

高機能高非線形ファイバの開発

Development of Highly Nonlinear Fiber with Enhanced Functions

高橋正典*
Masanori Takahashi杉崎隆一*
Ryuichi Sugizaki廣石治郎*
Jirou Hiroishi忠隈昌輝*
Masateru Tadakuma谷口友規*
Yuki Taniguchi八木 健*
Takeshi Yagi

概要 高非線形ファイバ(HNLF)は、高速伝送システムで必要とされる全光信号処理デバイスや集中型ラマン増幅器のキーパーツの一つである。光信号処理デバイスに適したHNLFとしては、非線形性が高いことと伝送損失が低いことが要求される。また、ラマン増幅器用のHNLFとしてはラマン利得効率が高く、OHロスの低いファイバが求められる。更に、これらのファイバを実装するにはモジュールの小型化が重要になる。

本報告では高い非線形性と低分散スロープを実現した高非線形ファイバ、ラマン増幅器用高非線形ファイバ、小クラッド径の高非線形ファイバを用いた小型高非線形ファイバモジュールに関して報告する。

1. はじめに

高非線形ファイバ(HNLF)は、高速伝送システムで必要とされる全光信号処理デバイスのキーパーツの一つである。全光信号処理デバイスとしては、四光波混合(FWM)を使用した光波長変換器や自己位相変調(SPM)あるいは相互位相変調(XPM)を利用した光パルス整形器がよく知られている。

光信号処理デバイスに適したHNLFとしては、非線形性が高いことと伝送損失が低いことが要求される。高い非線形性により光伝送処理に必要なファイバ長を短くでき、デバイスの容積を小さくすることが可能となる。更に、ファイバ型非線形デバイスを実現するに当たり、所定の分散特性を有することも重要である。特に、HNLF波長変換器を使用した光クロスコネクタとその波長帯域の拡大が報告されている^{1), 2)}が、波長変換器のために最適化されたHNLFにおける最も重要な点は、零分散波長の制御である。高効率かつ広帯域の波長変換を実現するためにHNLFの零分散波長とポンプ光波長との間に厳密な一致が要求される。そのため、低分散スロープを有する高非線形ファイバはポンプ波長の零分散波長依存性を緩和し、変換帯域を広げるのに有利である。

また、高NA、小 A_{eff} であるHNLFは集中型ラマン増幅器用のファイバとしても適している。十分な利得を得るためには励起光強度を上げることと、使用条長を長くすることが効果的であるが、非線形現象³⁾や二重レイリー後方散乱(DRBS)⁴⁾による信号劣化の要因となってしまう。この解決策として、信号波

長帯、励起波長帯の損失低減や非線形係数とラマン利得係数の最適化など集中ラマン増幅器に適した高非線形ファイバの開発も進んでいる。

一方で高非線形ファイバを利用した波長変換器やパルス整形器、光増幅器を実用化する上で、コンパクトな高非線形ファイバモジュールの検討も必要である。例えば通常の19インチラックの1スロットにオンボードで収納できるモジュールは有効である。更に、実用的な用途では様々な環境で安定した性能を発揮する事が求められる。特に温度変化はファイバのパラメータ変化を引き起こす要因となる。

本報告では高い非線形性と低分散スロープを実現した高非線形ファイバ、ラマン増幅器用高非線形ファイバ、小クラッド径の高非線形ファイバを用いた小型高非線形ファイバモジュールに関して報告する。

2. 低分散スロープ高非線形ファイバ

四光波混合を利用した波長変換や、自己位相変調等を利用したパルス圧縮、ソリトン伝送、波形整形等に使用され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分散スロープが低ければそのファイバの所望の波長分散を満たす波長範囲が広がるため有用と考えられる。図1は、高い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。分散スロープが高い場合に比較して、分散スロープが低い場合は、同じ波長分散の範囲に入る波長が広がることが分かる。

高非線形ファイバの特性としては、 n_2 が大きいこと、 A_{eff} が

* 研究開発本部 ファイナルフォトニクス研究所

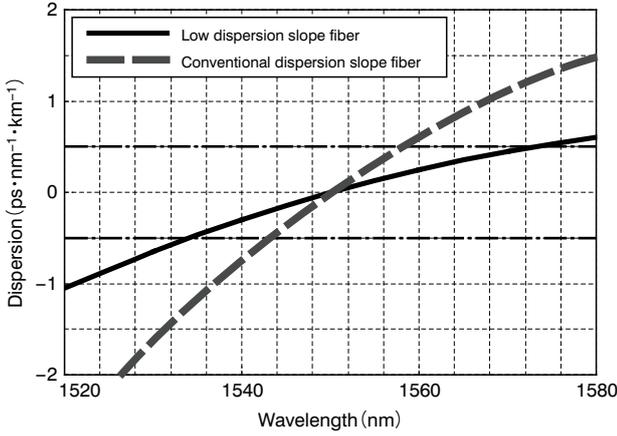


図1 低分散スロープによる広帯域化
Bandwidth expansion by low dispersion slope.

小さいこと、伝送損失が小さいこと、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、かつ小さな伝送損失と低い波長分散スロープとを有する高非線形ファイバを開発した。

2.1 ファイバ設計

ファイバの代表的な屈折率プロファイルを図2に示す。シミュレーションによる検討の結果、非線形定数を大きくすると同時に分散スロープを小さくするプロファイルとして、図2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型プロファイルが適していることが知られている。

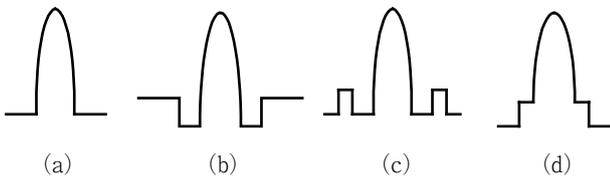
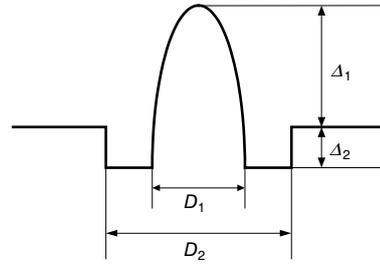


図2 屈折率プロファイル
Refractive index profiles.

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は次のとおりである。図3にW型プロファイルでの重要パラメータを示す。 $R_A = \Delta_2 / \Delta_1$ とした時の、 R_A の変化に対する分散スロープを計算により求めた結果を図4に示す。この計算では、 R_a を一定とし、コア径は零分散波長が1550 nmとなるコア径に設定した。この図において $R_A = 0$ は、単峰プロファイルを示す。 R_A が大きくなると、 A_{eff} は小さくなる。逆に R_A の値が大きくなると、分散スロープが増大する。更に、図3に示すようにセンターコアの外径を D_1 、ディプレストの外径を D_2 とした時、その比 R_a を変化させると、ファイバの光学特性は図5～7に示すように変化する。図5～7では、センターコアとディプレスト層の屈折率の組み合わせの一例において、波長1550 nmで波長分散が零となる時のそれぞれの特性を示している。 A_{eff} が小さいこと、分散スロープが低いこと、カットオフ波長が短いことという特性を満たすには、図5～7より最適なパラメータがあることが分かる。



$R_a = D_1 / D_2$

図3 W型プロファイル
Parameters for W-shaped profile.

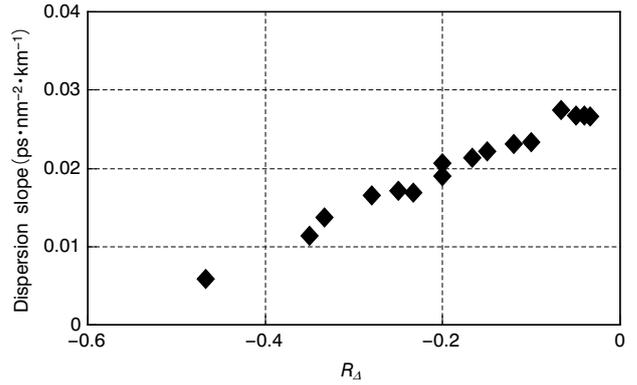


図4 分散スロープと R_A の関係
Relationships between dispersion slope and R_A .

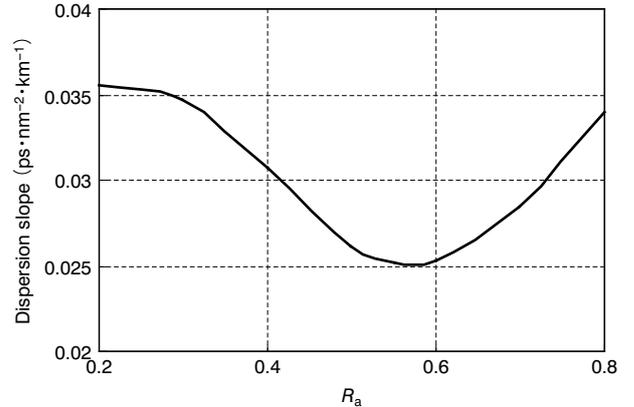


図5 分散スロープの R_a 依存性
Dependence of dispersion slope on R_a .

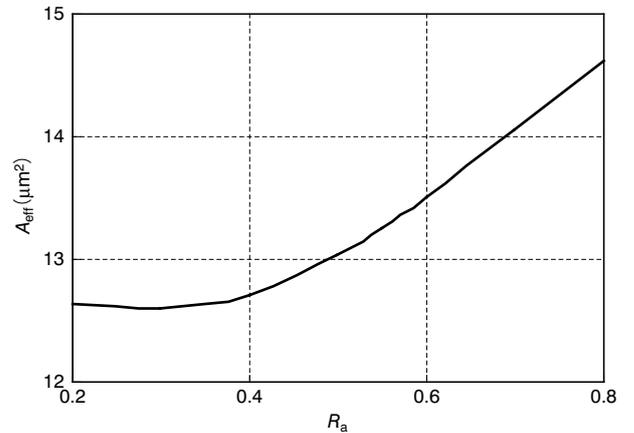


図6 A_{eff} の R_a 依存性
Dependence of A_{eff} on R_a .

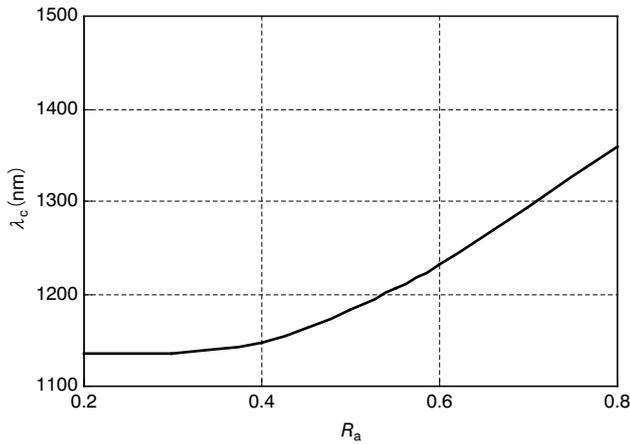


図7 カットオフ波長の R_a 依存性
Dependence of cutoff wavelength on R_a .

2.2 ファイバ特性

表1に、非線形定数を大きくすると同時に分散スロープを小さくする新しい設計により実際に作製された高非線形ファイバの特性を示す。ここで、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#Eに示す。新設計によるファイバの波長分散特性を図8に示す。

新しい設計によるファイバ#A、#B、#Cの分散スロープはそれぞれ0.016、0.013、0.0013 $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ と、従来の高非線形ファイバ#Eの分散スロープの半分以下に低減することに成功している。特に#Bは、 $61.9 \times 10^{-10}/\text{W}$ 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。#Cは0.0013 $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ と、特に低い分散スロープを有する。#Dは伝送損失が0.37 dB/kmと、小さい特徴を有する。また、#A~#D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。

3. 集中型ラマン増幅器用高非線形ファイバ

ラマン増幅器はファイバ中で起こる非線形現象の一つである誘導ラマン散乱(SRS)を利用しているので、非線形性の高いファイバは必然的に大きなラマン利得係数(g_R/A_{eff})を持つ。

表1 高非線形ファイバの特性
Characteristics of prototype fibers high nonlinearity.
(@1550 nm)

ファイバ	#A	#B	#C	#D	#E
分散スロープ ($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.016	0.013	0.0013	0.022	0.031
分散($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.11	-0.08	0.005	-0.31	0.12
λ_c (nm)	1222	1354	1254	1161	1427
A_{eff} (μm^2)	14.7	9.7	9.7	14.7	12.6
n_2/A_{eff} ($10^{-10}/\text{W}$)	31.0	61.9	50.7	31.8	43.2
損失 (dB/km)	0.48	1.16	1.13	0.37	0.83
γ ($\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$)	12.6	25.1	20.5	12.9	17.5
PMD ($\text{ps}/\text{km}^{1/2}$)	0.04	0.12	0.02	0.02	0.04
融着接続損失 (dB)*	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	—

*SMFとの融着接続損失

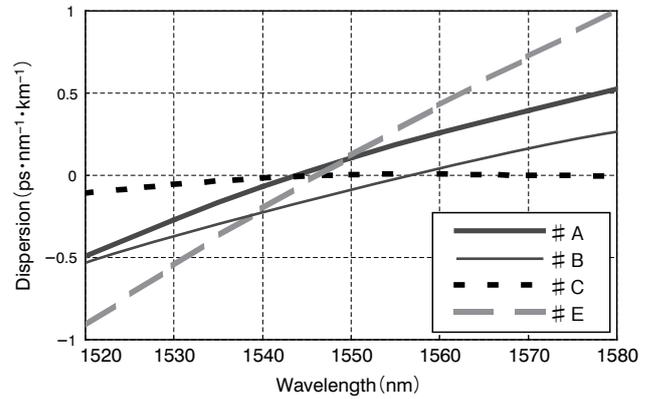


図8 高非線形ファイバの分散特性
Dispersion characteristics of prototype fibers with high nonlinearity.

この特性を生かし、高非線形ファイバを使用した集中型ラマン増幅器が開発されている⁵⁾。高非線形ファイバを集中型ラマン増幅器に適用する場合、ダブルレイリー散乱(DRBS)によるMPI(multi-path interference)雑音や非線形位相シフト(NLPS)に気を付けなければならない。DRBSを抑制するためには、レイリー散乱係数(κ)を小さくする必要があり、NLPSを小さくするには、非線形係数(n_2/A_{eff})を小さくする必要があるが、 κ や n_2/A_{eff} は、 g_R/A_{eff} と同様に、コアとクラッドの屈折率差に比例する。従って、ラマン増幅器用高非線形ファイバにとっては、これらのパラメータのバランスが重要になる。

また、シリカ系ファイバでは、SRSにより増幅される信号光波長は励起光波長よりも約13 THz低周波数側になるので、1550 nmの信号光を増幅する場合、励起光波長は約1450 nmとなる。ラマン増幅の効率を上げるためにはこの波長域のロスを低く押さえることが重要だが、それには1383 nmにピークを持つOH基による吸収を押さえる必要がある。

我々は、ラマン利得効率が高く、OHロスの低い高非線形ファイバ:高ラマン利得ファイバ(high Raman gain fiber)(HRGF)を開発し、そのファイバを用いた集中型ラマン増幅器のパワー変換効率が、C+Lバンドブースタ増幅器で72%、Cバンドで65%を達成しうることを示した⁶⁾。開発したファイバの特性を表2に、このファイバのラマンスペクトルを図9に示す。

表2 HRGFの特性
Characteristics of typical HRGF.

Parameter	Unit	HRGF
Loss @1450 nm	dB/km	0.75
Loss @1550 nm	dB/km	0.60
Cutoff wavelength	nm	1165
κ @1550 nm	$10^{-4}/\text{km}$	9.2
A_{eff} @1550 nm	μm^2	10.2
g_R/A_{eff} pumped at 1450 nm	$\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$	6.3
n_2/A_{eff} @1550 nm	$10^{-9}/\text{W}$	4.4
γ	$10^{-9}\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$	18

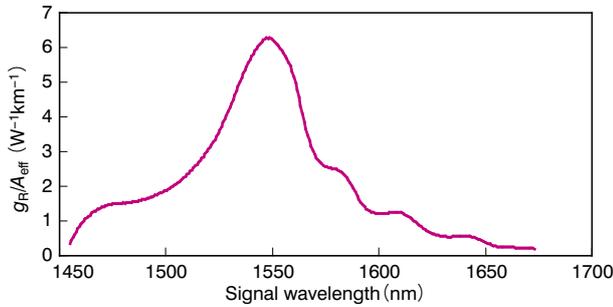


図9 HRGFのラマンゲインスペクトル(1450 nmポンプ時)
Raman gain spectrum of HRGF pumped at 1450 nm.

4. 細径高非線形ファイバ

近年、多くの光信号処理が研究・開発されているが、そのほとんどがシングルチャンネルに適用されるものである。実際のWDM伝送に高非線形ファイバデバイスを適用することを考慮すると、ラックへの収納等の観点から小型の高非線形デバイスが必要となる。我々はクラッド径を細径化した高非線形ファイバを開発し、それを用いた小型のモジュールを作製した。

4.1 ファイバ設計

高非線形ファイバモジュールに使用するファイバ長はファイバの特性とアプリケーションによって決まるが、～400 m程度が典型的な長さである。数百メートルのファイバをモジュールに収納する際、ファイバはボビンに巻かれた状態となるが、モジュールの小型化にはこのボビンの小型化が重要である。ファイバ長が一定の場合、ボビンの大きさはファイバのコア径とボビンの内径に依存する。

従来の被覆外径は250 μmであるが、これはファイバをケーブル化して、様々なフィールドにて使用することを前提に開発されている。一方、高非線形ファイバはコイル状に加工して機器内で使用するため、ケーブル化やケーブル敷設時にファイバに加わる応力などは考慮しなくても良いと考えられる。よって、高非線形ファイバの被覆厚は従来の被覆厚より薄く設計できるため、結果として被覆径を小さくすることが可能である。また、ファイバクラッド径を小さくすることも当然被覆外径を小さくするために効果的である。

光ファイバの信頼性設計において、ファイバに掛かるひずみを小さく抑えることは重要な意味を持つ。コイルや束を小型化するためにはなるべく小さな径にファイバを巻きたいが、ファイバの巻き径を小さくするほどファイバに掛かる巻きひずみは大きくなる。ファイバに掛かる巻きひずみはファイバクラッド径に比例するため、ファイバクラッド径を小さくすることにより、ファイバに掛かる巻きひずみの増加を抑えつつ、ファイバを小さな巻き径に巻くことが可能になり、コイルや束のコンパクト化に有利になる。

今回、光ファイバ心線に関して確立されている破断寿命の推定手法⁷⁾を用いて巻付け径を決定した。光ファイバの破断率は式(1)より導出できる。

$$\lambda = \alpha N_p C \frac{(\bar{\varepsilon} t_s)^{\beta}}{\varepsilon_p^{n_p} t_p} \quad (1)$$

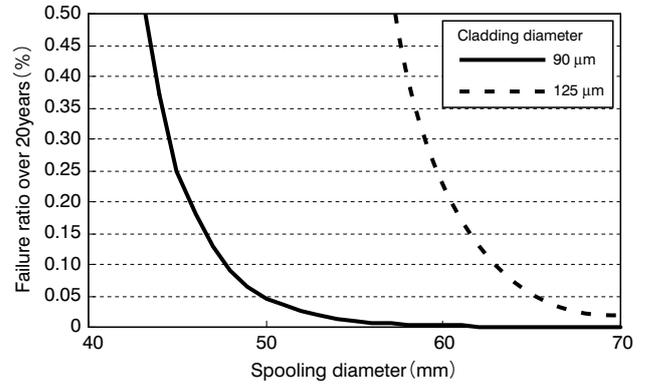


図10 破断率の巻き径依存性
Dependence of failure ratio on spooling diameter.

ただし

- α : m/n_p
- N_p : スクリーニング試験時の単位長当りの破断回数
- C : 環境により決定する係数
- $\bar{\varepsilon}$: 等価負荷ひずみ
- ε_p : スクリーニング試験印加応力
- n_p : スクリーニング試験時の疲労係数
- n : 使用環境での疲労係数
- t_p : ε_p が付加される時間
- t_s : $\bar{\varepsilon}$ が付加される時間

式(1)から計算した破断率を図10に示す。

125 μmのファイバを60 mmの径に巻いた時の破断率は約0.25% (20年)である。ファイバ径を90 μmにした場合、同じ破断率で45 mmの径に巻くことができる。よって、小型モジュール用のクラッド径90 μmの高非線形ファイバを設計した。

4.2 ファイバ特性

今回試作した細径HNLF(ファイバA)の特性及びクラッド径125 μmのHNLF(ファイバB)の伝送特性を表3に示す。ファイバA, Bでは同じ屈折率分布を持つプロファイルを採用した。クラッド径を90 μmとした高非線形ファイバは、クラッド径が125 μmである通常サイズの高非線形ファイバと比較して特に特性の低下がみられないことが分かる。また、細径のファイバAでは被覆径を145 μmとしたため、ファイバの体積を約65%小さくすることができた。

表3 細径高非線形ファイバの特性
Characteristics of small-diameter HNLFs.

		(@1550 nm)	
Fiber ID		A	B
Cladding diameter	(μm)	90	125
Coating diameter	(μm)	145	250
Dispersion slope	(ps · nm ⁻² · km ⁻¹)	0.017	0.016
Dispersion	(ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹)	-0.06	0.11
λ_0	(nm)	1553	1543
γ	(W ⁻¹ · km ⁻¹)	19.2	19.0
Loss	(dB/km)	0.86	0.88
Bending loss (φ20 mm)	(dB/m)	< 0.1	< 0.1
PMD	(ps/nm ^{1/2})	0.017	0.042

4.3 高非線形ファイバモジュール

ファイバAを用いて小型の高非線形ファイバを作製した。モジュール外観を図11に、主な特性を表4に示す。

今回作製した細径ファイバを使用することにより従来よりも小さい径に巻き付けても十分な信頼性が確保できた。また、小型のポビンを使用することによりモジュールサイズを約1/30に小型化することができた。このモジュールのフットプリントは3.5インチのFDよりも小さく、厚さは3.5インチFD3枚分とほぼ同じサイズに収まっている。

作製したモジュールを使用して波長変換実験を行った。実験系を図12に示す。

実験に先立ち、まず予備実験として温度0℃～40℃まで変化させてλ₀を測定した。実験結果を図13に示す。この結果からファイバのλ₀は0.031 nm/℃の温度依存性があることが分かった。次に各温度でPMDを測定した。結果を図14に示す。この結果からこの温度範囲ではPMDには大きな変化が無いことが分かった。

図15にポンプ波長を20℃のλ₀に固定した場合の波長変換効率を示す。Δλはポンプ波長λ_pとシグナル波長λ_sとの差である。ポンプパワーが17 dBmの場合、最大変換効率は-17.3 dBであった。この結果は、今回作製した小型モジュールはファイバBを使用した従来の大きさのモジュールと遜色無いパフォーマンスを有することを示している。実験ではモジュールの温度を0℃、10℃、20℃、30℃、40℃と変化させて行った。この実験結果を図16に示す。FWM波長変換の理論から⁹⁾、群速度分散とSOP、信号光の位相が変換効率に影響を与える。このモジュールは小さい分散スロープにより0℃～40℃の範囲でΔλが25 nmまではほとんど変わらない変換効率を有している。ポ



図11 3.5インチFDと高非線形ファイバモジュール
3.5 inch floppy disk and HNLF module using fiber A.

表4 モジュール特性
Characteristics of HNLF module using fiber A.

Fiber length	(m)	200
Insertion loss	(dB)	< 0.5*1
DGD	(ps)	0.038
Bobbin size Outer-Inner-Height	(mm)	φ75 - φ45 - 7*2
Module size (W) - (D) - (H)	(mm)	90 - 80 - 10

*1: 接続損失<0.2 dB含む

*2: 同コイルに400 mまで巻付け可能

ンプ波長とシグナル波長の位相がずれてくると変換効率はλ₀とλ_pの差に大きく依存する。よってΔλが35 nm以上では温度依存性が強く観測されているが、35 nmの帯域を持つこのモジュールは特別な温度制御なしにCバンド全体をカバーできることを示している。

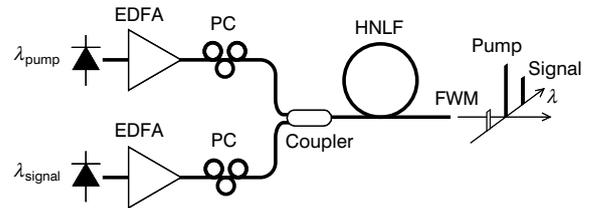


図12 波長変換実験系
Setup for wavelength conversion experiment.

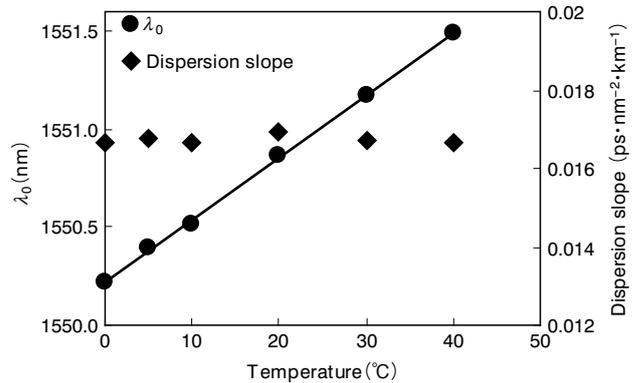


図13 λ₀の温度依存性
Temperature vs. λ₀ relationship at 0–40℃.

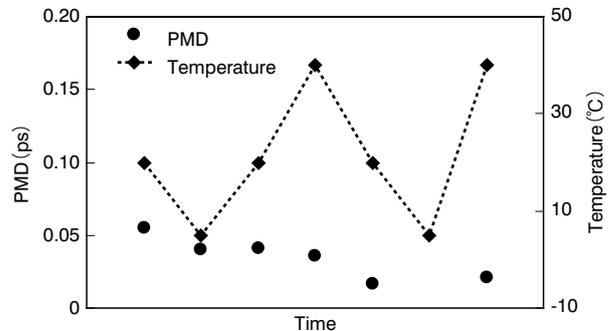


図14 PMDの温度依存性
Temperature vs. PMD relationship at 0–40℃.

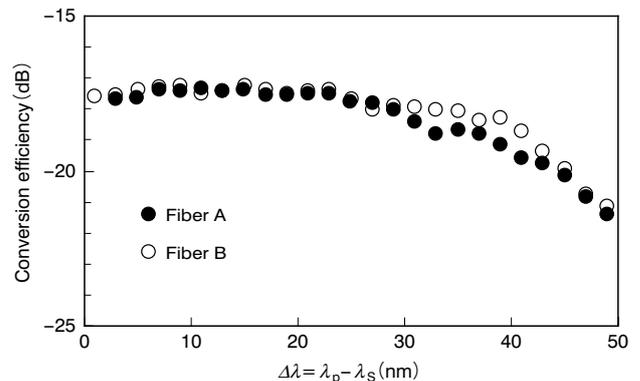


図15 波長変換帯域の比較
Comparison of wavelength conversion bandwidths.

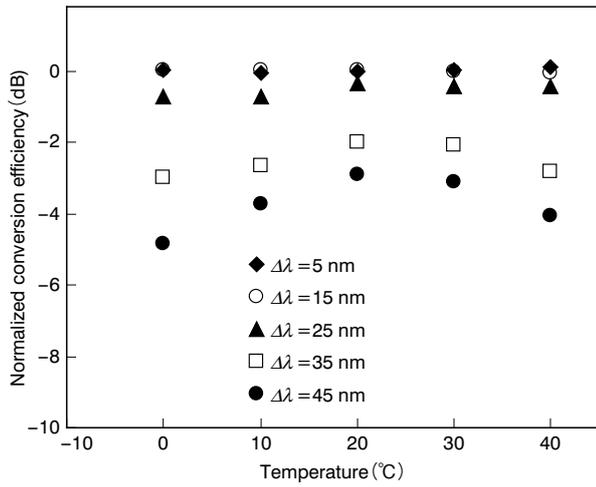


図16 正規化波長変換効率の温度依存性
Dependence of normalized conversion efficiency on temperature.

5. おわりに

高 γ , 低分散スロープを有する高非線形ファイバを開発した。これらのファイバは将来の光信号処理に利用されることが期待される。更に高いラマンゲインを持つファイバ(HRGF)を開発し、高効率な集中型ラマンアンプの実現性を示した。これらの高非線形ファイバが実装される際にはコンパクトなパッケージが必要不可欠と考えられるが、クラッド径を細径化した高非線形ファイバを使用することによりコンパクトパッケージングを実現し安定した特性を示した。

参考文献

- 1) S. Watanabe et al.: ECOC'98 PD paper (1988), 83.
- 2) O. Aso et al.: *Electrics Letters* **36** (2000), 709.
- 3) T. Okuno et al.: OAA2001, OtuB5, (2001).
- 4) T. Tsuzaki et al.: OAA2002, OWA2, (2002).
- 5) M. Kakui: OAA2003, MC1, (2003).
- 6) A. Oguri, Y. Taniguchi, R. Sugizaki, T. Yagi, and S. Namiki: OAA2004, OTuA6, (2004).
- 7) Y. Mitsunaga et al.: *Electron. Lett.*, **17** (1981), 567.