

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リング長制御

Ring length control of amplitude modulated harmonically mode-locked fiber ring lasers

水池 秀仁†, 鈴木 基仁†, 森 正和†, 西澤 典彦‡, 後藤 俊夫‡, 山根 一雄‡†,
Hidehito MIZUCHI, Motohiro SUZUKI, Masakazu MORI, Norihiko NIZHIZAWA, Toshio GOTO,
Kazuo YAMANE

Abstract: In this paper, we investigated the ring length compensation by an optical delay line in amplitude modulated harmonically mode-locked (AM-HML) fiber ring lasers. The noise power of the relaxation oscillations near the fundamental frequency of the erbium dope fiber amplifier (EDFA) is monitored, and the optical delay line is controlled to minimize the power. The lasing characteristics at the repetition frequency of 1.6GHz is evaluated under the ring length control.

1. はじめに

通信において、伝送速度の向上は常に考えていかねばならない課題である。電気による多重・分離の限界速度を克服するためには、OTDM、光 MUX/DMUX など、光信号による多重・分離の技術を確認していかなければならない。従って、高繰り返し、かつ高安定な超短光パルスの発生と制御の技術はますます重要となってきた。

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 帯の広い波長範囲にわたって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る。また、光ファイバ伝送路との整合性が良いという特徴を有するため、集積型半導体レーザと共に、光ファイバ通信システムに関連した分野での光源として盛んに研究されている^{1,2)}。

モード同期ファイバリングレーザでは、高繰り返し化や短パルス化のためには、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、一般には、モード競合によって動作が不安定となる。本研究では、モード競合を抑える手法として、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³⁾。

この AM-HML 法によってモード競合は抑えられるが、周囲温度の変化などによるリング長変動までは抑えることができない。そのため、繰り返し周波数が 1.6GHz から 12.8GHz へと高くなればなるほど、出力波形が乱れてし

まうという問題があった⁴⁾。

そこで、リング長変動を補償する手法について検討した。リング長を調節するためのデバイス、フィードバック信号の候補となる各種雑音成分の特性比較、及び摂動付加方法、の各項目について検討を行い、その結果に基づいて、リング長制御機能を有する AM-HML ファイバリングレーザを構築した。予備変調信号の生成には、GHz 帯 PLL を用いた⁴⁾。次にこのリング長制御系を用いて、繰り返し 1.6GHz での動作確認実験を行い、リング長制御の条件下での出力パルスの特性、及び長時間安定性などについて調べた。

2. リング長制御法

2.1 リング長制御法の検討

リング長制御法について、他の研究例⁵⁾から本研究の条件 (繰り返し周波数 1.6GHz、リング長 65m) でのリング長制御系に要求される特性を見積もると、次のようになる。この条件に合う delay 素子と EDFA 緩和振動検出系を順に検討した。

- (1) delay 調整精度 : $\ll 2 \mu\text{m}$
- (2) delay 調整幅 : $\sim 6\text{mm}$
- (3) EDFA 緩和振動周波数 : 10kHz \sim 40kHz
- (4) EDFA 緩和振動の雑音レベル : モード同期成分に対して 30dB \sim 70dB 小 (-60dBm \sim -100dBm)

2.2 delay 素子

delay 素子として入手可能なものは次のようになる。

† 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)

- ① ビエツ素子
- ② 空中伝播させ、微動台により伝播距離を変化
- ③ 光ファイバ

①のビエツ素子は微小な摂動をリング長に与えるのには都合よいが、数 mm までのリング長調整を行うのには適していない。従って、他の delay 素子と組み合わせて使用する必要がある。

②の空中伝播は 25nm 間隔での微調整が可能である。しかし、挿入損失を抑える工夫、及び反射対策が別途必要となる。

③の光ファイバとして市販のサンテック ODL-300 を用いれば、調整精度 0.1ps (=30 μ m)、最大調整幅 200ps (=60mm)、挿入損失 \sim 2dB、反射減推量 $>$ 50dB が得られる。制御回路にギア機構を組み合わせ、調整精度 \ll 2 μ m を実現すること、及びリングレザ中の EDFA 利得の増加を図って挿入損失分を補償することが必要となる。また、リング長が 2m 程度長くなって、基本周波数が変わるため、予備変調信号生成用の PLL 回路の動作周波数範囲を確かめておく必要がある。

以上のことから、光ファイバをリング長調整を行うための第一候補とし、ビエツ素子は微小な摂動を与えるのに用いることとした。

光ファイバの挿入損失を調べたところ、遅延時間が 60ps 近辺で最小 (1.3dB) になった。そこで、リング長制御の中心位置を遅延時間 60ps に設定した。また、光ファイバでの挿入損失を補償するために EDFA 励起光源の出力を上げた。(43mW \rightarrow 62mW)。これにより小信号利得は 2.2dB、飽和出力レベルは 2.8dB、それぞれ上昇したので、光ファイバを挿入することによるリングレザの損失増加を十分補償できることが分かった。

2.3 EDFA 緩和振動検出系

微弱な雑音レベルを測定する必要があるため、Ge APD の出力信号を適当な通過帯域の増幅器で増幅し、選択レベルメータで測定する構成とした。リング長制御に用いるフィードバック信号の候補としては様々なものが考えられる。ここでは以下の信号を想定し、その検出に必要な増幅器を設計・製作した。

- ① 緩和振動周波数成分 (10kHz \sim 40kHz)
- ② 基本周波数成分 ($f_a=3.18$ MHz)、及びその近傍に現れる緩和振動成分
- ③ 基本周波数の高調波成分 ($2f_a\sim 5f_a$)、及びその近傍に現れる緩和振動成分

使用した選択レベルメータの測定可能な周波数帯域は 50kHz \sim 800MHz であった。そこで、①の緩和振動周波数成分 (10kHz \sim 40kHz) を観測する場合は、Ge APD の出

力信号を通過帯域 5kHz \sim 45kHz の 3 次帯域通過フィルタ (BPF) に通した後に増幅し、1MHz の水晶発振器で周波数変換してから選択レベルメータにて測定した。一方、②と③の測定においては、中間に通過帯域 500kHz \sim 15MHz の 5 次低域通過フィルタ (LPF) を設けた広帯域増幅器に Ge APD の出力信号を接続する構成とした。図 1 と図 2 に用いた測定系の周波数特性を示す。伝達レベルゲインは予想値よりも大きめとし、Ge APD の入力に光可変減衰器を接続して飽和が生じない状態で使用した。

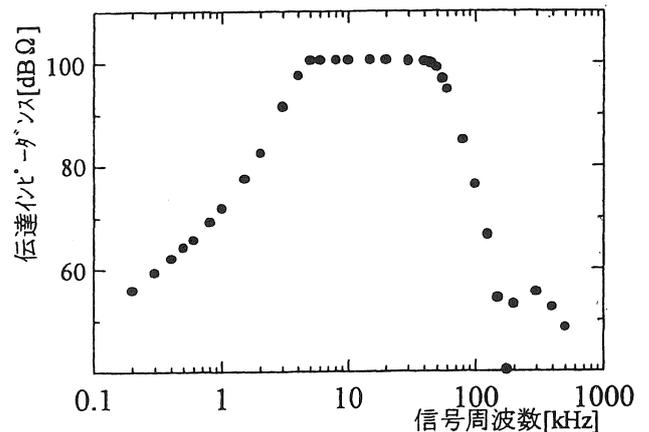


図 1 緩和振動周波数成分の測定系の周波数特性 (3 次 BPF)

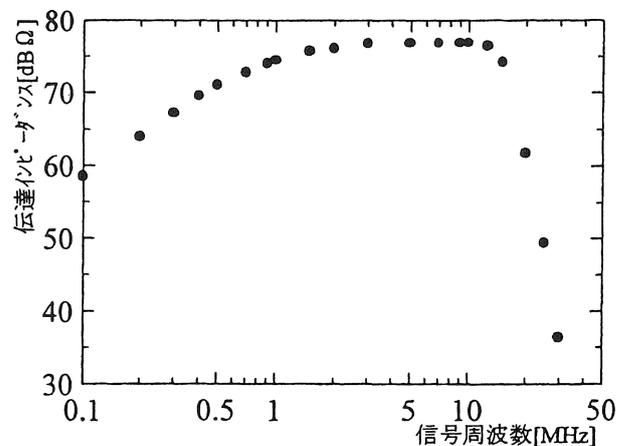


図 2 基本周波数、高調波周波数、及びそれら近傍の緩和振動成分の測定系の周波数特性 (5 次 BPF)

雑音測定系の動作をチェックするために、光ファイバを用いずに、信号発生器 (SG) 周波数のみを変化させて EDFA 緩和振動周波数 (15kHz) における雑音レベルを測定した。結果を図 3 に示す。揺らぎが大きいが、特定周波数で雑音レベルが下がること、及びその辺りでサブリングオシロスコープで観測した出力光パルス波形は良好となることが確かめられた。雑音レベルが大きく下がる SG 周波数の幅 Δf は 100Hz 程度である。これをリング長変化 Δl に換算すると、 $\Delta l = l \times \Delta f / f = 65[\text{m}] \times 100[\text{Hz}] / 1.5834[\text{GHz}] = 4.1[\mu\text{m}]$ とな

る。従って、当初の delay 調整精度の目標値 $\ll 2 \mu\text{m}$ は妥当な値であることが分かる。

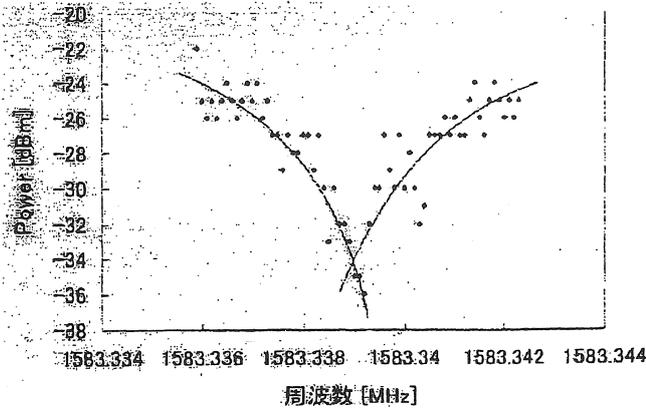


図3 緩和振動周波数における雑音強度のSG周波数依存性

3. 光ファイバによるリング長制御

図4に実験系を示す。パソコンでステップモータを制御し、ギアで減速して光ファイバライン（全長 2.5m）を駆動した。ギアによる減速機構を用いているため、バックラッシュを避けられない。従って、両方向制御での精度は保証されない。ここでは、一方向制御での精度が当初の delay 調整精度の目標値 $\ll 2 \mu\text{m}$ を満たすようにギア減速比を決めた。この時の調整精度は $0.5 \mu\text{m}/\text{ステップ}$ とした。

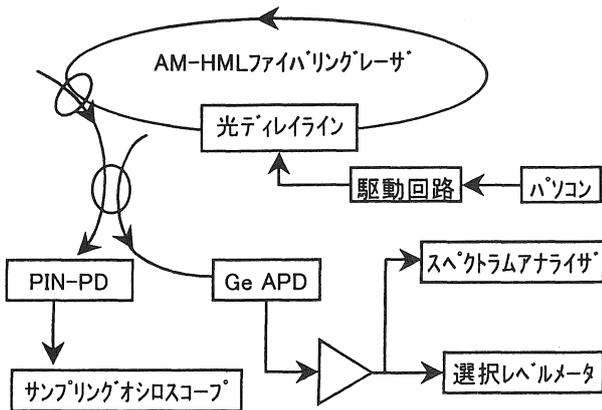


図4 リング長制御の検討実験系

光ファイバを挿入したことによってリング長が長くなり、リングレーザの基本周波数は $3.303360[\text{MHz}]$ から $3.181800[\text{MHz}]$ となった。この周波数変化に合わせて、予備変調信号生成用の PLL 回路 ($1.6\text{GHz}/3.2\text{GHz}/6.4\text{GHz}/12.8\text{GHz}$) の動作周波数範囲の調整を行った。

本実験での繰り返し周波数は比較的安定な動作が可能な $1.6[\text{GHz}]$ とした。この繰り返し周波数で、フィードバック

信号、制御特性などを実験により確認した。

3.1 フィードバック信号の選択

リング長を $0.5 \mu\text{m}/\text{ステップ}$ で一方向に掃引して、フィードバック信号として使えるような雑音信号のレベル変化を測定した。フィードバック信号の候補としては、次の信号を考えた。

- (1) EDFA 緩和振動周波数 f_{relax} ($=15\text{kHz}$)
- (2) 基本周波数 f_a ($=3.18\text{MHz}$)
- (3) f_a 近傍の EDFA 緩和振動成分 f_a+f_{relax}
- (4) 基本周波数の高調波 $2f_a$
- (5) $2f_a$ 近傍の EDFA 緩和振動成分 $2f_a+f_{\text{relax}}$

3.1.1 予備変調無しの場合

予備変調信号無し、即ち通常の高調波モード同期ファイバリングレーザについて上記の (1)、(3)、(5) について測定した。結果を図5、図6に示す。 $2f_a$ 近傍の EDFA 緩和振動成分は変化幅が大きく、且つ微小なリング長変動に対して鋭い変化を示している。

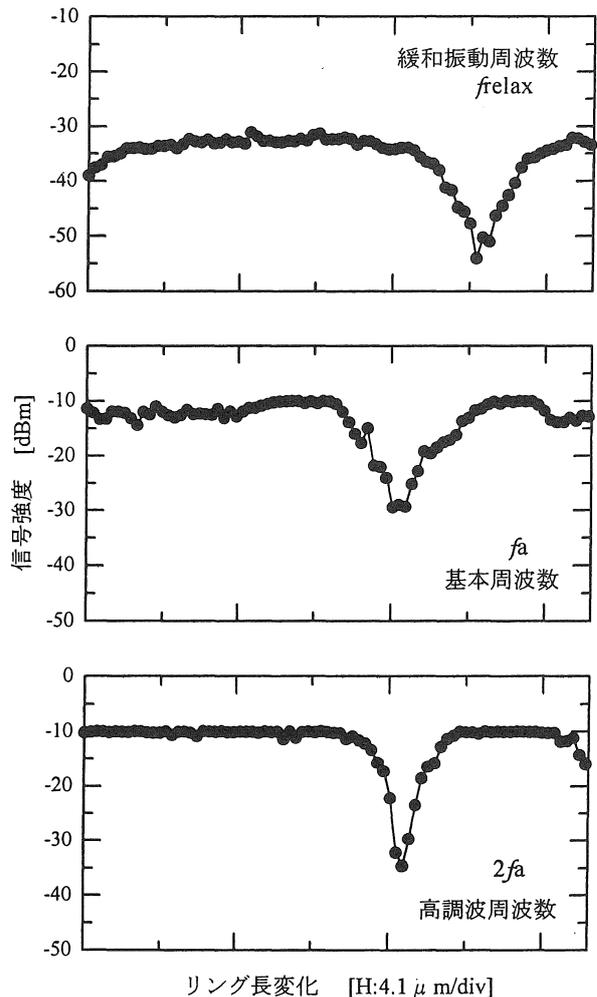


図5 雑音強度のリング長依存性（予備変調無し）

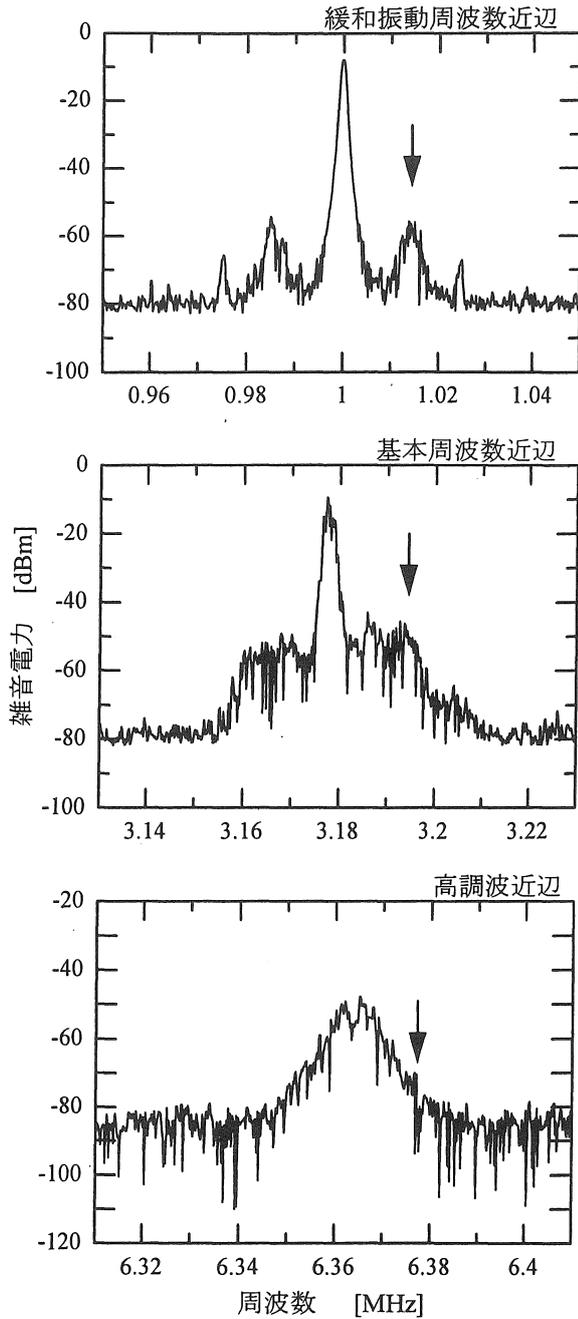
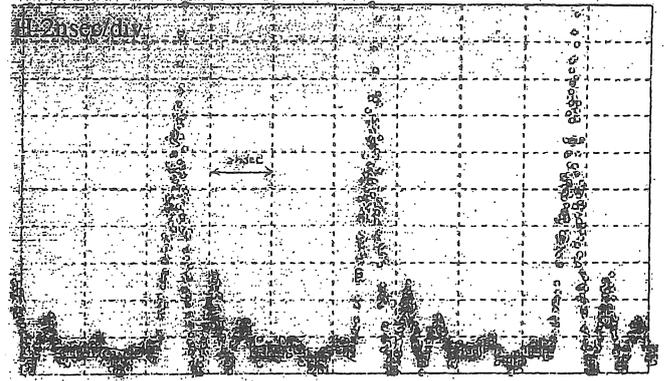
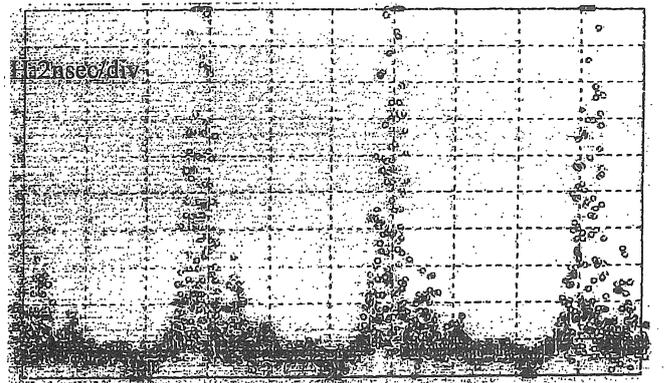


図 6 雑音スペクトル (予備変調無し)

図 5 の緩和振動周波数において雑音パワー (緩和振動周波数成分強度) が最小となるリング長に光ファイバリングレーザを設定した場合と、その値から約 20dB 増加して、雑音パワーがリング長変化に対してほぼ一定となる状態に設定した場合の二つについて、サンプリングオシロスコープで観測した光パルス波形を図 7 に示す。雑音パワーが最小となるリング長において、良好な光パルス波形が得られていることが分かる。また、この最適なリング長から $\pm 1.6 \mu\text{m}$ 程度の範囲内 (雑音パワーが最低値から +10dB 程度) であれば、良好な光パルス波形が得られることが観測された。



(a) 雑音パワーが最小となるリング長



(b) 雑音パワーが最小値から 20dB 増加するリング長

図 7 光パルス波形 (予備変調無し)

3.1.2 予備変調有りの場合

次に、予備変調信号の有無による差異を調べるために、予備変調信号有り、即ち AM-HML ファイバリングレーザについて同様の実験を行った。本実験では予備変調周波数は基本周波数に等しい値に設定した。前記 (1) ~ (5) の雑音パワーについて、リング長変動に対する依存性を測定した結果を図 8 ~ 図 10 に示す。また、測定した雑音成分スペクトルを図 11 に示す。

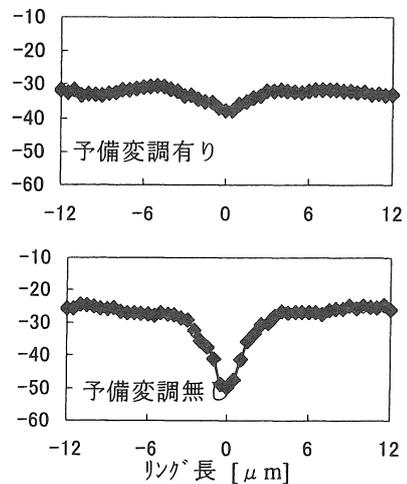


図 8 基本周波数成分 f_a のリング長依存性

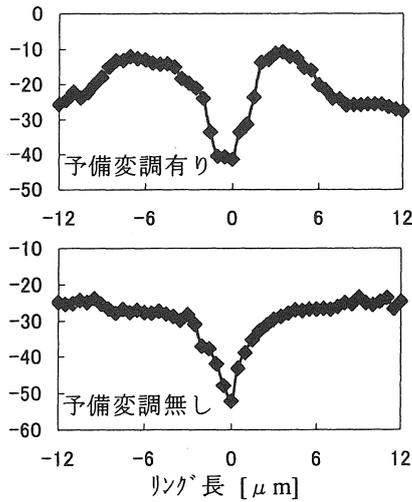


図9 緩和振動周波数成分 f_{relax} のリング長依存性

図8に示すように、予備変調信号有りの場合には、基本周波数 f_a の雑音パワーはリング長を変化させても6dB程度しか変化しない。一方、予備変調信号なしの場合については25dB程度の変化が観測されている。このような差異が生じたのは、予備変調を行うことで意図的に生成された周波数 f_a の信号が存在するため、つまり、AM-HML法の原理どおりに動作しているためであると考えられる。

しかし、EDFA 緩和振動周波数 f_{relax} 、及び f_a や $2f_a$ 近傍のEDFA 緩和振動成分 $f_a \pm f_{relax}$ 、 $2f_a \pm f_{relax}$ は、予備変調信号有りの状態でもリング長を変化させると25~30dB程度の大きな変化を示す。これらの成分は何れも、安定なリング長の前後で雑音パワーが一旦増加するといった変化をみせた。この理由は、予備変調信号を加えているため、安定なリング長からはずれるとEDFA 緩和振動が増加するだけでなく、スーパーモード競合も助長されるためである。即ち、EDFA 緩和振動雑音の増加と、スーパーモード競合による雑音増加が加え合わさって観測されることになる。

図11の雑音スペクトルにおいて、予備変調信号がある場合には、前記(1)~(5)の雑音成分全てをはっきりと識別できることが分かる。また、予備変調有りの場合、緩和振動成分以外にも、緩和振動周波数の半分だけずれた成分 $1/2 f_{relax}$ 、 $f_a \pm 1/2 f_{relax}$ 、及び $2f_a \pm 1/2 f_{relax}$ が現れている。この原因は不明であるが、リング長変化に対する雑音パワーの依存性は通常の緩和振動成分とほぼ同様な変化を示した。

以上の結果から、AM-HML ファイバリングレーザのフィードバック信号として、 f_a 近傍のEDFA 緩和振動成分、または $2f_a$ 近傍のEDFA 緩和振動成分を用いるのが有効であることが分かった。以下の実験においては、 f_a 近傍のEDFA 緩和振動成分をフィードバック信号として用いた。

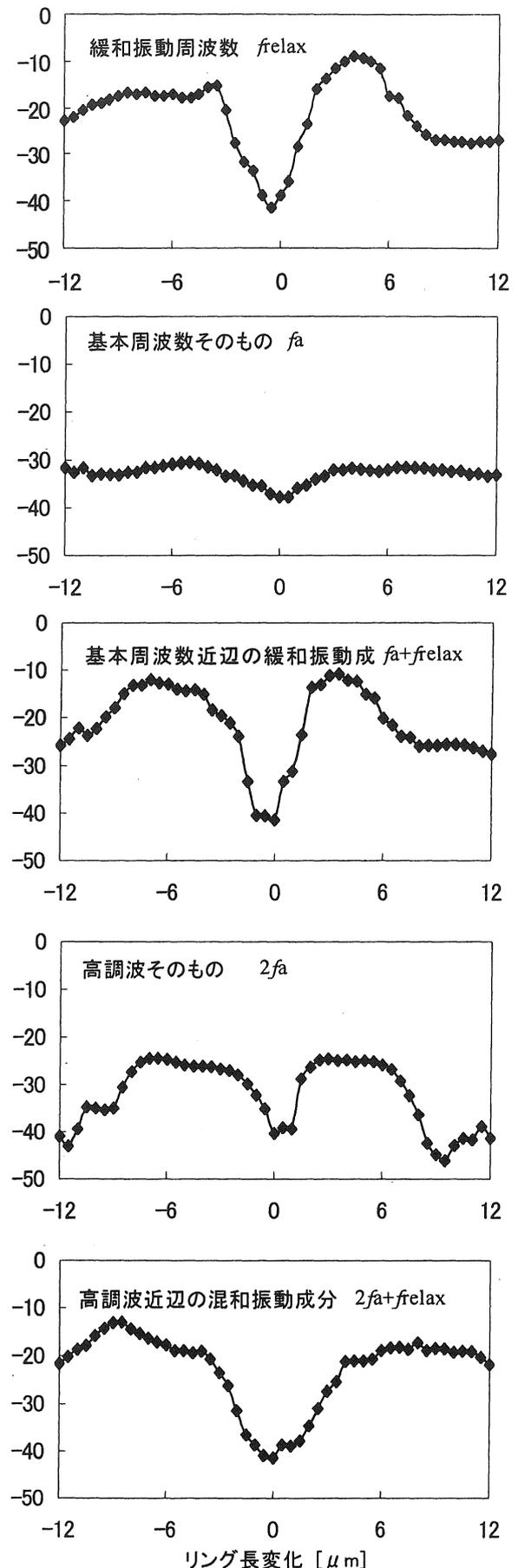


図10 各周波数成分のリング長依存性

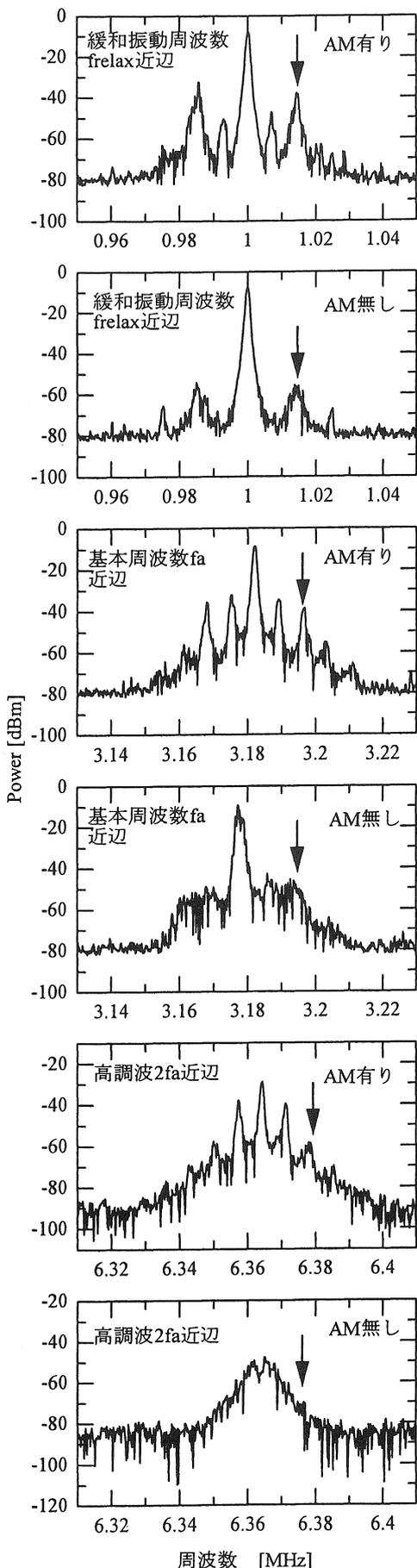


図 11 各成分のスペクトル

3.2 リング長制御系の構成と動作特性

リング長を最適状態に制御するには、何らかの摂動を系に加え、その影響をフィードバック信号を介して取り出して、リング長をどの方向に動かすべきかを判断する。摂動の与え方としては、次のような方法が考えられる。

(i) SG 周波数を一定とし、光デレイラインをギア制御してリング長に摂動を与える。

(ii) SG 周波数を一定とし、ファイバをピエゾ素子に巻きつけてリング長に摂動を与える。

(iii) リング長を一定とし、SG 周波数に摂動を与える。

通信応用の点からは、(i)、(ii) の繰り返し周波数を一定に保つことが望ましい。

(i) については、リング長に $1\mu\text{m}$ 以下の摂動を与えようとする、ギアのバックラッシュの影響を抑えることが必要となる。バックラッシュの影響を抑えるような種々のギア駆動法を試みたが、ギアの位置によっては空回りするという現象が生じ、制御系に使用することは困難であることが分かった。

(ii) については、リング長に摂動を付加するための系と、 GPIB 等のパソコンによるフィードバック信号検出系との同期をとる工夫が必要となる。最終的にはリング長制御をパソコン制御ではなく、独立したアナログ制御系として分離するのが理想であるが、そのためには詳しい応答特性の評価が不可欠となる。

そこで、SG 周波数に摂動を与える (iii) の形態を採用した。この方式では、摂動付加系もフィードバック信号検出系も、全てパソコンで制御することができ、プログラムの簡単な変更で種々の応答系に対応することが可能である。この実験系を図 12 に示す。

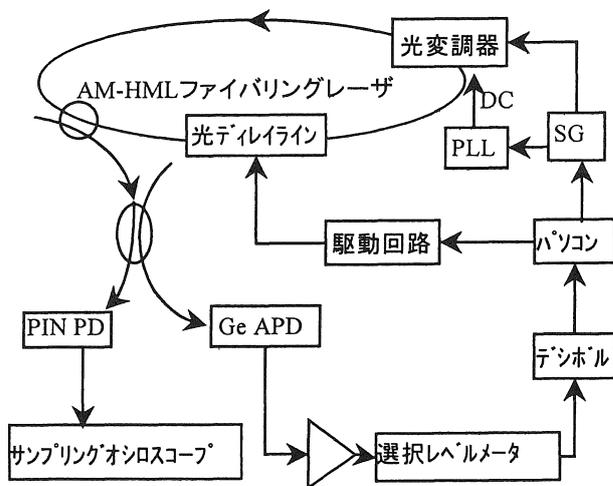


図 12 実験系

SG 周波数を $1.6\text{GHz} \pm 10\text{Hz}$ でステップ的に変化させ、そ

の時のフィードバック信号（基本周波数近傍の EDFA 緩和振動成分強度）を選択レベルメータで検出する。SG 周波数が 1.6GHz-10Hz から 1.6GHz+10Hz に変化した時にフィードバック信号強度が増加するか、減少するかを検出すれば、現在のリング長が最適値よりも長い（増加する場合）、短い（減少する場合）が分かる。この結果によって、リング長が最適値に近づくように、光ファイバを一定ステップずつ動かせばよい。

この制御法では、ステップモータの応答速度で系全体の応答が制限される。その結果、パルスによる制御は 1 秒間に 4 サイクルが上限となった。一方、ギアによる減速比を調節して、光ファイバの制御を 0.25 μm ステップで行った。これから、1 秒間に 1 μm までのリング長変動に対応できることになる。平均的な実験条件下でのリング長変動の大きさは、これまでの見積もりでは 1 秒間に 0.16 μm であるから、本制御系で十分に対応が可能である。

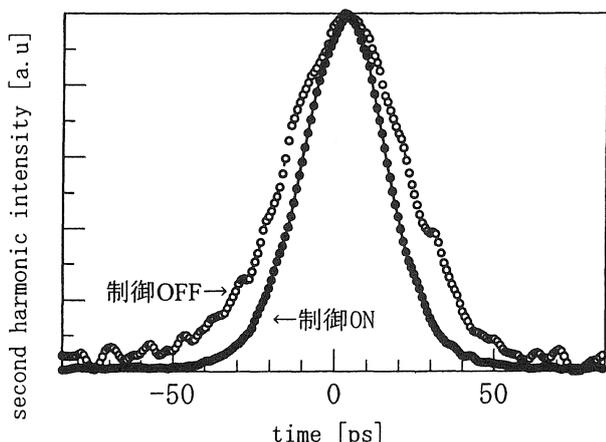


図 13 SHG オートコレクタ出力波形

図 13 にリング長制御が有る場合と、無い場合の SHG オートコレクタ出力波形を示す。制御が無い場合には、波形の裾に大きな乱れが観測されることがある。これに対して、制御が有る場合、波形の裾に見られた乱れもなく、良好なパルス波形が観測された。

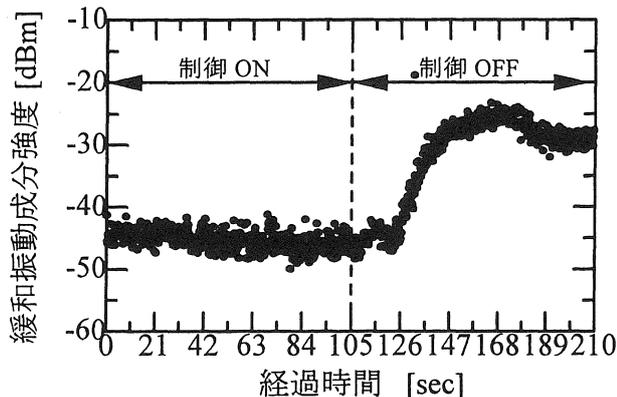


図 14 制御 ON→OFF でのフィードバック信号強度変化

図 14 にリング長制御を ON から OFF 切り替えた時の、フィードバック信号の時間変化を示す。OFF にしても直ちにはフィードバック信号強度が増加せず、20 秒程度は低く抑えられた状態に留まる。この期間は、VCO としてのファイバリングレーザがロックレンジ内で SG 周波数に同期するものと考えられる。

また、サブリングオシロスコープで観測した光波形は、フィードバック信号強度が制御時の最低値から約 5dB 程度増加するまでは良好であった。

この制御系を用いて、長時間にわたって安定動作することを確かめた。

予備変調信号の有無による安定性の比較のために、図 14 で制御を中断した際のフィードバック信号強度が増加するまでの時間 τ の測定を行った。安定であればあるほど、 τ は長くなるはずである。制御 ON→制御 OFF を繰り返し行った結果、予備変調有りの場合は τ のばらつきは小さく、その平均は約 20sec で、ほぼ一定の値となった。一方、予備変調無しの場合は τ の値は大きくばらついたが、平均すると、約 20sec 程度となり、予備変調の有無による安定性の差は、繰り返し周波数 1.6GHz においては顕著に現れてこなかった。このことに関しては、繰り返し周波数を高くして調べて詳しく調べる必要がある。

リング長制御状態での時間バンド幅積の予備変調依存性を図 15 に示す。予備変調とは、AM-HML 法において予備変調する際の電界振幅による変調の深さのことで、この値は出力パルス列のスペクトル解析から求めることができる⁶⁾。図中に示す実線はガウス型のトランスフォームリミットな値 (=0.441) を表しており、予備変調の大きさによらず、パルス幅 19ps、スペクトル幅 23GHz であり、時間バンド幅積はガウス波形の 0.441 にほぼ一致していることが分かる。

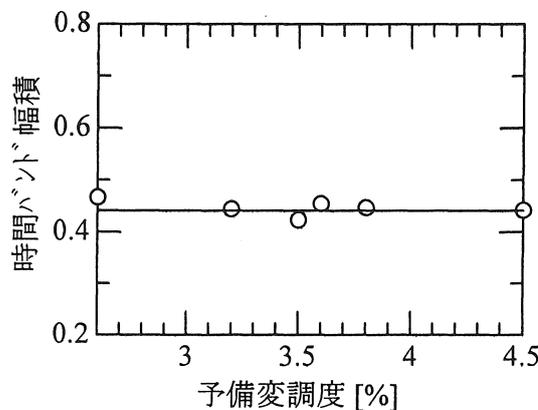


図 15 時間バンド幅積の予備変調依存性

4. まとめと今後の課題

予備変調方式 (AM-HML 法) 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、リング長変動を補償する手法について実験検討した。

リング長調節には光ディレイライン、フィードバック信号には基本周波数近傍に現れる EDFA 緩和振動成分を用いた。リング長に摂動を与える代わりに、信号発生器の周波数を幅 20Hz でステップ的に変調する構成とした。次にこのリング長制御系を用いて、繰り返し周波数 1.6GHz での確認実験を行い、リング長制御の条件下における出力パルスの特性、及び長時間安定性などについて調べた。その結果、室温変動によるリング長変化を補償しながら、安定に発振することを確認できた。

今後は、この方式で繰り返し周波数を 3.2GHz、6.4GHz、12.8GHz の順に上げ、高繰り返しでの短パルス光発生の実験を行う。また、これと平行して、リング長制御をパソコンで行うのではなく、独立したアナログ制御系として分離する方式を検討したい。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 水池他, "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" *愛知工業大学研究報告*, No.36, pp.201-208(2001)
- 5) 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)
- 6) 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14年 3月19日)