

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 29 日現在

機関番号：12201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656042

研究課題名(和文)ラジアル時空間レンズを用いたフェムト秒パルスの時空間制御と物質加工への応用

研究課題名(英文)Control of femtosecond laser pulses using a radial spatiotemporal lens and application to material processing

研究代表者

早崎 芳夫 (Hayasaki, Yoshio)

宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・教授

研究者番号：10271537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：回転対称な集光分布を有するラジアル時空間レンズを実験的に実証し、計算機シミュレーションにより集光特性を明らかにした。ラジアル時空間レンズは、アキシコンレンズと光軸の動径方向(ラジアル方向)に分光する素子である円形回折格子により構成され、中心波長800nm、スペクトル幅30nmのフェムト秒レーザーパルスを用いて、集光面のみで最短パルス幅になることを実証した。また、計算機シミュレーションを用いて、ラジアル時空間レンズで集光されたパルスが、時空間レンズと同様の軸方向特性を有しながら、回転対称の波面の干渉による光軸中心に生じた高いピーク光強度をもつベッセルビームとなることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We firstly proposed a diffractive spatiotemporal lens with a rotationally-symmetrical structure and demonstrate the focusing characterizations evaluated by a numerical simulation. The diffractive optical element gives a good solution for making the complex and dynamic structures for controlling dispersion and wavefront compensations. The diffractive spatiotemporal lens has a concentric diffractive grating that disperses a broadband ultrashort pulse to the radial direction from z axis as a key optical parts. Therefore, it is called as a diffractive radial spatiotemporal lens. The most important feature of the DRSTL is a circularly symmetrical simultaneous spatial and temporal focusing. It has the controllability of the lateral peak intensity distribution by changing the spatial frequency of the concentric diffractive grating.

研究分野：光工学

キーワード：時空間レンズ 2光子顕微鏡 フェムト秒レーザー 計算機プログラム 空間光変調素子 回折光学素子

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒レーザー加工は、その高い加工精度から、太陽電池や機能性ガラスの切断や穴空け等、環境光デバイスの製造行程の中で重要な役割を果たしており、その高精細化の要求は日増しに大きくなる。本研究は、レーザー加工技術の本来有する低排出性に加えて、フェムト秒レーザーの使用による光利用効率の極めて高い物質光励起と高い光軸分解能によって、光と物質との相互作用を効果的に増強するレーザー加工技術を開発し、グリーンイノベーションの一役を担う。

我々は、空間光変調素子に表示したホログラムでフェムト秒レーザーパルスを多数に分岐して、高スループット・高光利用効率な加工を実行するホログラフィックフェムト秒レーザー加工法を開発した[Appl. Phys. Lett. 87, 031101 (2005)]。

ホログラフィック時空間レンズは、上記の加工法におけるナノレベルの加工精度を実現させるために障害となる波長分散を解決する方法として産み出された [Opt. Lett. 35, 139 (2010)]。これまでに、ホログラムに本質的に存在する波長分散を補正できることと、光学系内の分散も同時に補正できることが実証された。しかしながら、我々の方法も含め、これまでの、全ての時空間レンズは、非対称な構造を有しているため、回折限界での集光が難しかった。

2. 研究の目的

本研究では、既存の非対称な時空間レンズに対して回転対称性を有するラジアル時空間レンズを開発する。さらに、この時空間レンズを用いて、高帯域のフェムト秒レーザーパルスを制御して、透明材料中に集光し、その高い集光性能を利用して、加工サイズの縮小を目指す。

3. 研究の方法

(1) 円形回折格子の作製とラジアル時空間レンズの集光特性の評価

横方向に対称な集光特性を有するラジアル時空間レンズを実現するためには、光軸の動径方向（ラジアル方向）に分光する素子が必要である。その一つである円形回折格子は、市販されていないため、特注か自作を必要とする。一般に、特注の回折素子は200万円以上と高価であるため、研究の過程の中で、試行錯誤しながら、何度も繰り返し製作することは現実的でない。そこで、自作することを計画し、レーザー露光と電子ビーム露光を用いて、円形回折格子を作製する。作製した円形回折格子を用いてラジアル時空間レンズを構築し、その集光特性を評価する。

(2) ラジアル時空間レンズの計算機シミュレーションによる特性評価

レンズパラメータの違いによる集光特性を明らかにすることを目的として、スカラー回折理論に基づく光伝搬計算による、計算機シミュレーションを実装する。

4. 研究成果

(1) 円形回折格子の作製

ホログラフィックフェムト秒レーザー加工法を用いて円形回折格子を作製した(図1)。このレーザー加工法は、大気中で加工可能で、複数点を同時加工するため、高いスループットを有する。加工線幅 $3\mu\text{m}$ 、直径 6mm で総延長 9m におよぶ加工を2時間で実行できた。1次回折効率は1.2%であった。

次に、電子ビーム露光装置 (ELIONIX 社製 ELS-6800) を用いて、レジスト (ZEP520A) パターンとして空間周波数 273.6lp/mm を有する、より高精細な円形回折格子を作製した。図2は、電子ビーム露光により作製された円形回折格子を示す。露光時間は48時間であった。

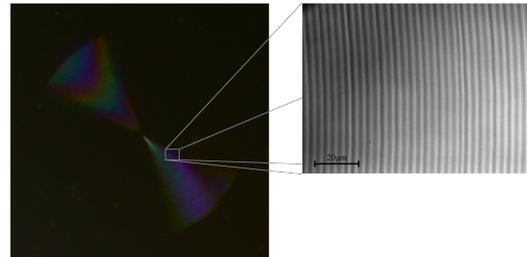


図1 ホログラフィックレーザー加工により作製された円形回折格子。

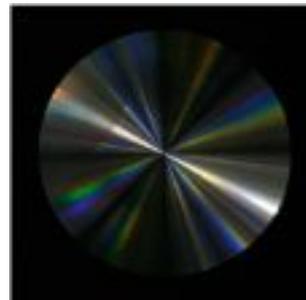


図2 電子ビームリソグラフィにより作製された円形回折格子。

図3は、白色光（メタルハライドランプ）を照射して分光した結果であり、図4は波長 632.8nm の He-Ne レーザーと波長 532nm の半導体レーザーを同軸で照射した時の回折パターンである。それぞれ、分光素子として機能したことが分かる。図4では、複数次数の回折光が観測された。次に示すパルス幅取得実験では、-1次回折光を除く回折光（0次光）をアパーチャによりカットして計測が行われた。1次回折効率は10%に向上した。



図3 円形回折格子への白色光照射 .

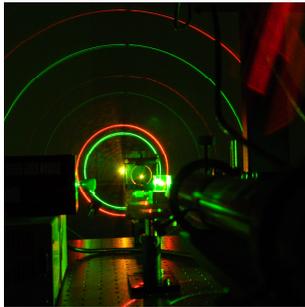


図4 円形回折格子へのHe-Neレーザーと緑レーザーの同軸照射 .

(2) 実験光学系と実験結果

作製された円形回折格子とアキシコンレンズで構成された回折型ラジアル時空間レンズの時空間同時集光の特性をフリンジ分解自己相関法により計測した．図5に実験光学系を示す．実験光学系は、再生増幅器フェムト秒レーザー、干渉計、ラジアル時空間レンズ、光検出器からなる．出射されたパルスは干渉系を用いて2分割され、パワーを調整されたのちにビーム径を縮小されてラジアル時空間レンズに入射された．-1次光を除く

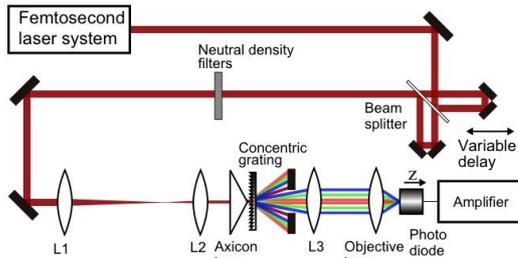


図5 実験光学系 .

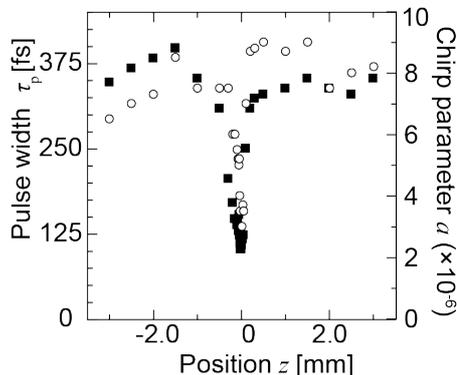


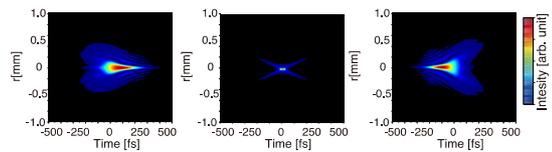
図6 光軸上のパルス時間幅 (黒点) とチャープパラメータ (白点) .

回折光はアパーチャによりカットされた．検出器は2光子吸収を利用したフリンジ分解自己相関法によるパルス幅取得を行うために、800nm に感度のない GaAsP フォトディテクタを用いた．フォトディテクタには1次元ステージが設置され、光軸方向に走査された．

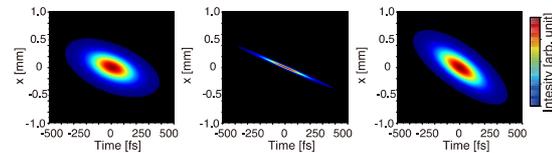
図6は、光軸上の各市における干渉波形から得られたパルス時間幅とチャープパラメータを示す．パルス幅は最大で412fsに伸長し、対物レンズの焦点に向かうにつれて急峻に縮小、対物レンズの焦点で最短の値を示した．このときのパルス幅は102fsであり、時空間集光に成功した．

(3) ラジアル時空間レンズの計算機シミュレーションによる特性評価

図7(a)-(c)はラジアル時空間レンズ、図7(d)-(f)は時空間レンズでの時空間強度分布である．両者における光軸からの距離に対する時間伸縮はほぼ同様の値を示し、 $z = 0\text{mm}$ では52fsとなった．時空間レンズでは周波数分布から導かれる通りにパルスフロントティルトが生じていた．特に $z=0\text{mm}$ (図7(e))においては時間短縮が生じていたため、パルスフロントティルトの効果が顕著に現れ、ピーク強度の時間局在が分光方向で場所ごとに異なった．一方、ラジアル時空間レンズでは周波数分布と同様に光軸から回転対称に時空間集光された．また、全方向からの干渉によりやはり中心に強い強度ピークを有した．以上の結果より、ラジアル時空間レンズの集光の縦横比は時空間レンズと比較して大きくなり、狭小な集光とった．ラジアル時空間レンズの特徴的な点として、時空間集光がな

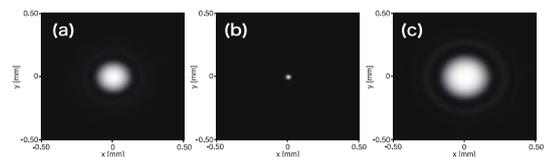


(a) $z = -30\text{mm}$ (b) $z = 0\text{mm}$ (c) $z = 30\text{mm}$



(d) $z = -30\text{mm}$ (e) $z = 0\text{mm}$ (f) $z = 30\text{mm}$

図7 再生面における時空間強度分布．(a) - (c) ラジアル時空間レンズ、(d) - (f) 時空間レンズ .



(a) $z = -30\text{mm}$ (b) $z = 0\text{mm}$ (c) $z = 30\text{mm}$

図8 ラジアル時空間レンズの横方向強度分布 .

れているにもかかわらず，中心干渉による強度ピークによって相対的に周囲のピークが減少するためにパルスフロントティルトの効果はほぼ現れないことが挙げられる．

図 8 に示すようにラジアル時空間レンズにおけるパルスの空間強度分布は光軸に対して円形対称である．また前方向からの干渉によりベッセルビームに近い形状を示すため，集光中心から外れた領域においてもサイドローブを有した．

図 9 に，光軸上におけるパルス幅分布を示す．分散光学系および結像光学系が同一である場合，ラジアル時空間レンズは，時空間レンズと同様に時空間同時集光を有することが示された．ラジアル時空間レンズと時空間レンズの結果がほぼ重なっている．

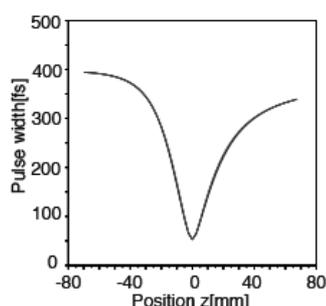


図 9 光軸方向パルス幅分布．

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 23 件)

- (1) Kazuki Sakuma, Satoshi Hasegawa, Hidetomo Takahashi, Michiharu Ota, Yoshio Hayasaki, “Holographic laser sweeper for in-process debris removal,” *Applied Physics B* (Jan. 2015) 10.1007/s00340-015-6011-6
- (2) Satoshi Hasegawa and Yoshio Hayasaki, “Holographic vector wave femtosecond laser processing (Invited paper),” *International Journal of Optomechatronics* Vol. 18, Iss. 2, 73-88 (2014).
- (3) Satoshi Hasegawa and Yoshio Hayasaki, “Dynamic control of spatial wavelength dispersion in holographic femtosecond laser processing,” *Optics Letters*, Vol. 39, Issue 3, 478-481 (2014).
- (4) Satoshi Hasegawa and Yoshio Hayasaki, “Polarization distribution control of parallel femtosecond pulses with spatial light modulators,” *Optics Express* Vol. 21, 12987-12995 (2013).
- (5) Satoshi Hasegawa and Yoshio Hayasaki, “Nonlinear sharpening of holographically processed sub-microstructures,” *Applied Physics A*, Vol. 111, Issue 3, 929-934 (2013).
- (6) Yoshio Hayasaki, Mitsuhiro Isaka, Akihiro Takita, Satoshi Hasegawa, and Saulius

Juodkazis, “Photo-acoustic sub-micrometer modifications of glass by pair of femtosecond laser pulses,” *Optical Material Express*, Vol. 2, pp. 691-699 (2012)

- (7) Yoshio Hayasaki, Maki Nishitani, Hidetomo Takahashi, Hirotsugu Yamamoto, Akihiro Takita, Daichi Suzuki, Satoshi Hasegawa, “Experimental investigation of the closest parallel pulses in holographic femtosecond laser processing,” *Applied Physics A* Vol. 107, No. 2, 357-362 (2012).

他 16 報

[学会発表](計 68 件)

(招待・依頼講演 21 件)

- (1) Yoshio Hayasaki, Holographic femtosecond laser processing, JSAP-OSA Joint Symposia (The 73rd JSAP Autumn Meeting, 2012) (Ehime Univ. & Matsuyama Univ., Sep. 11-14, 2012)
- (2) Yoshio Hayasaki and Satoshi Hasegawa, Parallel femtosecond laser processing with vector-wave control, *Progress in Ultrafast Laser Modifications of Materials*, (Cargèse, Corsica, France, 14-19 April 2013).
- (3) Yoshio Hayasaki, Holographic femtosecond laser processing, Light Conference International Conference on Frontiers of Laser Processing (ICFL2013) (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP), Changchun, China, July 8-10 2013).
- (4) Yoshio Hayasaki, “Holographic femtosecond laser processing,” International Conference on Optics & Optoelectronics, (Dehradun, India, March 5-8, 2014)
- (5) Yoshio Hayasaki, “Holographic femtosecond laser processing,” AOM2014 (Xi’an, China, Sep. 18-20, 2014).
- (6) Yoshio Hayasaki, “Invitation to holographic femtosecond laser nanofabrication,” □The annual International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO), (Taipei, Taiwan, 27-31 Oct, 2014).

(他 15 件)

(国際会議 19 件)

- (7) Ryo Iijima and Yoshio Hayasaki, “Radial spatiotemporal focusing with circularly symmetry,” The 9th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF’14), (Itabashi Culture Hall, Tokyo, Japan, February 12-14, 2014)
- (8) Ryo Iijima and Yoshio Hayasaki, “Radial Simultaneous Spatial and Temporal Focusing of Femtosecond Pulse,” 2013 Japan-Taiwan Bilateral Symposium in Nano/Bio-Photonics (JTBS), (Shizuoka University, Hamamatsu, Japan November 25-27, 2013).
- (9) Satoshi Hasegawa, Yoshio Hayasaki, “Liquid volumetric display with parallel optical access by computer generated

hologram,” OSA Topical Meeting Digital Holography and 3-D Imaging (DH) (The Fairmont Orchid, Kohala Coast, Hawaii, USA21 - 25 April 2013)

- (10) Satoshi Hasegawa and Yoshio Hayasaki, “Arbitrary polarization distribution control of parallel femtosecond pulses with spatial light modulators,” The 14th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2013) (Niigata, Japan, July 23–26, 2013).

(他 15 件)

(国内会議 28 件)

- (11) 飯島亮, 早崎芳夫, ラジアル時空間レンズ, 光設計グループ第 54 回研究会, (宇都宮大学, 2014 年 7 月 25 日).
- (12) 長谷川智士, 早崎芳夫, ホログラフィックベクトル波フェムト秒レーザー加工, 第 61 回 応用物理学会春季学術講演会 (青山大学, 2014 年 3 月 17-20 日).
- (13) 飯島亮, 早崎芳夫, 軸対称な回折格子を用いたラジアル時空間レンズ, 第 60 回 応用物理学会春季学術講演会 (神奈川工科大学, 2013 年 3 月 27-30 日)
- (14) 飯島亮, 長谷川智士, 杉坂純一郎, 早崎芳夫, ラジアル時空間レンズ, Optics & Photonics Japan 2012(タワーホール船堀 . 東京, 2012 年 10 月 23-25 日)
- (15) 長谷川智士, 早崎芳夫, ベクトル制御型並列フェムト秒レーザー加工, Optics & Photonics Japan 2012(タワーホール船堀 . 東京, 2012 年 10 月 23-25 日)

(他 23 件)

〔図書〕(計 2 件)

- (1) Yoshio Hayasaki and Satoshi Hasegawa, “Chapter 4: “Spatial and Temporal Manipulation of Ultrafast Laser Pulses for Micro- and Nano-Processing” in Ultrafast Laser Processing: From Micro- to Nanoscale (Edited by K. Sugioka and Y. Chen) (PAN STANFORD PUB)(2013.9)
- (2) Yoshio Hayasaki, “Chapter 8: Holographic Three-Dimensional Measurement of an Optically Trapped Nanoparticle” in Multi-dimensional Imaging (Edited by Bahram Javidi, Enrique Tajahuerce, Pedro Andres) (Wiley-IEEE Press, 2014.3), pp. 175-196.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: レーザ加工装置、レーザ加工方法、およびレーザ発振装置
発明者: 高橋秀知, 太田道治, 早崎芳夫, 長谷川智士
権利者: 国立大学法人宇都宮大学, アイシ

ン精機

種類: 特願

番号: 2013-150897

出願年月日: 2013 年 7 月 15 日

国内外の別: 国内

名称: レーザ加工装置、レーザ加工方法、およびレーザ発振装置
発明者: 高橋秀知, 太田道治, 早崎芳夫, 長谷川智士
権利者: 国立大学法人宇都宮大学, アイシ

ン精機

種類: PCT

番号: PCT/JP2014/003739

出願年月日: 2014 年 7 月 15 日

国内外の別: 国外

○取得状況 (計 1 件)

名称: レーザー加工装置
発明者: 早崎芳夫, 田北啓洋, 伊坂充弘
権利者: 国立大学法人宇都宮大学

種類: 特許

番号: 5357790

出願年月日: 2010 年 1 月 28 日

取得年月日: 2013 年 9 月 6 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

(研究代表者の受賞)

- (1) Satoshi Hasegawa, Yoshio Hayasaki, Koh Young Best Paper Award 2014 (2014 年 11 月).
- (2) Laval Virtual Awards (2015 年 4 月)

(共同研究者および学生の受賞)

- (1) 阿部哲也, 第 5 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, 優秀発表賞.(2015 年 3 月).
- (2) Kota Kumaga, DHIP2014 Outstanding Poster paper award, (2014 年 12 月)
- (3) Kazuki Sakuma, ICPEPA-9 Outstanding Student Paper Award (Poster), (2014 年 9 月).
- (4) Satoshi Hasegawa, SLPC2014 Outstanding Paper Award (Poster), (2014 年 4 月).

6. 研究組織

(1)研究代表者

早崎芳夫 (HAYASAKI Yoshio)

宇都宮大学・

オプティクス教育研究センター・教授

研究者番号: 10271537

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし