

# 光通信帯ビスマス系 ファイバリングパルスレーザ

東京理科大学 工学部 電気工学科 准教授 | ふくち ゆたか 福地 裕

## 1. はじめに

光通信や光計測、光信号処理などに用いられる光源として、モード同期レーザが注目を集めています。特に、高調波モード同期ファイバリングレーザは、広い波長範囲や細いパルス、高効率、ギガ ( $G=10^9$ ) Hz 帯の高く安定した繰り返し周波数、高いビーム性、光ファイバとの整合性、反射体不要、経年変化が小さい、メンテナンスが容易などの多くの利点を持っています<sup>1)–13)</sup>。

通常、高調波モード同期ファイバリングレーザは、石英系ガラスをホストガラスに用いたエルビウム添加ファイバをレーザ発振のための光利得媒質として用いています。発振波長範囲を広げるためには光増幅の得られる波長帯域を拡大する必要があります。しかし、石英系エルビウム添加ファイバの利得帯域は、通常は光通信波長帯の一つのCバンド（波長 1530 ナノ ( $n=10^{-9}$ ) m から 1565 nm 付近）にあります。石英系エルビウム添加ファイバは、長尺化と励起条件の調整により、Lバンド（波長 1570 nm から 1605 nm 付近）での増幅動作も可能です。しかし、どちらも増幅可能な波長帯域は、35 nm 程度に制限されています。また、石英系エルビウム添加ファイバを用いると、光の共振器となるファイバリングの長さが 10 m から 100 m 程度となり、他のレーザと比べてかなり長くなり、機械的な振動や熱膨張などの外乱の影響を受けやすくなります。さらに、光共振器の基本周波数間隔が狭くなるため、高調波モード同期の際にスーパーモードの競合に起因する強度雑音の影響を受けやすくなります。このため、いくつかの安定化技術が提案されています。特に、三次の非線形光学デバイスにおける自己位相変調と呼ばれる効果による光スペクトルの拡散と、光帯域通過フィルタによる光スペクトルのフィ

ルタリングを組み合わせた方式は、構造が簡単で有効な安定化技術の一つです。しかし、非線形光学デバイスを光共振器の中に挿入することによる共振器長の増加は避けられず、共振器長の増加はシステムの安定性を低下させます。

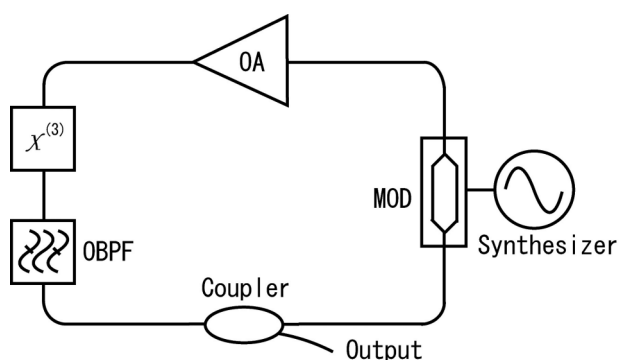
一方、高調波モード同期ファイバリングレーザの生成する光パルス列の繰り返し周波数は、能動モード同期を行うために光共振器内に配置された光変調器の動作帯域や、これを駆動する電子回路の電気帯域によって制限されます。このため、通常の能動モード同期では、40 GHz をこえる繰り返し周波数を実現するには高いコストがかかります。この問題を克服する技術として、光変調器や駆動電子回路の電気周波数帯域を広げることなく高繰り返しの光パルス列を生成できる、有理高調波モード同期と呼ばれる技術が提案されています<sup>4)–20)</sup>。

この稿では、以上の多くの技術課題を克服できる新しい高調波モード同期ファイバリングレーザを紹介します。このレーザは、酸化ビスマス系ガラスをホストガラスに用い、非線形光学デバイスとしても機能する新たなエルビウム添加ファイバを用いています<sup>21)–26)</sup>。この光ファイバを、利得媒質と安定化の両方に用いているため、光共振器の長さが従来のファイバリングレーザよりかなり短くなっています。

## 2. パルスレーザの構成と動作

【図 1】に、波長可変の高調波モード同期ファイバリングレーザの構成を示します。基本的な構成素子は、利得媒質である光増幅器 (OA)、モード同期を行うための光変調器 (MOD) とその駆動回路、発振波長を制御するための光帯域通過フィルタ (OBPF)、モード同期パルス列を共振器外へ取り出す光カップラです。

まず高調波モード同期について説明します。これは、



【図 1】 ファイバリングパルスレーザの基本構成

ファイバリング共振器の長さで決まる基本周波数（基本縦モード）の間隔  $f_c$  の整数  $n$  倍で光の強度を変調するか、もしくは光の位相を変調し、周波数間隔が  $n \times f_c$  ずつ離れた縦モードの間の位相を固定することによりモード同期を行う技術です。ここで、整数  $n$  は高調波に関する次数です。このとき、出力される光パルス列の繰り返し周波数は、変調周波数と等しく  $n \times f_c$  となります。これにより、GHz 帯の繰り返し周波数を持つ光パルス列を比較的容易に生成できます。一方、高調波モード同期において、1 ピコ ( $p=10^{-12}$ ) 秒以下のパルス幅の実現は難しくなります。これは、光変調器 (MOD) の動作帯域により周回する光パルスにかけられる時間ゲート幅が決まるからです。

この実験では、最初に光の強度変調による高調波モード同期を紹介します。また、光増幅器 (OA) の利得媒質には、酸化ビスマス系ガラスを宿主ガラスに用い、同時に以下で説明する三次の非線形光学 ( $\chi^{(3)}$ ) デバイスとしても機能するエルビウム添加ファイバを採用しています。このビスマス系ファイバの利得帯域は、ファイバの長さで励起条件によって変化します。したがって、広帯域化を実現するためには、ビスマス系ファイバの長さで励起方式の最適化を行う必要があります。

【表 1】に、3 本の異なる長さのビスマス系高非線形エルビウム添加ファイバの利得帯域を示します。長さ 29 cm のファイバの利得帯域は、主に C バンドをカバーしています。一方、長さ 271 cm 長のファイバの利得帯域は、主に L バンドをカバーしています。中間の長さ 151 cm のファイバの利得帯域は、C バンドと L バンドの両方をカバーしています。そこで以下では、この 151 cm 長ファイバを採用した高調

| ファイバ長  | エルビウム添加量 | 利得帯域    |
|--------|----------|---------|
| 29 cm  | 6500 ppm | C バンド   |
| 151 cm | 3250 ppm | C+L バンド |
| 271 cm | 3250 ppm | L バンド   |

【表 1】 ビスマス系エルビウム添加ファイバの利得帯

波モード同期ファイバリングレーザを紹介します。

### 3. 雑音の発生機構とその抑圧手法

2 節で説明したように、高調波モード同期の際の縦モードの組み合わせは、 $n$  通り存在します。これらはスーパーモードと呼ばれる互いに独立したモードを形成し、同時に発生し得ます。ここで、ある 1 つのスーパーモードが他のスーパーモードを完全に抑圧している理想的な場合には、エネルギーが等しい光パルス列が形成され、安定な高調波モード同期を実現できます。しかし実際には、幾つかのスーパーモードが不規則に競合して発振するので、光パルスごとにエネルギーの変動が起こります。これにより、光パルスの強度が時間とともに変動します。これがモード競合雑音であり、高調波モード同期ファイバリングレーザにおいて大きな問題となります。利得媒質としてエルビウム添加ファイバを用いた場合には、エルビウムイオンの寿命が 10 ms 程度と長いため、振幅の異なる光パルスをそのまま増幅してしまい、このままではモード競合雑音を抑圧することができません。

モード競合雑音を抑圧できる簡単な方法があります。これは【図 1】に示すように、三次の非線形光学 ( $\chi^{(3)}$ ) デバイスにおける自己位相変調と呼ばれる効果と、光帯域通過フィルタ (OBPF) による光スペクトルのフィルタリングを組み合わせる技術です。ここでは個々の光パルスは、自己位相変調を受けてピーク強度に依存したスペクトル広がりを生じます。光パルスのピーク強度が増大すると、自己位相変調効果によるスペクトル広がりも増大します。このとき、帯域限定された光帯域通過フィルタ (OBPF) を通過すると、スペクトルの両端が大きく削られ、より大きな損失を受けます。この結果、パルスエネルギーが減少しピーク強度が抑えられます。一方、パルスのピーク強度が減少すると、自己位相変調の効果によるスペクトル広がりも小さく

なるため、スペクトルの裾野はより低い損失で光帯域通過フィルタ (OBPF) を通過できます。つまり、ファイバリング共振器内を周回する個々の光パルスは、ピーク強度に依存した光損失を受けます。この結果、光パルスのピーク強度が一定に保たれ、モード競合雑音を抑圧できます。この強度に依存した非線形な損失は、自己位相変調の効果がフェムト ( $f=10^{-15}$ ) 秒のオーダーで起こるため、数十 GHz 帯の高繰り返し光パルスにも十分応答します。

この実験では、共振器長の増加を避けるため、安定化のための三次非線形光学 ( $\chi^{(3)}$ ) デバイスとして、利得媒質であるビスマス系エルビウム添加ファイバ自身の持つ高い非線形性を利用するという新しい技術を用いています。

#### 4. 高繰り返しパルス列の生成手法

高調波モード同期時に出力される光パルス列の繰り返し周波数は、強制モード同期のために光共振器内に配置された光変調器 (MOD) の変調周波数と等しくなります。これに対して有理高調波モード同期とは、光変調器 (MOD) の駆動周波数を微調整することにより、駆動用電子機器の電気帯域を広げることなく、これを超える高い繰り返し周波数を持つ光パルス列を生成する技術です。

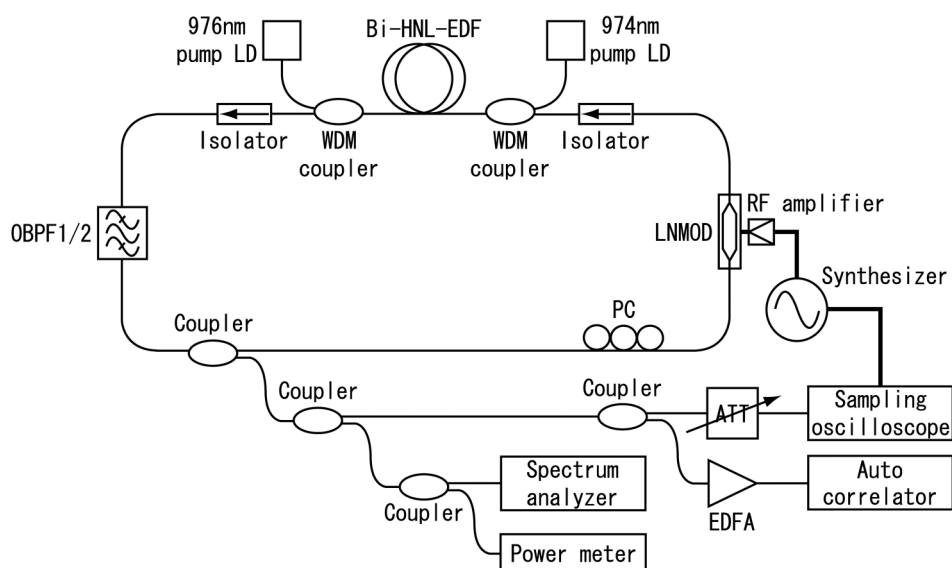
この動作原理を説明します。高調波モード同期時における光変調器 (MOD) の変調周波数  $n \times f_c$  を、

$f_c/p$  だけ僅かにずらした場合を考えます。つまり、変調周波数を、 $(n+1/p) \times f_c$  とします。ここで、 $p$  は有理高調波次数と呼ばれる整数です。このとき、ファイバリング共振器内を周回する光パルスと変調信号は、 $p$  周回後に同期します。また、変調周期内には、 $p$  周回分の光パルスが存在します。この結果、高い繰り返し周波数 ( $p \times n + 1$ )  $\times f_c$  を持つ有理高調波光パルス列が生成されます。

しかし、有理高調波モード同期ファイバリングレーザでは、光パルスの振幅のバラツキが大きな問題となります。これには、光学素子などを別途追加することなく、光変調器 (MOD) のバイアス点と変調振幅を調整するだけで有理高調波光パルス列の振幅等化を実現できる技術が提案されています。この実験でも、光変調器 (MOD) の伝達関数を調整する振幅等化技術を採用しています。

#### 5. 光パルス生成の実験系

【図 2】に、高調波および有理高調波モード同期ファイバリングレーザの実験系を示します。利得媒質と安定化のための三次非線形光学 ( $\chi^{(3)}$ ) デバイスに用いるビスマス系高非線形エルビウム添加ファイバ (Bi-HNL-EDF) は、長さ 151 cm、エルビウム添加量 3250 ppm、非線形係数  $64.2 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  です。【表 1】に示したように、ファイバの長さは利得帯域が C バンドと L バンドの両方をカバーするように最適化さ



【図 2】 実験系

れています。励起光源も最適化しており、2つのファブリー・ペロー半導体レーザ (LD) を用いています。前方励起には、中心波長 974 nm で光出力 28.1 dBm のものを用い、波長分割多重 (WDM) 光カップラを介して、ビスマス系高非線形エルビウム添加ファイバ (Bi-HNL-EDF) に入力しています。一方後方励起には、中心波長 976 nm で光出力 28.1 dBm の半導体レーザ (LD) を用いています。2つのアイソレータは、反射戻り光による増幅動作の不安定性や増幅器の雑音特性の劣化を抑えるとともに、レーザ発振を左回りのみに限定しています。2つのアイソレータによる逆方向 (右回り) の光の透過損失は 60.7 dB+47.9 dB であり、十分大きくしています。

繰り返し周波数 10 GHz の高調波モード同期と 4 次 ( $p=4$ ) の 40 GHz の有理高調波モード同期を行うために、シンセサイザにより駆動された、挿入損失 2.7 dB、消光比 25.0 dB、電気帯域 12.5 GHz のマッハツェンダー型ニオブ酸リチウム強度変調器 (LNMOD) を用いています。この光変調器の変調周波数は、10.074162 GHz から 10.115893 GHz までの範囲で微調整しています。また、光変調器のバイアス電圧と変調振幅を調整することにより、振幅等化された光パルス列を生成しています。偏波制御器 (PC) により、光の偏波状態を調節しています。発振波長を変化させるための光帯域通過フィルタ (OBPF 1 または 2) には、C バンド側では、C バンドをカバーする挿入損失約 1.0 dB で 3 dB 帯域幅 3.0 nm の OBPF 1 を用いています。一方 L バンド側では、L バンドをカバーする挿入損失約 1.0 dB で 3 dB 帯域幅 3.0 nm の OBPF 2 を用いています。

スーパーモードの競合によって生じる強度雑音を抑圧するためには、ビスマス系高非線形エルビウム添加ファイバ (Bi-HNL-EDF) 自身の持つ高い非線形性を用いています。これにより、安定化のための三次非線形光学 ( $\chi^{(3)}$ ) デバイスを別途挿入することによる共振器長の増加を避けています。なお、自己位相変調の効果により強度に依存して広げられた光スペクトルの両端のフィルタリングには、発振波長を制御するための光帯域通過フィルタ (OBPF 1 または 2) を用いています。

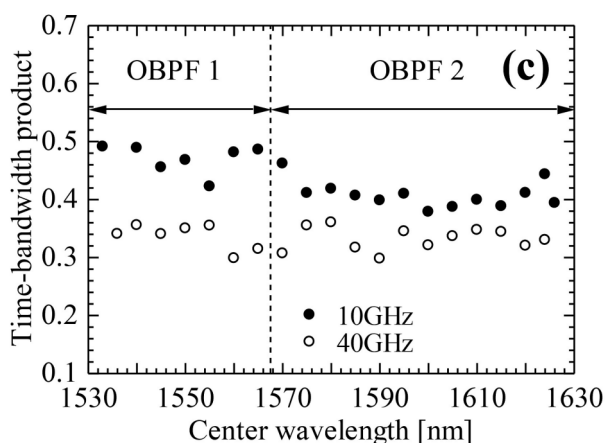
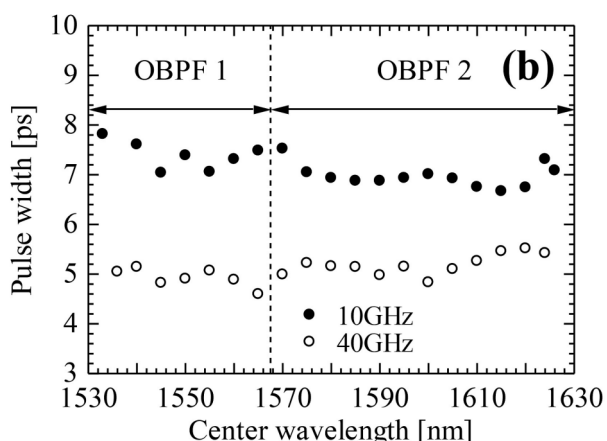
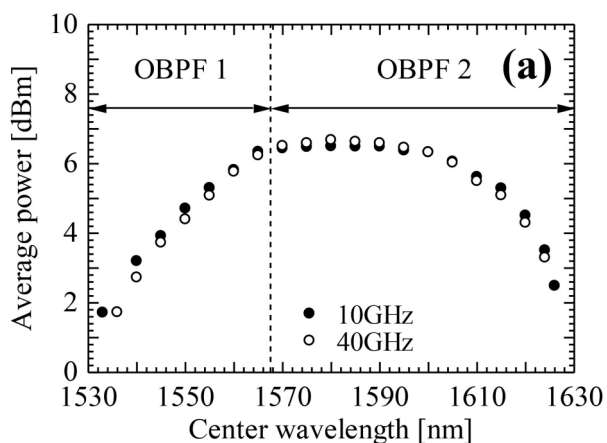
損失 3% の光カップラにより、10% を出力として

取り出し、87% を帰還させています。出力された高調波モード同期光パルス列および有理高調波モード同期光パルス列は、光電力計、光スペクトラムアナライザ、自己相関光パルス波形測定器、および電気帯域 63 GHz のサンプリングオシロスコープを用いて評価しています。自己相関光パルス波形測定器の前にあるエルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) は、プリアンプとして用いています。また、サンプリングオシロスコープへ入力される光電力は、前にある可変光減衰器 (ATT) を用いて -3 dBm に設定しています。全ての素子を挿入した状態でのファイバリング共振器の全長は、約 6 m です。光共振器長は、約 3 m まで短くできます。

## 6. 出力光パルス列の測定

高調波モード同期時 ( $p=1$ , 10 GHz) と、4 次 ( $p=4$ , 40 GHz) の有理高調波モード同期時における光パルス列の測定結果を示します。【図 3(a)】は、中心波長と平均出力電力の関係を示しています。高調波モード同期時 (●) の波長可変範囲は 1533 nm から 1626 nm (幅 93 nm) で、平均出力電力は 1.72 dBm から 6.50 dBm までの範囲です。一方、4 次の有理高調波モード同期時 (○) の波長可変範囲は 1536 nm から 1624 nm (幅 88 nm) で、平均出力電力は 1.73 dBm から 6.68 dBm までの範囲です。いずれもビスマス系高非線形エルビウム添加ファイバ (Bi-HNL-EDF) の広い利得帯域特性により、C バンドと L バンドの両方をカバーする波長可変性を実現しています。出力電力の波長依存性は、主に利得媒質の利得プロファイルに起因しています。したがって、励起電力を増加できれば、出力電力と波長可変幅も増加できると考えられます。

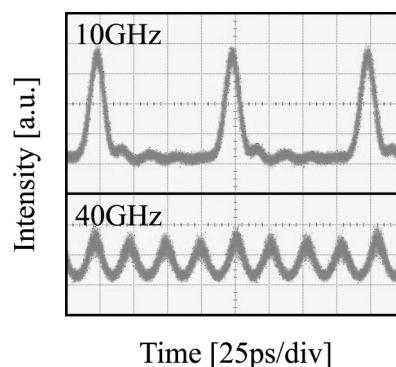
【図 3(b)】は、出力された光パルス列の中心波長とパルス半値全幅の関係を示しています。高調波モード同期時 (●) のパルス幅は、6.7 ps から 7.8 ps までの範囲で、4 次の有理高調波モード同期時 (○) のパルス幅は、4.6 ps から 5.5 ps までの範囲です。次数  $p$  を 1 (10 GHz) から 8 (80 GHz) まで変えて実験を行ったところ、 $p$  が増加するにつれてパルス幅が減少する傾向を示しています。



【図 3】 発振波長に対する出力光パルス特性

【図 3(c)】は、出力光パルス列の中心波長と時間帯域幅積の関係を示しています。高調波モード同期時(●)の時間帯域幅積は 0.38 から 0.49 までの範囲にあり、4 次の有理高調波モード同期時(○)の時間帯域幅積は 0.30 から 0.36 までの範囲にあります。どちらの場合も、トランスフォームリミットに近い良好な光パルス列が出力されていることがわかります。

【図 4】は、中心波長を 1580 nm に設定したとき



【図 4】 波長 1580 nm での光パルス列の強度波形

に出力された高調波モード同期光パルス列と有理高調波モード同期光パルス列の強度波形を示しています。パルス間隔は、高調波モード同期時(上)が 100 ps で、4 次の有理高調波モード同期時(下)が 25 ps です。それぞれ、光パルス列の繰り返し周波数 10 GHz と 40 GHz に対応しています。またどちらの場合も、スーパーモードの競合による強度揺らぎは見られず、高安定動作を実現しています。他の波長帯においても同様に、高安定な強度波形が得られています。

## 7. おわりに

ビスマスベースの新しい高調波および有理高調波モード同期ファイバリングレーザを紹介しました。このレーザでは、長さ 151 cm の短尺のビスマス系高非線形エルビウム添加ファイバ (Bi-HNL-EDF) を広帯域の利得媒質と安定化のための三次非線形光学 ( $\chi^{(3)}$ ) デバイスの両方に用いました。この結果、約 6 m という短いファイバリング共振器を実現し、モード競合雑音も効果的に抑圧しました。さらに、繰り返し周波数 10 GHz の高調波モード同期時と 4 次の繰り返し周波数 40 GHz の有理高調モード同期時に対して、C バンドと L バンドの両方をカバーする広い波長可変性を実現し、高安定で振幅の等しい光パルス列を生成しました。

## 参考文献

- 1) G. R. Lin, I. H. Chiu, and M. C. Wu, "1.2-ps mode-locked semiconductor optical amplifier fiber laser pulses generated by 60-ps backward dark-optical comb injection and soliton compression," *Optics Express*, vol. 13, no. 3, pp. 1008-1014, February 2005.

- 2) G. R. Lin and I. H. Chiu, "Femtosecond wavelength tunable semiconductor optical amplifier fiber laser mode-locked by backward dark-optical-comb injection at 10 GHz," *Optics Express*, vol. 13, no. 22, pp. 8772–8780, October 2005.
- 3) H. R. Chen, K. H. Lin, C. Y. Tsai, H. H. Wu, C. H. Wu, C. H. Chen, Y. C. Chi, G. R. Lin, and W. F. Hsieh, "12 GHz passive harmonic mode-locking in a 1.06  $\mu\text{m}$  semiconductor optical amplifier-based fiber laser with figure-eight cavity configuration," *Opt. Lett.*, vol. 38, pp. 845–847, March 2013.
- 4) S. Li and K. T. Chan, "Electrical wavelength-tunable actively mode-locked fiber ring laser with a linearly chirped fiber Bragg grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 799–801, June 1998.
- 5) Z. Xiupu, M. Karlsson, and P. Andrekson, "Design guidelines of actively mode-locked fiber ring lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 1103–1105, August 1998.
- 6) D. Pudo, L. R. Chen, D. Giannone, L. Zhang, and I. Bennion, "Actively mode-locked tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 143–145, February 2002.
- 7) O. Pottiez, O. Deparis, R. Kiyon, M. Haelterman, P. Emplit, P. Megret, and M. Blondel, "Supermode noise of harmonically mode-locked erbium fiber lasers with composite cavity," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, no. 3, pp. 252–259, March 2002.
- 8) S. W. Chan and C. Shu, "Harmonically mode-locked fiber laser with optically selectable wavelength," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 771–773, June 2002.
- 9) N. G. Usechak, G. P. Agrawal, and J. D. Zuegel, "Tunable, high-repetition-rate, harmonically mode-locked ytterbium fiber laser," *Opt. Lett.*, vol. 29, pp. 1360–1362, June 2004.
- 10) A. Zeitouny, Y. N. Parkhomenko, and M. Horowitz, "Stable operating region in a harmonically actively mode-locked fiber laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 41, no. 11, pp. 1380–1387, November 2005.
- 11) G. T. Harvey and L. F. Mollenauer, "Harmonically mode-locked fiber ring laser with an internal Fabry-Perot stabilizer for soliton transmission," *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 107–109, January 1993.
- 12) L. Duan, C. J. K. Richardson, Z. Hu, M. Dagenais, and J. Goldhar, "A stable smoothly wavelength-tunable picosecond pulse generator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 840–842, June 2002.
- 13) M. Nakazawa, K. Tamura, and E. Yoshida, "Supermode noise suppression in a harmonically modelocked fibre laser by selfphase modulation and spectral filtering," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 461–463, February 1996.
- 14) G. R. Lin, Y. C. Chang, and J. R. Wu, "Rational harmonic mode-locking of erbium-doped fiber laser at 40 GHz using a loss-modulated Fabry-Pérot laser diode," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 1810–1812, August 2004.
- 15) E. Yoshida and M. Nakazawa, "80–200 GHz erbium doped fibre laser using a rational harmonic mode-locking technique," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 1370–1372, July 1996.
- 16) M. Y. Jeon, H. K. Lee, J. T. Ahn, D. S. Lim, H. Y. Kim, K. H. Kim, and E. H. Lee, "External fibre laser based pulse amplitude equalisation scheme for rational harmonic modelocking in a ring-type fibre laser," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 182–184, January 1998.
- 17) M. Y. Jeon, H. K. Lee, J. T. Ahn, K. H. Kim, D. S. Lim, and E. H. Lee, "Pulse-amplitude-equalized output from a rational harmonic mode-locked fiber laser," *Opt. Lett.*, vol. 23, pp. 855–857, June 1998.
- 18) H. K. Lee, K. Kim, and H. G. Kim, "Pulse-amplitude equalization of rational harmonic mode-locked fiber laser using a semiconductor optical amplifier loop mirror," *Opt. Commun.*, vol. 160, pp. 51–56, 1999.
- 19) Z. Li, C. Lou, K. T. Chan, Y. Li, and Y. Gao, "Theoretical and experimental study of pulse-amplitude-equalization in a rational harmonic mode-locked fiber ring laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, no. 1, pp. 33–37, January 2001.
- 20) X. Feng, Y. Liu, S. Yuan, G. Kai, W. Zhang, and X. Dong, "Pulse-amplitude equalization in a rational harmonic mode-locked fiber laser using nonlinear modulation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 1813–1815, August 2004.
- 21) Y. Fukuchi and J. Maeda, "Characteristics of rational harmonic mode-locked short-cavity fiber ring laser using a bismuth-oxide-based erbium-doped fiber and a bismuth-oxide-based highly nonlinear fiber," *Optics Express*, vol. 19, no. 23, pp. 22502–22509, November 2011.
- 22) H. Sotobayashi, J. T. Gopinath, Y. Takushima, K. Hsu, and E. P. Ippen, "Broad-band wavelength-tunable, single frequency, and single polarization bismuth oxide-based erbium-doped fiber laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 1628–1630, July 2004.
- 23) H. L. Liu, H. Y. Tam, W. H. Chung, P. K. A. Wai, and N. Sugimoto, "La-codoped bismuth-based erbium-doped fiber ring laser with 106-nm tuning range," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 297–299, February 2005.
- 24) Y. Fukuchi and J. Maeda, "Characteristics of wavelength-tunable harmonically mode-locked short-cavity fiber ring laser using a bismuth-oxide-based erbium-doped fiber and a bismuth-oxide-based highly nonlinear fiber," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 48, no. 7, pp. 897–902, July 2012.
- 25) Y. Fukuchi and J. Maeda, "Wavelength-tunable and pulsewidth-variable actively modelocked short-cavity fibre laser using bismuth-based highly nonlinear erbium-doped fibre," *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 16, pp. 1012–1013, August 2012.
- 26) Y. Fukuchi, K. Hirata, and H. Ikeoka, "Extra-broadband wavelength-tunable actively mode-locked short-cavity fiber ring laser using a bismuth-based highly nonlinear erbium-doped fiber," *Opt. Commun.*, vol. 324, pp. 141–146, August 2014.