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：2025.06.10】　【Update：2025.03.17】

課題データ / Project Data

課題番号 Project Issue Number	24UT1019
利用課題名 Title	原子時計に用いられるメタサーフェス搭載マイクロ光学セルの開発
利用した実施機関 Support Institute	東京大学 / Tokyo Univ.
機関外・機関内の利用 External or Internal Use	外部利用/External Use
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	量子・電子制御により革新的な機能を発現するマテリアル/Materials using quantum and electronic control to perform innovative functions
キーワード Keywords	メタサーフェス、原子時計、マイクロセル、光学セル,量子効果/ Quantum effect, 電子線リソグラフィ/ EB lithography,走査プローブ顕微鏡/ Scanning probe microscope,膜加工・エッチング/ Film processing/etching

利用者と利用形態 / User and Support Type

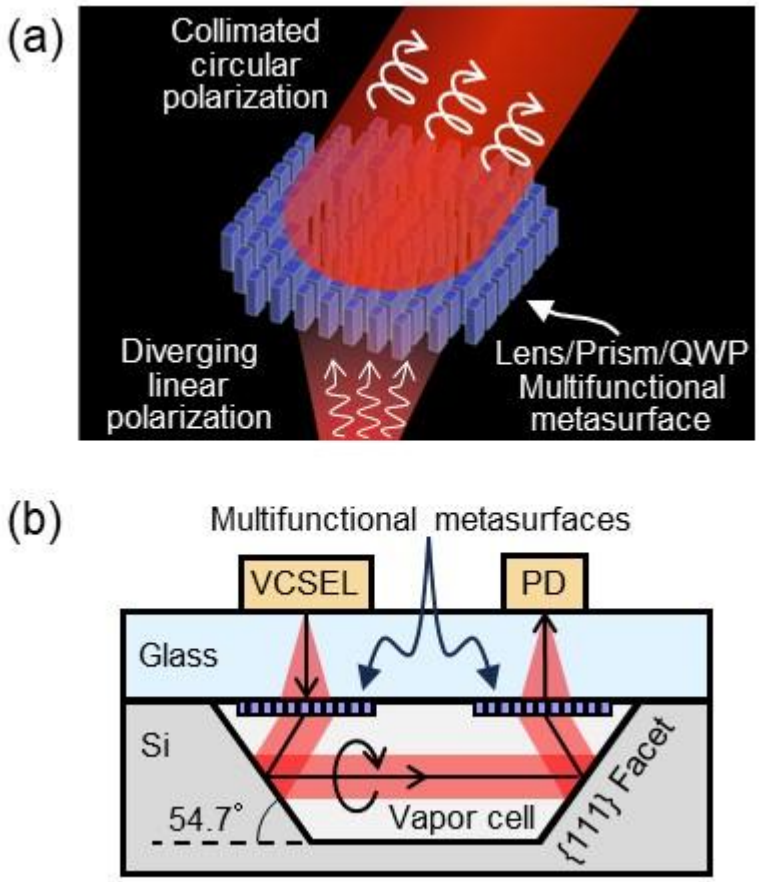
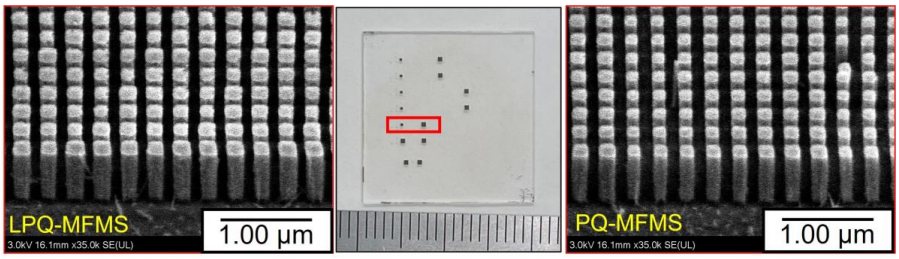
利用者名（課題申請者） User Name (Project Applicant)	岩見 健太郎
所属名 Affiliation	東京農工大学工学部機械システム工学科
共同利用者氏名 Names of Collaborators Excluding Supporters in the Hub and Spoke Institutes	PONRAPEE PRUTPHONGS,片岡勇斗
ARIM実施機関支援担当者 Names of Supporters in the Hub and Spoke Institutes	
利用形態 Support Type	機器利用/Equipment Utilization

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

利用した主な設備 Equipment ID & Name	UT-503：超高速大面積電子線描画装置 UT-604：高速シリコン深掘りエッチング装置 UT-855：高精細電子顕微鏡 UT-800：クリーンドラフト潤沢超純水付

報告書データ / Report

概要（目的・用途・実施内容） Abstract (Aim, Use Applications and Contents)	本研究では、原子時計に必要とされる光学セルのさらなる小型化を目指し、反射型光学セルに使用可能な多機能メタサーフェスの開発を目的とする。多機能メタサーフェスは、Fig.1 (a)に示すように長方形のシリコン柱を配列し、偏向・1/4波長板およびレンズとして同時に機能する構造を持つ。また、多機能メタサーフェスを Fig.1(b)のように結晶異方性エッチングで形成されたシリコン{111}面の基板と接合し、光学セルを製作する。これにより、従来の原子時計の物理パッケージの大幅な空間縮小が可能と考えられる。本研究では、メタサーフェスのシリコン柱のパターン描画およびエッチングを行うために、ARIM東京大学武田クリーンルームの装置を利用した。
実験 Experimental	【利用した主な装置】 超高速大面積電子線描画装置（F7000S-VD02）、高速シリコン深堀エッチング装置（MUC-21 ASE-Pegasus）、高精細電子顕微鏡（Regulus 8230） 【実験方法】 本研究では、表面に水素化モルファスシリコンを750nm成膜した20mm角のテンパックスガラス基板上に、シリコン柱の配列パターンを描画した。ここで、超高速大面積電子線描画装置（F7000S-VD02）を利用した。前述の基板上にポジ型のEBレジストZEP-520Aを塗布した。本研究のメタサーフェスは300μm角と500μm角二種類あり、前述の基板上に12個のメタサーフェスをまとめて描画した。また、ここではF7000S-VD02のVSB(Variable Shaped Beam)を使用することで、ナノスケール四角形パターンを短時間で描画することにした。その後、現像およびマスクとして用いるクロム(膜厚50-60nm)のリフトオフプロセスを行い、柱形状を形成するため、高速シリコン深堀エッチング装置（MUC-21 ASE-Pegasus）を用いてシリコン膜をエッチングした。本研究では、柱形状の完成度がメタサーフェスの性能に影響を及ぼすため、高精細電子顕微鏡（Regulus 8230）を利用して柱形状の観察・評価を行った。昨年度の研究では、性能向上を目指して、SEMで観察したデータに基づき、シリコン膜のエッチングレシピを少しずつ調整し、より垂直性・完成度の高い柱の形成を試みた。しかし、これによりメタサーフェスの透過率が低下する傾向が見られた。今年度の研究では、レシピの再現性を確認しつつ、シリコン柱が多少逆テーパ形状になっても高性能を維持できるように再設計を行った。また、エッチングプロセスを3段階に分け、少しずつPassivation時間を減らし、エッチングをレートを上げる方法を採用し、確実に逆テーパ形状の柱を形成した。
結果と考察 Results and Discussion	製作したメタサーフェスの柱を、高精細電子顕微鏡（Regulus 8230）により撮影した画像をFig. 2に示す。今回は、高速シリコン深堀エッチング装置（MUC-21 ASE-Pegasus）のEtching[s]/Passivation[s]を調整し、750nmのシリコン膜をエッチングした。柱の欠損が少なく、目視でも柱が目標である多少逆テーパ形状を得ることに成功した。しかし、このメタサーフェスを用いて性能評価を行った結果、相対効率では良かったが、透過率の課題は残ったままであった。当時はシリコンの削り残しがあると考えたため、エッチングが強めのレシピでエッチングしたが、現段階では、シリコンの自然酸化膜によるものである可能性が考えられ、検討する必要がある。

図・表・数式 1 Figures, Tables and Equations 1	 Fig. 1 (a) Schematic diagram of the proposed metasurface. (b) Schematic side view of a reflection-type optical cell.
図・表・数式 2 Figures, Tables and Equations 2	 Fig. 2 Fabricated metasurfaces.
その他・特記事項（参考文献・謝辞等） Remarks(References and Acknowledgements)	・共同研究者：国立研究開発法人 情報通信研究機構 原基揚様 ・超高速大面積電子線描画装置の利用にあたって、度々サポートしてくださった学術支援専門職員の藤原誠様に深く感謝申し上げます。

成果発表・成果利用 / Publication and Patents

DOI（論文・プロシーディング）[1] DOI (Publication and Proceedings)	Ponrapee Prutphongs, Highly efficient multifunctional metasurface integrating lens, prism, and wave plate, *Optics Express*, **32**, 28599(2024). DOI: https://doi.org/10.1364/OE.524027
口頭発表、ポスター発表および、その他の論文[1] Oral Presentations etc.	Ponrapee Prutphongs, Yuto Kataoka, Motoaki Hara, and Kentaro Iwami, “Merging MEMS Vapor Cell with Meatasurfaces for Next-Gen Chip-Scale Atomic Clocks”, IEEE MEMS 2025, Kaohsiung Taiwan, 22/Jan/2025

口頭発表、ポスター発表および、その他の論文[2] Oral Presentations etc.	Ryosei Ito, Ponrapee Prutphongs, Katsuma Aoki, Satoshi Ikezawa, Motoaki Hara, andKentaro Iwami, ”Development of Vapor Cells Based on Tri-functional Metasurface forMicrofabricated Atomic Clock”, The 14th International Conference on Metamaterials,Photonic Crystals and Plasmonics (META 2024), Toyama Japan, 19/July/2024
口頭発表、ポスター発表および、その他の論文[3] Oral Presentations etc.	片岡 勇斗，Ponrapee Prutphongs，伊藤 遼成，岩見 健太郎*，「小型原子時計パッケージのための多機能メタサーフェスの効率向上」，第 41 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム（仙台国際センター），27P3-PS-14，2024年 11 月 27 日
口頭発表、ポスター発表および、その他の論文[4] Oral Presentations etc.	Ponrapee Prutphongs，片岡 勇斗，伊藤 遼成，原 基揚，岩見 健太郎*，「チップスケール原子時計へ用いる複合メタサーフェスの検証」，Optics & Photonics Japan (OPJ) 2024（電気通信大学），30pMS10， 2024 年 11 月 30 日
特許出願件数 Number of Patent Applications	0件
特許登録件数 Number of Registered Patents	0件