

# 次世代プロセッシングのための径偏光レーザービームの開発

東北大学 多元物質科学研究所

教授 佐藤俊一

(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007206)

キーワード：径偏光，プロセッシング

## 1 研究の背景と目的

現在レーザープロセッシングに使用されているレーザービームのほとんどは、直線・円偏光あるいは無偏光であり、ビームのどの位置でも同じ偏光状態を有している。これに対して、空間的な偏光分布が不均一であるベクトルビームの研究が活発になっており、特に偏光が放射状に分布した径偏光レーザーは高効率性と精密加工性を兼備した次世代プロセッシング用レーザーとして期待されている。

その理由は、物体に垂直に集光した場合、全ての光線が p 偏光となるため、反射率が小さく、従って材料に吸収される光エネルギーの割合が高くなることである。また、強く集光した際にはスポットサイズが小さくなることから、精密微細加工にも適していると考えられている。

径偏光レーザービームに関する研究の歴史は浅く、現在文献的に報告されている径偏光レーザーのほとんどは出力および安定性の点で不十分である。従って、レーザープロセッシングに使用できるようなレーザーの開発は急務となっている。

本研究の目的は、我々が取り組んできた新しい径偏光レーザービーム発生方法を発展させ、レーザープロセッシングでの使用に適するような出力と安定性とを併せ持つレーザーを開発することである。具体的には、将来の産業応用を視野に入れ、ファイバーレーザーでの径偏光レーザービームの発生を中心に研究を進めた。

## 2 ベクトルビームの特徴

偏光分布が空間的に均一である光ビームは、スカラー波動方程式の解として得られ、Hermite-Gauss や Laguerre-Gauss ビームがよく知られている。また、非回折ビームとして知られる Bessel-Gauss ビームや、楕円座標系の解として知られる Ince-Gauss

ビームもスカラービームの例である。これに対して、電場の空間分布が不均一である場合には、電場をベクトルとして考える必要があり、光ビームはベクトル波動方程式の解となる。これまでに、いくつかの解が見いだされている。最初に報告されたのは、Bessel-Gauss ビームであるが、これはスカラーの Bessel-Gauss ビームとは異なっていることに注意する必要がある。両者とも強度分布は Bessel-Gauss 関数で表わされるものの、後者の場合、電場は方位方向に対して、複雑な振る舞いを見せる。この他、Laguerre-Gauss 型および変形 Bessel-Gauss 型の強度分布を持つベクトルビームも見いだされている。これらの中で最も簡単な偏光分布をもつものが、径偏光および方位偏光ビームである。Fig. 1 に示すように、径偏光ビームは電場が放射状に分布しているのに対して、方位偏光ビームは、方位方向に分布している。どちらの場合も、強度分布はドーナツ型であり、数学的には全く同じである。光軸上で強度がゼロになるのは、光軸上は偏光の特異点であるためである。特に、径偏光ビームは強く集光した場合、焦点付近では強い軸方向電場が発生することが知ら

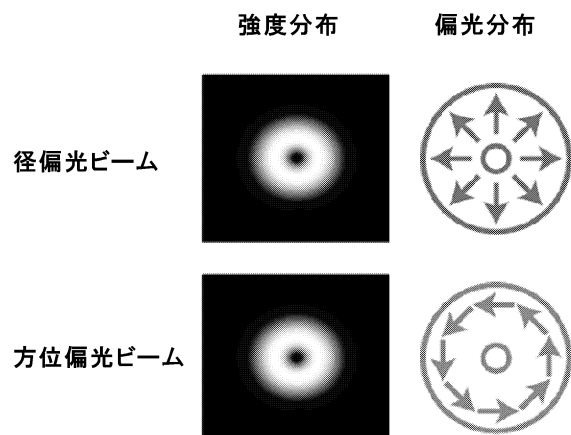


Fig. 1 径および方位偏光ビームのビーム断面での強度および偏光分布

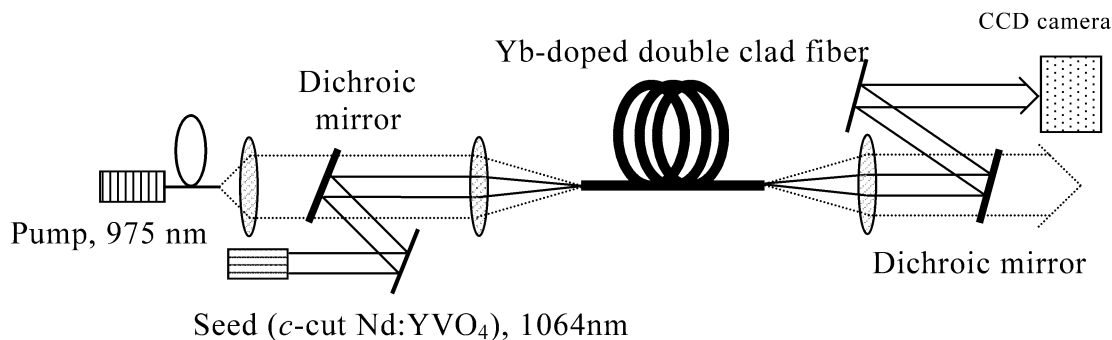


Fig. 2 径偏光レーザー増幅器

れており、これに起因して、Gauss型の強度分布を持つ直線あるいは円偏光ビームに比べ、さらに小さなスポット径が得られる。また、物質表面に対して垂直に集光した径偏光および方位偏光ビームでは、すべての光線がpおよびs偏光になることは容易に理解できる。

Fig. 1で示した、径および方位偏光ビームは光ファイバー内を伝搬するLP<sub>11</sub>ビームとほぼ同じである。またベクトルビームには、Fig. 1に示したビームの他に、多重リングを持つ径および方位偏光ビームや、花びら状の強度分布と偏光方向が方位方向に複数回回転するビームも知られている。

### 3 光ファイバーによる径偏光ビームの増幅

#### 3.1 実験方法

Fig. 2に径偏光レーザー増幅器の概略図を示す。増幅のための種光として用いる径偏光ビームは、われわれが提案・実証した、複屈折性を有するc軸カットNd:YVO<sub>4</sub>レーザー共振器を用いて発生させた。レンズを用いて径偏光ビームをYbドープダブルクラッドファイバーに導入し、ファイバーからの出射ビームを観測した。波長1064nmのレーザー光に対して、基本径偏光ビームに対応するLP<sub>11</sub>モードが伝播するように、コア径が15μmの光ファイバーを選択して使用した。ふたつのクラッドを持つ光ファイバーの内側のクラッドに励起レーザー光を導入することで、Ybがドープされたコアの部分を励起し、径偏光ビームの増幅を行った。励起光にはファイバー結合型半導体レーザーを使用し、精密に温度を調整することによって、発振波長をYbの吸収ピークである975nmに同調した。光ファイバー出口から射出した、増幅された径偏光ビーム(1064nm)と励起

光(975nm)を分離するために、ダイクロイックミラーを使用した。レーザービームの強度プロファイルはCCDにより計測した。

#### 3.2 実験結果

Fig. 3に、c軸カットのNd:YVO<sub>4</sub>レーザーから発生した出力160mWの径偏光ビームのみをYbドープ光ファイバーを伝播させた後の、遠視野での(a)出力ビームの横断面強度分布及び(b)-(d)直線偏光板透過後の強度分布を示す。図(a)より、光ファイバー伝播後も中心に穴の開いた強度分布であること、また図(b)-(d)より、ビームの偏光分布が放射状であることが分かる。これらより、光ファイバー伝播後も径偏光ビームが保たれていることが確認された。また、ファイバー結合効率はおよそ50%であった。

Fig. 4に、半導体レーザー光(出力2780mW)を光ファイバーに導入して増幅した場合の、遠視野での(a)出力ビームの横断面強度分布、及び(b)-(d)直線偏光板透過後の強度分布を示す。得られた強度および偏光分布はFig. 3とほとんど同じであって、増幅後も出射ビームの偏光および強度分布が維持されていることが分かる。

Fig. 5に、種光の出力が160mWの場合の、励起光出力に対する増幅されたビームの出力を示す。図より、励起光出力が2780mWの場合、光ファイバー内での増幅作用により出力1060mWの径偏光ビームが得られていることが分かる。この時の増幅率は6.6倍、スロープ効率は約42%と求められた。

このスロープ効率は、一般に行なわれている直線偏光のガウスビームを種光として用いたファイバー増幅の結果(73%)に比べると低い値であった。この理由として、径偏光ビームがドーナツ状の強度分布であるのに対し、光ファイバーコアでの利得分布が

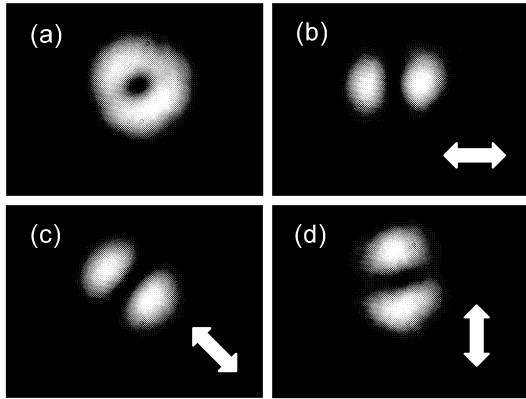


Fig. 3 Ybドープ光ファイバー伝 (a) 横断面強度分布および(b)-(d)直線偏光板透過後の強度分布. 矢印は直線偏光板の向きを示す.

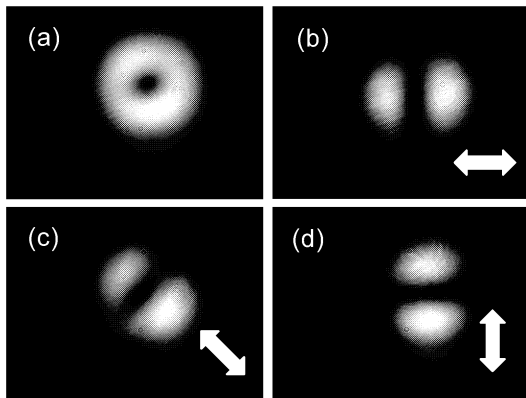


Fig. 4 増幅された径偏光ビームの遠視野での (a) 横断面強度分布および(b)-(d)直線偏光板透過後の強度分布. 矢印は直線偏光板の向きを示す.

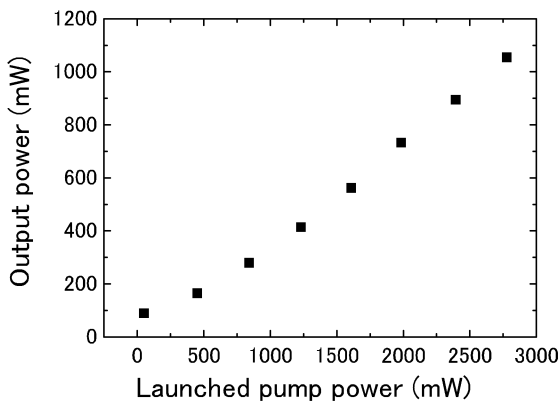


Fig. 5 励起光出力に対する径偏光ビーム出力. 種光の径偏光ビーム出力は 160 mW.

ほぼ均一であることに起因していると考えられる.

事実, 種光の出力が小さい場合には, ガウス型の強度分布と広いスペクトルを持つ ASE が強く発生することが確認された. しかしながら, 種光出力が 160mW の場合, ASE は観測されなかった. 光ファイバーコア構造を変更することで, 将来的にはスロープ効率は大幅に改善できると考えられる.

## 4 熱効果を利用したベクトルビームの直接発生

### 4.1 原理と実験方法

ロッドタイプの Nd:YAG レーザーは加工用レーザーとして広い範囲で利用されているが, ロッド中の熱分布に起因する depolarization によってレーザー光の偏光分布を乱してしまい, 出力の飽和あるいは低下をもたらすことが知られている. これに対して, 径偏光あるいは方位偏光ビームは, 偏光分布が円筒対称であるために, ロッド中で発生する熱複屈折の影響をほとんど受けることがないため, 高出力化および高品質化に大きな効果があると予想されている. 本研究では, この熱複屈折を積極的に利用して径あるいは方位偏光ビームを発生させることを試みた. ロッド中に円筒対称な熱複屈折が発生すると, 常光線と異常光線では屈折率が異なる. ここでさらに熱レンズ効果が加わると, ロッド中での常光線と異常光線の光路が異なるため, 光共振器の安定境界付近では, 一方の偏光性だけが安定になることがある. 異常光線は径偏光ビームに対応しているため, 異常光線だけが安定になるような光共振器を設計すれば, 自動的に径偏光ビームだけが発振することになる.

実験においてはレーザー媒質として, LD 側面励起の Nd:YAG ロッドを使用した. リアミラー (RM) には, 高反射率の平面ミラーを用い, 出力ミラー (OC) は平面ミラー (%R = 90) とした. ロッドの中心から OC および RM までの距離を, それぞれ  $d_{OC}$  = 130 ~ 600 mm および  $d_{RM}$  = 70 ~ 1000 mm の範囲で変化させた. 熱レンズ効果の焦点距離  $f$  は, ロッドに  $TM_{01}$  および  $TE_{01}$  モードの LD ビーム ( $\lambda = 780$  nm) を入射して測定した.

### 4.2 結果と考察

Fig. 6 に,  $d_{OC} = 600$  mm とし,  $d_{RM}$  を 70 から 1000 mm まで変化させたときのレーザー出力・発振特性を示す.  $d_{RM} = 70$  mm では, 駆動電流 ( $I$ ) の増加とともに出力パワーが増大したが,  $I = 17$  A で発振が

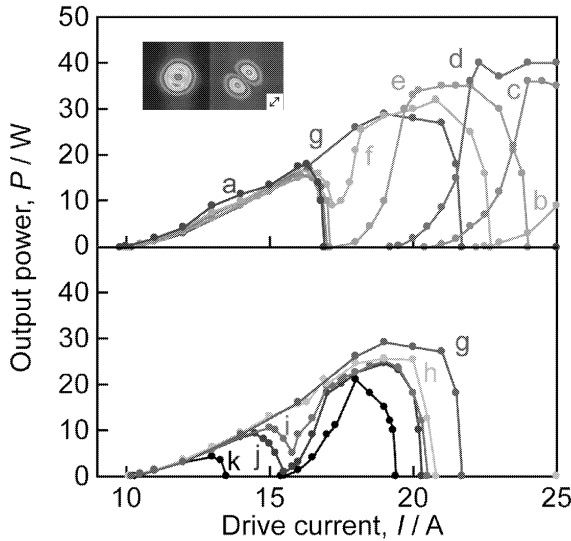


Fig. 6  $d_{RM}$  が 200 から 600 mm の時 (上図および 600 から 1000 mm の時 (下図) のレーザー出力. 挿入図:  $TM_{01}$  モードビームの全強度 (左) および直線偏光板を透過した後の強度分布 (右).

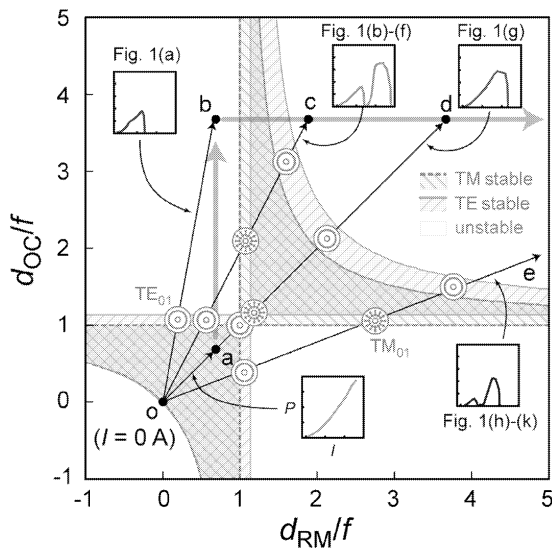


Fig. 7  $TM_{01}$  および  $TE_{01}$  モードに対する光共振器の安定性ダイアグラム.

停止した (Fig. 6(a)). 発振停止の直前では  $TE_{01}$  モード発振が認められた.  $RM$  をロッドから遠ざけると ( $d_{RM} = 200$  mm), 発振停止後に再発振する領域が現れた (Fig. 6(b)).  $d_{RM}$  を増加させると再発振電流値は低下し, 再発振後には  $TM_{01}$  モード発振が認められた (Fig. 6(c)-(f), 内挿図). 対称共振器構成 ( $d_{RM} = 600$  mm) では, 発振が中断する領域は認められなかった (Fig. 6(g)).  $d_{RM}$  を対称共振器位置か

らさらに増加させると, 今度は発振が中断する電流値が減少する傾向に転じた (Fig. 6(i)-(k)). いずれの構成でも, 発振停止前には  $TE_{01}$  モード発振が, 再発振後には  $TM_{01}$  モード発振が観察された.

この発振特性は, ロッドの熱レンズ効果と熱複屈折性を考慮したレーザー共振器の安定性ダイアグラムを用いて説明できる (Fig. 7). 熱レンズ効果 (f) を持つ共振器の安定発振条件は,  $|(1-d_{RM}/f_{TM, TE})(1-d_{OC}/f_{TM, TE})| \leq 1$  となる. ここで, YAG ロッド熱複屈折性により f は常光線 (方位偏光成分: TE) と異常光線 (径偏光成分: TM) とで異なり,  $f_{TE}/f_{TM} \sim 1.2$  であった. 一方, I の増加とともに熱レンズの f は小さくなり, 共振器の安定条件はダイアグラム上を遷移し, その経路は共振器構成によって決まる. 共振器の安定条件が境界を跨ぐ領域では, 熱複屈折性に起因して  $TE_{01}$  と  $TM_{01}$  モードの安定性に差が生じ, いずれかのモードのみが安定となる領域が存在する. このように, ロッドの熱効果を利用することで,  $TE_{01}$  および  $TM_{01}$  モードの選択的発振が可能であることを明らかにした.

このようにして選択発振した径および方位偏光ビームの出力は共振器に依存するものの, 30W 以上の値が得られた. 本方法では, 共振器ミラーやロッドなどは全く同じであっても, 共振器長を選べば, 径偏光と方位偏光を自由に選択できる. また, 最大の出力が得られるように調整することも可能である.

## 5 まとめ

新しいレーザープロセッシング用光源として期待される径偏光ビームの出力向上のために, 光ファイバーレーザー増幅と, 固体レーザーの熱複屈折を利用した直接発振を試みた. その結果, 光ファイバーレーザー増幅では, 1W 以上, 直接発振では 30W 以上の出力が得られた. これらの出力はマイクロメートルオーダーの穿孔やレーザーマーキングに対しては十分な値であると言える. さらにこれらの値は限界値ではなく, 今後さらなる出力向上が見込まれ, 溶接や切断などの大出力が要求されるレーザープロセッシングに対しても有効なレーザー光源としての利用が期待される.