

高出力ラジアル偏光ビームの発生とレーザー加工への応用

西前 順一・山本 達也・藤川 周一

Generation of Radially Polarized High Power Beam and Its Application to Laser Processing

Junichi NISHIMAE, Tatsuya YAMAMOTO and Shuichi FUJIKAWA

High power radial polarization beam has attracted attention to improve the performance of laser processing. In this paper, some methods for generating high power radial polarization beam are presented focusing on application to sheet metal cutting by CO₂ laser. By using a metal grating mirror, a radial polarization CO₂ laser of output power of 4 kW has been developed at present. It has been theoretically predicted that the cutting speed will increase about 50% by adopting a high power radial polarization beam in place of conventional circular polarization beam. And then the improvement of cutting speed has been observed experimentally by using the high power radial polarization laser. Also it has been confirmed that the laser drilling performance is improved by adopting a high-power azimuthal polarization beam in place of conventional circular polarization beam.

Key words: radial polarization, azimuthal polarization, laser processing, laser cutting

レーザーの応用は、情報・通信や計測をはじめとするさまざまな分野に広がっているが、最も重要な応用分野のひとつとして材料加工を挙げることができる。レーザーを利用した材料加工の研究開発はルビーレーザーの発明直後から進められ、現在では、その優れた高速性、微細性、フレキシビリティなどの特長を生かしてさまざまな産業における製造プロセスに利用されている。

金属の切断加工は数あるレーザー加工应用の中でも最も市場規模が大きく、おもに平均出力がキロワットを超える高出力のCO₂レーザーが使用されている用途である。切断加工に用いられるビームの偏光状態は、出力、集光径、横モードパターン等と並んで加工特性に影響する重要なビームパラメーターである。直線偏光ビームを用いた場合には任意形状の切断において加工の異方性を生じてしまうため、現在のレーザー切断加工においては、軸対象偏光とみなすことができる円偏光ビームが多用されている。

このような状況にあって、ラジアル偏光ビームを用いる

ことで、切断方向による異方性のない対称な加工特性を保ちながら、加工効率を1.5~2倍に向上する可能性があるというシミュレーション結果がロシアアカデミーのNizievらにより報告された¹⁾。これを機に、高出力のラジアル偏光ビームの発生と加工応用に関する研究開発が活発化している。

本稿では、高出力ラジアル偏光ビーム発生技術と金属切断を中心とした加工応用の状況について紹介する。

1. 偏光状態を考慮したレーザー切断モデル

レーザーを用いた金属切断加工は、集光したレーザー光を金属表面に照射することで金属材料を溶融し、アシストガスを吹き付けて溶融金属を除去することで進行する。このとき、ビームと金属材料の境界に切断前面が形成され、ビームは金属界面に対して斜に入射することになる。金属へ斜入射するビームの吸収率(反射率)はP偏光とS偏光で大きく異なるため、使用するビームの偏光状態によって

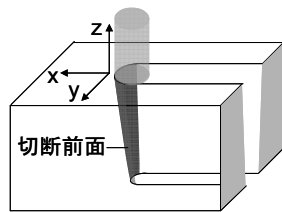


図1 切断加工の概念図.

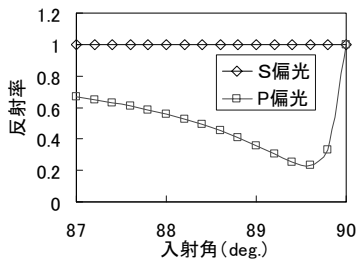


図2 切断前面における反射率.

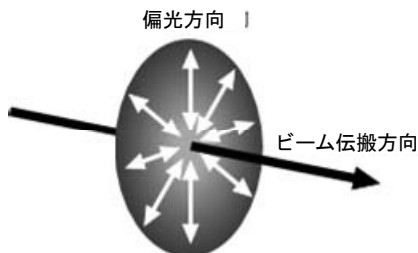


図3 ラジアル偏光ビーム.

加工特性が変化する.

図1, 図2から推定されるように, 金属の切断加工では, 切断前面において吸収率の高い(反射率の低い)P偏光ビームを照射することによってS偏光ビームを照射した場合に比較して切断前面へのビームの吸収量が増加し, 加工速度が向上すると考えられる. しかしながら, 実際の応用においては任意の形状加工が必須であり, 直線偏光ビームを用いて常に切断前面に対してP偏光のビームを照射することは加工装置が複雑化するなどの問題があるため, 一般的なレーザー切断加工機では, 偏波面に方向依存性のない円偏光が使用される. 円偏光で金属の切断加工を行う場合, 切断前面には吸収率の高いP偏光と吸収率の低いS偏光が1/2ずつ照射されることになる. 一方, 図3に示すラジアル偏光ビームを金属の切断加工に適用した場合には, 径方向のみに偏光方向が偏波しているため, 照射ビームが切断前面に対して常にP偏光で接することになる. このため, 円偏光を使用した場合に比較して切断速度の向上を期待することができる.

Nizievらは, 切断加工におけるビームパワー吸収量と溶融量が比例するというエネルギーバランスの考え方に基

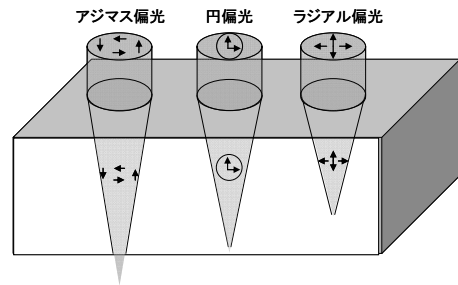


図4 穴あけ加工の偏光依存性.

いた三次元加工シミュレーションコードを開発し, 切断前面の形状とビーム吸収量とをコンシステントに求めることによって各種のビーム偏光状態における切断速度を計算している¹⁾. その結果として, ラジアル偏光ビームを用いることによって, 円偏光ビームを用いた場合と比較して1.5~2倍の切断速度が得られる可能性があることが報告されている.

以上はビームの一側面から被加工物にエネルギーを伝える切断加工の場合であるが, 穴あけ加工に関しては, 図4に示されるようにラジアル偏光ビームの吸収率が高いため, ワークの深い領域に到達する前にビームパワーが減衰してしまうために, ラジアル偏光ビームは深い穴あけには不向きと考えられる. 一方, 穴あけ加工においては, 周方向の偏光であるアジマス偏光ビームを用いることによって, 深い領域までビームパワーを到達させ, 効率的な加工が可能になると考えられる.

2. 高出力ラジアル偏光ビームの発生技術

ラジアル偏光ビームの発生技術に関しては, 円錐プリズムや固体レーザー媒質の複屈折を利用した共振器を用いる方法, 分割波長板・フォトニック結晶・液晶等による偏光操作を用いる方法など, 多様な手法が報告されている²⁻⁷⁾. 以下では, 金属切断加工をターゲットとする高出力CO₂レーザーに関するラジアル偏光ビーム発生技術の例を紹介する.

2.1 ワイヤグリッドミラー

Nesterovらは, 放射線状に形成された金属(Cu)ワイヤー群を備えたミラーをレーザー共振器の全反射鏡に採用することによって1.8kWのラジアル偏光ビームを発生している(図5)⁸⁾. 赤外光を透過・吸収するSi基板上に厚さ0.65μmのTi層を形成し, さらにその上に0.65μm厚の高導電率Cuのワイヤー層を蒸着したミラー構造が報告されている.

この方式は, 遠赤外領域の偏光子として用いられるワイヤグリッドを放射状に形成して共振器の反射ミラーとし

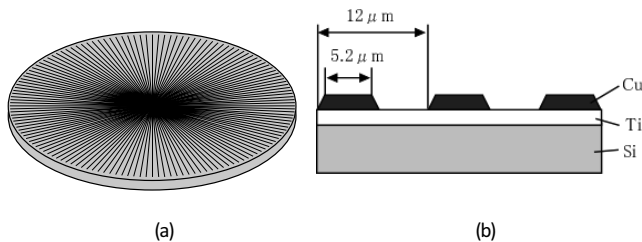


図5 ワイヤグリッドミラーの構造⁸⁾. (a) 外観, (b) 細部詳細.

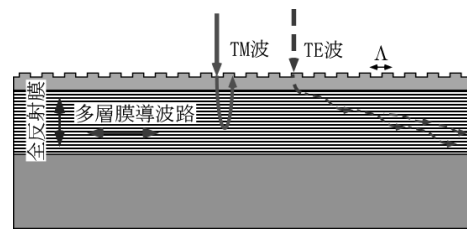


図7 多層膜導波路グレーティングミラー.

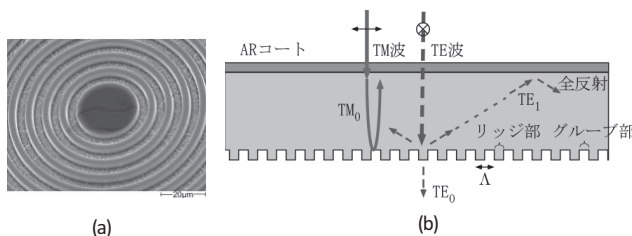


図6 GIRO ミラーの構造⁹⁾. (a) 外観写真, (b) 詳細構造と動作説明図.

て用いたものとみなすことができる。ワイヤグリッド偏光子では導電率の高い金属ワイヤーに沿った偏光成分のみが反射され、ワイヤーに垂直な偏光成分は透過・吸収される。放射状に形成したワイヤグリッドを共振器ミラーとして用いることによって、ラジアル偏光ビームの発生が可能となる。

2.2 GIRO (giant reflection to zero order) 方式

GIRO は、GaAs などの高屈折率の基板の上に波長以下のピッチのグレーティングを同心円状に形成し、ラジアル方向となる TM 波のみを反射させ、アジマス方向となる TE 波の 0 次反射光をなくす方法である。図 6 にその外観と動作原理を示す⁹⁾。

基板側からグレーティング内に入射した平面波はリッジ部を伝搬するモードとグループ部を伝搬するモードに分離し、それぞれの伝搬定数に対応する伝搬速度でグレーティング内を伝搬する。大気との境界面ではリッジ部を伝搬した光とグループ部を伝搬した光に位相差が発生し、この位相差は TM 波（ラジアル方向）と TE 波（アジマス方向）で異なる。ここでリッジ部とグループ部の光の位相差が TM 波において π だけ異なるように、TE 波において $\pi/2$ だけ異なるようにグレーティングの深さおよびピッチを設定する。グレーティングのピッチは大気側での光の波長より短く製作されている。

ここで TM 波の振る舞いを考えると、大気との境界でリッジ部とグループ部の位相差が π だけ異なっているため、0 次光は存在しない。さらに大気側ではグレーティングのピッチが波長以下であるため、回折光も存在し得ない

ことから TM 波は境界面ですべて反射される。反射波の 2 成分は 2π 、つまり同位相で戻ることになり、基板バルク界面でも回折せずそのまますべて 0 次光として戻っていく。

一方、TE 波の場合は大気との境界でリッジ部とグループ部の位相差が $\pi/2$ だけ異なっているため 0 次光が存在し、この 0 次光の一部は大気側へ出力される。大気側で回折光が存在しないことは TM 波と同じである。大気との境界面で反射された TE 波の 2 成分は π の位相差でバルク界面に到達するため、強い回折によって散逸する。

2.3 多層膜導波路グレーティングミラー

Ahmed らドイツのグループは、多層膜光導波路と回折格子を組み合わせたラジアル偏光のみに高い反射率を有する誘電体多層膜ミラーを共振器内に組み込むことによって 3 kW のラジアル偏光ビームを発生させている¹⁰⁾。

多層膜導波路グレーティングミラーは、図 7 に示すようにグレーティング部と多層膜導波路を組み合わせた構造になっている。グレーティングは TE 波（アジマス偏光）を導波路モードとモード結合させるために用いられている。グレーティングのピッチを導波路モードの波長と一致させることによって TE 波が導波モードに結合し、ミラーの径方向に TE 波を導波させる。グレーティングのピッチは $6.5 \mu\text{m}$ 、深さは $0.2 \mu\text{m}$ が報告されている。TM 波（ラジアル偏光）に対しては導波路モードと結合せず、多層膜は全反射膜として作用する。TE 波の導波モードは、実効屈折率が $n_{\text{eff}} = 1.655$ および $n_{\text{eff}} = 1.602$ の 2 つの近接する導波モード間に使用波長域を一致させることによって製作精度の裕度を広げている。TE 波の導波モードの波長域は真空中における波長 $10.5 \sim 10.7 \mu\text{m}$ の範囲に相当する。

2.4 トリプルアキシコン共振器

東海大学の遠藤らは、トリプルアキシコン共振器を用いて 2 kW のラジアル偏光ビームを発生している¹¹⁻¹³⁾。

図 8 にトリプルアキシコン共振器の概念構成を示す。共振器の全反射ミラーとして円錐型の反射面を用いることによって、円錐面に対して反射率の高い S 偏光として入射するアジマス偏光モードを選択する。トリプルアキシコンとすることで共振器の安定性を向上させるとともに、誘電体

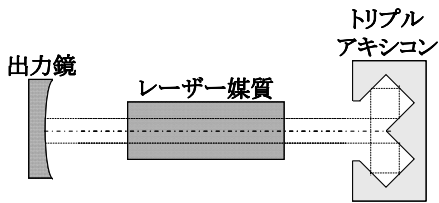


図8 トリプルアキシコン共振器の概念構成¹¹⁾.

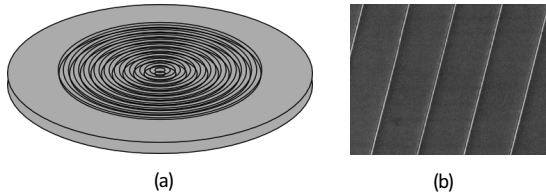


図9 金属グレーティングミラーの構造. (a) 外観, (b) 細部詳細.

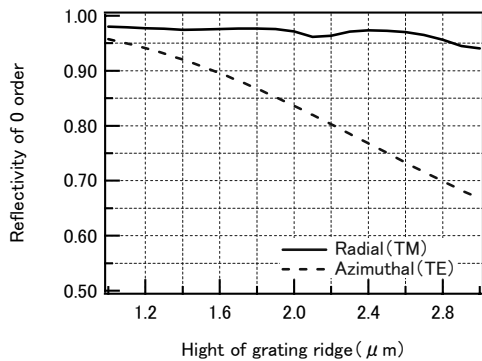


図10 RCWA法による金属グレーティングミラー設計計算例.

多層膜コーティングによって偏光選択性を増強している。共振器から発生するアジマス偏光ビームを反射型の波長板を用いた外部光学系によって偏光変換することによって、高出力のラジアル偏光ビームが得られる。

2.5 金属グレーティングミラー

三菱電機の山本らは、円周状に溝が刻まれた金属のグレーティングミラーを用いた4 kWのラジアル偏光ビームの発生を報告している^{14,15)}。金属グレーティングミラーは、構造が比較的シンプルであるとともに、高热伝導の金属 (Cu基板+Auコーティング) のみで構成されるため高出力動作に適した方式と考えられる。

Cuの基板上にレーザー波長よりも長い緩やかな周期で円周状の溝を刻み、波長よりも細いリッジ部分を残す構造となっている (図9)。リッジ部分はアジマス偏光に対して感受性の高い一種のアンテナとして作用し、アンテナから再放射される電磁波と基板からの反射波が破壊的に干渉させることでアジマス偏光に対する反射率を選択的に低下させる動作原理である。

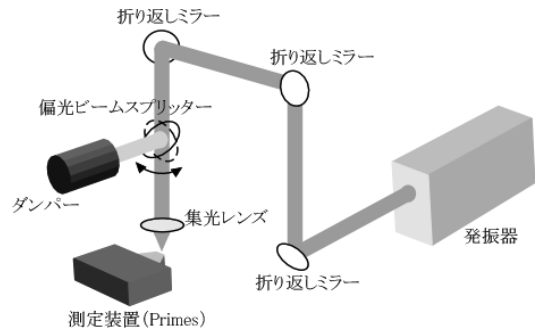


図11 4 kWラジアル偏光ビーム発生試験装置の構成.

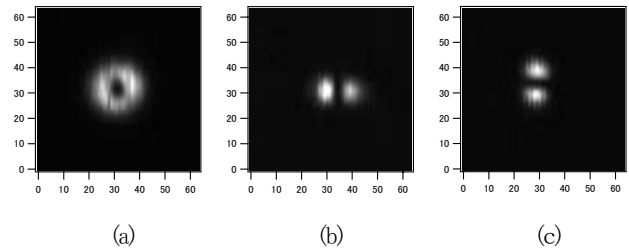


図12 4 kWラジアル偏光ビームモード形状. (a) 全体, (b) x偏光成分, (c) y偏光成分.

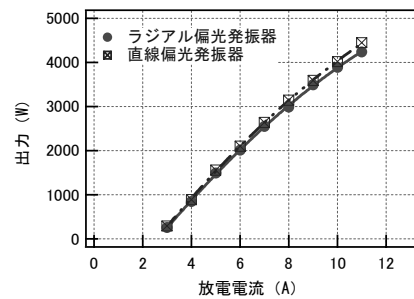


図13 出力特性.

金属グレーティングミラーの設計には、電磁界解析手法であるRCWA法 (rigorous coupled-wave analysis) が用いられている。RCWA法を用いてグレーティングのピッチ、リッジ部の高さ、リッジ部の幅を適切に設計することによって、ラジアル偏光反射率97.8%、アジマス偏光反射率は82.8%のミラーを試作している (図10)。共振器ミラーとして使用した場合に効率的な発振に必要なラジアル偏光に対する高い反射率と、確実にラジアル偏光を選択するに十分な偏光間の反射率差とを両立している。

金属グレーティングミラーを組み込んだ共振器によって4 kWを超えるラジアル偏光ビーム出力が確認されている (図11, 12)。ラジアル偏光に対する金属グレーティングミラーの反射率は十分に高いため、通常のみらる共振器からの出力低下はほとんどみられない (図13)。また、ビーム品質を表す M^2 は、ラジアル偏光の理論値 ($M^2 = 2.0$) に近い $M^2 = 2.09$ が得られている (図14)。

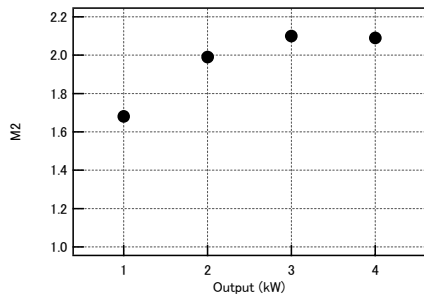


図 14 M^2 測定結果.

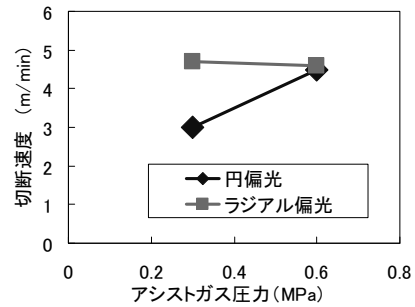


図 16 円偏光とラジアル偏光切断速度のアシストガス圧力依存性.

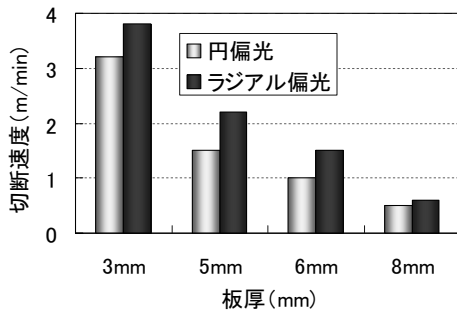


図 15 円偏光とラジアル偏光の切断速度比較.

表 1 円偏光とラジアル偏光の切断面粗さ比較.

	切断面粗さ Rz (μm)	
	円偏光	ラジアル偏光
切断上部	12	6
切断下部	20	11

3. 軸対象偏光ビームの加工応用

3.1 ラジアル偏光ビームによる金属切断加工

Ahmedらドイツのグループが3 kWのラジアル偏光ビームを用いた金属切断加工の結果を報告している¹⁰⁾. 数種類の厚さのステンレス材料の切断速度を円偏光ビームとラジアル偏光ビームで比較した結果, 図 15 に示されるようにラジアル偏光ビームを用いた場合, 円偏光ビームを用いた場合と比較して1.2倍~1.5倍の切断速度が得られている. また, 表 1 に示されるように, 切断面の品質(面粗度)の比較において, ラジアル偏光ビームを用いることによって円偏光ビームを用いた場合と比較して切断面粗さを半減できる結果が得られている.

東海大学の遠藤らによっても同様の結果が得られている¹¹⁻¹³⁾. 熱間圧延鋼板 SPH 4.5 mmの切断加工においてラジアル偏光ビームを用いた場合, 円偏光に比べておおむね 1.5 倍の速度でドロスフリー切断が可能であることが報告されている. また, 冷間圧延鋼板 SPC 1.6 mm の切断において, ラジアル偏光ビームを用いることによって, これまでのレーザー切断につきものであった加工条痕がほとん

どみられない高品質切断が可能であることが示されている.

一方, ワーク板厚などの加工パラメーターを変えた場合, 切断速度に対するラジアル偏光の利点がほとんど観測されない場合があるなど, ラジアル偏光切断加工の特性にはいまだ不明点が残されていることも報告されている.

遠藤らは, 金属切断加工におけるラジアル偏光ビームの新たな可能性についても報告している. 図 16 はステンレス (SUS304) の窒素切断結果を示すものである. ステンレスの窒素切断においてラジアル偏光ビームを用いた場合, アシストガス圧力を 0.6 MPa から 0.3 MPa に下げても切断速度が低下しないという現象が観測された. この結果は, ラジアル偏光ビームを用いることによって窒素切断におけるアシストガスの消費量を 2 分の 1 程度に低減できる可能性を示唆するものである. 窒素切断においてはアシストガスの消費がランニングコストの大きな部分を占めることから, 産業応用という観点から注目すべき結果である.

さらには, 軽量高剛性材料として用途が拡大しつつあるマグネシウム合金へのレーザー切断の適用可能性が報告されている¹³⁾. マグネシウムは活性が高く, 非常に燃えやすい材料であるため, 加熱溶融を原理とするレーザー切断の適用には困難があり, これまでマグネシウム合金のレーザー切断は実用化されていない. 円偏光, アジマス偏光, ラジアル偏光の 3 種類の偏光状態のビームを用いてマグネシウム合金 (AZ31) 1 mm の窒素切断試験を実施した結果, ラジアル偏光を用いることによって, 従来では不可能であった高速でドロスフリーの良好切断が確認されている.

3.2 アジマス偏光ビームによる穴あけ加工

図 17 は遠藤による金属材料 (SPH 9.0 mm) に対する穴あけ貫通時間の報告をグラフに表したものである. 穿孔時間はアジマス偏光が最も短く, ラジアル偏光が最も長い時間がかかっている. アジマス偏光を用いた穴あけ加工では, 円偏光を用いた場合と比較して 24% の加工時間短縮が可能である.

穴あけ加工におけるアジマス偏光の有効性については,

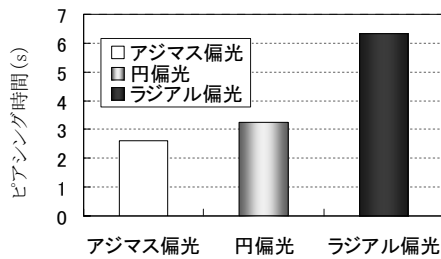


図 17 偏光状態による穴あけ (ピアッシング) 時間の比較.

金属以外の材料や、例えばフェムト秒レーザーなど CO₂ レーザー以外のレーザーを用いた評価も実施されており、到達穴深さなどで円偏光に対する優位性が報告されている^{16,17)}。

金属の切断加工に使用される高出力 CO₂ レーザー用を中心として、ラジアル偏光発生技術とその加工応用について紹介した。アジマス偏光を用いた穴あけ加工に関しては安定的な効果が見込まれ、実用化に進むことが期待される。ラジアル偏光を用いた切断加工は、現在使用されている円偏光と比較して 1.5 倍程度の切断速度を実現できるポテンシャルを有しているものと考えられる。しかしながら、本稿で紹介した単純な加工モデルとは整合しない現象も観測されており、ラジアル偏光を用いた場合の加工メカニズムには不明な点も残されている。偏光状態と加工の関係に関する詳細なメカニズムの解明、ラジアル偏光が効果を発揮する条件の明確化が進展することを期待する。

文 献

- 1) V. G. Niziev and A. V. Nesterov: "Influence of beam polarization on laser cutting efficiency," *J. Phys. D*, **32** (1999) 1455-1461.
- 2) Y. Kozawa and S. Sato: "Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism," *Opt. Lett.*, **30** (2005) 3063-3065.
- 3) Y. Kozawa, K. Yonezawa and S. Sato: "Radially polarized laser beam from a Nd: YAG laser cavity with a c-cut YVO₄ crystal,"

- Appl. Phys. B*, **88** (2007) 43-46.
- 4) Y. Kozawa, S. Sato, T. Sato, Y. Inoue, Y. Ohtera and S. Kawakami: "Cylindrical vector laser beam generated by the use of a photonic crystal mirror," *Appl. Phys. Express*, **1** (2008) 022008.
- 5) H. Kawachi, Y. Kozawa, S. Sato, T. Sato and S. Kawakami: "Simultaneous generation of helical beams with linear and radial polarization by use of a segmented half-wave plate," *Opt. Lett.*, **33** (2008) 399-401.
- 6) A. Maekawa and M. Uesaka: "Generation of radial polarized laser beam and its applications for accelerator," *Proceedings of Free Electron Laser Conference (FEL) 08* (Gyeongju, Korea, 2008).
- 7) K. Kitamura, K. Sakai, N. Takayama, M. Nishimoto and S. Noda: "Focusing properties of vector vortex beams emitted by photonic-crystal lasers," *Opt. Lett.*, **37** (2012) 2421-2423.
- 8) A. V. Nesterov, V. G. Niziev and V. P. Yakunin: "Generation of high-power radially polarized beam," *J. Phys. D*, **32** (1999) 2871-2875.
- 9) T. Moser, J. Balmer, D. Delbeke, P. Muys, S. Verstuyft and R. Baets: "Intracavity generation of radially polarized CO₂ laser beams based on a simple binary dielectric diffraction grating," *Appl. Opt.*, **45** (2006) 8517-8522.
- 10) M. A. Ahmed, J. Schulz, A. Voss, O. Parriaux, J. C. Pommier and T. Graf: "Radially polarized 3 kW beam from a CO₂ laser with an intracavity resonant grating mirror," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1824-1826.
- 11) M. Endo: "Azimuthally polarized 1 kW CO₂ laser with a triplex-axicon retroreflector optical resonator," *Opt. Lett.*, **33** (2008) 1771-1773.
- 12) 遠藤雅守: "大出力軸対称偏光レーザー発生技術および加工応用", *レーザー加工学会誌*, **18** (2011) 171-177.
- 13) 遠藤雅守: "マグネシウム合金のレーザー切断加工", *Form Tech Review*, **20** (2010) 4-9.
- 14) 山本達也, 西前順一, 藤川周一: "CO₂ レーザによる 4 kW ラジアル偏光ビームの発生", *Optics & Photonics Japan*, 25aG8 (2009).
- 15) 山本達也, 西前順一, 藤川周一: "4 kW ラジアル偏光ビームの発生", *レーザー学会研究会報告 No. 393* (2009) 1-6.
- 16) M. Kraus, M. A. Ahmed, A. Michalowski, A. Voss, R. Weber and T. Graf: "Microdrilling in steel using ultrashort pulsed laser beams with radial and azimuthal polarization," *Opt. Express*, **18** (2010) 22305-22313.
- 17) M. Meier, V. Romano and T. Feurer: "Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation," *Appl. Phys. A*, **86** (2007) 329-334.

(2013 年 10 月 29 日受理)