

# 複合共振器によるファイバーレーザーコヒーレントアレイに関する研究

植田研究室 松尾 圭悟

## 1. はじめに

高出力かつ高ビーム品質なレーザーはあらゆる分野での応用が考えられ、必要とされている。高出力なファイバーレーザーとして、ファイバーの体積に対する表面積の割合が大きいことと自由形状であることに注目し、渦巻きに巻いたディスク状のファイバーの側面から励起することで、1kW という高出力レーザーが実現されている。また、シングルモードファイバーよりコア径の大きい、ラージモードエリアファイバー（コア径が大きいことで単位面積あたりの強度が弱くなり非線形性を抑えることができる）を用いた研究が行われている。

一方高出力化の方法として、複数のレーザーをコヒーレントに加算するというコヒーレントアレイがある。コヒーレントアレイでは、既存の技術によって高出力化が望めるため非常に求められている技術であるといえる。

本研究ではファイバーカップラーを用いた方法を利用している。最近、同じようにファイバーカップラーを用いたコヒーレントアレイの研究が盛んに行われている。回折光学素子やビームスプリッターを用いた方法を比較すると、ファイバーカップラーを用いた方法は、結合時の挿入損失が少ない、複数のカップラーを用いて多段接続が可能、様々な共振器を構成することができるなど、いくつもの利点を持っている。

また、コヒーレントアレイのもう1つの特長である、ビーム方向のコヒーレント制御についても盛んに研究が行われている。これらの研究では、周波数変調器や位相制御器など機械部位が含まれ複雑な構成となっている。しかし、ファイバーカップラーを用いた本研究の方法では、機械部位が必要なくビーム方向の制御ができるという利点がある。

最後に、複合共振器の特長を活かし高調波モード同期ファイバーレーザーの実現を目指した。モード同期には、能動モード同期法と受動モード同期法がある。

能動モード同期は、共振器内の光変調器に変調信号を印加することによりパルスが発生させる方法であり、パルスの繰り返しは共振器長で決まる周波数の任意の整数倍に設定できるため、繰り返しの高い GHz 帯のパルスが発生できる長所がある。例として、ファイバーリング共振器内にマッハツェンダー型変調器を用いる方法や、同じくファイバーリング共振器内にファブリペローエタロンを用いる方法が報告されている。

受動モード同期は、共振器内に可飽和吸収体を置くか、ファイバーの非線形光学効果を利用する[9]ことで、外部からエネルギー的な制御をせず短パルスが発生させる方法である。この方法は、利得帯域を最大限に用いたフェムト秒パルスが発生できる長所がある。パルスの繰り返しは共振器長によって決まるため、能動モード同期に比べ 100MHz 以下と低くなる。

## 2. 複合共振器

本研究では、N本の独立したファイバーレーザーをN×Nファイバーカップラーを用いて結合し、複合共振器を構成している。2×2ファイバーカップラーを用いた場合、2つのファブリ・ペロー共振器が存在する複合共振器となっている。この共振器構成とそれぞれの共振周波数の関係を図1に示す。

マイケルソン型共振器では、2つのファブリ・ペロー共振器の発振条件を同時に満たす周波数で発振するため周波数間隔は、ファブリ・ペロー共振器の周波数間隔を用いて式(1)で表される。

$$\Delta \nu_f = c/2nL \quad \Delta \nu = c/2n(L_2 - L_1) \quad (1)$$

ファイバーレーザーコヒーレントアレイでは、複合共振器を用いることで最も発振しやすい周波数でレーザー発振が起こる。

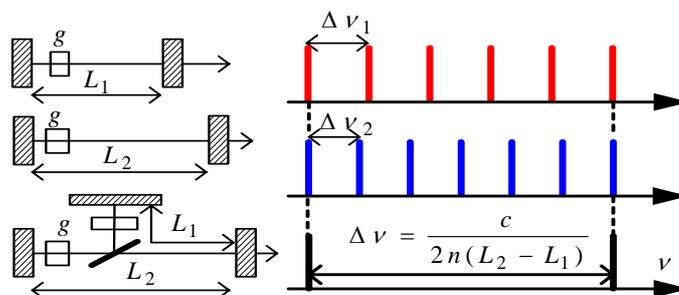


図1 複合共振器の特長

## 3. ファイバーレーザーコヒーレントアレイ

N = 2

N=2の時の実験構成図を図2に示す。2つの独立したEr添加ファイバーレーザーを作製し、2×2ファイバーカップラーを用いて結合することで実験を行った。

共振器は、ポートAのファイバー端面のフレネル反射(3.4%)と2つのFBGによって複合共振器を構成している。また、ポートBにはファイバー端面を8度に研磨したFC/APCを融着し戻り光をなくしている。

この時の出力のパワー特性を図3に示す。

ポートAから最大出力2.88Wが得られた。このとき、加算効率を

$$(\text{加算効率}) = \frac{(\text{コヒーレントアレイ後の出力})}{(\text{独立状態のレーザー出力の総和})}$$

と定義すると、N=2の場合、加算効率93.5%を得ることができた。

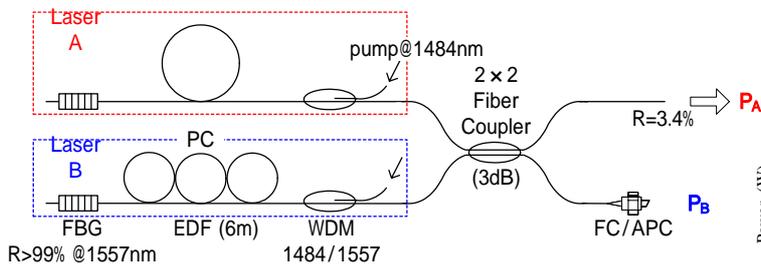


図 2 実験構成図 (N=2)

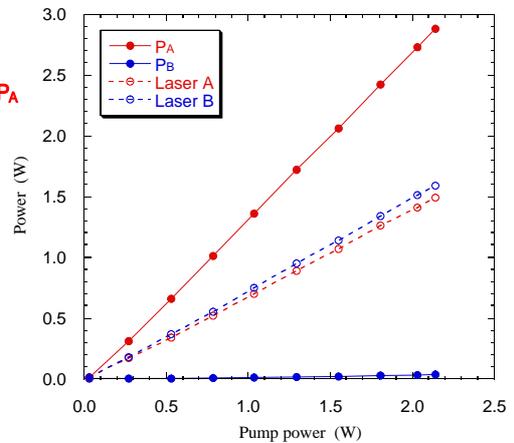


図 3 出力のパワー特性 (N=2)

### N = 8

まず 4 本の Er 添加ファイバーレーザー (EDFL) を 4×4 ファイバーカップラーによって結合し Array A, Array B、2 つのコヒーレントアレイ (N=4) を作製した。さらに、Array A, Array B を 2×2 ファイバーカップラーによって結合することでコヒーレントアレイ (N=8) の実験を行った。共振器は、ポート A のファイバー端面 (フレネル反射 3.4%) とファイバー端面に誘電体多層膜を蒸着したファイバー端面鏡 (R > 99%) によって構成される複合共振器となっている。Er 添加ファイバー (EDF) は波長選択性 (WDM) ファイバーカップラーを用い、自作のラマンファイバーレーザー (波長 1484nm) で励起した。

このときの出力のパワー特性を図 5 に示す。N=4 のとき、Array A、Array B はそれぞれ加算効率 94.2%、96.0% を得た。さらに N=8 のときは、最大出力 2.65W、加算効率 84.7% を得ることができた。

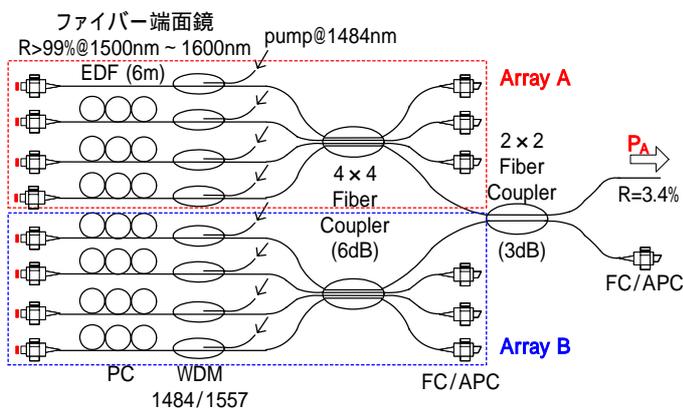


図 4 実験構成図 (N=8)

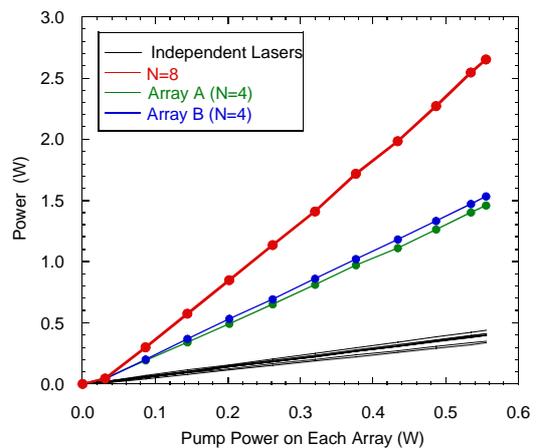


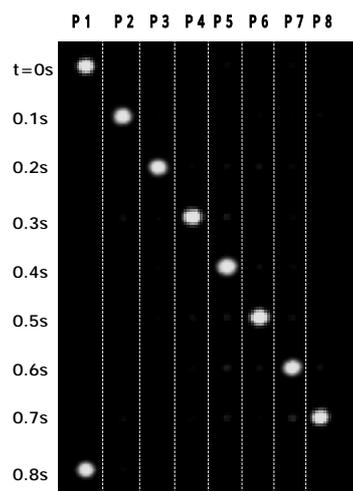
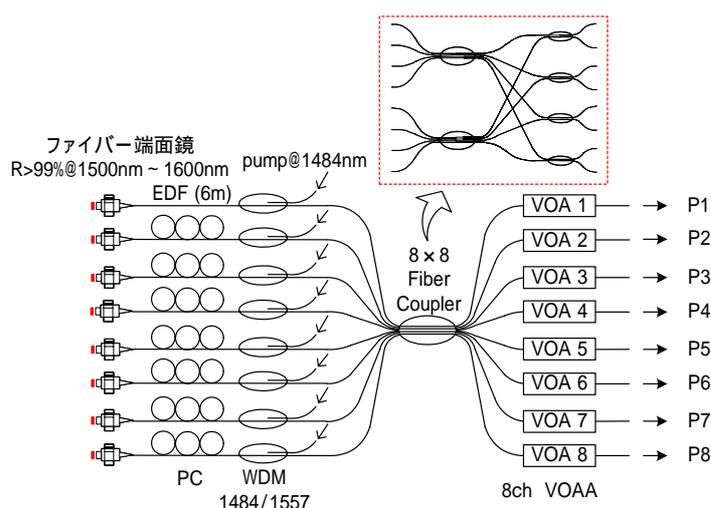
図 5 出力のパワー特性 (N=8)

## 4. ビーム方向のスイッチング

8×8 ファイバーカップラーは、4×4、2×2 ファイバーカップラーを組み合わせで構成した。VOAA（可変光減衰器アレイ）を各出力ポートに挿入し、ポートの透過率を電気光学的に制御する。複合共振器には、8ポートに対応して8通りのコヒーレント加算モードがある。出力ポート以外のポートに電圧を加え損失を与えることにより、閾値を制御することで単一出力が得られる。電圧非印加のポートを時間的に切り替えることで、ビーム方向のスイッチングを実現した。実験装置の構成と走査速度 10Hz での結果を図 6、図 7 にそれぞれ示す。

損失 20%、45%のとき、それぞれ 40~70、100~200 のコントラスト比を得た。共振器内の近接場結合であるためサイドローブがなく単一横モードの高ビーム品質でのビーム走査を実証した。

今回の装置では、矩形電圧波形でスイッチングしているために緩和発振が起こり、走査速度の限界を制限している。印加電圧波形を最適化し、緩和発振を抑圧することで一層の高速ビーム走査が期待できる。



## 5. 高調波モード同期ファイバーレーザー

高調波モード同期とは、共振器長の長さによって決まる基本繰り返し周波数の整数倍の変調をあたえることで得られる。この整数倍の変調をあたえる方法として、電気光変調器や音響光変調器を用いるや、共振器内にファブリペローエタロンなどを挿入する方法がある。しかし、本研究では、これまで用いてきた複合共振器の特長である、2つの共振器長の差によって縦モード間隔が離散化するという特長を用いて整数倍の変調を与えることで、高調波モード同期の実現を目指した。

## 5.1 モード同期ファイバーレーザー

まず基本繰り返し周波数のモード同期ファイバーレーザーを作製した。構成図を図 8 に示す。共振器は、SESAM と FR ミラーによって構成した。

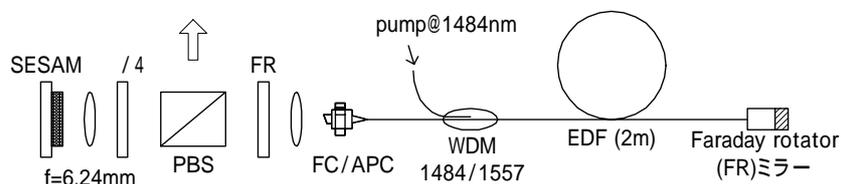


図 8 モード同期ファイバーレーザー実験構成図

パルスの取り出しは、 $\lambda/4$  板と偏光依存型ビームスプリッター (PBS) を用いて取り出し効率が可変となる構成とした。また 2 つの FR を用いることでファイバー内での偏光の不安定性を抑えている。このとき得られたモード同期のパルス列と発振スペクトルを図 9、図 10 に示す。

繰り返し周波数 12.2MHz、スペクトル幅 (FWHM)、パルス幅 (FWHM) 549fs、出力パワー 2.75mW が得られた。このときのパルス幅とスペクトル幅の積は、3.19 となりほぼフーリエ限界に近いパルスが得られていることが分かる。

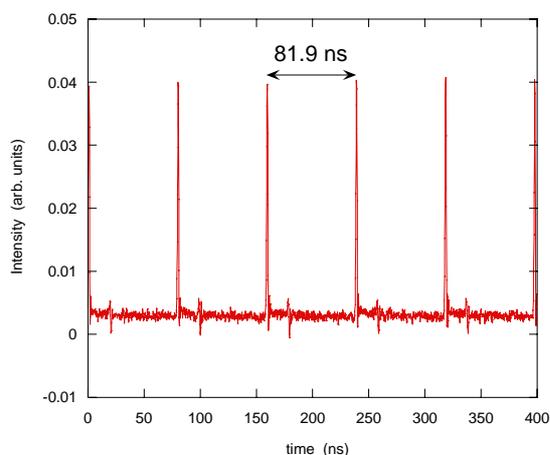


図 9 パルス列

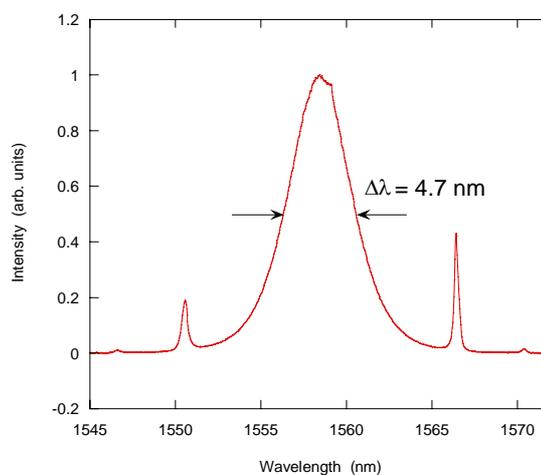


図 10 発振スペクトル

## 5.2 高調波モード同期ファイバーレーザー

基本繰り返し周波数のモード同期をもとに複合共振器を構成し、共振器の差  $L2 - L1$  を調節し、20 次の高調波モード同期が得られる条件で実験を行った。構成図を図 11 に、このとき得られたパルス列、発振スペクトル、ビートスペクトルを図 12 ~ 14 に示す。

結果として、高調波モード同期は得られなかった。しかし、CW 成分が残っているが、繰り返し 276MHz (基本繰り返し周波数 13.8MHz に対して 20 次の高調波)、パルス幅 (FWHM) 924fs、

出力パワー30.3mW のパルス列は得られた。

さらに共振器長を調節することで、コヒーレント加算モード以外のモードを 40dB に抑圧できた。これによって複合共振器によるコヒーレント加算モードの条件は達成できたと考えられる。

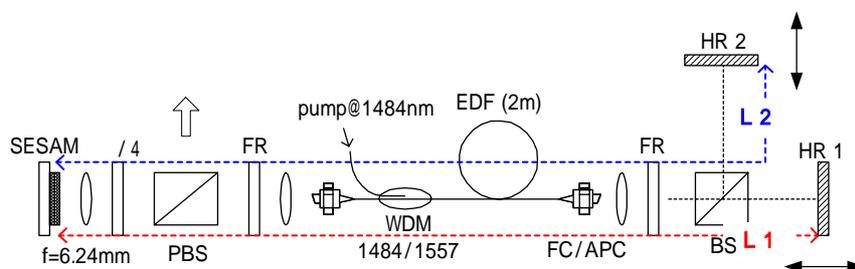


図 11 高調波モード同期ファイバーレーザー実験構成図

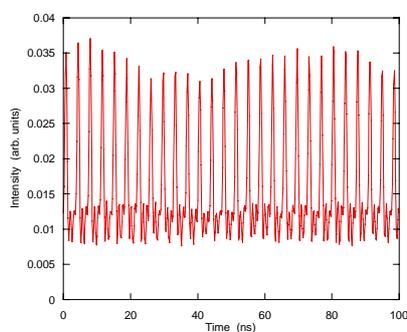


図 12 パルス列

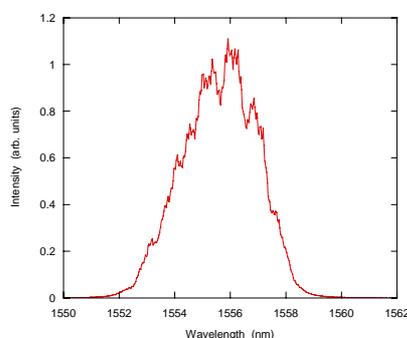


図 13 発振スペクトル

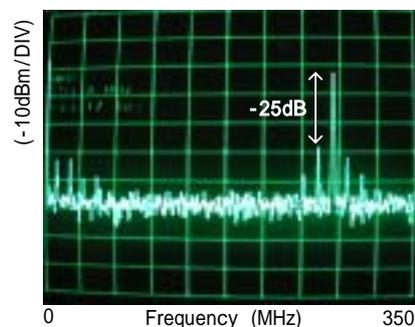


図 14 ビートスペクトル

## 6 . まとめ

ファイバーレーザーコヒーレントアレイでは、 $N=2, 4, 8$  と実験を行いそれぞれ加算効率 93.6%、96.1%、84.7%と高い加算効率を得ることができた。

ビーム方向のスイッチングでは、VOAA を用いることで出力ビーム方向のスイッチングを実現し、40~70 (損失 20%時)、100~200 (損失 45%時) と高コントラスト比を得た。また、ビーム走査速度~3kHz と高速ビーム走査を実証した。印加電圧を最適化することで、さらなる高速化が可能であると考えられる。

高調波モード同期ファイバーレーザーでは、CW 成分が残ってはいるが、繰り返し周波数 276MHz (基本繰り返し周波数 13.8MHz に対して 20 次の高調波) パルス幅 (FWHM) 924fs、出力パワー30.3mW のパルス列が得られた。しかし、パルス列にモジュレーションがみられるなど不安定な要素が存在する。コヒーレント加算モードに対してその他のモードの抑圧が 40dB 以下になるよう共振器長の条件は達成することができた。今後、取り出し効率と励起パワーを調節し共振器内パワーを最適化することで、CW 成分のない高調波モード同期が実現できると考えられる。