

Y b 添加マルチコアファイバーレーザーの研究

量子・物質工学科 植田研究室 小林哲也

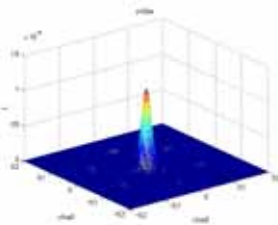
はじめに

単体のファイバーを高出力化するには誘導ラマン散乱や誘導ブリリュラン散乱による非線形の影響、破壊閾値の影響で限界がある。そこでレーザーパワーの重畳を目的としたレーザーアレイの研究が行われてきた。複数のレーザーが位相同期したコヒーレントアレイが実現すれば、高精度加工を代表とした産業界への貢献だけでなく、医療、ライダー、リソグラフィ用 EUV 光源などの幅広い応用が期待できる。そこで本研究では単体のファイバーに複数のコアを持つことでレーザーアレイを構築した Y b 添加マルチコアファイバーを用いた。本研究ではマルチコアファイバーで位相同期させ In-phase モードのみを励振させることを目的とした。

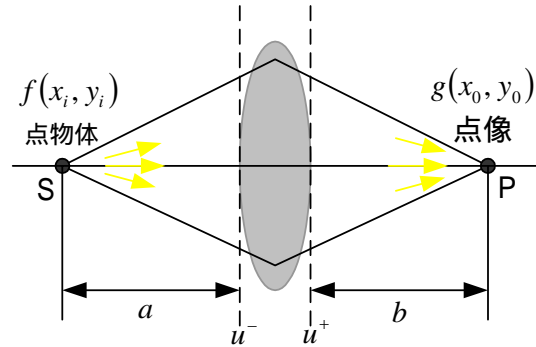
原理

() スーパーモード

マルチコアファイバーにおいてコア同士の間隔が非常に近い場合、コア間の相互作用によって一般のモードでは定義できない特有のモードを持つ。これがスーパーモードである。さらに各々のスーパーモードが位相差 0 で位相同期しているモードを In-phase モードという。このモードは左図のように遠視野で回折限界光を結べるという特性がある。



() レンズのフーリエ変換作用



点光源 S がレンズの前方、距離 a の位置に尾あり、その像 P がレンズの後方から b の距離にできたとする。レンズの焦点が f の場合以下の式が成り立つ。

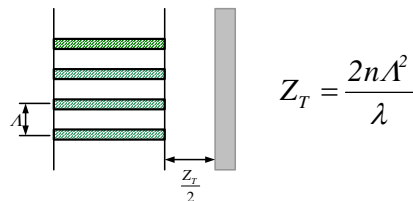
$$1/a + 1/b = 1/f$$

またレンズの後方焦点面で観測する場合 ($b=f$ のとき)、フレネル回折とフーリエ変換により点像 P における波面は以下のようにになる。

$$g(x_0, y_0) = \frac{1}{i\lambda f} \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda f}\left(1 - \frac{a}{f}\right)(x_0^2 + y_0^2)\right] \cdot F\left(\frac{x_0}{\lambda f}, \frac{y_0}{\lambda f}\right)$$

このようにレンズの焦点面では入力信号 $f(x, y)$ のフーリエ変換が得られる。さらに $a = f$ 、つまり入力信号がレンズの前側焦点面にあれば位相項がなくなり、完全なフーリエ変換が得られる。これがレンズのフーリエ変換作用である。

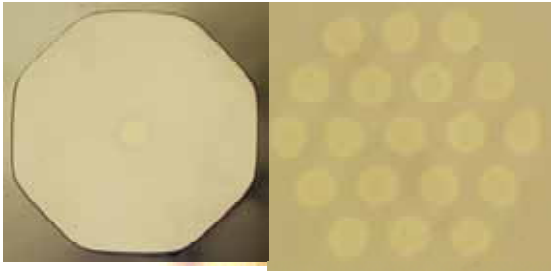
() Talbot 共振器



レーザーアレイにおいて回折光どうしの重ね合わせの結果、出射端面から $Z_T = 2nA^2$ のところで出射直後の強度分布が再現される。これが Talbot 効果というものであり、Talbot 共振器長 ($Z_T/2$) の位置にミラーを置き、出射直後の強度分布を戻すことで、位相同期させる共振器を Talbot 共振器という。

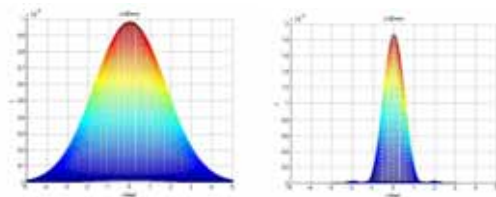
実験

本研究では $7.9\mu\text{m}$ の 19 個のコアを $11\mu\text{m}$ の間隔で三角格子状に配列した Yb 添加マルチコアファイバーを使用した(下図)。



このファイバーは $V = \frac{\pi d}{\lambda} NA = 1.584$ より

個々のコアのモードはシングルモードである。各コアから LP_{01} のビーム拡がり ($\omega_0=5.5$) を持った、同出力のガウシアンビームが出ていたとすると、遠視野において各ビームが完全にインコヒーレント、In-phaseのときのビーム拡がり ϕ はそれぞれ以下ようになる。

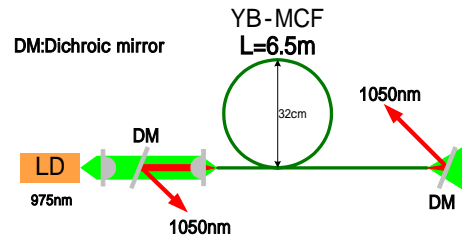


インコヒーレント
 $\phi=6.9[\text{deg}]$

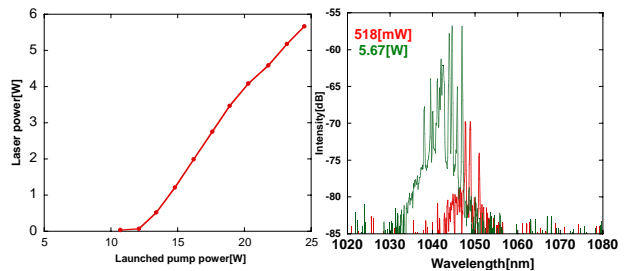
In-phase
 $\phi=1.9[\text{deg}]$

本実験では遠視野におけるビーム拡がり、ビームパターンによりモードの検証を行なった。

() 端面反射 端面反射の共振器



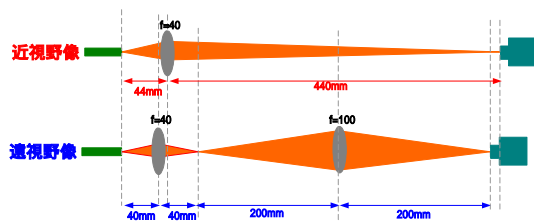
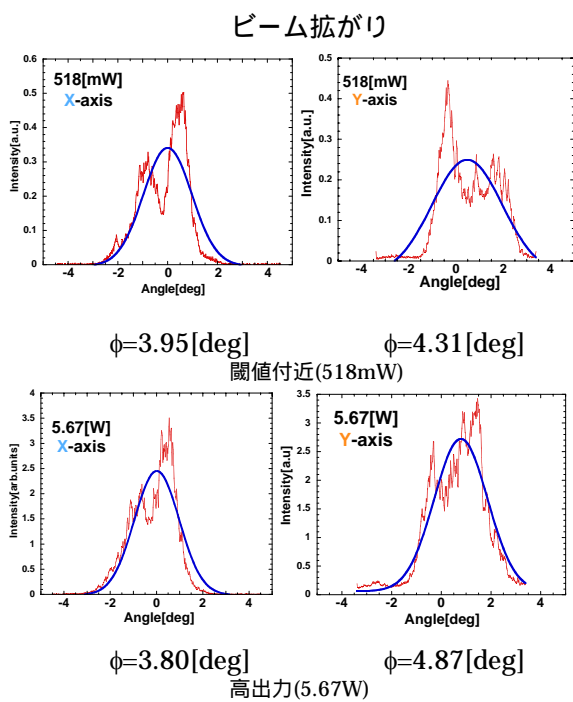
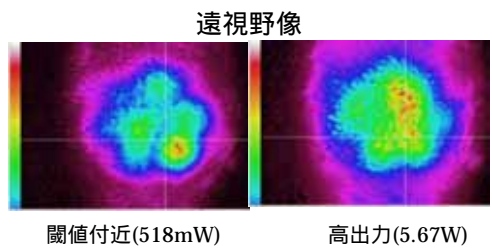
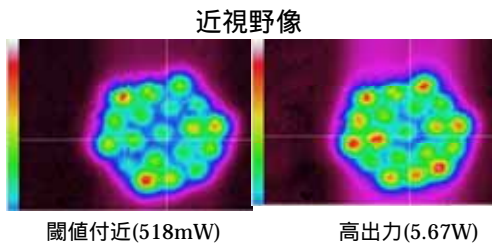
本実験では 975nm のファイバーカップル LD を $f=11$ のレンズでコリメイトし、 $f=8$ のレンズで集光させファイバーにクラッド励起させた。ファイバーの両端面をフラットに研磨することで両端面のフレネル反射によって共振器を構築した。出射されたレーザー光はダイクロイックミラーで反射させパワーおよびスペクトルを測定した。この時の出力特性のスロープ効率は 44.7% となった。



出力特性

スペクトル

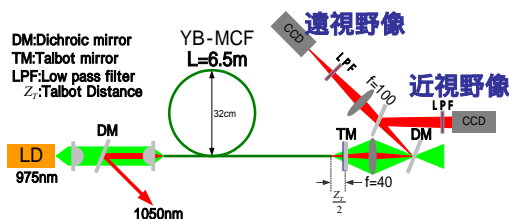
次に出射側に $f=8$ のコリメイトレンズを焦点より少し話した位置に配置し、結像を CCD で観測することで、近視野像を観測した。遠視野像においては $f=40$ のレンズをファイバーの出射端面から 40mm の位置に置き、レンズから 40mm の位置に CCD を置くことで観測を行なった。この時の閾値付近、高出力での近視野像、遠視野像、遠視野におけるビーム拡がりはそれぞれ以下ようになった。



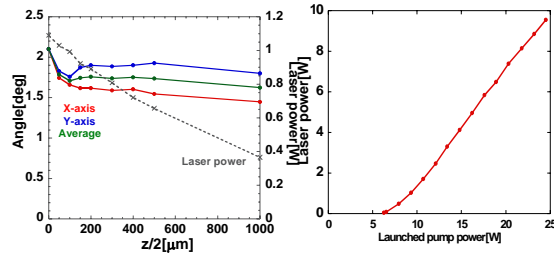
次に本実験では出射後に Talbot ミラー (HT<980nm,HR:1020 ~ 1200nm)を置くことで Talbot 共振器を構築した。また近視野像、遠視野像を精度よく測るために実験系を組みなおした。その方法としては Talbot ミラーの後に $f=40$ のレンズを調整できるようにしておき、近視野像では $f=40$ のレンズをファイバーの出射端面から 44mm の位置に設置し、レンズから 440mm の位置に CCD を置くことで実測の 10 倍の倍率で近視野像の測定を行なうものである。遠視野像の測定においては $f=40$ のレンズを端面から 40mm の位置に設置し、 $f=100$ のレンズを $f=40$ のレンズから 240mm の位置に置き、その後 200mm のところに CCD を置くことで、一度レンズのフーリエ変換作用を用いた後、イメージトランスファーさせて結象を観測した。

まず Talbot 共振器の実験はミラーをファイバーの端面に接触させた状態から徐々に離れたときのレーザーパワー、遠視野像のビーム拡がりの測定を行なった。この際遠視野像のビーム拡がりは $100\mu\text{m}$ のところで最小となった。本実験におけるファイバーの Talbot 共振器長が $134\mu\text{m}$ ということから Talbot 共振器によってより In-phase モードを選択励振できたと言える。以後の測定は Talbot ミラーを $100\mu\text{m}$ の位置に設置して測定を行なった。この時のレーザーパワーは以下のようになり、スロープ効率 54.3% となり端面 端面の時より高効率化すること

() Talbot 共振器



ができた。

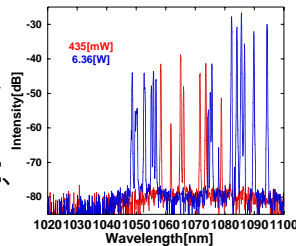


Talbot 共振器長

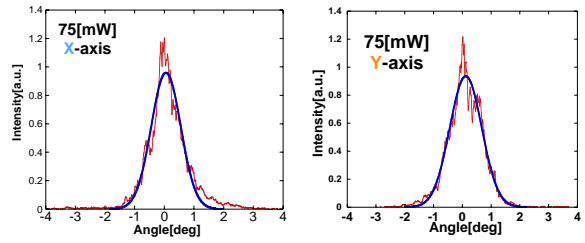
出力特性

スペクトルにおいては発振閾値が下がったことにより端面 端面のときより長波長側に移動した(右図)。

近視野像、遠視野像、遠視野における
ビーム広がりを ASE、
閾値付近、高出力
においてみると以下
のようになった。



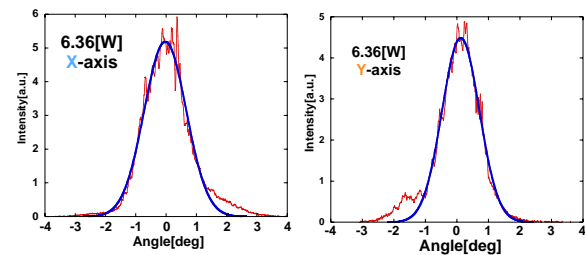
スペクトル



$\phi=1.99[\text{deg}]$

$\phi=2.22[\text{deg}]$

閾値付近(75mW)

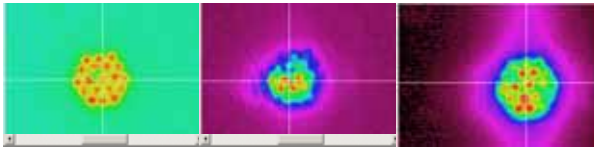


$\phi=2.78[\text{deg}]$

$\phi=2.37[\text{deg}]$

高出力(6.36W)

近視野像

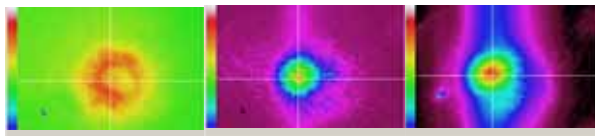


ASE

閾値付近(75mW)

高出力(6.36W)

遠視野像

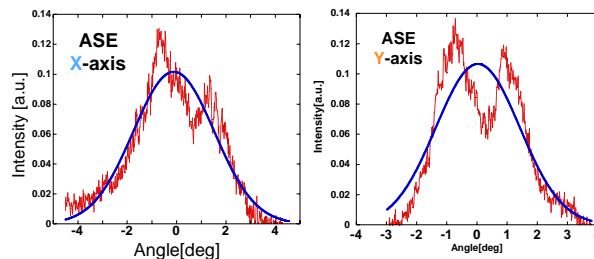


ASE

閾値付近(75mW)

高出力(6.36W)

ビーム広がり



$\phi=6.54[\text{deg}]$

$\phi=5.54[\text{deg}]$

ASE

結果

端面反射 端面反射共振器ではビーム広がり、遠視野像より位相同期はできたものの、マルチスーパーモード化してしまい、In-phase モードのみを励振させることはできなかったことがわかる。しかし Talbot 共振器を構築することで、高出力化に伴う高次モードの影響は多少あれども、In-phase モードを選択励振させることができた。また、発振閾値が下がり、スロープ効率も端面反射 端面反射共振器より高効率化させることができた。

今後の予定

M^2 値を測定しビーム品質の定量評価を行なう。また今回、Talbot 共振器によって In-phase モードが選択励振されたメカニズムを解明たいと考えている。後々は高エネルギーパルスが発振実験や、空間位相変調器を用いてコヒーレントビーム偏向なども検討している。