

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560055

研究課題名(和文)パルス状空間ソリトン光の対向衝突における物理機構解明

研究課題名(英文)Analysis of physical mechanism at the collision point of counter-propagating pulse-shaped spatial solitons

研究代表者

日坂 真樹 (Hisaka, Masaki)

大阪電気通信大学・医療福祉工学部・准教授

研究者番号：40340640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：バルク材料深部の物質構造を高い空間分解能で局所制御可能な新しい3次元光制御法の開拓を目指し、対向するパルス状空間ソリトン光の衝突点で生じる非線形相互作用について解明を試みた。長作動対物レンズを用いた走査型位相差顕微鏡を対向衝突システムに組み入れ、光学材料内部の振幅および位相コントラスト像を観察した。また、入射波である基本波とその第2高調波の間で生じる周期的エネルギー移行を考慮した有限差分時間領域法を開発し、空間ソリトン光の閉じ込め作用や対向衝突作用について数値解析した。

研究成果の概要(英文)：Nonlinear interaction at the collision point of counter-propagating pulse-shaped spatial solitons has been investigated to develop three-dimensional optical processing with the high spatial resolution at the depth of optical materials. Phase-contrast scanning optical microscope using long working distance objective lens was built in the experimental system, and absorptive and phase-contrast images of the structures in the materials were experimentally obtained. Also, the finite-difference time-domain method considering the periodic energy transfer between the fundamental beam and its second-harmonic beams were developed, and the self-trapping effects and collision response of the counter-propagating spatial solitons were numerically analyzed.

研究分野：光計測制御

キーワード：光制御 空間ソリトン

1. 研究開始当初の背景

高度産業技術による産業製品の小型化に伴い、素子構造の小型化・高密度化を実現するための多層化・積層化技術が急速に進みつつある。素子構造の大きさや形状、さらには素子内部の加工位置に制約されない3次元構造物の製作技術は、これからの重要な産業基盤技術になると期待される。

高速性及び並列性に優れた光は透明光学材料の内部まで容易に伝搬でき、理想的な3次元制御技術として期待されている。レーザーをレンズで材料内部に集光する従来の3次元光制御法では、2光子吸収法を融合することでマイクロメートル(μm)より小さな空間分解能での3次元光加工に成功している。しかしながら、この材料内部にレーザー集光する手法では、空気と光学材料の境界で生じる屈折率不整合で発生する球面収差や集光レンズの作動距離不足が原因となり、材料の深い部分への局所集光が大きく制限されている。申請者は光学材料深部において高い空間分解能で光制御を実現できる新しい手法として、パルス状空間ソリトン光の対向衝突を利用した3次元光制御法[図1]を考案し、その基礎研究を進めてきた。パルス状空間ソリトンを用いた手法は、焦点深度が十分に深いと見なせる空間ソリトン光の利用しており、光学材料深部を高い空間分解能で光制御できる可能性をもつ。

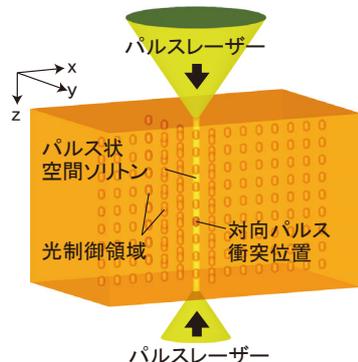


図1 空間ソリトンを利用した光制御法

2. 研究の目的

パルス状空間ソリトンを用いた手法は、焦点深度が十分に深いと見なせる空間ソリトン光の利用しており、光学材料深部を高い空間分解能で光制御できる可能性をもつ。レーザーを材料表面に集光するので、球面収差やレンズの作動距離の制約を受けない。また、空間ソリトン光は照射レーザー自体の自己収束効果でビーム径を保持しながら伝搬するので、光学材料深部の局所領域に光照射できる。さらに、パルス状空間ソリトンの非線形な対向衝突をさせると、光の伝搬方向(z軸方向)の位置特定や、片側ビームの光学遅延制御による深さ位置制御を実現できる。材料の外部温度や電場の閾値制御および空間ソリトン光の衝突崩壊作用を併用

することで空間分解能の向上を期待できる。パルス状空間ソリトン光を安定的な形成や簡便なz位置制御を実現できれば、材料の大きさや深さ位置に制限されない媒体深部の3次元局所光制御が可能となる。

パルス状空間ソリトンを用いた光制御法を実現するための重要な技術は、パルス状空間ソリトン光の対向衝突点における光学材料との非線形相互作用にある。これを実現するための要素技術として、(1)パルス状空間ソリトン光の形成、(2)対向パルス衝突点における光学材料との非線形相互作用、(3)非線形相互作用による光学材料の局所構造変化、が要求される。

本研究では、これらの3機構を解明するためにSBN結晶を用いた基礎実験を試み、新しい非線形相互作用の物理モデルの構築および光学特性の評価を目的とした。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、以下の項目について研究開発し、パルス状空間ソリトン光の対向衝突点について実験および数値解析を用いて検討した。

- (1) パルス状空間ソリトン光形成と対向衝突作用システムの検証光学系の試作
- (2) 光学材料内部観察用の走査型位相差顕微鏡の開発
- (3) 有限差分時間領域法(FDTD)による基本波と第2高調波との非線形エネルギー移行の開発

4. 研究成果

- (1) パルス状空間ソリトン光形成と対向衝突作用の検証光学系の試作

図2はパルス状空間ソリトンを利用した光制御実験系である。パルス幅50fs、中心波長800nm、平均光強度250mW、繰り返し周波数80MHzのチタンサファイアレーザーをハーフミラーで分割し、大きさ3×4×5mm³のSBN結晶表面近傍に開口数0.08で集光照射した。レーザーの偏光方向と結晶軸は一致させており、対向パルス衝突位置は片方の光路に対して光学遅延装置を挿入することで制御した。結晶内部で発生した散乱光および屈折率分布は側方からCCDカメラで観察した。

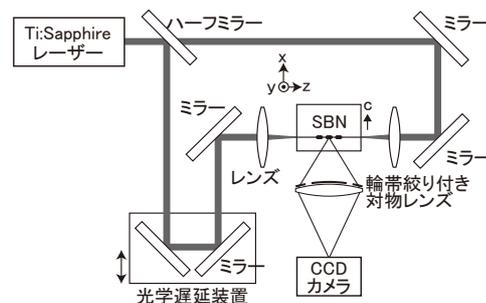


図2 パルス状空間ソリトンを利用した光制御実験系

SBN 結晶内部での空間ソリトン光の形成実験をした。SBN 結晶の散乱光を結晶側方から観察すると、チタンサファイアレーザーの基本波ビーム (FB: ω) に加えて、その第2高調波ビーム (SHB: 2ω) の散乱光が観察された。それぞれのビーム散乱光は同時に側方に射出されるので、それぞれ光学フィルタを通して観察した。

図3はレーザーを左側から片側照射したときの基本波ビームと第2高調波ビームの観察像である。図3(a)のFBでは伝搬とともにビーム径が拡がり、ビーム伝搬と共に自己収束作用は低下した。一方、図3(b)のSHBは概ねビーム径を保持しながら伝搬し、自己収束作用が実験的に確認できる。

z_1 及び z_2 位置でのビーム径を測定するとFBではそれぞれ $15.7\mu\text{m}$, $33.8\mu\text{m}$ であり、SHBではそれぞれ $10.5\mu\text{m}$, $9.6\mu\text{m}$ であった。SHBに対してはおよそ 1mm の伝搬距離において、空間ソリトン光形成を実験的に確認できた。

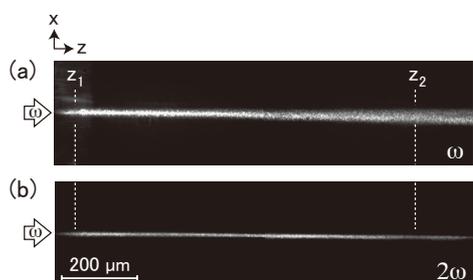


図3 空間ソリトン光形成
(a) 基本波 (b) 第2高調波

対向パルス衝突では対向衝突点での非線形光学作用が重要な役割を果たす。パルスレーザーを結晶両端から照射し、結晶内で対向照射したときの衝突点の観察像を図4に示す。非衝突点である z_3 での第2高調波 (SHG) の光強度に対して、対向パルス衝突点である z_4 での SHG 光強度は 2.3 倍となり、非線形な応答を示した。また、対向パルス衝突点の位置を光学遅延装置で実験的に制御できた。

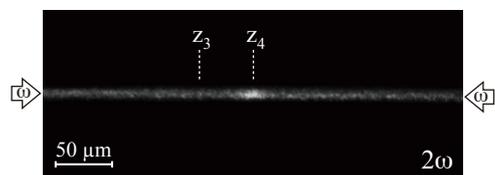


図4 パルス状空間ソリトン光の非線形衝突作用

(2) 光学材料内部観察用の走査型位相差顕微鏡の開発

光学材料内部の屈折率構造を観察するための輪帯照明を用いた走査型位相差顕微鏡の実験光学系を図5に示した。輪帯絞りを配置した開口数 0.55 の長作動対物レンズで強度で波長 632.8nm の He-Ne レーザーを試料に

対して輪帯状に収束照射し、光学材料からの透過光および回折光を円環状に CCD カメラで撮影した。撮影した円環状光強度分布には、光学材料の集光点に対して全方位から傾斜照明した場合の透過光および回折光が重ね合わされた状態で記録されている。

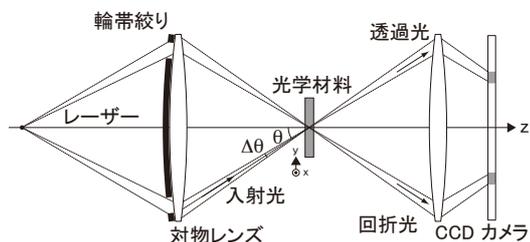


図5 走査型位相差顕微鏡

光学材料を xy 面内で走査しながら各試料位置での円環状光強度分布を撮影し、試料に対して同一方位から光照射した円環状光強度分布から、照射方向に対する傾斜照明画像を形成した。このとき、各走査点で撮影した円環状光強度に対して同じ大きさの扇状領域の平均値をセル値とすることで、空間周波数スペクトルが 8 の字状に分布した 120 方位の傾斜照明画像を再構成した。8 の字状スペクトルは位相情報に対して上下の円環で異なる符号を持つため、空間周波数フィルタによって位相情報を抽出した。各方位のスペクトルにも同様の処理を適用し、フーリエ面で重ね合わせることで振幅および位相コントラスト画像を再生した。図6に光学材料の吸収および屈折率分布構造を可視化した画像を示す。厚い材料のため、低周波信号や材料の小さな不均一構造が観察されるが、衝突領域の屈折率分布は描出できていない。

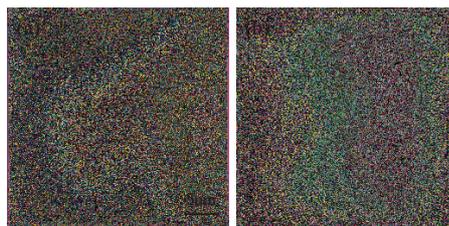


図6 光学材料の再生画像
(a) 吸収構造 (b) 屈折率構造

(3) 有限差分時間領域法による基本波と第2高調波との非線形エネルギー移行

SBN 結晶における対向パルス衝突作用では、強誘電体の分極反転構造と 2 次の非線形効果による第 2 高調波発生 (SHG) が関与すると考えられる。第 2 高調波発生と分極反転とを考慮するために 2 次非線形光学定数 d を組み込んだ非線形 FDTD 法を検討した。

数値解析では、実験に用いた 4mm 結晶構造を持つ SBN 結晶を光学材料と仮定し、非線形効果を考慮した電場に関する Maxwell 方程式を差分化した。基本波 (角振動数 ω) と第 2

高調波（角振動数 2ω ）とを同時に考慮することは難しいため、本解析では基本波と第2高調波の解析空間を分離した。従って、電場 E を基本波 E_ω と第2高調波 $E_{2\omega}$ に分けると、TM波では、基本波に対しては、

$$E_{\omega z}^{n+1} = E_{\omega z}^n - \frac{1}{n_o^2} \left\{ d_{33} (E_{\omega z}^{n+1} E_{2\omega z}^n - E_{\omega z}^n E_{2\omega z}^{n+1}) \right\} \frac{\Delta t}{\epsilon_0 n_o^2} \nabla \times \mathbf{H}_\omega \quad (1)$$

第2高調波に対しては、

$$E_{2\omega z}^{n+1} = E_{2\omega z}^n - \frac{1}{n_e^2} \left\{ d_{33} \left((E_{\omega z}^{n+1})^2 - (E_{\omega z}^n)^2 \right) \right\} \frac{\Delta t}{\epsilon_0 n_e^2} \nabla \times \mathbf{H}_{2\omega} \quad (2)$$

が導出される。このアルゴリズムでは、基本波は第2高調波の寄与を考慮し、同様に、第2高調波は基本波からの寄与を考慮している。

非線形効果を考慮したFDTDを用いて局所分極反転領域での対向パルス光の衝突作用を解析するために、光学材料での系を図7のようにモデル化した。材料分散を設定した大きさ $10 \times 15 \mu\text{m}$ のSBN結晶に対して、解析領域を1セルサイズ 10 nm 、セル数 1000×1500 と設定した。解析領域中央部分に長さ $0.5 \mu\text{m}$ 、間隔 $0.5 \mu\text{m}$ の周期的分極反転領域をz軸方向に配置した。結晶の分極方向は2次非線形定数 d の符号（±）で設定した。解析領域の両端に幅 $2.0 \mu\text{m}$ の波源を配置し、中心波長 800 nm 、パルス幅 43 fs 、電場 $2.0 \times 10^9 \text{ V/m}$ のパルス光を対向照射させた。解析における時間間隔を $1.0 \times 10^{-17} \text{ s}$ とし、解析領域境界にはBerenger型PML吸収境界条件を適用した。

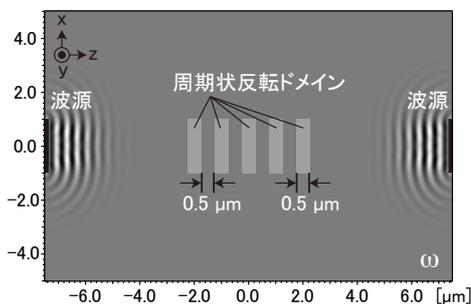


図7 数値解析における周期的分極反転とパルス状空間ソリトン光のモデル化

パルス光 (ω) の照射により発生した第2高調波 (2ω) の電場 $E_{2\omega}$ を図8に示す。図8(a)および(b)はそれぞれ周期的分極反転構造が対向パルス衝突点に一致する場合と一致しない場合での $E_{2\omega}$ の振幅である。位置が一致しない場合では対向衝突位置で分極方向が一方に揃っているため、材料分散で生じた位相不整合により $E_{2\omega}$ が打ち消される結果となった。一方、位置が一致する場合には周期分極反転構造による疑似位相整合が形成され、電場 $E_{2\omega}$ の値は増大する結果となった。パルス光は広帯域周波数成分を有しているため、 $E_{2\omega}$ のパワースペクトルを算出すると、第2高調波の光強度が波長に依存することが分かり、本解析にて仮定した分極反転構造においては、位置が一致した場合にはピーク波長が短波長側に変移する結果となった。

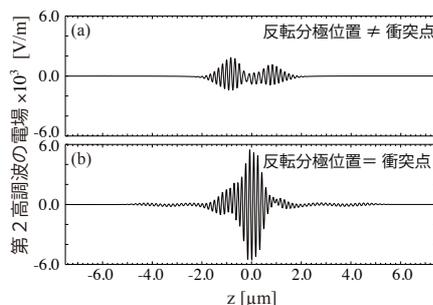


図8 対向衝突領域での第2高調波発生

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1) M. Hisaka, "Phase-contrast scanning optical microscopy for biological tissues (Invited Paper)", *Photonics Asia, SPIE, Optical Design and Testing VI*, 査読あり, 92720B, (Beijing, China, 10 Oct. 2014), doi:10.1117/12.2072566

〔学会発表〕(計5件)

1) Y. Miyake, M. Hisaka and T. Ikuta, "Phase-contrast optical microscopy for biological tissues using oblique laser illumination," 5th Asian and Pacific-Rim Symposium on Biophotonics (APBP'15), APBPp2-1, Pacifico Yokohama, Yokohama, 2015/4/23.

2) Y. Miyake, M. Hisaka and T. Ikuta, "Cross-sectional Biological Tissue Imaging by Using Phase-Contrast Scanning Microscope with Annular Illumination," 13th Polish-Japanese Seminar on Biomedical Engineering, Osaka-Electro Communication University, Osaka, 2014/11/3.

3) Y. Miyake, M. Hisaka and T. Ikuta, "Phase-Contrast Scanning Optical Microscopy of Biological Tissues Using Annular Illumination," Biomedical Imaging and Sensing Conference 2014 (BISC'14), BISCp3-1, Pacifico Yokohama, Yokohama, 2014/4/23.

4) 三宅 泰広, 徳永 朋佳, 日坂 真樹, 生田 孝, "輪帯照明を用いた走査型位相差顕微鏡の3次元空間分解能の検討," 日本光学会年次学術講演会 (OPJ 2014), 7pD1, 2014年11月7日, 東京都文京区, 筑波大学

5) 三宅泰広, 日坂真樹, 生田孝, "微小位相物体による走査型位相差顕微鏡の性能評価," 生体医工学シンポジウム 2014, 2A-15, 2014年9月27日, 東京都小金井市, 東京農工大学

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日坂 真樹 (HISAKA MASAKI)

大阪電気通信大学・医療福祉工学部・准教授
研究者番号: 40340640