

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24655171

研究課題名(和文) 偏光イメージングセンサーの開発

研究課題名(英文) Development of real-time polarization imaging sensor

研究代表者

下間 靖彦 (Shimotsuma, Yasuhiko)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40378807

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：超短パルス光と物質との相互作用において、波長や電場強度の影響だけでなく、偏光、位相をはじめとして、周波数・空間チャープ等の超短パルス光の素性がどのような役割を果たしているのかを体系的に観察した。さらに構造複屈折アレイを石英ガラスの内部に形成し、固体撮像素子との組み合わせによって、リアルタイムで偏光情報を撮影可能な偏光イメージングセンサーを開発した。

研究成果の概要(英文)：We have developed the real time imaging sensor which is possible to image the polarization information. Especially, we have confirmed that the induced structure inside SiO₂ glass by using ultrashort pulse irradiation can act successfully as polarization filter. We have also revealed that the influence of the frequency- and spatial-chirp on the form-birefringence inside glass.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学・機能材料・デバイス

キーワード：偏光 ガラス 複屈折 超短パルスレーザー 欠陥制御 ナノ構造 自己組織化 イメージング

1. 研究開始当初の背景

申請者は、超短パルス光と物質との非線形相互作用と光誘起プラズマとを巧みに融合させることによって、材料の任意の場所に光の回折限界以下のナノ周期構造の形成を目指し、光と物質の相互作用の新たな可能性を開拓してきた。その結果、超短パルス光のシングルビームのみの照射により、透明な固体材料内部に光の回折限界を遙かに超えたスケールで構造が変調したナノ周期構造が自己組織的に形成される現象を世界で初めて発見した(*Phys. Rev. Lett.* 91 (2003) 247405.)。また本成果を応用することにより、5次元(XYZ+偏光+位相)での超高密度光記録への応用の可能性を実証し(*Adv. Mater.* 22 (2010) 4039.)、さらに液相プロセスにおいても、金属ナノワイヤや磁性ナノ粒子等の合成および形態制御にも成功している(*Chem. Mater.* 19 (2007) 1206., *Langmuir* 27 (2011) 8359.)。特に、ガラスの内部に局所的な複屈折現象の発現が可能であること、さらに反射型液晶空間光変調器を利用したホログラフィック加工技術を最大限生かすことにより、新しいリアルタイム偏光イメージングセンサーの作製に利用できなかと考え、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

超短パルス光と物質との相互作用において、波長や電場強度の影響だけでなく、偏光、位相をはじめとして、周波数・空間チャープ等の超短パルス光の素性がどのような役割を果たしているのかを理解するとともに、構造複屈折アレイを石英ガラスの内部に形成し、固体撮像素子との組み合わせによって、リアルタイムで偏光情報を撮影可能な偏光イメージングセンサーを開発する。

3. 研究の方法

本研究の最終目標である「リアルタイムで偏光情報を撮影可能な偏光イメージングセンサー」を開発するため、以下の2つの研究項目を遂行する。

(1) 超短パルス光のパルス成形・制御システムの開発: 超短パルス光と物質との相互作用は、超短パルス光の素性(偏光、位相、周波数チャープなど)に大きく依存するとの視点から、超短パルス光のパルス成形・制御技術を確立する。

(2) 偏光イメージングセンサーの開発: 研究項目(1)で構築する超短パルス光のパルス成形・制御システムに加え、反射型液晶空間光変調器を利用したビームパターンの整形技術およびホログラフィック一括加工技術との融合により、撮像素子(CCD または CMOS)上に貼り付けた石英ガラス内部に画素ごとに対応した偏光子アレイを形成し、偏光イメージングセンサーを作製する。

4. 研究成果

(1) 超短パルス光のパルス成形・制御システムの開発: フェムト秒レーザーを石英ガラス内部に集光し、その焦点近傍に誘起される局所的なナ

ノ周期構造由来の複屈折制御を試みた。具体的には複屈折を発現させた領域を積層することにより、複屈折による位相差に加成性が成り立つことを確認し、さらにパルスエネルギーをはじめとして、描画速度、偏光方向、波形整形したフェムト秒パルス等の諸条件と誘起される複屈折の大きさとの関係について詳細に調べた。レーザー照射条件(パルスエネルギー、描画速度)と複屈折による位相差とのそれぞれの関係は、パルスエネルギーが大きいほど、描画速度が遅いほど、位相差は大きくなった。パルスエネルギーが $2 \mu\text{J}$ 以上の場合、照射領域がわずかに着色し、258 nm 励起の蛍光スペクトルから、ODC(II)とNBOHC等の欠陥に由来する着色と考えられた。また、ダブルパルス列に波形整形し、投入全エネルギーを同一とした方が、通常のシングルパルス列より位相差が大きくなった。これは、第1パルスにより励起されたプラズマ電子の緩和時間(～数ピコ秒)以内に次の第2パルスが到着し、逆制動放射過程を経たプラズマ電子の励起がシングルパルス列に比べて促進されるためと考えた。加えて、 GeO_2 ガラスにおいても、フェムト秒レーザーを集光照射することで、ナノ周期構造の形成が示唆された。照射パルスエネルギーが 120 nJ 以上の場合、 O_2 分子によるものと考えられる 1555 cm^{-1} 付近にピークが観察され、照射部は金属 Ge と酸素ガスに分解されていると推測された。一方、120 nJ 以下の照射エネルギーの場合、その集光部に照射レーザーの偏光に垂直な方向に遅軸が現れており、石英ガラスで見られた構造的複屈折と同様の現象が観察された。

(2) 偏光イメージングセンサーの開発: 本研究で開発する偏光イメージングセンサーは、透過偏光方向が4方向で異なる偏光子アレイを石英ガラスに作り込む必要がある。このため、フェムト秒レーザーを石英ガラス内部に集光する際に自己組織的に形成される酸素欠陥から成るナノ周期構造(幅 20 nm、周期間隔 200 nm)が発現する構造的複屈折を利用する。構造的複屈折の位相差は、照射レーザーの諸条件(パルスエネルギー、描画速度、繰り返し周波数等)に依存する。特に、可視光領域で偏光子アレイとして機能させるためには、例えば波長 546 nm の光に対して 273 nm 以上の位相差を発現させる必要がある。このため、フェムト秒ダブルパルスと石英ガラスとの相互作用について評価した。特に、ダブルパルス間の遅延時間と繰り返し周波数がナノ周期構造由来の位相差に及ぼす影響を調査した。集光部に誘起される複屈折は、遅延時間、繰り返し周波数に依存し、同一のパルスエネルギーにおいても、遅延時間 10 ps、繰り返し周波数 50 kHz のときに最大となることを突き止めた。このような複屈折を最大にする条件は、励起される自己束縛励起子(STE)の形成ダイナミクス(寿命: ~ 600 ps)が影響しており、さらに、熱蓄積による集光部内での酸素欠陥の拡散および形成・消滅の結果として、最適な繰り返し周波数条件(50 kHz)があることを明らかにした。最終的に、 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ のサイズの偏光子をアレ

イ状に 10×10 個作製し、偏光イメージングセンサーとして機能することを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計20件)

- ① S. Nakashima, K. Sugioka, K. Tanaka, M. Shimizu, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Midorikawa and K. Mukai, Plasmonically enhanced Faraday effect in metal and ferrite nanoparticles composite precipitated inside glass, *Optics Express*, 査読有, Vol. 20, 2012, pp. 28191-28199.
DOI: 10.1364/OE.20.028191
- ② T. Tochio, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, M. Nishi, K. Hirao and K. Miura, Transient stress imaging after irradiation with a focused femtosecond laser pulse inside a single crystal, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 51, 2012, pp. 126602-1-6.
DOI: 10.1143/JJAP.51.126602
- ③ S. Zhou, T. Matsuoka, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, M. Nishi, Z. Hong, J. Qiu, K. Hirao and K. Miura, Localized control of light-matter interactions by using nanoscale asymmetric TiO₂, *Nanotechnology*, 査読有, Vol. 23, 2012, pp. 465704-1-6.
DOI: 10.1088/0957-4484/23/46/465704
- ④ Y. Shimotsuma, T. Asai, K. Miura, K. Hirao and P. G. Kazansky, Evolution of self-assembled nanostructure in glass, *Journal of laser micro/nanoengineering*, 査読有, Vol. 7, 2012, pp. 339-344.
DOI: 10.2961/jlmn.2012.03.0019
- ⑤ M. Yamaji, H. Kawashima, J. Suzuki, S. Tanaka, M. Shimizu, K. Hirao, Y. Shimotsuma and K. Miura, Homogeneous and elongation-free 3D microfabrication by a femtosecond laser pulse and hologram, *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 111, 2012, pp. 083107-1-7.
DOI: 10.1063/1.4705286
- ⑥ T. Tochio, M. Sakakura, S. Kanehira, Y. Shimotsuma, K. Miura and K. Hirao, Laser-induced transient stress distribution inside a single crystal by time-resolved birefringence imaging, *Proceedings of SPIE*, 査読無, Vol. 8243, 2012, pp. 82430E-1-8.
DOI: 10.1117/12.908186
- ⑦ Y. Ishikawa, Y. Shimotsuma, A. Kaneta, M. Sakakura, M. Nishi, K. Miura, K. Hirao and Y. Kawakami, Fabrication of photo-induced microstructure embedded inside ZnO crystal, *Proceedings of SPIE*, 査読無, Vol. 8243, 2012, pp. 82430N-1-7.
DOI: 10.1117/12.908190
- ⑧ M. Sakakura, T. Tochio, M. Shimizu, N. Yasuda, M. Ohnishi, K. Miura, Y. Shimotsuma and K. Hirao, Control of material properties by parallel laser irradiations at multiple laser spots using a spatial light modulator, *Proceedings of SPIE*, 査読無, Vol. 8243, 2012, pp. 824310-1-8.
DOI: 10.1117/12.912752
- ⑨ M. Shimizu, M. Sakakura, M. Nishi, Y. Shimotsuma, K. Hirao and K. Miura, Control of element distribution in glass with femtosecond laser, *Proceedings of SPIE*, 査読無, Vol. 8243, 2012, pp. 824400-1-6.
DOI: 10.1117/12.906644
- ⑩ M. Sakakura, N. Fukuda, Y. Shimotsuma, K. Hirao, K. Miura, Hologram design for holographic laser machining inside transparent materials, *Proceedings of SPIE*, 査読無, Vol. 8607, 2013, pp. 86070V-1-8.
DOI: 10.1117/12.2003829
- ⑪ D. Tan, Y. Yamada, S. Zhou, Y. Shimotsuma, K. Miura, J. Qiu, Photoinduced luminescent carbon nanostructures with ultra-broadly tailored size ranges, *Nanoscale*, 査読有, Vol. 5, 2013, pp. 12092-12097.
DOI: 10.1039/c3nr04392d
- ⑫ A. Stone, H. Jain, V. Dierolf, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao, Multilayer aberration correction for depth-independent three-dimensional crystal growth in glass by femtosecond laser heating, *Journal of the Optical Society of America B*, 査読有, Vol. 30, 2013, pp. 1234-1240.
DOI: 10.1364/JOSAB.30.001234
- ⑬ T. Watanabe, M. Shiozawa, E. Tatsu, S. Kimura, M. Umeda, T. Mine, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, M. Nakabayashi, K. Miura, K. Watanabe, A driveless read system for permanently recorded data in fused silica, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 52, 2013, pp. 09LA02-1-5.
DOI: 10.7567/JJAP.52.09LA02
- ⑭ M. Shiozawa, T. Watanabe, E. Tatsu, M. Umeda, T. Mine, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, M. Nakabayashi, K. Miura, K. Watanabe, Simultaneous multi-bit recording in fused silica for permanent storage, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 52, 2013, pp. 09LA01-1-4.
DOI: 10.7567/JJAP.52.09LA01
- ⑮ H. Okamoto, K. Kasuga, Y. Kubota, N. Nishimura, H. Kawamoto, K. Miyauchi, Y. Shimotsuma, K. Miura, White emission of Yb²⁺:fluoride glasses efficiently excited with near-UV light, *Optics Express*, 査読有, Vol. 21, 2013, pp. 22043-22052.
DOI: 10.1364/OE.21.022043
- ⑯ D. Tan, S. Zhou, B. Xu, P. Chen, Y.

Shimotsuma, K. Miura, J. Qiu, Simple synthesis of ultra-small nanodiamonds with tunable size and photoluminescence, Carbon, 査読有, Vol. 62, 2013, pp. 374-381.

DOI: 10.1016/j.carbon.2013.06.019

- ⑰ M. Sakakura, Y. Ishiguro, N. Fukuda, Y. Shimotsuma, K. Miura, Modulation of laser induced-cracks inside a LiF single crystal by fs laser irradiation at multiple points, Optics Express, 査読有, Vol. 21, 2013, pp. 26921-26928.

DOI: 10.1364/OE.21.026921

- ⑱ M. Sakakura, T. Kurita, M. Shimizu, K. Yoshimura, Y. Shimotsuma, N. Fukuda, K. Hirao, K. Miura, Shape control of elemental distributions inside a glass by simultaneous femtosecond laser irradiation at multiple spots, Optics Letters, 査読有, Vol. 38, 2013, pp. 4939-4942.

DOI: 10.1364/OL.38.004939

- ⑲ M. Sakakura, Y. Ishiguro, Y. Shimotsuma, N. Fukuda, K. Miura, Modulation of transient stress distributions for controlling femtosecond laser-induced cracks inside a single crystal, Applied physics A, 査読有, Vol. 114, 2013, pp. 261-265.

DOI: 10.1007/s00339-013-8142-0

- ⑳ D. Tan, S. Zhou, Y. Shimotsuma, K. Miura, J. Qiu, Effect of UV irradiation on photoluminescence of carbon dots, Optical Materials Express, 査読有, Vol. 4, 2013, pp. 213-219.

DOI: 10.1364/OME.4.000213

[学会発表] (計10件)

- ① Y. Shimotsuma, Evolution of self-assembled nanostructure in glass, The 13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication

発表年月日: 2012年6月15日

- ② Y. Shimotsuma, Optical anisotropy of self-assembled nanostructure in glass, 2012 Advanced Photonics Congress (招待講演)

発表年月日: 2012年6月20日

- ③ Y. Shimotsuma, Nanostructuring under ultrashort pulse laser irradiation, Progress In Electromagnetics Research Symposium

発表年月日: 2012年8月20日

- ④ 下間 靖彦, 超短パルスレーザーを利用したナノ物質創成の新展開, ナノファイバー学会第3回年次大会 (招待講演)

発表年月日: 2012年10月12日

- ⑤ 下間 靖彦, Avant-Garde femtosecond laser processing: From new phenomena to innovative devices, レーザー加工学会 (招待講演)

発表年月日: 2012年12月14日

- ⑥ Y. Shimotsuma, Photoinduced self-assembly of nanostructure in glass, Cargese 2013 (招待講演)

発表年月日: 2013年4月16日

- ⑦ 下間 靖彦, フェムト秒レーザーを利用した液相レーザーアブレーションによる機能性ナノ粒子の合成, 日本化学会 新領域「液相高密度エネルギー」ナノ反応場」第4回研究会 (招待講演)

発表年月日: 2013年5月31日

- ⑧ Y. Shimotsuma, Y. Yamada, M. Sakakura, K. Hirao, K. Miura, Nanoparticle synthesis by femtosecond laser ablation in liquid, CLEO-PR & OECC/PS 2013

発表年月日: 2013年7月2日

- ⑨ Y. Shimotsuma, T. Asai, M. Sakakura, K. Miura, Femtosecond-laser nanostructuring in glass, LAMP 2013

発表年月日: 2013年7月24日

- ⑩ 下間 靖彦, 超短パルスレーザー加工に関する最新の研究紹介, 精密工学会 生産自動化専門委員会 (招待講演)

発表年月日: 2013年10月25日

[図書] (計2件)

- ① 下間 靖彦, ナノインプリント/ナノ加工技術とオプトテクノロジー 第3節 フェムト秒レーザーによる微細周期構造の形成とその応用, 情報機構, 2012, 238-250.

- ② 下間 靖彦, ナノインプリント/ナノ加工技術とオプトテクノロジー 第5章 金属ナノワイヤー, シーエムシー出版, 2012, 182-200.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://func.mc.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

下間 靖彦 (SHIMOTSUMA Yasuhiko)

研究者番号:40378807

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号: