

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス : 3.1 光学基礎・光学新領域

2025年3月15日(土) 13:30 ~ 17:15 会 K305 (講義棟)

[15p-K305-1~14] 3.1 光学基礎・光学新領域

小澤 祐市(東北大)、藤井 稔(神戸大)、納谷 昌之(納谷ラボ)

◆ 奨励賞エントリー

13:30 ~ 13:45

[15p-K305-1]

光機械共振器における機械的共振サイドバンドによる光圧と光誘起熱効果の分離 I

○荒張 秀樹¹、高岡 航大²、秋田 成司²、石原 一¹ (1.阪大院基礎工、2.阪公立大院工)

◆ 奨励賞エントリー

13:45 ~ 14:00

[15p-K305-2]

光機械共振器における機械的共振サイドバンドによる光圧と光誘起熱効果の分離 II

○高岡 航大¹、荒張 秀樹²、金子 涼太³、石原 一²、秋田 成司¹ (1.阪公大院工、2.阪大院基礎工、3.阪府大工)

14:00 ~ 14:15

[15p-K305-3]

多光子過程による精密熱分布を利用した気泡チャンネル

○伊藤 宙陸¹、内山 雄暉¹、小俣 颯祐¹、山田 大翔¹、本間 聡¹ (1.山梨大工)

14:15 ~ 14:30

[15p-K305-4]

多重ニードルスポットによる3次元蛍光イメージングの並列化

○小澤 祐市¹ (1.東北大多元研)

◆ 奨励賞エントリー

14:30 ~ 14:45

[15p-K305-5]

NanoVNAを活用した安価な強磁性共鳴測定装置の開発と性能評価

○福永 怜央¹、高橋 龍之介¹、上野 哲朗²、庄司 大希³、戸川 欣彦³、和達 大樹^{1,4} (1.兵庫県大理、2.QST、3.大阪公立大工、4.阪大レーザー研)

14:45 ~ 15:00

[15p-K305-6]

タイコグラフィカル位相回復におけるビームプロファイルの影響

○前野 碧斗¹、鵜野 克宏¹ (1.茨大院理工)

15:00 ~ 15:15

[15p-K305-7]

光駆動微小液滴ロボットの環境適応性

○納谷 昌之^{1,2}、白田 真也¹、椎名 仁太郎¹、三友 秀之³、居城 邦治³、斎木 敏治¹ (1.慶大理工、2.納谷ラボ、3.北大電子研)

15:15 ~ 15:30

[15p-K305-8]

1/4波長液晶製幾何学位相素子マスクを用いた転写露光法による幾何学位相素子形成

○野田 浩平^{1,3}、藤田 雅也¹、坂本 盛嗣^{1,3}、鈴木 雅人^{1,3}、佐々木 友之^{1,3}、川月 喜弘^{2,3}、小野 浩司^{1,3}
(1.長岡技大、2.兵庫県立大、3.CREST, JST)

15:45 ~ 16:00

[15p-K305-9]

酸化スズで表面改質した銀ナノ薄膜の表面プラズモン共鳴特性

○(M1)鈴木 麗人¹、杉田 篤史¹、細見 圭¹ (1.静岡大工)

16:00 ~ 16:15

[15p-K305-10]

Fabry-Perot型光共振器における鏡の表面形状による固有モード制御

○渡邊 芙美枝¹、鈴木 雄太¹、手塚 信一郎¹ (1.横河電機(株))

16:15 ~ 16:30

[15p-K305-11]

プラズマ加工技術を利用した電気駆動用ランダム構造の作製

○藤原 英樹¹、Shi Quan²、梶田 信²、大野 哲靖³、田中 宏彦³、上原 日和⁴ (1.北海学園大、2.東大、3.名大、4.核融合研)

◆ 奨励賞エントリー

16:30 ~ 16:45

[15p-K305-12]

オンチップマイクロ共振器による分子振動の制御

○(M2)関根 悠介¹、董 俊余¹、北濱 康孝¹、肖 廷輝^{1,2,3}、合田 圭介^{1,2,4,5} (1.東京大学、2.量研機構、3.鄭州大学、4.武漢大学、5.カリフォルニア大学)

16:45 ~ 17:00

[15p-K305-13]

時間変調磁性メタマテリアルによる非対称な周波数上方/下方変換

○(PC)児玉 俊之¹、千葉 貴裕²、菊池 伸明³、岡本 聡^{4,5}、大野 誠吾⁶、富田 知志^{1,6} (1.東北大高教機構、2.東北大学際研、3.秋田大院理工、4.東北大多元研、5.東北大CSIS、6.東北大院理)

◆ 奨励賞エントリー ◆ 英語発表

17:00 ~ 17:15

[15p-K305-14]

Photonic wire bonding using high refractive index UV curable resin for dip-in 3D laser lithography

○(M1)Lixin Xiang¹, Sho Okada², Katsunori Nishiura², Takuo Shikama³, Shu Nagamatsu¹, Towa Maekawa¹, Kensuke Otsuka³, Tomohir Amemiya¹ (1.Institute of Science Tokyo, 2.NICT, 3.Mitsui Chemicals, Inc)

光機械共振器における機械的共振サイドバンドによる光圧と光誘起熱効果の分離 I

Separation of optical force and photo-induced thermal effects by mechanical resonance sidebands in optomechanical resonators I

阪大院基礎工¹, 阪公大院工², [○]荒張秀樹¹, 高岡航大², 秋田成司², 石原一¹

Osaka Univ.¹, Osaka Metro. Univ.², [○]H. Arahari¹, K. Takaoka², S. Akita², H. Ishihara¹

E-mail: arahari.h@opt.mp.es.osaka-u.ac.jp

光と物質の運動量交換によって生じる「光圧」は、光ピンセットをはじめ、微小物質の運動操作技術として広く応用されている。我々は、物質の「発光」を利用した光圧（発光圧）に着目し、新たなオプトメカニクス [1] 技術に向けた研究を進めてきた [2]。具体的には、Fig. 1(a)に示す金属基板上に発光薄膜を架橋した光機械共振器を想定し、発光圧が機械振動を自発的に誘起・変調可能であることを理論的に示した。特に、キャビティの光閉じ込め効果により増幅された発光圧が振動子の機械共振周波数 f_m をシフトさせること（光ばね効果[3], f_{opt} in Fig.1(b))を定量的に示した。

発光圧による光ばね効果を実験的に観測する際、光ばね効果に加え、励起時に発生する熱が機械共振周波数をシフトさせる問題（熱由来の周波数シフト f_{th} 分離）が課題となる。これを解決するため、我々は励起光強度を熱応答時定数 τ_{th} より高い周波数 f_{mod} で周期 AM 変調し、機械共振スペクトルに現れるサイドバンド(Fig.2(a))を利用して光圧と熱効果を分離する手法を提案した(Fig.2(b))。この手法により、数 Hz 精度で周波数シフトを測定可能となり(連続講演で発表)、理論的に予測される光ばね効果を十分観測可能であることを明らかにした。また、本手法は従来の PLL 法に伴う帯域制限を受けない新しい光圧計測技術である。

本研究の成果は、発光に関わる分極モードを機械振動モードに変換する新たなオプトメカニクスの基盤となる可能性がある。本機構により、誘起される振動モードに共鳴周波数が大きく異なる量子系を結合させ、発光体固有の量子力学的情報を伝送・制御可能にする光圧技術の新たな応用につながると期待される。

[1] M. Aspelmeyer, et al., Rev. Mod. Phys. **86**, 1391(2014).

[2] 荒張他, 第 84 回応用物理学会 秋季学術講演 21a-A601-9 (2023).

[3] B. S. Sheard, et al., Phys. Rev. A **69**, 051801 (2004).

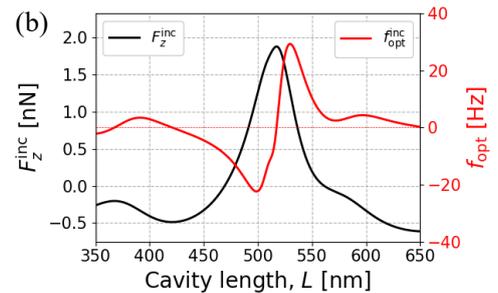
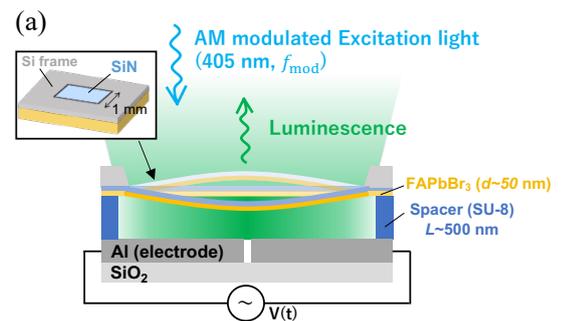


Fig.1 (a) Model diagram. Luminescent film: FAPbBr₃. (b) Luminescence-induced optical force and optical spring effect vs. cavity length. Parameters: excitation light intensity $I = 50 \text{ W/cm}^2$, $f_m = 400 \text{ kHz}$.

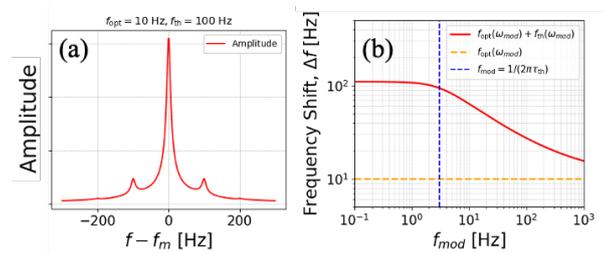


Fig 2. (a) Simulated resonance spectrum under AM modulation at $f_{mod} = 100 \text{ Hz}$. (b) Frequency shift vs. f_{mod} . Parameters: $\tau_{th} = 53 \text{ ms}$. (Simulation)

光機械共振器における機械的共振サイドバンドによる光圧と光誘起熱効果の分離Ⅱ

Separation of optical force and photo-induced thermal effects by mechanical resonance sidebands in optomechanical resonators II

阪公大院工¹/阪大院基礎工²/阪府大工³, [○]高岡航大¹, 荒張秀樹², 金子涼太³,
石原一², 有江隆之¹, 秋田成司¹

Osaka Metro. Univ.¹/ Osaka Univ.²/ Osaka Pref. Univ.³, [○]K. Takaoka¹, H. Arahari², R. Kaneko³,
H. Ishihara², T. Arie¹, S. Akita¹

E-mail: sk24275g@st.omu.ac.jp

はじめに 光の吸収・散乱が物質に及ぼす力, さらには発光によってもたらされる光圧を利用した光・機械共振器として, 発光薄膜が架橋構造かつ鏡面との間に光キャビティ構造を持つデバイスの作製・調査を行ってきた²⁾。このデバイスでは, 発光により自発的に光キャビティ中に生じた光定在波の光圧によって機械振動の変調・誘起が起こると理論的に予測されている¹⁾。前回は機械共振周波数シフトとして現れる発光圧効果の観測において, 発光誘起に伴う熱効果を低減すべく, 新たにサイドバンドを用いた力検出法を提案し, これにより小さな熱時定数を持つ熱効果にマスクされた微弱な力を検出できる可能性を示唆した。今回はこの検出法における定量的な評価法を検討したので報告する。

実験 前回報告同様, Si₃N₄ 正方膜を振動子とする薄膜型機械共振器に対して誘電効果振動駆動を行った(Fig.1)。薄膜にPL励起のために 405nm CW レーザーを周期 AM 変調 (ω_m) し薄膜に照射する(Fig.2)。この時, 熱を含む効果による周期的な周波数偏移($\Delta\omega$), すなわち系のばね定数変動を引き起こす。そこでロックイン検出により得た共振スペクトルから ω_s に関する信号の検出を行った。

結果と検討 Fig.3(a)に, 実験により得た共振スペクトルを示す。ここでバネ定数が周期変調を受けていると考えると共振特性は $\cos\left\{\omega t + \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \cos(\omega_m t)\right\}$ となる事が期待できるため, フィッティング関数として第一種ベッセル関数 $\{J_n(\Delta\omega/\omega_m)\}$ で重みづけたローレンツ関数で各モード ($P_n, n \in \mathbf{Z}$) を表し多項式近似する。これは同図内に示した通り, 実験結果によくフィットしていることが分かる。Fig.3(b)にはフィッティングパラメータとフィッティング誤差, そこから算出したメカニカルQ, $\Delta\omega$ を示した。このフィッティングでは約 1Hz の精度で $\Delta\omega$ を定量できた。

以上のように, 共振スペクトルのサイドモードからより正確な $\Delta\omega$ の測定が可能であることを示した。この手法では時定数の異なる効果を分離し, 数 Hz オーダーで周波数偏移を測定することが可能である。これは連続講演にて示す, 熱効果にマスクされた発光圧効果を十分に測定可能な精度である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP 21H05019, JP21K18193, JP21K18880 で行われた。

参考文献 1) 荒張他, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演 21a-A601-9 (熊本, 2023), 2)高岡他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 17a-A32-4 (新潟, 2024)

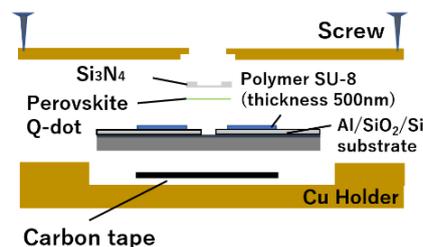


Fig. 1 Schematic of light-emitting opt-mechanical system.

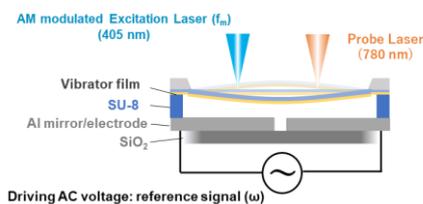


Fig. 2 Measurement setup.

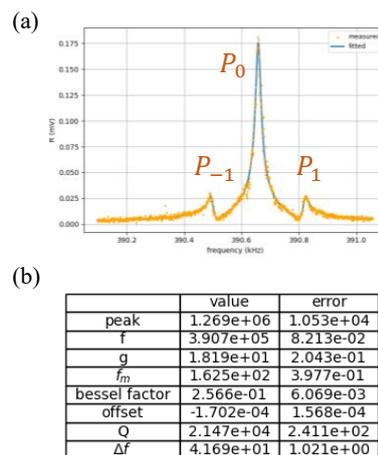


Fig. 3 (a)Resonance spectrum.
(Applied $f_m = 160$ Hz, Orange: Experiment, Blue: fitting.)
(b)fitting parameters and errors.

多光子過程による精密熱分布を利用した気泡チャンネル

Bubble channel using precise heat distribution by multiphoton process

山梨大工¹ ○伊藤 宙陸¹, (M1)内山 雄暉¹, (B)小俣 颯祐¹, (B)山田 大翔¹, 本間 聡¹

Univ. of Yamanashi¹, °Hironori Ito¹, Yuki Uchiyama¹, Sosuke Omata¹, Hiroto Yamada¹,

Satoshi Honma¹

E-mail: hito@yamanashi.ac.jp

マイクロ流体工学やソフトロボティクスなどの発展には、マイクロスケールにおいて任意の位置に任意の進行方向に液体や気泡を操作する技術が不可欠である。既存の手法は流れの発地点や気泡の位置は構造体に依存しており、本当の意味での3次元的な運動量制御はいまだに実現されていない。

本発表では図1に示すような多光子過程を利用した全く新しい気泡や流れの制御方法を提案する。フェムト秒パルスレーザーをメチルエーロ飽和アセトン溶液中に集光すると集光点近傍には極めて空間分解能が高くかつ急峻な熱の分布が瞬時に形成される。気泡が集光点付近に存在するとき、この熱勾配によってマランゴニ流が発生し、その反作用で気泡は高温部である集光点へ導かれ、高精度の気泡の位置制御が実現する。

この提案手法を利用して図2に示すような

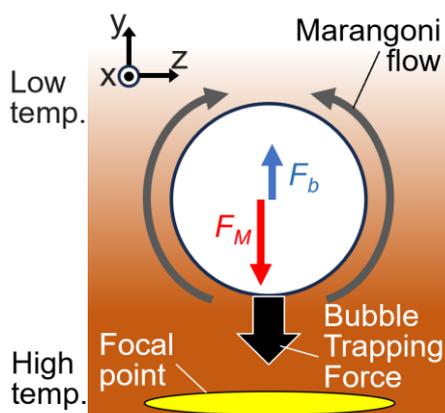


Fig. 1. Principle of trapping by Marangoni forces acting on a bubble with a thermal gradient. Marangoni flow is generated upward, causing the bubble trapping force.

気泡のガイドチャンネルのデモンストレーションを実施した。フェムト秒パルスレーザーをN.A.=0.1の対物レンズで溶液中に集光し、長さ約1 mm、幅10 μm の細長い2光子吸収分布チャンネルを発生させた。するとそのラインに沿って気泡を正確に光源方向へ誘導することができた。プロットに示すように気泡の軌跡のずれは数 μm 程に収まった。

提案手法は、特にガルバノミラーや空間光変調器のような光の高度な空間制御技術と組み合わせることで、流体の関わる全ての分野に革新をもたらすと期待される。

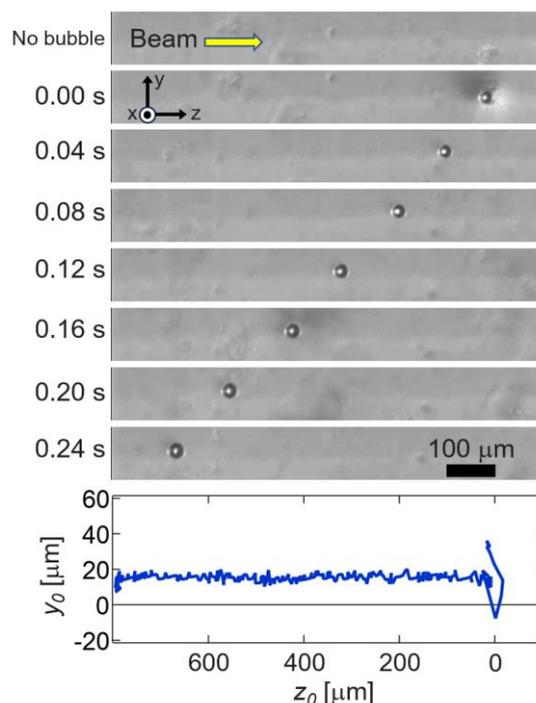


Fig. 2. The image shows a bubble moving horizontally precisely along the beam focal line. The plot shows the bubble trajectory relative to the focal line.

多重ニードルスポットによる3次元蛍光イメージングの並列化

Parallelized Three-Dimensional Fluorescence Imaging by Multiplexed Needle Spots

東北大多元研 °小澤 祐市

IMRAM, Tohoku Univ., °Yuichi Kozawa

E-mail: y.kozawa@tohoku.ac.jp

はじめに：レーザー走査型蛍光顕微鏡法は、測定試料の3次元像を取得できる観察法として広く用いられている。一方で、本イメージング法において3次元像を得るためには観察面を移動しながら2次元像を逐次取得する必要があるため、観察深さ範囲に応じて画像取得時間が増大するという課題がある。我々は、レーザー顕微鏡法における3次元画像取得を高速化する方法として、長焦点深度のニードル状励起スポット走査と蛍光信号に対する波面制御を原理とした新しいレーザー顕微鏡法をこれまで提案してきた[1-3]。本技術は、ニードルスポットの1回の2次元走査（ラスト走査）のみから試料の深さ情報を一挙に取得でき、観察面を移動することなく3次元画像構築を可能にする。一方で、本原理によるさらなる高速化を目指す上で、ニードルスポットのラスト走査そのものが制限要因となることから、現在これを解決するための新たな方法論の開発を進めている。今回、走査するニードルスポットを試料面で面内方向に多重化し、データ取得の並列化による取得速度のさらなる向上に向けた要素技術の検討を行ったので、その結果を報告する。

結果：波長 1040 nm のフェムト秒パルスレーザー光を励起光源とした2光子励起レーザー顕微鏡をベースとして、液晶空間光変調器(LCOS-SLM)を用いて対物レンズ焦点に長焦点深度のニードル状励起スポットを形成した。従来は、このニードルスポット励起により生ずる蛍光信号に対して、多重化計算機合成ホログラムの原理[2,3]によって設計された変調波面を蛍光信号に重畳することで、試料の深さ情報を像面での面内方向の情報へと変換し、アレイ型検出器を用いて信号取得を行っている。本研究では、励起光に対するさらなる波面制御によって焦点でのニードルスポットの多重化を試み、これによる像面での蛍光像の多重化と、2次元検出器による並列データ取得の可能性を検討した。Fig. 1にニードルスポットの多重化による像面での蛍光信号の並列像形成を検証した結果を示す。カバーガラ

ス下に固定された凝集蛍光ビーズ試料（直径 200 nm）に対してニードルスポットを定点照射し、試料を光軸に沿って移動した場合の像面での面内方向シフト特性を検証した。Fig. 1(b)および1(c)での水平方向(H軸)が試料の深さ方向に対応しており、垂直方向(V軸)がニードルスポットの多重化方向に対応する。本実験では6重のニードルスポット照射に対して、像面において6段の蛍光像が並列に形成された[Fig. 1(c)]。この場合、水平方向の各段が物体面での異なるy座標での深さ情報に対応しており、それぞれの強度分布を解析することで、3次元画像を形成できることが期待される。本原理に基づく詳細な3画像形成特性については当日報告する。

参考文献 [1] Y. Kozawa and S. Sato, *Sci. Rep.*, **9** 11687 (2019). [2] Y. Kozawa *et al.*, *Biomed. Opt. Express* **13** 1702 (2022). [3] D. Kume *et al.*, *Opt. Express* **32** 7289 (2024).

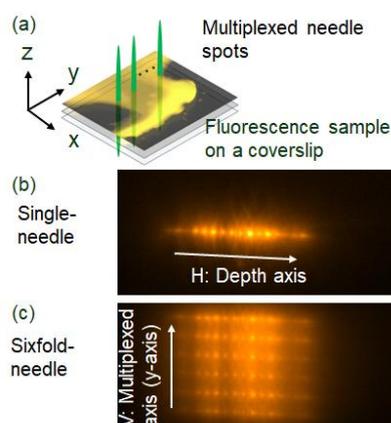


Fig. 1 (a) Conceptual diagram of multiplexed needle spots. The projected fluorescence images recorded while changing the axial position of a thin fluorescence sample under single- (b) and sixfold-needle spot (c) excitation.

NanoVNA を活用した安価な強磁性共鳴測定装置の開発と性能評価 Development and Performance Evaluation of a Low-Cost Ferromagnetic Resonance Measurement System Using NanoVNA

兵庫県大理¹, QST², 大阪公立大工³, 阪大レーザー研⁴

○(M1) 福永 怜央¹, (D3) 高橋 龍之介¹, 上野 哲朗²,

庄司 大希³, 戸川 欣彦³, 和達 大樹^{1,4}

Univ. of Hyogo¹, QST², Omu³, Osaka Univ.⁴

°R. Fukunaga¹, R. Takahashi¹, T. Ueno², Y. Togawa³, H. Shoji³, H. Wadati^{1,4}

E-mail: fukuosugcto1230@gmail.com

現在我々の生活には可視光、マイクロ波やX線といった電磁波が欠かせないものとなっている。磁性体のマイクロ波吸収現象として、強磁性共鳴(FMR: Ferromagnetic resonance)がある。FMR測定により、スピントロニクスデバイスの開発に重要な磁化ダイナミクスなどを理解することができる。

本研究では、このFMRを手軽かつ安価に観測することを目的とした。最近では、一度に広帯域のFMR測定を行うため、ベクトルネットワークアナライザ(VNA)が用いられているが、VNAが非常に高価な機器であるという問題がある。そこで今回、Amazonでも購入できるVNAであるNanoVNAという非常に安価な製品を用いたFMR測定装置の開発を行った。高周波誘電率の測定などNanoVNAの物性測定への応用は始まったばかりである[1]。

本研究でFMR測定を行った試料はGd₃GasO₁₂基板上のY₃Fe₅O₁₂薄膜であり、膜厚は約2μmである。Fig. 1にNanoVNAで測定したY₃Fe₅O₁₂薄膜の共鳴周波数のスペクトルを示す。磁場印加とともに高周波数側にシフトすることから、これは強磁性共鳴であることが確認できた。また、より強い磁場で高周波まで測定した結果とも一致したためNanoVNAをもちいたFMR測定を実現できた。講演では、3Dプリンターも用いた安価に抑えるための工夫も紹介したい。

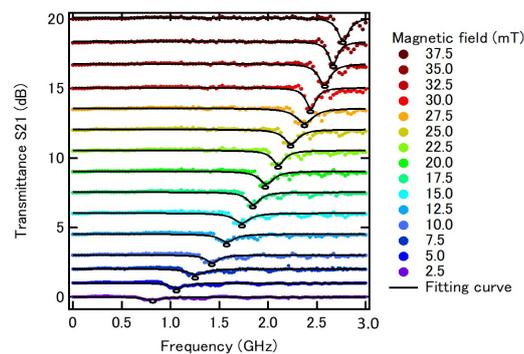


Fig. 1: FMR spectra of Y₃Fe₅O₁₂ thin films obtained by NanoVNA.

[1] A. Erkoreka and J. Martinez-Perdiguero, Rev. Sci. Instrum. **95**, 023903 (2024).

タイコグラフィカル位相回復におけるビームプロファイルの影響

The Impact of Beam Profile on Ptychographical Phase Retrieval

茨大院理工、(M1)前野 碧斗、(P)鵜野 克宏

Grad. Schl. of Sci. ad Eng., Ibaraki Univ., Aoto Maeno, Katsuhiko Uno

E-mail: 24nm648x@vc.ibaraki.ac.jp

1. はじめに

先行研究においては、ラゲールガウシアンビームを用いたタイコグラフィカル反復エンジンによる物体再生に関する研究が行われていた。本研究では、この結果の妥当性を検証することを目的とし、(p,l)の値をさらに大きくした場合においても再生精度が向上するか否かを詳細に検討した。

2. 理論

e-PIE と呼ばれるタイコグラフィカル反復エンジンのフローチャートを図1に示す(1)。これを繰り返して、n 回目の RMS 正規化エラー値 $E_o(n)$ がある値より小さくなる。または、位相回復の反復回数が上限に達するまで反復する。(2)

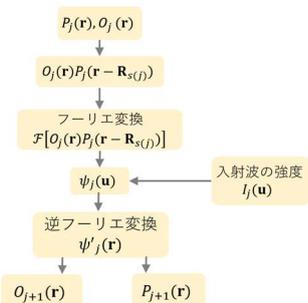


figure1 Flowchart of e-PIE

3. シミュレーション方法

ラゲールガウシアンビームは以下の式で示す。

$$P(r, \phi, z; p, l) = \left(\frac{\sqrt{2}r}{w}\right)^{|l|} L_p^{|l|} \left(\frac{2r^2}{w^2}\right) \exp(jl\phi) \left(\frac{w_0}{w}\right) \exp\left[-r^2\left(\frac{1}{r^2} - \frac{jk}{2R}\right) - j(2p + l + 1)\right]$$

次数 p と方位角方向の次数 l で形が決まる。ビームの照射間隔、半径、p と l の値を変えて、シミュ

レーションを行った。図2、3は再構成した物体の振幅と位相画像である。

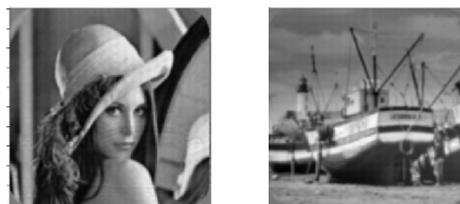


figure2 amplitude image figure3 phase image

4. 結果

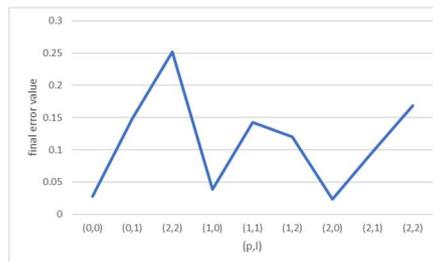


figure4 Final error value for each (p,l)

図4はある条件での(p,l)ごとの最終エラー値を示した図である。(p,l)=(2,2)までのまでの最終エラー値を検討した結果、l=0 のときエラー値が小さい傾向にあることを確認したが、(p,l)>(2,2)の範囲ではデータが不足しており、現在、検証中である。

5. 結論

本研究は、4つのビームパラメータによる最終エラー値の傾向を明らかにする試みである。現時点では l=0 の場合にエラー値が小さい傾向が示唆されており、今後の研究により、(p,l)>(2,2)の領域における傾向の詳細を解明する予定である。

参考文献

(1) F.Hue,J.M.Rondenberg,A.M.Maiden,P.A.Midgley, Ultramicroscopy,vol.111,issue8,p1117-1123(2011)
 (2) Ultramicroscopy,vol.109,issue10,pp1256-1262,2009

光駆動微小液滴ロボットの環境適応性

Environmental adaptability of optical driven microdroplet robot

慶大理工¹, 納谷ラボ², 北大電子研³ ◯納谷昌之^{1,2}, 白田真也¹, 椎名仁太郎¹, 清水望有¹三友秀之³, 居城邦治³, 齋木敏治¹Keio Univ.¹, Naya-Lab.², Hokkaido Univ.³◯Masayuki Naya^{1,2}, Shinya Hakuta¹, Jintaro Shiina, Mamoru Shimizu¹, Hideyuki Mitomo³,Kuniharu Ijro³, Toshiharu Saiki¹E-mail: masa@naya-lab.com

揮発性で低表面張力の液体（エタノール）と不揮発性で高表面張力の液体（PEG200）を混合した溶液を、ガラス表面に光熱変換層を形成した基板とガラス基板とで挟み、液体が架橋していない領域の光熱変換層にレーザ光を照射すると、局所的発熱（HS:ホットスポット）により液滴が発生する^[1]。われわれは、この液滴が、基板や照射するレーザ光の条件に応じて、あたかも生物のような挙動を示すことを見出している。

今回、我々は、光熱変換層として直径 40nm の金ナノ粒子（AuNP）を分散した基板とマイクロレンズアレイ (MLA) を用いた配列光照射光学系^[2]を用いて、環境が大きく変化するときの液滴の挙動を観測した。AuNP に波長 532nm のレーザ光が照射されると、プラズモン共鳴によって強く発熱する HS が生じる。AuNP の配列はランダムであるので、MLA によるレーザ光照射パターンとの相関は場所によって大きく異なる。したがって、基板上で配列光パターンを移動することで、液滴の発生環境（HS のパターン）は時事刻々と変化する。液滴発生の初期には、光スポットと AuNP の位置が重なった時にのみ液滴が発生し、光スポットの移動とともに点滅的な挙動を示した(Fig.1)。一方で、液滴が十分に発達し、複数液滴が一体となった後には、光スポットの移動とともに、レーザパターンと AuNP 分布の相関に応じて、アメーバのように体型を変化させて自身の生存を維持しようとするかのような挙動を示した(Fig.2)。この結果は、液滴が成長することで、複数の HS 間の流体ネットワークが形成され、並列情報処理を行いながら自分自身の生存確率を高く保つための前生物体的な挙動^[3]を行うようになるということを示唆している。

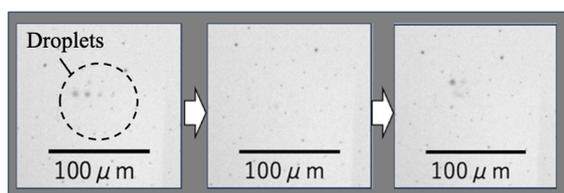


Fig.1 Droplets behavior in the early stages

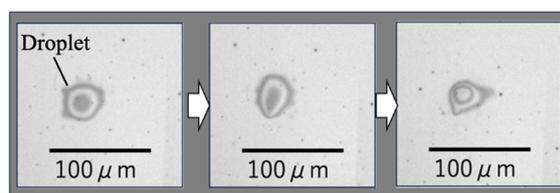


Fig.2 Droplet behavior after growth

本研究は、文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム」、「科研費学術変革研究(A)」、および「物質・デバイス領域共同研究拠点」の助成を受けている。

[1] Y. Takamatsu, et al., *Micromachines*, 14(7), (2023),1460

[2] 納谷昌之他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会(2024) 講演予稿集 17a-A32-3

[3] M. Egbert, et al., *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 53, (2023), 87-112

1/4 波長液晶製幾何学位相素子マスクを用いた転写露光法による幾何学位相素子形成

Fabrication of geometric phase element based on transfer exposure method using a quarter waveplate liquid crystal geometric phase element mask

長岡技大¹, 兵庫県立大², CREST, JST³, [○]野田 浩平^{1,3}, 藤田 雅也¹, 坂本 盛嗣^{1,3},
鈴木 雅人^{1,3}, 佐々木 友之^{1,3}, [○]川月 喜弘^{2,3}, 小野 浩司^{1,3}

Nagaoka Univ. of Tech.¹, Univ. of Hyogo², CREST, JST³, [○]Kohei Noda^{1,3}, Masaya Fujita¹,
Moritsugu Sakamoto^{1,3}, Masato Suzuki^{1,3}, Tomoyuki Sasaki^{1,3}, Nobuhiro Kawatsuki^{2,3}, Hiroshi Ono^{1,3}

E-mail: noda@konomi.nagaokaut.ac.jp

偏光感受性を有する光反応性液晶材料を用いることで、様々な光学異方性空間分布を持つ幾何学位相素子 (GPE) を作製することができる。GPE の作製手法として、偏光干渉露光法や偏光描画露光法が用いられている。しかしながら GPE の社会実装を考えたとき、素子の大面積化や量産性の向上が課題となる。我々は、紫外光に耐性のある液晶製幾何学位相素子マスク (GPEM) を原板とした転写露光法について先に報告した^[1]。転写露光法は大面積化や量産性に優れた加工手法であり、液晶製 GPEM を用いることで簡便に GPE のレプリカを加工できる。しかし、転写露光法では、GPEM の位相差のエラーがレプリカの特性に強く影響する。この問題を克服するために今回我々は、1/2 波長の位相差を持つ GPEM を用いた転写露光法を 1/4 波長位相差の GPEM マスクへと代替する手法を提案する。

Fig. 1(a)に位相差が $\lambda/2$ の GPEM を用いた転写露光光学系を示す。本光学系では、まず直線偏光を GPEM へと入射させ、発生する ± 1 次光を転写位置で互いに干渉させることで、GPEM の半周期の偏光パターンを形成する。本光学系の場合、GPEM の位相差が $\lambda/2$ からずれると 0 次光が発生し、転写位置での偏光方位や楕円率が線形でなくなる。一方で Fig. 1(b)は今回考案した位相差が $\lambda/4$ の GPEM を用いた転写露光光学系である。本光学系では円偏光を GPEM へと入射させる。GPEM からは 0 次光と+1 次回折光が 1:1 の強度比で発生し、これらを転写位置で干渉させて GPEM と同じ周期の偏光干渉パターンを形成する。本光学系の場合、GPEM の位相差が $\lambda/4$ からずれると 0 次光と+1 次回折光の強度比が 1:1 ではなくなるが、形成される偏光干渉パターンにゆがみは生じない。Figure 2 に Fig. 1(a)、(b)それぞれが転写露光位置に作る偏光干渉パターンについて干渉縞の格子ベクトル方向の位置 x における偏光方位角分布及び楕円率角分布の数値シミュレーション結果をプロットしたものである。位相差 $\lambda/2$ の GPEM においては、位相差がずれると偏光方位角の格子方向の変化が非線形となり、楕円率角に格子方向の変調が生じている。それに対し位相差 $\lambda/4$ の GPEM を用いた光学系においては偏光方位角の格子方向変化量が線形であり、楕円率も変動はするが、格子方向で一定であり均一な偏光露光が可能であることを示している。

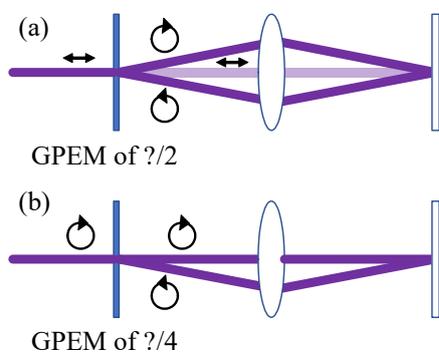


Fig.1 Schematic diagram of transfer exposure method using GPEM

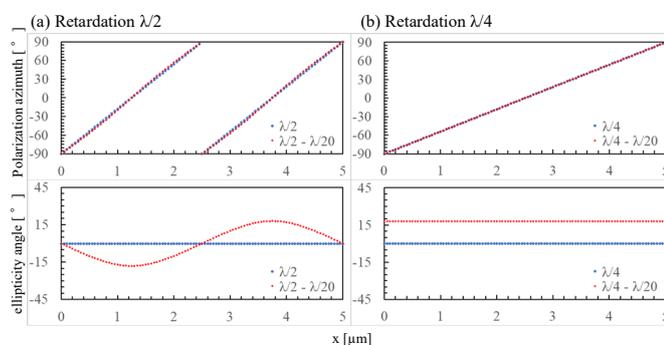


Fig. 2 Polarization azimuth angle and ellipticity angle of interference fringes on the exposed surface

参考文献 [1]藤田他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 22a-1BN-7 (2024).

酸化スズで表面改質した銀ナノ薄膜の表面プラズモン共鳴特性 Surface Plasmon Resonance of Ag Nanofilm Surface Modified with SnO₂ Layer

静岡大工¹, ◯(M1)鈴木 麗人¹, 杉田 篤史¹, 細見 圭¹

Shizuoka Univ.¹, ◯Reito Suzuki¹, Atsushi Sugita¹, Kei Hosomi¹

E-mail: suzuki.reito.20@shizuoka.ac.jp

金、銀、銅等の貴金属ナノ材料は、優れたプラズモニック材料として長年研究されてきた。銀は誘電率の虚部の値が小さく、電磁波のエネルギー損失が小さいため、貴金属の中で最も理想的なプラズモン材料の1つである¹。しかし、銀(Ag)は空气中で自然に硫化反応や炭化水素との吸着反応し、表面プラズモン(SP)特性を失うため、長期的利用は現実的ではない²。本研究では銀表面に酸化スズ(SnO₂)層を被覆し、表面保護することで、この課題の解決に挑戦した。

Ag ナノ薄膜は、真空蒸着法によって石英ガラス基板上に成長した。Ag ナノ薄膜の厚さは40 nm とした。SnO₂ 層は Na₂SnO₃ 溶液中で成長した。この Ag ナノ薄膜表面に SnO₂ 層を形成した薄膜試料を SnO₂/Ag 薄膜構造と呼ぶ。比較のために SnO₂ 層を成長していない Ag 薄膜構造も用意した。SP 共鳴特性はクレッチマン配置での反射率測定法によって評価した。

Fig. 1 (a) 試料作製直後の SnO₂/Ag 及び Ag 薄膜構造の反射スペクトルを示す。いずれの構造も 46.2°に SP 共鳴による反射ディップを生じた。二つの試料においてディップを生じる角度がよく一致したことは、SnO₂ 層が SP 共鳴特性に影響を与えないほど薄かったことによるものと考察した。

Fig. 1 (b)に試料製作から1、4、8、19日後の反射スペクトルを示す。試料製作翌日と4日目のスペクトル形状はほとんど一致していた。この結果より、SnO₂ 層を導入することによって Ag 表面の SP 特性の変化を抑制することがで

きた。しかし、製作から8日以上経過すると SnO₂/Ag 薄膜構造のディップ位置は高角側へシフトし、Ag 表面の保護効果は短期的なものであった。

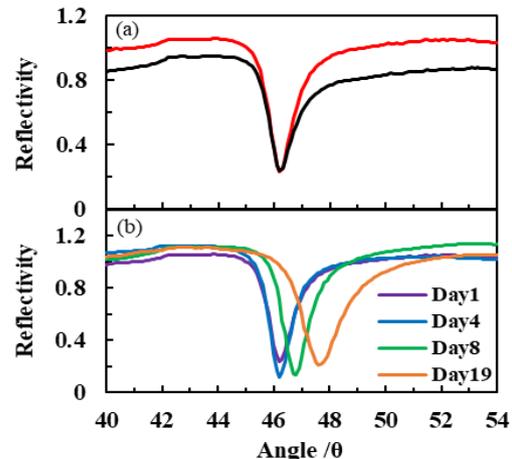


Fig. 1 (a) Reflection spectra of SnO₂/Ag (red) and Ag (black curves) thin film in the as-prepared state. (b) Reflection spectra of SnO₂/Ag structures measured at 1, 4, 8, and 19 days after sample preparation.

光電子分光により SnO₂/Ag 薄膜構造の表面状態を分析したところ、SnO₂ 層を成長していることを確認した。一方、原子間力顕微鏡観測を行ったところ、試料作製直後は数ナノレベルで平坦だった表面が数日後には 10 nm 程度の凹凸が生じていることを確認した。これは、Ag 表面で銀クラスターの移動を生じたことによるものと考察した。この移動により SnO₂ 保護膜に亀裂を生じ、SP 特性の抑制が短期的なものになったと解釈した。

1) K. M. McPeak et al., ACS Photonics **2** (2015) 326.

2) M. D. McMahon et al., Appl. Phys. B **80** (2005) 915.

Fabry-Perot 型光共振器における鏡の表面形状による固有モード制御

Control of eigenmodes by surface topography of mirror in Fabry-Perot resonator

横河電機(株)¹, [○]渡邊 芙美枝¹, 鈴木 雄太¹, 手塚 信一郎¹

Yokogawa Electric Corporation¹, [○]Fumie Watanabe¹, Yuta Suzuki¹, Shin-ichiro Tezuka¹

E-mail: Fumie.Watanabe@yokogawa.com

Fabry-Perot 型光共振器の解析手法の 1 つに、Fox-Li 法[1, 2]があるが、スカラー波近似を用いるため、偏光を含めた光共振器の固有モード計算はできなかつた。我々はこれまでに、偏光を含めた光共振器の固有モード解析方法を提案し、任意の鏡形状を持つファブリーペロー光共振器の固有モードと、回折損失を高次モードまで一度に計算した[3, 4]。通常、最低次の固有モードは TEM00 となるが、高次モードである TEM10 や TEM01 を選択的に最低次の固有モードに制御することができると、光共振器としての活用の幅が広がるのが期待できる。そこで本研究では、共振器を構成する 2 つの鏡のうち、1 つの鏡の表面に段差構造を持たせることで、最低次のモードを TEM10 や TEM01 に制御することを提案する。

図 1 はモデルである。光共振器は鏡 M_1 と鏡 M_2 から成り、 a は鏡の大きさ、 b は共振器長である。 M_2 は表面に段差構造を有し、 h は段差の大きさである。図 2 の(a-1)と(b-1)は、 $a = 5\lambda$ 、 $b = 10\lambda$ 、 $h = \lambda/4$ (λ は光の波長)の凹面鏡における、 M_2 に段差構造がないときと、あるときの、最低次の固有モードである。また、図 2 の(a-2)と(b-2)は M_2 表面の正面図である。正面図における緑色の段は低く、オレンジ色の段は高い。これより、段差構造を導入することで、最低次の固有モードが TEM10(図 2(b-1))となった。これは、段差構造によって、TEM00 の固有値が大幅に小さくなる一方で、TEM10 の固有値はほぼ変わらなかったためである。講演では、段差構造を増やしたときの計算結果や、段差の高さ依存性について発表する。

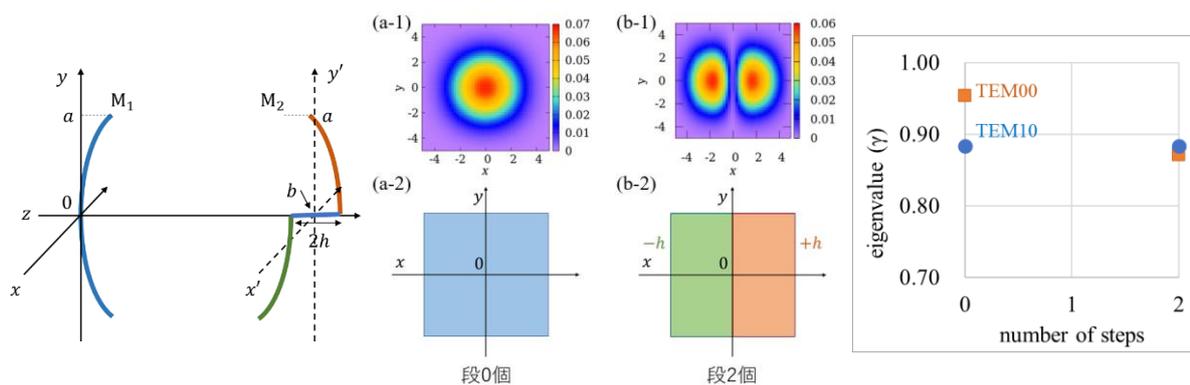


図 1 : 光共振器モデル

図 2 : M_2 表面正面図と固有モード

図 3 : 段数と固有モード

[1] A. Fox and T. Li, Bell System Technical Journal, (1961).

[2] C. Kurokawa, Y. Suzuki, Y. Kitagawa, S. Tezuka, OSA Continuum 4, 3129-3138 (2021).

[3] Yuta Suzuki and Shin-ichiro Tezuka, Proceedings of the ODF'22, paper P_OTH_37 (2022).

[4] Fumie Watanabe, Yuta Suzuki, Shin-ichiro Tezuka, The 71th JSAP, 24p-13P-13 (2024).

プラズマ加工技術を利用した電気駆動用ランダム構造の作製

Fabrication of random structures for electric drive using plasma processing technology

北海道大¹, 東大², 名大³, 核融合研⁴ ○藤原英樹¹, Shi Quan², 梶田信², 大野哲靖³,
田中宏彦³, 上原日和⁴

Hokkai-Gakuen Univ.¹, Tokyo Univ.², Nagoya Univ.³, NIFS⁴, °Hideki Fujiwara¹, Quan Shi²,
Shin Kajita², Noriyasu Ohno³, Hirohiko Tanaka³, Hiyori Uehara⁴

E-mail: h-fujiwara@hgu.jp

光多重散乱に基づき動作するランダムレーザーは、強度ムラの無い高強度光源としてセンサーやイメージング分野などへの光源応用が期待されているが[1]、電気駆動化が応用上の課題となっている。前回の発表では、ZnO 粒子膜を水熱合成した p 型 GaN 基板に透明電極基板を圧着する単純な方法で構造を作製し、電圧を印加することで紫外-青色発光を示すことを報告した[2,3]。本発表では、より単純な構造として、ZnO 粒子膜ランダム構造の代わりに、アルゴンプラズマ・堆積エッチング法により表面に凹凸構造を形成した p 型 GaN 基板を直接透明電極基板に圧着する構造を提案し、その電気特性や発光特性を測定した結果について報告する。

実験では、名古屋大学の材料照射用小型ダイバータプラズマ模擬実験装置 Co-NAGDIS を使用し、外部から不純物 (Mo) を堆積させながら、Ar プラズマを市販の p 型 GaN 基板に照射した。この時、不純物である Mo がランダムに GaN 基板表面に堆積し、マスクとして働くため、プラズマエッチングによりランダムな表面凹凸構造が形成される[3,4]。この試料に市販の透明電極基板 (FTO 基板) を圧着し、電源に接続した。また、試作した GaN 基板の光学特性を確認するため、UV パルスレーザーで光学励起を行い、表面凹凸によるランダムレーザー発振の確認を行なった。

図 1(a, b) は作製した試料およびその電気駆動発光の写真であり、FTO 基板と GaN 基板のエッチング部分が重なっている箇所において点状の複数の紫外発光スポットが確認できる。同じ試料の電流-電圧 (I-V) 特性を測定した結果が図 1(c) である。若干高めの 5 V 付近で立ち上がりを示す非線形な挙動が確認でき、試作したエッチング GaN/FTO 界面で電流が流れることを確認した。

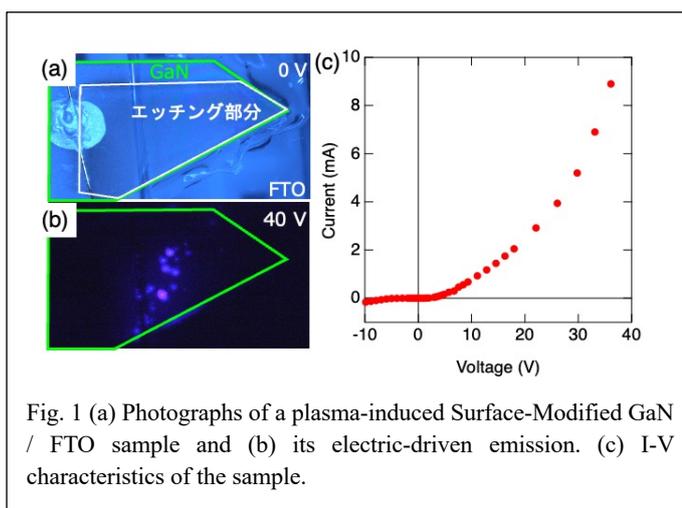


Fig. 1 (a) Photographs of a plasma-induced Surface-Modified GaN / FTO sample and (b) its electric-driven emission. (c) I-V characteristics of the sample.

[1] B. Redding *et al.*, Nat. Photon. **6**, 355 (2012), [2] 藤原他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 16p-A32-10 (2024), [3] Q. Shi *et al.*, ACS Appl. Opt. Mater. **1**, 412 (2023), [4] Q. Shi *et al.*, Langmuir **40**, 12437 (2024).

オンチップマイクロ共振器による分子振動の制御

Controlling molecular vibrational modes with on-chip microcavities

東京大学¹, 量研機構², 鄭州大学³, 武漢大学⁴, カリフォルニア大学⁵ ○(M2) 関根 悠介¹, 董俊余¹, 北濱 康孝¹, 肖 廷輝^{1,2,3}, 合田 圭介^{1,2,4,5}

Univ. of Tokyo¹, QST², Zhengzhou Univ.³, Wuhan Univ.⁴, Univ. of California⁵, Yusuke Sekine¹, Jun-Yu Dong¹, Yasutaka Kitahama¹, Ting-Hui Xiao^{1,2,3}, Keisuke Goda^{1,2,4,5}

E-mail: sekine-yusuke570@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

振動強結合 (VSC) は、閉じ込められた光による共鳴準位と分子の振動準位とが相互作用を起こして新たな二つの準位に分裂する現象である (Fig. 1)。この現象下では、分子の物理的・化学的性質が変化することが多くの研究で実証されている。VSC を起こすには、入射光を数マイクロメートルサイズの空間に閉じ込めることが必要だが、それには、ファブリーペロー共振器が用いられてきた。しかし、これは共振器全体の大きさ、そして共振器の制御に問題を抱えており、それゆえこれまで VSC が実際の化学システムに応用されることはなかった。本研究では、VSC の応用面における困難を突破しうる小型かつ容易に制御可能な共振器を作製し、実際に VSC が観測されたことを報告する。

本研究では、微細加工技術を用いて、シリコンチップの上にマイクロメートルサイズの回折格子で構成される共振器を作製し、原子間力顕微鏡 (AFM) で表面を観察した (Fig. 2a)。次に、このチップにポリメタクリル酸メチル (PMMA) を塗布したものを試料として、反射型 FTIR 測定装置を用いて、試料の入射光の吸収による反射光の減衰を様々な入射光角度で測定することによって振動強結合の観測を行った。結果は Fig. 2b に示されている。チップに帰属される吸収波数 (共鳴準位) は角度に依存するが、入射光角度 75 度付近で PMMA 分子のカルボニル吸収に対応する 1730 cm^{-1} 前後に新たな二つの異なる吸収が観測された。これは振動強結合に見られる特有の現象で、二つの吸収が交差する波数前後に相互作用で分裂した新たな二つの準位が現れたことを示している。このように、本研究で作製されたオンチップ回折格子型共振器によって、振動強結合を観測することができた。

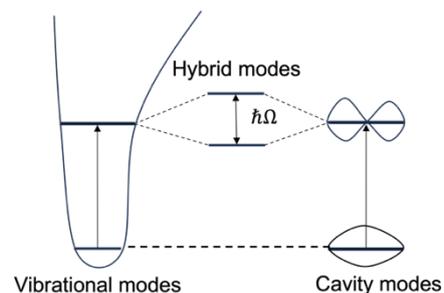


Fig. 1 Schematic of vibrational strong coupling (VSC).

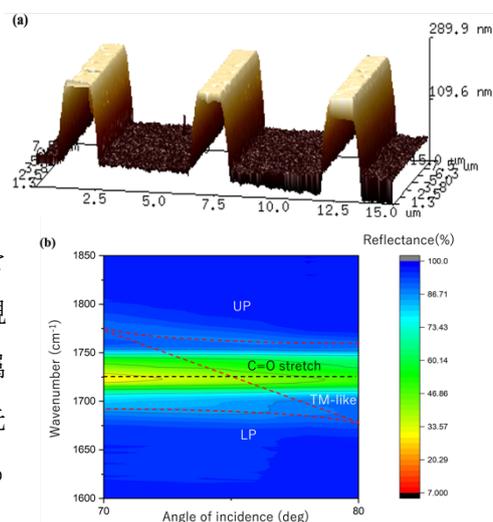


Fig. 2 The design of microcavities and dispersion plots of the optical cavity with gratings. (a) The AFM image of the microcavities. (b) The VSC between the C=O stretching mode and the transverse magnetic (TM) mode. The red dotted line and curves indicate the absorption by the TM mode and the split modes, respectively.

時間変調磁性メタ材料による非対称な周波数上方/下方変換

Asymmetrical Frequency Up-/Down-conversion by Time-varying Magnetic Metamaterials

東北大高教機構¹, 東北大学際研², 秋田大院理工³, 東北大多元研⁴, 東北大 CSIS⁵, 東北大院理⁶

○ 児玉 俊之¹, 千葉 貴裕², 菊池 伸明³, 岡本 聡^{4,5}, 大野 誠吾⁶, 富田 知志^{1,6}

IEHE,¹ FRIS, Tohoku Univ.², Akita Univ.³, IMRAM,⁴ CSIS,⁵ Dept. of Physics, Tohoku Univ.⁶

○ T. Kodama¹, T. Chiba², N. Kikuchi³, S. Okamoto^{4,5}, S. Ohno⁶, S. Tomita^{1,6}

E-mail: tkodama@tohoku.ac.jp

負屈折率媒質や隠れ蓑のように誘電率(ϵ)や透磁率(μ)を空間制御するメタ材料に対して、 ϵ や μ を時間領域で制御する時間変調メタ材料が関心を集めている。時間変調メタ材料では、 ϵ や μ の変調周波数で入射電磁波の周波数が上方と下方に変換される。これまで、 ϵ の時間変化による可視-近赤外光の周波数変換が観測されてきた [1]。一方我々は、 μ の時間変調に取り組んでいる [2]。前回、 μ 時間変調メタ材料によるマイクロ波の周波数変換を初めて実証した [3]。今回は μ 時間変調メタ材料に見られる、上方/下方変換の非対称性について報告する。

Fig. 1(a)と(b)に本実験で作製した μ 時間変調メタ材料の光学顕微鏡像を示す。非ドーブシリコン基板に厚さ 200 nm の金 (Au) の蛇行線路 (橙色)、厚さ 200 nm のガラス (SiO₂) のスペーサ (青色)、厚さ 200 nm の Au のコプレーナ伝送線路 (赤色) をスパッタリング成膜とフォトリソグラフィーで作製する。最後に厚さ 250 nm の強磁性体 Ni₈₀Fe₂₀ を蛇行線路とコプレーナ伝送線路が交差する 5 μ m \times 5 μ m の領域に成膜する (Fig.1(b) 緑色)。

電磁石で 24.4 mT の直流磁場 H_{dc} を $-x$ 方向に印加する。蛇行線路に周波数 f_m の変調波を印加する。4.0 GHz の搬送波をコプレーナ伝送線路に流し、スペクトラムアナライザで測定した透過スペクトルを Fig.1 (c) に示す。 $f_m = 0.4$ GHz のとき、 μ 時間変調メタ材料によって 4.0 GHz の搬送波が変換され、3.6 GHz に下方変換波が、4.4 GHz に上方変換波が見られる。一方、 $f_m = 0.8$ GHz から 1.2 GHz では、上方変換波のみが見られる。このような非対称な周波数変換には、Ni₈₀Fe₂₀ の非線形スピンドYNAMIXが寄与していると考えられる。

本研究は JST-CREST(JPMJCR 2102) によって支援されている。東北大の金森義明教授との有益な議論に感謝する。[1] Y. Zhou et al., Nat. Commun. 11, 1 (2020). [2] T. Kodama et al., PRAppl. 19, 044080 (2023); PRB 109, 214419 (2024). [3] T. Kodama et al., in preparation; 児玉他、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 18a-A33-8.

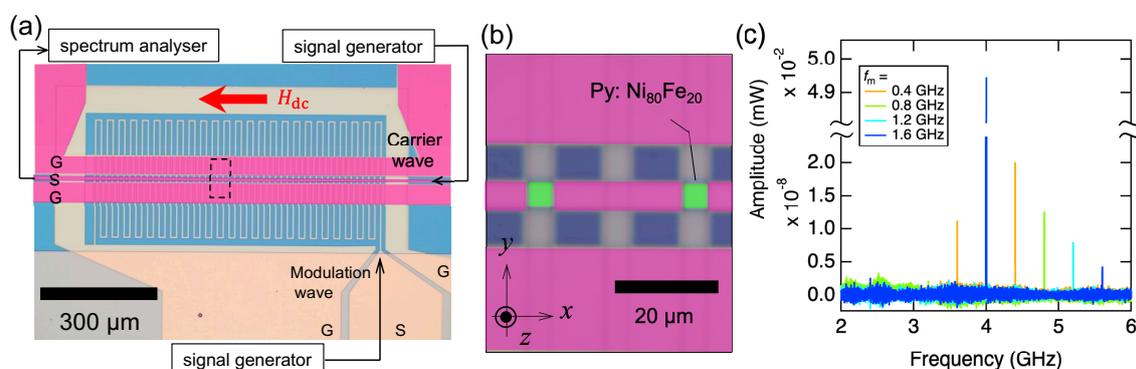


Fig 1: (a) A photograph of the metamaterial device and (b) an enlarged view. (c) Microwave frequency conversion measurement results at various modulation frequencies.

ディップイン 3 次元レーザー描画を用いた 高屈折率紫外線硬化樹脂によるフォトニックワイヤボンディング Photonic wire bonding using high refractive index UV curable resin for dip-in 3D laser lithography

○向 立昕¹, 岡田 祥², 西浦 克典³, 四釜 拓生³, 永松 周¹, 前川永遠¹, 大塚 健祐³, 雨宮 智宏¹
東京科学大学¹ 情報通信研究機構² 三井化学株式会社³

Lixin Xiang¹, Sho Okada², Katsunori Nishiura³, Takuo Shikama³, Shu Nagamatsu¹, Towa Maekawa¹,
Kensuke Otsuka³, Tomohiro Amemiya¹

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Institute of Science Tokyo, Tokyo 152-8552, Japan.

²Photonic ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Tokyo 184-8795, Japan.

³Innovative Solutions Center for Information & Communication Technology, R&D Center, Mitsui Chemicals, Inc., Chiba 299-0265, Japan

E-mail: xiang.lx@n.titech.ac.jp

1. はじめに

フェムト秒レーザーによる 3 次元光造形を基盤とするフォトニックワイヤボンディング (PWB) 技術は、後工程でデバイスの任意の箇所に三次元の樹脂細線を形成できることから、各種光デバイスを高精細なアラインメントなしにレンズフリーで接続可能となる [1]。このようにして形成された樹脂細線において強い光閉じ込めを実現することは、接続対象となる光デバイス間の集積性を高めることに繋がるため、それに適した光硬化性樹脂の開発が望まれる。そのような背景のもと、本研究では、光通信帯域において高屈折率かつ低損失な 3 次元レーザー描画用の光硬化性樹脂を開発し [2]、その特性を評価した。以下、詳細を述べる。

2. 開発した紫外線硬化樹脂と伝搬特性評価

開発した紫外線硬化樹脂およびその光学特性を、Fig. 1 に示す。硫黄含有のアクリル酸チオエステル化合物およびジメタクリレート系モノマーを適切な割合で混合することで、ディップインレーザー描画 (DiLL) 用途としては世界最高の屈折率 1.65、アッペ数 31 を有する材料を開発することに成功した。併せて、光硬化性化合物に対する光重合開始剤の含有率を調整することで、Yb:KGW フェムト秒レーザー (75 MHz, 515 nm) を用いたショットテストにおいて、解像度は 200 nm 程度になることを確認した。

次に、開発した紫外線硬化樹脂を PWB 技術として光回路に適用した際の性能評価を行うため、グレーティングカップラ (GC) を有するシリコン導波路に対して 3 次元樹脂細線を形成した。Figs. 2(a)(b) に、本研究で用いた素子構造を示す (各パ

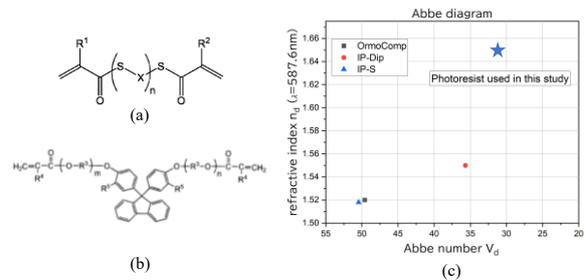


Fig. 1 (a)(b) Chemical formulas of components in developed UV curable resin. (c) Optical parameters of several photoresists for dip-in laser lithography.

ラメータは FDTD 解析により GC と樹脂細線の最も高い結合効率が得られるように設定した)。Yb:KGW フェムト秒レーザーによる DiLL を用いて GC 間を樹脂細線により接続し (Fig. 2(c))、伝搬特性を測定した結果を Fig. 3 に示す。これにより、波長 1600 nm において、GC と樹脂細線の結合損失は 8.2dB と見積もられた。

謝辞 本研究は、JST CREST (JPMJCR24R1), JST ASPIRE (23837157), ARIM (JPMXP1222IT0025) の援助で行われた。

参考文献

- [1] S. J. Chowdhury *et al.*, *Opt. Express* **32**, 3085 (2024).
- [2] K. Otsuka, T. Urakami, T. Amemiya, *Japanese Patent Application* No. 2024-056442 & No. 2024-056451 (2024).

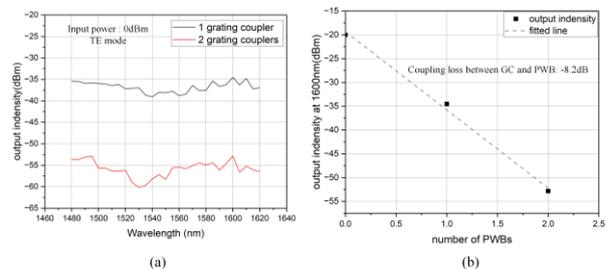


Fig. 3 (a) Wavelength dependence of grating coupler with PWB. (b) Coupling loss estimation between GC and PWB.

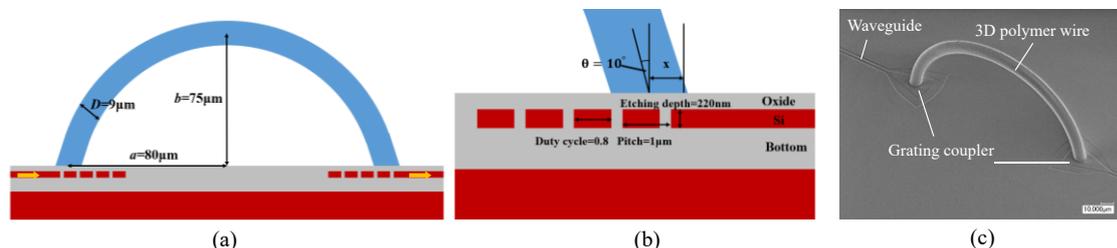


Fig. 2 (a)(b) Schematic view of grating couplers and a photonic wire used in this study. (c) Scanning electron microscope image of the device.