analytical and numerical calculations. These calculation methods were used to explain the Mie scattering phenomenon of an experimentally fabricated Si nanostructure in the visible wavelength region. By using the developed method, the structural color characteristics of periodically arranged Mie resonators were investigated and applied to fabricate color pixels. The simple Si nanostructures were able to be made to exhibit various reflection colors by tuning their physical dimensions. The designed nanostructures exhibited polarization-dependent properties that made it possible to create overlaid images. An individual pixel generated an individual color, thereby achieving subwavelength-resolution encoding without color mixing. Next, in order to extend the variety of pixel colors and their applications, a color modification approach involving Si oxidation was demonstrated. The reflection colors of the oxidized Si nanostructures were able to be tuned over a wider range of reflection colors based on the oxidation reaction. The different color change properties of each nanostructure enabled the construction of an “invisible ink” that was able to hide color information. Moreover, the use of a metal-masked Mie resonator to further improve the pixel color properties was proposed. By adding a Cr mask to a Si nanostructure, the excited states of the multipoles were able to be controlled, resulting in the generation of a sharper reflection peak and the suppression of undesirable peak shifts. These color properties supported the development of full-color images with a subwavelength resolution exceeding 100,000 dpi. Finally, the signal modulation of a Si Mie resonator by laser irradiation was demonstrated. A calculation model with a photothermal effect was developed, and allowed the underlying mechanism of this modulation to be revealed, suggesting the potential of active tuning of structural colors.

This approach to generating subwavelength structural colors using Si-based Mie resonators could be utilized for the construction of not only functional color printing for anti-counterfeiting and security certification, but also for fundamental elements of other potential applications, including flat lenses, holograms, optical data storage, filters, and deflectors.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (長崎 裕介)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教授	高原 淳一
	副 査	教授	井上 康志
	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

本論文は長崎裕介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続いて本論文の構成が示されている。1章ではミー共振器の基本的な概念の説明と古典電磁気学に基づくミー理論の説明がなされている。一様媒質中に置かれた単一誘電体球におけるミー共振モードの解析解から各モードの散乱断面積が導出され、シミュレーションおよび実験結果と比較されている。2章から4章までは構造色について述べている。2章ではシリコン (Si) を用いたミー共振器により散乱スペクトルを制御することで構造色への応用が可能であることを提案し、これを実証している。反射スペクトルの実験結果と電磁シミュレーション結果を比較し、良い一致を得ている。また、周期構造ではなく単一のミー共振器でも同じ色が出せることを示し、回折限界解像度の画像生成に応用できることを実証している。また、色の偏光特性を利用した新しい情報コーディング方法を提案している。3章は2章の結果を発展させ、Si の熱酸化によりミー共振器の表面に二酸化ケイ素層を形成することで、ナノ構造を作製した後に色を変化させる方法を提案している。また、これを応用して隠された情報が加熱により浮き出す「インビジブルインク」を提案している。4章では Si ミー共振器の上部表面にクロム薄膜を付加することにより、2章の結果と比較して彩度と解像度を同時に向上できることを理論的に見出している。次に実験により色空間が拡大することを実証している。さらにチェッカーボードボタンを作製して、100,000dpi という回折限界解像度と彩度の高い画像を同時に実現できることを示している。5章は前章までと異なり、ミー共振器内部での強い電場集中にともなう非線形光散乱効果について述べている。単色レーザー光に対するミー共振器を設計し、共振による温度上昇効果を理論的に計算している。さらに、共同研究グループによる光学測定結果との比較により、非線形光散乱が共振による熱効果であることを見出している。結論では、これらの成果をまとめている。

構造色の研究はこれまで、多層膜やフォトニック結晶などの周期性を利用したものがほとんどであった。近年では、金属ナノ構造を用いた構造色であるプラズモニックカラーが提案され、回折限界解像度のカラー画像が実現されてきた。本研究は誘電体を用いることでプラズモニックカラーより彩度が向上し、色空間の広いカラー画像を実現した。また、ミー共振器に金属を付加することにより光閉じ込め効果を向上させ、プラズモニックカラーに匹敵する高い解像度を実現することに成功した。また、これまで金属ナノ粒子で報告されてきた非線形散乱が誘電体ナノ構造においてもおきることを見出し、それが熱効果によるものであることを示した。

本成果は応用上重要なシリコン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のみに頼ることなく解析的理論を併用して系統的に解明するとともに、ミー共振器を実際に作製して、その光散乱特性を線形領域から非線形領域の広いパワーにわたり系統的に実証した。また、それを新しい原理の構造色に応用し、理論限界の解像度を実証することに成功した。本研究は誘電体メタマテリアルという分野を切り開き、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している。本成果は応用物理学、特に2次元メタマテリアル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。