

超小型高非線形ファイバモジュールの開発

Development of Ultra Compact Highly Nonlinear Fiber Modules

高橋正典* 味村 裕* 谷口友規*
Masanori Takahashi Yu Mimura Yuki Taniguchi
廣石治郎* 忠隈昌輝* 杉崎隆一*
Jiro Hiroishi Masateru Tadakuma Ryuichi Sugizaki
坂野 操*² 八木 健*
Misao Sakano 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広帯域光源、パルス圧縮器などへの応用が期待されるキーパーツの1つである。近年HNLFの高機能化が実現されているが、これらのファイバを実装する際にはモジュールの小型化が重要になる。

本報告では、有限要素法によるクラッド径細径化の限界に関する理論的な検討結果と、この検討結果に基づき実現したクラッド径51 μm のファイバの特性について報告する。このファイバは機械強度試験及び環境試験で良好な特性を示し、十分な長期信頼性を確保しつつコインサイズのモジュールに収納可能である。試作した超小型モジュールを使用してSC光発生実験を行った結果、良好な特性であることを確認した。

1. はじめに

光ファイバ中で起こる非線形現象は伝送路中で信号波形を劣化させる原因となる一方、将来期待されている160 Gbpsを超える超高速伝送システムにおける光信号処理¹⁾は、この非線形現象の効果を利用した手法が必須であると考えられている。応用事例としては光波長変換²⁾や光パルス整形³⁾が良く知られており、更に信号処理以外にも広帯域光源⁴⁾や、パルス圧縮器⁵⁾などが報告されている。これらのアプリケーションにおいて、ファイバの非線形性を高めた高非線形ファイバ (HNLF) はキーパーツとして使用されている。

現在異なる材料や構造を持つHNLFが多数報告されている^{6)~9)}。ファイバ中で高効率に非線形現象を起こすためには非線形定数 ($\gamma = 2\pi n_2/A_{eff}$) が大きいこと、伝送損失が低いことが要求される。非シリカガラス系HNLFはシリカガラス系HNLFと比較して γ は非常に大きい¹⁰⁾が、伝送損失もまた非常に大きい特性を持つ。このため、伝送損失と γ から算出した最大非線形位相シフト量を比較すると、シリカガラス系高非線形ファイバが最も高効率であることが報告されている¹⁰⁾。

HNLFには低ロス、高 γ 以外にもアプリケーションに応じて所定の分散特性を有することが求められる。シリカガラス系HNLFは通信波長帯において分散をゼロにコントロール可能である。更に低分散スロープを実現可能なため、所定の分散値を

持つ領域を広帯域に確保できる。また、ファイバ長手方向における安定した分散特性も効果的な非線形プロセスに影響を与える¹¹⁾。この点においてもファイバ製造時の制御性が良いシリカガラス系HNLFは有利である。

近年多数報告されているHNLFを使用したアプリケーションはその多くが各研究所の開発段階にある。HNLFを実際に製品化するためにはモジュールの小型化が必要である。HNLFをコンパクトにパッケージングする観点において、大きな γ を持つ非シリカガラス系HNLFは、数メートルという短尺で使用可能なため⁷⁾⁹⁾、モジュールの小型化には有利である。しかし、HNLFをモジュール化するには、最終的に既存の光学系と接続することを考慮し、通常のシングルモードファイバ (SMF) や分散シフトファイバ (DSF) と接続されるが、これらのファイバはその接続損失が大きいことが問題となる。シリカガラス系HNLFは非シリカガラス系HNLFと比較して γ が小さいため、必要なファイバ長が長くなる。しかし、シリカガラス系HNLFは非線形プロセスが高効率であり、分散制御性及び製造性が良いことに加え、信頼性が確立されていること、通常SMFと低ロス (<0.2 dB) で接続可能であることなどから、実際の使用に適している。

本報告では実用化を視野に入れたシリカガラス系HNLFの小型化について報告する。第2章では理論的及び機械的設計の検討結果を、第3章では試作したファイバの特性及び信頼性の評価結果を、第4章では試作ファイバを使用したモジュール特性についてそれぞれ報告する。更に第5章では試作した小型モジュールを使用したSC光発生の実験結果について報告する。

* 研究開発本部 ファイタルフォトンクス研究所

*² 研究開発本部 横浜研究所

2. HNLFの細径化の設計

シリカガラス系HNLFを非線形デバイスに使用する場合は、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、概ね数百m程度である。この程度の長さ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のが一般的であるため、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。ボビンサイズはファイバ長が一定の場合、ファイバ外径（コーティング径）とボビンの内径（ファイバの巻きつけ径）に依存する。

ファイバ外径の細径化に対するアプローチとして被覆厚の低減が挙げられる。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。HNLF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等にファイバに加わる応力などは考慮しなくてもよい分、被覆厚の低減が可能である。更に、被覆厚を変えずに被覆径を小さくするためにはファイバ径（クラッド径）の細径化が効果的である。

光ファイバの信頼性設計において、ファイバにかかるひずみを小さくおさえる事は重要な意味を持つ。コイルサイズを小型化するためにはファイバの巻き付け径を小さくすることが有効であるが、ファイバの巻き径を小さくするほどファイバにかかる曲げひずみが大きくなる。ファイバにかかる曲げひずみはファイバ径に反比例するため、ファイバ径を小さくすることにより、ファイバにかかる曲げひずみを抑制しつつ、ファイバを小さな巻き径に巻くことが可能になる。

以上の理由からモジュールの小型化にはクラッド径の細径化が有効である。これまでに90 μm のHNLFを使用した3.5インチフロッピーディスクサイズのモジュールを開発してきた¹²⁾が、モジュールの更なる小型化のためには更なる細径化が必要となる。HNLFはモードフィールド径(MFD)が非常に小さく、コア周辺への光の閉じ込めが強いため細径化には有利であるが、クラッド径を大幅に細径化するには理論的及び機械的設計の検討が必要である。

2.1 理論的な細径化の検討 (FEMシミュレーション)

光ファイバは一般的にコアとクラッドの屈折率差を利用して光をコア周辺に閉じ込めて伝送する。この光の強度はコアからの距離が離れるにしたがって指数関数的に減少していくが、クラッド径（クラッド厚）が十分にでない場合、伝送するモードがクラッドと被覆の境界に達し、大きな漏洩ロスが発生してしまう。よってクラッド径を細径化するにはコアの設計に対して必要なクラッド径を明確にする必要がある。

有限要素法 (FEM) によるシミュレーション¹³⁾により漏洩ロスとクラッド径との関係を解析した。本シミュレーションでは実際にシリカガラス系HNLFで採用されているコアの屈折率プロファイルと通常SMFで使用されているものを使用した。

HNLFのプロファイルは、Geを高濃度に添加したセンターコアと、Fを添加したサイドコアを有するW型プロファイルとし、SMFは単峰形プロファイルとした。各コアの設計に対し、コア径を変えずにクラッド径を変化させた際の漏洩ロスをシミュレーションした。本シミュレーションではクラッドから被覆部に漏れる光の量をロスとしたため、レーリー散乱や吸収、

マイクロベンドロスなどは含まれていない。

図1にシミュレーションにより得られたクラッド径と漏洩ロスの関係を示す。この結果から、クラッド径を薄くするほど漏洩ロスが大きくなることが分かる。HNLFとSMFを比較するとHNLFではクラッド径40 μm でも125 μm のSMFよりもロスが少ないことが分かる。

図2にマクロベンドを加えた際のフィールド分布を示し、図3にマクロベンドを加えた際のロス特性を示す。クラッドが薄くなり、光の閉じ込めが弱くなると曲げに対する耐性が変化することが懸念される。しかし、光の閉じ込めが非常に強い設計のコアを持つHNLFは曲げの影響を受け難く、クラッドを細径化しても曲げに対する耐性はさほど変化しないことが分かる。

これらのシミュレーションによる理論的検討結果からHNLFの場合、クラッド径が40 μm 以上であればクラッド径125 μm のSMFと同等以上の漏洩ロス特性が得られると考えられる。

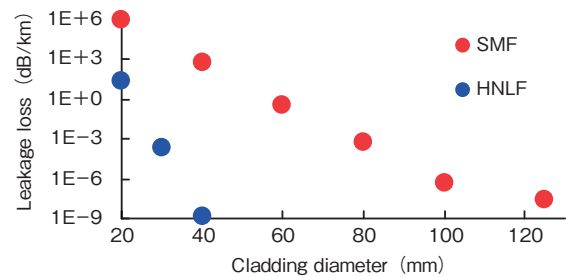


図1 クラッド径と漏洩ロスの関係
Relationship between leakage loss and cladding diameter.

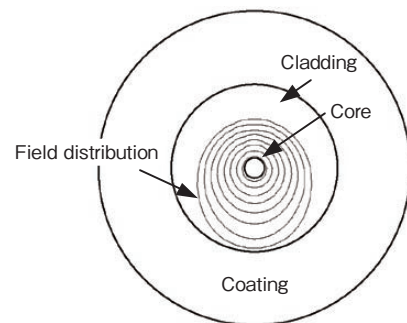


図2 マクロベンドを加えた際のフィールド分布
Field distribution under macro bending.
(SMF with 80 μm cladding, $r = 20$ mm)

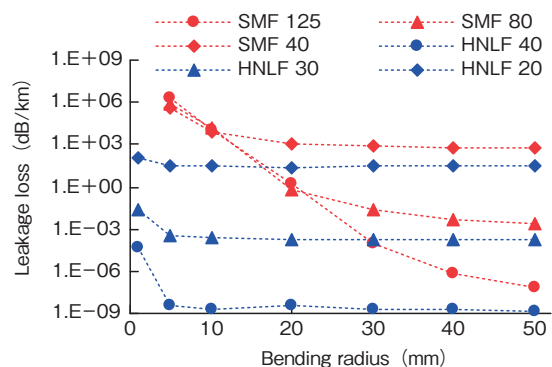


図3 マクロベンドを加えた際の漏洩ロス特性
Leakage loss due to macro bending.

2.2 機械的強度の検討

クラッド径を大幅に細径化したファイバを作製する際には光学特性に加え機械的強度について考慮する必要がある。一般的に光ファイバをハンドリングする際には10 N程度の引張強さが必要である。クラッド径125 μm の光ファイバの引張強さは概ね50 ~ 60 N程度であり、この引張強さはクラッドの断面積にはほぼ比例する。図4に引張強さのクラッド径依存性を示す。この図から10 N以上の十分な引張強さを得るためにはおよそ50 ~ 55 μm 程度のクラッド径が必要となる。

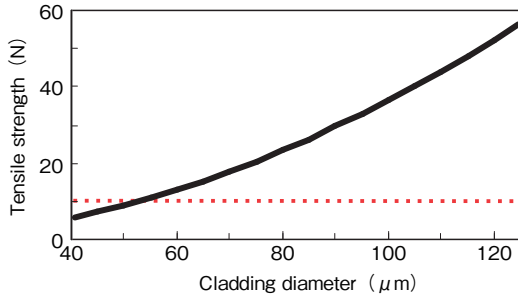


図4 引張強さのクラッド径依存性
Dependence of tensile strength on cladding diameter.

3. 細径HNLFの特性

細径化検討の結果を考慮し設計・試作した細径HNLFの特性を表1に示す。本試作ではコア設計の異なる2種類のファイバを試作したが、いずれのファイバもクラッド径55 μm 以上とし、10 N以上の引張強さを確保した。また、ファイバA、ファイバBともに2層被覆を施すことにより十分な信頼性の確保を目標とした。ファイバAと比較して、ファイバBではより分散スロープが低く、またロスも低く押さえられている。表1に示した基本的な光学特性は同じコアの設計を持つクラッド径125 μm のHNLFと同様な値となっている。

表1 試作したHNLFの特性 (@1550 nm)
Characteristics of fabricated HNLF (@1550 nm).

項目	A	B
クラッド径 (μm)	56	58
被覆径 (μm)	130	124
分散スロープ ($\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$)	0.026	0.013
分散値 ($\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$)	-0.29	0.63
λ_0 (nm)	1539	1617
γ (XPM) ($\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$)	13.3	12.1
伝送損失 (dB/km)	0.64	0.50
曲げ損失 ($\phi 15$ mm) (dB/m)	<0.1	<0.1
PMD ($\text{ps}/\text{nm}^{1/2}$)	0.06	0.13

試作したファイバの機械的強度特性を評価した。図5にワイブル分布プロットを示す。ワイブル分布係数 m_1 (高強度)と m_2 (弱強度)はそれぞれ44.7と1.2であった。さらに図6に動疲労試験結果を示す。試作した細径ファイバの動疲労係数 n は27.6 (IEC, TIA/EIA法)であった。

これらの結果から、試作した細径HNLFは通常サイズのファ

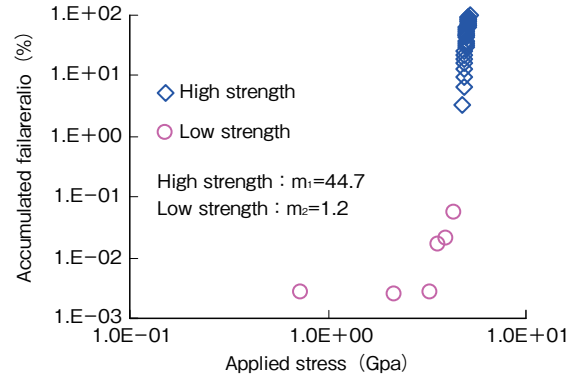


図5 ワイブル分布プロット
Weibull distribution of tensile strength in fabricated HNLFs.

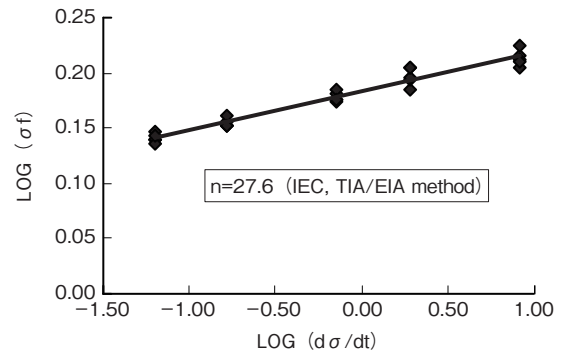


図6 動疲労試験結果
Result of dynamic fatigue test.

イバと比較して良好な機械的強度特性を持つことが確認できた。

4. 小型モジュールの設計

4.1 機械的強度信頼性の設計

ファイバをコンパクトに収納するためにはファイバを巻き付けるボビンの小型化が有効である。これにはファイバの巻き付け径 (ボビン内径) を極力小さくしたいが、ファイバを小径に曲げる際にはファイバにかかる曲げひずみによる破断寿命について考慮する必要がある。光ファイバの破断寿命に関する理論¹⁴⁾からファイバの破断確率は次の式(1)で表される。

$$\lambda = aN_P \frac{B_P/E^2}{(B/E^2)^\beta} \frac{(\bar{\varepsilon}^n t_s)^\beta}{\varepsilon_P^{n_P} t_P} \quad (1)$$

記号	内容
a	$m/n_P - 2$
N_P	Frequency of fiber failure
$\frac{B_P/E^2}{(B/E^2)^\beta}$	Environmental parameter
$\bar{\varepsilon}$	Equivalent applied strain
ε_P	Applied strain
n_P	Fatigue parameter
N	Fatigue parameter
t_P	Time of ε_P applied
t_s	Time of $\bar{\varepsilon}$ applied

式(1)をもとに今回の試作、評価により得たパラメータから細

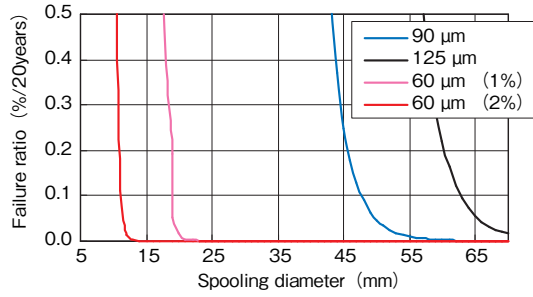


図7 巻き付け径と破断率の関係
Relationship between spooling diameter and failure ratio.

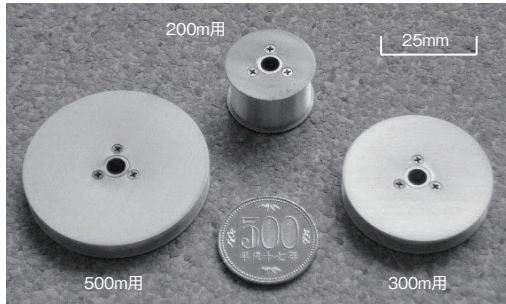


図8 細径ファイバ用ボビン
Small bobbins for down sized HNLF.

径HNLFの破断率を計算した。図7に破断率と巻き付け径の関係を示す。125 μm のファイバを60 μm の径に巻き付けた場合、20年での破断率は約0.25%である。今回試作した細径ファイバは同じ破断率で20 mmの径に巻き付けることが可能である。更に製造時のブルーテストレベルを2%とすることにより、細径ファイバは12 mmの径に巻き付け可能となる。

細径クラッドによる巻き付け径の小径化と、ファイバ径(被覆径)の細径化(ファイバ体積の減少)により細径ファイバは小型のボビンに収納可能となる。図8に細径ファイバ用ボビンを示す。このボビンでは200 mのファイバがコインサイズ(図8は500円硬貨)に収納可能である。

4.2 接続特性

HNLFにとって重要なパラメータの1つに接続ロスが挙げられる。この種のファイバは主にデバイスとして機器内で使用されることが想定されるが、最終的には既存の光学系との接続を考慮してSMFなどに接続されることが求められる。HNLFではファイバの非線形性を上げることで非線形プロセスの効率が上がり、所要パワーの低減が期待できるが、接続ロスが大きいとHNLFに入射するパワーが減少してしまうため、このメリットを十分に生かすことができない。

試作した細径HNLFは市販の融着器を使用し、融着条件を変更することにより通常SMFと直接融着接続が可能である。融着ロスは0.2 dB以下に抑えることが可能である。

図9に細径HNLFとSMFの融着接続部の接続状況を示す。

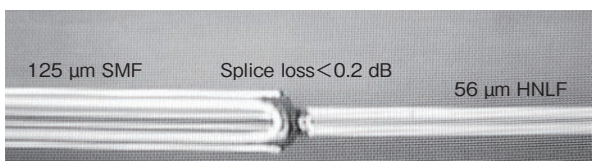


図9 細径HNLFとSMFの融着接続部
Fusion splice of fabricated HNLF and SMF.

4.3 耐環境特性

試作した小型モジュールを使用してTelcordia GR-63-COREに準拠した環境試験を行った。使用した温度パターンを図10に、測定結果を表2に、Operating Temperatureの結果を図11に示す。

表2から全ての環境試験においてロスの変化が0.1 dB以下、PMDの変化が0.1 ps以下であることが分かる。また、Operating Temperature試験では全ての温度・湿度でパワーの変動が0.02 dB以下であった。これらの結果から試作した小型モジュールは良好な耐環境特性を有することを確認した。

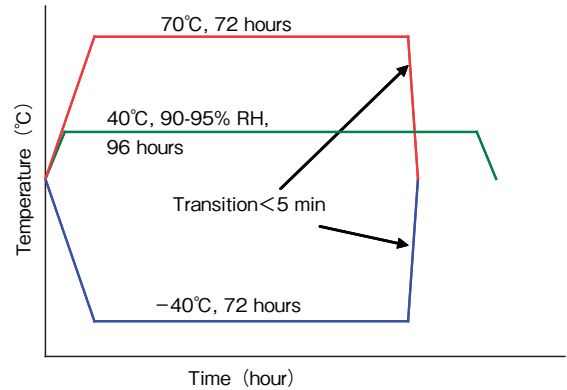


図10 GR-63-CORE 温・湿度パターン
Temperature and humidity pattern of GR-63-CORE.

表2 環境試験結果

Results of environmental performance tests.

項目	Loss	PMD
	(dB)	(ps)
Low-temperature and thermal shock	< 0.1	< 0.1
High-temperature and thermal shock	< 0.1	< 0.1
High relative humidity exposure	< 0.1	< 0.1
Operating temperature and humidity	< 0.02	—

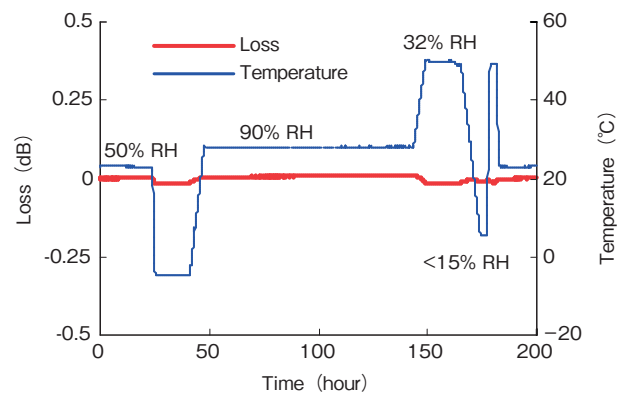


図11 Operating temperature 測定結果
Result of operating temperature test.

5. 細径HNLFによるSC光発生

細径HNLFにより実現した小型モジュールを使用してSupercontinuum (SC) 光発生実験を行った。HNLFの正常分散領域で発生するSC光はノイズが少なく、信号対雑音比(SNR)がよいため光信号処理や広帯域光源などへの応用が期待されて

いる⁴⁾。これらのアプリケーションが実際にフィールドで使用される際にはファイバは装置を構成するデバイスの一つとして機器内に収納されることが想定されるため、モジュールの小型化が不可欠と考えられる。今回開発した小型モジュールはこれらの用途には非常に有効と考えられる。

5.1 SC光発生に適したファイバの設計

SC光の発生効率を上げるためには高効率に非線形現象を起こす必要があり、これには γ が大きいこと及び伝送損失が低いことが要求される。また、ポンプ光を入射する波長におけるファイバの分散値が小さい方がよい。しかし、広帯域・低ノイズのSC光を発生させるためには、正常分散領域を広帯域に確保する必要がある。このためには低分散ロープを持つファイバが望ましい。また、ファイバ長を長くすることにより高効率化が期待できる¹⁵⁾。しかし、ファイバが長くなることによりモジュールの小型化には不利になる。

これらの条件を考慮し、数値計算により最適化を行った。計算に使用した主なパラメータは、ポンプ波長1560 nm、繰り返し周波数10 GHz、パルス幅2 ps、平均パワー100 mW、 γ 14 km⁻¹W⁻¹とした。この結果、ファイバ長を1 kmに、1560 nmでの分散値-0.8 ps/km/nmとなるようにHNLFを設計、試作した。

5.2 試作ファイバの特性

作製したファイバの特性を表3に示す。ほぼ設計どおりの分散値かつ低分散スロープを持つHNLFが得られた。このファイバの γ はCW-SPM法で13.8 km⁻¹W⁻¹であった。また、クラッド径を51 μ mにまで細径化し、被覆構造を最適化することにより、被覆径(ファイバ外径)を85 μ mまで細径化することに成功した。これより表1に示したHNLFと比較しても約1/2の体積となり、図8に示したボビンに約2倍の長さのファイバの収納が可能となった。

表4にこのファイバを使用したモジュール特性を示す。試作したHNLF1 kmを図8に示した ϕ 50 mm、厚さ5 mmのボビン(図8では500 m用と表記)に収納した。このファイバのSMFとの接続は4.2項に示した通り市販の融着器で融着接続が可能であり、接続損失は0.2 dB以下に抑えることができた。

表3 試作したSC光発生モジュール用HNLFの特性
Characteristics of fabricated HNLF for SC module.

項目		
クラッド径	(μ m)	51
被覆径	(μ m)	85
分散スロープ	(ps/nm ² /km)	0.017
分散値	(ps/nm/km)	-0.82
伝送損失	(dB/km)	1.14
γ (SPM)	(W ⁻¹ km ⁻¹)	13.8
PMD	(ps/nm ^{1/2})	0.05

表4 SC光発生モジュールの特性
Characteristics of SC module.

項目		
ファイバ長	(m)	1000
挿入損失	(dB)	< 1.5*
PMD	(ps/nm ^{1/2})	0.05
ボビンサイズ	(mm)	ϕ 50 - 5

* SMFとの融着ロス(2点)を含む

5.3 SC光発生実験

試作したHNLFモジュールを使用してSC光発生実験を行った。図12に実験装置の構成図を示す。本実験系は半導体モードロックレーザ(MLL)、EDFA、小型HNLFモジュール、光スペクトラムアナライザ(OSA)から成り、非常にシンプルな構成である。本実験では光源の繰り返し周波数は10 GHz、波長は1560 nmに設定し、パルス幅は2.1 ps、パルス形状はSech²、時間帯域幅積($\Delta t \times \Delta \nu$)は0.35であった。

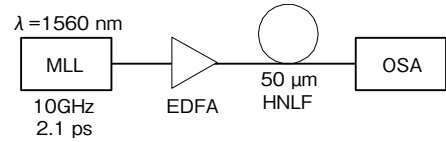


図12 実験系の構成
Experimental setup.

図13に入力パワー100 mW時の波形を示す。光スペクトラムアナライザ(OSA)のレゾリューションは0.01 nmに設定した。ポンプ光入力波長付近のリップルは3 dB程度と十分小さい値となっており、HNLFの正常分散領域を利用したことにより、平坦性に優れたスペクトルを観測した。このスペクトルのピークパワーから10 dB、20 dBパワーが下がった点におけるスペクトルの広がり(帯域)はそれぞれ28.1 nm、32.1 nmとなっている。入射パワーを上げることでさらに帯域を拡大することが可能であると考えられる。

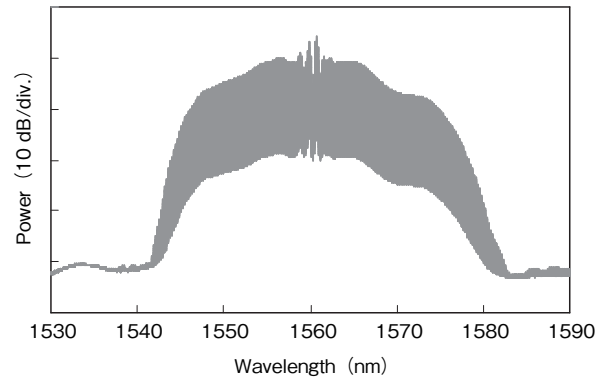


図13 入力パワー100 mW時のSCスペクトル
Output SC spectrum with input power of 100 mW.

6. おわりに

有限要素法によるシミュレーションによりシリカガラス系HNLFの細径化の理論的境界について明らかにした。この理論検討と機械強度設計の結果、クラッド径51 μ m、被覆径85 μ mに細径化したHNLFを設計・試作し、このファイバを使用することにより、コインサイズのHNLFモジュールを実現した。試作した細径HNLF及び小型モジュールは各種信頼性試験において従来型のファイバと比較しても良好な特性を示した。試作した小型モジュールを使用してSC光発生実験を行い、良好な特性であることが確認した。

参考文献

- 1) Y. Hashimoto: "Optical Clock Recovery Using Optical Phase-locked Loop with Voltage-controlled mode-locked semiconductor laser," ECOC2004, We2.5.1, (2004).
- 2) S. Watanabe, S. Takeda and T. Chikama: "Interband Wavelength Conversion of 320 Gb/s (32×10 Gb/s) WDM Signal Using a Polarization-Insensitive Fiber Four-Wave-Mixer," ECOC1998, PD, (1998), 85.
- 3) P. V. Mamyshev: "ALL-OPTICAL DATA REGENERATION BASED ON SELF-PHASE MODULATION EFFECT," ECOC1998, 1, (1999), 475.
- 4) Y. Takushima and K. Kikuchi: "10-GHz, Over 20-Channel Source by Slicing Super-Continuum Spectrum Generated in Normal-Dispersion Fiber," IEEE Photonics Technology Lett., 11, (1999).
- 5) T. Inoue and S. Namiki: "CL-band Tunable Optical Pulse Compression Based on Stationary Rescaled Pulse Propagation in Comb-like Profiled Fiber," ECOC2005, Mo3.5.2, (2005), 55.
- 6) J. Hiroishi, N. Kumano, K. Mukasa, R. Sugizaki, R. Miyabe, S. Matsushita, H. Tobioka, S. Namiki and T. Yagi: "Dispersion slope controlled HNL-DSF with high g of 25 W-1km-1 and band conversion experiment using this fiber," ECOC2002, PD1.5 (2002).
- 7) T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara and N. Sugimoto: "Multi-step-index Bismuth-based highly nonlinear fiber with low propagation loss and splicing loss," OFC2005, OThA2, (2005).
- 8) A. Mori, K. Shikano, K. Oikawa, K. Naganuma, M. Kato and S. Aozasa: "1.5 mm band zero-dispersion shifted tellurite photonic crystal fibre with a nonlinear coefficient λ of 675 w-1km-1," ECOC2004, Th3.3.6, (2004).
- 9) Julie Y.Y. Leong, Periklis Petropoulos, Symeon Asimakis, Heike Ebendorff-Heidepriem, Roger C. Moore, Ken Frampton, Vittoria Finazzi, Xian Feng, Jonathan H.V. Price, Tnya M. Monro and David J. Richardson: "A lead silicate holey fiber with $\lambda = 1860$ W-1km-1 at 1550 nm," OFC2005, PDP22, (2005).
- 10) Takashi Inoue, Osamu Aso and Shu Namiki: "Recent Issues on Nonlinear Effects in Optical Fibers," OECC2003, IP, 37, (2003).
- 11) O. Aso, Shin-ichi Arai, T. Yagi, M. Tadakuma, Y. Suzuki and S. Namiki: "Broadband four-wave mixing generation in short optical fibers," ELECTRONICS LETTERS, 36, (2000), 709.
- 12) M. Takahashi, J. Hiroishi, R. Sugizaki, H. Tobioka, T. Yagi and S. Namiki: "Wide temperature-range operation of a ultra compact highly nonlinear fiber four-wave mixer module," ECOC2004, We4.P.019, (2004), 508.
- 13) K. Saitoh and M. Koshiba: "Full-Vectorial Imaginary-Distance Beam Propagation Method Based on Finite Element Scheme: Application to Photonic Crystal Fibers," IEEE Journal of Quantum Electronics, 38, (2002).
- 14) Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, H. Kobayashi and Y. Ishida: "Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing," J. Appl. Phys. 53(7), (1982).
- 15) S. Taccheo and L. Boivin: "Investigation and Design Rules of Supercontinuum Sources for WDM Applications," OFC2000, ThA1, (2000).