

マテリアル先端リサーチインフラ利用報告書

ARIM User's Report

[Release : 2026.01.13] [Update : 2026.01.13]

課題データ / Project Data

課題番号 Project Issue Number	24OS1043
利用課題名 Title	シリコンメタサーフェスによる全光制御素子
利用した実施機関 Support Institute	大阪大学 / Univ. of Osaka
機関外・機関内の利用 External or Internal Use	内部利用（ARIM事業参画者以外） / Internal Use (by non ARIM members)
ARIM半導体基盤PF 関連課題 Related to ARIM-SETI	指定なし / No Designation
横断技術領域 Cross-Technology Area	加工・デバイスプロセス/Nanofabrication 計測・分析/Advanced Characterization
重要技術領域 Important Technology Area	高度なデバイス機能の発現を可能とするマテリアル/Materials allowing high-level device functions to be performed 革新的なエネルギー変換を可能とするマテリアル/Materials enabling innovative energy conversion
キーワード Keywords	熱輻射制御,光デバイス/ Optical Device,電子線リソグラフィ/ EB lithography,フォトニクスデバイス/ Nanophotonics device,メタマテリアル/ Metamaterial,蒸着・成膜/ Vapor deposition/film formation

利用者と利用形態 / User and Support Type

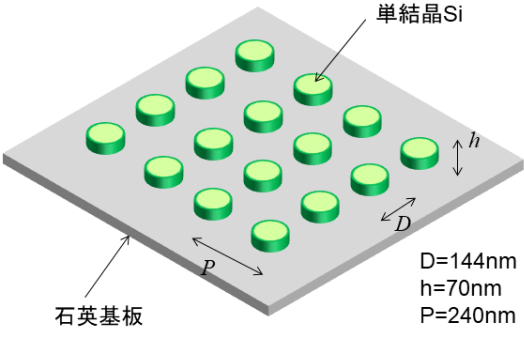
利用者名（課題申請者） User Name (Project Applicant)	高原 淳一
所属名 Affiliation	大阪大学 大学院工学研究科 物理学系専攻
共同利用者氏名 Names of Collaborators Excluding Supporters in the Hub and Spoke Institutes	Chen Dingwei,新開誠也,柏原昌渡,宮崎遼太
ARIM実施機関支援担当者 Names of Supporters in the Hub and Spoke Institutes	
利用形態 Support Type	機器利用/Equipment Utilization,技術代行/Technology Substitution

利用した主な設備 / Equipment Used in This Project

利用した主な設備 Equipment ID & Name	OS-103 : 超高精細電子ビームリソグラフィ装置 OS-113 : 多元DC/RFスパッタ装置 OS-115 : RFスパッタ成膜装置 (絶縁体成膜用) OS-117 : EB蒸着装置 OS-126 : 接触式膜厚測定器
---	--

報告書データ / Report

概要 (目的・用途・実施内容) Abstract (Aim, Use Applications and Contents)	<p>メタサーフェスはメタ原子とよばれる光共振器を平面基板上に周期的に配列した2次元メタマテリアルである。一般にメタサーフェスは構造パラメータが設計時に固定される静的光学素子である。2000年代から時間的に光学特性が変化するアクティブメタサーフェス (AMS) の研究がすすめられた。既存のAMSの多くは液晶やMEMSへの電圧印加によるものであり、系の応答速度は電気回路の時定数に律速される。フォトリソの超高速性・低消費電力性を最大限に生かすためには、光により光を制御 (全光制御) できるAMSが必要である。しかし、メタサーフェスは縦型素子であり光との相互作用長が短い点が原理的な問題となる。既存の全光制御素子の非線形光学デバイスの多くは横型で、光導波路を伝搬させて相互作用長を稼ぐがメタサーフェスではそれは難しい。そこで我々は全光制御に適した方法として熱光学効果 (photothermal effect) によるAMSについて研究を行った。我々はパルスレーザー光を用いることなく連続レーザー光で巨大な有効カー一定数を実現し、光により散乱方向の切り替えを実証することに成功した。しかし、この素子は制御光と信号光で同じ波長を用いるため、信号光の制御が難しいという問題点があった。今回我々は、制御光と信号光の波長を分離した全光制御を目的として、素子設計と実験を行った。本メタサーフェスではモード結合理論における縮退臨界結合の原理に基づいてメタ原子アレイの完全吸収体の設計を行った。ここで、メタ原子の高さと周期を最適化し、磁気四重極子 (MQ) モードと電気四重極子 (EQ) モードが縮退する波長405nmにおいて吸収率80%の準完全吸収体となるようにした。このとき同時に473nmにおいて透過率が極小値 (~ 0) をとることがわかった。そこで我々はシリコン (Si) メタサーフェスを利用した準完全吸収体に波長405nmの連続レーザー光 (制御光) を照射したときの、473nm (信号光) における透過・反射スペクトルを実験的に調べた。</p>
実験 Experimental	<p>SOQ (Silicon On Quartz) 基板上の単結晶シリコンを用いて、電子ビーム露光とドライエッチングにより円柱型ミラー共振器をメタ原子とするSiメタサーフェスを作製した。この素子に光学顕微鏡下で波長405nmのレーザー光を対物レンズで集光して照射すると準完全吸収体として動作する。一方、室温において473nm (信号光) においては透過率がほぼゼロである。光学顕微鏡下において可視域 (380-550nm) における反射、透過、吸収率の顕微スペクトルを測定した。</p>
結果と考察 Results and Discussion	<p>メタサーフェス素子に波長405nmの連続光を垂直入射させたときの前方および後方散乱スペクトルを計測した。その結果、室温で波長473nmにおいては磁気双極子と電気双極子から出る散乱波の破壊的干渉効果によって前方散乱が抑制され、透過率がほぼゼロだったものが、熱光学効果による屈折率の変調により透過率が増大することがわかった。入射パワー密度を増大させると最大381%にまで増大できることがわかった。このことから熱光学効果によって光散乱が後方散乱優位 (T\sim0) から前方散乱優位へと切り替わる「光の伝搬方向のスイッチング」がおきたといえる。これにより制御光と信号光を分離した全光スイッチングを実証することができた。</p>

<p>図・表・数式 1 Figures, Tables and Equations 1</p>	 <p>四重極子の縮退臨界結合を利用したSiメタサーフェス完全吸収体</p>
<p>その他・特記事項 (参考文献・謝辞等) Remarks(References and Acknowledgements)</p>	

成果発表・成果利用 / Publication and Patents

<p>DOI (論文・プロシーディング) [1] DOI (Publication and Proceedings)</p>	<p>Kentaro Nishida, All-optical control of semiconductor nanostructure scattering/absorption via the photothermal effect [Invited], <i>Journal of the Optical Society of America B</i>, 41, D61 (2024). DOI: 10.1364/JOSAB.531136</p>
<p>DOI (論文・プロシーディング) [2] DOI (Publication and Proceedings)</p>	<p>Rongyang Xu, Perfect absorption of violet light enabled by rotated Mie resonators, <i>Journal of Applied Physics</i>, 135, (2024). DOI: 10.1063/5.0208039</p>
<p>口頭発表、ポスター発表 および、その他の論文[1] Oral Presentations etc.</p>	<p>Seiya Shinkai and Junichi Takahara, "All-optical spectral control by perfect absorber based on quadrupole resonance and photothermal effect", The 14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2024), SP25-4, Toyama International Conference Center, Toyama, July 18 (2024).(oral)</p>
<p>口頭発表、ポスター発表 および、その他の論文[2] Oral Presentations etc.</p>	<p>Dingwei Chen and Junichi Takahara, "Absorption Enhancement of Excitons in WS2 by Silicon Huygens' Metasurface", JSAP-Optica Joint Symposia, Toki Messe, Niigata, September 17 (2024).(oral)</p>
<p>口頭発表、ポスター発表 および、その他の論文[3] Oral Presentations etc.</p>	<p>新開誠也、西田健太郎、Shi-Wei Chu、高原淳一：「シリコンメタサーフェスによる四重極子共振を用いた熱光学的透過制御」、第72回応用物理学会春季学術講演会 15a-K506-5 (開催地：東京理科大学 野田キャンパス) 2025年3月15日。(口頭発表)</p>
<p>口頭発表、ポスター発表 および、その他の論文[4] Oral Presentations etc.</p>	<p>Dingwei Chen and Junichi Takahara, "Absorption enhancement of exciton of WS2 by silicon Huygens' metasurface based on degenerate critical coupling", The 14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2024), SP22-2, Toyama International Conference Center, Toyama, July 16 (2024).(oral)</p>

特許出願件数 Number of Patent Applications	0件
特許登録件数 Number of Registered Patents	0件