

第 59 回 応用物理学会北海道支部 第 20 回 日本光学会北海道支部 合同学術講演会予稿

B 会場 (B31 講義室)

B - 1 1 月 6 日 (土) 10:30 ~ 12:00 座長 : 山根 啓作 (北大工)

- B-1-1 超音波ナノトランスデューサによる GHz 単一表面音響波パルスの生成と検出★
○西山 翔¹, 友田 基信¹, V. E. Gusev², Oliver B. Wright¹, 松田 理¹
(北大工¹, ルマン大 (仏)²)
- B-1-2 LCOS Wave Shaper の高解像度化に向けた Pixel Shift-based Dual-phase Modulation Method
○王 江漣¹, 岡本 淳¹, 後藤 優太², 富田 章久¹
(北大情報科学研究院¹, 国立研究開発法人情報通信研究機構²)
- B-1-3 体積ホログラムと空間光変調器を用いたモード分割多重信号の再構成可能なモード交換 ★
○片桐 晟博, 岡本 淳, 富田 章久
(北海道大学 大学院情報科学院)
- B-1-4 電荷ガラス物質 θ -(BEDT-TTF)₂CsCo(SCN)₄ における光誘起キャリアダイナミクス ★
○和田 侑万¹, 土屋 聡¹, 谷口 弘三², 戸田 泰則¹
(北大院工¹, 埼玉大理工²)
- B-1-5 4f 波形整形器による分散コヒーレントブリルアン散乱分光法の高感度化 ★
○奥山 亮, 石島 歩, 三上 秀治
(北海道大学工学部)
- B-1-6 チャープパルス位相シフトデジタルホログラフイーによる複数の異なる時間における画像の同時取得
○福田 渉, 今城 秀, 窪田 駿二, 唐澤 直樹
(公立千歳科学技術大学)

超音波ナノトランスデューサによる GHz 単一表面音響波パルスの生成と検出 Generation and detection of GHz single surface acoustic wave pulses by ultrasonic nanotransducers

○(M2)西山 翔¹, 友田 基信¹, V. E. Gusev², Oliver B. Wright¹, 松田 理¹

¹北大工, ²ルマン大 (仏)

○Sho Nishiyama¹, Motonobu Tomoda¹, Vitalyi E. Gusev², Oliver B. Wright¹, Osamu Matsuda¹

¹Hokkaido Univ., ²Le Mans Université.

超音波トランスデューサは、超音波と電気エネルギーの変換に用いられる装置で、科学や産業、医療などの様々な分野で利用されている。電磁波や超音波などの波動を使った測定では、その波長が短ければ短いほど空間分解能が向上する。これは、表面音響波(SAW: Surface Acoustic Wave)でも同様である。短波長 SAW は、材料表面や内部の微小な欠陥や振動などを高い解像度で検出できるため、非破壊検査やセンサなどに応用されている。

SAW の発生、検出には、櫛型電極 (IDT : Interdigital Transducer) を用いる方法が知られているが、この方法では周波数帯域が狭く、広帯域かつ短波長の SAW を作るためには工夫が必要である。より短波長の超音波トランスデューサ実現の手法として、超短パルスレーザーとナノ構造とを用いる方法が注目されている。例えば、金属ナノ構造のような人工的に作製した光吸収体を用いることで、超音波の波源となる空間を制御し、より短波長を励起することが試みられている。[1] この先行研究では、ピコ秒の光パルスを金ナノワイヤ / 石英ガラス基板の試料に照射することで、平面波状の GHz 帯かつ広帯域な SAW パルスの生成を目指した。しかし、金と石英ガラスとの大きな音響インピーダンス差によりナノワイヤ構造が共振器のように働き、特定周波数の SAW が強く生成されたため広帯域な SAW パルスは得られなかった。

本研究では、一対のナノワイヤからなる超音波トランスデューサを提案し、実際に作製した構造の特性を調べる。トランスデューサ材料としては、石英ガラスの音響インピーダンスと近い金属であるアルミニウムを採用した。試料は、石英ガラス基板の上に、幅 $0.1 \mu\text{m}$ のアルミニウムナノワイヤを $5.0 \mu\text{m}$ と $10.0 \mu\text{m}$ の間隔で配置した。(図 1) 写真では、線幅が $0.1 \mu\text{m}$ より太く見えるが、レーザー露光時のオーバードーズによって線幅が増大していることが考えられる。なお、ドーズ量の小さい試料も作製しており、こちらは所望の線幅になっていると期待している。これらを励起源および検出器として利用することで GHz 帯の高周波数かつ広帯域の超音波パルスの生成・検出を目指した実験を予定している。

[1] Y. Imade et al., Nano Lett. 21, 6261–6267 (2021)

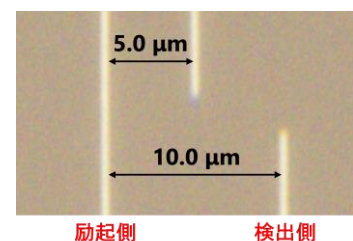


図 1: 作製した構造を光学顕微鏡で撮影した写真。長さ $100 \mu\text{m}$ 、幅 $0.1 \mu\text{m}$ (設計値) のナノワイヤが $5.0 \mu\text{m}$ と $10.0 \mu\text{m}$ の間隔で配置されている。左が励起側 (送信用)、右が検出側 (受信用) である。

LCOS Wave Shaper の高解像度化に向けた Pixel Shift-based Dual-phase Modulation Method

¹北海道大学 大学院情報科学院 ²国立研究開発法人情報通信研究機構
王 江漣¹, 岡本 淳¹, 後藤 優太², 富田 章久¹

1. はじめに

Liquid crystal on silicon based wave shaper (LCOS wave shaper)[1]は、回折格子による分光と LCOS 型空間光変調器(SLM)による波長ごとの位相変調によって光パルスを任意に整形することが可能であり、光通信分野において光信号の波形補償やモード・波長分散補償へ応用される[2]. より高精度な波形補償やモード・波長分散補償には、位相変調における高解像度化が求められる。そこで、本研究では、DPM(Dual Phase Modulation)法[3]に基づき、片方の SLM の位相変調パターンを 1/2 ピクセルずらす Pixel Shift-based DPM 法を提案する。本稿では、提案手法の基本原理を示した後、提案手法によって、位相変調パターンの解像度が 2 倍に向上し、高い位相変調性能を維持したまま事を数値解析により示す。

2. 本手法の原理

図 1 に DPM 法を示す。DPM は、2 つの SLM によって位相変調された光が干渉することで、位相と強度の両方を変調する[3]。まず、入射光をビームスプリッタ(BS)で二光路に分岐する。次に、それぞれの分岐したビームに 2 つの SLM を用いて異なる位相変調を施す。その後、位相変調された光は再び BS によって合波する。この時、2 つの位相変調された光の干渉により強度変調が生じ、SLM の位相変調を適当に調整することで、所望の複素振幅を得られる。

Pixel Shift-based DPM 法では、片方の SLM によって表される位相パターンを 1/2 ピクセルずらすことで 2 倍の解像度の複素振幅像を生成できる。所望の複素振幅を $A(x, y) \exp[i\varphi(x, y)]$ とすると、2 台の位相変調 SLM に表示するパターン $\theta_1(x - \Delta x/2, y)$ 及び $\theta_2(x + \Delta x/2, y)$ は、それぞれ、以下の関係を満たす。

$$\theta_1(x - \Delta x, y) = \varphi(x, y) + \cos^{-1}[A(x, y) / 2] \quad (1)$$

$$\theta_2(x + \Delta x, y) = \varphi(x, y) - \cos^{-1}[A(x, y) / 2] \quad (2)$$

ここで、 Δx は SLM の x 軸のピクセルサイズである。2 つの SLM の変調パターンが重ね合わされると、対応する 2 つの異なる値が生成され、2 倍の解像度の複素振幅像を生成できる。

3. 数値解析

Pixel Shift-based DPM 法により生成した複素振幅像を数値解析によって評価する。従来手法と提案手法における所望の位相変調を図 2(a)

と図 3(a)に示すように、0~ 2π の階段パターン、ピクセル数はそれぞれ 256×256 ピクセルおよび 512×256 ピクセルである。図 2(b),(c)と図 3(b),(c)は、それぞれ従来手法と提案手法における SLM1 と SLM2 に表示する画像である。再生像の品質を評価するには、次のように定義される信号対雑音比 (SNR) を使用する。ここで、 N_{dx} と N_{dy} はそれぞれピクセルの数、 $f(x, y)$ は所望の位相画像、 $g(x, y)$ は再生した位相画像である。

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{x=1}^{N_{dx}} \sum_{y=1}^{N_{dy}} f(x, y)^2}{\sum_{x=1}^{N_{dx}} \sum_{y=1}^{N_{dy}} \{f(x, y)^2 - g(x, y)^2\}} \quad (3)$$

再生像は、従来手法で、図 2(d)のように、SNR が 33.68 dB であった。一方、提案手法で、図 3(d)のように、SNR は 31.64 dB で、従来手法と同様の位相変調性能を維持しつつ、再生像のピクセル数を従来の 2 倍にできることが分かった。

4. 結論

本稿では、LCOS wave shaper の高解像度化にむけて、片方の SLM の位相変調パターンを 1/2 ピクセルずらす Pixel Shift-based DPM 法を提案した。数値解析により、提案手法は位相変調性能を維持したまま 2 倍の解像度の位相変調が得られることを示した。今後は、実験によって本手法の有効性を実証する。

本研究は JSPS 科研費 JP22K04099 の助成を受けたものです。

参考文献

1. J. Schröder, *et al.*, OECC2012, pp. 859-860, 2012.
2. Yuta Goto *et al.*, vol. 122, no. 379, OCS2022-83, pp. 68-72.
3. A. Shibukawa *et al.*, Opt. Express, 22(10), 11918-11929 (2014).

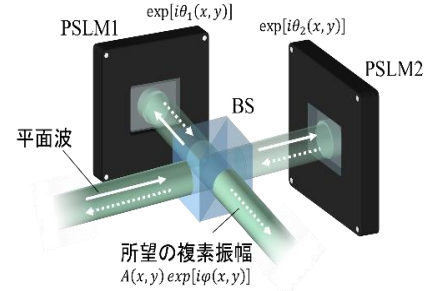


図 1 DPM の構成

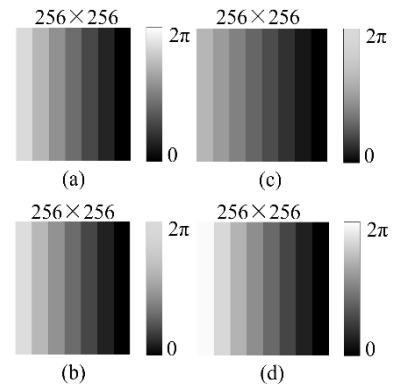


図 2 従来手法の結果. (a) 所望の位相変調. (b) SLM1 の表示画像. (c) SLM2 の表示画像. (d) 再生した画像(SNR=33.68 dB)

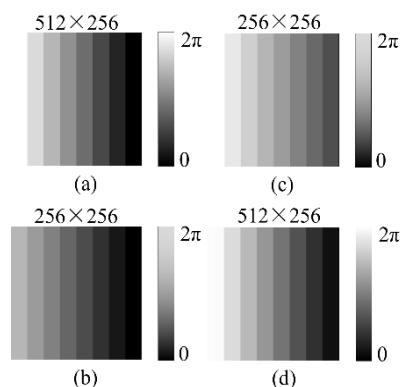


図 3 提案手法の結果. (a) 所望の位相変調. (b) SLM1 の表示画像. (c) SLM2 の表示画像. (d) 再生した画像(SNR=31.64 dB)

体積ホログラムと空間光変調器を用いた モード分割多重信号の再構成可能なモード交換

¹北海道大学 大学院情報科学院

片桐 晟博¹, 岡本 淳¹, 富田 章久¹

1. はじめに

光通信の伝送容量拡大のため、モード分割多重(MDM)技術の研究が進められている。MDM 伝送の実現には複数モードに対応した光信号処理技術が必要となり、その一つがモード交換技術である。また、任意の信号のモードを交換する機能と、交換しないままパスする機能を選択することが出来る、再構成可能なモード交換器の実現が望まれる。再構成可能であることで、静的なモード交換器に比べて更なる MDM 通信網の柔軟性向上が期待できる。そこで、体積ホログラムを用いたモード合分波器(VHDM)[1]と空間光変調器(SLM)を用いた再構成可能なモード交換手法を提案した。また、提案するモード交換の光学系を示し、数値解析によって提案した系で信号光の導波モードを変換できることを示した。本研究では、VHDM の回折効率を最大化するために VHDM の作成の改善を図り、その数値解析結果を報告する。

2. VHDM による再構成可能なモード交換

Fig.1 に今回提案するモード交換手法の概念図を示す。また、Fig.2 に VHDM の動作の概念図を示す。まず、MDM 信号が FMF1 からモード分波器として動作する VHDM1 へ照射される。Fig.2(b)のように、信号光は予め記録されたそのモードごとに異なる角度で回折し、基本モードに変換されて空間的に分離される。そのため各信号は SLM1 上で、信号のモードごとに異なる波面位置を取る。ここで、Fig.1 に示すように VHDM1 で分離された信号光の角度を SLM1 で変更し、SLM2 面において波面位置が交換されるような位相変調を行う。波面位置が交換されることによって、レンズを介し VHDM2 に入射する角度が交換される。また、VHDM は再生過程の逆過程を辿ることによりモード合波器として動作し、基本モード光を入射角度に対応したモードの光へ復調することが可能である。Fig.1 において VHDM2 は合波器として動作している。ここで、VHDM2 へ入射する角度が交換されているため信号のモードは VHDM2 での合波後に交換される。以上の動作により、VHDM によるモード交換が可能となる。また、SLM1 での変調を変更し、SLM1 と SLM2 で波面位置を交換せず保持することにより、2 信号のモードを交換しない動作を選択することも可能である。したがって、再構成可能なモード交換を実現することができる。

3. 数値解析

本研究では、MXT 改善のため、VHDM の作成時に記録ビーム径と露光時間を変更した。数値解析により提案するモード交換器の動作を再現し、確認した。Fig.1 に示した光学系を用い、モードが LP01 の Signal1 と、LP11a の Signal2 の 2 信号の

モードを交換する場合について検証した。VHDM の記録と再生は異波長記録再生法[2]を用いた。VHDM2 による再多重化後の信号について、式 1 で定義する結合効率 CE[dB]により評価する。ただし、 CP_i は*i*番目の導波モードに結合する結合パワー、 CP_D は信号の所望の導波モードに結合する結合パワーである。

$$CE = 10 \log_{10}(CP_i/CP_D)$$

得られた結果を Table.1 に、VHDM の改善前の結果を Table.2 に示す。Signal1 の LP11a、Signal2 の LP01 に対する結合効率が高く、信号光のモード変換が成立したと言える。さらに、両信号ともに改善前に-12dB程度であった MXT が-22dB以下となっており、改善がみられた。しかし、Signal2 について LP11b の MXT が高く、これは VHDM2 の多重化精度の問題と考えられる。今後はさらなる VHDM の改善、SLM2 における位相補償による結合効率の向上を試みる。

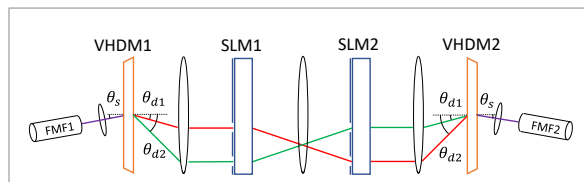


Fig.1 モード交換提案手法の概念図、及び数値解析の構成

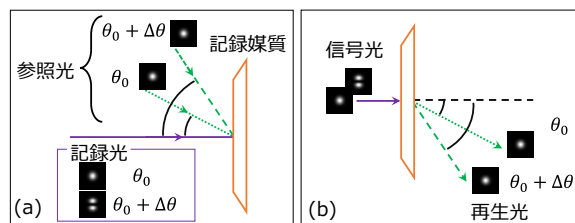


Fig.2 VHDM の概念図(a)記録過程 (b)再生過程

Table.1 結合効率CE[dB] (改善後)

	LP ₀₁	LP _{11a}	LP _{11b}
Signal1	-22.61	0.00	-22.81
Signal2	0.00	-28.24	1.09

Table.2 結合効率CE[dB] (改善前)

	LP ₀₁	LP _{11a}	LP _{11b}
Signal1	-12.73	0.00	-14.96
Signal2	0.00	-12.21	-0.76

参考文献

- [1] Y.Wakayama et al.: Opt. Express 21, 12920 (2013)
[2] S.Shimizu et al.: Appl. Opt. 57, 146-153 (2018)

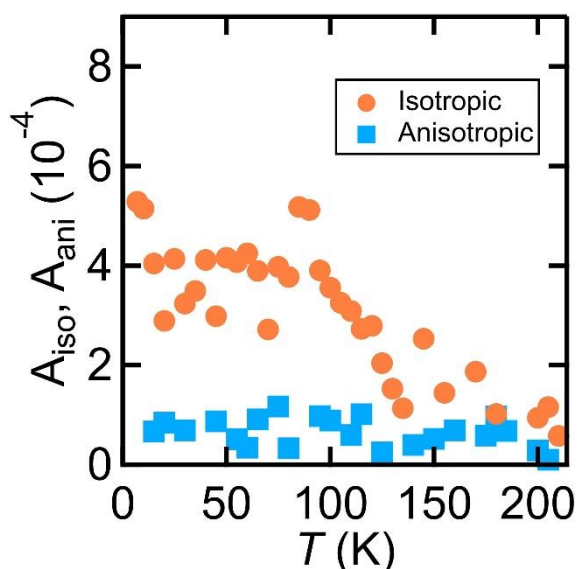
電荷ガラス物質 θ -(BEDT-TTF) $_2$ CsCo(SCN) $_4$ における光誘起キャリアダイナミクス

¹ 北大院工、² 埼玉大理工、○和田 侑万¹、土屋 聡¹、谷口 弘三² 戸田 泰則¹

ガラスとは原子や分子がランダムなまま無秩序に固まった状態のことである。近年、電荷ガラスと呼ばれる固体中の電子のガラス化現象が有機導体において報告されている[1]。電荷ガラスは固体物理とソフトマター物理のそれぞれにおいて中心的な課題である「強相関電子」と「ガラス」が融合した新しい研究分野であり、電荷、スピン、格子など従来の分子ガラスにはない自由度が絡んだ新しいガラス物性の探索や電子の高速応答性を利用したデバイスの開発など基礎、応用の両面から注目を集めている。しかし電荷ガラスは従来の分子ガラスに比べて研究が少なく、その物性は未解明な部分が多い。

本研究では、電荷ガラスについて新たな知見を得るために、偏光分解ポンププローブ分光法を用いて電荷ガラスを示す有機導体 θ -(BEDT-TTF) $_2$ CsCo(SCN) $_2$ (θ -CsCo)の光誘起キャリアダイナミクスを調査した[2]。この測定はポンプ光で励起されたキャリアの緩和ダイナミクスを、遅延時間をつけたプローブ光の過渡反射率変化 ($\Delta R/R$) として測定し、フェルミエネルギー近傍の電子状態 (ギャップ構造や電子秩序の異方性) を調査する実験手法である。測定に使用した光パルスはパルス幅 120 fs、繰り返し周波数 54 kHz、中心エネルギーはそれぞれポンプ光 3.02 eV、プローブ光 1.51 eV である。

図は、プローブ光の偏光に依存するダイナミクス (異方成分: ■) 及び偏光に依存しないダイナミクス (等方成分: ●) の信号振幅を温度に対してプロットしたものである。異方成分は温度に依らずほとんど一定であるのに対して、等方成分は 150K 以下で増大していくことが分かった。この振る舞いは、等方成分と異方成分がともに増大する電荷結晶 (秩序) とは対照的であり[3]、 θ -CsCo においては複数の短距離電荷秩序ドメインが出現し、それぞれが異なる方向性を持って分布していることを示唆している。



図：等方成分 (●) および異方成分 (■) の信号振幅の温度依存性。

- [1] F. Kagawa, et al., Nat. Phys. 9, 419 (2013).
- [2] T. Sato et al., Phys. Rev. B 89, 121102(R) (2014).
- [3] K. Nakagawa et al., Phys. Rev. Res. 5, 013024 (2023).

4f 波形整形器による分散コヒーレントブリルアン散乱分光法の高感度化

北海道大学工学部 ○奥山 亮, 北海道大学電子科学研究所 石島 歩, 三上 秀治

近年、生体組織の粘弾性の変化が器官発生をはじめとする生命現象に関与することが明らかになりつつあり、時々刻々と変化する細胞微小環境の粘弾性計測を実現するために、非侵襲・サブ細胞レベル・リアルタイムで計測する手法の重要性が高まっている¹。非侵襲的に試料の粘弾性を計測可能な手法の一つとしてブリルアン散乱分光法が挙げられる。本手法では、試料中の密度変動により非弾性散乱される光（ブリルアン散乱光）の周波数を解析することで、試料の粘弾性が計測可能である。その中でも、ポンププローブ計測により、サブ細胞レベルの空間分解能で計測が可能なコヒーレントブリルアン散乱分光法は、リアルタイム計測を実現するための技術開発が進展している。特に、計測速度に優れている分散方式のコヒーレントブリルアン散乱分光法²は、チャープしたプローブ光の各波長成分を遅延量の異なる別々のプローブ光と見立て、分光器で一括検出することにより、ブリルアン周波数の空間分布のリアルタイム取得を可能にした。しかし、プローブ光のスペクトルは一般には平坦でないため、光強度の低い波長成分ではショットノイズの影響が大きく、相対的に計測感度が低下する。このため、光損傷閾値が低く高感度な計測が必要とされる発生胚などの生体試料では、多数の繰り返し計測による平均化が必要となるため、リアルタイム計測が困難になる。

そこで本研究では、分散コヒーレントブリルアン散乱分光法のリアルタイム計測における感度向上手法を提案する。4f 波形整形器³でチャープしたプローブ光のスペクトルを平坦化し、イメージセンサの各画素に入射する光子数を飽和電荷量まで引き上げることで、ショットノイズに対する信号光の比率を増大する（図 1a）。加えて、分光器と 4f 波形整形器との間にフィードバックループを形成することで、規格化スペクトルの標準偏差を 0.28（波形整形なし）から 0.02（波形整形あり）に低下させ、平坦なスペクトルを実現した。過渡反射率のノイズレベルを評価するために、スペクトルを平坦化したプローブ光を用い、ポンプ光を入射せずに過渡反射率を計測した結果（図 1b-e）、最大 46 dB ノイズを抑制可能であった。

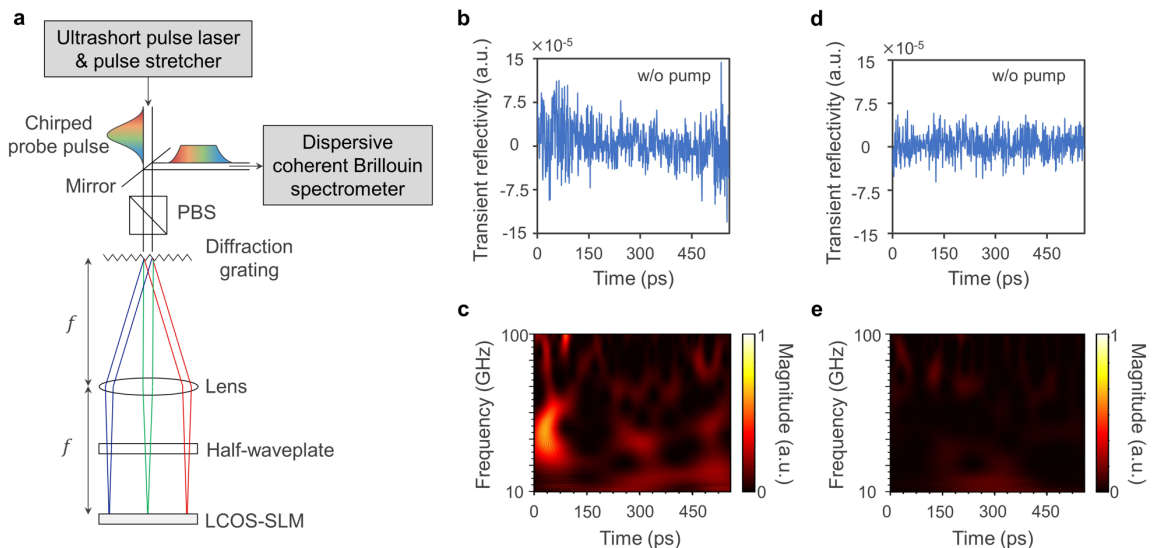


Fig. 1 | 提案手法と実験結果. (a) 4f 波形整形器の概略図. (b) プローブ光を整形しない場合の過渡反射率の時間変化と(c) その瞬時周波数解析結果. (d)と(e)はプローブ光を整形した場合における結果.

[1] Prevedel, R *et al. Nature methods.* **16**, 969-977 (2019).

[2] Ishijima, A. *et al. Photoacoustics.* **29**, 100447 (2023).

[3] Weiner, A. M. *Rev.Sci.Instrum.* **71**, 1929-1960 (2000).

チャープパルス位相シフトデジタルホログラフィーによる複数の異なる時間における画像の同時取得

公立千歳科学技術大学 ○福田 渉、今城 秀、窪田 駿二、唐澤 直樹

我々の研究室では、チャープパルス位相シフトデジタルホログラフィーの手法を用いて、超短パルスレーザー光による超高速現象のフェムト秒オーダーの分解能による単一時間における振幅・位相画像の取得に、従来成功している。本研究では、チャープパルス位相シフトデジタルホログラフィーの手法を用いて複数の時間における振幅・位相画像の同時取得を行った。

図1に本研究で使用した実験光学系を示す。物体光はBS2で2つの物体光に分割され、それぞれの物体光は凸レンズ付き五角形型スリットと凹レンズ付き星型スリットを通過している。参照光は高屈折率ガラスによってチャープが与えられ、4分の1波長板によって円偏光となっている。参照光をチャープさせ、物体光に光路長差をつけて分割することで、複数のタイミングのホログラムをシングルショットで記録できる。物体光と参照光が干渉するタイミングによって記録される干渉画像は異なり、五角形型スリットを通る物体光は長波長側にタイミングを合わせ、星型スリットを通る物体光は短波長側にタイミングを合わせている。DOEで物体光と参照光が干渉した光を7つに分割し、それぞれの光波をBPFに異なる角度で入射させ、特定の波長光のみを透過させる。分割した光を図1に示す4つの異なる直線偏光方向の強度画像が記録可能な偏光カメラに記録した。今回の実験では、DOEで7つに分割された光波から2つの光波を選択し、それぞれの光波に対応する振幅・位相画像を再構成する。

図2に再構成された長波長側と短波長側の2つの画像の振幅・位相画像を示す。ここで(a)と(a')は長波長側の光波の振幅と位相画像である。長波長側の物体光は五角形型スリットを通過しているため、(a)には五角形型の振幅画像が再構成され、(a')には上に凸の位相画像が再構成されている。(b)と(b')は短波長側の光波の振幅と位相画像である。短波長側の物体光は星型スリットを通過しているため、(a)に星型の振幅画像が再構成され、(a')には下に凸の位相画像が再構成されている。これらの図からチャープパルス位相シフトデジタルホログラフィーの手法を用いて複数枚の振幅・位相画像の同時取得とそれぞれの画像の再構成が可能であることがわかる。

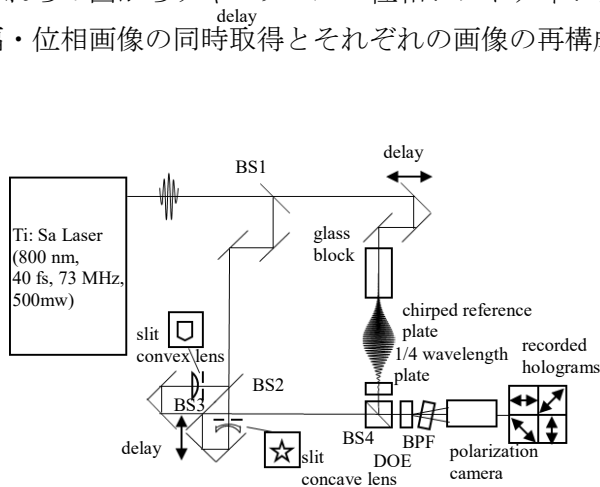


図1 実験光学系。ここでBSはビームスプリッター、DOEは回折光学素子、BPFはバンドパスフィルターを示す。

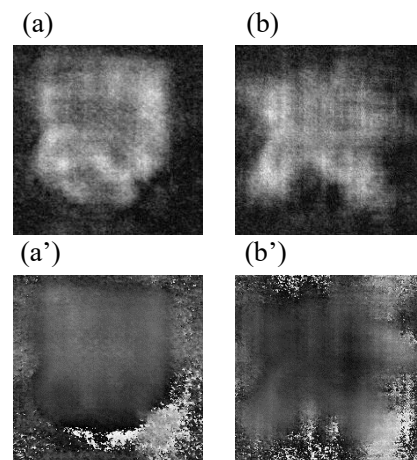


図2 (a)、(a') 長波長側の振幅・位相画像。(b)、(b') 短波長側の振幅・位相画像。