

高調波モード同期ファイバリングレーザにおけるリング長制御特性

Ring Length Control of Harmonically Mode-Locked Fiber Ring Lasers

森 正和†, 松永 雅規†, 濱田 正敏†, 西澤 典彦‡, 後藤 俊夫‡, 後藤 了祐‡†, 丸橋 大介‡†
Masakazu MORI, Masanori MATSUNAGA, Masatoshi HAMADA, Norihiko NISHIZAWA, Toshio GOTO,
Ryousuke GOTO, and Daisuke MARUHASHI

Abstract : The ring length control of harmonically mode-locked Er-doped fiber ring lasers was improved to tolerate large and abrupt ambient temperature changes. By speeding up the control loop response, and also by isolating Er-doped fibers from abrupt temperature changes, a ring length change as large as $3.8 \mu\text{m}/\text{sec}$ could be compensated, and stable mode-locked operations were obtained. Also the lasing characteristics under stable operation, especially the dependence on the lasing wavelength, were investigated. The output pulses were transform-limited Gaussian in most cases, but pulse trains of shorter pulse width with double-peak spectra were observed under certain conditions.

1. はじめに

エルビウム(Er)添加光ファイバを利得媒体に用いた高調波モード同期ファイバリングレーザは、まず、ファイバリングレーザであることから、①構成が簡単、②縦モード周波数間隔が調整可能、③波長可変範囲が広い、④光ファイバとの整合性が良い、という特長を有する。また一方において、高調波モード同期レーザであることから、⑤高繰り返し、かつ⑥短光パルスの発生が可能である、という特長がある。

我々は、半導体レーザとの相互注入同期¹⁾や、半導体レーザの全光制御モード同期法²⁾の光源としての応用を考えている。この目的に関しては、縦モード周波数間隔が調整可能であること、および広帯域(数 100GHz 以上)に渡って位相が固定された側波帯成分を発生させることが必要である。前者の縦モード周波数間隔については、メートル単位でリング長を容易に調整できるため、大きな技術課題は無いと考えている。一方、後者については、高繰り返しな安定光パルスを種々の環境下で長時間にわたって発生させることが重要である。

我々は、高繰り返しな安定光パルスを発生させることを目的として、予備変調方式による高調波モード同期ファイバリングレーザについて、室温揺らぎによるリング長変動を補償する機構を組み込んで実験を進めてきた³⁾⁻⁵⁾。

これまで、セリミック振動子によりリング長に μm オーダーの摂動を加えてリング長の状態を検出し、光デレイラインを用いて

リング長変動を補償するという方式で安定制御が可能であるという点までは確認している。この方式でかなりの室温環境まで対応可能であるが、注入光源として要求されるような安定度にはまだ達していないことが分かった。例えば、安定動作させるためには、電源投入してから数時間のプレヒートが必須であるとか、夏季などにエアコンを動作させると制御が外れてしまうという問題があった。

そこで、まず、リング長制御の高性能化を図った。エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)を中心にして温度急変対策を施すと同時に、制御系を見直して、制御速度の向上を図った。

安定なリング長制御系を確立した上で、次に、出力パルス光特性を詳しく評価した。

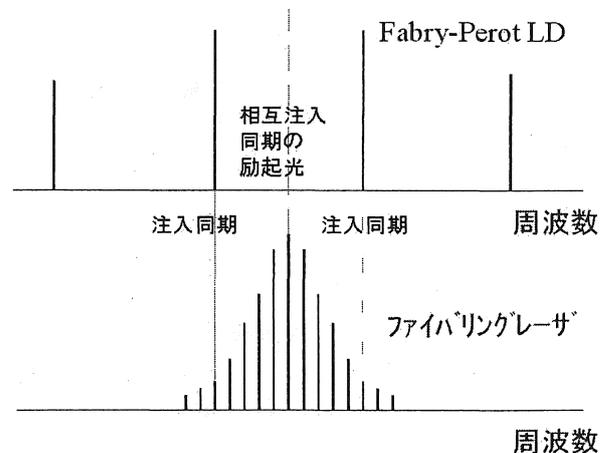


図 1 全光制御モード同期への応用

† 愛知工業大学 工学部 情報通信工学科(豊田市)

‡ 名古屋大学大学院 工学研究科(名古屋市)

‡† 富士通株式会社 光開発推進部(川崎市)

2. リング長制御の高性能化

ファイバリングレーザではリング長が数 10m であるため、室温変化によるリング長の変化が大きい。石英の関連特性の温度変化は、線膨張係数 $\sim 0.5 \times 10^{-6}$ [1/K]、屈折率の温度係数 $\sim 7 \times 10^{-6}$ [1/K]⁶⁾であるため、温度によるリング長変化の殆どは屈折率の変化に原因がある。但し、温度上昇でリング長 \rightarrow 大、温度下降でリング長 \rightarrow 小、という感覚的な変化方向に変わりはない。本実験系のリング長は約 65m であり、リングを恒温槽に入れずに室温変化にさらした場合のリング長の日変化は、総変化量 ~ 4 mm、平均変化割合 $\sim 0.16 \mu\text{m}/\text{sec}$ である。

本実験系では、セラミック振動子(富士セラミックス製 Z20H90X100C-WYX、直径 10cm の環状)でリング長に摂動を加えて、リング長の状態を検出し、光ファイバライン(サンテック製 ODL-300)にてリング長変化を補償する方式をとっている。この光ファイバラインで補償可能なリング長は 4cm であり、通常の実験環境下では十分な値である。一方、リング長の変化割合は実験環境によって大きく変わる。例えば、エアコンが動作している場合には、エアコンの風が直接当たらないとしても短時間での変化割合はもっと大きくなる。特に、夏季の昼間における冷房中にはこの変化が顕著であり、リング長制御動作がはずれてしまうことがたびたびあった。したがって、上記の平均的なリング長変化割合 $\sim 0.16 \mu\text{m}/\text{sec}$ よりも大きな変化割合に対応できるようにしておくことが必要である。

そこでまず、温度変化に敏感に反応する箇所を調べて、温度急変対策を施した。次に、リング長制御の速度を高速化する方法を検討した。

2. 1 温度急変対策と制御の高速化

リング長制御を動作させた状態で、リングの各部に順番にエアアルコールをかけながら、温度変化に敏感な箇所を調べた。その結果、最も敏感な箇所はEDF本体であり、以下、0.9mm ϕ 被覆ファイバ部、3mm ϕ ケーブルファイバ部、の順であった。

3mm ϕ ケーブルファイバ部については、エアコンの風が当たる程度の環境下では問題無いと判断した。また、0.9mm ϕ 被覆ファイバ部については、エアマットで覆うなど、エアコンの風が直接には当たらないようにすれば十分と考えた。一方、EDF本体は温度変化に極めて敏感であったため、水中に保持して、急激な温度変化が加わらないようにした。この措置と同時に、ボビンに巻きつけるという形態ではなく、大径のコイル状に緩く巻くことにより、温度変化による歪の影響を抑えるようにした。

長期変化を考えると、セラミック振動子とファイバとの接触具合を一定に保つことも重要である。接着するのが最も確実であるが、そうすると再使用できなくなってしまう。そこで、ファイバをセラミック振動子の外周に沿って二回巻き、その上に幅が広いゴムバンドをかぶせ、更にそのゴムバンドの両端にマジックテープを付けて引っ張り状態を調節できるようにした。

セラミック振動子に印加する電圧は、ファンクションジェネレータの出力(40Hz)を商用電源用のトランスで昇圧して用いた。実験した結果では、リング長摂動量が大きいほど安定に制御できたので、1.26 μm mp-p 近辺で用いた。

制御速度を向上させるため、各部の応答速度を評価した。その結果、現状の制御系では、ロックインアンプ A/D 変換部、次にステップモータの順で応答が遅いことが分かった。そこで、ロックインアンプのアナログ出力をデジタルに接続し、デジタルで A/D 変換する形式とした。これにより、応答速度はこれまでの

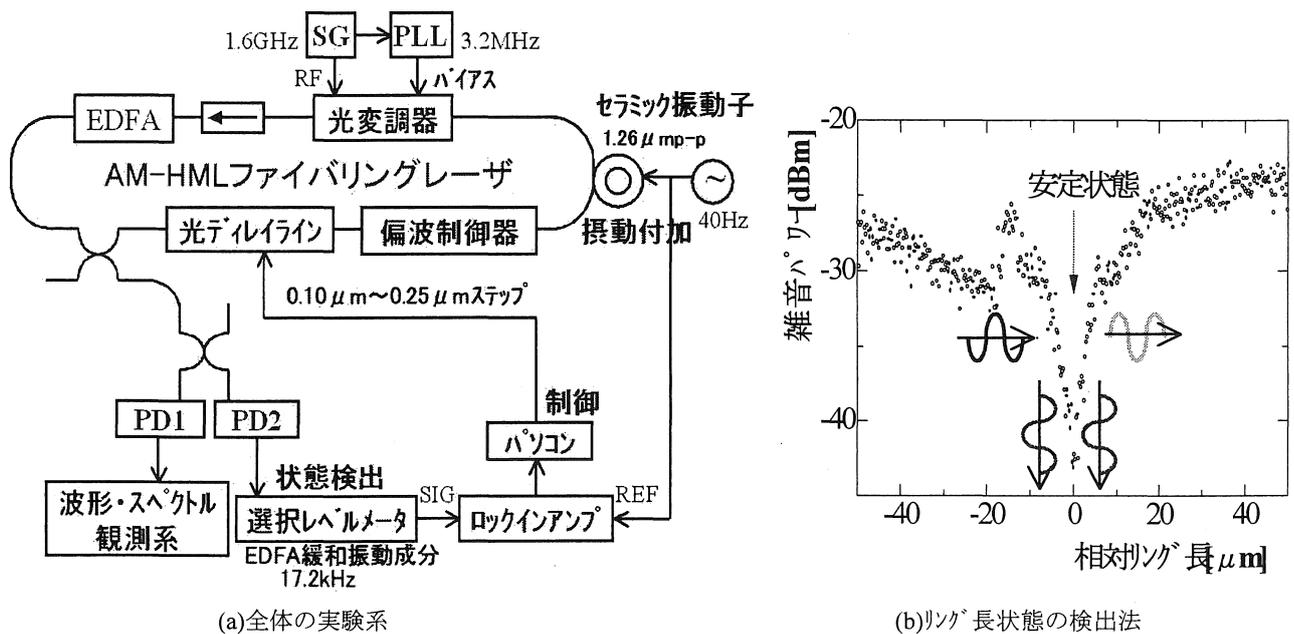


図 2 リング長制御の原理と実験系

80倍となった。これのみで当面の目的に対しては十分であるため、ステップングモードは変更しなかった。

2. 2 制御パラメータの最適化

リング長制御には、リングレーザーの安定・不安定と一対一に対応する量、例えば EDFA の緩和振動雑音を制御のためのフィードバック信号として使う⁷⁾。図 2(a)に示すように、セリミック振動子を用いて、 $1\mu\text{m}$ 程度のリング長摂動を加え、雑音強度の変化を検出する。もし、リング長が最適値(=雑音強度が最小となる値)よりも短い場合には、雑音強度の時間変化は、リング長摂動量と逆位相になる。一方、リング長が最適値よりも長い場合には、雑音強度の時間変化は、リング長摂動量と同位相になる。これをロックインアンプで検出する。リング長摂動によって偏波変動が誘発されるのを避けるために、外部変調器の入力側 PANDA ファイバ ($0.9\text{mm}\phi$ 被覆付き) をセリミック振動子に二回巻き、摂動を加えた。

ロックインアンプで検出される信号は、雑音強度をリング長で微分したものである。図 3 のように、最適リング長の近辺で雑音強度が下に凸の滑らかな形状になるのであれば、その微分は最適リング長の近辺で直線的に変化する。したがって、微分値に比例したリング長補償を光ディレイラインで加えればよい。この場合には、リング長が常に図の矢印の範囲内にあるように制御がなされる。しかし、現実には図 2(a)のように、雑音強度は最適リング長が特異点となるような変化をする。すなわち、図 3 の矢印で示した範囲は極めて狭く、この範囲に制御するためには、実験系全体を恒温槽に入れるなどの措置が必要となる。そこで、今回は、一制御あたりのステップングモード駆動量を一定とし、その回転方向を微分値の符号で変える方式とした。この方式で安定状態を維持するためには、一制御あたりのステップングモード駆動量を小さくして、一秒当りの制御回数を大きくせねばならない。これらの値は、実験を繰り返して決めていった(図 4)。

エアコンの風が直撃しないように、本実験系にはエアーマットをかぶせてあるが、微風による μm オーダーのリング長変動は頻繁に起きている。したがって、パソコンによる制御サイクルの速度

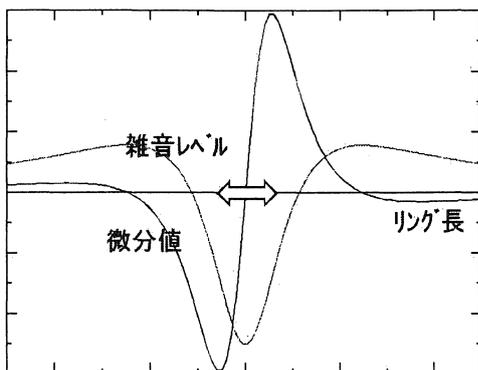


図 3 ロックインアンプ 検出信号

は速ければ速いほど良い。図 2(a)はフィードバック信号として、EDFA の緩和振動周波数成分(17.2kHz)を用いた場合の例である。図にあるように、リング長に対して滑らかに変化するわけではなく、細かい不規則な揺らぎを伴いながら変化する。そのため、ロックインアンプ出力の平均的な値で制御する必要がある。平均操作をロックインアンプでアナログ的に行うべきか、或いはパソコンでデジタル的に行うべきかは、制御速度と検出信号の S/N 比との兼ね合いで決まる。実験を繰り返した結果、ロックインアンプの時定数を 10msec とし、パソコン上でロックインアンプ出力を 5 回平均したときに最良の制御特性が得られた。

以上の改良を施した結果、一制御あたりのステップングモード駆動量は $0.11\mu\text{m}\sim 0.23\mu\text{m}$ 、一秒当りの制御回数は 16.7 回となった。この結果、一秒当りの制御量の最大値は $3.8\mu\text{m}/\text{sec}$ となった。これは従来の制御可能量の 5 倍にあたる。

2. 3 長時間制御特性

制御用のフィードバック信号として EDFA の緩和振動周波数成分(17.2kHz)を用いた場合について、制御時のリング長補償量と雑音レベルの変化を図 5 に示す。リング長補償量は、一制御あたりのステップングモード駆動量を積分したものである。

図 5(a)は夏季昼間のものである。リング長は、エアコンによる数分単位の細かい変化を繰り返しながら、ゆっくりとした数 10 分~数時間の変化をしているのが分かる。室温が低下するとリング長補償量は増加する。図 5(a)での一秒当りの制御量の最大値は、 $170\mu\text{m}/4\text{min}=0.71\mu\text{m}/\text{sec}$ となっている。温度計で室温変化を測定したところ、数分単位での細かいリング長変化は、 $0.3\text{度}\sim 0.4\text{度}$ の室温変化によって生じているのが分かった。これからリング長全体の温度変化率を見積もると、 $[\text{リング長変化量}/\text{全体のリング長}]/\text{温度変化}=170\mu\text{m}/63\text{m}/0.35\text{K}=8\times 10^{-6}[1/\text{K}]$ となる。この値は、石英の屈折率の温度係数 $\sim 7\times 10^{-6}[1/\text{K}]$ とほぼ同じである。EDF 本体を水中に入れているにもかかわらず、ほぼ同じ値になったのは、EDF の屈折率の温度係数がかなり大きいためと考えられる。

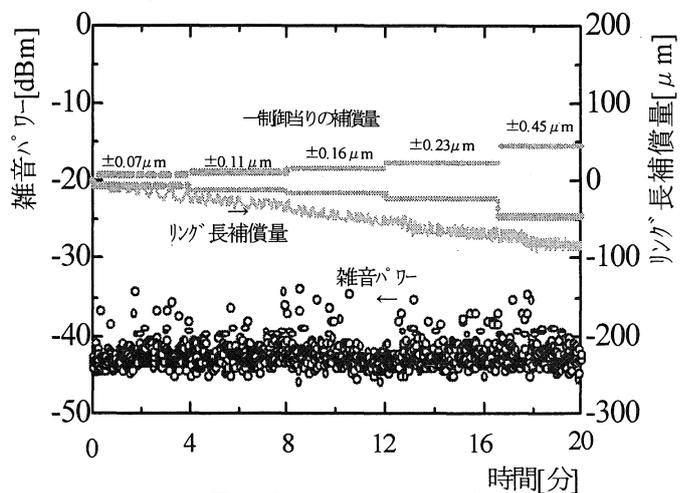
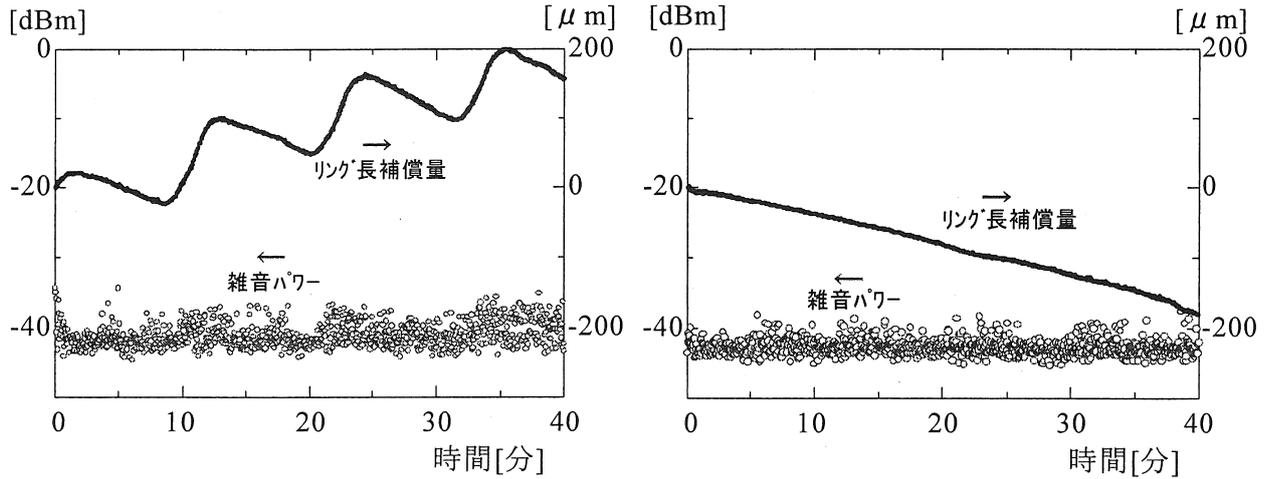


図 4 制御パラメータの最適化



(a)短時間のリング長変化がある場合

(b)長時間のリング長変化のみの場合

図 5 制御時のリング長補償量と雑音レベル

図 5(b)は夏季夕方のものである。エアコンの設定温度と室外温度との兼ね合いによって、たまたま、エアコンが 40 分間 OFF したまま (ただし、送風はしている) となっている。このような状況下では、一制御あたりのステップモータ駆動量がかなり小さな量でも安定に制御することが可能である。実験系全体を恒温槽に入れた場合には、これと同等な環境になると思われる。

実験の初段階では偏波変動の影響を心配したが、実験を行ってみると、温度急変によるリング長変動が最大の問題であり、偏波変動はそれほど深刻ではないことが分かった。本実験系のように、検光子を備えた偏波制御器を使用している場合には、ある程度の偏波変動があっても、リング一周の損失が多少変動するのみであり、制御不能となることは無いと考えている。

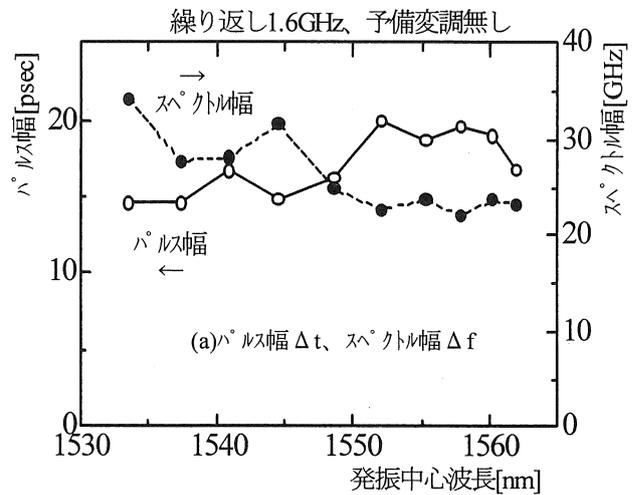
3. 出力パルス光の特性

3.1 波長依存性

繰り返し周波数を 1.6GHz に保ったままで、リング中の光フィルタ(BPF)の通過波長を 1535nm~1565nm の範囲で変化させて、モード同期状態での出力光パルスの特性を測定した。測定結果を図 6 に示す。パルス時間幅 Δt は、ガウス型の時間波形を仮定して、SHG オートコリレート波形から求めたものである。また、スペクトル幅 Δf は、flat Fabry-Perot 干渉計(リ-スペクトルレンジ = 164GHz)を用いて測定した。使用した flat Fabry-Perot 干渉計のフィネスは、測定した波長範囲において、35~40 であった。

パルス時間幅 Δt とスペクトル幅 Δf は、測定した波長範囲では、1535nm~1545nm(領域 I)と 1550nm~1565nm(領域 II)でほぼ一定となっている。パルス時間幅 Δt は、領域 I で約 15psec であり、領域 II で約 19psec であった。一方、スペクトル幅 Δf は前者で 30GHz、後者で 23GHz であった。

これに対して、時間・バンド幅積 $\Delta t \Delta f$ は、測定した全波長範囲 1535nm~1565nm でガウス波形のフーリエ変換極限値



(a)パルス幅 Δt 、スペクトル幅 Δf

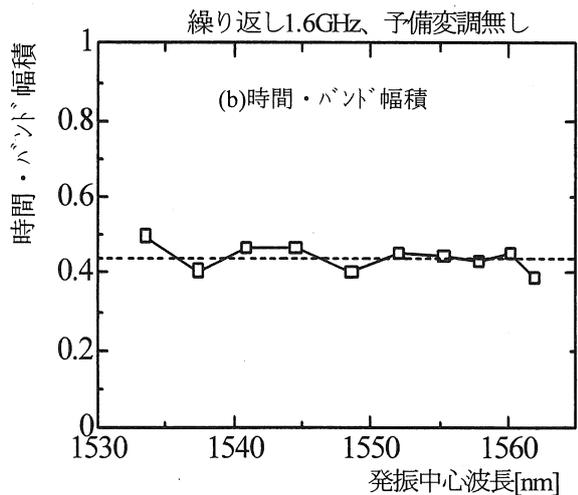


図 6 出力光パルスの波長依存性

0.441 に近く、ほぼ一定となった。

均一な広がり の利得媒質を用い、発振波長を利得中心波長に一致させて、振幅変調によりモード同期させた場合には、出力光のパルス幅は次式で与えられる³⁾。

$$\tau = \frac{\sqrt{\sqrt{2} \ln 2}}{\pi} \left(\frac{g_0}{\delta_l} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{f_m \Delta f} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 g_0 : 中心波長における光増幅器の飽和利得、 δ_l : 光変調器の変調指数、 f_m : 変調周波数、 Δf : 光増幅器の周波数帯域幅、である。

EDF の増幅には 56 個の遷移が関与しているため⁹⁾、単一の遷移を前提とした(1)式は、厳密には適用できない。しかし、大雑把には、1536nm の第一ピークと、1552nm の第二ピークの二つに分けて、それぞれが均一な広がりを持つとして考えれば¹⁰⁾、大略の特性は予想できる。

繰り返し周波数を一定としたままで、光フィルタにより発振波長を変化させた場合には、(1)式で g_0 と Δf のみが変わることになる。 g_0 はリング一周の損失と釣り合うはずであるから、リング損失の波長依存性が小さければ、発振波長によらず、ほぼ一定となる。一方、 Δf については、前述のように、1536nm 近辺での値と 1552nm 近辺での値に分けて考えればよい。

以上のように、リング損失の波長依存性が小さいという条件下での波長依存性は、1535nm~1545nm と 1550nm~1565nm の二領域に分けられ、その領域内ではほぼ一定となることが分かった。

3. 2 二波長発振状態

本実験系では、偏波非保持の EDF を用いているため、リング中の偏波制御器 PC(ファイバ製、SQHAP-1550)を用いて、リング一周での損失が最小となるように偏波状態を調節して使用する。PC の調整によっては、図 7 に示したような双峰のスペクトル形状となり、パルス時間幅が通常よりは 10%-20% だけ狭くなるという状態でモード同期がかかることがあった。一旦、双峰スペクトル形状の状態でもード同期がかかると、リング長制御系が正常に動作していれば、長時間(90 分以上)に渡ってそのモード同期状態が維持されることが観測された。

双峰スペクトル状態では、パルス時間幅 $\Delta t = 12.4 \text{ psec}$ (ガウス時間波形を仮定)、スペクトル幅 $\Delta f = 39.4 \text{ GHz}$ であった。時間・バンド幅積は $\Delta t \Delta f = 0.489$ となり、ガウス波形のフーリエ変換極限值 0.441 よりも大きな値となる。しかし、短パルス化という観点からは、有効な手段となり得る。

双峰スペクトル状態が生ずる原因は不明であるが、リングの複屈折が関係しているのではないかと考えている。今回の現象は、リングに複屈折を意図的に付加した二波長発振のモード同期ファイバリングレーザーの報告¹¹⁾と類似している。本実験系では、PC と一部の定偏波ファイバ(PC の出力部、および外部変調器の入力部)以外には複屈折を持たせないようにしているため、図 7(b) のように小さな周波数差(~20GHz)の二波長で発振したものと考えられる。スペクトル成分の一部が重なっ

ているので、二波長の発振は互いに独立ではなく、一定の位相関係が保たれている。

双峰スペクトル状態は、短パルス化、広帯域化、あるいは多波長同時発振化¹²⁾、など広い応用が考えられるため、まずは各波長成分の偏波方向を測定して、大雑把な原因推定を行いたい。

比較のために、単峰スペクトル形状(通常のモード同期状態)でのデータを図 8 に示す。

4. まとめと今後の課題

リング長制御の高性能化を図り、次にリング長制御状態での出力パルス光特性を評価した。

リング長制御の高性能化に関しては、EDFA を中心にして温度急変対策を施すとともに、制御速度の向上、および制御パラメータの最適化を図った。その結果、長時間安定性が向上し、かつリング長変化が $3.8 \mu \text{ m/sec}$ (従来の 5 倍)まで対応可能となった。

リング長制御状態での出力パルス光特性を調べた結果、測定した波長範囲(1535nm~1565nm)において、パルス時間幅とスペクトル幅の変化は、波長領域 1535nm~1545nm と 1550nm~1565nm の二つに分けて考えればよいこと、および全波長域においてトランスフォーマリットなガウス波形となることが分かった。

また、偏波状態の調整によっては、発振スペクトルが双峰性で、かつパルス時間幅が短くなる状態があることが分かった。この原因は、リングの複屈折によるものと考えている。

今後は、双峰性発振スペクトルの原因解明、および高繰り返し化を進めると共に、LD と組み合わせた注入同期や相互注入同期の実験を進める。

謝辞

本論文は、文部科学省 平成 15 年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2)、課題番号 14550042 「多縦モード半導体レーザーにおける相互注入同期とその応用に関する研究」)の助成を受けて行われた研究の成果の一部である。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] L.W.Liou, M.Yu, T.Yoshino, and G.P.Agrawal, "Mutual injection locking of a fibre laser and a DFB semiconductor laser", *Electron.Lett.*, Vol.31, No.1, pp.41-42, Jan.1995.
- [2] H.Kasuya, M.Mori, R.Goto, T.Goto, and K.Yamane, "All-optical mode-locking of Fabry-Perot laser diode via mutual injection locking between two longitudinal modes", *Appl.Phys.Lett.*, Vol.75, No.2, pp.13-15, July 1999.
- [3] B.P.Singh, T.Tazaki, K.Ikeda, M.Mori, T.Goto, and A.

Miyauchi, "Mode-locking of fibre ring lasers with a coherent-phase relationship among axial mode groups", *Optics & Laser Technol.*, Vol.27, No.4, pp.275-277, 1995.

[4] 野村林太郎, A.Rahwanto, 西沢典彦, 後藤俊夫, 森正和, 山根一雄: 予備変調方式による高調波モードロックファイバリングレーザーの新構成法, レーザー研究, Vol.26, No.7, pp.554-558, July 1998.

[5] 水池秀仁, 鈴木基仁, 森正和, 西沢典彦, 後藤俊夫, 後藤了祐, 山根一雄: 予備変調方式による高調波モード同期ファイバリングレーザーのリング長制御, 愛知工業大学研究報告, Vol.37B, pp.191-198, 3月 2002.

[6] 稲場肇, 秋元義明, 中沢正隆: 光通信技術の最新資料集 V, pp.15-20, オプトロニクス社, 東京, 2001.

[7] H. Takara, S. Kawanishi, and M. Saruwatari, "Stabilisation of a modelocked Er-doped fibre laser by suppressing the relaxation oscillation frequency component", *Electron. Lett.*, vol.31, no.4, pp.292-293, Feb.1995.

[8] D.J.Kuizenga and A.E.Siegman, "FM and AM mode locking of the homogeneous laser-Part I: Theory", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-6, pp.694-708, Nov.1970.

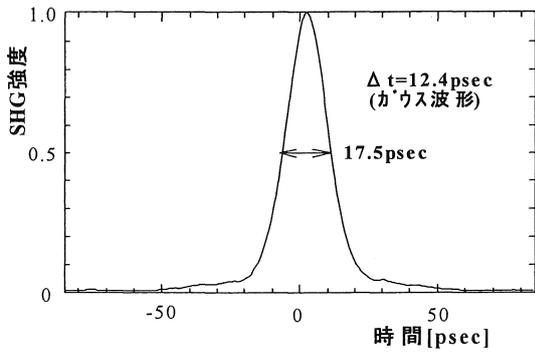
[9] 石尾秀樹監修: 光増幅器とその応用, p.41, オーム社, 東京, 1992.

[10] E.Desurvire, J.L.Zyskind, and J.R.Simpson, "Spectral gain hole-burning at 1.53 μ m in Erbium-doped fiber amplifiers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.2, pp.246-248, Apr.1990.

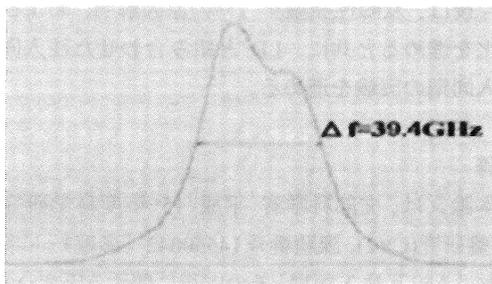
[11] J.B.Schlager, S.Kawanishi, and M.Saruwatari, "Dual wavelength pulse generation using mode-locked Erbium-doped fibre ring laser", *Electron. Lett.*, vol.27, No.22, pp.2072-2073, Oct.1991.

[12] H. Takara, S. Kawanishi, M. Saruwatari, and J.B. Schlager, "Multiwavelength birefringent-cavity mode-locked fibre laser", *Electron. Lett.*, vol.28, No.25, pp.2274-2275, Dec.1992.

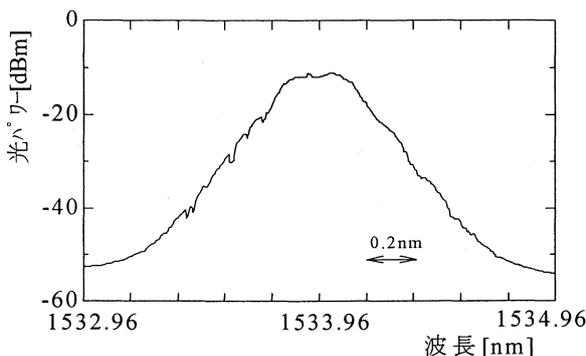
(受理 平成 16 年 3 月 19 日)



(a) SHG オートコリレータ波形

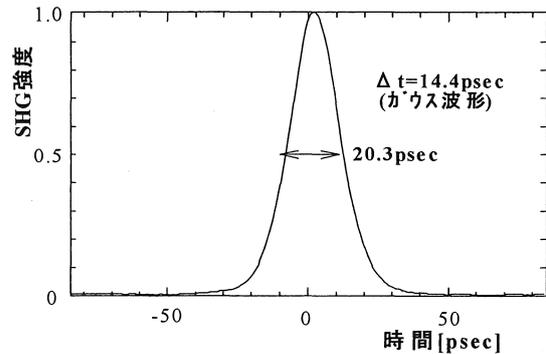


(b) スペクトル (flat F-P 干渉計)

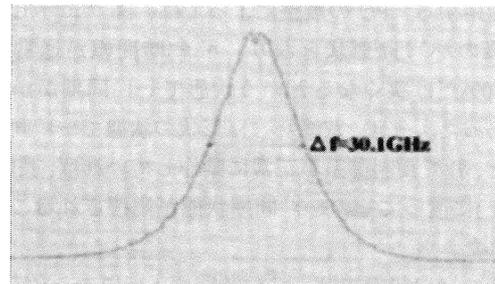


(c) スペクトル (光スペアナ)

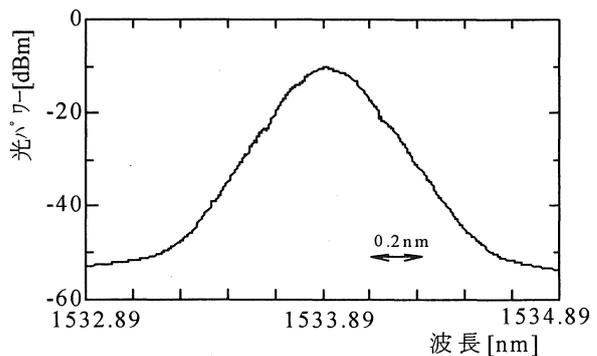
図 7 双峰スペクトル状態



(a) SHG オートコリレータ波形



(b) スペクトル (flat F-P 干渉計)



(c) スペクトル (光スペアナ)

図 8 単峰スペクトル状態 (通常状態)