

光信号処理用高非線形ファイバの開発

Development of Highly Nonlinear Fiber for Optical Signal Processing

廣石 治郎*

Jiro Hiroishi

杉崎 隆一*

Ryuichi Sugizaki

麻生 修^{*2}

Osamu Aso

忠隈 昌輝^{*2}

Masateru Tadakuma

渋谷 妙子^{*3}

Taeko Shibuta

概要 光ファイバ中で生ずる非線形光学現象は、ノイズの発生や波形の歪みを起こして信号を劣化させる原因となる。このため伝送路用ファイバにおいては、非線形現象をできるだけ小さくすることが望まれている。その一方で、光ファイバ中で生ずる非線形光学現象を利用した光信号処理が検討されている。例えば、非線形現象である四光波混合や自己位相変調を積極的に利用することにより、複数の波長の信号光を一括して波長変換することやパルスの圧縮等が可能となる^{1)~4)}。このような非線形現象を利用した光信号処理は、次世代の高速光信号処理や長距離光伝送技術として期待されている。四光波混合を利用した波長変換に分散スロープ0.02 ps/nm/km以下を有する高非線形ファイバを開発した。このファイバは四光波混合を使用した波長変換におけるポンプ波長の依存性を緩和し、変換帯域を広げる。更に、偏波保持高非線形ファイバ、小クラッド径とした高非線形ファイバを報告する。

1. はじめに

伝送路用ファイバ中で生ずる非線形現象は、ノイズの発生や波形の歪みとなって信号を劣化させる原因となる。このため伝送路用ファイバにおいてはできるだけ非線形現象を起こしにくいことが望まれている。しかし、非線形現象である四光波混合や自己位相変調を積極的に利用することにより複数の波長の信号光を一括して波長変換することやパルスの圧縮、ソリトン伝送、波形整形等が可能となる。これらの非線形現象を光信号処理に利用するためには、それに適したファイバが必要となる。我々は非線形現象を利用した光信号処理のための高非線形ファイバ(Highly nonlinear DSF; HNL-DSF)の開発を行っている。その中で、波長変換をターゲットとした0.02 ps/nm/km以下の分散スロープと大きな非線形定数を有する高非線形ファイバを開発した。このファイバは四光波混合を利用した波長変換におけるポンプ波長の零分散波長依存性を緩和し、変換帯域を広げる。更に、偏波保持の高非線形ファイバ、小クラッド径とした高非線形ファイバを報告する。

2. 光ファイバ中の非線形光学現象

2.1 非線形光学現象

光ファイバ中にパワーの大きな光が入力されると、屈折率が入力された光のパワーによって変化する。このとき屈折率 n は次式により示される。

$$n = n_0 + n_2 \cdot I \quad (1)$$

ここで、 n_0 は線形屈折率、 n_2 は非線形屈折率、 I は光のパワー密度を示す。

これに起因して、光ファイバ中で様々な非線形光学現象を生ずる。光ファイバ中で生ずる非線形光学現象としては、自己位相変調(SPM)、相互位相変調(XPM)、四光波混合(FWM)、ブリュアン散乱等があげられる。自己位相変調は、単独で位相シフトを生ずる現象であり、相互位相変調は、波長の異なった光が同時に同一方向に伝搬するとき生ずる位相のシフト現象である。四光波混合は異なる2波長以上の信号が入力されたときある規則をもってあらたな波長の光を生ずる現象である。自己位相変調を利用してパルスの圧縮やソリトン伝送が可能となる。また四光波混合を利用して波長の変換が可能となる。

非線形光学現象の効き方の指標としては、非線形位相シフトを考えることができる。自己位相変調における非線形位相シフト ϕ_{NL} は次式により示される。

$$\phi_{NL} = (2\pi/\lambda)(n_2/A_{eff}) \cdot I \cdot L_{eff} \quad (2)$$

ここで、 λ は波長、 A_{eff} は有効コア断面積、 L_{eff} はファイバの実効長を示す。

2.2 四光波混合による波長変換

ここで四光波混合を利用した波長変換について簡単に説明する。四光波混合は図1に示すように、周波数の異なるポンプ光と信号光(プローブ光)が入力されたとき、下記の周波数の条件を満たした変換光(アイドラ光)を生ずる非線形現象の一つである。

$$f_{conv} = 2 \cdot f_{pump} - f_{signal} \quad (3)$$

* ファイナルフォトニクス研究所 WF チーム

^{*2} ファイナルフォトニクス研究所 光伝送サブシステム開発部^{*3} 古河テクノロジーサーチ

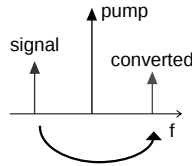


図1 四光波混合による波長変換
Wavelength conversion using four wave mixing

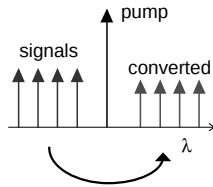


図2 多波長変換
Multi wavelength conversion

ここで、 f_{pump} はポンプ光の周波数、 f_{signal} は信号光の周波数、 f_{conv} は変換光の周波数を示す。

図1では、信号光は一つであるが、四光波混合を利用した波長変換では、図2に示すように複数の波長の信号光を一つのポンプ光で一括して波長変換することが可能である。しかもこの波長変換は光ファイバ中を光が進行する程度の高速度で変換可能という優れた点を有する。

3. 高非線形ファイバに要求される特性

(2)式より非線形位相シフトを大きくするには、光ファイバの特性としては n_2/A_{eff} の値を大きくすればよいことがわかる。すなわち、 n_2 を大きく、 A_{eff} を小さくすればよい。 n_2 は材料により決まる値である。シリカガラスをベースとする光ファイバでは、コアに屈折を高めるためのゲルマニウムがドーパされる。このゲルマニウムのドーパ量を多くすることにより n_2 を大きくすることができる。また、コアとクラッドの屈折率差を大きくすることによって光の閉じこめ効果が大きくなり光の伝達領域を狭くすることができる。すなわち、有効断面積 A_{eff} を小さくすることができる。

また、四光波混合を利用した波長変換では位相整合条件を満たすために、ポンプ光の波長はファイバの零分散波長に合わせる必要がある。したがって、例えばポンプ光を波長1550 nmに立てるのであれば、使用する光ファイバの1550 nmにおける波長分散の絶対値はできるだけ小さいことが望まれる。また、四光波混合を利用した波長変換にかかわらず、非線形現象である自己位相変調等を利用したパルス圧縮や、ソリトン伝送、波形整形でも、使用する高非線形ファイバにはその非線形現象に応じた波長分散値を有することが要求される。

使用する高非線形ファイバの波長分散スロープが小さければ、そのファイバの所望の波長分散に入る波長範囲が広がるため有用と考えられる。図3は、大きな分散スロープを有する従来のファイバと低分散スロープを有するファイバの波長分散特性を示す。分散スロープが大きい場合に比較して、分散スロープが小さい場合は、同じ波長分散の幅に入る波長の範囲が広がることがわかる。

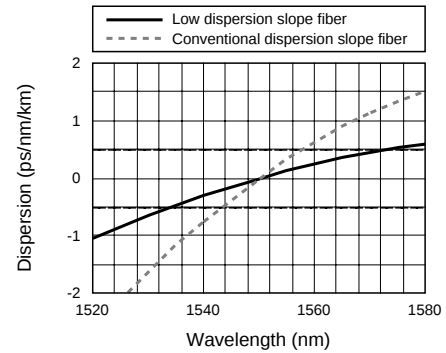


図3 低分散スロープによる広帯域化
Wide bandwidth by low dispersion slope

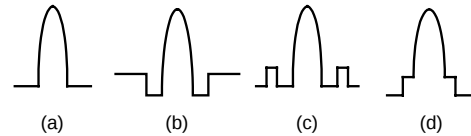


図4 屈折率プロファイル
Refractive index profile

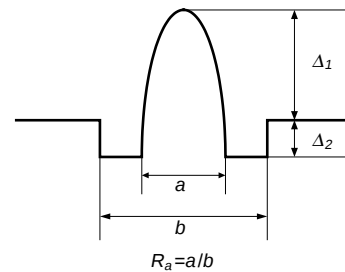


図5 W型屈折率プロファイル
W-shaped profile

高非線形光ファイバの特性としては、 A_{eff} が小さいこと、分散スロープが小さいこと以外に使用波長に対してカットオフ波長が短いことが必要とされる。

以上を踏まえ、非線形現象を利用して光信号処理を行うための高非線形ファイバとして、大きな非線形定数を有するとともに所望の波長分散を有しつつ、かつ小さな波長分散スロープを有する高非線形ファイバの開発を行った。

4. ファイバの設計

非線形定数を大きくするとともに、分散スロープを小さくすることを同時に満たすためにプロファイルの検討を行った。ファイバの代表的な屈折率プロファイルを図4に示す。シミュレーションによる検討の結果、図4の(b)に示すセンターコアの周囲に屈折率の低いディプレスト層を設けたW型プロファイル(図5)が前記の両特性を満たすのに適する結果が得られた。

更に、このW型プロファイルにおいて、プロファイルの各パラメータの詳細な検討を行った。センターコアの外径を a とし、ディプレストの外径を b としたとき、その比 a/b を変化させると、ファイバの光学特性は図6～8に示すように変化する。図6～8では、波長1550 nmで波長分散が零となるときにそれ

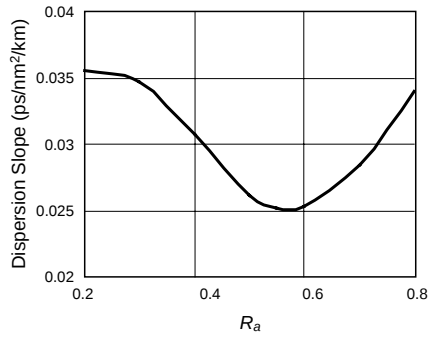


図6 分散スロープの R_a 依存性
Dispersion slope dependence on R_a

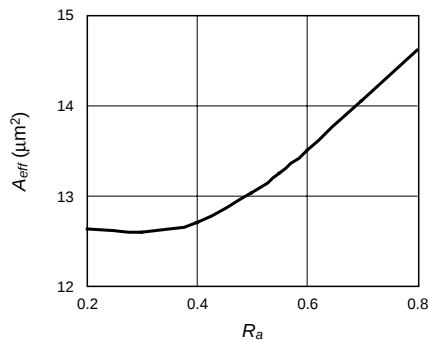


図7 A_{eff} の R_a 依存性
 A_{eff} dependence on R_a

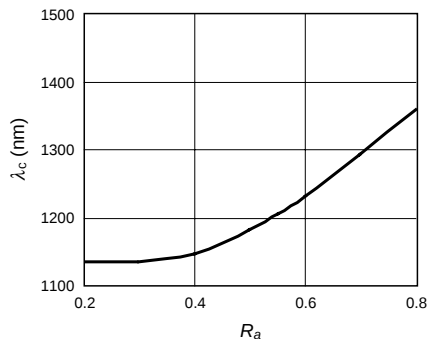


図8 カットオフ波長の R_a 依存性
 λ_c dependence on R_a

ぞれの特性を示している。

A_{eff} が小さいこと、分散スロープが小さいこと、カットオフ波長が短いことといった特性を満たすには、図6～8より、最適なパラメータがあることがわかる。

シミュレーションの結果、特性のバランスのとれた表1に示す特性のファイバを試作候補とした。なお、表1では波長1550 nmにおける分散が0 ps/nm/kmとなるときに特性を示している。

5. 試作ファイバの特性

表2に新しい設計により実際に作製した高非線形ファイバの特性を示す。なお、比較として過去に試作された高非線形ファイバの特性を表2の#Cに示す。新設計によるファイバの波長分散特性を図9に示す。

表1 シミュレーションによる高非線形ファイバの特性
Characteristics of highly nonlinear fibers by simulation

ファイバ	#A	#B
分散スロープ (ps/nm²/km) @1550 nm	0.024	0.021
λ_c (nm)	1217	1342
A_{eff} (μm²) @1550 nm	13.5	9.0

表2 高非線形ファイバの特性
Characteristics of highly nonlinear fibers

ファイバ	#A	#B	#C
分散スロープ (ps/nm²/km)	0.016	0.013	0.031
分散 (ps/nm/km)	0.11	-0.08	0.12
λ_c (nm)	1222	1354	1427
A_{eff} (μm²)	14.7	9.7	12.6
n_2/A_{eff} ($\times 10^{-10}/W$)	31.0	61.9	43.2
損失 (dB/km)	0.48	1.16	0.83
γ (W⁻¹km⁻¹)	12.6	25.1	17.5
PMD (ps/km¹/²)	0.04	0.12	0.04
融着接続損失 (dB)	< 0.1	< 0.1	< 0.1

) SMFとの融着接続損失

注) 測定波長は1550 nm (適用される場合)

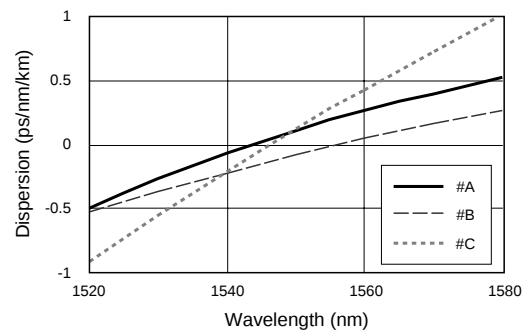


図9 試作ファイバの分散特性
Dispersion characteristics of fabricated fibers

新しい設計によるファイバ#Aと#Bの分散スロープはそれぞれ0.016 ps/nm²/kmと0.013 ps/nm²/kmと、従来の高非線形ファイバ#Cの分散スロープの半以下に低減することに成功している。特に#Bは、 $61.9 \times 10^{-10}/W$ と大きな n_2/A_{eff} を有しつつ小さな分散スロープを有する。

また、#A、Bいずれのファイバもカットオフ波長は1400 nmより十分短くできている。

6. 波長変換実験

低分散スロープを有する高非線形ファイバの優位性を検証するために、四光波混合を使用した波長変換実験を行った。図10に実験系を示す。ポンプ光と信号光を合わせて高非線形ファイバに導入し、変換光のパワーをOSAにより測定した。なお、ここで用いた高非線形ファイバの条長は200 mである。ポンプ光と信号光(プローブ光)の波長差を20 nmに保ちつつ、ポンプ光と信号光の両波長を、高非線形ファイバ(HNL-DSF)の零分散波長の近傍で変化させた。このときの変換光のパワーをモニターした。

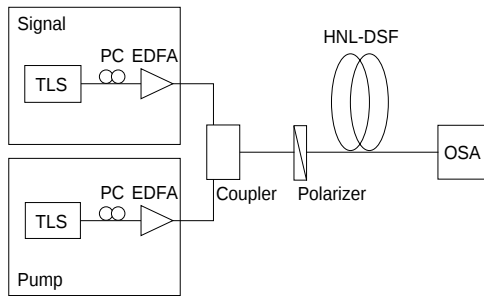


図10 波長変換実験系
The set up of wavelength conversion experiment

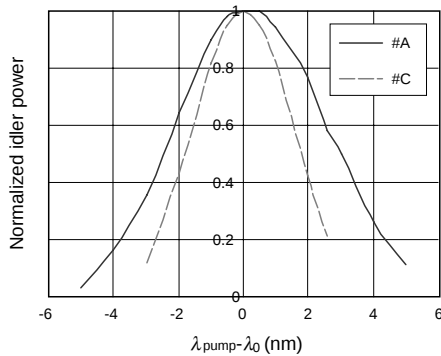


図11 ポンプ波長トレランス
Pump wavelength tolerance

実験結果を図11に示す。ポンプ波長がファイバの零分散波長にセットされたとき変換効率が最も高く、ポンプ波長がファイバの零分散波長から離れる程変換効率は低下するが、ファイバ#Aを使用した場合は、ポンプ波長がファイバの零分散波長から離れても変換効率の低下が#Cを使用したときより少ないことがわかる。このように低分散スロープを有する高非線形ファイバを使用することにより波長変換におけるポンプ波長の依存性を緩和できることがわかる。

7. 偏波保持高非線形ファイバ

非線形現象を利用した光信号処理は、ファイバの波長分散のほかにファイバの偏波状態にも大きく影響される。このため高非線形ファイバに偏波保持が要求されるサブシステムが多い。ここでは、応力付与材を使用した偏波保持高非線形ファイバを報告する。

図12に偏波保持高非線形ファイバの構造を示す。コアを挟み、 $B_2O_3-SiO_2$ からなる応力付与母材を両側に配した構造をとる。 $B_2O_3-SiO_2$ は、クラッドを構成する純石英に比較して大きな線膨張係数を有する。このためファイバの線引き工程における冷却時に、応力付与部に引っ張り歪みが生じ、これによって偏波保持が達成されることになる。

表1に示すファイバ#Aと同じプロファイルにて、図12に示す構造を有する偏波保持高非線形ファイバを作成した結果を表3に示す。表3に示すように、この偏波保持高非線形ファイバは、小さな分散スロープを有し、優れていることがわかる。また、消光比、ビート長も十分な値を有していることがわかる。

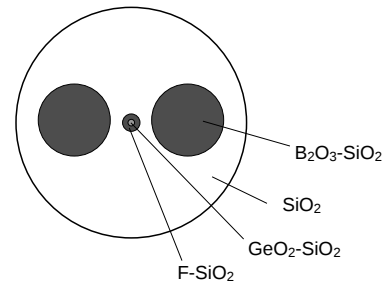


図12 高非線形PANDAファイバ
Highly nonlinear PANDA fiber

表3 高非線形PANDAファイバの特性
Characteristics of highly nonlinear PANDA fiber

項目	測定波長	特性
分散スロープ ($ps/nm^2/km$)	@1550 nm	0.018
分散 ($ps/nm/km$)	@1550 nm	0.04
λ_c (nm)		1205
MFD (μm)	@1550 nm	4.3
損失 (dB/km)	@1550 nm	0.89
クロストーク (dB/100 m)	@1550 nm	- 32.9
ビート長 (mm)		4.5

8. 細径高非線形ファイバ

光信号処理用に使用される高非線形ファイバは、それを利用するサブシステム内にモジュール化されて収められるのが、一般的な使用形態となると考えられる。このことから、高非線形ファイバを収める容量はできるだけ小さいことが、システムのコンパクト化につながる。通常、シングルモードファイバ (SMF) や分散シフトファイバ (DSF) にはクラッド径 $125 \mu m$ が使用されているが、ここではコンパクト化のためにクラッド径及び樹脂被覆径を細径化した高非線形ファイバを検討した。

表1に示すファイバ#Aのプロファイルにて、クラッド径 $90 \mu m$ とした高非線形ファイバを作製した結果を表4に示す。

表4に比較として同じ屈折率プロファイルを有するクラッド径 $125 \mu m$ の高非線形ファイバの特性を示す。表に示すように、クラッド径 $90 \mu m$ の高非線形ファイバは、クラッド径に対応して樹脂被覆径を $145 \mu m$ にできている。この細径高非線形ファイバは、クラッド径が $125 \mu m$ 、樹脂被覆径が $250 \mu m$ である従来のファイバに比較して、樹脂被覆径で58%、断面積で34%、モジュールサイズで35%ほど低減され、これによりサブシステムのコンパクト化が可能となる。

また、クラッド径を $90 \mu m$ としたファイバの特性は、クラッド径 $125 \mu m$ のファイバと比較して特性に遜色ないことがわかる。

9. おわりに

低分散スロープを有する高非線形ファイバを開発した。このファイバを使用した四光波混合を利用した波長変換実験によりポンプ波長のトレランスが広がることが確認された。更にPANDA化した高非線形ファイバ、コンパクト化を可能とする

表 4 細径高非線形ファイバの特性
Characteristics of highly nonlinear fiber with small clad diameter

項目	細径 高非線形 ファイバ	通常サイズ の高非線形 ファイバ
クラッド外径 (μm)	90	125
被覆外径 (μm)	145	250
分散スロープ (ps/nm ² /km)	0.017	0.016
分散 (ps/nm/km)	- 0.64	0.11
λ _c (nm)	1213	1222
MFD (μm)	4.3	4.3
n ₂ /A _{eff} (10 ⁻¹⁰ /W)	31.5	31.0
損失 (dB/km)	0.41	0.48
曲げ損失 (dB/m)	< 0.5	< 0.5
融着接続損失 (dB)	0.049	0.042
PMD (ps/km ^{1/2})	< 0.1	< 0.1

) SMFとの融着接続損失

注) 測定波長は1550 nm (適用される場合)

クラッド径を細径化した高非線形ファイバを作製した。

高非線形ファイバを使用した光信号処理は、光 - 光処理であるという高速処理性と多波長一括変換やパルス圧縮、ソリトン伝送、波形整形等に利用できることから、将来の高速信号処理、長距離伝送においてその活用が期待される。

謝辞

本開発を行うに当たり、御協力をいただいた千葉ファイバ製造部の神谷部長、田村GM、大沼GM、小山氏、下高原氏、生産技術開発センターの小相澤部長、中村氏、打越氏、井上氏、ファイナルフォトニクス研究所光サブシステム開発部の坂野主査、並木主査、WFチームの小倉チーム長、八木主査、熊野氏をはじめとする関係者の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) Aso, S.Arai, T.Yagi, M.Tadakuma, and S.Namiki: Broadband four-wave mixing short optical fibers, Electronics Letter Vol.36 No.8 (2000)
- 2) 麻生修, 忠隈昌輝, 並木周: 光ファイバ中の四光波混合発生とその応用技術開発, 古河電工時報, 105 (2000), 46.
- 3) Aso, S.Arai, T.Yagi, M.Tadakuma, Y.Suzuki, and S.Namiki: Efficient FWM Based broadband Wavelength Conversion Using a Short High-Nonlinearity Fiber, IEICE Trans.Electron Vol.E83-C (2000) 816.
- 4) M.Onishi: Silica-based Fibers For Nonlinear Applications, OECC (2002) 490.