

## 4 kW ラジアル偏光ビームの発生

山本 達也・西前 順一・藤川 周一

三菱電機(株)先端技術総合研究所加工制御システム技術部 〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1

### Generation of Radially Polarized 4 kW Beam from a CO<sub>2</sub> Laser

Tatsuya YAMAMOTO, Junichi NISHIMAE and Shuichi FUJIKAWA

Machining & Processing Control System Department, Mitsubishi Electric Corporation Advanced Technology R&D Center, 8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-8661

We succeeded in a generation of the radial polarization beam of the high power of 4 kW. This beam is generated from a CO<sub>2</sub> laser using a grating mirror grooved in the form of concentric circumferences. The grating mirror has a high reflectivity for the radial polarization. And the polarization extinction ratio (radial/azimuthal) is large enough for operation in a resonator cavity. We believe that this mirror is industrially useful. This can be expected to improve processing speed in the cutting of thick plates that are significant advantages of the radial polarized beam.

**Key words:** CO<sub>2</sub> laser, radially polarized, grating mirror, laser cutting, material processing

#### 1. はじめに

近年、CO<sub>2</sub>レーザーによる板金切断加工において、ラジアル偏光ビームが注目されている。ラジアル偏光ビームとは、Fig. 1 に示すように、偏光方向が径方向のみに存在するビームを示す。金属の切断加工では、切断フロントに対して反射率の低い p 偏光のレーザービームを照射することにより、金属へのレーザービームの吸収率が向上し加工速度を上げることができると考えられている。しかしながら、加工対象の形状は複雑であるため、直線偏光ビームを用いて常に切断フロントに対して p 偏光のレーザービームを照射することは困難である。このため、一般的な金属の切断加工には、全方向に等方的な円偏光を用いている。円偏光で金属の切断加工を行う場合、切断フロントには、吸収率の高い p 偏光と吸収率の低い s 偏光が交互に照射されることになる。一方、ラジアル偏光ビームは径方向に偏光方向が向いているため、ラジアル偏光ビームで金属の切断加工を行うと、切断フロントには常に p 偏光が照射されることになる。このため円偏光の場合より切断速度が向上し、理論的には1.5~2倍の加工速度向上の可能性が指摘されている<sup>1)</sup>。ラジアル偏光ビームの発生事例は多数報告されており、その方法もさまざまである。Nesterov は、放射状に溝が形成された金属のグレーティングミラーを共振

器の全反射鏡に採用することにより、1.8 kW のラジアル偏光ビームを発生している<sup>2)</sup>。Moser は、ピッチが波長以下の回折格子を用い、ラジアル偏光のみが反射される誘電体ミラー (GIRO) を使用してラジアル偏光ビームの発生に成功している<sup>3)</sup>。ドイツのトルンプ社は、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もつ誘電体多層膜ミラーを共振器内に組み込み、3 kW のラジアル偏光ビームの発生に成功している<sup>4)</sup>。また、東海大学では、トリプルアキシコンミラーを用いてラジアル偏光ビームの発生を試みている<sup>5)</sup>。今回、新たに円周状に溝が刻まれた金属のグレーティングミラー (Fig. 2) を設計し、4 kW のラジアル偏光ビームの発生に成功したのでこれを報告する。

#### 2. ラジアル偏光ミラーの設計

ラジアル偏光ビームは、前述したように、径方向のみの放射状に偏光方向が存在する。このため、ビームの中心では偏光方向が確定せず、その強度分布は Fig. 3 に示したような中心部の強度が 0 のドーナツ状の強度分布となる。このような偏光が許されるビームモードとしては、エルミート・ガウスの TEM01 モードと TEM10 モードを重ね合わせた TEM01\*モード、あるいはラゲール・ガウスの LG01

E-mail: Yamamoto.Tatsuya@dw.MitsubishiElectric.co.jp

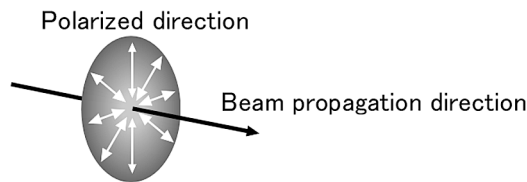


Fig. 1 Radially polarized beam.

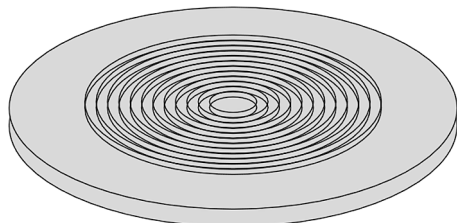


Fig. 2 Metal grating mirror.

モードなどがある。Fig. 3では、ドーナツ状の強度分布を有するラジアル偏光ビームと、直線偏光ビームの強度分布および偏光分布を示した。ラジアル偏光ビームは偏光方向および強度分布が互いに直角となるエルミート・ガウスモードを同位相で重ね合わせたもの、直線偏光ビームは偏光方向が同じで強度分布のみが互いに直角となるエルミート・ガウスモードを位相差  $90^\circ$  で重ね合わせたもの、と考えることができる。一般的に、ガウスビームとよばれる TEM00 モードでは、Fig. 3 に示したようなラジアル偏光ビームをつくることはできない。よって、ラジアル偏光ビームは TEM01\* および LG01 が最も低次のモードとなり、ビーム品質としては M2 値=2 が理論限界（下限）となる。

金属の切断加工において、ラジアル偏光ビームが優位性を示すのは比較的厚い材料の場合である。これは、薄い材料では切断フロント面にテーパがつかず、ほぼ垂直に切断フロント断面が形成されるため、p 偏光と s 偏光の吸収率に差がつかないことによる。厚い材料を切断する場合、出力の高いレーザーが必須となり、高出力のレーザーに耐えるラジアル偏光ミラーが必要となる。

前章で示したように、ラジアル偏光ビームの発生方法は、いろいろな方式が提案されているが、現在まで 4 kW 以上の高出力でラジアル偏光ビームを発生させた例はない。GIRO 方式では、レーザーが  $\text{CO}_2$  レーザーに対して吸収率の高い GaAs 媒質内を通るため、高出力のビームを安定的に発生させることは困難であると考えられる。多層膜光導波路と回折格子を組み合わせた誘電体多層膜ミラー方式も同様に、多層膜内をビームが通り、さらに構造も複雑である。

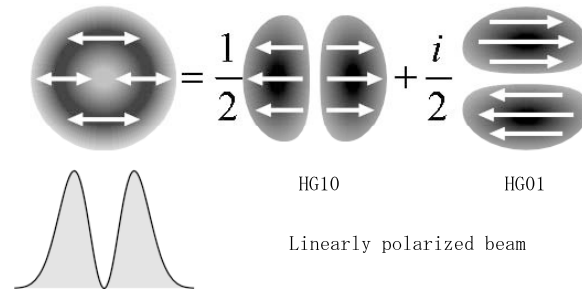
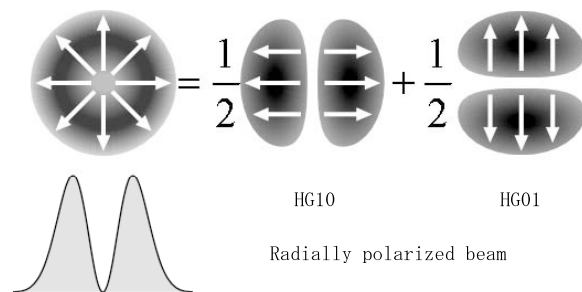


Fig. 3 Intensity and polarization distribution of radially and linearly polarized beam.

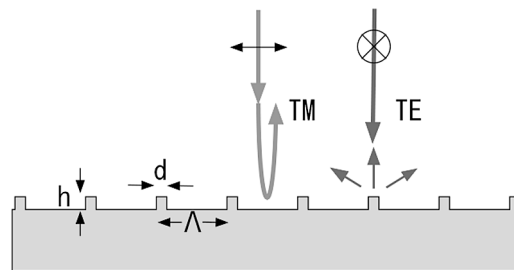


Fig. 4 Metal grating mirror (cross section).  $\Lambda$ : Grating period,  $h$ : height of grating ridge,  $d$ : width of grating ridge.

このため今回、われわれは、比較的構造がシンプルで高出力にも耐えうる、金属のグレーティングミラーを採用することにした。Fig. 2 に示すような円周方向に沿って溝があるグレーティングミラーにより、ラジアル偏光を発生する。これは、Fig. 4 に示すように、反射面基板に偏光方向によって感度の異なるアンテナを立て、アンテナ反射波を用いて全体の反射波を乱すことにより、偏光選択性を与えるというコンセプトである。

波長程度以下の幅のアンテナを立てると、アンテナ上面のカットオフ電流はアンテナに沿う方向には流れやすいが、アンテナと垂直方向には流れにくくなる。したがって、アンテナはアンテナに沿った偏光成分 (TE 波) をよく反射し、アンテナと垂直方向の偏光成分 (TM 波) はほ

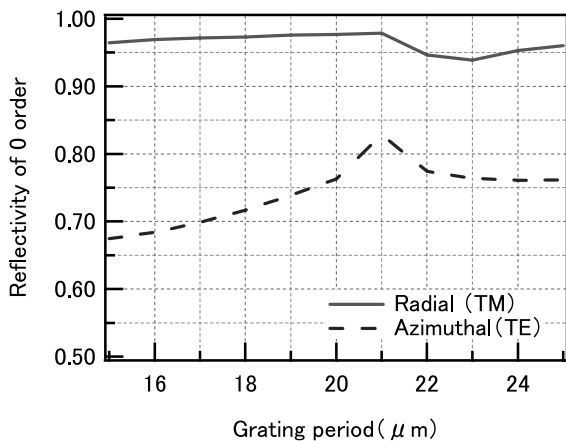


Fig. 5 Radial and azimuthal reflectivity of 0 order as functions of grating period.

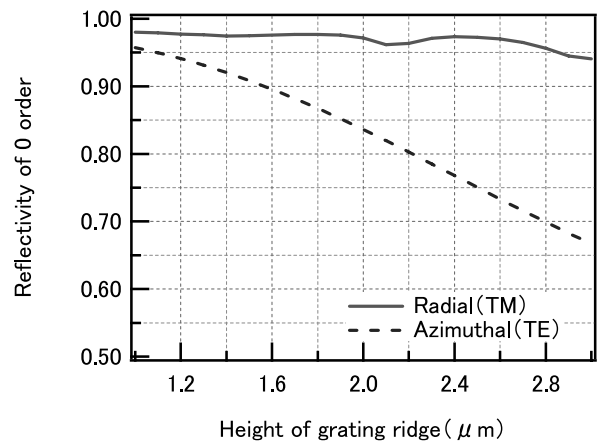


Fig. 6 Radial and azimuthal reflectivity of 0 order as functions of height of grating ridge.

とんど反射しない性質を有することになる。このため、アンテナと垂直方向の偏光成分ほぼすべてが反射面基板で反射される。一方、アンテナに沿った偏光成分は、アンテナ上面および反射面基板によって反射されるが、これらの反射波ではアンテナの高さによって位相差が生じ、互いに干渉する。干渉の度合いが大きくなると、反射率（0次光成分）が低下する。したがって、ラジアル偏光を発振させる場合には、アジマス方向に沿ってアンテナを形成し、アジマス方向の反射波を干渉させることにより反射率を下げればよいことになる。

さて、このようなグレーティング構造によってアジマス偏光の反射率を下げるためには、グレーティングのリッジ部（アンテナ上面）からの反射波とグレーティングのグループ部（反射面基板）からの反射光の強度比を小さくし、位相差を  $180^\circ$ （半波長分）に近づけ、干渉の度合い（つまり回折効率）を大きくすることが望ましい。グレーティングのリッジ部からの反射波とグループ部からの反射光の強度比を小さくするためには、リッジ部面積とグループ部面積を等しくする必要がある。しかしながら、リッジ部面積とグループ部面積をともに小さくすると、ピッチが波長以下のグレーティングとなり、反射波が回折せず反射率を低下させることはできない。一方、グレーティングのリッジ部およびグループ部の面積をともに大きくすると、アンテナと垂直方向の偏光成分もグレーティングのリッジ部で反射するようになり、ラジアル偏光の反射率を低下させることにつながる。

このラジアル偏光ミラーを共振器ミラーとして採用する場合、ラジアル偏光の反射率を下げることは、発振効率の低下につながり望ましくない。このため、ラジアル偏光ミラーのスペックとしては、グレーティングのリッジ部の幅

は波長以下、グレーティングのグループ部の幅は波長以上とする。

設計にはベクトル波動解析手法の一種である RCWA 法 (rigorous coupled-wave analysis) を用い、リッジ部上面（入射面）、グレーティング部（周期構造内）、反射面基板上（反射面）それぞれの領域に対して、電磁波を固有のモードに展開し、各領域の境界条件からマクスウェル方程式を数値的に解くことにより、各モードの反射率を求めた。

グレーティングのピッチ、リッジ部の高さ、リッジ部の幅により、ラジアル偏光およびアジマス偏光の反射率が変化する。ラジアル偏光の反射率が高く、共振器ミラーとして採用した場合に十分アジマス偏光が消光するような偏波消光比となるように、これらの値を定めた。Fig. 5 に、グレーティングのピッチと 0 次光反射率の関係を示す。リッジ部の高さは  $2\ \mu\text{m}$ 、リッジ部の幅は  $1\ \mu\text{m}$  である。計算した範囲では、TM 波（ラジアル偏光）が 94% 以上の反射率をもつのにに対して TE 波（アジマス偏光）では 83% 以下の反射率となっている。CO<sub>2</sub> レーザーの波長  $10.6\ \mu\text{m}$  のちょうど 2 倍となるピッチでは、隣り合ったリッジ部からの反射波の干渉によりピークが発生する。この範囲においては、ラジアル偏光とアジマス偏光の消光比は十分と考えられる。

Fig. 6 に、グレーティングのリッジ部の高さとの関係を示す。グレーティングのピッチは  $20\ \mu\text{m}$ 、リッジ部の幅は  $1\ \mu\text{m}$  である。リッジの高さによる影響は大きく、計算した範囲では、リッジ部を高くするほど、ラジアル偏光とアジマス偏光の消光比は大きくなる。ただし、リッジ部を高くすると、ラジアル偏光の反射率にも影響し、反射率が小さくなる傾向となる。

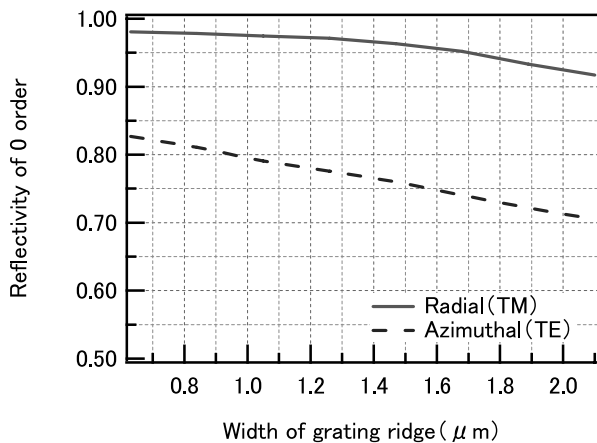


Fig. 7 Radial and azimuthal reflectivity of 0 order as functions of width of grating ridge.

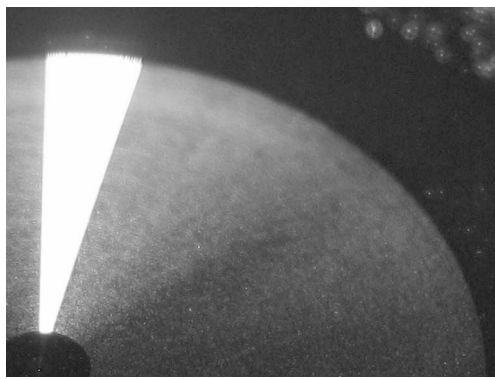


Fig. 8 Picture of a realized radial grating mirror.

Fig. 7に、グレーティングのリッジ部の幅と反射率の関係を示す。グレーティングのピッチは $20\ \mu\text{m}$ 、リッジ部の高さは $2\ \mu\text{m}$ である。計算した範囲では、リッジ部の幅を大きくすると、ラジアル偏光、アジマス偏光ともに反射率が低下する。

これらの計算結果から、ラジアル偏光の反射率が高く、偏光選択性も確実と考えられる値を採用した。最終的に設計したミラーのラジアル偏光成分の0次光反射率は97.8%、アジマス偏光成分の0次光反射率は82.8%となった。

Table 1に、本方式とこれまで報告のあったラジアル偏光ミラーの反射率を示す。本方式では、ラジアル偏光とア

Table 1 Radial and azimuthal reflectivity.

Method	Radial reflectivity (%)	Azimuthal reflectivity (%)	Reflectivity ratio (Radial/Azimuthal)
This letter	97.8	82.8	1.18
Diffraction mirror with the groove line along the radius <sup>2)</sup>	94*	72*	1.31
GRO <sup>3)</sup>	99.3	0.6	165.6
Multilayer waveguide <sup>4)</sup>	99.6	41.1	2.42

\*Experimental result.

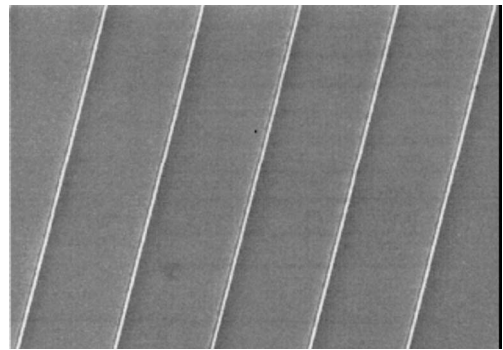


Fig. 9 SEM picture of a realized radial grating mirror.

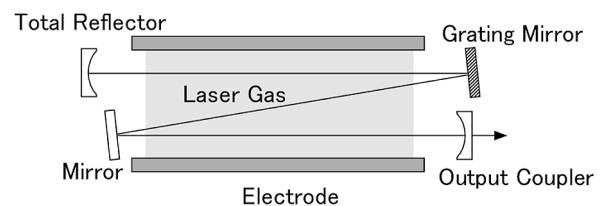


Fig. 10 CO<sub>2</sub> laser resonator used for the generation of the radially polarized beam.

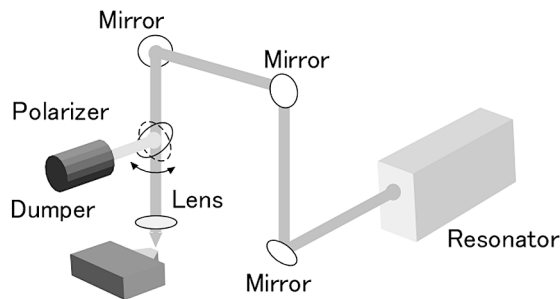
ジマス偏光の消光比は最も小さいが、ラジアル偏光とアジマス偏光の反射率の差は15%あり、共振器内において十分な偏光選択性をもつと考えられる。また、ラジアル偏光成分の反射率97.8%は、共振器ミラーとして十分な反射率であり、通常ミラーを使用した場合に比べて、レーザーの出力低下は問題にならない程度となることが期待できる。製作したラジアル偏光ミラーの写真をFig. 8に示す。材料は、CO<sub>2</sub>レーザーのミラーとして一般的な、銅基板上に金コートをしたものとなっている。

Fig. 9は製作したラジアル偏光ミラーのSEM写真である。

### 3. ラジアル偏光ビームの発生

製作したラジアル偏光ミラーを共振器に組み込み、ラジアル偏光ビームの発生試験を行った。発振器は三軸直交型CO<sub>2</sub>レーザーを用い、グレーティングミラーはFig. 10に示すように共振器内部の折り返しミラーに適用した。

Fig. 11に、実験配置図を示す。集光レンズによりビー



Focus Monitor (Primes)

Fig. 11 Schematic drawing of measurement of radial polarization beam.

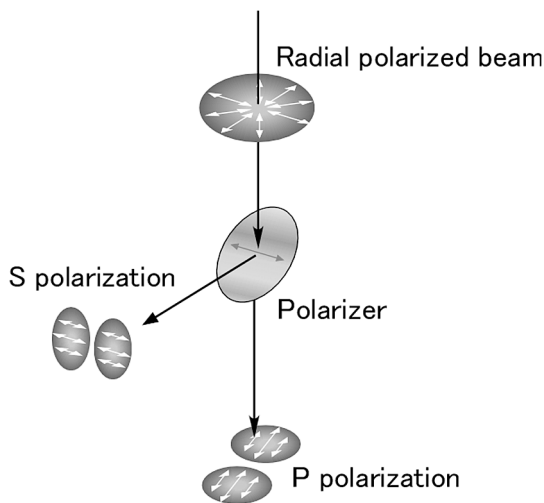


Fig. 12 Principle of measurement.

ムを集光し、ビームの強度分布を測定した。集光レンズ手前に偏光ビームスプリッターを配置し、一方向のみの偏光ビームを取り出すことにより、偏光方向を確認する。偏光ビームスプリッターは、任意の方向に回転させることができるようにした。

偏光ビームスプリッターは、s波のみを反射し、p波を透過する。このため、透過したラジアル偏光ビームプロファイルは、Fig. 12のように観測される。つまり、偏光ビームスプリッターのp波の方向に2つに分かれた強度分布 (TEM01モード) のビームが観測されれば、そのビームはラジアル偏光であることが確認できる。

Fig. 13は、偏光ビームスプリッターを通さない、もとのビームの強度分布測定結果である。ドーナツ状のプロファイルが確認できる。

Fig. 14, Fig. 15は、偏光ビームスプリッターを回転させて、それぞれx方向、y方向の偏光成分を取り出し、強度分布を測定した結果である。偏光ビームスプリッターの向きと透過したp偏光のビーム強度分布から、偏光の向きが

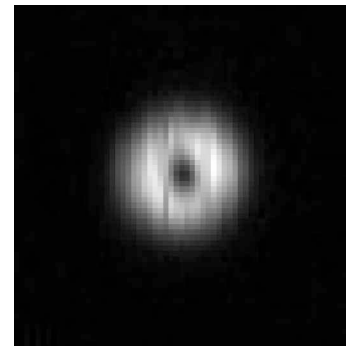


Fig. 13 The result of intensity distribution of the radially polarized beam without polarizer.

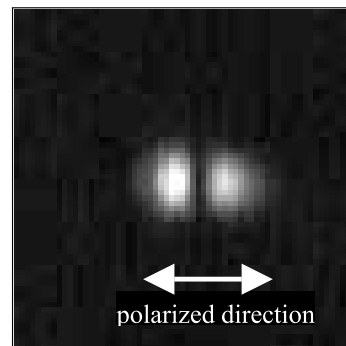


Fig. 14 The result of intensity distribution of the radially polarized beam through a polarizer oriented horizontally.

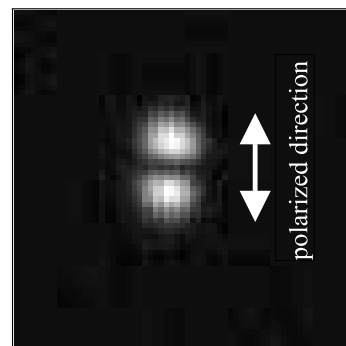


Fig. 15 The result of intensity distribution of the radially polarized beam through a polarizer oriented vertically.

ラジアル方向であることが確認された。

Fig. 16は、ラジアル偏光発振時のCO<sub>2</sub>レーザーの入出力特性と、通常の直線偏光発振時の入出力特性である。ラジアル偏光発振時にも、通常の直線偏光発振と同等の出力が得られており、最大出力4200Wが得られた。この値は、報告者らが知る限り、CO<sub>2</sub>レーザーのラジアル偏光出力として世界最高値である。

Fig. 17は、レーザー出力とM2値の関係である。ラジアル偏光ビームのM2値は、理論的には最も低次のモードでM2=2となる。試験結果は、4kW時でM2=2.09となつて

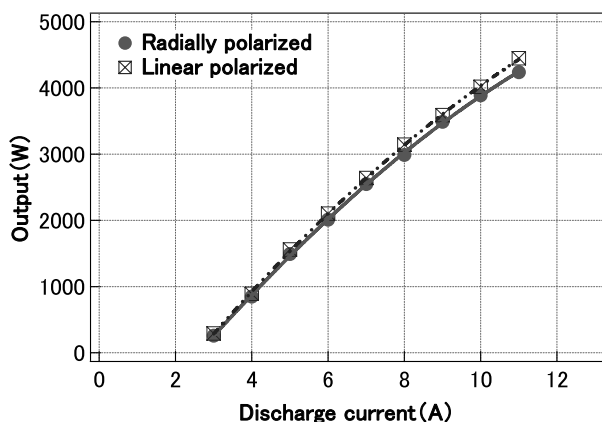


Fig. 16 Output characteristics.

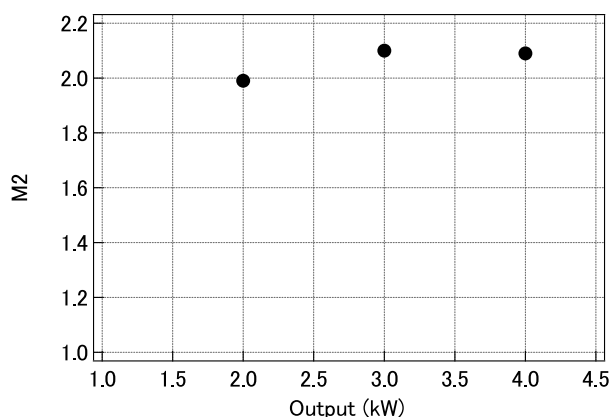


Fig. 17 Measured M2 factor versus the laser output power.

おり、ほぼ理論値どおりの値となった。

本方式では、偏光の消光比は他方式と比較して小さいが、共振器ミラーとして使用した場合、十分な偏光選択性をもつことが確認された。本報告では、平面ミラーにこれを適用したが、製作が比較的容易であることから、球面ミラーにもこれを適用することは可能と考えられる。また、

材料も通常の反射ミラーと同じ金属製であり、耐久性も期待できる。これらのことから、直線偏光を出力する従来の発振器からの置き換えも容易であり、他方式に比べ最も産業用途として採用しやすい方式といえる。

#### 4. おわりに

円周状に溝が刻まれた金属のグレーティングミラーを新たに設計し、4 kW のラジアル偏光ビームの発生に成功した。設計したグレーティングミラーは、共振器内ミラーとして高い反射率をもち、アジマス偏光との消光比も十分に大きなものであり、産業用の CO<sub>2</sub> レーザーに使用するに十分なスペックである。4 kW のラジアル偏光ビーム発生は、現時点で筆者が知る限り、世界最高レベルである。これにより、ラジアル偏光ビームの優位性が顕著になる厚板の切断加工において、加工速度の向上が期待できる。今後、開発したラジアル偏光ビームを用いて加工速度向上の実証試験を行う。

#### 文 献

- 1) V. G. Niziev and A. V. Nesterov: "Influence of beam polarization on laser cutting efficiency," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32** (1999) 1455-1461.
- 2) A. V. Nesterov, V. G. Niziev and V. P. Yakunin: "Generation of high-power radially polarized beam," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32** (1999) 2871-2875.
- 3) T. Moser, J. Balmer, D. Delbeke, P. Muys, S. Verstuyft and R. Baets: "Intracavity generation of radially polarized CO<sub>2</sub> laser beams based on a simple binary dielectric diffraction grating," *Appl. Opt.*, **45** (2006) 8517-8522.
- 4) M. A. Ahmed, J. Schulz, A. Voss, O. Parriaux, J. C. Pommier and T. Graf: "Radially polarized 3 kW beam from a CO<sub>2</sub> laser with an intracavity resonant grating mirror," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1824-1826.
- 5) M. Endo: "Development of an optical resonator with conical retroreflector for generation of radially polarized optical beam," *Proc. SPIE*, **6872** (2008) 687207.