

## 2-4 超広帯域光生成技術とその応用

### 2-4 Supercontinuum Generation and its Applications

外林秀之

SOTOBAYASHI Hideyuki

#### 要旨

超広帯域光 (Supercontinuum光) は、パルスレーザからのパルスを高非線形ファイバなどの非線形媒質に入射し、そこで起きる非線形効果により光スペクトルが超広帯域に広がった光である。その超広帯域性を生かして、光周波数標準、光計測、フォトニックネットワーク、極短パルスの生成など、幅広い応用分野が期待されている。本論文では、光ファイバを用いた超広帯域光生成技術を紹介し、超広帯域光を用いた様々な応用技術を紹介する。

In this paper, we describe the design theory for the supercontinuum spectrum generation in an optical fiber. To generate a wideband supercontinuum spectrum, the balance between fiber nonlinearity and the amount of group velocity dispersion is important. Secondly, the experimental results of supercontinuum generation are shown. A few kinds of optical fibers such as a highly nonlinear dispersion-shifted fiber and a highly nonlinear bismuth-oxide fiber are tested. Finally several applications of supercontinuum light are described. We demonstrate multi-wavelength light source, multiplexing format conversion, and optical characterization using a supercontinuum light source.

#### [キーワード]

超広帯域光, 光信号処理, 非線形光学, 光デバイス, フォトニックネットワーク

Supercontinuum, Photonic signal processing, Nonlinear optics, Photonic device, Photonic network

## 1 まえがき

超高速光信号処理技術は、その潜在的な高速性からフォトニックネットワークや光計測分野などにおいて、主要な役割を果たすものと期待されている。例えば光ファイバの非線形性を用いた例では、応答速度が数フェムト秒であるため、サブペタ Hz 領域に達する超広帯域性という潜在的な利点がある。超広帯域光 (Supercontinuum 光) は、パルスレーザからのパルスを高非線形ファイバなどの非線形媒質に入射し、そこで起きる非線形効果により光スペクトルが超広帯域に広がった光である。その超広帯域性を生かして、光周波数標準、光計測、フォトニックネットワーク、極短パルスの生成など、幅広い応用分野が期待されている。特に超高速フォトニックネットワークにおいては、光が潜在的に持つ広帯域性と超高速性を十分

に活用するために、光多重分離、光スイッチング、全光学的波長変換などの中核的な役割を期待されている。

## 2 超広帯域光生成技術

### 2.1 光ファイバによる超広帯域光生成

光ファイバを用いて超広帯域光を発生させる方法には大きく分けて二通りある。一つは、異常分散ファイバを用いる方法で、ソリトン効果を利用してパルス圧縮を行う方法である。もう一つは正常分散ファイバを用いる方法で、光パルスの非線形伝搬による周波数チャーピング蓄積によるスペクトル拡大である。異常分散ファイバを用いる方式は、複数パルスを生成しやすく、また、その複数パルス間の相互非線形作用により、光スペクトル形状は複雑で、多くのディップを有する傾向があ

る。一方、正常分散ファイバを用いる方法は、単一パルスを保ちつつ周波数チャープを蓄積するため、コヒーレンス特性に優れ、生成される光スペクトル形状も、平坦かつディップがなく、様々な応用には利用しやすい。

正常分散ファイバを用いる超広帯域光の設計指針については、非線形媒質である光ファイバの非線形性と波長分散値の釣合いが重要である。光ファイバ中の光パルス非線形伝搬は、非線形シュレディンガー方程式で記述されるが、大まかにはパラメータ  $\sqrt{L_d/L_{nl}}$  が光スペクトル拡大率に比例する [1][2]。ここで、 $L_d = \tau_0^2/\beta_{av}$  は分散長を表し、 $\tau_0$  はパルス幅を、 $\beta_{av}$  は二次分散の平均値を表す。また、 $L_{nl} = 1/\gamma P_0$  は非線形長を表し、 $P_0$  は入射パルスピークパワーを、 $\gamma$  は光ファイバの非線形定数を表す。つまり、パラメータ  $\sqrt{L_d/L_{nl}}$  は、 $\sqrt{(\tau_0^2 P_0 \gamma)/\beta_{av}}$  と表すことができる。これにより光ファイバの非線形定数と二次分散の比率により、光スペクトル拡大率は決まることが分かる。効率よく光スペクトルを拡大するには、高強度のパルスを、非線形定数が大きく二次分散値が小さいファイバに入射すればよいことが分かる。

## 2.2 正常分散ファイバを用いた超広帯域光生成

上記に示されるように、高非線形ファイバは超広帯域光生成に有望である。酸化ビスマス系高非線形ファイバは、材質自体の高非線形性と極小コア面積による光閉じ込めにより、超高非線形性を有する。一方、波長分散特性は広帯域にわたり比較的分散スロープ値が小さい。これらの性質を利用し、1200 nm から 1800 nm にわたる超広帯域光を発生した [3]。

使用した酸化ビスマス系高非線形ファイバの諸特性は、コア系  $1.7 \mu\text{m}$ 、実行断面積  $3.3 \mu\text{m}^2$ 、非線形定数  $1100 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$  で、一般的な分散シフトファイバより 400 倍の超広非線形性を有する。図 1 に示すように、82 MHz 繰り返し、150 fs パルス幅のレーザパルスを条長 2 cm の酸化ビスマス系高非線形ファイバに入射し、その光パルスを測定した。図 2 にその結果を示す。入射光パワー 32 mW の時に、3 dB 幅が約 170 nm の超広帯域光を生成することができた。また、本生成パルス幅は 865 fs であったが、グレーティング対による圧縮が可能で、図 3 に示すようにパルス幅 25 fs に圧縮することができた。これにより本方式による超広帯域光生成は、コヒーレンス性が良いことが示された。

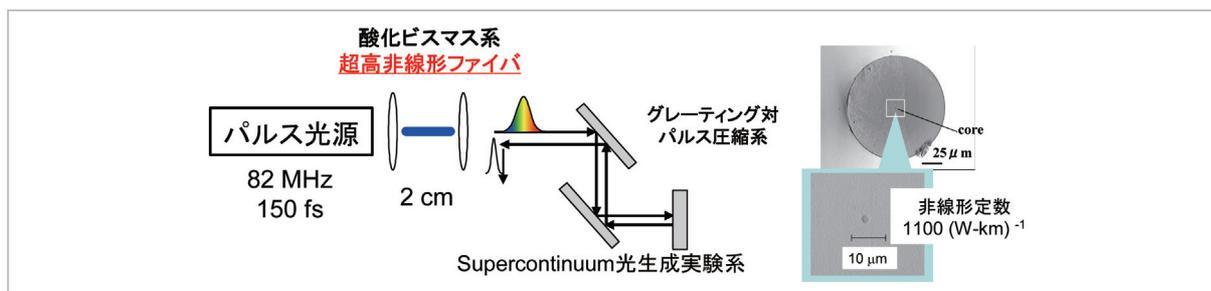


図1 超広非線形ファイバを用いた超広帯域光生成実験系

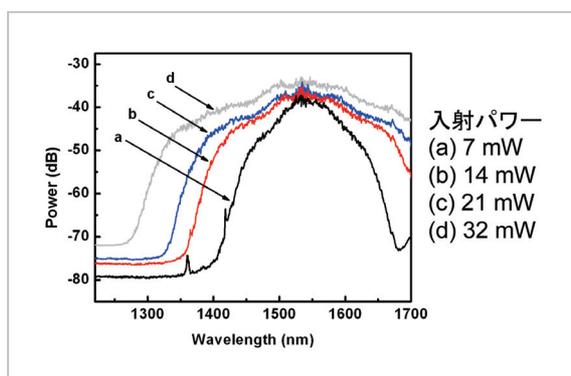


図2 生成光スペクトル

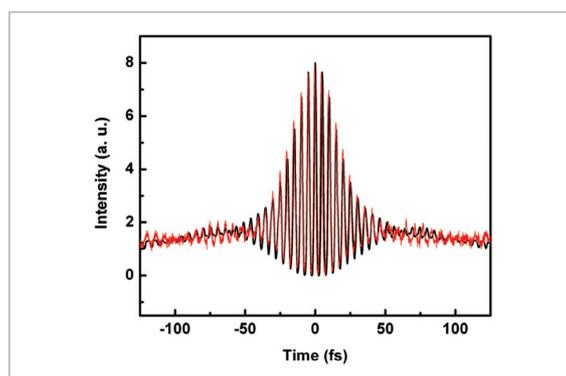


図3 生成フェムト秒パルス(圧縮後)

## 2.3 異常分散ファイバを用いた超広帯域光生成

異常分散ファイバを用いた超広帯域光生成実験系を図4に示す[4]。光源としては繰り返し34.2 MHz、パルス幅100 fs、中心波長1571 nmのストレッチパルスモード同期ファイバレーザを用いた。超広帯域光生成に使用したファイバは、条長500 mの分散シフト高非線形ファイバで、零分散波長1565 nmで非線形定数は $21 (W \cdot km)^{-1}$ である。入射パワー28.8 mWの時の生成光スペクトルを図5に示す。光スペクトル上に幾つかのディップが存在するものの、1.2から2.0  $\mu m$ にわたる超広帯域光を生成することができた。

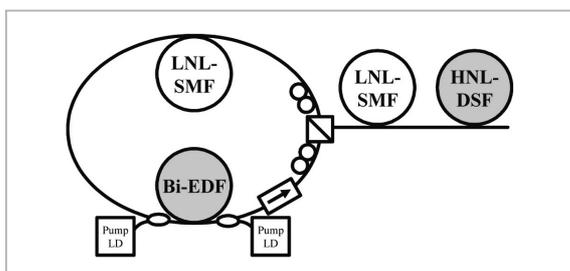


図4 実験系

LNL-SMF: low nonlinear single-mode fiber, Bi-EDF: Bismuth-oxide based Erbium-doped fiber, LD: Laser diode, HNL-DSF: High-nonlinear dispersion shifted fiber

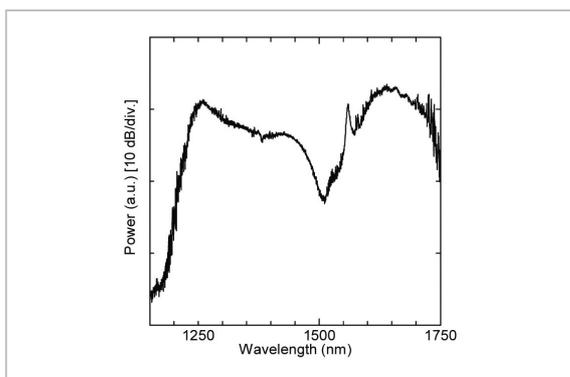


図5 生成超広帯域光スペクトル

## 3 テラビット波長バンド (81 WDM × 40 Gbit/s) 一括生成への応用

現在では波長多重(WDM)ネットワークの波長数増大による伝送容量の拡大が急速に進み、テラビットを超えるに至っている。超広帯域光生成技術を用いると、単一の光源から複数の波長

多重信号を同時に生成することが可能で、システム構成を大幅に簡便化することができる。図6に3.2 Tbit/s 波長バンドの一括生成・伝送の実験系を示す[5]。40 Gbit/sの光信号を増幅後、超広帯域光生成ファイバ(SCF)[6]に入射すると、図7のように光スペクトルが広がる。これを100 GHz間隔の81チャンネルアレイ導波路回折格子(AWG)フィルタによりスペクトルスライス・多重することにより、総容量3.2 Tbit/s (81 WDM × 40 Gbit/s)の波長バンドを一括生成できる。本成果の特長は、超高速光信号処理技術を駆使して、単一光源から81チャンネルの波長バンド信号を一括で生成を行ったことにあり、従来よりも簡便かつ厳密にWDMチャンネル間の周波数制御が行える点で実用的である。

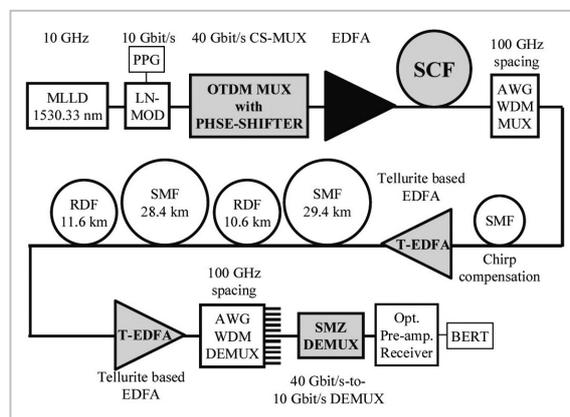


図6 実験系

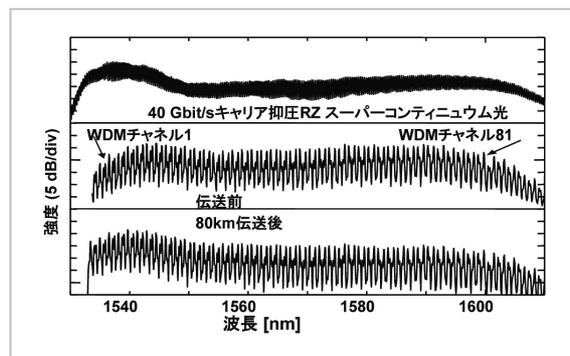


図7 超広帯域光による3.24 Tbit/s (81 WDM × 40 Gbit/s) 波長バンド生成・伝送実験結果

## 4 光多重方式変換への応用

フォトニックネットワークにおいては、波長多重(WDM)、光時分割多重(OTDM)、光符号分割

多重(OCDM)など多様な多重化方式が混在する。このような異種ネットワークを接続するノードにおいては光多重方式変換が必須の機能である。超広帯域光は、多重化方式変換に応用することができる[7]。図8に示すように波長領域では、光信号のスペクトルを光ファイバの非線形性を用いて広げる超広帯域光生成技術とアレイ導波路回折格子に代表される多波長光フィルタによる多波長スペクトルスライスによる、光信号の多波長への同時複写を行っている。時間領域では、光遅延線による時間位置シフトと超高速ピコ秒時間ゲートを用いた光信号の時間スロット入れ替え操作を行っている[8]。図9に実験系を、図10に実験結果を示す。中心波長1553.9 nmの40 Gbit/s OTDMが、チャンネル当たり10 Gbit/sで1549.7 nm - 1558.2 nmにおいて350 GHz間隔の4波長に変換されているのが確認できる。また、反対にこの4×10 Gbit/s WDMが40 Gbit/s OTDM(中心波長1553.9 nm)に変換されているのが分かる。こういった波長領域・時間領域における光信号処理技術を多角的に組み合わせることにより、両方の領

域で40 Gbit/sの光信号を自在に処理することが可能である。また、同様の技術を用いてOCDMとWDM間の多重方式変換も実証されている[9]。

## 5 ナノ構造フォトニクス結晶の広帯域特性評価への応用

超広帯域光は、超広帯域光計測に有用な光源である。その一例として、ナノ構造フォトニクス結晶の光学特性評価に超広帯域光を応用し、1.2-2.0 μmの波長域で一次元フォトニクス結晶の光学特性測定を行った[10]。図11に測定に用いた一次元フォトニクス結晶の構造を示す。周期構造のマイクロキャビティで中心に欠陥モードを有している。図12に超広帯域光を用いた透過特性を示す。実験には図5の超広帯域光を用いた。800 nm以上にもわたる透過特性を測定することができ、また、欠陥モードも0.1 nmの分解能にて測定が可能であった。数値解析による光学特性計算結果と実験結果は良い一致が得られ、超広帯域光はナノ構造フォトニクス結晶の広帯域特性評

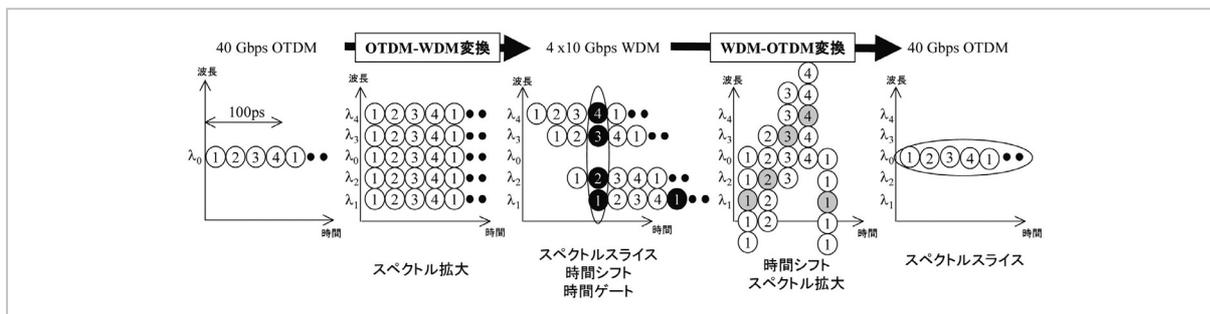


図8 光時分割多重(OTDM)と波長多重(WDM)の双方向多重方式変換の原理

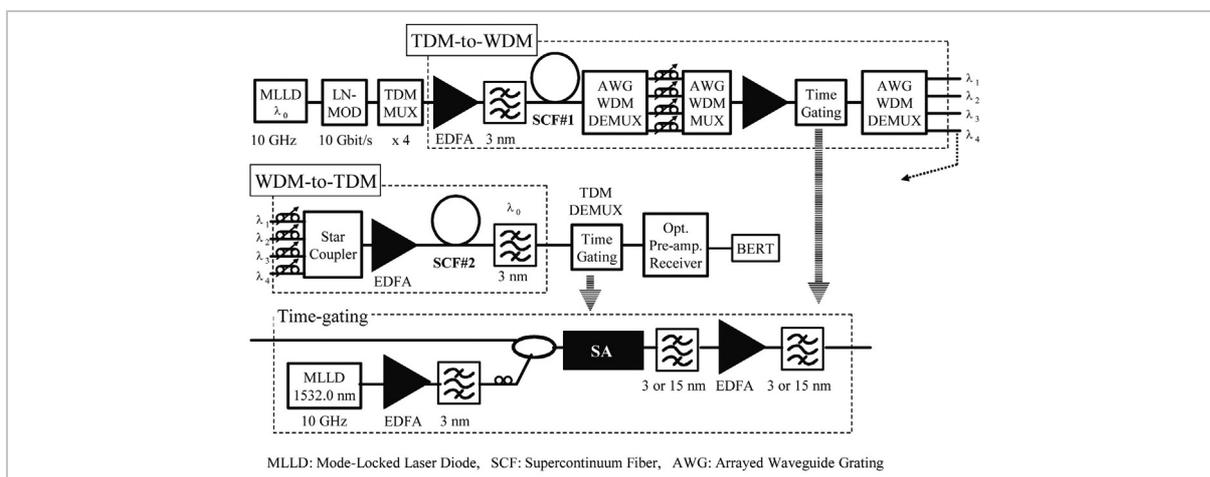
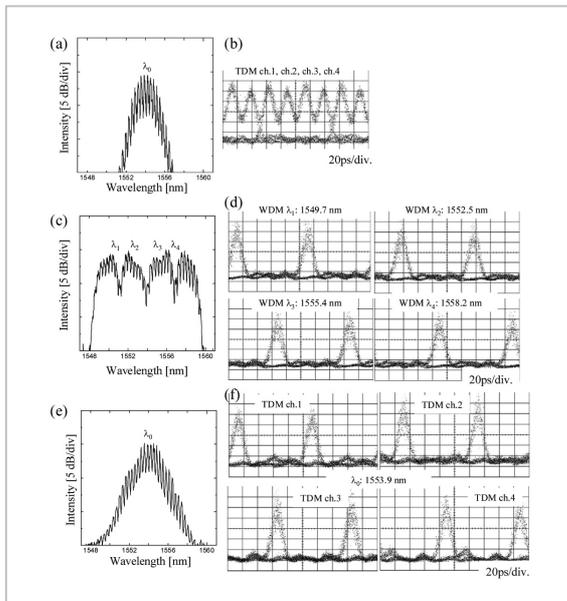


図9 光時分割多重(OTDM)と波長多重(WDM)の双方向多重方式変換実験系



**図10** 光時分割多重 (OTDM) と波長多重 (WDM) の双方向多重方式変換実験結果 (a) 40 Gbit/s OTDM, (b) 変換後 40 Gbit/s WDM, (c) 再変換後 40 Gbit/s OTDM

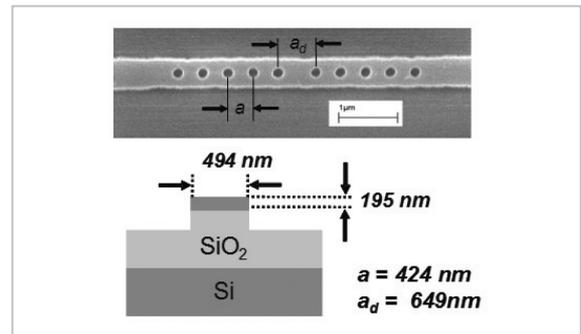
値に適していることが示された。

## 6 むすび

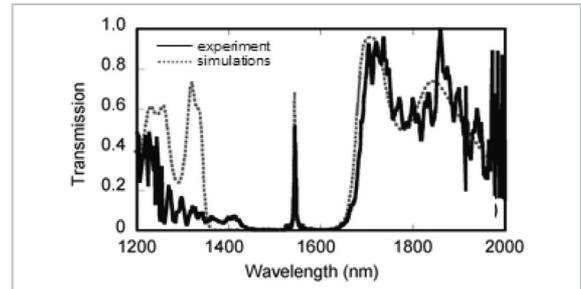
本論文では、光ファイバを用いた超広帯域光生成方法を議論した。また、超広帯域光のフォトニックネットワーク及び光計測への応用例を紹介した。これらの応用例は、時間領域及び周波数領域における超高速光信号処理を駆使することにより可能となったもので、その超高速性及び拡張性が

### 参考文献

- 1 S.Taccheo and L.Boivin, "Investigation and design rules of supercontinuum sources for WDM applications", Optical Fiber Communication Conference 2000, ThA1.
- 2 W.J.Tomlinson, R.H.Stolen, and C.V.Shank, "Compression of optical pulses chirped by self-phase modulation in fibers", J. Opt. Soc. Am. B. Vol.1, pp.139-149, April 1984.
- 3 J.T.Gopinath, H.M.Shen, H.Sotobayashi, E.P.Ippen, T.Hasegawa, T.Nagashima, and N.Sugimoto, "Highly nonlinear bismuth-oxide fiber for supercontinuum generation and femtosecond pulse compression", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol.23, No.11, pp.3591-3596, 2005.
- 4 H.Sotobayashi, J.T.Gopinath, J.W.Sickler, and E.P.Ippen, "Broadband fiber lasers using Bismuth Oxide-based Erbium-doped fiber amplifiers", SPIE Optics East, paper 5595-03, Philadelphia, Oct. 2004.



**図11** 一次元フォトニクス結晶



**図12** 透過光スペクトル (実線：実験結果、点線：数値計算結果)

ら、超広帯域光応用の可能性は非常に多様性があると考えられる。

### 謝辞

本研究について、ご議論・ご指導を頂いた大阪大学北山研一教授、上智大学小関健教授、マサチューセッツ工科大学 Erich P. Ippen 教授に感謝する。

- 5 H.Sotobayashi, A.Konishi, W.Chujo, and T.Ozeki, "Wavelength-band generation and transmission of 3.24-Tbit/s (81-channel WDM×40-Gbit/s) carrier-suppressed return-to-zero format by use of a single supercontinuum source for frequency standardization", OSA J. Opt. Soc. Am. B, Vol.19, No.11, pp.2803-2809, 2002.
- 6 H.Sotobayashi and K.Kitayama, "325 nm bandwidth supercontinuum generation at 10 Gbit/s using dispersion-flattened and non-decreasing normal dispersion fibre with pulse compression technique", IEE Electron. Lett., Vol.34, No.13, pp.1336-1337, 1998.
- 7 H.Sotobayashi, K.Kitayama, and W.Chujo, "Photonic gateway: TDM-to-WDM-to-TDM conversion and reconversion at 40 Gbit/s (4 channels 10 Gbits/s)", OSA J. Opt. Soc. Am. B, Vol.19, No.11, pp.2810-2816, 2002.
- 8 H.Sotobayashi, W.Chujo, and T.Ozeki, "Wideband tunable wavelength conversion of 10 Gbit/s RZ signals by optical time-gating of highly chirped rectangular shape supercontinuum light source", OSA Opt. Lett., Vol.26, No.17, pp.1314-1316, 2001.
- 9 H.Sotobayashi, W.Chujo, and K.Kitayama, "Photonic gateway: multiplexing format conversions of OCDM-to-WDM and WDM-to-OCDM at 40 Gbit/s (4×10 Gbit/s)", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol.20, No.12, pp.2002-2008, 2002.
- 10 P.T.Rakich, H.Sotobayashi, J.T.Gopinath, S.G.Johnson, J.W.Sickler, C.W.Wong, J.D.Joannopoulos, and E.P.Ippen, "Nano-scale photonic crystal microcavity characterization with an all-fiber based 1.2-2.0  $\mu$ m supercontinuum", OSA Optics Express, Vol.13, No.3, pp.821-825, 2005.

---

外林秀之

新世代ネットワーク研究センター光波  
量子・ミリ波 ICT グループ主任研究員  
(旧基礎先端部門光情報技術グループ  
主任研究員) 博士(工学)  
超高速光信号処理フォトリック、ネッ  
トワーク、光デバイス