

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390094

研究課題名(和文) 超高強度超短パルスポータックス・ベクトルビームを用いた非線形光学の新展開

研究課題名(英文) Recent progress of nonlinear optics with vortex vector beams for high intensity and ultrashort laser pulses

研究代表者

張本 鉄雄 (HARIMOTO, Tetsuo)

山梨大学・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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は螺旋状位相と径偏光及び方位方向偏光を考慮した Sパラメータによる非線形光学システムの簡易な光学設計法を確立した。非臨界位相整合方式のタイプ I LBO結晶を用いて、径偏光基本波ビームが二枚の結晶を透過することで、基本波と同様なドーナツ型の第二高調波ビームが得られることを明らかにした。集光ビームがラインビームに近い楕円形ビーム生成システムの精密制御も行き、今後のベクトルビームを用いた材料加工への応用に関わる工学的な課題を評価した。楕円形ビームシステムの特性実験結果より回折限界レベルの集光特性が得られたことが示され、実用化に必要とするシステムの再現性、安定性及び正確性も確認された。

研究成果の概要(英文)： The possibility of optimization design of the nonlinear optical system with parameter S is explored in consideration of the spiral phase and radial or azimuthal polarization, and a simple design method with S is set up for ultrahigh intensity and ultrashort laser pulses. A new scheme of the second-harmonic generation with a radially-polarized fundamental donut beam through two type I LBO crystals is proposed, and the second-harmonic beam with the same profile as that of the fundamental beam is numerically demonstrated. Operation properties of an optical system for elliptical beam generation is investigated in order to estimate practical issues on the application with a vortex vector laser beam to material processing. Experimental results of system characteristics showed that the focal line width at the focal point is the same as that of the diffraction limitation. The reproducibility, stability and accuracy of the system that need to commercialization are also confirmed.

研究分野：レーザー工学と非線形光工学

キーワード：ポータックス・ベクトルビーム 第二高調波発生 光パラメトリックチャープパルス増幅 非線形光学効果 ビーム形状最適化

### 1. 研究開始当初の背景

空間的位相(ポータックス: Vortex/渦)・偏光分布(ベクトル)を制御した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(Laguerre-Gaussian: LG)ビームが注目されている。螺旋構造の位相分布に起因する光の軌道角運動量は光ピンセットや、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。

ポータックス・ベクトルビーム光学及び光の軌道角運動量の研究は主にオランダを中心とした欧州で盛んに展開されている。日本では、電気通信大学、北海道大学と千葉大学はポータックスとその加工への応用研究を展開して、ポータックスの発生や非線形光学効果を用いたポータックス制御に関して多数の成果を公表し、特にポータックスレーザービームを用いて直径 50 nm 長さ 10  $\mu\text{m}$  の世界で最も細い金属針を作ること成功した。東北大学は第二高調波発生による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シフター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ポータックス・ベクトルレーザービームを更なる高出力化及び短波長化することが不可欠となってきて、そのためポータックス・ベクトルビーム非線形光学の構築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、第二高調波発生及び光パラメトリックチャープパルス増幅を用いて、テラワット~ペタワット・サイクルパルスのポータックス・ベクトルレーザービームの発生・強度増幅・短波長変換及びその材料加工への応用に取り組んできた。

### 2. 研究の目的

本研究は超高強度超短パルスポータックス・ベクトルレーザービームの非線形光学特徴を明らかにすることが目的である。第二高調波発生を用いたポータックス・ベクトルレーザービームの短波長化と、パラメトリックチャープパルス増幅による高出力化・極短パルス化は本研究の主要な内容であり、テラワット~ペタワット・サイクルパルスのポータックス・ベクトルレーザービームの実用化に向けて関係する非線形光学課題を理論と実験の両面で明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究は二次の非線形光学過程における逆変換効果に着目し、位相不整合を取り入れた第二高調波発生によるラゲールガウシアンビームの発生方法を考案し、その可能性を検証する。また、ラゲールガウシアンビームとエルミートガウシアン(Hermite-Gaussian: HG)ビームとの関係より二段階の非線形光学過程を用いたポータックス・ベクトルレーザービームの短波長化と高出力化及び極短パルス化の考案の実用可能性も数値解析によって明らかにし、ペタワット・サイクルパルス級のポータックス・ベクトルビームの非線形光学の理論基礎も完成させる。

(1)ポータックス・ベクトルビームの非線形光学の理論基礎の構築

ガウシアンビームに対応する第二高調波発生及びパラメトリックチャープパルス増幅に関する非線形波動方程式の数値計算コードをベクトル量に対応させ、ポータックス・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、ポータックス・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、高効率第二高調波発生及び高利得パラメトリックチャープパルス増幅に関わる課題を理論的に明らかにさせる。

(2)二次の非線形光学過程によるラゲールガウシアンビーム発生の実証

逆変換区域の第二高調波発生及びパラメトリックチャープパルス増幅によるラゲールガウシアンビームの発生において、ラゲールガウシアン関数の回帰分析で最適な結晶厚さと入射基本波(シード光)との関係を明らかにする。この方式で発生したラゲールガウシアンビームは同位相であり、直線偏光でもある。このため、本研究では、超高強度サイクルパルスにも対応できる螺旋状位相変換器及び偏光変換素子の開発に取り組んで、ポータックス・ベクトルビームの新たな発生法を実用化させる。これらの結果は第二高調波発生及びパラメトリックチャープパルス増幅に限らず、一般的な二次の非線形光学過程にも広げる。

(3)二段階の非線形光学過程によるポータックス・ベクトルビームの短波長化と高強度化の試み

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、高効率第二高調波発生と高利得パラメトリックチャープパルス増幅を得ることが期待できる。一枚目の非線形光学結晶の常光線軸を鉛直偏光成分に対応させ、この成分のビームだけを短波長化又は強度増幅をさせる。残りの水平偏光成分は一枚目結晶の異常光線軸と同じ偏光方向になったため、結晶をそのまま通過する。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、方位偏光の第二高調波の発生やシード光の強度増幅が可能になる。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 1053 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 の LBO 結晶による波長 532 nm のラゲルガウシアンビームの発生の可能性を検証する。

#### (4) ポーティクス・ベクトルビームに関する $\Delta S$ パラメータ光学設計法を確立

研究代表者は、非線形波動方程式より二次の非線形光学過程における規格化された位相整合ファクター  $\Delta S$  と変換効率との解析関係を既に導いて、複雑な数値計算をせずに位相整合ファクター及び入射レーザー先頭強度に対応する最適な非線形光学結晶の長さを解析的に設計することができるようになった。本研究では、螺旋状位相分布と径偏光及び方位方向偏光分布を考慮した  $\Delta S$  パラメータによる非線形光学システムの最適化設計の可能性を探り、それに関する課題を解決すると共に高強度サイクルパルスポーティクス・ベクトルビームに関する  $\Delta S$  パラメータ光学設計法を確立する。

高出力ポーティクス・ベクトルビームを用いた材料加工（半導体ウェハのダイシング等）への応用に必要な実用的な光学系の設計や再現性の向上に関わる課題を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) $\Delta S$ パラメータを用いた二次非線形光学過程の最適化

二次の非線形光学効果を用いたレーザー光の短波長化及びその増幅においては、主に第二高調波発生と光パラメトリック増幅効果が利用される。高効率を得るために、入射レーザー光と非線形光学結晶の最適化が必要である。強度や波長及び偏光方向が一定であるレーザーパラメータに対して、非線形光学結晶の位相整合角とその長さの最適化方法としては、非線形波動方程式より導かれた楕円関数法が挙げられる。変換効率を除く小信号近似も初歩的な方法として第二高調波発生や光パラメトリック増幅の評価によく利用されている。また、パソコンの計算速度の進歩と数値計算ソフトの高機能化によって、非線形波動方程式を直接に利用して数値計算による最適化も一般的に行えるようになった。本研究は二次の非線形光学過程における変換と逆変換の周期性に着目し、第二高調波発生及び光パラメトリック増幅の変換効率にも対応できる近似解析式を導くことができた。また、非線形波動方程式を記述する  $\Delta S$  パラメータを利用して二次の非線形光学過程を評価できることから、 $\Delta S$  パラメータを用いた二次の非線形光学過程の簡易な最

適化方法を確立した。

角周波数  $\omega_m$  ( $m=1, 2, 3$ ) のレーザー光による三波混合 ( $\omega_1+\omega_2=\omega_3$ ) に対応する特性因子である  $\Delta S$  パラメータは、次式

$$\Delta S = (k_3 - k_2 - k_1) / \sqrt{2d_{\text{eff}}^2 I_1 \omega_1 \omega_2 / \varepsilon_0 c^3 n_1 n_2 n_3}$$

で表される。ここで、 $n_m$  は屈折率、 $k_m$  は波数、 $c$  は真空中の光速、 $\varepsilon_0$  は真空中の誘導率、 $d_{\text{eff}}$  は非線形光学常数、 $I_1$  は入射レーザーの総強度である。 $\Delta S$  パラメータには入射レーザー光の強度と波長、非線形光学結晶の屈折率と非線形光学常数、結晶中における波数ベクトルの差（位相不整合要素）がすべて含まれている。三波混合のような非線形光学過程の最適化では、入射レーザー光の波長と強度が一定であれば、非線形光学結晶の位相整合角とその長さは最適化対象となる。位相整合角は従来の位相整合条件によって決められるが、最適な結晶長さは式

$$L \approx \ln(16/|\Delta S|) / \sqrt{\varepsilon_0 c^3 n_1 n_2 n_3 / 8d_{\text{eff}}^2 I_1 \omega_1 \omega_2}$$

で評価することができる。このときの  $\Delta S$  パラメータを最大強度変換率  $\eta_{\text{max}}$  との関係式

$$\Delta S = 2(1 - \eta_{\text{max}}) / \sqrt{\eta_{\text{max}}}$$

に置き換えることによって、 $\eta_{\text{max}}$  に対応する最適な結晶長さ  $L$  が求められる。 $\eta_{\text{max}}=1$  は理論的に最適な条件であるが、実際にレーザービーム発散角やバンド幅を無視できないため、結晶の最適化設計では、ビーム発散やバンド幅を  $\Delta S$  に寄与することによって最適な結晶長さを決める。光パラメトリック増幅も同じように最適化できる。

#### (2) 二次の非線形光学効果における位相不整合の近似解析法

二次の非線形光学効果に基づいた非線形光学結晶のパラメータの最適化設計や変換効率の定量化評価は非線形波動方程式で数値計算を通じて行うことが一般的な方法である。小信号近似は、解析的な手法として、変換効率を除いた非線形光学過程における位相不整合の影響を近似的に評価することも可能である。また、非線形波動方程式を楕円関数で表示することで、プログラムによる数値計算をせずに非線形光学過程を解析的に評価できる。しかし、楕円関数を用いた方法は物理的にイメージすることが容易でなく、より簡単な設計法は常に求められている。

非線形波動方程式を用いて、二次の非線形光学過程は主に変換領域（小信号領域）、飽和領域及び逆変換領域に分けて別々にそれらの特徴を評価することができる。非線形光学効果の最も重要な特徴は変換効率であり、これを評価するには小信号領域だけでなく飽和領域を含めた設計法が必要である。本研究は非線形波動方程式により規格化されたパラメータを用いた二次の非線形光学過程における位相不整合要素と変換効率の関係を解析的に明らかにし、さらに群速度不整合まで広げること成功した。

$\omega_1+\omega_2=\omega_3$  のような二次の非線形光学過程は  $\Delta S$  パラメータと規格化された非線形光学

結晶長のみ依存する。第二高調波最大強度の半分のところで小信号近似を飽和近似の結果と等しくさせると、第二高調波最大強度値に対応する結晶長  $L$  は

$$L \approx \frac{1}{2d_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 c^3 n_1 n_2 n_3}{2I_1 \omega_1 \omega_2}} \times \ln \left[ \frac{16d_{\text{eff}}}{|2/v_3 - 1/v_2 - 1/v_1| |\Delta\omega_1|} \sqrt{\frac{2I_1 \omega_1 \omega_2}{\varepsilon_0 c n_1 n_2 n_3}} \right]$$

で与えられる。ここで、 $\Delta\omega_1$  は基本波のバンド幅、 $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  は群速度である。この式は非線形光学結晶のパラメータ ( $n_1, n_2, n_3, d_{\text{eff}}$ ) と入射する基本波のパラメータ ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3, I_1$ ) によって構成され、ピコ秒領域における群速度不整合を含めるものである。更に群速度分散を取り入れることでフェムト秒レーザーパルスにも対応できる。

(3) 第二高調波発生を利用したドーナツ型ビームの時間分布特性

波長変換として多く用いられている第二高調波発生に位相不整合因子を加えることで、ガウス型の基本波ビームから第二高調波ドーナツ型ビームを生成することを明らかにした。本研究では生成したドーナツ型ビームの時間分布特性についての数値的解析を行った。非臨界位相整合方式のタイプ 1 LBO 結晶を用い、位相整合温度にすることで第二高調波を発生させる。

数値解析より、位相不整合因子を加えた射出ビーム強度が結晶長に対して周期性を示すことが明らかになった。その周期性は基本波と第二高調波における変換周期であり、この周期を求めることにより基本波と第二高調波それぞれのドーナツ型的设计式を求めることが可能である。基本波  $L_{1\omega}$  と第二高調波  $L_{2\omega}$  がドーナツ型ビームになる結晶長の設計値はそれぞれ次式

$$L_{1\omega} = (2n-1)L, \quad L_{2\omega} = 2nL$$

で与えられる。ここで、 $L$  は第二高調波最大強度値 (1/2 周期) に対応する結晶長、 $n$  は自然数である。これらの式より、結晶長が 1/2 周期の奇数倍の時は基本波のドーナツ型ビーム、偶数倍の時には第二高調波のドーナツ型ビームが設計できる。ビームの中心強度が 0 になるのは第二高調波だけである。そのため、理想的なドーナツ型ビームは第二高調波ドーナツ型ビームにおいて設計した。入射基本波強度を  $1.5 \text{ GW/cm}^2$ 、結晶を  $23.3 \text{ mm}$ 、LBO 結晶の温度変化を  $0.01 \text{ (} 1.4256 \text{ m}^{-1}\text{)}$  とし、ドーナツ型の第二高調波ビームを得られることが示された。時間分布において、ドーナツ中心ではドーナツ分布をしており中心強度が 0 になっていることが明らかにでき、ドーナツのリングの時間分布は、ガウス分布であり最大強度をとることが明らかになった。理想的な第二高調波ドーナツ型ビームは、時間分布においても理想的な分布を示しておりドーナツ

ツ型の特性を持っていることが示された。(4) 二段階の第二高調波発生を用いた径偏光ベクトルビームの短波長化

本研究は二段階の第二高調波発生を用いた径偏光ベクトルビームの短波長化の可能性に関する評価を行った。

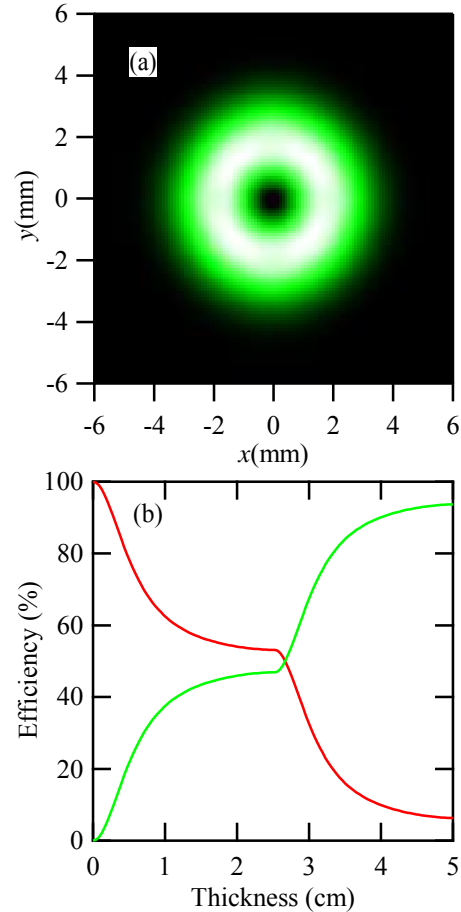


図1 径偏光ビームの第二高調波発生

径偏光ベクトルビーム LG01 が二つの Hermite-Gaussian モード成分 HG10 と HG01 によって構成されることから、二段階の第二高調波発生方式を考案した。一枚目結晶では常光線偏光の HG01 成分が第二高調波に変換され、異常光線偏光の HG10 成分はそのまま通過する。二枚目結晶の光軸を 90 度回転させることにより、一枚目結晶での常光線偏光が異常光線偏光に、異常光線偏光が常光線偏光へと変わる。これにより一枚目結晶で変換されなかった異常光線偏光の HG10 成分が第二高調波に変換され、一枚目結晶で変換された常光線偏光の HG01 成分はそのまま通過する。二枚目の結晶透過後に各偏光成分のビームは合成され、径偏光ベクトルビームは第二高調波ビーム(LG01)に変換されたことになる。

非臨界位相整合方式のタイプ 1 LBO 結晶 (長さ  $2.5 \text{ cm}$ 、 $\theta=90^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$ ) を用いて、第二高調波を発生させる数値評価を行った。数値計算では、LBO 結晶の位相整合温度を  $147.5$  とし、基本波は  $1064 \text{ nm}$ 、強度  $2.0 \text{ GW/cm}^2$  の径偏光ベクトル基本波ビームを用

いた。径偏光ベクトル基本波ビームが二枚のLBO結晶を透過することで、基本波と同様なドーナツ型の第二高調波ビームを得ることができ、エネルギー変換効率はそれぞれの結晶ごとに、ほぼ限界に達したことを確認できた。

現時点での第二高調波発生は結晶ごとの位相のずれが生じないものと仮定して数値計算を行っている。しかし、実際に各成分を合成する際に位相のずれが生じるため、今後は位相のずれを考慮した第二高調波の発生が必要である。

#### (5)材料加工への応用におけるビーム光学系の高精度制御

本研究では、集光ビーム分布がラインビームに近い楕円形ビーム生成システムの精密制御も行い、今後のベクトルビームを用いた材料加工への応用に関わる工学的な課題を評価した。

レーザーダイシングでは半導体ウェハに集光するビームは、通常のガウス型強度分布を持つ円形ビームを用いるよりもトップハット型を有する方形ビームや楕円形ビームの方が有効である。これらのラインビームを用いることで、より均一な照射が可能となり、ダイシング時の集光スポットの重なりを考慮せずにダイシング速度の高速化が実現可能となる。

レーザーを用いた半導体ウェハ加工においては、半導体ウェハに集光したビームサイズとその位置の最適化は照射レーザーパワーと同様に重要な要素である。本研究で実施した楕円形ビーム生成システムの設計は、従来の光学原理に基づいたものであるが、実用化の観点から精密制御に関わる光学部品数を最小限に抑えている。また、レーザービームの集光サイズとその位置のコントロールもシステムの外觀寸法を変えずに行えるようになっている。

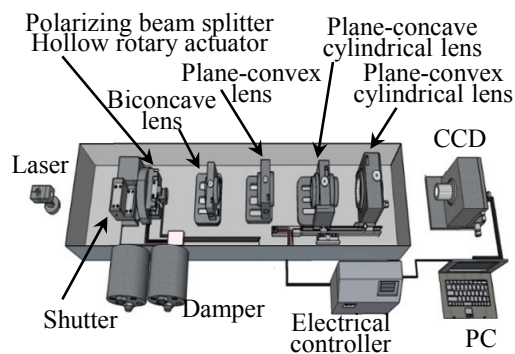
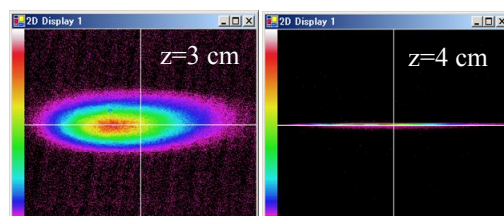


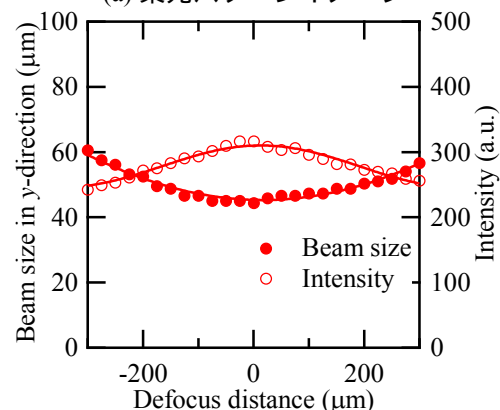
図2 楕円ビームシステムの構成図

図2に示す楕円形ビームユニットは、レーザーダイシングを最適化するために必要なレーザーパワー制御系、円形ビーム拡大系と楕円形ビーム制御系によって構成され、市販の光学部品が用いられている。レーザーパワー制御系には1/2波長板とキューブ型偏光ビームスプリッタが用いられ、ビームスプリッタを透過したレーザーパワーの調整役割を

担う。1/2波長板の回転を中空ロータリーアクチュエータで精密にコントロールすることによって半導体ウェハ加工に必要なレーザーパワーの調節が可能となっている。ビームスプリッタに反射されたレーザービームはダンパーによって処理される。円形ビーム拡大系には、両凹球面レンズと平凸球面レンズが用いられている。また、楕円形ビーム制御系は平凹シリンドリカルレンズと平凸シリンドリカルレンズから構成されている。平凹シリンドリカルレンズを電動スライダで駆動することで、二つのシリンドリカルレンズの間隔を高精度で制御し、半導体ウェハに集光したビームサイズを精密に調整することができる。この楕円形ビームユニットで基本波波長1064 nmのNd:YVO<sub>4</sub>レーザーの第二高調波(532 nm)、第三高調波(355 nm)及び第四高調波(266 nm)の円形ビームを楕円形ビームに変換させる。それぞれのレーザー波長に応じて各光学系にある光学部品を切り替える。基本波の繰り返し周波数の変化範囲20~100 kHzに対して、パルス幅は14~26 nsで、最大平均出力パワーは20 Wである。光学系の光学部品もナノ秒の高エネルギーレーザーに対応するものを用いる。楕円形ビーム光学系の集光特性の評価は、図2に示すように、CCDイメージセンサで行うが、レーザーダイシングを施す時には、このCCDイメージセンサはX-Yステージに切り替えられ、X-Yステージと連動することによって、集光ビームの大きさのみならず、その位置も制御できる。



(a) 集光パターンイメージ



(b) ディフォーカス特性

図3 楕円ビーム光学システムのディフォーカス特性

半導体ウェハの加工特性に大きく影響を及ぼすレイリー長さを考慮して、スポットサイズ $\sqrt{2}$ 倍の前後位置までのディフォーカス特性

性を測定した(図3)。シリンドリカルレンズ CL1 と CL2 の初期間隔  $z$  を 4 cm に設定するとき、 $y$  方向の最小ビームサイズは  $47\ \mu\text{m}$  となり、回折限界時の理論評価結果と同じである。また、 $z$  を 8 cm と 5.5 cm に設定すると、 $y$  方向の最小ビームサイズはそれぞれ  $16.8\ \mu\text{m}$ 、 $23.8\ \mu\text{m}$  となり、これらの結果も回折限界時の理論評価結果とほぼ同じである。デフォーカスによるレーザー強度の変化から、最小ビームサイズに近づくにつれて光強度は増加し、最小ビームサイズを過ぎると減少していくことも確認された。

## 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3件)

太田 由香、松坂 浩志、張本 鉄雄：“楕円形ビーム光学系の動作特性”、精密工学会誌 Vol. 82、No.2、163-167 (2016) (査読有)。

Tetsuo Harimoto and Hidetomo Tsugane: “Dynamic properties of second-harmonic intensity of a nanosecond-order laser pulse”, Optical Review, Vol. 21, No. 3, 265-269 (2014) (査読有)。

Tetsuo Harimoto: “Simple method of optimizing second-harmonic generation under imperfect phase-mismatching conditions caused by group-velocity mismatch and group-velocity dispersion”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.53, No.3, 038003-1-3 (2014) (査読有)。

### [学会発表](計7件)

田村 大、張本 鉄雄：“二段階の第二高調波発生を用いた径偏光ベクトルビームの短波長化”、2015年 第76回応用物理学会秋季学術講演会、予稿集 DVD、03-226、名古屋国際会議場、2015年 9月 14日、講演番号 14p-PA1-3。

長田 基希、張本 鉄雄：“第二高調波発生を利用したドーナツ型ビームの時間分布特性”、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、2014年 11月 7日、講演番号 7pP3。

張本 鉄雄：“特性因子  $S$  を用いた二次非線形光学過程の最適化、” 2014年 第75回応用物理学会秋季学術講演会、予稿集 DVD、03-124、北海道大学札幌キャンパス、2014年 9月 18日、講演番号 18p-PA3-1。

長田 基希、張本 鉄雄：“第二高調波発生を利用したドーナツ型ビームの生成”、2014年 第61回応用物理学会春季学術講演会、予稿集 DVD、04-157、青山学院大学相模原キャンパス、2014年 3月 18日、講演番号 18p-PA4-1。

小林 由佑、張本 鉄雄、松坂 浩志：“楕

円レーザービーム自動調整光学系の制御”、第14回レーザー学会東京支部研究会、講演予稿集、P-3、p.2、東海大学高輪湘南キャンパス、2014年 3月 5日。

近藤 勝仁、張本 鉄雄：“光パラメトリック増幅効果を用いたドーナツビームの発生”、第14回レーザー学会東京支部研究会、講演予稿集、P-4、p.2、東海大学高輪湘南キャンパス、2014年 3月 5日。

張本 鉄雄：“二次の非線形光学効果における位相不整合の近似解析法”、日本光学会年次学術講演会、奈良県新公会堂、2013年 11月 12日、講演番号 12pP4。

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

( )  
研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )  
研究者番号：