

コヒーレント加算ファイバーレーザーに関する研究

電子工学専攻 植田研究室 関口知樹

1 はじめに

半導体レーザー励起希土類添加ファイバーレーザーは2重クラッド構造ファイバーによって110Wシングルモード発振が得られたことにより、高出力、高ビーム品質なレーザー装置であると位置づけられてきている[1]。全ファイバーレーザー装置は様々な利点を持っており、高い変換効率、装置の小型化、信頼性などが挙げられる。

ファイバーレーザーの高出力化の研究は主に、多くの励起光をどのように効率よくファイバーのコアに吸収させるかという研究が行われているが、一方で、複数のレーザーをコヒーレント加算するという技術は、既存の技術によって、高出力化が可能であるため、非常に求められている技術といえる。

一般に光のコヒーレントな加算には精密な空間、時間の位相制御を必要とする。しかし、本研究の方法はシングルモードファイバー内での干渉であるため、空間モードの不整合は起きない。また、縦モードは、その共振器のコヒーレント加算が得られるようなモードのみが自然に発振するために、周囲の環境に影響を受けることは無く、制御を必要としないといった利点を持つ。

2 マイケルソン共振器

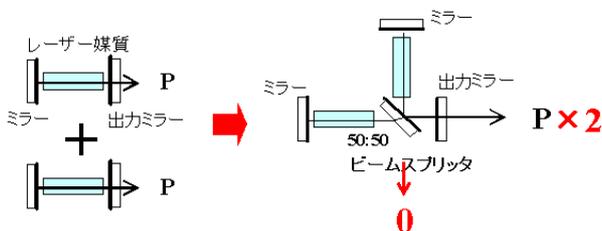


図1 マイケルソン共振器

コヒーレント加算で用いるマイケルソン共振器

の構成を図1に示す。マイケルソン干渉計の両腕にレーザー媒質が入っており、出力ポートの一方のみにミラーのある共振器となっている。このとき、ミラーのない方から出力はない。これは、マイケルソン干渉計の特性によって、反射、透過しやすい波長が異なることによるものである。図2にマイケルソン干渉計の入射光に対する反射、透過率の周波数特性を示す。このように、反射しやすい周波数と透過しやすい周波数が異なっており、このとき、反射はマイケルソン共振器にとって利得を、透過は損失を意味する。つまり、発振モードは図2の赤実線のように反射率の高い周波数において発振しやすいと考えられる。また、透過しやすい波長は発振することはない。つまり、加算しやすい周波数のみが発振するために、単一出力で足された出力が得られるのだと考えられる。

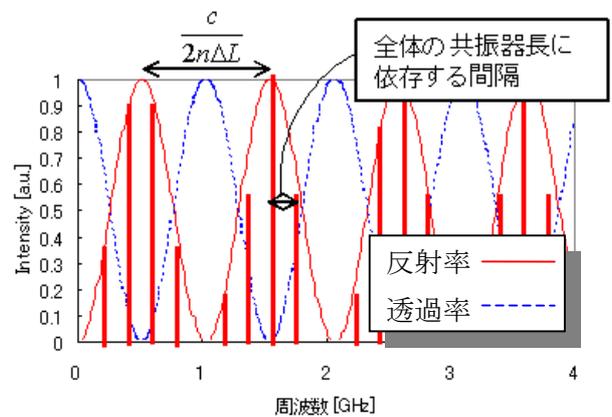


図2 マイケルソン干渉計の反射、透過特性と発振モード

3 コヒーレント加算ファイバーレーザー

実験装置を図2に示す。2本のファイバーレーザーを50:50ファイバーカップラーによって結合

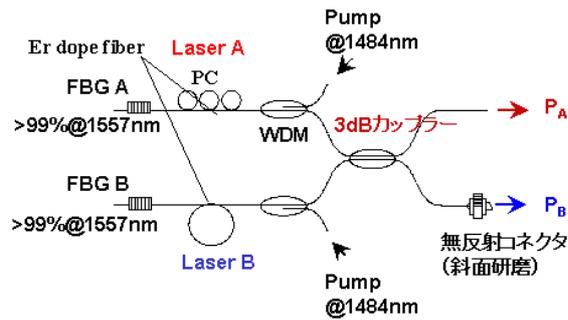


図 3 コヒーレント加算ファイバーレーザー

した構成となっている。共振器構成はファイバーブラッググレーティング(FBG)A,Bとファイバー端面のフレネル反射から構成され、片方の出力ポートにはファイバー端面のフレネル反射を防ぐために無反射コネクタをつけることにより、Y字型の共振器となっている。励起光は波長選択性(WDM)ファイバーカップラーによって注入されている。このときの P_A 、 P_B の出力特性を図3に示す。点線は結合前の出力特性であり、実線は結合後の出力特性となっている。 P_A 出力の傾きが結合後には2倍となっていることがわかる。これは2本のファイバーレーザー出力が加算されていることを表わしている。このとき、加算効率は93.5%という非常に高い効率が得られた。

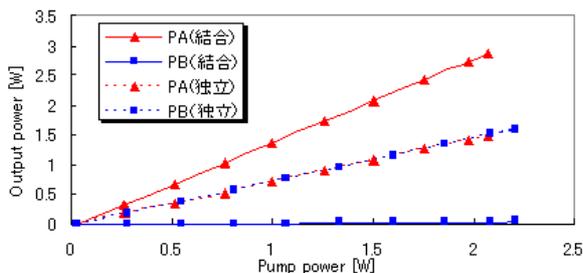


図 4 コヒーレント加算ファイバーレーザー出力特性

発振のモード構造を観測するために、縦モード間のビートスペクトルを測定することによって観測した。これはファイバーレーザーの共振器長が非常に長いため、縦モード間隔は非常に狭く、直接、モード構造を観測することは困難なためであ

る。しかし、縦モード間隔が狭いために、そのビート周波数は比較的遅く、測定が可能となる。図5にファブリ・ペロー共振器とマイケルソン共振器ファイバーレーザーの出力のビートスペクトルを示す。ファブリ・ペロー共振器の共振器長は9.1 mで構成されており、このときの縦モード間隔は11.37 MHzとなり、非常に狭いため、図のように帯状になる。一方、マイケルソン共振器は全長が約1.2 mで構成されているが、図のようにモード間隔は広がる。これは、マイケルソン干渉計の腕の長さの差に相当する反射周波数間隔で発振しているためであると考えられる。このとき、腕の差を約1 mつけておりそのモード間隔で発振していることが図5からわかる。

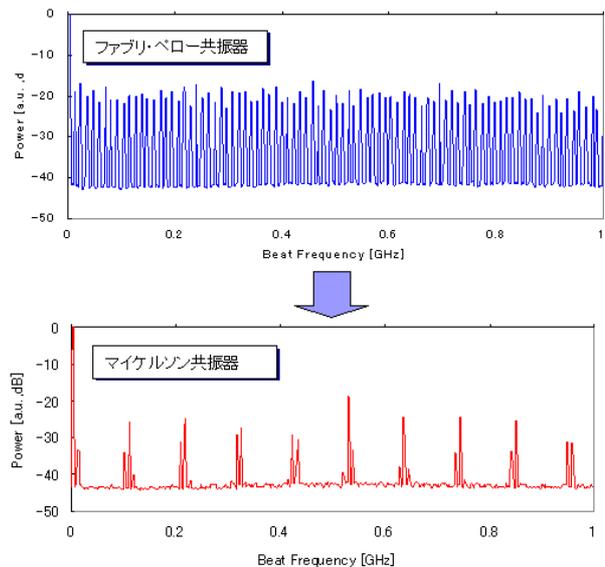


図 5 ファブリ・ペロー共振器、マイケルソン共振器 発振モードのビートスペクトル

また、このコヒーレント加算は複数本のファイバーレーザーにおいても加算が可能である。図6に等分岐4×4ファイバーカップラーを用いた、4本のファイバーレーザーの加算実験構成図を示す。それぞれ約0.8 Wのファイバーレーザーを加算し、加算効率96.1%が得られた。このことから、複数ファイバーレーザーの加算においても応用が可能であることがわかる。

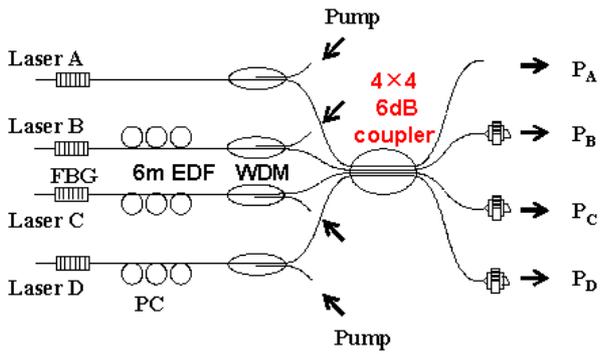


図 6 コヒーレント加算ファイバーレーザー (N=4)

4 半導体レーザーのコヒーレント加算

半導体レーザー(LD)は電気変換効率が非常に良い、レーザー装置といえるが、高出力レーザーの応用として直接使われることは少ない。主な理由に、ビーム品質が悪いことが挙げられる。しかし、このコヒーレント加算の技術を用いることによって、ビーム品質は良いが出力は小さいLDを足し合わせることによって、高出力、高ビーム品質なレーザーが得られると考え、実験を行った。

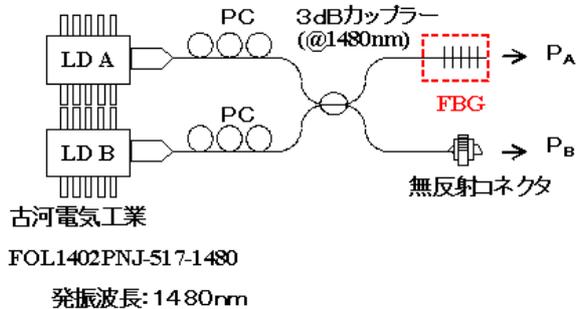


図 7 半導体レーザーのコヒーレント加算

装置図を図4に示す。先程のファイバーレーザーの利得部分がLDからなる構成となっている。LDにはファイバー出力LD(出力端面には反射防止膜が施されている)を用いた。ファイバースラッググレーティングを出力ポートに付けたのは、付けない状態では、LD端面のARコーティングが発振を完全に抑えるだけ反射率を抑えられていないために、LD自身が発振してしまい、インコヒーレントな加算になってしまうためである。この

ときの出力特性を図5に示す。加算現象は得られたが、効率は非常に悪い結果となった。原因としてLDの出力端面の反射防止膜がLD自身の発振を完全に抑えるほどではないために、コヒーレントな加算が起きなかったのだと考えられる。しかし、LDのコヒーレント加算は可能であるという実証には十分な結果であり、この方法によりLDから高出力、高輝度なレーザー光を得ることができるといえる。

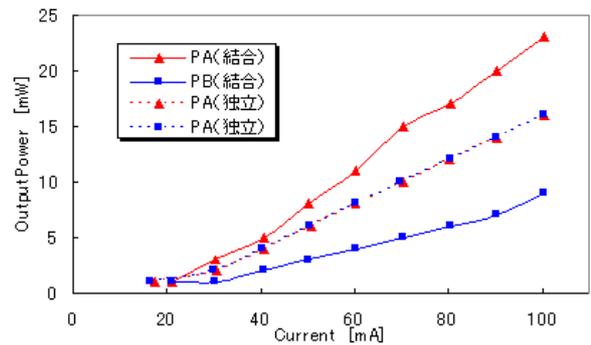


図 8 LD コヒーレント加算出力特性

5 コヒーレント加算モード同期ファイバーレーザー

このコヒーレント加算では、図5に示すように、モード間隔が広がり、その間隔はマイケルソン干渉計の腕の差に相当する共振器の縦モードをつくる。これは、長い共振器長(長い利得長)を持ちながら、実効的に短い共振器のモードを形成することが可能であることを意味しており、つまり、この現象を利用することで、高繰り返しモード同期パルスが得られることが考えられる。また、分岐された共振器でモード同期が得られることは興味深い。ファイバークップラーによって分岐され、強度が小さくなった状態でそれぞれが増幅され、加算される。共振器中では強度の大きい状態を少なくすることが可能となる。

はじめに、コヒーレント加算ではない状態(ファブリ・ペロー共振器)において、受動モード同期ファイバーレーザーを作製した。受動モード同期を得る方法として、ファイバー内の非線形偏光

回転を利用している。実験装置を図9に示す。共振器中に利得ファイバーと偏光子が入っており、このように、非常に簡単な構成でモード同期を得ることができる。このとき、ファイバーを伝搬する光は、自己位相変調と相互位相変調によって、直行する偏光間に位相差が起き、これによって、強度に依存して偏光状態が変化する現象が起きる。この現象と偏光子を組み合わせることによって、パルスの両翼部分では偏光子によって遮断され（損失を受け）、パルスの中心部分では透過するような変更状態にすることによって、高速な過飽和吸収体と同様な働きをし、受動モード同期が起きる。偏光状態の制御には2枚の波長板を用いている。共振器のミラーはファイバーブラッググレーティングでは反射帯域が狭いため、広帯域な反射特性を持つミラーを用いている。

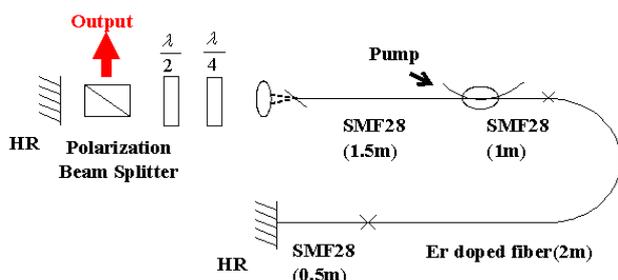


図9 非線形偏光回転モード同期ファイバーレーザー

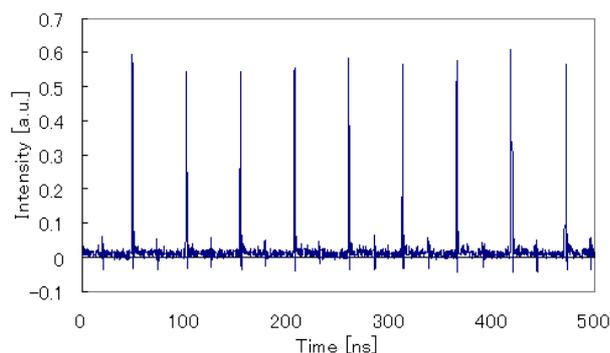


図10 出力時間波形（サンプリング・オシロスコープ）

モード同期は光学台を叩くことによって開始す

る。得られた出力パルス列を図10に示す。共振器長に相当する縦モード間隔19.5MHzが得られた。また、励起光100mW、出力25mWのときの発振スペクトルと自己相関波形を図11、12に示す。波長幅 $\Delta\lambda = 7.3\text{nm}$ 、パルス幅 $\Delta t = 390\text{fs}$ が得られた。次に、この方法を用いてコヒーレント加算モード同期ファイバーレーザーの実験を行った。

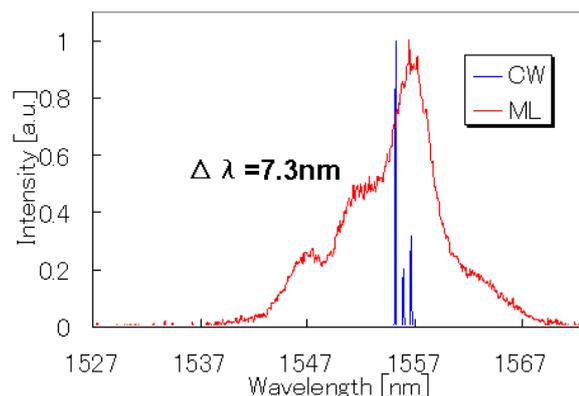


図11 発振スペクトル

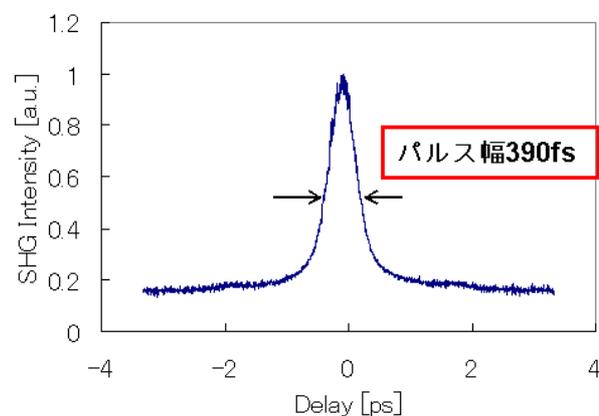


図12 自己相関波形

実験装置を図13に示す。コヒーレント加算の方法、受動モード同期の方法は先程の説明と同様である。しかし、このとき、モード同期を得ることはできなかった。この起きなかった理由として、偏光の制御の困難さが原因であると考えた。この共振器において偏光状態を制御しなければならない要素が多く存在することが考えられる。1つは非線形偏光回転モード同期を得るために、パルス

において、強度が弱い箇所は損失が大きく、強度が強い箇所は損失が少ない状態をつくることである。この偏光状態がつかれなければもちろんモード同期はかからない。もう1つは、コヒーレント加算を得るために、両腕からの2つの光が干渉するときの偏光状態を等しくすることである。この偏光状態をつくれなければ、2倍の出力は得られず、また、損失の非常に大きい共振器となってしまう。この2つのことを考慮するとマイケルソン干渉計部分において、非線形偏光回転が起きた時の、パルスの尖頭部分の偏光状態を両腕で等しくし、モード同期が起きるような入射偏光を探し、といった非常に複雑な状況をつくらなければならない。

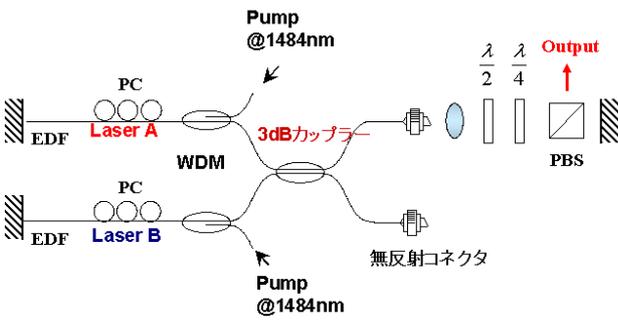


図 13 コヒーレント加算モード同期ファイバーレーザー

そこで、実験装置を図14のように、分岐後では、光を空間伝搬させて実験を行った。これによって、分岐後の偏光状態が変わることがないので、加算させるための偏光制御が必要なくなり、必要な偏光制御は受動モード同期のための制御のみとなる。この状態は、コヒーレント加算ではないが、発振モードの構造は同様になる。しかし、この時もモード同期は得られなかった。だが、ある波長板の角度において、光学台を叩くと、図15のようなパルスが一瞬だがオシロスコープにおいて観測された。

図において、周波数の高いパルス列はマイケルソン共振器の腕の差に相当する周波数で、この実

験の目的とするモード同期の起きてほしい繰り返しの周波数である。一方、低周波数なパルス列も存在していることがわかる。つまり、このような分岐した共振器では発振モードが等間隔ではなく、不完全な状態が存在する可能性があると考えられる。

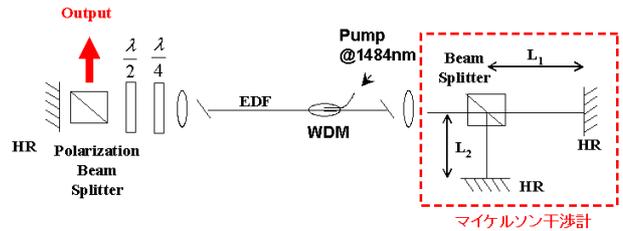


図 14 分岐型共振器

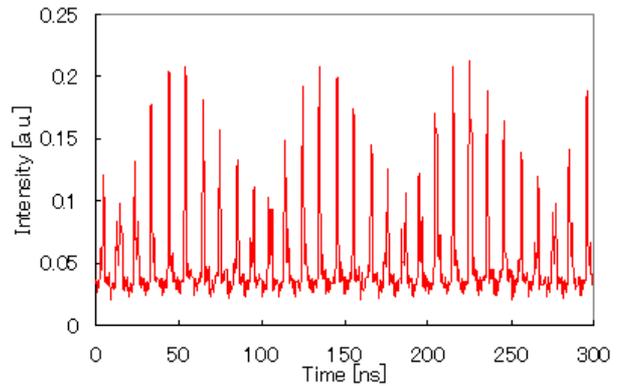


図 15 分岐型共振器 時間波形

マイケルソン共振器の共振する縦モード（透過率）は計算が可能である[2]。ある共振器長の条件での計算した結果を図16に示す。周期が2つ存在し、高周波数はマイケルソン共振器の腕の差に相当する縦モードであり、低周波数は図17においてマイケルソン共振器に存在する2つのファブリ・ペロー共振器の平均の長さに相当する縦モード間隔である。図16において、強度の強い周波数が発振すると考えると、マイケルソン共振器の腕の差に相当する周波数間隔で発振しやすいことは先程の考えと同様であるが、発振する周波数はマイケルソン干渉計の反射周波数の中心には無く、等間隔ではないことがわかる。このときはもちろ

んモード同期は起きないと考えられる。

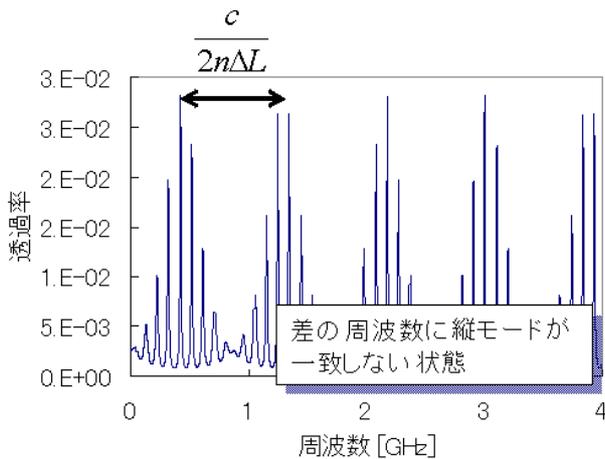


図 16 マイケルソン共振器のモード構造 (1)

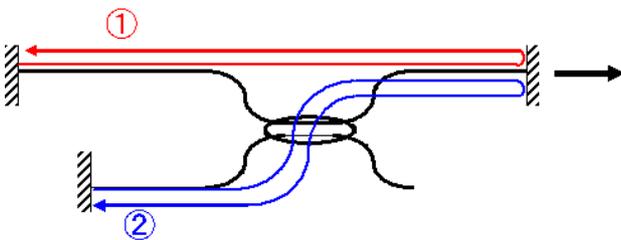


図 17 マイケルソン共振器のモード構造 (2)

ほとんどの共振器長の状態では図 16 のように、等間隔にはならないが、ある条件では等間隔になる。それは、図 17 において、存在する 2 つのファブリ・ペロー共振器がそれぞれつくる縦モードの櫛の重なる周波数間隔がマイケルソン共振器の反射周波数間隔と一致する時である。このときのマイケルソン共振器の共振周波数を図 18 に示す。このときは、高繰り返しモード同期が可能であることが考えられる。これは時間軸上では、ある一定繰り返しのパルス列が共振器内にあるとすると、そのパルスはファイバーカップラーによって分けられ、ミラーに反射され、また合流する。しかし、両腕で光路長が異なっているため、同じパルスがファイバーカップラーで合流することはない。パルス列において 1 つ遅れてくる (または、早い) パルスと衝突し、干渉する時に加算が得られるこ

と考えられる。かつ、その繰り返しが両ファブリ・ペロー共振器の共振状態を満たす時、モード同期が得られると考えられる。つまり、精密な共振器長の制御が必要となる。

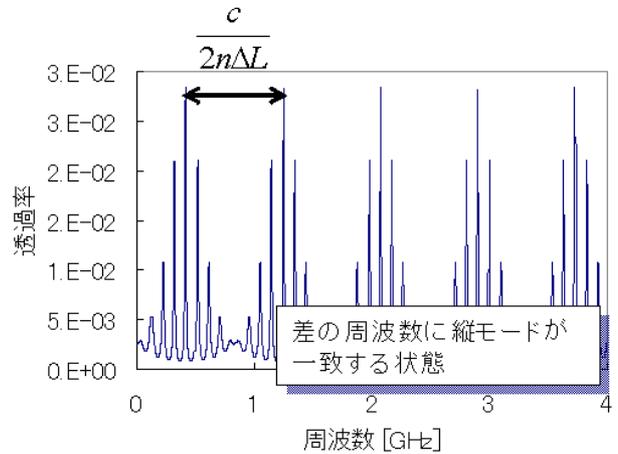


図 18 マイケルソン共振器のモード構造 (3)

5 まとめ

等分岐ファイバーカップラーを用いることにより、高効率な加算を実現した。半導体レーザーについても行い、加算が得られた。この加算方法はどうのようなレーザー媒質においても可能であると考えられる。高出力、高ビーム品質なレーザー装置として期待できる。また、高繰り返しモード同期ファイバーレーザーを提案し、実験を行ったが、モード同期は得られなかった。しかし、高繰り返しモード同期を得るには共振器長の制御が必要であることがわかった。

6 参考文献

- [1] V.Dominic, S.MacCormack, R.Waarts, S.Sanders, S.Bicknese, R.Dohle, E.Wolak, P.S.Yeh and .Zucker“110W fiber laser,”Electron.Lett.35,1158-1159(1999).
- [2] Peter Barnsley, Paul Urquhart, Colin Millar, and Michael Brierley,“Fiber Fox-Smith resonators: application to single-longitudinal-mode operation of fiber lasers,”J.Opt.Soc.Am.A 5,1339-1346(1988)