

令和元年6月4日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04975

研究課題名(和文) 非線形光学効果を用いた高出力ベクトルレーザービームの短波長化と偏光状態の多様化

研究課題名(英文) Wavelength shortening and polarization-state diversification of high-power vector laser beams with nonlinear optical effects

研究代表者

張本 鉄雄 (HARIMOTO, Tetsuo)

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：80273035

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：エルミートガウシアンビームに対応する第二高調波発生に関する非線形波動方程式の数値計算コードに偏光回転をベクトル量に対応させると同時に、ベクトルビームの空間分布と偏光分布及び方位方向の位相分布を新たに加えた。複雑な偏光状態のベクトルビームを用いた非線形光学の理論及び数値解析に必要な基礎的な数値解析手段を確立できた。また、二つのマイケルソン干渉計を同一の光学系で立体的に構成したヤング・ツインマイケルソン干渉計を考案し、レーザービーム波面の安定した計測の可能性を検証する実験では、ツイン型マイケルソン干渉計で計測精度として1nm以下の安定した波面計測は可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、サイクルポータティクス・ベクトルビームの高出力化及び短波長化の理論解析法・光学設計法・基礎実験データベース化を確立することで、今後の国内外における類似の実験研究に指針的な基礎データを提供することも図るものである。本研究は、レーザープラズマ相互作用を中心とする高強度レーザー光科学の研究に必要な新たなレーザー光源の開発に貢献できるものだと考え、また材料のナノ加工への応用にも期待できることから学術的な意義のみならず産業化への波及効果にも期待できる。

研究成果の概要(英文)：The spatial distribution and polarization state of the vector beam and the phase distribution of the azimuth direction are added to the numerical calculation code of the nonlinear wave equation for second harmonic generation corresponding to the Hermitian Gaussian beam. The basic numerical analysis means necessary for theoretical and numerical analysis of nonlinear optics with vector beams of complex polarization states are established. In addition, a twin Young-Michelson interferometer in which two Michelson interferometers are three-dimensionally configured with the same optical system is proposed. As a measurement accuracy, stable wavefront measurement of 1 nm or less has become possible with the twin Michelson interferometer.

研究分野：非線形光工学、レーザー工学

キーワード：非線形光学効果 第二高調波発生 第四高調波発生 径偏光レーザービーム

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

偏光分布を制御したベクトルレーザービームとして、光軸付近に穴の空いた強度分布をもつドーナツ型のラゲールガウシアンビームが注目され、マイクロ操作及びナノ金属針の加工に応用されつつある。また、光の電場が放射状に分布している径偏光ビームや方位方向に分布している方位偏光ビームの強度分布も同じドーナツ型であるが、径偏光ビームは集光すると、電場ベクトル合成の結果としてガウシアンビームに比べより小さなスポットサイズが得られるため、材料加工及びレーザープラズマ相互作用への応用に大いに期待されている。

ベクトルビーム光学の研究は主にイギリス、ドイツ、日本、中国を中心としたヨーロッパやアジアの国々で盛んに展開されている。日本では、北海道大学と千葉大学はポータビリティベクトルビームとその加工への応用研究を展開して、ポータビリティベクトルビームの発生や非線形光学効果を用いたポータビリティ制御に関して多数の成果を公表し、特にポータビリティレーザービームを用いて直径 50 nm 長さ 10 μm の世界で最も細い金属針を作ることに成功した。東北大学は第二高調波発生の遠視野ビームパターンを通じて軸方向における電場の観測に成功した。大阪大学は液晶の旋光性を利用して偏光位相板と位相遅延板との組み合わせで高強度レーザーにも適応できるベクトルビーム及びそのレーザープラズマ相互作用への応用可能性を示した。

しかし、材料加工やレーザープラズマ相互作用等への応用にはベクトルレーザービームを更なる高平均出力化及び短波長化することが不可欠となってきて、また、径偏光と方位偏光のみならず多岐な偏光状態も求められている。そのため、ベクトルビーム非線形光学の構築と偏光状態の多様化は重要な課題として浮上してきた。このような背景から、本研究では、第二高調波発生と第四高調波発生を用いて、高平均出力(数十ワット)・高繰り返し(数十キロヘルツ)・ナノ秒のベクトルレーザービームの発生・短波長変換・偏光状態の多様化に関する基礎研究に取り組んできた。

2. 研究の目的

本研究は非線形光学効果を用いた高出力ドーナツ型ラゲールガウシアン(Laguerre-Gaussian)レーザービームの径偏光・方位偏光・多岐な偏光の発生の新方式を考案し、その実用化及び高効率微細加工への応用の可能性を明らかにすることが目的である。本研究では、アレイ化した複数枚の非線形光学結晶セルを波長変換器としてレーザービームの短波長化を実現すると同時に径偏光変換器としても機能する。また、径偏光ドーナツ型第二高調波(Second-harmonic generation: SHG)レーザービームを(1, 0)と(0,1)エルミートガウシアン(Hermite-Gaussian)モード成分に分解して第四高調波(Fourth-harmonic generation: FHG)に変換させることによって、ドーナツ型方位偏光レーザービームを得ることが期待できる。更に、(1, 0)と(0, 1)モード成分を制御することで多岐な偏光を持つレーザービームを発生することも本研究の内容である。特に非線形光学効果を用いたビームの偏光状態の多様化における諸課題と対策を理論と実験の両面で明らかにする。

3. 研究の方法

本研究は非線形光学効果を用いた高平均出力レーザービームの偏光状態多様化と短波長化を同時に目指し、そのために必要な非線形光学過程の特徴及び諸研究課題・解決策等を明らかにする。複数枚の結晶を組み合わせアレイ式の非線形光学結晶セルを偏向状態変換器として考案し、本研究を通じてその実用化の可能性を探る。また、ドーナツ型のベクトルレーザービームを(1, 0)と(0, 1)エルミートガウシアンモードに分け、第四高調波発生を施すことによって、ベクトルビームの紫外波長領域への短波長化を実験的に検証する。これらの新しい考案の実証とともに、高平均出力・高繰り返し・ナノ秒・任意偏光状態のベクトルビームの非線形光学の理論基礎も完成させる。

エルミートガウシアンビームに対応する SHG 及び FHG に関する非線形波動方程式の数値計算コードは、(1, 0)と(0, 1)エルミートガウシアンモードに対応するもので、任意の偏光状態の高調波発生に対応するには、円柱座標系における非線形波動方程式を用いた SHG と FHG の数値解析も必要になってきた。偏光回転をベクトル量に対応させると同時に、ベクトルビームの空間分布と偏光分布及び方位方向の位相分布を新たに加えることで、任意偏光状態のベクトルビームを用いた非線形光学の理論及び数値解析を実施し、高効率 SHG 及び FHG に関わる課題を理論的に明らかにすることが可能である。

径偏光と方位方向偏光のラゲールガウシアンビームは二つの直線偏光エルミートガウシアンビームに分解することが可能であり、非線形光学過程を二つの偏光成分にそれぞれ対応させる二段階に分けて実施すれば、高効率 SHG と FHG を得ることが期待できる。一枚目の非線形光学結晶を鉛直偏光成分に結晶の常光線軸に対応させ、二枚目の非線形光学結晶の常光線軸と異常光線軸は一枚目のそれらと 90 度回転して設置することによって、水平偏光成分も非線形光学過程に関わり、方位偏光の第四高調波の発生が可能になる。同様に方位偏光ベクトルビームを用いた場合には径偏光ビームを得ることが可能である。本研究では、波長 1054 nm の高出力パルスベクトルレーザービームを基本波としてタイプ I 非臨界位相整合方式の LBO 結晶による波長 532 nm の径偏光ラゲールガウシアンビームの発生実験を実施し、更にタイプ I の BBO 結晶で波長 266 nm のエルミートガウシアンビームに変換させた後、マッハツェンダー型の偏光状態変換光学系を通して、多様な偏光状態をもつ紫外レーザー光を高変換効率で発生さ

せ、それに関する技術課題を解決する。第二高調波を発生させると同時に、その偏光状態も制御するため、アレイ式の結晶セルを構築する。このようなアレイ式の結晶セルは、全ての結晶の異常光線軸が同じ方向に向くに限って、既にレーザー核融合の研究で実用化された。しかし、径偏光レーザービームの発生に応用されるのはまだ例がない。数値計算結果に基づき、アレイ式結晶セルの作成に必要な結晶設定精度や組立精度等を明確にさせる。

本研究では、マッハツェンダー型干渉計を基にした偏光状態変換光学系を構築し、ベクトルビームの偏光状態の多様化を図る。ドーナツ型の径偏光第二高調波ビームをプリズム偏光子で二つの互いに垂直な $(1, 0)$ と $(0, 1)$ エルミートガウシアンモードに分解させ、それぞれの光路に挿入した $\lambda/4$ 波長板を回転させることによって、二つモードの偏光をある角度の方向に傾ける。一方の光路に位相遅延器を入れることによって、二つのモードに更に位相遅延を与え、再度一つのビームに重ね合わせると、多様な偏光状態のベクトルレーザービームを得ることが可能である。また、より高いビーム変換効率を得るために、汎用の円形ガウシアンビームをアキシコンレンズ対でドーナツ型ビームに変換する方式を採用し、95%を超える変換効率を実現することを目指す。

4. 研究成果

エルミートガウシアンビームに対応する第二高調波発生に関する非線形波動方程式の数値計算コードに偏光回転をベクトル量に対応させると同時に、ベクトルビームの空間分布と偏光分布及び方位方向の位相分布を新たに加えた。複雑な偏光状態のベクトルビームを用いた非線形光学の理論及び数値解析に必要な基礎的な数値解析手段を確立できた。径偏光と方位偏光のラゲールガウシアンビームを二つの直線偏光エルミートガウシアンビームに分解したうえ、従来の非線形波動方程式をこの二つの偏光状態に対応させたことで、考案した実験配置の数値評価に必要な数値解析ができた。既に基本波から第四高調波への変換効率の定量評価ができ、波長 1054 nm の基本波から波長 532 nm の径偏光ラゲールガウシアンビームの発生に必要なタイプ I 非臨界位相整合方式 LBO 結晶の最適設計と、波長 266 nm のエルミートガウシアンビーム発生に必要なタイプ I 位相整合 BBO 結晶の最適設計を完了した。第二高調波を発生させると同時に、その偏光状態も制御するため、アレイ式の結晶セルの設計を行った。

第四高調波ビームの偏光状態を観測するには、マッハツェンダー型の偏光状態変換光学系の構築とともに、時間と空間コヒーレンスの同時測定が可能となるツイン型マイケルソン干渉計を新しい計測手段として考案し、光波干渉と光子干渉の同時測定のみならず、偏光状態に関する位相情報の絶対測定も可能になった。また、二つのマイケルソン干渉計を同一の光学系で立体的に構成したヤング・ツインマイケルソン干渉計を考案し、径偏光レーザービームの時間コヒーレンスと空間コヒーレンス特性の同時測定を試みた。さらに、レーザービーム波面の安定した計測の可能性を検証し、大掛かりな防振装置や空調設備のないラフな環境下でもツイン型マイケルソン干渉計で計測精度として 1nm 以下の安定した波面計測は可能になった (図1と図2)。

また、従来の大きな頂角をもつ円錐レンズと異なって、頂角の小さな円錐レンズを用いたドーナツビーム発生の基礎研究も行い、円錐レンズ内における全反射回数と頂角との関係や出射するドーナツビームの分布特性との関連性を明らかにした。アキシコンレンズを用いたドーナツ型レーザービームの発生の実証実験では、一般的に広く利用されている基本角度 10 度のアキシコンレンズによるドーナツ型レーザービームの発生実験を実施し、ドーナツビーム径の制御方法を確認できた。また、レンズ内における多重全反射を用いたドーナツビーム径を制御するために、これまでほとんど利用されていない基本角度の大きなアキシコンレンズを取り入れ、直径 50mm、高さ 70mm と 50mm の二種類アキシコンレンズを用いた基礎実験でこれらレンズの応用可能性を明らかにした。更に、アキシコンレンズによるレーザービーム偏光特性への影響も確認できた。方形型光ファイバーを用いて方形型ビームの発生実験を行った。発生した方形型レーザービームのスペクトル特性、偏光特性、時間及び空間コヒーレンス等を実験で明らかにし、ビーム制御方式としてレーザー核融合への応用可能性を確認できた。

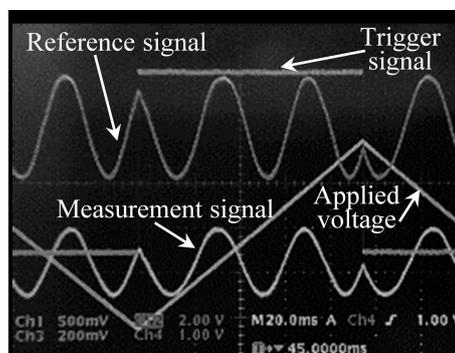


図1 測定信号と参考信号の波形

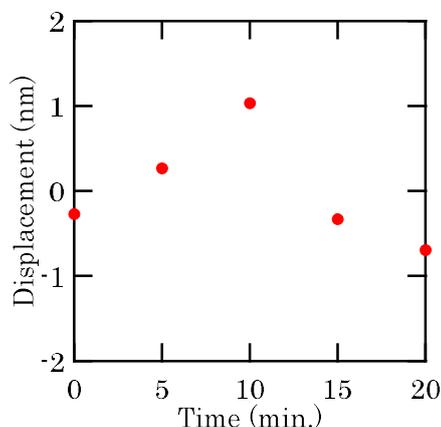


図2 ツイン型マイケルソン干渉計による波面測定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計2件）

- ① Tetsuo Harimoto and Kikyo Toshima: “A Michelson Twin Interferometer for Effective Compensation for Environment Disturbance,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.57, No. 10, 108003-1-3 (2018)(査読有)。
- ② 戸嶋喜叶、張本鉄雄：“マイケルソン・ツイン干渉計による光波干渉と光子干渉の同時観測”、光学, Vol.47, No.8, 346-350 (2018)(査読有)。

〔学会発表〕（計6件）

- ① 戸嶋喜叶、張本鉄雄：“マイケルソン・ヤング干渉計による時間空間コヒーレンスの同時測定、”2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2018年9月18日、講演番号18p-PA4-3。
- ② 戸嶋喜叶、張本鉄雄：“ツイン型マイケルソン干渉計の外乱補償特性、”2018年第65回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学・西早稲田キャンパス、2018年3月20日、講演番号20a-P2-4。
- ③ 戸嶋喜叶、張本鉄雄：“ダブルマイケルソン干渉計を用いた光波および光子干渉の同時計測、”日本光学会年次学術講演会、筑波大学東京キャンパス文京校舎、2017年11月1日、講演番号1aP3。
- ④ Tetsuo Harimoto and Tomoari Kono: “Beam Transformation Properties of a Square Core Fiber,” The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), P17-01, Keio Plaza Hotel, 2-2-1 Nishi-Shinjuku, Shinjuku-Ku, Tokyo 160-8330, Japan, August 22, 2017.
- ⑤ Gelloz Bernard, Fuwa Hiroki, Harimoto Tetsuo, Kondoh Eiichi, Jin Lianhua: “Porosity Dependence of the Absorption Coefficient and Quantum Confinement of Porous Silicon Nanostructures in HF Solutions”, 2017年第64回応用物理学会春季学術講演会、横浜パシフィコ、2017年3月16日、講演番号16p-P15-15。
- ⑥ 戸嶋喜叶、張本鉄雄：“マイケルソン干渉計を用いた光の波動性と粒子性の測定実験、”2017年第64回応用物理学会春季学術講演会、横浜パシフィコ、2017年3月16日、講演番号16a-P1-23。

6. 研究組織