

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20399

研究課題名（和文）空間光変調を用いた電子励起密度分布の制御による低損失光導波路の高速加工

研究課題名（英文）High-speed processing of low-loss optical waveguides by controlling the distribution of electron excitation using spatial light modulation

研究代表者

吉崎 れいな（Reina, Yoshizaki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：80967852

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：超短パルスレーザーによる透明材料への改質書き込みは光集積回路制作に必須の技術であるが、改質の書き込み過程は複雑であり、低損失な光導波路の高効率書き込みは実現していない。本研究は、超短パルスレーザー照射による透明材料への改質書き込みにおいて、改質の書き込み過程を明らかにすることで、空間制御を実現し低損失な光導波路の高効率書き込みを達成することを目的としている。新規開発した定量評価手法によって、光導波路内部でエネルギー吸収と屈折率変化が生じる過程の定量計測に成功した。得られた知見からα水晶内に従来研究結果に対し20倍以上高速な1.5 mm/sで、伝搬損失5 dB/cmの導波路書き込みに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、透明結晶材料における超短パルスレーザーによるType Ⅱ型の光導波路書き込み過程を定量的に明らかにした。従来研究によって高効率かつ低損失な光導波路書き込みのためにパラメータの最適化が行われてきているが、そのパラメータで光導波路がどのように形成されるかは十分に明らかになっていなかった。本研究は加工パラメータが直接関与するミクロな視点の加工現象とマクロな視点の光導波路の性能の関係を紐解いた。加工パラメータがどのように光導波路形成に影響するかという知見は、今回研究対象にしたα水晶だけでなく、他のレーザー媒質やダイヤモンドに対する光導波路形成にも応用可能であり、産業応用への展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：The inscribing of modifications in transparent materials using ultrafast pulse lasers is a crucial technique for the fabrication of photonic integrated circuits. However, the process of modification inscription is complex, and efficient writing of low-loss optical waveguides has not yet been achieved. This study aims to clarify the modification inscription process in transparent materials via ultrafast pulse laser irradiation to achieve spatial control and efficient writing of low-loss optical waveguides. By employing a newly developed quantitative evaluation method, we successfully measured the process of energy absorption and refractive index change within the optical waveguides. Based on the insights obtained, we achieved the inscription of waveguides in α-quartz at a speed over 20 times faster than previous studies, at 1.5 mm/s, with a propagation loss of 5 dB/cm.

研究分野：微細加工

キーワード：超短パルスレーザー 光導波路 内部改質 屈折率計測 電子励起 その場観察

1. 研究開始当初の背景

透明材料への光導波路書き込みは次世代コンピュータでの活用が期待される光集積回路制作に必須の技術である。BK7 などのガラスやダイヤモンド、レーザ媒質など多くの透明材料で、超短パルスレーザ照射により密度が低下する改質が施され導波路は製作される(図 1)。導波路は、内部に損傷がなく低損失であること、高効率かつ簡便に作成可能である必要がある。高効率かつ簡便な光導波路作成のため、空間光変調器を用いた三次元集光技術によるシングルスキャン書き込みが試みられてきた。しかし改質は透明材料内のレーザの非線形伝搬・吸収の結果生じるため、改質の空間分布の能動的な制御が難しい。求める改質の空間分布と同一になるように光強度分布を設定したとしても、求める改質分布を得ることはできない。光強度を非常に低くし、非線形性の影響を低くすることはこの問題の解決の一手となるが、適用できる材料が限られるだけでなく、高速な加工は難しくなる。高速な加工を目指し大きな光強度を用いると非線形な加工現象が顕著になり、光導波路内部に損傷が生じたり、改質の壁面に凹凸が生じたりすることで、光導波路の損失が増大していると考えられる。従って、低損失な光導波路の高速書き込み実現のために、媒質内における超短パルス非線形な加工現象の制御方法の新規開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、非線形伝搬を考慮した空間光変調によって透明材料の改質領域の空間制御を実現し、低損失な光導波路の高効率書き込みを達成することを目指す。

3. 研究の方法

本手法の実現のために次の 4 点を実現する必要がある。(1)エネルギー吸収量と屈折率変化量の定量評価、(2)多パルス加工における加工領域の重なりの影響解明、(3)ミクロな加工現象と光導波路性能との関係の解明、(4)改質分布をフィードバックした光変調による改質領域の制御、の 4 点である。これによって材料内に吸収・蓄積される超短パルスレーザエネルギーの空間制御が可能になり、低損失になるように設計された通りの屈折率分布で形成される光導波路のシングルスキャン書き込みが達成される。

(1)(2)(3)(4)の 3 項目について、具体的に以下の手法を用いて研究を進めた。

(1)エネルギー吸収量と屈折率変化量の定量評価

超短パルスレーザを透明材料に照射してエネルギー吸収がおこると、材料中の電子が励起して一時的に透過率が減少する。つまりレーザから透明材料へ移動したエネルギー量はレーザ照射直後の材料内の透過率で計測可能である。この材料内の透過率変化分布をポンププローブ・シャドウグラフによって撮像することで電子励起密度を算出した。レーザ照射後の屈折率変化量はマッハツェンダー干渉イメージングによる位相変化量計測から求めた。レーザを単点に照射する場合、エネルギー吸収量や屈折率変化量はレーザの光軸について軸対称になると仮定できるため、三次元の各点における透過率変化と位相変化をアーベル変換で算出した。これら 2 つ電子励起密度分布と屈折率変化量の関係を明らかにするために、ポンププローブ・シャドウグラフとマッハツェンダー干渉イメージングを同じ顕微鏡システムで結像する光学系 (Fig. 1) を設計することで、2 つ空間分布の厳密な比較を可能にした。透明材料としては合成 α 水晶を用いた。

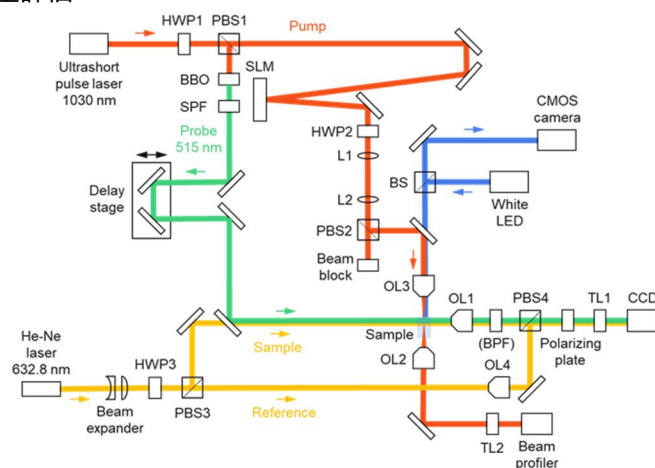


Fig. 1 加工中の過渡的なエネルギー吸収量と加工後の屈折率変化量を同じ結像系で定量計測する光学系。

(2) 多パルス加工における加工領域の重なりの影響解明

複数のレーザパルス照射しながらスキャンすることで光導波路は書き込まれる。従って既に書き込まれた光導波路と次のレーザ照射が重なることで予期せぬ屈折率変化が書き込まれる可能性がある。最終的な屈折率変化分布を制御するためには、既に書き込まれた改質部が次の加工にもたらす影響を解明する必要がある。具体的には(1)の手法によって、光導波路書き込みを模して、少しずつ移動しながら複数点レーザを照射した際の変化を定量評価した。

(3) ミクロな加工現象と光導波路性能との関係の解明

(1)(2)で定量計測されたミクロな視点での電子励起密度や屈折率変化がどのように最終的な光

導波路の性能に関わってくるかは明らかになっていない．この関係を解明すべく(1)(2)で加工に用いたレーザパラメータで光導波路書き込みを行い，その性能を評価した．

(4)改質分布をフィードバックした光変調による改質領域の制御

(4)の項目については，期間内では限定的な内容のみの取り組みとなった．今回の期間中の検討では **Type** 型として知られる 2 本の改質領域を書き込むことでその間に形成される光導波路を制作した．書き込みの高能率化のためにこれらの 2 本を同時に書き込む変調を空間光変調器によって導入した．導入する光変調について，対称性の高い構造になるように制御を行った．

4．研究成果

(1)エネルギー吸収量と屈折率変化量の定量評価

定量評価に用いた実験系を Fig. 1 に示した．波長 1030 nm, パルス幅 10 ps の超短パルスレーザは空間光変調器 (LCOS-SLM X15213-03; 浜松ホトニクス) で球面収差補正が施され, 20 倍の対物レンズで α 水晶内部に集光された．超短パルスレーザによる吸収を観察するために, **Pump-probe** 撮像法でシャドウグラフを得る．更に最終的に形成される試料のひずみを観察するためにマッハツェンダー干渉計測を行った．

Figure 2(a)に単点に 1 パルス超短パルスレーザを照射した際のポンププローブ画像とそこから計算された電子密度分布を示す．電子励起の時間的進展は焦点位置から始まり, 上方へ拡大し, 約 20 ps で飽和に達し, 200 ps 以上にわたって持続する (Fig. 2(b))．これは, 10 ps のパルス持続時間を考慮すると, レーザ吸収が約 20 ps 以内に発生し, その後の変調を引き起こすことを示す．Figure 2(c)および(d)は, パルスエネルギー 3, 5, 7.5, 10 μJ における, レーザ照射から 20 ps 後のポンププローブ画像と電子励起密度分布である．パルスエネルギーが 3 μJ でも, 電子励起密度は $5.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ に達する．1030 nm の波長における水晶の臨界電子密度が約 10^{27} m^{-3} であることを考慮すると, 観察された値は十分大きく, 材料が恒久的な変化を受けたことを示唆する．

Figure 2(e)は照射後 0.1 秒以上経過した後のレーザ照射部の干渉画像で, Fig. 2(f)はそこから算出された屈折率変化分布である．レーザ照射領域の中心では屈折率が減少し, エッジでは増加した (Fig. 2(g))．この屈折率の変化は顕著であり, 最大で 0.1 を超える (Fig. 2(h))．水晶における超短パルスレーザによる変質は, アモルファス, 欠陥結晶または歪んだ結晶に分類される．観察された屈折率変化は, 主にアモルファス化による密度の減少とそれに続く膨張に起因する [8]．屈折率の大幅な減少が観察された照射領域の中心は, アモルファス化したと考えられる．これは, 電子励起の中心と屈折率の減少の位置が一致することによって裏付けられる (Fig. 2(d))．

しかし, 計算された電子励起の増加が屈折率の顕著な変化と常に相関はしていない (Fig. 2(d)(f))．パルスエネルギーが増加するにつれて, 電子励起が中空化していくが特に屈折率変化ではその傾向がみられない．算出された電子励起の結果は, 励起中の吸収ではなく, 自己捕捉励起子 (STE) 共鳴による光増幅 [13] によるレーザ照射の中心での透過率の上昇に起因すると考えられる． α 石英の STE 発光スペクトルは 2.5 eV ($\lambda = 500 \text{ nm}$) および 2.8 eV ($\lambda = 440 \text{ nm}$) にあり [14], 515 nm の波長のプローブパルスは増幅に敏感である． α 石英内の高いパルスエネルギーによる加工中の電子励起密度をより正確に測定するためには, 増幅に敏感でない異なるプローブ波長の選択が重要だといえる．図 2(i)は, 電子励起と屈折率変化の長さの相関関係である．この比例関係から, 20 ps 後に計測された電子励起体積が, パルス幅 10 ps のレーザ照射下での屈折率変化体積と密接に関連しているといえる．

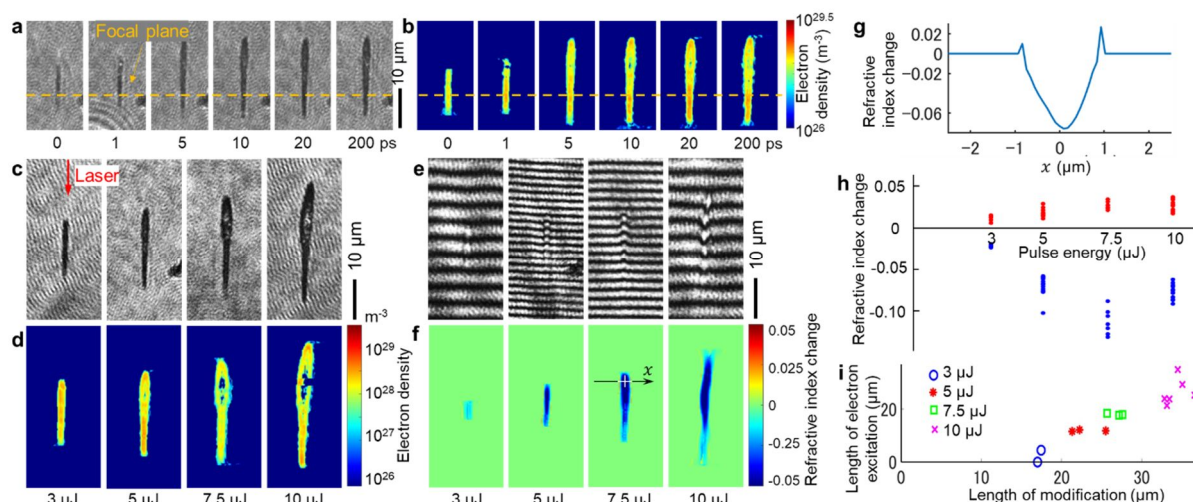


Fig. 2 単点照射時の電子励起密度と屈折率変化分布．パルスエネルギー 5 μJ における(a) 透過率と(b) そこから算出された電子励起密度の時間変化．レーザ照射後 20 ps 後の異なるエネルギーにおける(c) 透過率と(d) そこから算出された電子励起密度．(e) 干渉縞画像と(f) 算出された屈折率変化量．(g) (f)の x 軸における屈折率分布．(h) 各エネルギーにおける最大・最小屈折率変化量．(i) 屈折率変化と電子励起密度の長さの関係．

(2) 多パルス加工における加工領域の重なりの影響解明

(1)で構築した定量評価システムを用いて、ピッチ p μm ずつ (Fig. 3(a)(b)) 4 回試料を動かしながら複数パルスによる影響を評価した。移動方向に対して垂直の観察 (Fig. 3(a)) および平行な観察 (Fig. 3(b)) をそれぞれ行い、移動方向に対して平行な観察においては、加工光を 2 点に分岐して集光した (Fig. 3(c))。ピッチ $p = 1.5 \mu\text{m}$ 、パルスエネルギー $5 \mu\text{J}$ の複数ショットを照射した際のポンププローブ画像と吸光度分布をそれぞれ Fig. 4(a)と(b)に示す。2shot 以降から、光の吸収が下流側では減少し、上流側に吸収体積が拡大していることが確認できる (Fig. 4(b))。また Fig. 4(b)の上の白線位置における各ピッチにおける吸光度を Fig. 4(c)にプロットした。吸収範囲の左端に注目すると、ピッチが小さいほど左方向に吸収範囲が増加する。レーザ単点 1 回照射後に形成される屈折率変化範囲の直径は最大の場合で $2 \mu\text{m}$ 程度である。つまりピッチが $2 \mu\text{m}$ 未満のときレーザの照射範囲の右端に改質部の左端が重複することとなる。改質のない水晶内ではレーザ吸収が発生しなかった光強度においても右端からレーザの吸収が発生し、起点として吸収体積が拡大し、結果として左方向にも吸収範囲が増大したと考えられる。このレーザ吸収の原因は、改質部におけるアモルファス化によるマイクロクラックおよび結晶欠陥[8]起因の光吸収率の上昇と考えられる。これは実際の透過顕微鏡観察において改質部が黒く観察されることも整合している。多ショット照射時のレーザ吸収の下流側での減衰と、上流側への増大も同様の光吸収率の上昇で説明できる。改質のない水晶内では、もっとも光強度が強い焦点位置近傍で最初に非線形吸収が生じ、そこを起点としたアヴァランシェイオン化によって吸収範囲が拡大していく。一方で、レーザ照射領域において、著しく高い光吸収を持つ改質部位が存在する場合、吸収は 1 回のレーザ照射で吸収が発生した位置の上部で早期に始まる。上部での早期吸収開始は、下部に到達する光のエネルギーを減衰させ、結果として下部のレーザ吸収が減少し、上部の吸収が増加する。複数のショットが重複して照射されて光導波路が形成される場合、レーザ吸収量が増加すること、前のショットによる加工の影響で吸収位置が上昇・拡大することに留意する必要がある。

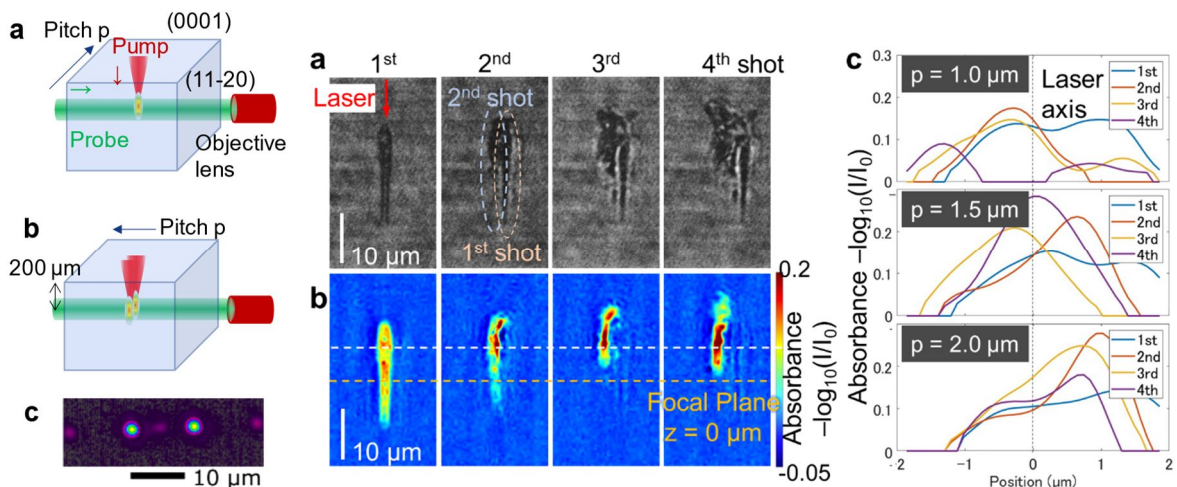


Fig. 3 (a) 垂直方向からの観察。(b) 水平方向からの観察。(c) レーザの 2 点分岐照射の例。

Fig. 4 複数回のレーザ照射における垂直方向からの観察。材料移動方向は右。(a) ポンププローブ画像。(b) 吸光度分布。(c) (b)の白点線での各ピッチにおける吸光度。

Fig. 5(a)(b)は複数回二点照射から得られる屈折率変化分布のマップおよびプロットである。合計エネルギー $6 \mu\text{J}$ とピッチ $p = 1.5 \mu\text{m}$ を使用し、二つの照射点間の間隔は $8.8 \mu\text{m}$ に設定した。単一ショット後の照射領域の周辺エッジでのみ屈折率の増加が観察された (Fig. 5(b))。導波路構造内での屈折率の増加は複数回照射後で確認された。単点の垂直方向からの観察 (Fig. 4(b))と同様に、複数のレーザ照射で改質領域は徐々に上方にシフトした。その結果、レーザ焦点位置の上方に 0.01 の屈折率増加が検出された。単一の照射点では直径約 $2 \mu\text{m}$ の屈折率変

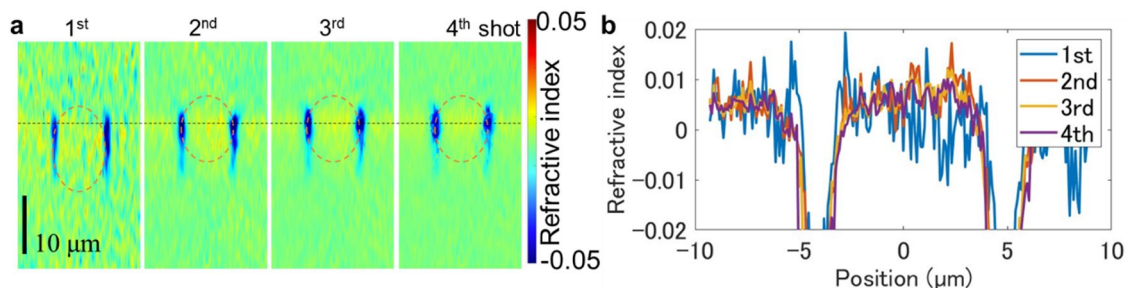


Fig. 5 (a) 移動に平行な方向からの観察から平面歪仮定で算出された屈折率分布。(b) (a)の点線における屈折率分布。

化領域が得られるが、複数照射による損傷トラックの戦略的な適用により、損傷トラックの近傍以外の領域でも屈折率変化を操作することが可能である。この技術は特にアモルファス化の周囲で光吸収率が増加する傾向があるため重要である。

(3) ミクロな加工現象と光導波路性能との関係の解明

Figure 5 は、合計パルスエネルギー $6\ \mu\text{J}$ 、走査速度 $2\ \text{mm/s}$ でレーザを照射した構造を光導波路として評価した際の光導波路端面の顕微鏡観察結果である、光が閉じ込められて伝送されており、導波路としての機能が確認された。合計パルスエネルギー $10\ \mu\text{J}$ および $2\ \mu\text{J}$ での書き込みも試みられたが、 $10\ \mu\text{J}$ では損失が過度に大きく、 $2\ \mu\text{J}$ では目立った改質が観察されなかった。具体的には、 $10\ \mu\text{J}$ の照射（各点ごとに $5\ \mu\text{J}$ ）はパルスオーバーラップによる亀裂を引き起こし（**Fig. (a)**を参照）、損失の増加に寄与したと考えられる。MFD（モードフィールド径）と導かれる光の強度は、二点間の間隔が広がるにつれて増加した。しかし、間隔が $16\ \mu\text{m}$ を超えると、フィールドが構造内で分岐する場合があった（**Fig. 7(j)**）。点間の過剰な間隔は、導波路構造の中央で最大の屈折率分布を形成する二つの損傷トラックの相乗効果を失わせる。

パルスエネルギー $6\ \mu\text{J}$ 、走査速度 $1.5, 2, 3\ \text{mm/s}$ 、および $12\ \mu\text{m}$ の照射間隔の場合、各々の伝搬損失と水平 MFD はそれぞれ $11, 10, 11\ \text{dB/cm}$ および $3.0, 3.4, 3.2\ \mu\text{m}$ であった。 $16\ \mu\text{m}$ の間隔の場合、これらの値はそれぞれ $6, 6, 5\ \text{dB/cm}$ および $4.0, 3.7, 4.0\ \mu\text{m}$ であった。先行研究では、波長 $1060\ \text{nm}$ の石英における伝搬損失は、 $18\ \mu\text{m}$ の間隔で $1.5\ \text{dB/cm}$ が達成されたと報告されている[5]。異なる書き込みパラメータや導かれるレーザの波長であっても、低伝搬損失のための間隔は近い。 $12\ \mu\text{m}$ と $16\ \mu\text{m}$ の二つの間隔を比較すると、各速度に対して MFD の増加は $1\ \mu\text{m}$ 未満であり、伝搬損失に比べて間隔の増加に対する変化は小さい。 $12\ \mu\text{m}$ の間隔では、光の伝搬が損傷トラックに近い場所で発生し、損傷トラック近傍での吸収が増加したと考えられる。つまり間隔が狭いと、伝搬損失は低透過領域を通過する光が増加し、コアとクラッドの間のインターフェースが容易に乱されるため、増加する。

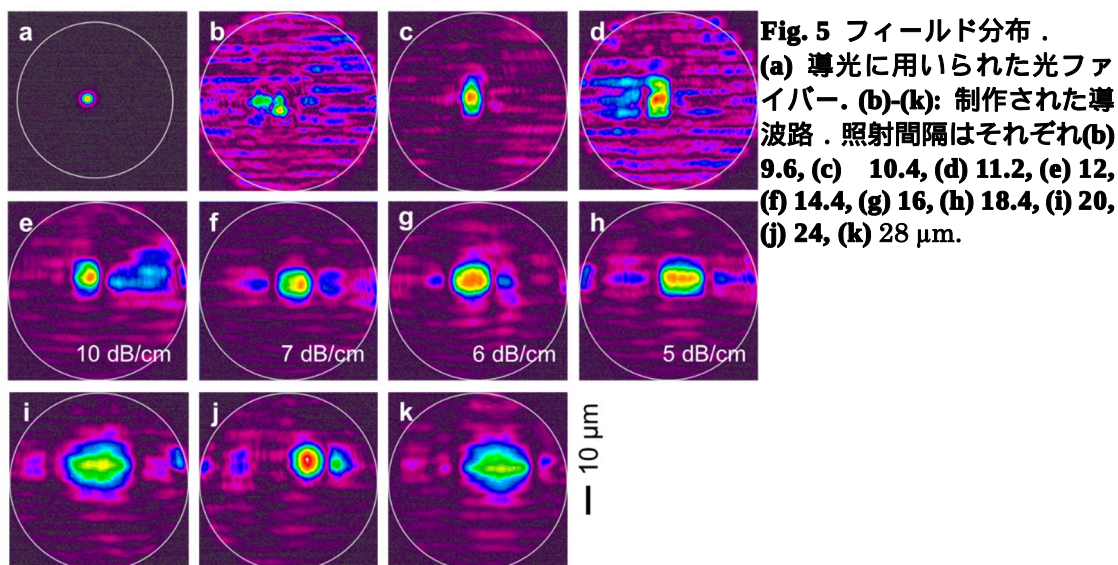


Fig. 5 フィールド分布．
(a) 導光に用いられた光ファイバー．(b)-(k): 制作された導波路．照射間隔はそれぞれ(b) 9.6, (c) 10.4, (d) 11.2, (e) 12, (f) 14.4, (g) 16, (h) 18.4, (i) 20, (j) 24, (k) 28 μm ．

(4) 改質分布をフィードバックした光変調による改質領域の制御

高品質な光導波路書き込みのため、ポンププローブ計測に基づく 2 点分岐集光時の光強度の調整を行った（**Fig. 6**）．特に 2 点の照射間隔が近い場合、対称な構造を得ることは難しく、電子励起密度計測結果から変調に用いるホログラムを微調整することでなるべく対称な改質書き込みを可能にした．今後は 2 点間の比率だけでなく、集光形状自体のフィードバックに挑む。

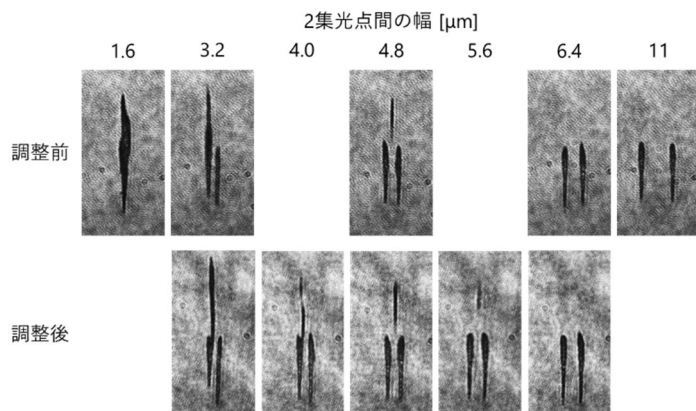


Fig. 6 光変調の微修正による改質の対称性向上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Reina Yoshizaki, Tomohiro Fukui, Masayuki Nakao	4. 巻 73
2. 論文標題 Formation Mechanism of Optical Waveguide in α -Quartz by Ultrashort Pulse Laser	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 福井智大, 吉崎れいな, 伊藤佑介, 服部隼也, 杉田直彦
2. 発表標題 超短パルスレーザによる電子励起の空間制御を用いた低損失光導波路の形成
3. 学会等名 精密工学会第30回学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Fukui, Reina Yoshizaki, Yusuke Ito, Junya Hattori, Naohiko Sugita
2. 発表標題 Modification in Alpha-Quartz Induced by Ultrashort Pulsed Laser for Low-Loss Optical Waveguide Formation
3. 学会等名 12th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications (ICPEPA- 12) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉崎 れいな, 福井 智大, 伊藤 佑介, 服部 隼也, 杉田 直彦
2. 発表標題 低損失光導波路実現に向けた 超短パルスレーザによる改質書き込み過程の直接観察
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1．発表者名 吉崎れいな，伊藤佑介，任国旗，長藤圭介，杉田直彦
2．発表標題 低損失光導波路実現に向けた超短パルスレーザによる改質書き込み過程の解明
3．学会等名 レーザー学会学術講演会第44回年次大会
4．発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6．研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--------	---------------------------	-----------------------	----

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------