

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420059

研究課題名(和文) ナノマイクロ加工へ用いる時空間歪が補償された超短パルスビーム列の発生

研究課題名(英文) Distortion-compensated multifocusing of ultrashort pulse beams for nano- and micro-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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：時空間における波形歪のない超短パルスビーム列を生成するカスケード光学系を開発した。回折系の後に屈折系がカスケードに接続され、両者の間に位相差板が配置されている。パルスビームを回折光学素子で分岐すると、波形歪の主要因である色収差が生じる。この色収差を回折系と屈折系で補正し、角度分散を位相差板で補償する。系全体に残る材料由来の位相遅延分散は入力パルスへチャープを与えて補償する。光線行列解析により導出した色収差補正の条件を用いてカスケード光学系を設計した。20fsのパルスビームを用いた波形の評価から、提案したパルスビーム列生成法の有効性を検証した。この研究成果は超短パルス微細加工へ応用できる。

研究成果の概要(英文)：We have developed a cascade optical system for multifocusing of ultrashort pulse beams. The system consists of a diffractive subsystem, a refractive subsystem, and a phase plate located between them. The primary reason for pulse distortions is chromatic aberrations arising from a diffractive beam splitter. Two subsystems optically coupled in cascade correct chromatic aberrations and the phase plate compensates for angular dispersions, while remaining material dispersions are removed by pre-chirping the input pulse. We designed a prototype system for evaluation by applying the aberration correction conditions derived from a ray-matrix analysis. The designed system was evaluated with 20-fs pulses by characterizing the transmitted pulses in terms of spatial and temporal profiles to verify the proposed beam delivery scheme. This optical system, which has the potential to be extended to sub-20 fs, enables thermal-free and high-throughput nano-and micro-processing using ultrashort pulses.

研究分野：光工学

キーワード：超短パルス ビーム列 回折光学 光学設計 光線行列解析

1. 研究開始当初の背景

超短パルスレーザーを用いた微細加工技術の研究が注目されている。この技術が広く産業へ応用されるには、製造に要求される加工の精度と生産性が満足されなければならない。超短パルスの非熱特性を利用すれば高精度な加工が可能であるが、そのためには50fs以下のパルス幅が求められる[1]。一方で超短パルス光源の高出力化が進んでおり、パルスビームを分岐して素材上の複数部位を並列に加工すれば、パルスエネルギーを無駄にすることなく、生産性を高めることができる。レーザーの分岐手段としては回折光学素子が使いやすく、連続発振レーザーやナノ秒パルスを用いた加工では普及している。

しかし、超短パルスビームへ回折光学素子を作用させる場合には問題が生じる。超短パルスは波長帯域を有するため、図1に示すように、回折されたパルスの空間波形(空間強度分布)と時間波形は歪む。空間波形が歪む主要因は回折により生じる横方向と縦方向の色収差にある。と同時に、色収差によりパルスのスペクトル形状が変調され(スペクトルの狭帯域化)、パルス幅が広がる。サブピコ秒や100fs程度のパルスの場合、光軸のごく近傍にパルスビーム列を生成すれば、加工における歪の影響は小さい[2-4]。ただし、加工用途は制約される。パルス波形歪を低減するための工夫については、二枚の回折光学素子を組み合わせた種々の光学配置が報告されている[5-7]。しかし、空間軸と時間軸の両方で波形歪を補償するには至っていない。パルス幅に反比例して波長帯域は大きく広がるため、50fsより短いパルスを回折光学素子で分岐する場合には、歪補償が不可欠となる。回折レンズと屈折レンズを組み合わせたハイブリッド光学系が提案されているが[8]、歪補償の精度に関して、理論予測と実験結果との間には隔りがある[9, 10]。

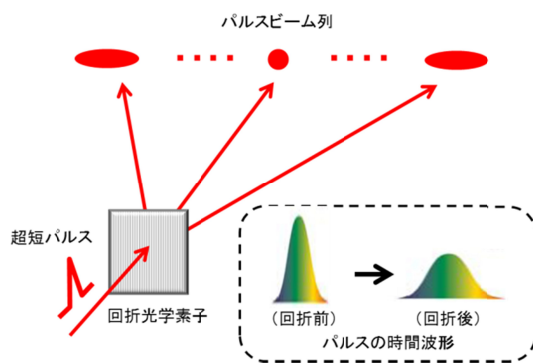


図1. 回折光学素子で生成された超短パルスビーム列に生じる空間波形(空間強度分布)の歪と時間波形の歪。

2. 研究の目的

超短パルスレーザーの産業応用をめざし、時空間における波形歪のない超短パルスビ

ーム列を生成する光学系を開発する。この光学系では、パルスビームの分岐手段として回折ビームスプリッタを用いる。光学系を設計するために、簡便で見通しの良い設計手法を提案する。提案した設計手法を使い、光学系の配置とそれを構成する光学要素を設計する。設計した光学系を試作し、時空間における歪補償の精度について、光学系の性能を評価する。パルス幅の観点から、光学系の応用上の限界についても考察する。評価と考察をふまえ、光学系の有用性を議論する。

光学系の設計と評価においては、パルス幅20fsを想定した。熱損傷のない高精度な加工を実現するには、パルスと材料の反応における統計的不確定さを除くことが肝要である。そのためにはパルス幅は50fs以下であることが求められ、短いほど加工精度は上がる。しかし、製造ラインにおける導入コストと稼働安定性にも配慮すると、パルス幅数fsの超短パルス増幅システムは現実的でない。

3. 研究の方法

まず、20fsパルスビーム列生成のための光学系の基本構想を描く。この構想の柱は、横色収差の補正と縦色収差の補正を分離して、光学系を構成する光学要素の位置合わせの難しさを軽減し、色収差補正の精度を確保する点にある。回折により生じる色収差を除くために、回折系と屈折系の相補的な組み合わせを検討する。

設計手法に関しては、幾何光学における光線行列[11]を活用し、色収差補正の条件を導出する。行列解析手法は近軸領域を想定しているが、数度の回折角には対応できるので、光学系の実用を制限するものではない。色収差を波長で級数展開して、一次近似により補正条件式を導く。二次以上の項は十分小さいので、一次近似の下で光学系の作用を検証し、その有用性を議論することは問題ない。波動光学を用いた大規模な数値シミュレーションを実行すれば、回折されたパルスの時空間における挙動を正確に予測可能である。しかし、光学設計のツールとしては使いにくく、実用性に欠ける。

評価に用いるパルスビームの諸元 - パルス幅、中心波長、そして波長帯域幅 - を考慮し、色収差補正の条件を用いて光学系を設計する。パルスビームの分岐と集光に用いる光学要素については、できるだけ広い波長範囲で高い光利用効率を得られ、かつ、効率の偏光依存性が極力小さいものを用意する。

設計した光学系を試作し、その性能を評価する。光学系の出力面の近傍において、パルスビームの空間強度分布と時間波形を計測する。空間強度分布の計測には、所要の感度波長帯域と空間分解能を有するCCDカメラを用いる。パルスの時間波形を計測するために、マッハツェンダー干渉計を利用したフリンジ分解自己相関器を構築する。

4. 研究成果

20fs パルスビームを分岐する新規な光学系（カスケード光学系と称する）を提案した。光学系の構成を図2に示す。回折系の後に屈折系をカスケードに接続して、両者の間に位相差板を配置する。焦点面 F_2 （加工面）に所望のパルスビーム列を得る。回折系は回折ビームスプリッタ（DBS）と回折レンズ（DL）から成り、屈折系は一对の球面レンズ（ L_1, L_2 ）から成るアフォーカル系とする。位相差板（PP）は焦点面 F_1 から少しはずれた場所に置く。位相差板の表面には微小な段差が形成されている。

カスケード光学系の機能に関しては、回折系で横の色収差を補正し、屈折系で縦の色収差を補正する、そして、位相差板で角度分散を補償する。主に屈折系に起因する材料分散の影響は、回折系に入れるパルスヘプリチャープを与えて補償する。カスケード光学系の出力面 F_2 では、色収差が補正され、位相遅延分散も補償されるので、空間軸でも時間軸でも均一なパルスビーム列が生成される。加えて、このパルスビーム列は入力パルスと同程度のパルス幅をもつ。図中に、入力パルス波形、プリチャープ後のパルス波形、そしてカスケード光学系の出力面におけるパルス波形を模式的に示した。

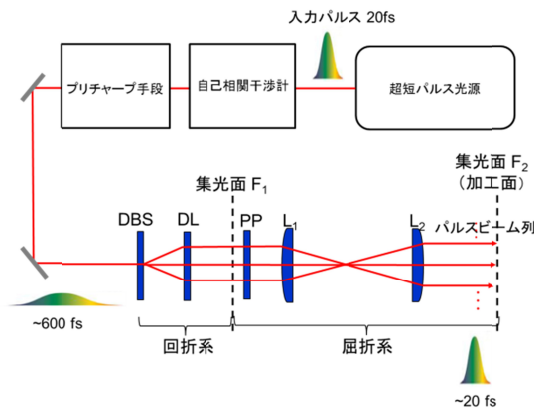


図2 .パルス幅 20fs のパルスビーム列を生成するためのカスケード光学系の模式図

光線行列を用いた設計手法を提案し、色収差補正に必要な諸式を導出した。回折系では、横色収差を補正する条件は以下の式で与えられる。

$$(f_{d0} - s) \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right) u_0 = 0 \quad (1)$$

ここで、 s はスプリッタと回折レンズの距離、 f_{d0} は中心波長 λ_0 における回折レンズの焦点距離である。式(1)からわかるように、 $s=f_{d0}$ の条件において、回折角度によらず、横色収差が消える。この条件では、回折系は疑似的なフーリエ変換光学系となり、分岐されたパルスビームは互いに平行に伝搬する。集光面 F_1 における集光パルスビームは、回折角によ

らず、等しいビーム径を有する。と同時に、等しい縦の色収差も有する。このような空間的並列性を分岐ビーム間へ導入することにより、後続の屈折系を用いて縦色収差を消すことが可能となる。

屈折系において、縦色収差が消える条件は以下の式で与えられる。

$$f_{d0} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right) + \left(\frac{f_{10}}{f_{20}} \right) (f_{10} + f_{20}) \left(\frac{\Delta n}{n_0 - 1} \right) = 0 \quad (2)$$

ここで、 f_{10}, f_{20} はレンズの屈折率、 n は λ に対する屈折率差、 n_0 は λ_0 における屈折率である。式(2)からわかるように、実用的な寸法で屈折系を実現するには、分散の大きなレンズ硝材を選ぶことが必須となる。回折系で導入された分岐ビーム間の並列性は屈折系においても保存される。この並列性のゆえに、入力パルスヘプリチャープを与えることで、分岐パルスに残された、硝材に起因する位相遅延の分散補償が可能となる。

回折系で生じる角度分散を位相差板で補償する条件は以下の式で与えられる。

$$\left(\frac{f_{d0}}{c} \right) \left(\frac{1}{\omega_0} \right) u^2 + \left(\frac{t}{c} \right) (2\dot{n} + \omega_0 \ddot{n}) = 0 \quad (3)$$

ここで、 c は光速、 t は板厚、 \dot{n}, \ddot{n} は硝材の屈折率を波長で微分した1次と2次の係数である。式(3)からわかるように、角度分散は回折角の二乗に比例して大きくなるので、屈折率分散の大きな材料で位相差板を形成することにより、表面の段差を実現容易な程度に小さくできる。

導出した色収差補正の条件を用いて、原理検証のためのカスケード光学系を設計した。考慮したパルス条件は、パルス幅 20fs、中心波長 780nm、波長帯域幅 ± 30 nm である。ビーム列の長さは 5.0mm とした。回折ビームスプリッタの代わりに、1次のブレース回折格子を用いた。実験に用いるパルス光源の出力に制約があり、パルスビームを多分岐できないためである。周期が $26.0\mu\text{m}$ と $15.6\mu\text{m}$ の回折格子を厚み 1.0mm の石英ガラス基板上にフォトリソグラフィで作製した。回折角は 1.7° と 2.9° であり、1次回折効率は $>90\%$ である。回折レンズの焦点距離を 50mm とし、式(1)から、回折格子と回折レンズの距離を 50mm と定めた。断面形状をブレース化した回折レンズをフォトリソグラフィで石英ガラス上に作製した。有効面積は $>10\text{mm}^2$ 、集光効率は $>90\%$ である。回折角 2.9° のパルスビームが入射する位置のレンズ周期は $16\mu\text{m}$ である。回折格子も回折レンズも Raman-Nath 領域で機能するように設計した。素子の Q 値は 10^2 となり、高い回折効率が広い波長範囲で得られる[12]。この性質によりスペクトルの狭帯域化が抑えられるので、パルス幅が不要に広がるリスクは避けられる。回折効率の偏光依存性もほとんどない。

レンズ試作のために選んだ硝材は E-FDS3(HOYA)である[13]。この硝材の屈折率

分散は一般的な硝材である BK7 の分散と比べて一桁以上大きい。E-FDS3 のアッペ数は 44.9、波長 780nm の屈折率は 2.066、波長差 60nm に対する屈折率差は 0.00739 である。等倍率のアフォーカル系を仮定し、式(2)から、レンズ L_1, L_2 の焦点距離を 287mm と決めた。試作したレンズの諸元は、レンズ径 50mm、中心厚 4.1mm、曲率 296.4mm である。設計に用いる屈折率は Laurent の式を用いて波長の関数として求めた。この屈折率から硝材の群遅延分散を $409\text{fs}^2/\text{mm}$ と算出し、アフォーカル系全体の群遅延分散を 3350fs^2 と推定した。この分散を相殺するために、回折系へ入力する 20fs のパルスへプリチャープを与えた。プリチャープの手段として、一对の分散補償鏡を用いた。反射回数でチャープ量を調整したため、分散補償には最大 $\pm 50\text{fs}^2$ 程度の誤差が生じた。プリチャープによりパルス幅は 620fs まで広がり、ピーク強度は $1/30$ に低下するので、位相差板がパルス照射により損傷をうけることはない。

本研究では、石英ガラスの平行平板を位相差板の代わりに用いた。平板の厚みは 5.0mm であり、 177fs^2 の群遅延分散を給する。この分散量は回折角 2.9 度における角度分散に相当する。レンズで生じる角度分散は、回折格子で生じる分散の $1/20$ 程度である。位相差板のひとつの形態として、オプティカルコンタクトで薄板を貼り合わせれば、接着剤を使用することなく作製できる。レンズ硝材と同じ E-FDS3 を位相差板の基材として用いれば、式(3)から、その段差は回折角度 2.9 度に対して 0.43mm となる。

チタンサファイア超短パルス光源 (TFS-1, NEW FEMTO)、フリンジ分解自己相関器、プリチャープ手段そしてカスケード光学系から成る評価系を光学ベンチ上に構築した。繰り返し 80MHz で出射されるパルスの諸元は、パルスエネルギー $\sim 1\text{nJ}$ 、パルス幅 22fs 、中心波長 780nm 、波長帯域幅 $\pm 25\text{nm}$ である。パルスビームの空間モードは TEM_{00} 、直線偏光を有し、ビーム直径は回折系の入口にて 2.5mm である。パルスビームの空間強度分布の測定には、高精細 CCD カメラを搭載したビームプロファイラ (BeamOn, DUMA OPTRONICS) を用いた。プロファイラの感度波長帯域は $350\text{-}1100\text{nm}$ 、画素寸法は $8.6\mu\text{m}\times 8.3\mu\text{m}$ である。パルス時間波形の計測では、自己相関器を通過した二本のパルスビームを、位相整合条件が満足されるように、集光面 F_2 に置いた非線形光学結晶 (BBO) へ入れた。BBO から放射された第二高調波を IR 除去フィルタを介してフォトダイオードへ結像し、出力信号をデジタルオシロスコープ (DS-5624A, IWATSU ELECTRIC) により周波数 250Hz でサンプリングして相関波形を取得した。自己相関器の掃引周波数は 0.025Hz 、掃引幅は $\pm 50\mu\text{m}$ である。

カスケード光学系を組み立てる過程で、集光面 F_1 において、回折角によらず、等しい

大きさの集光ビーム径が得られること (分歧ビーム間の並列性) を確認している。回折系と屈折系を接続する際の位置合わせ誤差として $\pm 1\text{mm}$ 程度は許容できることもわかっている。この実験では、パルスの計測はパルス発振モードで行い、光学要素の位置合わせは連続発振モードで行った。

カスケード光学系を評価し、横縦の色収差が補正されることを確認した。図 3 に、 F_2 の近傍における集光スポット径の実測値を示す。比較のために、回折レンズで得た集光スポット径を示した。回折レンズの場合は、回折による色収差のせいで、検出位置のゼロ点を中心に $\pm 2\text{mm}$ の範囲で、集光スポット径はほとんど同じである。他方、カスケード光学系で得た集光スポット径は、光軸上 (回折角 0.0°) でも光軸外 (回折角 1.7° と 2.9°) でも、焦点近傍では回折限界近くまで絞れている。焦点から少しはずれると、集光スポット径は敏感に大きくなる。直交する二方向における集光スポット径の測定値の間に有意差は認められなかった。これらの結果は、カスケード光学系の集光面 F_2 において、集光パルスビームの色収差が補正されていることをはっきりと示すものである。

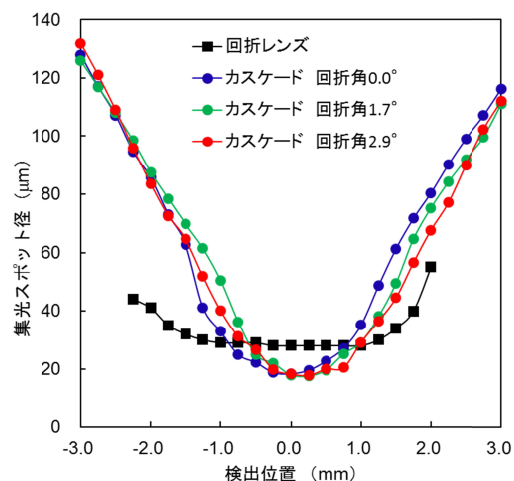


図 3 . 集光パルスビームのスポット径。

カスケード光学系を使うと、パルス幅の不要な広がりを補償できることも確認した。図 4 に、自己相関波形の測定結果を示す。比較基準となるパルス幅 22fs の入力パルスの相関波形を図 4 (a) に載せた。この波形のピーク幅 (縦軸の高さ 4.0 での波形幅) は 35fs である。回折レンズで光軸上に集光したパルスから得た相関波形は大きく広がり、ピーク幅は 82fs であった (図 4 (b))。他方、カスケード光学系から得た相関波形におけるピーク幅は、回折レンズのその半程度であり、光軸上の集光パルスに対しても、光軸外の集光パルスに対しても 41fs であった (図 4 (c)(d)(e))。これらの結果は、回折そして集光されたパルスビームに生じる色収差をカ

スケード光学系で補正することにより、位相遅延分散の補償も可能になることを示すものである。図4(c)(d)(e)の相関波形に認められるペダスタルは、屈折系に残存する3次の位相遅延分散に起因する。この3次分散のために、線形チャープパラメータ[14]によるパルス幅推定法をそのまま使うことは妥当ではないと考え、波形ピークの幅を直接比べて、分散補償の効果を検証した。プリチャープによる分散補償の精度を改善することで、3次分散を除くことができる。

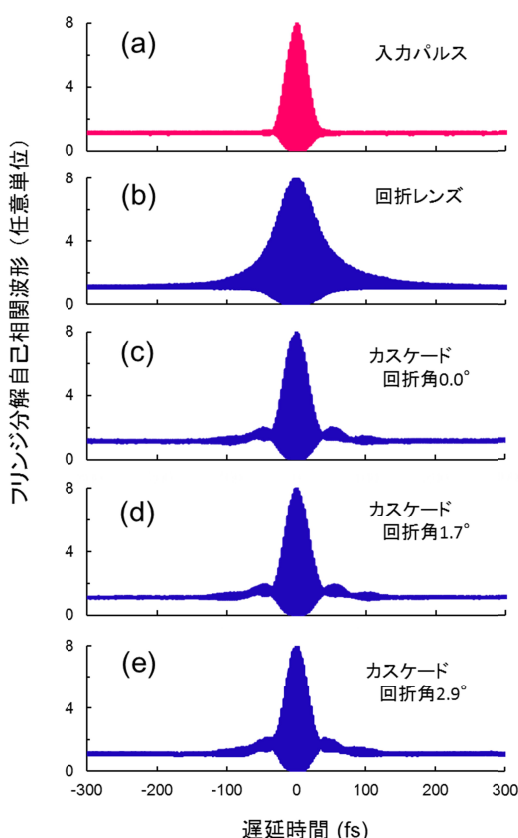


図4 集光パルスの自己相関波形:(a)パルス幅 22fs の入力パルス, (b)回折レンズで集光したパルス, (c)カスケード光学系で光軸上に集光したパルス (回折角 0.0°), (d)カスケード光学系で光軸外に集光したパルス (回折角 1.7°) (e)カスケード光学系で光軸外に集光したパルス (回折角 2.9°)。

以上の評価結果から、カスケード光学系を用いると、時空間の波形歪を補償しつつ、20fs のパルスビーム列を生成できると結論する。カスケード光学系の歪補償の機能は、20fs 以下のパルスに対しても有効である。色収差補正の条件である式(1)(2)は、光学系の配置とレンズ硝材の分散特性から自動的に満足される。また、カスケード光学系の構成要素である回折ビームスプリッタと回折レンズの回折効率特性が波長に対してほぼ不感であることから、10fs パルスの波長帯域幅 140nm 程度であれば、スペクトルの狭帯域化によるパルスの広がりは無視できる。

国内外における超短パルスを用いた並列加工に関する多くの研究では、 ~ 100 fs パルスを用いている。パルスビーム列でシリコンウエハの表面へ文字をマーキングした事例[3]や透明材料の内部へ導波路を形成した事例が報告されている[4]。これらの事例では、パルスを分岐する手段として空間光変調器が使われ、ビーム列のパターンを時々刻々と変えながら加工する点に技術の特徴がある。光軸近傍の微小領域に加工が限定されているため、パルスビーム列に生じる波形歪の加工への影響は小さい。他方で、パルス幅 50fs 以下の条件で、長さ数 mm のパルスビーム列の生成を目的とした研究は、引用文献[8-10]の他にはみあたらない。この研究でも、多分岐パルスにおける歪補償の精度については、理論値と実測値の隔たりが大きい。入力パルス幅が 28fs の条件で、回折角 1.6° における出力パルス幅は 63fs まで広がるとの結果が報告されている[10]。

本研究を通じて、20fs のパルスビームから、時空間の波形歪が補償されたパルスビーム列を発生させる目的が得られた。開発したパルスビーム分岐技術を用いると数 mm 長のビーム列を容易につくれるので、超短パルスレーザーを活用したナノマイクロ加工技術の実用に向けた議論ができるようになる。今後はパルスビームの多分岐が可能な光学系を試作し、パルス幅 20fs の増幅システムを用いたレーザー加工へ同光学系を試し、加工の精度と生産性に関する評価を行う。開発技術の価値はその使いみちで決まると考えており、産業界のニーズを先取りしつつ、従来プロセスの代用ではない、付加価値の高い加工用途を開拓したい。

<引用文献>

- 1) 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).
- 2) 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).
- 3) Z. Kuang, W. Perrie, J. Leach, M. sharp, S. P. Edwardson, M. Padgett, G. Dearden, and K. G. Watkins, "High throughput diffractive multi-beam femtosecond laser processing using a spatial light modulator," *Appl. Surf. Sci.* **255**, 2284-2289 (2008).
- 4) M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuna, K. Miura, and K. Hirao, "Fabrication of three-dimensional 1x4 splitter waveguides inside a glass substrate with spatially phase modulated kaser system," *Opt. Express* **18**, 12136-12143 (2010).

- 5) J. Amako, K. Nagasaka, and K. Nishida, "Chromatic-distortion compensation in splitting and focusing of femtosecond pulses by use of a pair of diffractive optical elements," *Opt. Lett.* **27**, 969-971 (2002).
- 6) G. Li, C. Zhou, and E. Dai, "Splitting of femtosecond laser pulses by using a Dammann grating and compensation grating," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 767-772 (2005).
- 7) S. Hasegawa and Y. Hayasaki, "Dynamic control of spatial wavelength dispersion in holographic femtosecond laser processing," *Opt. Lett.* **39**, 478-481 (2014).
- 8) G. Minguez-Vega, J. Lancis, J. Caraquitena, V. Torres-Company, and P. Andres, "High spatiotemporal resolution in multifocal processing with femtosecond laser pulses," *Opt. Lett.* **31**, 2631-2633 (2006).
- 9) G. Minguez-Vega, E. Tajahuerce, M. Fernandez-Alonso, V. Climent, J. Lancis, J. Caraquitena, and P. Andres, "Dispersin-compensated beam-splitting of femtosecond light pulses: Wave optics analysis," *Opt. Express* **15**, 278-288 (2007).
- 10) 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).
- 11) A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals* (John Wiley & Sons, 2003), p.34.
- 12) T. Shiono, T. Hamamoto, and K. Takahara, "High-efficiency blazed diffractive optical elements for the violet wavelength fabricated by electron-beam lithography," *Appl. Opt.* **41**, 2390-2393 (2002).
- 13) <http://www.hoya-opticalworld.com/english/d/atadownload/index.html>
- 14) J. -C. Diels and W. Rudolph, *Ultrashort Laser Pulse Phenomena*, 2nd ed. (Elsevier, 2006), p.464.

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 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

尼子 淳、中野 秀俊、20fs パルスビームアレイ生成のためのカスケード光学系の提案、第 64 回応用物理学会秋季学術講演会、2017 年 3 月 15 日、パシフィコ横浜国際会議場
中野 秀俊、村上 拓、上田 義人、尼子 淳、カスケード光学系による 20fs レーザーパルス集光特性、第 64 回応用物理学会秋季学術講演会、2017 年 3 月 15 日、パシ

フィコ横浜国際会議場

中野 秀俊、尼子 淳、回折光学素子対によるフェムト秒レーザーパルスビーム配列生成ならびに集光特性の評価、電気学会 光・量子デバイス研究会、2016 年 9 月 20 日、産業技術総合研究所(つくば市)
中野 秀俊、佐藤 慎、竹田 州、尼子 淳、回折光学素子対により集光されたフェムト秒レーザーパルス幅の評価、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016 年 3 月 21 日、東京工業大学(大岡山キャンパス)
中野 秀俊、菅野 貴行、小林 誠也、尼子 淳、回折レンズによるフェムト秒レーザーパルスのパルス幅伸張の評価、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、2015 年 9 月 14 日、名古屋国際会議場

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：レーザー加工方法及びレーザー加工装置

発明者：尼子 淳、中野 秀俊

権利者：同上

種類：特許

番号：特許願 2014-248683

出願年月日：平成 26 年 12 月 9 日

国内外の別：国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

<http://researchmap.jp/g0000212018/>

<http://researchmap.jp/g0000211128/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

中野 秀俊 (NAKANO, Hidetoshi)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：90393793

(3) 連携研究者

()

研究者 :

(4) 研究協力者

村上 拓 (MURAKAKI, Takumi)

上田 義人 (UEDA, Yoshihito)

佐藤 慎 (SATO, Shin)

竹田 州 (TAKEDA, Shu)

菅野 貴行 (KANNO, Takayuki)

小林 誠也 (KOBAYASHI, Masaya)