

# 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の高繰り返し化

## High repetition frequency operation of amplitude modulated harmonically mode-locked fiber ring lasers

水池 秀仁†, 鈴木 基仁†, 森 正和†, 後藤 俊夫‡, 山根 一雄‡†,

Hidehito MIZUCHI, Motohiro SUZUKI, Masakazu MORI, Toshio GOTO, Kazuo YAMANE

Abstract : We have proposed the amplitude modulated harmonically mode-locked (AM-HML) fiber ring lasers to stabilize harmonically mode-locked fiber ring lasers. The method stabilizes fiber ring lasers by generating super modes intentionally. In this paper, the characteristics of the AM-HML fiber ring lasers at repetition frequencies of 1.6GHz, 3.2GHz, 6.4GHz, and 12.8GHz is investigated. For the ring length control, we investigated the regenerative mode-locking method and also the ring length compensation by an optical delay line. To evaluate the lasing characteristics, we have analyzed the power spectral density of the output pulse train, the amplitude distortion, the timing jitter, and the modulation degree.

### 1. はじめに

近年の高度情報化社会において更なる大容量化、超高速度が必要とされている。しかし数十 Gb/s 以上のデータを電氣的に信号処理するのは現状では極めて困難である。この限界を越える手段としては、超短光パルスを用いる手法が有望である。この目的で、超短光パルスの発生、制御、評価の技術が盛んに研究されている<sup>1,2)</sup>。利得媒質としては、固体、半導体、光ファイバが研究されているが、個々の目的に応じた使い分けが必要である。

エルビウム添加光ファイバ (EDF) を利得媒体に用いたモード同期ファイバリングレーザは、1.55 μm 帯の広い波長範囲でトランスフォーマリットな超短光パルスを発生することができ、かつ非線形媒質としての光ファイバとの整合性が良いなどの特徴を有する。そのため、光通信システムに関連した分野での光源として集積型半導体レーザと共に盛んに研究されている。しかし、モード同期ファイバリングレーザでは、短パルス化や高繰り返し化のためには、モード同期基本周波数の数百倍以上の高調波で変調を行う必要があり、モード競合などによって動作が不安定となる。そこで、動作安定化のための手法がいくつか提案されてきた<sup>3,4)</sup>。我々は、モード競合を押さええる手法として、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の安定化法 (AM-HML 法) を提案し、実験してきた<sup>5)</sup>。この AM-HML 法によって高繰り返し化の超短光パル

スを得ることができる。これまで、繰り返し周波数 1.6 GHz での動作を実験により確認している。より短い光パルスを発生させるためには、繰り返し周波数を上げればよい。例えば、1.6 GHz の 8 倍、すなわち 12.8 GHz において AM-HML 法を適用できれば、現状 1.6 GHz でのパルス幅を  $1/\sqrt{8}=0.35$  倍にでき、短パルス化ができる。そこで、より短パルスを発生することを目的として、位相同期ループ回路 (PLL) を用いた高繰り返し化の AM-HML ファイバリングレーザの実験を行った。

一方、ファイバリングレーザを長時間動作させると、温度変化などの影響でリング長が変わり、モード同期するための繰り返し周波数が変動して、動作が不安定になるという問題もある。この解決法として、繰り返し周波数を一定に保ったままリング長を補償する方法<sup>6)</sup>、及びリング長変動に合わせて繰り返し周波数を変化させる方法<sup>7)</sup>が提案されている。通信応用の点からは、繰り返し周波数が変化しない前者が望ましい。しかし、後者の技術が確立できれば、PLL 技術とリング長補償機構とを組み合わせると、前者の技術も確立できる。そこでまず、リング長の変動を補償する手段として、再生モード同期を用いる方法の基本検討を行った。

### 2. 高繰り返し化

AM-HML 法では、高調波モード同期に必要な高調波周波数  $fh$  に予備変調周波数  $fs$  (基本周波数  $fa$  の整数倍) で AM 変調をかける。これによって、高調波周波数  $fh$  の縦モードに予備変調周波数間隔  $fs$  で側波帯が現れる。パルスがファイバ

† 愛知工業大学 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)

リング内を循環することによってこれが繰り返され、 $f_s$  間隔で側帯が現れる。その結果、基本周波数  $f_a$  の整数倍ではあるが、高調波周波数  $f_h$  の整数倍でない周波数成分（スーパーモード）の間で結合が起こり、それらの相対位相も固定される。すなわち、AM-HML 法は、予備変調周波数間隔  $f_s$  で、意図的にスーパーモードを作り出して安定化させる手法である。

このように、AM-HML 法では、高調波周波数  $f_h$  に同期した予備変調信号  $f_s$  が必要となる。その発生方法には、大きく分けて、IC による分周回路と PLL の二つが考えられる。我々は、デバイスによる制限が比較的小さく、かつ 10 GHz 以上の繰り返しが可能であるという観点から、PLL 方式について検討し、実際にこれらの PLL を用いて、高繰り返しでのファイバリングレーザの実験を行った。

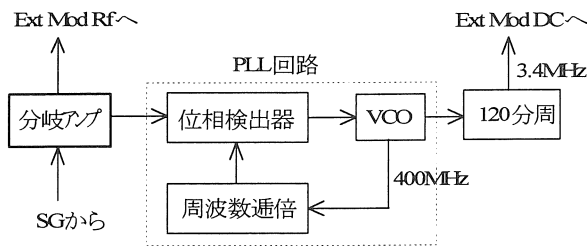
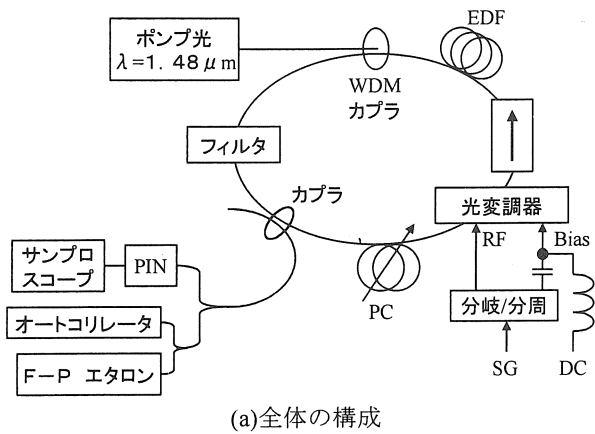


図 1. 実験系

実験系を図 1 に示す。ファイバリングの長さは約 60m で、基本周波数  $f_a$  は 3.4MHz である。EDF は Er 濃度 230ppm、長さ約 40m であり、これを波長 1.48  $\mu$ m、45mW のポンプ光で後方励起して用いた。発振波長選択のために通過帯域 3nm の波長可変フィルタを使用した。全系は非偏波保持型であるので、リング一周の偏波方向を調整するために偏波制御器を使用している。光変調器には、帯域 12 GHz の LiNbO<sub>3</sub> 振幅変調器を使用した。

信号発生器 (SG) からの出力を用いて高調波周波数  $f_h$  ( $\sim +17$ dBm) で外部光変調器を駆動するとともに、高調

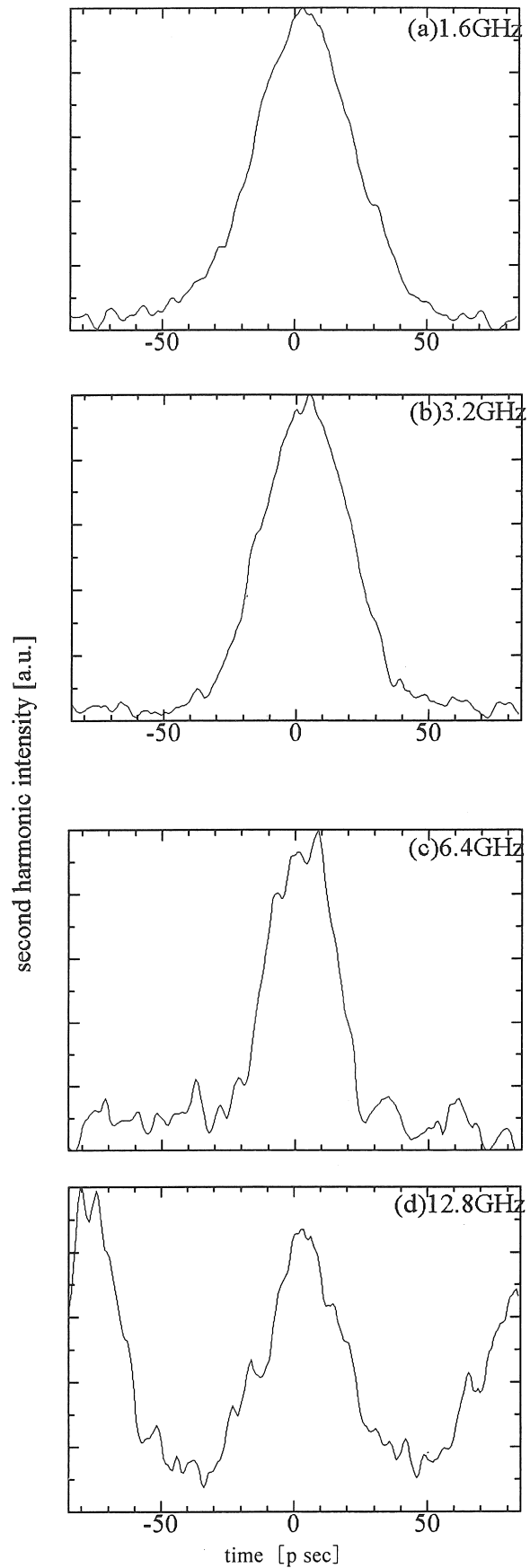


図 2. オートコリレータ出力波形

波信号  $f_h$  に同期した予備変調信号  $f_s=f_a$  (基本周波数 3.4MHz、60mV p-p 程度) を用いて、光変調器の動作バイアスポイントを変調する。これにより、高調波信号  $f_h$  を振幅変調したのと同様な効果が得られる<sup>8)</sup>。同図の分岐/分周の部分に PLL 回路を使用している。

出力を取り出すために分岐比 8:2 の光カップラを用い、帯域 20 GHz のフォトダイオードで受光した。時間波形をサンプリングオシロスコープで確認した後、パルス幅をオートコレクタ、スペクトル幅を Fabry-Perot 干渉計で測定した。

繰り返し周波数が 1.6 GHz、3.2 GHz、6.4 GHz、12.8 GHz の時のオートコレクタ出力波形を図 2 に示す。サンプリングオシロスコープ画面上の波形を見ながら SG の周波数を設定するのであるが、高繰り返しになるほどモード同期状態かどうかの識別が困難であり、同図のように、繰り返し周波数の上昇とともに波形が歪んでいった。

図 3 にパルスの半値全幅  $\Delta t$ 、スペクトルの半値全幅  $\Delta f$ 、及び時間バンド幅積  $\Delta t \Delta f$  の繰り返し周波数依存性を示す。オートコレクタ出力波形からパルスの半値全幅  $\Delta t$  を求める際には、sech 型の波形を仮定した。時間バンド幅積  $\Delta t \Delta f$  は、繰り返し周波数が 1.6 GHz と 3.2 GHz の時は sech 型の値 (0.315) に近く、6.4 GHz と 12.8 GHz の時はガウス型の値 (0.441) に近づいている。理論的には、一様な広がりをもつ利得媒質では、モード同期状態でパルスの半値全幅  $\Delta t$  は繰り返し周波数の平方根の逆数に比例する<sup>9)</sup>。実験結果では、高繰り返し周波数になるほどこの関係からはずれる傾向にあり、モード同期がかかりにくくなっている。

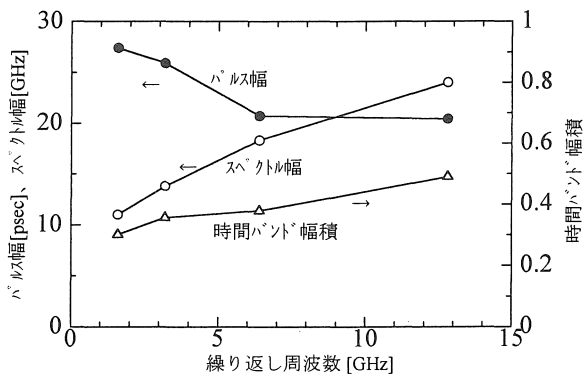


図 3. パルス半値全幅、スペクトル半値全幅、及び時間バンド幅積の繰り返し周波数依存性

以上のように、今回の実験では、高繰り返しになるほど波形が歪み、時間バンド幅積  $\Delta t \Delta f$  が増加するなど、モード同期状態からずれる傾向にあった。これは、次の二点に問題があるためと考えている。

(1) SG 周波数設定分解能の粗さ: SG の設定分解能は 1.6 GHz で 20Hz、繰り返し周波数 3.2 GHz 以上で 1kHz

である。

(2) リング長変動の影響: リング長の補償をしていないため、モード同期周波数が変動する。今回の実験環境におけるリング長の変動は、平均して 160nm/sec と見積もられる。周波数変動に換算すると、繰り返し周波数 12.8 GHz の時で、33Hz/sec 程度になる。

繰り返し周波数 1.6 GHz では、SG 周波数を変えていくと、非同期→同期→非同期へと状態が切り替わるのをはっきりと識別でき、同期する周波数値に設定することが容易であった。しかし、3.2 GHz 以上では状態の切り替わりを識別するのが困難であった。分解能 1kHz のために、SG 周波数を変えてもモード同期領域を飛び越してしまっている可能性が大きい。SG と PLL を 1.6 GHz で動作させ、周波数通倍して外部変調器を駆動するようにすれば、SG 周波数の設定分解能を上げることが可能である。これにより、繰り返し周波数 12.8 GHz において、設定分解能を現状の 1kHz から  $20\text{Hz} \times 12.8\text{GHz} / 1.6\text{GHz} = 160\text{Hz}$  にできる。

また、リング長  $l$  (=60m) をある長さ  $\Delta l$  だけ変化させて、モード同期周波数を設定分解能  $\Delta f_{SG}$  以上に変化させるのも一方法である。  $\Delta f_{SG} / f_h \leq \Delta l / l$  から、  $\Delta l \geq 20\mu\text{m}$  であればよい。

一方、リング長の補償については、室温の日変化を考えると ~4mm を補償することが必要となる。上記の点と合わせて、分解能 ~1 $\mu\text{m}$ 、可変幅 ~4mm のリング長補償機構が必要と結論される。市販の微動ステージでもこの仕様は満足できるが、反射を抑えながら、なおかつ挿入損失を小とするための、光学的な検討を十分に行う必要がある。

### 3. 予備変調信号の位相の影響

これまでの実験で、予備変調信号  $f_s$  は高調波信号  $f_h$  に同期してはいるが、その相対位相  $\phi$  までは制御していない。しかし、この相対位相  $\phi$  は、 $f_h$  間隔の主モードと、それから  $f_s$  だけ離れたサイドモード (スーパーモード) との位相関係を決めるものであり、パルス波形への影響が全く無いわけではない。そこで、この相対位相  $\phi$  によるパルス波形の変化を実験で調べた。

最も安定してモード同期がかかる、繰り返し 1.6 GHz で実験を行った。図 1 (a) の実験系において、予備変調信号の位相を変えられるように、分岐/分周の部分を図 4 のもので置き換えた。出力部に可変長同軸管を設け、位相を変化させるものである。使用した可変長同軸管の特性を表 1 に示す。周波数 3.2 GHz 以下では、挿入損失が小さい。周波数 1.6 GHz においても一周分以上の遅延を与えることができる。

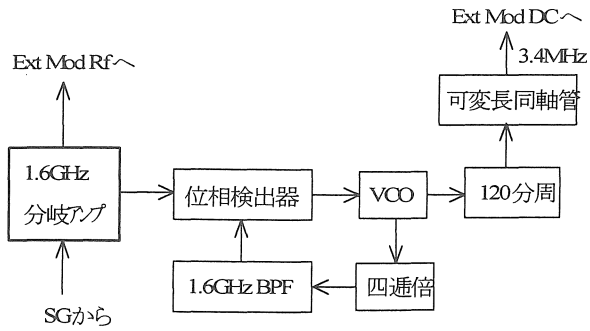


図 4. 予備変調信号の位相調整

表 1. 可変長同軸管の特性

周波数	挿入損失	最大遅延時間
1.6GHz	1.0dB	0.67nsec
3.2GHz	1.4dB	0.67nsec
6.4GHz	2.0dB	0.67nsec
(9.5GHz)	(4.0dB)	測定できず
12.8GHz	9.2dB	

電気信号のレベルを前節と同じにして、実験を行った。実験の途中で、図 1 の偏波制御器(ファイバホ製、SQHAP-1550)の調整の仕方によって、パルス幅が前節の値よりも極端に狭くなるという現象が見られた。これまでは、波形観測用 PIN の出力振幅が最大となるように偏波制御器を調整していた。このときの出力パルス幅  $\Delta t$  は図 3 のように 27psec 程度になる。一方、波形観測用光カップラの出力パワーが最大となるように偏波制御器を調整すると、パルス幅は 8psec 程度になり、これまでの値の 1/3 になった。実験を数回繰り返し、パルス幅狭化の現象を再現性よく観測することができた。原因はまだ明らかでないが、偏波制御器に組み込まれている検光子と、光強度に依存したファイバリング中の偏波回転とで偏波スイッチング作用<sup>10,11)</sup>が起きている可能性がある。

パルス幅が狭くなるように偏波制御器を調整した状態で、予備変調信号の相対位相の影響を調べた結果を図 5 に示す。可変長同軸管 5cm は 0.16nsec の遅延に対応し、高調波信号  $f_h=1.6$  GHz での位相  $90^\circ$  に対応する。同図から、どの相対位相でも、パルス波形に殆ど変化が無く、半値全幅は 8psec (SHG 出力で 12psec) で一定になっていることが分かる。

これまで通りの方法で偏波制御器を調整した状態でも、予備変調信号の相対位相の影響を調べた。この場合も、パルス波形に殆ど変化がなかった。

以上の結果から、実際に使用している程度の予備変調

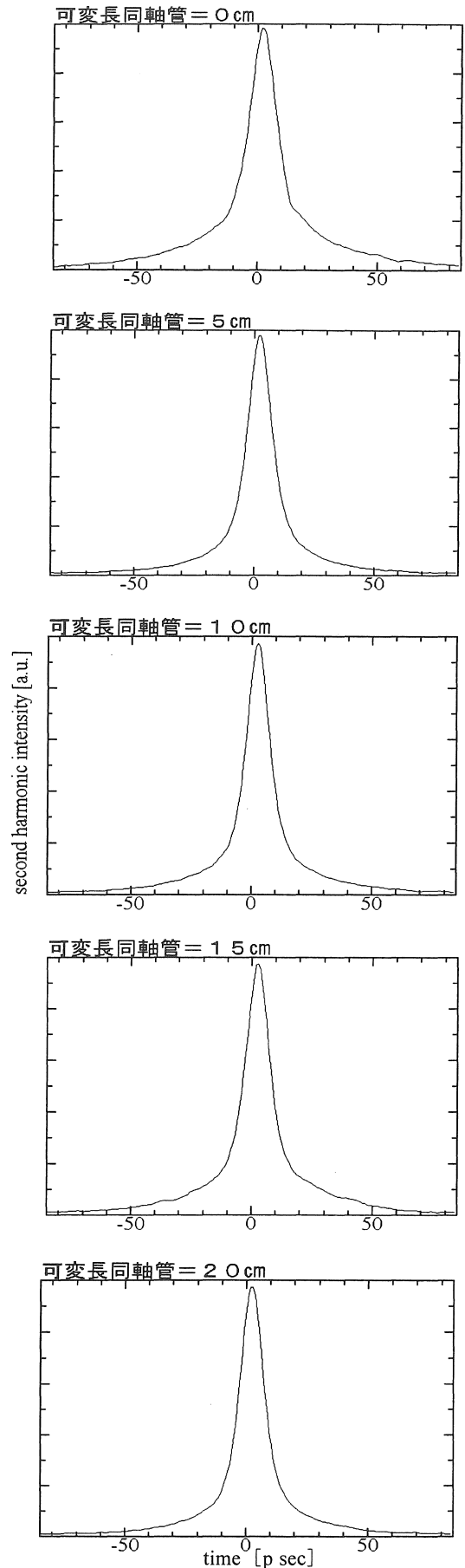


図 5. 予備変調信号の位相の影響

度であれば、予備変調信号の相対位相  $\phi$  は考慮しなくてよいと結論できる。

4. 再生モード同期方式の検討

高調波モード同期ファイバリングレーザの動作を不安定にする要因は、スーパーモードによるモード競合の他に、2節で述べたリング長変化によるモード同期周波数(繰り返し周波数)の変動がある。予備変調方式によりモード競合を抑えることができるが、リング長変化の影響を抑えることはできない。リング長変化の問題は、リング長補償機構を設ける方法と、リング長変化に合わせて繰り返し周波数を変化させる方法とがある。ここでは、後者の方法である、再生モード同期方式の基本検討を行った結果について述べる。この方式は、変動した周波数に合わせて、繰り返し周波数を制御するものであり、リング長変化の影響を抑えて動作を安定化させることができる。

検討した系を図6に示す。今回は、繰り返し周波数 1.6 GHz で動作させることを当面の目標として検討したが、既開発の PLL 技術を使って、3.2 GHz /6.4 GHz /12.8 GHz の動作も原理的には可能である。

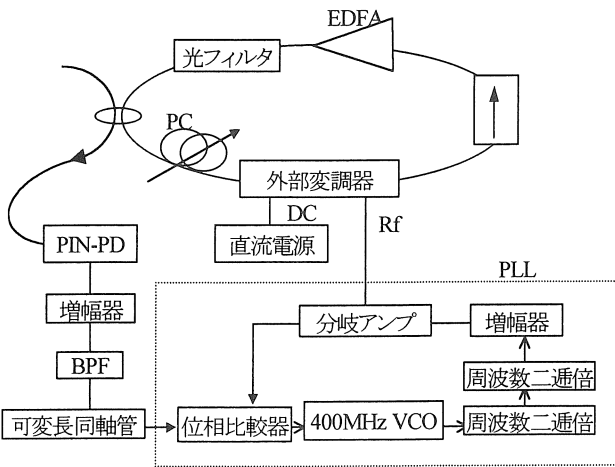


図6. 再生モード同期方式の構成(繰り返し 1.6GHz)

この系では、PLL 出力を用いてファイバリングレーザを動作させ、その出力の一部をカップラにて取り出す。PIN-PD で電気信号に変換し、増幅した出力を可変長同軸管を通して位相を合わせる。これを PLL 回路にフィードバック制御することにより、動作周波数を自動調整する。従って、リング長変化による周波数変動を PLL のプルインレンジ内で自動補償できる。また、予備変調をかける場合は、VCO 出力を分周して用いればよい。

再生モード同期方式は、外部変調器の RF 入力から位相比較器の REF 入力までの光部分と電気部分を一種の帯域通過フィルタとみなして、発振器を構成するものである。

帯域通過フィルタの周波数変化に合わせて発振周波数が変化する。但し、この帯域通過フィルタは、スーパーモードによるサブピークを持った特性となるから、それを抑えるような電氣的狭帯域通過フィルタ(図中の BPF)が別途必要である。この BPF に必要な Q 値は、繰り返し周波数 1.6 GHz の場合、 $Q \sim fh/fa=470$  となる。

繰り返し周波数 1.6 GHz で大雑把な動作実験を行った。手持ちの都合で、BPF には  $Q \sim 106$  の同軸線フィルタを用い、予備変調はかけないで実験した。

VCO の自走周波数を調整することによって、スーパーモードが抑えられたレーザ発振状態になることが観測された。しかし、長時間にわたって安定化することはできなかった。また、現状では、電氣的な飛びによってループ系が発振し易い。この発振抑圧対策と、BPF の Q 値改良が必要である。

5. 出力パルス列のスペクトル解析

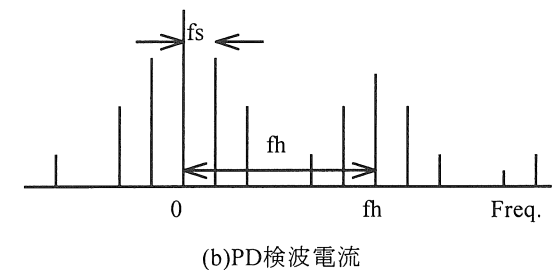
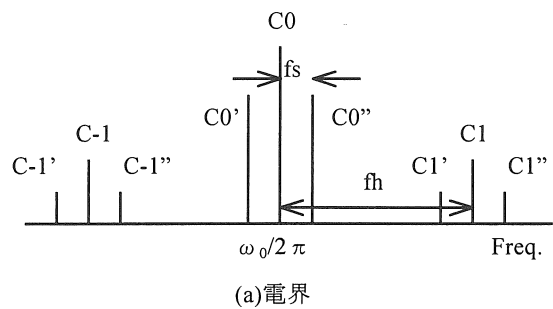


図7. 電界と PD 検波電流の振幅スペクトル

モード同期パルス列を PD で受け、そのスペクトルから振幅揺らぎやタイミングジッタを求めるのに D.von der Linde の手法<sup>12)</sup>が広く用いられている。しかし、振幅揺らぎが小さい、一定振幅のパルス列であることが前提であり、そのままの形では予備変調方式に適用できない。そこで、D.von der Linde の手法を予備変調方式の場合へと適用することを検討した。同時に、予備変調方式において重要なパラメータである予備変調度をパルス列のスペクトルから求める手法の検討を行った。従来は、予備変調度をサブプロ上の波形観測から求めていたが、PD の帯域に依存するという欠点があった。

まず、電界スペクトルと PD 検波電流のスペクトルは異なることに注意しなければならない。D.von der Linde の手法で扱うものは PD 検波電流のスペクトルである。予備変調度が小さい場合の光電界  $E(t)$  のスペクトルは、高調波周波数  $f_h$  の整数倍だけ離れた側波帯成分の上下に更に予備変調周波数  $f_s$  だけ離れた側波帯が現れるはずである。従って、図 7 (a) のようになる。式で表すと、

$$E(t) = \frac{1}{2} \left[ \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp(j2\pi f_h t) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n' \exp\{j2\pi n(f_h - f_s)t\} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n'' \exp\{j2\pi n(f_h + f_s)t\} \right] \exp(j\omega_0 t) + c.c. \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2} \{E_{env}(t) \exp(j\omega_0 t) + c.c.\}$$

PD 検波電流  $i(t)$  は電界振幅の包絡線を  $E_{env}(t)$  として、 $i(t) \propto E_{env}(t)E_{env}(t)^*$  であるから、次のような周波数成分が現れる。

DC 成分  $\propto c_0 c_0^* + c_{-1} c_{-1}^* + c_1 c_1^* + \dots$   
 $f_h$  成分  $\propto c_0 c_{-1}^* + c_0' c_{-1}^* + c_0'' c_{-1}^* + c_1 c_0^* + \dots$   
 $(f_h + f_s)$  成分  $\propto c_0 c_{-1}^* + c_0' c_{-1}^* + c_1 c_0^* + \dots$   
 $(f_h + 2f_s)$  成分  $\propto c_0' c_{-1}^* + c_1' c_0^* + \dots$   
 ……

$(f_h + 2f_s)$  成分や  $2f_s$  成分などの、電界スペクトルには含まれていないものも現れる。電界の振幅変調率を  $m_E$  とすると、 $c_i' = c_i'' = m_E c_i / 2 (i=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$  だから、各周波数成分の振幅比は次のようになる。

$$\begin{aligned} (f_h \pm f_s) \text{ 成分} / f_h \text{ 成分} &= m_E / (1 + m_E^2 / 2) \\ (f_h \pm 2f_s) \text{ 成分} / f_h \text{ 成分} &= m_E^2 / [4(1 + m_E^2 / 2)] \quad (2) \\ (f_h \pm 2f_s) \text{ 成分} / (f_h \pm f_s) \text{ 成分} &= m_E / 4 \end{aligned}$$

このように、PD 検波電流のスペクトルは図 7 (b) のようになり、電界スペクトルとは異なる。そこで、PD 検波電流の波形  $i(t)$  を D.von der Linde の解析法に合わせて表すと次のようになる。

$$i(t) \equiv G(t) = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} \{1 + A(t)\} g(t - \mu T + T J(t)) \{1 + m(t)\} = G_0(t) + G_0(t)m(t) \quad (3)$$

但し、 $G_0(t) = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} g(t - \mu T)$  は振幅揺らぎもタイミングジッタも無い、周期  $T$  の波形を表す。 $m(t)$  は予備変調による振幅変調を表し、周期  $1/f_s$  の周期関数である。上記のように、 $m(t)$  の中には  $f_s$  成分のみでなく、 $2f_s$  成分も含まれることになる。式 (3) の自己相関関数を求めると次のようになる。

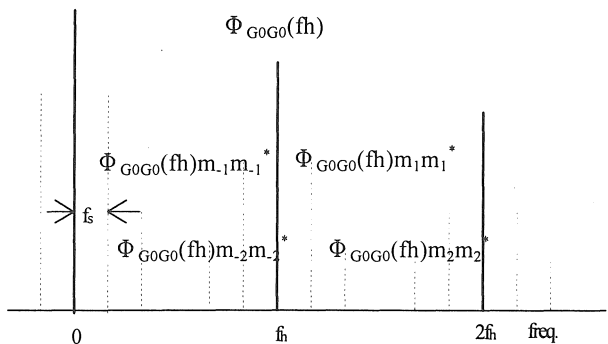
$$\begin{aligned} \Phi_{GG}(\tau) &= \Phi_{G_0G_0}(\tau) + \Phi_{AA}(\tau) \Phi_{G_0G_0}(\tau) \\ &+ T^2 \Phi_{JJ}(\tau) \Phi_{G_0'G_0'}(\tau) + \Phi_{G_0mG_0m}(\tau) + \Phi_{AA}(\tau) \Phi_{G_0mG_0m}(\tau) + T^2 \Phi_{JJ}(\tau) \Phi_{G_0'mG_0'm}(\tau) \quad (4) \end{aligned}$$

但し、 $G_{0m}$  は関数  $G_0(t)m(t)$  を、 $G_0'm$  は関数  $G_0'(t)m(t)$  を表す。ここで ' は時間についての微分である。点線の部

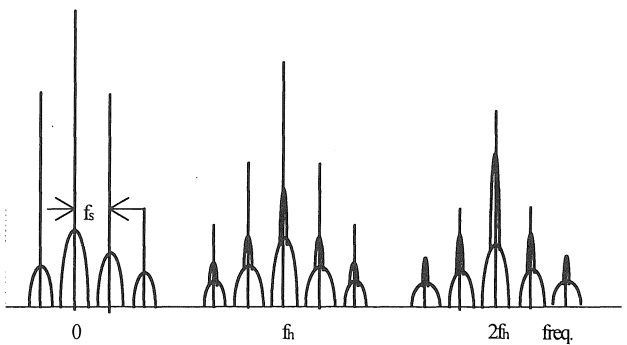
分が予備変調によって新たに付け加わる項である。これらは  $G_0(t)m(t)$  のスペクトルが分かれば計算できる。 $m(t)$  は周期  $1/f_s$  の周期関数であるから、次のフーリエ級数に展開できる。図 7 の結果から、予備変調度が小さい場合は、 $n=-2 \sim +2$  で十分である。

$$m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m_n \exp(j2\pi n f_s t) \quad (5)$$

これを用いて、式 (4) の右辺第一項と第四項によるパワースペクトル密度が図 8 (a) のように求められる。同図で実線は  $G_0(t)$  から、波線は  $G_0(t)m(t)$  から生ずるスペクトルである。この線スペクトル成分を基にして、振幅揺らぎとタイミングジッタを含んだ全パワースペクトル密度を求めると、図 8 (b) のようになることが分かる。



(a) パワースペクトル密度の線スペクトル成分



(b) パワースペクトル密度の全成分

図 8. PD 検波電流のパワースペクトル密度

同図から、振幅揺らぎとタイミングジッタの周波数成分が  $f_s$  以内に収まっていれば、スペクトルの重なりは生じないことが分かる。本研究で実験しているファイバリングレーザはこの条件を満たしている。この場合は、D.von der Linde の解析法を用いて振幅揺らぎとタイミングジッタを求められる。

図 8 (a) と図 7 (b) の各周波数成分のパワー比を比較すると、次の関係が得られる。

$$m_{-1} m_{-1}^* = m_1 m_1^* = [m_E / (1 + m_E^2 / 2)]^2 \quad (6. a)$$

$$m_{-2} m_{-2}^* = m_2 m_2^* = m_E^4 / [4(1 + m_E^2 / 2)]^2 \quad (6. b)$$

図 9 (a) のスペクトル観測例に適用してみると、データからは

$m_1 m_1^* = 0.079$ 、 $m_2 m_2^* = 0.0016$  が得られる。これから、 $|m_1| = 0.28$ 、 $|m_2| = 0.040$  となる。一方、図 9 (a) のスペクトルが得られた状態での PD パルス列の振幅変調度を別の方法で評価したところ 0.3 であった。この値は、 $|m_1|$  と  $|m_2|$  から予想される値と一致している。また、 $|m_1|$  と  $|m_2|$  の値を用いて電界の振幅変調度  $m_E$  を求めると、式 (6. a) からは  $m_E = 0.29$ 、式 (6. b) からは  $m_E = 0.37$  となり、 $\pm 15\%$  程度の範囲で一致している。

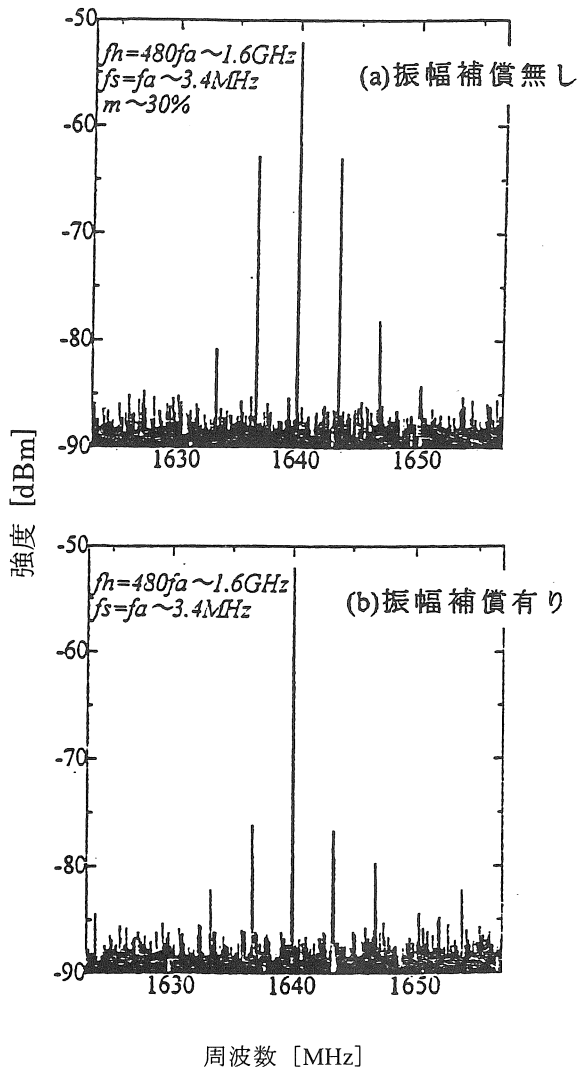


図 9. スペクトル観測例

図 9 (b) のスペクトル観測例は、ファイバリングレーザの外に設けた外部光変調器で予備変調分を補償した時のものである。従って、PD パルス列の振幅変調度は観測できないくらいに小さくなっている。このデータに適用してみると、 $|m_1| = 0.06$ 、 $|m_2| = 0.03$  となる。これから、PD パルス列の振幅変調度は最大でも 0.09 程度と推定される。また、電界の振幅変調度  $m_E$  は、式 (6. a) からは  $m_E = 0.08$ 、式 (6. b) からは  $m_E = 0.17$  となり、両者は大きく違う。図 9 (b) が得られた状態では、電界振幅の変調成分の中で予備変調

周波数  $f_s$  の成分よりも、むしろ  $2f_s$  などの高調波成分の方が大きくなって式 (1) での仮定が成り立たなくなるために、このような食い違いが出たと考えている。実際の予備変調方式の動作状態ではこのような事態は起きず、式 (1) での仮定は成立する。

以上、出力パルス列のスペクトル解析から、予備変調度を求められることが分かった。

6. リング長の補償

リング長補償については、リングレーザ内に光ディレイラインを挿入して変動分を打ち消して一定に保つ方法と、再生モード同期法によって繰り返し周波数をリング長の変動に合わせて変える方法がある。光通信システムにおいて繰り返し周波数は一定であるほうが望ましい。そこで、光ディレイラインを用いる方法でリング長の制御をすることを前提に、それに用いる制御用のフィードバック信号の評価を行った。これまでファイバリングレーザのリング長補償の手法として、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) の緩和振動強度をフィードバック信号として用いる手法<sup>6)</sup>などが提案されてきた。そこで我々は EDFA の緩和振動以外に、基本周波数、及びその高調波近傍の緩和振動成分などをフィードバック信号として用いることができるかどうか検討した。

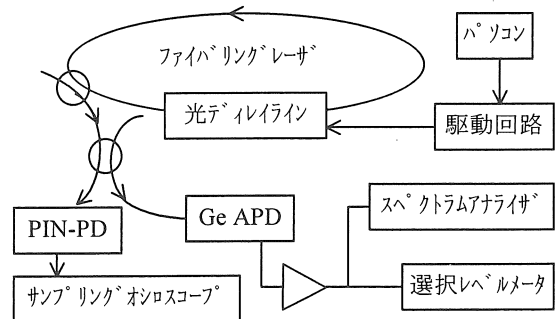


図 10. 実験系

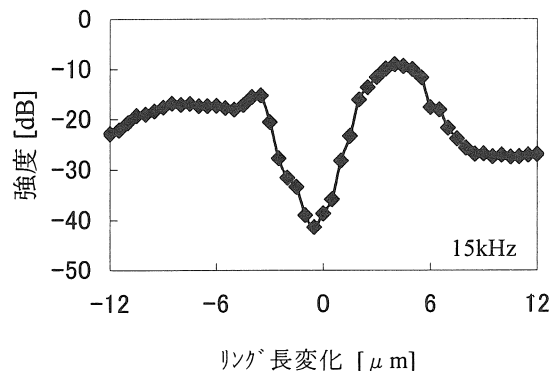


図 11. 緩和振動周波数の強度

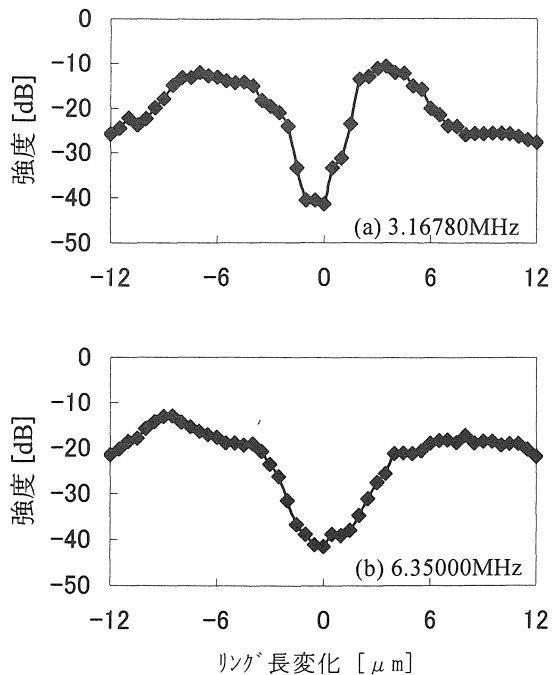


図 1.2. 緩和振動成分の強度

実験系を図 1.0 に示す。この系においてファイバリングレーザを最適な状態で駆動しておき、その状態からパソコンで制御して光ディレイラインを±12 μm の範囲で約 0.5 μm ずつずらし、信号の強度変化を選択レベルメータにより測定した。

図 1.1 に緩和振動周波数の強度変化を、図 1.2 (a) に 3.2 MHz 近傍の緩和振動成分、(b) に 6.4 MHz 近傍の緩和振動成分の強度を示す。

これらの結果から、緩和振動周波数、基本周波数、及びその高調波近傍に現れる緩和振動成分をフィードバック信号に用いることができることが分かった。

## 7. まとめと今後の課題

予備変調方式 (AM-HML 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、短パルス化を目的とした、PLL による高繰り返し化の実験検討 (1.6 GHz / 3.2 GHz / 6.4 GHz / 12.8 GHz)、およびリング長補償を目的とした、再生モード同期方式の基本検討を行った。現状の系では繰り返し周波数 6.4 GHz 以上でのモード同期がかかりにくいという結果であったが、リング長補償を施すことにより、安定パルスを発生できるとの目処が得られた。

本実験において、強制モード同期とは性質が異なるパルス幅の狭窄化現象が観測された。この原因を明らかにし、高繰り返し化と併せて、より短パルスの発生へと結び付けたいと考えている。

また、予備変調方式の出力パルス列のスペクトル解析を行い、振幅変調度、タイミングジッタのみならず、予備変調度も求め

られることを明らかにした。

上記の点に加えて、今後は、光技術と高周波技術を組み合わせた、パルス圧縮、パルス変調、及び繰り返し周波数の分周、逡倍などの応用法も検討していく予定である。

## 参考文献

- 1) 吉田他, "モード同期ファイバリングレーザ", *レーザー研究*, Vol. 27, No. 11, pp. 756-761 (1999)
- 2) 長沼, "フェムト秒パルスの位相測定法", *レーザー研究*, Vol. 28, No. 8, pp. 474-478 (2000)
- 3) H. Takara et al., "20GHz transform-limited optical pulse generation and bit-error-free operation using a tunable, actively modelocked Er-doped fiber ring laser", *Electron. Lett.*, Vol. 29, pp. 1149-1150 (1993)
- 4) E. Yoshida et al., "20GHz, 1.8ps pulse generation from a regeneratively modelocked erbium-doped fiber laser and its femtosecond pulse compression", *Electron. Lett.*, Vol. 31, pp. 377-378 (1995)
- 5) B. P. Singh et al., "Mode-locking of fiber ring lasers with a coherent-phase relationship among axial mode groups", *Opt. Laser Technol.*, Vol. 27, pp. 275-277 (1995)
- 6) H. Takara et al., "Highly stable, actively mode-locked Er-doped fiber ring laser utilizing relaxation oscillation as detuning monitor", *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E81-C, pp. 213-219 (1998)
- 7) E. Yoshida and M. Nakazawa, "Wavelength tunable 1.0ps pulse generation in 1.530-1.555 μm region from PLL, regeneratively modelocked fiber laser", *Electron. Lett.*, Vol. 34, pp. 1753-1754 (1998)
- 8) R. Nomura et al., "New scheme of amplitude modulated harmonically mode-locked Er-doped fiber ring lasers", *OECC '97*, 9D5-3 (1997)
- 9) D. Kuizenga and A. E. Siegman, "FM and AM mode locking of the homogeneous laser", *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-6, pp. 694-708 (1970)
- 10) D. U. Noske et al., "Subpicosecond soliton pulse formation from self-mode-locked erbium fiber laser using intensity dependent polarization rotation", *Electron. Lett.*, Vol. 28, pp. 2185-2186 (1992)
- 11) K. Tamura et al., "Self-starting additive pulse mode-locked erbium fiber ring laser", *Electron. Lett.*, Vol. 28, pp. 2226-2228 (1992)
- 12) D. von der Linde, "Characterization of the noise in continuously operating mode-locked lasers", *Appl. Phys.*, Vol. B39, pp. 201-217 (1986)

(受理 平成13年 3月19日)