

# 非偏波保持ファイバを使用した 1.55 $\mu\text{m}$ 高安定ノイズライクパルスファイバレーザーの開発

宮崎 麻琴<sup>1</sup>, 吉田 実<sup>1</sup>, 関口 翔太<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 近畿大学大学院 総合理工学研究科エレクトロニクス系工学専攻(〒 577-8502 大阪府東大阪府小若江 3-4-1)

<sup>2</sup> 株式会社オプトクエスト(〒 362-0021 埼玉県上尾市原市 1355)

## 1.55 $\mu\text{m}$ Highly Stable Noise-Like Pulse Fiber Laser Using Non-Polarization Maintaining Fiber

Makoto MIYAZAKI,<sup>1</sup> Minoru YOSHIDA,<sup>1</sup> and Shota SEKIGUCHI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program in Electronic Engineering, Interdisciplinary Graduate Faculty of Science and Engineering, Kindai University,  
3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502

<sup>2</sup>K. K. Optoquest, 1355 Haraichi, Ageo, Saitama 362-0021

(Received October 24, 2022)

We have developed a highly stable noise-like pulse (NLP) laser by using nonlinear polarization rotation. We have constructed a Fabry-Perot resonator that includes a mechanism for the passive cancellation of a change in polarization with a Faraday rotator mirror (FRM). The FRM rotates the polarization state of input lights by 90 degrees and reflects the lights, so this effect cancels out the polarization fluctuation caused by light travelling back and forth through a fiber. In this experiment, the output pulse parameters were a pulse width of 18.92 ns (FWHM), a spectrum bandwidth of 70.04 nm (FWHM) and an autocorrelation waveform of 0.57 ps (FWHM). In addition, the resonator could generate NLPs even if the polarization state in the resonator changed by a polarization controller (PC). From these, we succeeded in developing the high stability NLP fiber laser constructed non-PM fiber.

**Key Words:** Pulse fiber laser, Faraday rotator mirror, Mode-locking, High stability, Non-polarization maintaining fiber

### 1. はじめに

パルスファイバレーザーは微細・精密加工や内部加工、計測応用などさまざまな用途がある。中でも、非線形偏波回転を利用した超短パルスファイバレーザーは、可飽和吸収ミラー(SAM)を利用したモードロックレーザーに比べ、材料劣化がなく長時間動作することが期待されている。しかし、ファイバの非線形偏波回転を利用する特性上、モードロックの安定性は共振器内のファイバに対する応力と温度の安定性に依存する複屈折の変化によって低下する。そのため、安定して使用するためには十分な温度制御と強固な固定が求められ、非線形偏波回転を用いたパルスファイバレーザー普及の大きな障壁になっている。今日主流となっている単パルスレーザーは、偏波保持ファイバを使用したモード同期方式が主流であり、性能向上が進んでいる<sup>1,2)</sup>。偏波保持ファイバはファイバにかかる応力などに影響されず光を伝播することができるため、安定性の高いレーザーを構築できる。しかし、偏波保持ファイバは一般的なファイバと比較して価格が高く、ファイバ間の偏波軸を揃えて融着する必要があることから共振器の構築が難しいという欠点もある。

非偏波保持ファイバの複屈折率の影響を低減させる技術として、ファラデー回転鏡(Faraday rotator mirror: FRM)を使用した、伝搬するファイバの複屈折率に依存しないファイバ増幅器も開発されている<sup>3)</sup>。この技術をパルスファイバレーザー共振器に適用し、非偏波保持ファイバで構成された、複屈折率変化の影響を受けないモード同期パルスファイバレーザーの開発を行なった。また、開発したパルスレーザーの応用として高非線形ファイバを伝搬させることによるスーパーコンティニューム(Super continuum: SC)光の生成を行なった。

### 2. 実験構成

#### 2.1 FRM(Faraday rotator mirror)の動作

FRMは偏波を45°回転させるファラデー回転子と反射鏡を組み合わせ、入力光の偏波状態を90度回転させて反射させる素子である。Fig. 1にFRMの動作図を示す。P軸とS軸で屈折率が異なるファイバを伝搬した後、FRMに入る光は、式(1)(2)で表される。

$$E_p = E_0 \sin(2\pi ft + \theta_p + \phi_p) \quad (1)$$

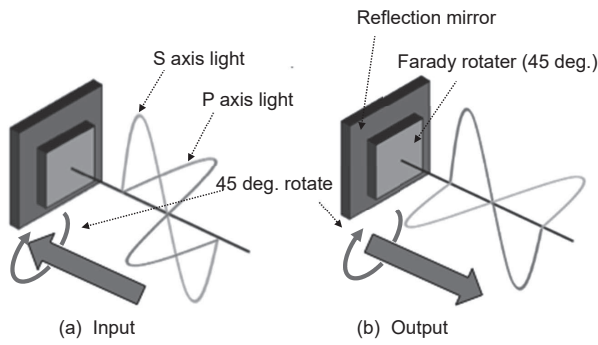


Fig. 1 Faraday rotator mirror.

$$E_s = E_0 \sin(2\pi ft + \theta_s + \phi_s) \quad (2)$$

$E_0$  は光の電場強度,  $f$  は光の周波数,  $\theta_p$  および  $\theta_s$  は初期位相,  $\phi_p$  および  $\phi_s$  はファイバ内部の複屈折による位相遅延を表す. 入射光の P 軸を伝搬する成分と S 軸を伝搬する成分は FRM によって互いに入れ替わり, 往路と復路で P 軸と S 軸は, 往路と復路で同じ複屈折率の光路を伝搬するため, FRM から反射しファイバを伝搬した光は式(3)(4)で表される.

$$E_p = E_0 \sin(2\pi ft + \theta_s + \phi_s + \phi_p) \quad (3)$$

$$E_s = E_0 \sin(2\pi ft + \theta_p + \phi_p + \phi_s) \quad (4)$$

式(3)と(4)からファイバの入射端に戻った光の P 軸と S 軸を伝搬する光の位相差は入射時の位相差と同一であることがわかる. したがって, FRM で反射された光は伝搬する媒質の複屈折率によらず,  $90^\circ$  偏波が回転し入射端へ戻る. この効果を用いて共振器の複屈折率の変化を補償している.

## 2.2 共振器の構成

Fig. 2 に, 共振器の構成を示す. 共振器は FRM を用いた反射型で作成し, 波長 1480 nm 励起用 LD (Laser diode), WDM (Wavelength division multiplexer) カプラ, SMF (Single mode fiber), EDF (Erbium doped fiber) (8.24 dB/m at 1480 nm), PC (Polarization controller), PBS (Polarizing beam splitter), 回転角 90 度の FRM, および偏波保持 3 dB ファイバ ループミラーで構成されている. 1480 nm LD は 980 nm LD に置き換えることができ, ループミラーは偏波を回転させない一般的なダイクロイックミラー等に置き換えることができる. SMF の波長分散

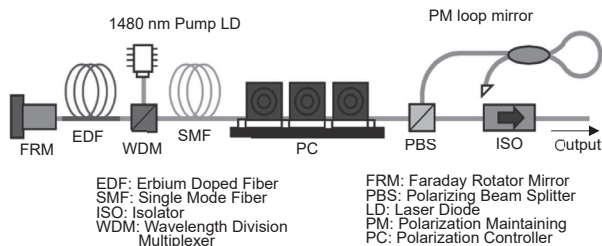


Fig. 2 Configuration of highly stable noise like pulse fiber laser.

は  $17.492 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$  であり, EDF の波長分散は  $-33.68 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$  であるため, EDF の長さを 14.00 m, SMF の長さを 26.96 m に設定することにより, 共振器全体を零分散にしている. 共振器内部の PC は発振には不必要であるが, 複屈折の変化の影響を調べるために挿入している.

## 2.3 共振器の出力

構築した共振器は, 励起入力  $500 \text{ mW}$  を超える状態において共振器内のファイバに外乱を加えることにより発振が得られた. Fig. 3 は励起入力  $540 \text{ mW}$  の場合における, 光スペクトラムアナライザ (MS9710C, Anritsu) で測定された出力光スペクトル, 光検出器 (ET-3010, EOT, 帯域周波数  $2 \text{ GHz}$  以上) およびオシロスコープ (TDS 684 C, Tektronix, 帯域周波数  $1 \text{ GHz}$ ) で測定された出力パルス波形と出力パルス列, 自己相関計 (HAC-150, Alnair Labs) を使用し測定された自己相関波形を示している.

Fig. 3 より, 得られたパルスは滑らかな広帯域なスペクトル, 矩形のパルス波形, および短い自己相関波形を有することを確認し, 繰り返し周波数は  $1.93 \text{ MHz}$  であることを確認した. 光スペクトルおよび自己相関波形から, 広帯域なスペクトルを持つ非コヒーレントパルス群であることがわかる. これらの結果から, NLP (Noise-like pulse) が発振しており, パルス波形は NLP 群の包絡線を表していると考えられる. 一般的に NLP の自己相関波形は矩形パルス上に同じ強度のコヒーレントスパイ

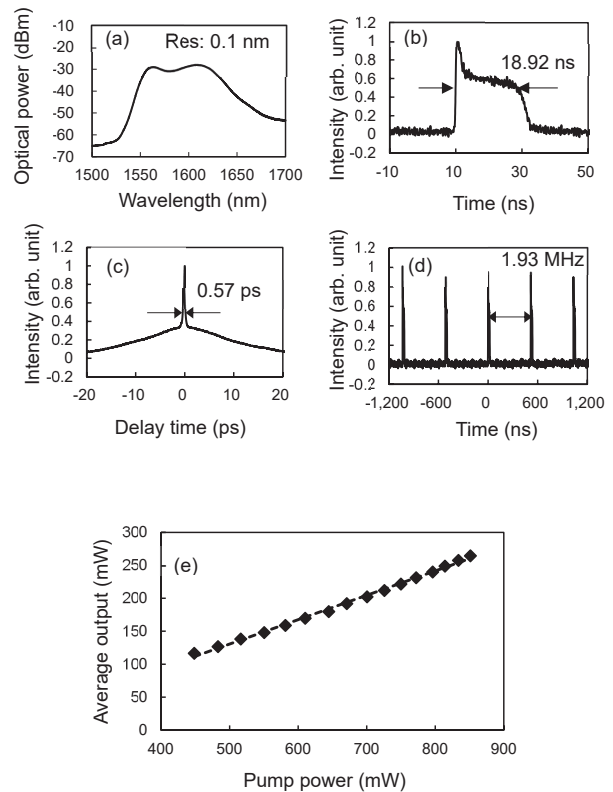


Fig. 3 Measured output profile. (a) light spectrum, (b) pulse waveform, (c) autocorrelation waveform, (d) pulse trains, and (e) pump power versus average output.

クが重なる測定結果となる。しかし、今回の測定で用いた自己相関計の測定窓が狭く、矩形パルスの頂点をオフセットとして測定されたため、Fig. 3(c)はコヒーレントスパイクのみが測定されている。

次に、励起入力を増減させた際の影響について述べる。励起入力に対する平均出力を Fig. 3(e) に示し、励起入力に対する時間波形のパルス幅を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) (b) は、励起入力が 448 mW および 851 mW の場合に得られた出力パルス波形を示している。Fig. 4 から、励起入力の増加に対して出力パルスのピークパワーは一定であり、包絡線のパルス幅が比例して広がることを確認した。ピークパワーが一定となる特性は過去の文献でも報告されており、NLP の基本的な特性を確認した<sup>4,14)</sup>。また、平均出力と時間波形のパルス幅の変化割合が異なっているが、これは使用した光検出器 (ET-3010) は DC パスがなく自然放出成分 (Amplified spontaneous emission: ASE) のような CW 成分を検出できないため、平均出力とパルス幅の割合に差異が生じたと考えられる。

この結果は、SC 光生成に用いる場合、時間波形の微分値を変化させずに平均出力を増減させることができ、光スペクトルの形状を維持しながら光パワーを調整することが可能であることを意味する。一般的な超短パルスレーザーを用いた SC 光は励起入力を調整すると時間波形の微分値が変化し、光スペクトルの形状が変化してしまう。そのため、SC 光を広帯域光として用いる場合において、NLP を種光源として生成された SC 光はスペクトル安定性が極めて優れたものとなる。

次に、時間的なモードロック安定性を確認するために、作成したレーザーの出力パワーを励起入力 540 mW 時において室温で 3 時間にわたり測定した。結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、測定された出力パワーの peak-to-peak 値は平均値の 1.1% であり、パルス発振が安定的に継続

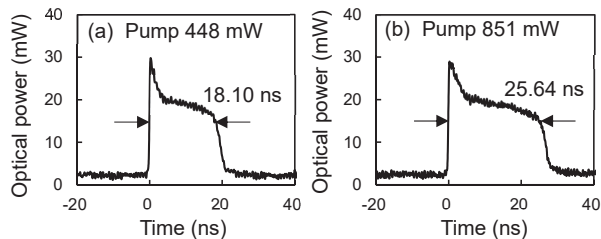
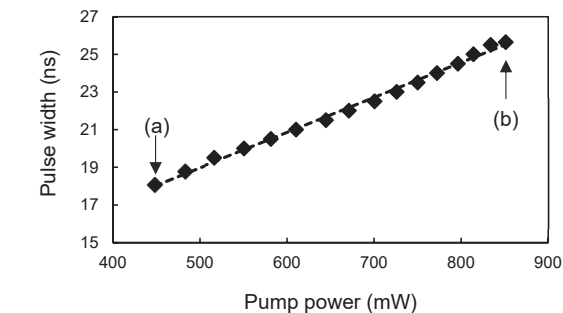


Fig. 4 Average output power versus pump power. (a) at a pump power of 448 mW and (b) at a pump power of 851 mW.

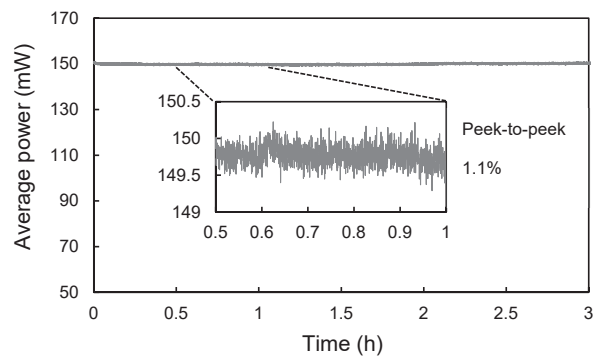


Fig. 5 Changes in average output when the pump power was 540 mW.

していることを確認した。

次に、共振器内の PC を操作し、共振器内部の複屈折率を変化させた場合におけるパルス発振安定性を測定した。PC がいかなる状態であっても、パルス発振を維持し続けたが、平均出力および時間波形のパルス幅が変化した。励起入力が 540 mW の場合における、最小および最大平均出力はそれぞれ 21.26 dBm および 23.09 dBm であった。各々の平均出力において得られた出力時間波形を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、出力時間波形のパルス幅は 17.90 ns から 20.20 ns の幅で変化した。これらの結果は、光ファイバの布線形状に変化が生じ、曲げ状態などが変化してもパルス発振は維持することを示しており、外乱に対して共振器の安定性が高いことを示している。従来のリング型共振器では発振のために共振器内部の複屈折率調整が必須であるが、今回開発したレーザーは無調整で発振可能であり、高いロバスト性を有していることがわかる。しかし、共振器内の偏波コントローラーを操作したときに、レーザーの平均出力と時間波形のパルス幅が変化しているため、用途によっては装置の振動などに起因するファイバの布線形状の変化により複屈折率が変動しないように固定等を施す必要がある。また、この結果から、温度変化に対しても高い安定性を有するものと考えている。

### 3. 光強度の違いによる非線形偏波回転への影響

開発した NLP レーザーにおいて、共振器内部の PC を操作した際に、パルス発振は停止しないものの、出力光のパルス幅および平均出力が変化した。この結果は、

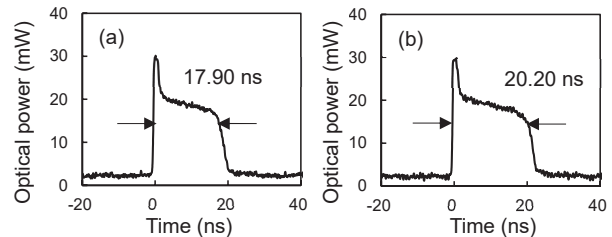


Fig. 6 Output waveforms. (a) at an average power of 21.26 dBm and (b) at an average power of 23.09 dBm.

共振器内を伝搬する光の偏波状態が非線形偏波回転の回転量に影響を与えていることによると考えている。そこで、光源の種類や伝搬するファイバ長に対するFRMの偏波補償効果を測定した。

### 3.1 FRMの偏波補償効果測定系

FRMの偏波補償効果測定系をFig. 7に示す。光源には低出力な連続波光としてDFB-LDとSLDを用い、パルス光として、開発したNLPレーザーを用いた。測定には偏波アナライザー(8509B, HEWLETT PACKARD)を使用し、被測定ファイバ光路内のPCを操作し、偏波を変化させ、出力光の偏波状態の軌跡をポアンカレ球にプロットした。

### 3.2 測定結果

DFB-LDとSLDを光源として使用した場合における偏波状態の軌跡をFig. 8に示す。Fig. 8より、被測定ファイバ光路を伝搬した際の偏波変動がFRMを用いることによりキャンセルされていることがわかる。また、DFB-LDおよびSLD間に出力光の偏波状態に差がないことからスペクトル幅による影響は無いことを確認した。

次に、光源にピークパワー25 mWおよび2.5 WのNLP光を用いた場合における偏波状態の軌跡をFig. 9に示す。Fig. 9より、NLPレーザーを使用した場合において、FRMによってキャンセルされない偏波変動が存在することを確認した。さらに、ポアンカレ球上で偏波状態の軌跡が取りうる範囲は光源のピークパワーに依存している。

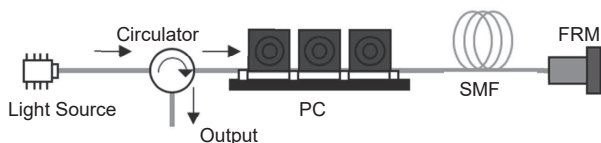


Fig. 7 FRM polarization compensation effect measurement system.

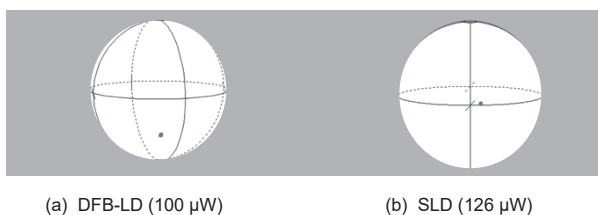


Fig. 8 Measured output polarization areas of DFB-LD and SLD.



Fig. 9 Measured output polarization areas of NLP when the average power was changed.

次に、被測定ファイバ長に対する依存性を確認するため、SMFの長さを10 mと40 mに変更し、同様の実験を行なった。Fig. 10に、SMFの長さを10 mおよび40 mとした場合における偏波状態の軌跡を示す。Fig. 10から、PCを操作した際における偏波状態の軌跡の広がりにはSMFの長さに依存していることがわかる。これらの結果より、FRMで補償できない偏波変化は非線形偏波回転であり、2章で得られたパルス幅の変化は、非線形偏波回転の回転量にともなう共振器の帰還率の変化であることがわかる。

## 4. SC光の生成

本研究で構築したNLPレーザーの応用として、高非線形ファイバを用いたSC光を生成した。SC光は、主に零分散ファイバにフェムト秒レベルの短パルスまたはNLPを伝搬させることにより、生成できることが確認されている<sup>15-17</sup>。高非線形ファイバには1.55 μm帯において零分散に近く、分散スロープがフラットなファイバを使用している。本研究では、NLP光を高非線形ファイバに伝搬させ、NLP光源の共振器内に設けたPCを操作した場合におけるSC光スペクトルの変化を測定した。Fig. 11に、平均パワーが21.26 dBmと23.09 dBmの場合のSC光スペクトルを示す。1480 nm付近のピークは共振器の励起光の漏れを測定している。Fig. 11に示すように、スペクトルは短波長側で1100 nmまで広がり、長波長側は1750 nm以上に広がっている。長波長側のスペクトルは、光スペクトラムアナライザの測定波長範囲が900 nm~1750 nmであるためこれより長波長側は記載できていない。また、共振器内のPCを操作した場合、ス

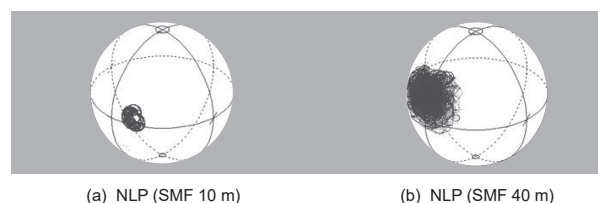


Fig. 10 Measured output polarization areas of NLP when the SMF length changed.

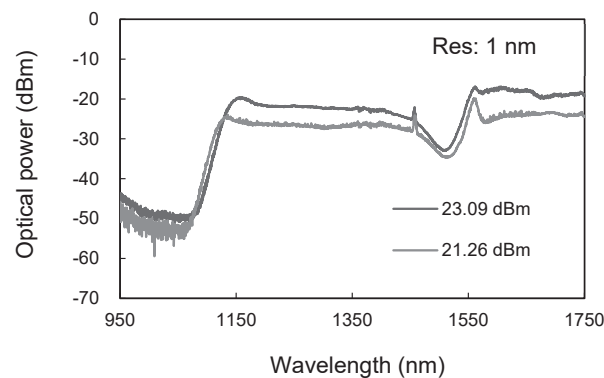


Fig. 11 Max and minimum of super continuum light spectrum when PC operated in the resonator.

ベクトル幅は変化せず、スペクトルの形状を維持しながら出力が増減した。これは、NLPを構成するパルス群全体の時間波形における微分値が変化せず、非線形光学効果によるスペクトルの広がりがあることに起因すると考えられる。

これらの結果から、本研究で構成したNLPレーザーを用いてSC光を発生させることができることを確認した。また、共振器内部のPCを操作し、偏波状態を変化させた場合においても、SC光のスペクトル形状は変化が少なく、高い安定性を得られることを確認した。

## 5. まとめ

FRMを用いた、共振器内部の複屈折率を補償する機能を有した共振器を構築することにより、時間並びにスペクトル安定性の高いノイズライクパルスレーザーを開発した。

構成したレーザーの出力光から、滑らかな広帯域光スペクトル、矩形パルス波形、および短い自己相関波形が測定された。これらの結果は、得られた出力がNLPであることを示している。

構成したレーザーのパルス発振安定性を評価するために、レーザー出力を室温で3時間にわたり測定した。その結果、出力パワーのpeak-to-peakは1.1%で安定していることを確認した。さらに、パルス発振は、共振器内のPCを操作した全ての偏波状態において継続することを確認した。これらの結果は、構成したレーザーが時間と外乱に対して高い安定性を持っていることを示している。しかし、共振器内のPCを操作した場合に、パルスの時間幅が変化した。これは共振器内を伝搬する光の偏波状態が変化した結果、非線形偏波回転の回転量が変化し、パルス幅が変化したと考えられる。非線形偏波回転

の量は、透過光の強度とファイバの長さを調整することによって変化させられることを確認しており、これらの値の最適化により、安定性のさらなる向上が期待できる。

この論文の執筆に協力いただいた高橋 佑輔氏と綱井 貴教氏に感謝します。

本研究はJSPS 科研費 20K05370 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) J. Szczepanek, T. M. Kardaś, M. Michalska, C. Radzewicz, and Y. Stepanenko: *Opt. Lett.* **40** (2015) 3500.
- 2) C. Agueraray, N. G. R. Broderick, M. Erkintalo, J. S. Y. Chen, and V. Kruglov: *Opt. Express* **20** (2012) 10546.
- 3) Y. Kanbayashi, M. Yoshida, and T. Inoue: *ECJ* **100** (2017) 36.
- 4) M. Suzuki, R. A. Ganeev, S. Yoneya, and H. Kuroda: *Opt. Lett.* **40** (2015) 804.
- 5) M. Horowitz, Y. Barad, and Y. Silberberg: *Opt. Lett.* **22** (1997) 799.
- 6) Z. Cheng, H. Li, and P. Wang: *Opt. Express* **23** (2015) 5972.
- 7) W.-C. Chang, J.-H. Lin, T.-Y. Liao, C.-Y. Yang: *Opt. Express* **26** (2018) 31808.
- 8) Y. Luo, B. Liu, Y. Xiang, Z. Yan, Y. Qin, Q. Sun, and X. Tang: *IEEE Photonics Technol. Lett.* **30** (2018) 1333.
- 9) L. M. Zhao, D. Y. Tang, and J. Wu: *Opt. Express* **15** (2007) 2145.
- 10) A.-P. Luo, Z.-C. Luo, H. Liu, X.-W. Zheng, Q.-Y. Ning, N. Zhao, W.-C. Chen, and W.-C. Xu: *Opt. Express* **23** (2015) 10421.
- 11) Boucon, B. Barviau, J. Fatome, C. Finot, T. Sylvestre, M. W. Lee, P. Grelu, and G. Millot: *Appl. Phys. B* **106** (2012) 283.
- 12) J. Liu, Y. Chen, P. Tang, C. Xu, C. Zhao, H. Zhang, and S. Wen: *Opt. Express* **23** (2015) 6418.
- 13) T. North and M. Rochette: *Opt. Lett.* **38** (2013) 891.
- 14) Q. Q. Wang, T. Chen, M. Li, B. Zhang, Y. Lu, and K. P. Chen: *Appl. Phys. Lett.* **103** (2013) 011103.
- 15) Y.-Q. Huang, Y.-L. Qi, Z.-C. Luo, A.-P. Luo, W.-C. Xu: *Opt. Express* **24** (2016) 7356.
- 16) Y. Takushima, K. Yasunaka, Y. Ozeki, and K. Kikuchi: *Electron. Lett.* **41** (2005) 399.
- 17) S.-S. Lin, S.-K. Hwang, and J.-M. Liu: *Opt. Express* **22** (2014) 4152.