



S. Sato

次世代プロセッシングのための ベクトルビームの開発

佐藤 俊一 *

1. まえがき

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。これらのビームはスカラービームとも呼ばれる。これに対して、ベクトルビームと呼ばれる、空間的な偏光分布が不均一である光ビームが存在していることは古くから知られていたものの、研究が活発になったのはごく最近のことである。ベクトルビームの応用としては、荷電粒子の加速や超解像顕微鏡の他に、高効率性と精密加工性を兼ね備えた次世代プロセッシング用レーザー光源としての利用が期待されている。

その理由は、ある種のベクトルビーム (Fig. 1 の経偏光ビーム) を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ためである。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。

前述のように、ベクトル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品質や安定性の点で十分であるとは言いがたい。従って、レーザープロセッシングに使用できるような高品質・高安定・高出力ベクトルビームの開発は急務となっている。

我々はいくつかの新しいベクトルビーム発生方法の開発に取り組んできているが、本稿では、レーザープロセッシングでの使用に適するような出力・安定性・品質を併せ持つベクトルビーム開発に関して、天田財団助成によって得られた成果と、その後の進展について報告する。

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 (ラジアル) 偏光および方位 (アジマス) 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、強度分布に注目するとともにドーナツ型で、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ことに起因している。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ため、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、すべての光線がそれぞれ p および s 偏光となる。

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 LP₁₁ ビームとほぼ同じである。またベク

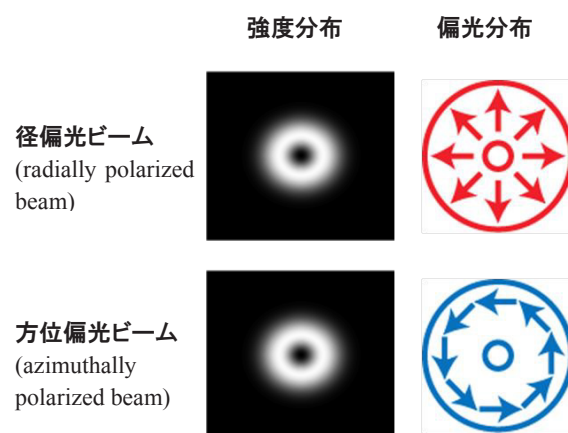


Fig. 1 径および方位偏光ビームのビーム断面での強度および偏光分布

* 東北大学 多元物質科学研究所 教授

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 実験装置の概要

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: YVO₄ 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 1064 nm のレーザー光に対して、基本径偏光ビームに対応する LP₁₁ モードが伝播するように、コア径が 15 μm 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 975 nm 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 (1064 nm) と励起光 (975 nm) 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²⁾

Fig. 3 に、c 軸カットの Nd: YVO₄ レーザーから発生した出力 160 mW 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およそ 50% であった。

Fig. 4 に、半導体レーザー光 (出力 2780 mW) 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 160 mW 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 2780 mW の場合、光ファイバー内での増幅作用により出力 1060 mW 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 160 mW の場合、ASE は観測されなかった。

3.3 出力アップ

上記において、ダブルクラッド光ファイバー増幅器を用いることによって、ベクトルビームの増幅が可能であることが実証されたので、この結果を踏まえ、より高出力な径偏光ビームの増幅を試みた。まず、種光として半導体レーザー励起の Nd: YAG レーザーからの径偏光ビームを使用した。このレーザー共振器には、径偏光に対する反射率が高いフォトリック結晶ミラーを使用しており、通常のミラーと交換するだけで径偏光ビームが得られる。この出力は 1 W と大きいほか、そのビーム品質も高く、径偏光の純度として 95% 程度が得られている。このビームを、コア径が 30 μm の Yb ドープ光ファイバー増幅器に入力し、波長 975 nm の半導体レーザーで励起した。増幅された光の偏光分布を測定したところ、Fig. 4 と同様なパターンが観測され、径偏光であることが確認された。また、励起光出力が 30 W のとき、増幅光の出力は 21 W であり、そのスロープ

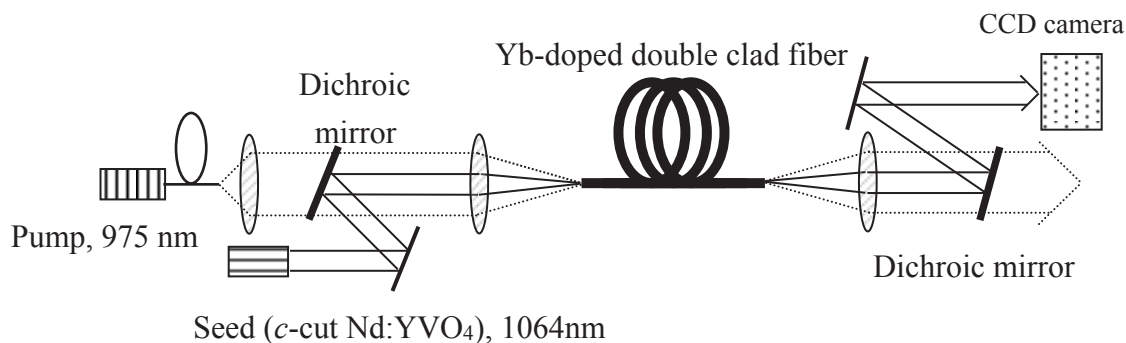


Fig. 2 径偏光レーザー増幅器

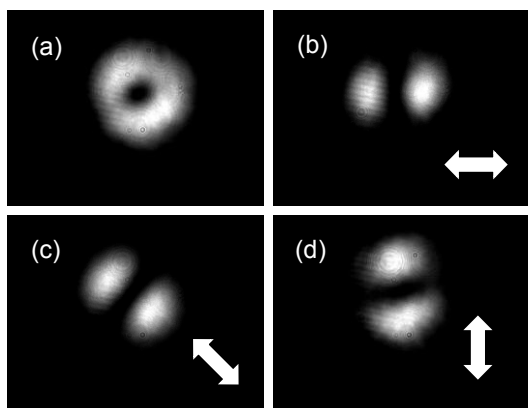


Fig. 3 Yb ドープ光ファイバー伝 (a) 横断面強度分布および(b)-(d)直線偏光板透過後の強度分布. 矢印は直線偏光板の向きを示す.

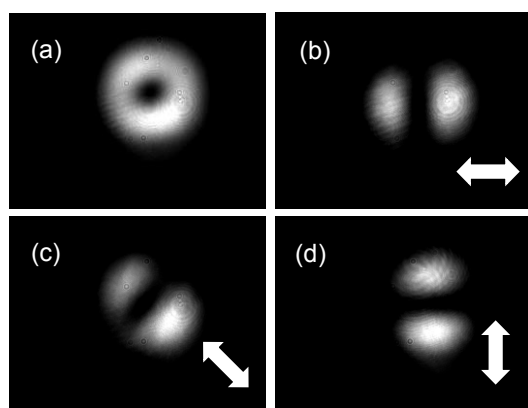


Fig. 4 増幅された径偏光ビームの遠視野での (a) 横断面強度分布および(b)-(d)直線偏光板透過後の強度分布. 矢印は直線偏光板の向きを示す.

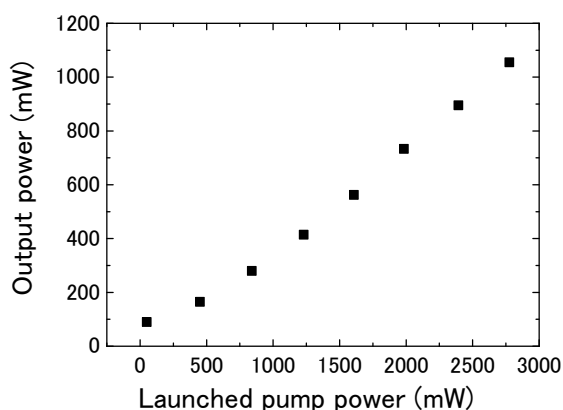


Fig. 5 励起光出力に対する径偏光ビーム出力. 種光の径偏光ビーム出力は 160 mW.

効率は 70% に達した. これは, コア径の大きな光ファイバー増幅器を使用したため, ドーナツ状の強度分布を持つ径偏光ビームに対しても十分な利得があるためと考えられる. また, 出力光のスペクトルには, 種光と同じ 1064nm の強いピークのみが観測され, ASE は十分に抑圧されていることが分かった³⁾.

最近では, 光ファイバーの複屈折に起因する偏光分布の低下に対して, 種光の偏光分布を制御することによって出力光の偏光分布を補償する試みを行っている. 種光出力 1.5W において, 出力 74W の励起光光源を用いた増幅実験を行い, 増幅光として 49W を得た. 径偏光度は 86% と種光に比べるとやや低下しているものの, ビーム品質 (M^2) は 2.4 と, 理論値である 2.0 に近い値が得られている.

4. 熱効果を利用したベクトルビームの直接発生⁴⁾

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分野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れてしまい, 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, この熱複屈折光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, 一方の偏光成分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 $d_{OC} = 130 \sim 600$ mm および $d_{RM} = 70 \sim 1000$ 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 で発振が停止した (Fig. 6(a)). 発振停止の直前では TE_{01} モード (方位偏光) 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 (径偏光) 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,

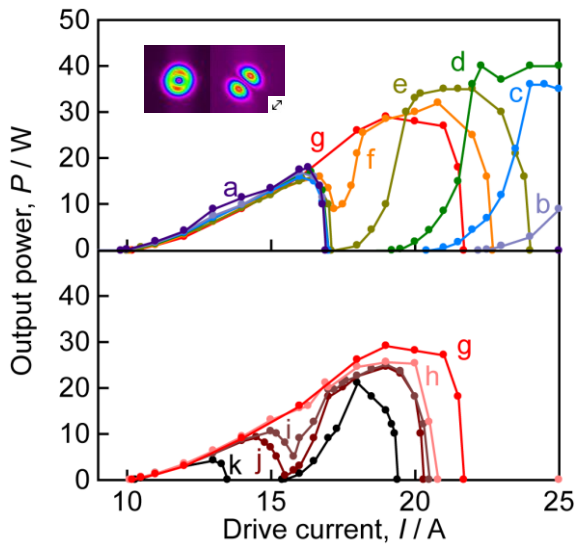


Fig. 6 d_{RM} が 200 から 600 mm の時 (上図および 600 から 1000 mm の時 (下図) のレーザー出力. 挿入図: TM_{01} モードビームの全強度 (左) および直線偏光板を透過した後の強度分布 (右).

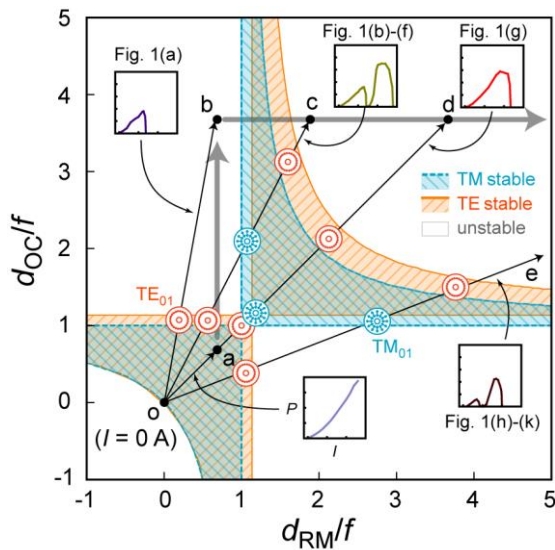


Fig. 7 TM_{01} および TE_{01} モードに対する光共振器の安定性ダイアグラム.

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. ベクトルビームによる穴開け加工

これまでに述べたベクトルビームは連続発振である. 微細加工を行う場合にはピコ秒やフェムト秒のパルスレーザーがより適していると考えられるが, 現在までにモードロック等によるパルス発振は試みていないものの, 光ファイバー増幅においては, パルスの種光があれば同様の方法で増幅することは可能であると考えられる.

一方, 直線偏光の超短パルス光源はよく利用されているが, 偏光変換素子を用いてベクトルビームに変換することは容易であり, 現在われわれはこの変換法を用いたフェムト秒ベクトルビームによる穴開け加工実験を試みている.

ベクトルビームによる穴開け加工の場合, 穴内部での反射が高いため, 径偏光ビームよりも方位偏光ビームの方が有利であると推測されている. しかし, 材料やレンズなどによって相異なる報告がなされており, いまだ, 共通した認識が持てない状況である. われわれは, 異なる開口数を持つ対物レンズを使用して, 複数の材料に対するベクトルビームの穴開け加工実験を進めている.

開口数が小さい場合は, ベクトルビームよりも, むしろ直線偏光ビームの方が, 加工速度が速く, また, 径偏光と方位偏光との間に優位差は見られなかった. これは, 焦点でのスポット径に大きく依存していると考えられる. しかし, 大きな開口数のレンズでは, 試みたすべての材料に対して, 明らかに方位偏光ビームが優位であることが認められた. これより, 穴内部での反射回数が多いほど方位偏光ビームによる加工速度が速いと考えられる. また, 方位偏光ビームの優位性は, 吸収の大きな材料に対しても認められている. これらの結果は微細な穴開け加工におけるベクトルビームの偏光の効果を示しており, 偏光選択による効率的な加工が期待される.

6. あとがき

ベクトルビームにはスカラービームにはない優れた特徴があり, われわれは超解像顕微鏡とレーザー加工を中心として応用研究を進めている. これらの応用に対して, ベクトルビームの特性を十分に生かし切るような性能を持つ光源の開発に対する課題はまだ多い. 実用性を考慮する

と, 半導体レーザーなどの安価で高品質なレーザー媒質が有望であると考えられるが, 現状では半導体からのベクトルビームの発振の報告は極めて少なく, 今後は素子構造などにも踏み込んだ取組みも必要であると考えられる.

謝 辞

本研究は, 公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに, 同財団に感謝いたします.

参考文献

- 1) Q. Zhan, Adv. Opt. Photon. **1**, 1 (2009).
- 2) T. Chubachi, Y. Kozawa, and S. Sato, Opt. Lett. **34**, 716 (2009).
- 3) S. Kanazawa, Y. Kozawa and S. Sato, Opt. Lett. **39**, 2857 (2014).
- 4) A. Ito, Y. Kozawa and S. Sato, J. Opt. Soc. Am. B **26**, 708 (2009).