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：2025.04.21】

課題データ / Project Data

課題番号 Project Issue Number	24UT1005
利用課題名 Title	マイクロ流路デバイスを用いた音響流による動的スピン流体発電の研究
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
重要技術領域 Important Technology Area	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	スピン流体発電、マイクロ流路, 段差計, スピンコーター, スパッタリング, 光露光（マスクアライナ）, 接合・接着, ダイシング, プラズマ処理, ウェット処理,ダイシング/ Dicing,スパッタリング/ Sputtering,光リソグラフィ/ Photolithgraphy,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)	髙橋 遼
所属名 Affiliation	お茶の水女子大学基幹研究院自然科学系
共同利用者氏名 Names of Collaborators Excluding Supporters in the Hub and Spoke Institutes	荒井 麻希
ARIM実施機関支援担当者 Names of Supporters in the Hub and Spoke Institutes	天谷 諭,與田 光宏,太田 悦子
利用形態 Support Type	機器利用/Equipment Utilization,技術補助/Technical Assistance

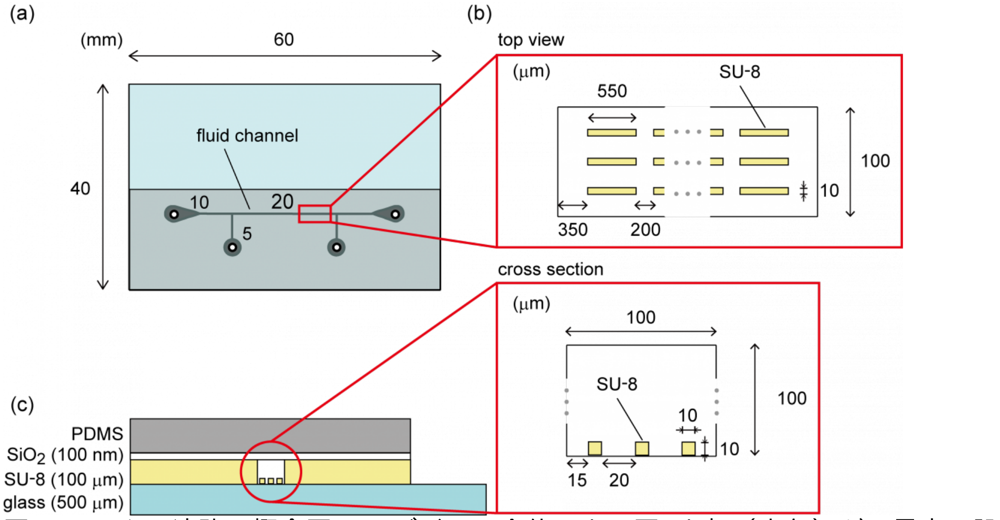
利用した主な設備 / Equipment Used in This Project

利用した主な設備 Equipment ID & Name	UT-504：光リソグラフィ装置MA-6 UT-606：汎用平行平板RIE装置 UT-703：8インチ汎用スパッタ装置 UT-805：プラズマ表面改質装置 UT-906：ブレードダイサー

報告書データ / Report

概要（目的・用途・実施内容） Abstract (Aim, Use Applications and Contents)	スピン流体発電とは、流動する液体金属の渦度分布に伴い、スピン-渦度相関を通して、伝導電子のスピン角運動量の流れ（スピン流）を誘起し、起電力として出力する現象である。本研究の主題は、この現象に対し音響振動による動的な制御性を与えることにある。目的遂行に当たり本利用課題では、実証実験を行うためのマイクロ流路デバイスの作製を実施した。流路底面に高さ10 μmの凹凸構造体群（音響流の発生源）を永久レジストにより作製し、流路側面にも永久レジストを採用した合成石英/SU-8/(SiO_2)/PDMSからなる大きさ100×100 μm^2の矩形流路の作製を実施した。

実験 **Experimental**	**【利用した主な設備以外】**UT-800 クリーンドラフト潤沢超純水付、UT-850 形状・膜厚・電気特性評価装置群、UT-851　機械特性評価装置、UT-858　電子顕微鏡、SC-308S スピンコーター、S-Image AUTO 100 自動接触角計. **【実施内容】**合成石英基板上に光リソグラフィによる永久レジスト構造体（流路底面の凹凸構造体群および流路側面）の作製、表面処理・改質を行い、合成石英/永久レジスト/PDMSの接合によるマイクロ流路の作製を実施した。 **【プロセス概要**（括弧内は使用した設備ID）**】**本利用課題で作製した流路デバイスの上面図を図1(a)に示す。流路デバイスはマイクロ流路部と圧電素子設置部からなり、次のプロセスによりマイクロ流路部の作製を行った。 ① 凹凸構造体群の作製（図1(b)）。合成石英基板をウェット洗浄（UT-800; アセトン 3分, IPA 3分, 超純水 1分）した後、OAP処理、ベーク（200℃, 30分; 密着性向上を目的とした強めの条件）、膜厚10 μmの条件[1]に則りSU-8 3010のスピンコート（SC-308S）・露光（UT-504）・現像（UT-800）をし、Hard Bakeまで実施した。 ②　流路側面の作製および表面処理。①の基板上に、同様にOAP処理、ベーク（200℃, 30分）、膜厚100 μmの条件[2]に則りSU-8 2100のスピンコート・露光・現像をし、Hard Bakeまで実施した。これにO_2プラズマによる表面洗浄（UT-606; 50 W, 26 Pa, O_2 30 sccm, 5分）を行い、続いてSiO_2膜100 nmをスパッタリングした（UT-703; 1000 W, Ar 50 sccm, Rate 7.2 nm/minに準拠）。SiO_2膜は接合における中間層であり、SU-8/(SiO_2)/PDMSとすることで接合強度を改善させることを目的とした[3]。SU-8/SiO_2の積層構造の厚みは段差測定および顕微鏡観察（UT-850）を通し確認した。次にJSR 7790Gを保護膜（1.1 μm相当）としてコート、収縮による凹凸構造体の破損を懸念し、ベークは行わず室温で数時間置いた後、デバイスサイズにダイシング（UT-906）した。 ③ PDMSによる流路上面の作製。SYLGARD 184を主剤:硬化剤=10:1で混合、平坦なSi基板全面に塗布し、真空脱泡（1時間）の後、80℃で硬化（2時間）させた。Si基板から剥離させたPDMSをデバイスサイズに成型、送液口などの加工を行った。 ④ 接合。②の基板の洗浄（アセトン 10分, 超純水 1分）、および③のPDMSの洗浄（エタノール超音波洗浄 5分, 超純水 1分, 恒温器による脱水 80℃, 10分）の後、両者に対し水蒸気プラズマ（UT-805; 60秒, 200 W, H_2O 10 sccm, heating (℃) Reactor:H_2O:MassFlow=50:65:75）による表面親水化を行った。親水化は接触角計（S-Image AUTO 100）により確認された。続いて両者を貼り合わせ、バイスで強く圧着させながら恒温器内（100℃, 10分）で接合させた。以上により、凹凸構造体群を流路内にもつ合成石英/SU-8/(SiO_2)/PDMSからなるマイクロ流路（図1(c)）が作製された。
結果と考察 **Results and Discussion**	本研究課題ではスピン流体発電現象の発生にあたり、マイクロ流路に対し液体金属を数100kPaの圧力で流入させる必要がある。本課題で作製したマイクロ流路は、上述のプロセスおよび専用のデバイスホルダーにより耐圧性能の向上が確認されたが、200 kPa程度で剥離が発生し発電現象の定量測定には不十分であった。この剥離は送液口でのみ発生していることに加え、剥離面の表面元素分析（UT-858）により、PDMSとSiO_2膜の間で発生していることが確認された。十分な耐圧性能を得るために、今後はSU-8の平坦性を含めた接合強度の改善が必要となる。 　さらに、PDMS接合前のデバイスに対し、ピエゾ素子を接着して凹凸構造体群の振動特性を評価（UT-851）したところ、目的の周波数帯で十分な振動振幅は得られなかった。本課題では100 kHz帯の音響振動により、凹凸構造体の振動を通して流路内の液体にRayleigh型の音響流を誘起させることを目的としている。しかしながら接着したピエゾ素子に対してデバイス底面の合成石英基板が大きく、素子の振動が伝搬できていない。底面形状、基板材質、振動方向などの観点から、インピーダンスの整合を含めた改善が必要となる。 　上記２点の検討事項を改善したマイクロ流路デバイスの作製を引き続き実施し、本研究の主題であるスピン流体発電の音響流による動的制御性の実証実験へとつなげていく。

図・表・数式 1 Figures, Tables and Equations 1	 図1. マイクロ流路の概念図. (a) デバイス全体の上面図. 上部（水色）が圧電素子設置部. 下部（灰色）がマイクロ流路部. (b) 流路内部における凹凸構造体群の上面図（上）と断面図（下）. (c) デバイス全体の断面図.
その他・特記事項（参考文献・謝辞等） Remarks(References and Acknowledgements)	本利用課題を実施するにあたり、東京大学ARIM微細加工部門の天谷諭氏、與田光宏氏、太田悦子氏には技術相談、技術補助など多岐にわたりご尽力を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。 [1] KAYAKU Advanced Materials, Inc. *TECHNICAL DATA SHEET SU-8 3000 Permanent Negative Epoxy Photoresist.* [2] Micro Chem Corp. *SU-8 2000 Permanent Epoxy Negative Photoresist PROCESSING GUIDELINES FOR: SU-8 2100 and SU-8 2150.* [3] Xiaolong, L. et al. A Human Microrobot Interface Based on Acoustic Manipulation. *ACS Nano* **13**, 11443-11452 (2019).

成果発表・成果利用 / Publication and Patents

DOI（論文・プロシーディング） DOI (Publication and Proceedings)	
口頭発表、ポスター発表および、その他の論文 Oral Presentations etc.	
特許出願件数 Number of Patent Applications	0件
特許登録件数 Number of Registered Patents	0件