



Title	Enhancement of Light-Matter Interaction in Two-dimensional Exciton with Huygens Metasurface
Author(s)	Chen, Dingwei
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105436
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (CHEN DINGWEI)	
Title	Enhancement of Light-Matter Interaction in Two-Dimensional Exciton with Huygens Metasurface (ホイヘンスメタサーフェスによる2次元励起子の光・物質間相互作用の増強)
Abstract of Thesis Two-dimensional (2D) transition metal dichalcogenides (TMDCs) represent a class of atomically thin semiconductors with tunable band structures, high carrier mobility, strong spin-orbit coupling, and remarkable excitonic characteristics. Compared with their bulk counterparts, 2D TMDCs exhibit a transition to direct bandgaps with giant exciton binding energies and efficient exciton-photon interactions. These unique features make them promising for optoelectronic and quantum photonic devices, including light emitters, detectors, and valleytronic elements. Nevertheless, their ultrathin thickness imposes an inherent limitation: the extremely small interaction volume leads to intrinsically weak absorption and emission, typically below the threshold required for practical device applications. This dissertation aims to address this limitation by introducing a multiple coupling strategy that integrates degenerate critical coupling (DCC) and intermediate coupling between Mie resonances in dielectric metasurfaces and excitons in monolayers TMDCs. By establishing and experimentally validating this framework, the work demonstrates a substantial enhancement of both absorption and photoluminescence (PL) in 2D materials. The optical properties of Mie resonators are first analyzed in detail, focusing on the electric and magnetic dipole (ED and MD) modes and their spectral degeneracy under the DCC condition. DCC enables perfect absorption when the radiative loss rate is matched to the intrinsic loss rate. While this phenomenon has been mainly achieved in the near-infrared and visible regions in previous studies, the present work extends it into the violet spectral range by employing rotated dielectric resonators. This extension verifies the universality of the DCC condition in high-index dielectric materials and expands its applicability to shorter wavelengths. Building on this understanding, the dissertation further investigates hybrid photonics systems composed of monolayer TMDCs integrated with Mie-type dielectric metasurfaces. Monolayer WS₂ is employed as a representative 2D semiconductor in the visible regime, where its A-exciton resonance around 615 nm dominates the optical response. Both numerical simulations and experimental measurements reveal an intermediate coupling regime between the exciton and Mie modes, characterized by a Rabi splitting of approximately 81 meV and significant enhancement in both absorption and emission. The system exhibits a maximum absorptivity exceeding 0.78 and a PL intensity enhancement of over 18-fold, demonstrating efficient energy exchange between the excitons and Mie resonances. This work identifies and experimentally confirms the physical origin of Miexcitons—the hybridized quasi-particles arising from intermediate Mie-exciton coupling. By tuning the structural parameters, the ED Mie mode can be brought into near-resonance with the excitonic transition, establishing the intermediate coupling that strengthens light-matter interaction. When the ED and MD modes are spectrally overlapped, these modes act cooperatively to further amplify the absorption and emission enhancement. Moreover, by adjusting the metasurface geometry, the Mie-resonance wavelength can be continuously tuned from the ultraviolet to the infrared, enabling broad compatibility with various 2D materials possessing different excitonic energies. In conclusion, this dissertation establishes a comprehensive framework for Mie resonance-based exciton enhancement through DCC and intermediate coupling, across from violet to visible wavelengths range. The findings deepen the physical insight into hybrid 2D-dielectric photonic systems and provide practical design principles for future optoelectronic and quantum photonic devices that exploit the extraordinary optical properties of atomically thin semiconductors.	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (CHEN DINGWEI)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教授	高原 淳一
	副 査	教授	坂本 一之
	副 査	教授	VERMA Prabhat
	副 査	教授	岡本 晃一 (大阪公立大学)

論文審査の結果の要旨

本論文はChen Dingwei氏が大阪大学大学院工学研究科の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4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る。1章では一般的な2次元材料の特性とその応用について述べた後に、遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)の物性が述べられている。本研究で中心的な役割を果たすTMDCにおけるエキシトン(exciton)の物理が示され、本研究に用いられる硫化タングステン(WS_2)の基本的な光学特性が紹介されている。2章ではミー共振器による光散乱についてミー理論の原理が述べられている。また、モード結合理論に基づき、電気双極子と磁気双極子が縮退したホイヘンス状態における縮退臨界結合を利用した誘電体による完全吸収体の動作原理が述べられている。2.4節ではメタ原子の回転の自由度を利用した臨界結合条件の制御の理論とその実験について述べている。申請者はRongyang Xu博士と共同で実験を行い、シリコン(Si)ミー共振器からなるメタサーフェスにおいてメタ原子を回転させるだけで、メタサーフェス完全吸収体の吸収波長を従来の緑色($\sim 550\text{nm}$)から紫色($\sim 430\text{nm}$)に短波長化することに成功した。

3章と4章は本研究の中心となる章である。3章ではSiミー共振器上に単層 WS_2 膜を担持した構造における2次元エキシトンとミー共振モードの結合系による光学スペクトルの電磁界シミュレーション結果について述べている。申請者はこの結合モードをミーエキシトン(Miexciton)と名付けた。3.3節と3.4節ではミー共振器に磁気双極子または電気双極子それぞれが単独で存在する場合の吸収率と電場増強効果を比較している。その結果、電気双極子においては結合による分散曲線のラビ分裂が観測された。3.5節では磁気双極子、電気双極子が同波長で縮退したホイヘンス状態の場合にラビ分裂エネルギーが増大することを見出し、ホイヘンスメタサーフェスの吸収率が単独の場合より大きくなることを見出している。本効果の原因について議論がなされている。4章では3章の結果をもとに行われた、実験結果について述べている。4.1節ではSiメタサーフェス上への単層 WS_2 膜の転写プロセスについて述べている。4.2節では顕微ラマン分光の結果から WS_2 の単層膜の転写に成功したことが示される。続いて4.3節では微細加工により作製したSiメタサーフェスの顕微分光による素子の反射、透過スペクトルから吸収スペクトルを求めている。4.4節ではSiメタサーフェスと単層 WS_2 との結合系の吸収率において実験結果とシミュレーションとを比較し、ラビ分裂エネルギーの大きさから本現象が強結合と弱結合の間の中間結合域にあることを示している。4.5節では蛍光増強度について平面基板と比較して18倍もの増強を観測することに成功している。蛍光スペクトルのレーザー強度依存性の実験からトリオン(trion)の効果と考えられるふるまいを見出している。最後に4.6節では角度依存性と他のTMDC材料への拡張について述べている。結論では、これらの成果をまとめている。

エキシトンと他の物理系との結合系はこれまで多くの研究が行われてきた。ナノフォトンクスではTMDC上に置かれたプラズモニック共振器における表面プラズモンとの結合系が有名である。この結合系の結合モードはプレキシトン(plexiton)とよばれ、中間結合域におけるTMDCの蛍光増強効果に関する研究が行われてきた。本研究はプラ

ズモニック共振器を誘電体ミラー共振器に拡張し、固有損失を大幅に減少させた系と考えることができる。単層 WS_2 膜では薄いため光との相互作用は弱く、平面基板上に置いた場合では共鳴時でも吸収率 ~ 0.1 程度しかないが、Siメタサーフェスと結合させることで相互作用を増大させ、吸収率 ~ 0.84 まで増強できることを示したことは特筆できる。

本成果は次世代の2次元半導体材料として期待されるTMDCの光・物質間相互作用の弱さという原理的な問題をホーヘンスメタサーフェスとの結合により解決することに成功した。本研究は誘電体メタサーフェスと2次元半導体材料が融合した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貢献するだけでなく、将来の光エレクトロニクス応用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。