

令和 4 年 5 月 10 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04112

研究課題名(和文) 精密加工へ用いる時空間波形歪が補償された超短パルスビームアレイの生成法の研究

研究課題名(英文) Distortion-compensated multifocusing of ultrashort-pulsed laser beams for precision processing

研究代表者

尼子 淳 (Amako, Jun)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：20644628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：時空間における波形歪がない超短パルスビームアレイをつくる光学系を開発した。回折ビームスプリッターでパルスビームを分岐し、光学系の諸分散を調整して波形歪を除き、実用十分な長さのパルスビームアレイをつくる。このパルスビームアレイで材料の複数部位を並列に加工すれば、製造ラインで要求される加工スループットを達成できる。この研究成果により、工業製品に使われるさまざまな材料に対して、レーザーアブレーション過程の発熱を抑えた、孔開け、切断、接合等々の精密加工が高い生産性で実現される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は、回折ビームスプリッターで超短パルスビームアレイをつくる光学系の設計に関して、時空間のパルス波形歪を除くために不可欠な分散補償の考え方を示し、パルスビームアレイの均一性を議論するために必要な回折効率の定式化を行った点にある。一方で本研究成果の社会的意義は、超短パルスレーザーを用いた加工技術を製造ラインへ広く導入するための具体的な方策を提案し、この加工技術がもたらす製造プロセスにおける技術革新を通して製品の市場競争力の議論を可能にした点にある。

研究成果の概要(英文)：We have developed a novel optical system that splits an ultrashort-pulsed laser beam with a diffractive beam splitter to make a distortion-compensated pulse beam array in a practically significant length. Diffracted ultrashort pulse beams are distorted in space and time owing to the broad spectra of the pulses. Given that all distortions come from system dispersions, key to the pulse distortion compensation is dispersion management. Using simple formulas we designed the optical system in which hybrid lenses are of essence, which effectively manage material and angular dispersions of the system. Through system evaluations using 20-fs laser pulses, we have corroborated that the designed optical system is able to remove pulse distortions, thereby improving the spatio-temporal focusing resolutions of the system. The proposed pulse delivery technique enables high-throughput, non-thermal ablation of materials, thus contributing to industrial applications of ultrashort laser processing.

研究分野：光工学

キーワード：超短パルスレーザー ビームアレイ 回折光学 パルス波形整形 分散補償 色収差補正

1. 研究開始当初の背景

超短パルスレーザーを用いた精密加工の技術が注目されている[1, 2]。超短パルスに固有の非熱特性を利用すれば金属からガラスまで様々な材料を高精度に加工できる。この技術が広く産業へ応用されるには、製造に求められる加工精度と生産性が同時に満足されなければならない。一方で超短パルス光源の高出力化が進み、パルスビームを分岐して材料の複数部位を並列に加工できれば、パルスエネルギーは無駄にならず、加工スループットは上がる。レーザービームを分岐する手段としては回折ビームスプリッタが便利で、ナノ秒パルスレーザーを用いた加工では量産技術として使われている[3]。このような状況のもとで、回折ビームスプリッタを用いた超短パルスビームアレイの生成法に関する研究が関心を集めている。

しかし、超短パルスは広い波長帯域をもつため、回折されたパルスビームは空間軸でも時間軸でも歪む。図1に示すように、回折による角分散が色収差をつくり、ビームは回折方向に伸びる。時間軸でながめると、色収差がパルスのスペクトル帯域を狭くしてパルスを伸ばす。回折角に比例して波形歪は大きくなる。光学素子の材料であるガラスの材料分散によってもパルスは伸びる。このような波形歪を有するパルスで材料を加工すると、パルスの非熱特性が失われて熱的損傷が生じ、加工の品質は低下する。光軸近傍の狭い領域 (< 1mmx1mm) にパルスビームアレイをつくれれば、波形歪の加工への影響は小さいが、加工用途は制約される[4-6]。パルスビームアレイの拡大を目的とするさまざまな光学系が提案されているが、パルス波形歪はとりきれていない[7-9]。生産性の高い超短パルスレーザー加工技術を実現するために、波形歪が補償された超短パルスビームアレイの生成法が求められている。

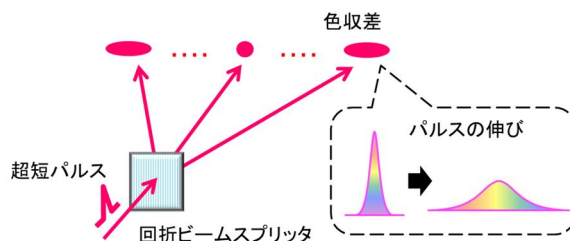


図1 回折された超短パルスに生じる波形歪

2. 研究の目的

本研究の目的は、時空間で波形歪のない超短パルスビームアレイをつくる光学系を開発することにある。この光学系で時間幅 30 fs 程度のパルスビームから長さ 3-5 mm のビームアレイをつくりたい。超短パルスの非熱特性を利用するにはパルスは短いほうが有利であるが[2]、製造ラインへの導入コストと稼働安定性の観点から前述のパルス時間幅を想定している。製造現場で要求される加工スループットを達成するには前述のビームアレイ長で足りる。

パルス波形歪を除く鍵は光学系が有する諸分散の調整にある。図2に、我々が提案するパルス搬送光学系の構成を示す。チャープミラー(CM)の後に、回折ビームスプリッタ(DBS)と回折集光レンズ(DFL)から成るフーリエ変換系を配置し、その後に対のハイブリッドレンズ(HL)から成るアフォーカル系を接続している。光学系の出口にあたる集光面に材料を置いて加工する。個々の光学要素はパルス波形歪を除くために必要なそれぞれの役割を担う。チャープミラーは入射パルスへ所要のチャープを与えてビーム径に依らないパルスの伸びを除く。回折ビームスプリッタと回折集光レンズを組み合わせて横方向の色収差を補正する。一对のハイブリッドレンズで縦方向の色収差を補正し、加えて、ビーム径に依存するパルスの伸び(パルスフロント歪)を除く。お互いの役割を補完するように光学素子を設計することにより、光学系の集光分解能は空間軸と時間軸の両方で大きく改善され、波形歪のない超短パルスビームアレイを実用十分な長さでつくることができる。

本研究の独自性は、1) 色収差を横方向と縦方向に分解して独立に補正する点と、2) ハイブリッドレンズを導入してレンズ形状に起因するパルスフロント歪を補償する点にある。横と縦の色収差を別々に補正することにより光学系の設計の見通しがよくなる。ハイブリッドレンズを用いると、分散調整におけるさまざまな制約が緩くなる。

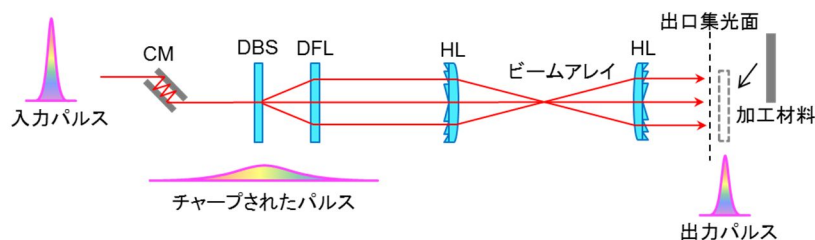


図2 提案するパルス搬送光学系の構成

3. 研究の方法

まず、パルス搬送光学系の基本設計に必要な定式化を行う。導出する諸式には、a)基本設計に必要な全てのパラメータを含み、パルス波形歪とパルス波長帯域幅（パルス時間幅の逆数）の関係をはっきり示すこと、b)光軸上を伝搬するビームとともに光軸外に回折されたビームにも使えること、が求められる。続いて、光学系の評価に使うパルスビームの条件を考慮し、導出した式を用いて光学系の構成を設計して、光学素子の仕様を決める。

分散調整で中心となる技術はハイブリッドレンズである。このレンズは回折面と屈折面から成り、これらの面がつくる色収差の正負ならびにパルスフロント歪の正負は逆である。したがって、回折面と屈折面をうまく組み合わせれば時空間のパルス波形歪を除ける。本研究の前に取り組んだプロトタイプの開発で得た知見によれば、屈折レンズだけではパルスフロント歪をとりきれず[10]、ハイブリッドレンズの導入が不可欠である。ハイブリッドレンズの設計では、色収差を補正する条件とパルスフロント歪を補償する条件が両立するように、回折レンズと屈折レンズのパラメータを各々最適化する。レンズの製作では、回折レンズと屈折レンズを別々に用意して、オプティカルコンタクトで接合する。この接合法は接着剤が不要なため、パルス波形への影響がない。オプティカルコンタクトが難しい場合には代替りの手段を探す。なお、ハイブリッドレンズを除く他の光学素子に関しては製作上の新たな課題はない。

製作した光学系を評価して、設計のとおりパルス波形歪が除かれることを検証する。評価には 20 fs のパルスビームを用い、光軸上と光軸外それぞれで、パルスビームの空間強度分布と時間幅を計測する。ビーム強度分布の計測には CCD カメラを使い、パルス時間幅の計測にはフリンジ分解自己相関干渉計を用いる。光学系のポテンシャルを知るために、パルス波形歪が補償される最大回折角を求める。生産性を左右する加工スループットを高めるには、ビームアレイを長くしたい、即ち、回折角を大きくとる必要がある。

4. 研究成果

設計の定式化、光学系の設計、製作と評価そして回折効率の定式化の順で研究の成果について述べる。詳細は引用文献 11 と 12 を参照されたい。

(1) 設計の定式化[11]: 光学系の基本設計に用いる便利な諸式を導出した。色収差とパルスフロント歪を波長の関数としてモデル化し、それぞれの関数をパルス中心波長の周りで級数展開して、一次近似により定式化した。導いた式は、a)色収差の補正とパルスフロント歪の補償のバランスのとおり方を教えてくれ、b)近軸領域を想定しているが、長さ 3-5mm 程度のパルスビームアレイには問題なく使える。市販の光学解析ソフトを「光学系の基本構想を練る」目的では使えない。そのような機能をそもそも備えていないからである。ただし、製作方法を考慮して基本設計を微修正するときに、光学解析ソフトは役に立つ。

(2) 光学系の設計と製作[11]: 導出した諸式を用いて光学系を設計した。設計条件は、中心波長 780 nm、パルス時間幅 20 fs (波長帯域幅 46 nm) である。入射ビーム径を 5.0 mm、回折集光レンズの焦点距離を 50 mm とした。ハイブリッドレンズを構成する屈折レンズと回折レンズの材料には石英ガラス (アッペ数 69) を選んだ。アッペ数が高いた方が分散を小さくするには有利であるが、回折面の製作に用いる半導体プロセスと相性のよい石英ガラスにした。ハイブリッドレンズの仕様については、全体の焦点距離が 150.3 mm、回折レンズの焦点距離が -1062.2 mm、屈折レンズの焦点距離が 132.2 mm、実効的アッペ数が 18 である。光学系の全長は 700 mm であり、プロトタイプのおよそ半分になった。光線追跡シミュレーションで光学系の色収差特性を調べたところ、波長 780 nm を中心に 46 nm を超える広い波長帯域で、パルスビームの集光位置はほぼ一定であることを確認した。光学系出口におけるパルス時間幅の計算値は 20.6 fs となり、ほとんど広がらずにパルスが搬送されることも確認できた。

ハイブリッドレンズの製作では、回折レンズと屈折レンズの間に空気ギャップを設けて鏡筒に組み込むことにした。ギャップが十分に小さければレンズ特性への影響はない。(当初はオプティカルコンタクトを考えたが、時間に制約がある中で技術課題を解決できないリスクに配慮して、接合方法を代えた。)回折レンズは平板上に形成し、屈折レンズは平凸レンズとした。レンズ直径は 40 mm、空気ギャップは 0.10 mm、回折面と屈折面の距離は 5.93 mm である。全ての界面に反射防止コートをつけて、反射迷光を防止して光利用効率を高めた。図 3 に、製作したハイブリッドレンズの構成と外観を示す。

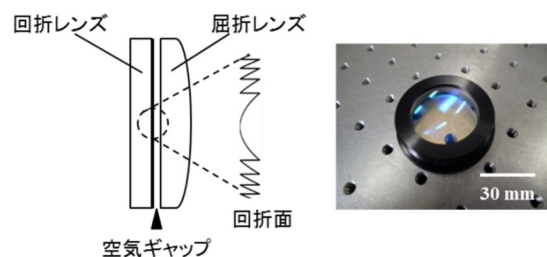


図3 ハイブリッドレンズの構成と外観

(3) 光学系の評価[11]: 繰り返し周波数 80 MHz で発振するモード同期チタンサファイアレーザーを評価に用いた。パルスの中心波長と時間幅は光学系の設計条件とほぼ等しく、パルスエネルギーは 4 nJ である。レーザーから出射された直線偏光パルスビームは TEM₀₀、ビーム径はチャープミラーの手前で 4.6 mm である。パルスエネルギーが小さいため、パルスビームを分岐してアレイを計測する代わりに、ブレイズ回折格子から得た+1 次回折ビームを計測した。回折角を 1.7° と 2.9° に選んだ。光軸からのビーム高さはそれぞれ 1.5 mm と 2.5 mm に相当する。パルスビームの空間強度分布の計測に使用した CCD カメラの感度波長域は 190–1320 nm、画素寸法は 4.4 μm × 4.4 μm である。パルス時間幅の計測では、回折角毎にプリチャープ量を調整して、ビーム径に依らないパルスの伸びを補償した状態で相関信号波形を取得し、この波形から解析的に時間幅を推定した。評価結果を項目別に以下に要約する。

集光点でのビーム幅: 光学系出口の近傍で、集光パルスビームの幅を CCD カメラで計測した(図4)。回折角が 0.0° (光軸上) 1.7°、2.9° いずれの条件でも、パルスビームは回折限界まで絞れていた。無収差のガウスビームを仮定して計算した集光ビーム径とも測定値はよく一致した。この評価から光学系の出口では色収差が補正されることを検証できた。

集光点でのパルス時間幅: 光学系出口において干渉計を用いて取得した相関信号波形からパルス時間幅を推定した。回折角が 0.0° (光軸上) 1.7°、2.9° の条件で推定されたパルス時間幅と入力パルスのパルス時間幅 (22 fs) との間には有意差は認められなかった(図5上)。この評価から光学系の出口ではパルスフロント歪が補償されることを検証できた。

なお、プロトタイプから得た相関信号波形には主ピークの外側にパルスフロント歪に起因する副ピークが認められ、パルス時間幅は 35 fs と推定された(図5下)。ハイブリッドレンズを用いた場合は、相関信号波形に副ピーク等のノイズは認められない。

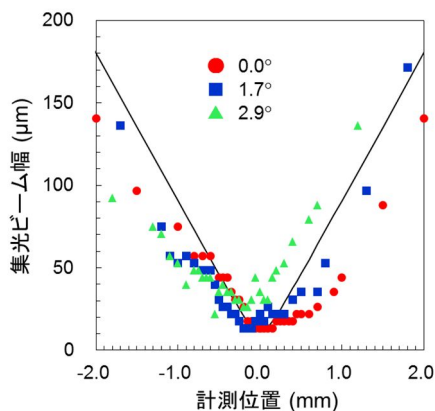


図4 取得した集光ビーム幅

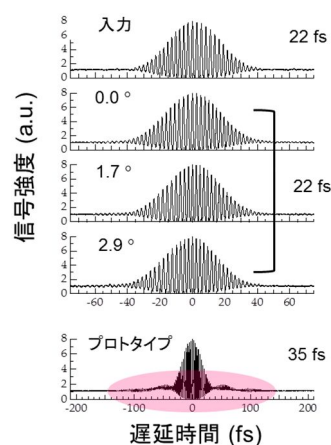


図5 取得した相関信号波形

パルスビームアレイの長さ: 回折ビームスプリッタを用いてパルスビームアレイをつくり、円形状の集光ビームが並ぶ範囲の長さを調べた。その結果、ほぼ等しいスポット径(18 μm)をもつ集光ビームが 4.0 mm の長さで得られることを確認した。アレイ長 4.0 mm は回折角 2.5° に相当する。ビームアレイを長くするために、アレイを構成する 33 本のパルスビームの間でパルス時間幅±1 fs 程度のばらつきを許容している。この評価では横方向にビームを分岐するスプリッタを使ったが、縦横にビームを分岐するスプリッタも使える。即ち、開発した光学系を使うと、直径 4.0 mm の円の中に縦横にパルスビームを並べることができる。

以上の結果が示すように、光学系の諸分散を調整することにより、色収差とともにパルスフロント歪も除かれ、光学系の空間分解能と時間分解能はどちらもほぼ限界まで向上する。他方、パルスビームアレイの長さは最大回折角で決まり、この角度は回折角に依存する位相遅延分散で制約される。この分散を補償する方法として、我々はパルスビームに与えるプリチャープヘオフセットを加える方法を提案した。上述したように、わずかな分散量すなわち小さなパルスの伸びを許容して最大回折角を広げることにより、パルスビームアレイを長くできる。(当初は光学系の中に位相差板を置いて位相遅延分散を補償することを考えた。しかし、分散補償とともにパルスビームの集光位置が光軸方向にずれてしまい、このずれを許容範囲内におさめるのは難しいことがわかったため、補償方法を代えた。)

開発した光学系は 20 fs より長いパルスビームでは問題なく使える。他方、20 fs より短いパルスビームに対してはパルスフロント歪が課題となり得る。現時点では実用的な選択とは言い難いが、10 fs のパルス光学系に通した場合、パルスフロント歪が許容値を超える。歪を減らすには、ハイブリッドレンズの構成をダブレットからトリプレットへ換える、レンズ材料を超低分散ガラスに換える等の工夫により、レンズの実効的アッペ数を調整する必要がある。

(4) 回折効率の定式化[12]: 均一なパルスビームアレイを提供する回折ビームスプリッタの設計には、スプリッタの回折効率を予測できる解析モデルが必要になる。レーザー加工へ広く使われる二値位相型回折ビームスプリッタをとりあげ、回折効率を算出する簡便な式を導出した。この式を用いて回折効率とパルス波長帯域幅(パルス時間幅の逆数)の関係を調べ、波

長帯域幅を考慮せずにスプリッタを設計した場合、a)パルスが短くなるとともにビームアレイの均一性が1からずれること、b)ビーム分岐数が多いほど均一性のずれが大きいこと、を明らかにした(図6)。図中の横軸は波長帯域幅 $\Delta\lambda$ を中心波長 λ_0 で割った値であり、20 fs は $\Delta\lambda/\lambda_0 = 0.059$ に相当する。 N はビーム分岐数である。これらの知見をもとにスプリッタを設計することにより、所望のパルス時間幅において、ビームアレイの中でパルスエネルギーを均等に分配できることがわかる。また、スプリッタの設計および製作では回折効率の誤差が生じるために、均一なビームアレイが得られる一方で、ビーム分岐数が制約されることもわかる。

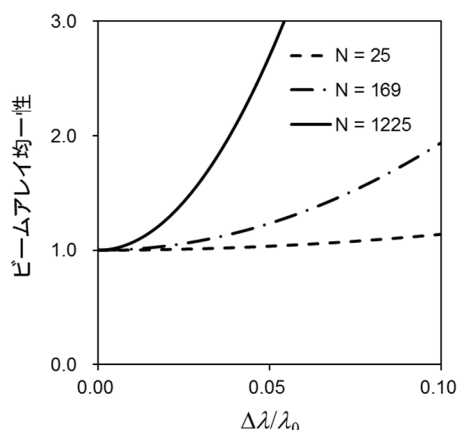


図6 ビームアレイ均一性とパルス波長帯域幅の関係

本研究では、時空間の波形歪がない超短パルスビームアレイをつくる光学系を開発した。この光学系は実用に足りる長さあるいは広さを有する超短パルスビームアレイを供給できる。超短パルスビームアレイを用いる並列加工に必要な、パルスエネルギーが~数 mJ を超えるフェムト秒レーザー装置はすでに商用化されている。回折ビームスプリッタに代えて空間光変調器を用いれば、駆動信号の更新だけでビームアレイの形や位置を自在に変えられるので、加工領域が平面から空間へと広がり、新奇な加工応用の創出にもつながる。本研究の成果により、工業製品に使われるさまざまな材料に対して、レーザーアブレーション過程の発熱を抑えた、孔開け、切断、接合等々の精密加工を高い生産性で実現できる。

< 引用文献 >

- 1) B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann, "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids," *Appl. Phys. A* **63**, 109–115 (1996).
- 2) B. Chimier, O. Uteza, N. Sanner, M. Sentis, T. Itina, P. Lassonde, F. Legare, F. Vidal, and J. C. Kieffer, "Damage and ablation threshold of fused-silica in femtosecond regime," *Phys. Rev. B* **84**, 0941041–0941049 (2011).
- 3) J. Amako and E. Fujii, "Beam delivery system with a non-digitized diffractive beam splitter for laser drilling of silicon," *Optics and Lasers in Eng.* **77**, 1–7 (2016).
- 4) Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka, and K. Hirao, "Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements," *Opt. Express* **12**, 1908–1915 (2004).
- 5) Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita, and N. Nishida, "Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator," *Appl. Phys. Lett.* **87**, 031101–031103 (2005).
- 6) A. Jesacher and M. J. Booth, "Parallel direct laser writing in three dimensions with spatially dependent aberration correction," *Opt. Express* **18**, 21090–21099 (2010).
- 7) G. Li, C. Zhou, and E. Dai, "Splitting of femtosecond laser pulses by using a Dammann grating and compensating grating," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 767–772 (2005).
- 8) S. Hasegawa and Y. Hayasaki, "Dynamic control of spatial wavelength dispersion in holographic femtosecond laser processing," *Opt. Lett.* **39**, 478–481 (2014).
- 9) R. Martinez-Cuenca, O. Mendoza-Yero, B. Alonso, I. J. Sola, G. Minguez-Vega, and J. Lancis, "Multibeam second-harmonic generation by spatiotemporal shaping of femtosecond pulses," *Opt. Lett.* **37**, 957–959 (2012).
- 10) J. Amako and H. Nakano, "Distortion-compensated multifocusing of ultrashort pulse beams using cascade optical system," *Appl. Opt.* **57**, 33–41 (2018).
- 11) J. Amako and H. Nakano, "Achromatic optical system with diffractive-refractive hybrid lenses for multifocusing of ultrashort pulse beams," *Opt. Express*, **29**, 4488–4503 (2021).
- 12) J. Amako and H. Nakano, "Formulation of diffraction efficiencies of binary phase gratings for array illumination with ultrashort pulse beams," *J. Opt. Soc. Am. A* **38**, 1696–1703 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Amako Jun, Nakano Hidetoshi	4. 巻 A 38
2. 論文標題 Formulation of diffraction efficiencies of binary phase gratings for array illumination with ultrashort pulse beams	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 1696 ~ 1703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1264/JOSAA.439269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Amako Jun, Nakano Hidetoshi	4. 巻 29
2. 論文標題 Achromatic optical system with diffractive-refractive hybrid lenses for multifocusing of ultrashort pulse beams	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 4488 ~ 4503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.412397	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 0件）

1. 発表者名 Amako Jun and Nakano Hidetoshi
2. 発表標題 Multifocusing of ultrashort laser pulses using dispersion control techniques based on hybrid optics
3. 学会等名 Optics & Photonics International Congress 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尼子 淳, 中野 秀俊
2. 発表標題 超短パルスビームアレイを発生させる二値位相格子の回折効率の定式化
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野 秀俊, 丸尾 恵介, 尼子 淳
2. 発表標題 ハイブリッドレンズを導入したカスケード光学系による時間的空間的歪のないフェムト秒パルスビームアレイ生成
3. 学会等名 第45回光学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸尾 恵介, 中野 秀俊, 尼子 淳
2. 発表標題 フェムト秒パルスビームアレイ生成のカスケード光学系におけるレンズ位置の許容範囲
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

尼子 淳 "精密加工へ用いる時空間波形歪が補償された超短パルスビームアレイの生成法に関する研究," 天田財団 平成29年度一般研究開発助成AF-2017215, 助成研究成果報告書 Vol. 33 (2020.11), https://www.amada-f.or.jp/report/k/k_2020.html.

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
研究分担者	中野 秀俊	東洋大学・理工学部・教授	
	(Nakano Hidetoshi) (90393793)	(32663)	

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
---------	---------