光ファイバ中の四光波混合発生とその応用技術開発

Four-Wave Mixing in Optical Fibers and Development of Its Applications

麻生修^{*} 忠隈昌輝^{*} 並木 周^{*} Osamu Aso Masateru Tadakuma Shu Namiki

概要四光波混合(FWM)はDWDM伝送において回避すべき現象の一つであるが,応用によっては重要な次世代光デバイスや光ファイバ測定技術の基礎となる。本報告では,FWMの発生原理について言及した後,応用としてFWMを効率よく発生する特殊ファイバを用いた,広帯域全光波長変換器の開発を紹介する。変換波長帯域は半値全幅で23.3 nmにわたり,これまでに報告されている非偏波保持の光ファイバを用いた波長変換では最も広帯域である。また,もう一つの応用として,FWMの発生効率の評価を介した光ファイバの非線形定数の新しい測定方法の開発を紹介する。本方法によれば光ファイバの波長分散と非線形係数を同時に測定することが可能である。

1. はじめに

光ファイバ中に大きな強度の光を入射した際,光学的な応答 が線形性を失う。この現象は光ファイバ中の非線形効果として 知られる。非線形効果のうち,誘電率の三次分極に起因する効 果を光カー効果という^{1).2)}。四光波混合(FWM, Four-Wave Mixing)は光カー効果の一種であり,二つ以上の異なった波 長の光をファイバ中に入射した際に生じる。FWMは一般には 三つの異なった波長の光を光ファイバ中に入射した際に,それ らのどの波長とも一致しない波長に新たに光が発生する現象で ある。発生した光はアイドラ(idler)光と呼ばれる。FWMは 光パラメトリック振動の一種である。

波長分割多重(DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing)方式による伝送を行う際,多重化した信号間の FWMは伝送性能を劣化させる。というのも,発生したアイド ラ光の波長が多重化された信号光と同じ波長に重なった際クロ ストークを引き起こすからである²⁾。DWDM伝送を行う際に は回避されるべきFWMではあるが,応用の仕方によって, FWMは有効な光デバイスの技術基盤を与える。また,FWM は光ファイバの非線形特性や波長分散を測定するための基礎技 術を提供する。本稿では,最近我々が行ったFWM応用技術の 研究開発の中より,広帯域全光一括波長変換器及び光ファイバ の非線形係数を測定する方法について述べる。

全体の構成を示す。まず2章で光ファイバ中のFWMについ て、その発生原理と解析についてまとめる。つぎに3章で FWMを用いた広帯域全光一括波長変換器について述べる。 FWMを利用した波長変換装置を実現するためには、高非線形 分散シフト光ファイバ(HNL-DSF, High NonLinearity Dispersion Shifted Fiber)が重要である。本報告においては、特 に短尺化したHNL-DSFを用いて広帯域一括波長変換を実現す る。4章では当社で開発されたHNL-DSFとそれを用いた波長 変換実験について述べる。5章では光ファイバの非線形係数と 波長分散を同時に測定する方法の原理を述べる。本方法は、特 に分散補償(DM, Dispersion Managed)システムで用いられ る光ファイバの非線形係数の評価への有用性を念頭に考案され た。6章で実際にRDF(Reverse Dispersion Fiber)に対して行 った測定結果について述べる。最後に全体のまとめと今後の課 題を7章で述べる。

2. 四光波混合の発生原理

FWM 発生の概念図を図1に示す。

図1に示すように,周波数軸上で二つのポンプ光を間に挟ん で,入射前からあった光は信号光(又は,プローブ光)とよば れる。プローブ光の周波数をf_{probe},ポンプ光の周波数をおのお のf_{p1},f_{p2}とした際に,アイドラ光の周波数は

$$f_{\text{idler}} = f_{\text{p1}} + f_{\text{p2}} - f_{\text{probe}} \tag{1}$$

となる^{1),2)}。この条件は周波数の位相整合条件と呼ばれる。 特に二つのポンプ光の周波数が等しい場合,縮退四光波混合 (DFWM, Degenerated Four-Wave Mixing)と呼ばれる。 DFWMの際には式(1)は以下のようになる。

$$f_{\text{idler}} = 2 f_{\text{p}} - f_{\text{probe}} \tag{2}$$

[。] 光技術研究所 WP プロジェクトチーム 光伝送グループ





図1 周波数域における四光波混合の概念図 (a)ポンプ光が2波の場合 (b)ポンプ光が1波の場合(縮退四光波混合) A schematic of four-wave mixing in the frequency domain. (a) case of 2 channel pump waves

(b) case of the 1 channel pump wave (degenerated four wave mixing)

ここで f_pは縮退したポンプ光の周波数である。連続(cw, continuous wave)光でのDFWMは以下の三元連立非線形常微 分方程式で記述される¹⁾。

$$\frac{dE_{p}}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_{p} = i\gamma \left(|E_{p}|^{2} + 2|E_{probe}|^{2} + 2|E_{idler}|^{2} \right) E_{p} + 2i\gamma E_{p}^{*}E_{probe} E_{idler} \exp(i\Delta\beta z)$$

$$\frac{dE_{probe}}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_{probe} = i\gamma \left(|E_{probe}|^{2} + 2|E_{idler}|^{2} + 2|E_{p}|^{2} \right) E_{probe} + 2i\gamma E_{idler}^{*}E_{p}^{2}\exp(-i\Delta\beta z) \qquad (12)$$

$$\frac{dE_{idler}}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_{idler} = i\gamma \left(|E_{idler}|^{2} + 2|E_{p}|^{2} + 2|E_{probe}|^{2} \right) E_{idler} + 2i\gamma E_{probe}^{*}E_{p}^{2}\exp(-i\Delta\beta z) \qquad (12)$$

ここでzはファイバの長手方向にわたる座標を表す。 α は光 ファイバの減衰係数, E_{p} , E_{probe} , E_{idler} はおのおのポンプ光,プ ロープ光及びアイドラ光の電場を表す。 γ は非線形係数であり, 以下のように与えられる¹⁾。

$$\gamma \equiv \frac{2\pi f_{\rm p}}{c} \cdot \frac{n_{\rm 2}}{A_{\rm eff}} \tag{4}$$

ここで n_2 は非線形屈折率であり, A_{eff} は有効コア断面積である。cは真空中の光の速さを表す。式(3)に現れる $\Delta\beta$ は伝搬定数の位相不整合を表し,以下のように記述される。

$$\Delta\beta = \beta_{\text{probe}} + \beta_{\text{idler}} - 2\beta_{\text{pump}} = -\frac{8\pi f_{\text{p}}^2}{c} D(f_{\text{p}}) (f_{\text{probe}} - f_{\text{p}}) \quad (5)$$

ここで,Dは波長分散係数である。シングルモード光ファイ バ中では $\Delta\beta$ が0のときに最も効率よくFWMが発生する。この ために効率の良いFWMを発生させる際にはポンプ光波長と光 ファイバの零分散波長をできるだけ一致させることが要求され る³⁾。方程式(3)の右辺第一項目は光カー効果による自己位 相変調(SPM, Self Phase Modulation)及び相互位相変調 (XPM, Cross Phase Modulation)の効果を表す。第二項目は DFWMを表す。この方程式を解析的に取り扱うのは困難であ る。減衰がない場合(α =0)には、この方程式の解がJacobiの 楕円関数で記述される^{4),5)}。しかし、この解析解は物理的な 因果関係の見通しが立てにくい。このせいもあってか、方程式 (3)を適当な仮定のもとで近似した近似方程式とその解析解に より議論されることが多い。これらの近似は主に、ポンプ光が DFWMを引き起こすがその反作用は全く受けない、という近 似である^{6),7)}。

3. 光ファイバ中のFWMを用いた波長変換

3.1 波長変換装置の意義

波長変換装置は,文字通り入射した信号光の波長を異なる波 長に変換するデバイスである⁸⁾⁻¹³⁾。このため,将来の光クロス コネクトを用いたフォトニックネットワークの構築に向け,大 きな期待が寄せられている。波長変換には種々の方法が提案さ れているが,光ファイバのFWMを用いたパラメトリック変換 には,他の波長変換に比べて以下の利点がある。

・変換の速度が速い。

・波長帯域間の信号を一括して変換できる。

このため,これらの特徴を使った幅広い応用も提案されている¹⁰⁾。

3.2 光ファイバ中の波長変換

3)

パラメトリック変換の特性を活かした波長変換装置として望 まれる特性として,高変換効率であることと広帯域であること

が重要である。

上記のような波長変換を実現するには,以下の条件が満たさ れている必要がある。

(a) ポンプ光波長を零分散波長と一致させる。

(b) 波長分散の長手方向の変動を小さくする¹¹⁾。

(c) プローブ光とポンプ光の偏光状態をそろえる。

既に文献^(0,7)で議論されているように,変換の波長帯域を拡 大するためにはこれにくわえてコヒーレント長の考え方に気を 配る必要がある。我々が対象にしているDFWMの文脈におい て文献^(0,7)の議論を要約する。周波数帯域,すなわちポンプ光 周波数と信号光(又はアイドラ光)の周波数の間隔を *f*とす ると,周波数帯域にわたって有意なDFWMを引き起こすため にはファイバ長*L*は以下の条件を満たす必要がある。

$$L \le L_{\rm coh} = \frac{2\pi}{|\Delta\beta|} = \frac{c}{4\pi^2 f_{\rm p} |D(f_{\rm p})|} \cdot \frac{1}{\Delta f^2} \propto \frac{1}{\Delta f^2}$$
(6)

ここで L_{coh} はコヒーレント長と呼ばれる,長さの次元を持ったパラメータである。この式(6)から, Δ fの大きな広帯域一括波長変換を行うためには,ファイバ長を短くする必要がある。

条件(b)に関しても、ファイバ長を短くすることにより分散 はそろうので有意である。更に、ファイバ長を短くすることで 条件(c)を緩めることにもなる。偏波保持光ファイバ(PMF, Polarization Maintaining Fiber)でもない限り、通常は入射し た偏光状態は出射まで保存しない。それは、ファイバ内部の複 屈折に起因する長手方向の偏光変動が原因である。たとえファ イバ入射時に偏光状態をそろえたとしても、複屈折Δnが存在 すると、ポンプ光と信号光の間の相対的な位相変化は

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{c} \Delta n \cdot \Delta f \cdot L \tag{7}$$

で表される。大きな変換帯域∆fを実現するには∆nを小さく するのが一つの方法である。文献¹²⁾ではPMFを用いて固有モ ード内でのDFWMを利用することで∆nを実効的に0にして半 値半幅36.0 nmを示す広帯域一括波長変換に成功した。しかし ファイバ長Lを短くすれば,∆nが有限でもある程度は偏光不 一致の問題を押さえられる。

以上の議論から,短尺ファイバの利点は多い。

ただしファイバ長を短くすると,非線形相互作用を起こすの



図 2 HNL-DSFの屈折率分布 Refractive index profile of the HNL-DSF

表1 HNL-DSFの諸元

Transmission characteristics of the HNL-DSF

項目	測定値		
減衰係数	0.61 dB/km		
零分散波長	1565.5 nm		
分散スロープ(@零分散波長)	0.029 ps/nm²/km		
非線型係数 g	13.8 W ⁻¹ km ⁻¹		



図3 波長変換実験系 Setup for the wavelength conversion experiment

に十分なファイバ長がとれなくなる。この点を補うために,単 位長さ当たりの非線形性の強いHNL-DSFを用いる。次章で詳 細を示す。

高非線形分散シフト光ファイバと広帯域一括全光 波長変換実験

本章では HNL-DSF 及びそれを用いた広帯域一括波長変換の 実験を示す。

図2に今回の実験で用いたHNL-DSFの屈折率分布を,また 表1にその諸元を示す。実験で用いた光ファイバはVAD (Vapor phase Axial Deposition)法で作成した。非線形係数は

= 13.8 W¹km¹である。この値は通常の分散シフト光ファイ バにおける非線形係数の約5倍に当たる。

実験系の概念図を図3に示す。

ポンプ光と信号光(プローブ光)はともに cw 光である。エ ルビウム添加ファイバ型光増幅器(EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier)で増幅された各々の光は10 dBカプラで合波 される。カプラの出射端には偏光子があり, HNL-DSF入射時 にポンプ光と信号光の偏光状態はそろう。出射光を光スペクト ラムアナライザ(OSA, Optical Spectrum Analyzer)で測定し てアイドラ光強度を求める。これにより,変換効率を求める。 変換効率 *G*, は

$$G_{\rm c} = \frac{P_{\rm idler} (z=L)}{P_{\rm probe}(z=0)}$$
(8)

のように,与えられる。図4にファイバ長が24.5 km,1.2 km,及び0.2 kmの場合における変換効率測定結果を示す。測定において,ポンプ光波長をファイバの平均ゼロ分散波長に一致させた。入射ポンプ光強度は100 mW(20 dBm)に設定し,信号光強度は1 mW(0 dBm)とした。

図4より,HNL-DSFのファイバ長を短くするに連れて帯域 は徐々に広がっていく。ファイバ長0.2 kmでは,半値半幅は 23.3 nmに達する。この値は,これまで非偏波保持光ファイバ で達成された最も広帯域の結果である¹³⁾。



図4 変換効率の測定結果(ファイバ長は各々24.5 km, 1.2 km, 200 m) Measured conversion efficiency. Each fiber length is, 24.5 km, 1.2 km, 200 m respectively.

— 48 —

5. 光ファイバの非線形係数と波長分散の測定

5.1 光ファイバの非線形係数の測定

近年著しく大容量化を果たしてきた長距離通信において, DWDM技術及びそれを実現するうえでEDFAが果たした役割 は大きい¹⁴⁾。しかし,EDFAで増幅された信号光の引き起こす 非線形効果はシステムの性能を劣化させる。

近年,FWMを抑制する技術として,DMシステムが注目されている¹⁵⁾。RDF(Reverse Dispersion Fiber)は通常のシングルモード光ファイバ(SMF,Single-Mode Fiber)との組合せで用いる¹⁶⁾。RDFは波長1550 nm帯でSMFと逆の符号で絶対値のほぼ等しい波長分散(正常分散)を有し,分散スロープの傾きが逆になる。このため,分散及び分散スロープ補償が同時に達成される。これまでSMF+RDFによるDMシステムを用いて大容量のWDM実験結果が報告されている^{17),18)}。

従来,非線形係数γを測定するために,光ファイバ中のSPM を用いる方法¹⁹⁾, XPMを用いる方法²⁰⁾およびFWMを用いる 方法^{21),22)}がおのおの開発されてきた。本報告では,比較的大 きな正常分散領域でも適用でき,かつ全光的な処理で測定を行 う方法を検討した^{23),24)}。DMシステムの実用化に伴い,RDFの ような正常分散を有する光ファイバの需要が生じると,その評 価の必要性が増すと考えるからである。

5.2 測定原理

測定では, Stolen と Bjorkholm により考案された近似^{1),7)}を 用いて議論を行う。彼らの近似は pump undepleted (ポンプが 減衰しない)近似の一つであり, DFWM の場合以下の方程式 系で近似される。

$$\frac{dE_{p}}{dz} = i\gamma |E_{p}|^{2} E_{p}$$

$$\frac{dE_{probe}}{dz} = 2i\gamma |E_{p}|^{2} E_{probe} + 2i\gamma E_{idler}^{*} E_{p}^{2} \exp(-i\Delta\beta z) \qquad (9)$$

$$\frac{dE_{idler}}{dz} = 2i\gamma |E_{p}|^{2} E_{idler} + 2i\gamma E_{idler}^{*} E_{p}^{2} \exp(-i\Delta\beta z)$$

これは式(3)においてファイバの減衰係数αを0とおいて, ポンプ光強度が系全体の中で支配的に大きいとした近似であ る。このためポンプ光は,DFWMによる反作用も受けない。 信号光とアイドラ光は同程度に大きく,互いにDFWMを通し て相互作用を行う。この方程式は解析的に解け,ファイバの正 常分散領域での変換効率*G*,は以下のように記述される¹⁾。



図5 非線形係数と分散の同時測定系 Setup for the simultaneous measurement of the nonlinear coefficient and chromatic dispersion

$$G_{\rm c} = \gamma^2 P_{\rm p}^2 L^2 \left[\frac{\sin(gL)}{gL} \right]^2$$
(10)

gはパラメトリック利得と呼ばれ,

$$g_{\equiv} \sqrt{\frac{1}{4} \Delta \beta (\Delta \beta + 4\gamma P_{p})}$$
(11)

により与えられる。以下,上記表現を用いて測定原理を解説 する。

式(10),(11)において, P_p を変数,ファイバ長*L*を既知の 量とすれば, $\gamma \ge \Delta \beta$ が未知の量である。異なる二つのポンプ光 強度 P_p に対して対応する二つの異なる変換効率 G_c が測定を通 して得ることが出来る。これは,数学的には二つの未知数 $\gamma \ge \Delta \beta$ に対して独立した二つの連立方程式を得たと見なせる。こ の二元非線形連立方程式を解くことにより非線形係数と波長分 散が求まる。実際には測定誤差を可能な限り取り除くため,連 立方程式を解くことはせず,複数のポンプ光強度 P_p に対して 変換効率 G_c を逐次求め,非線形関数の最小自乗法である Levenberg Marquardt法²⁵⁾を用いて $\gamma \ge \Delta \beta$ を求めた。

6. RDFを用いた実験

6.1 測定系

図5に実験系の概念図を示す。

図3に示した系とほぼ同じだが,ポンプ光を増幅するEDFA のASE (Amplified Spontaneous Emission)を低減するために バンドパスフィルタを用いた。また,15 dBカプラを用いてプ ローブ光とポンプ光を合波した。偏波コントローラ(PC, Polarization Controller)をEDFAの後段に配置したため,入力 を調節するのに減衰器(attenuator)を配置した。このため, 合波した後のポンプ光強度が小さくなるので,図3のように偏 光子を用いることなく,注意深くプローブ光とポンプ光の偏光 状態を合わせて測定用光ファイバに入射した。入力プローブ光 は光パワーメータで,出力光は分解能0.01 nmのOSAで測定し 変換効率を求めた。



図6 測定結果(ファイバ長10km,ポンプ光波長1553.0nm) は波長分散を,は非線形係数を表す Result of the measurements. Fiber length is 10km and pump wavelength is 1553 nm.

represents the chromatic dispersion and is nonlinear coefficient, n_p/A_{eff} .

— 49 —





6.2 測定条件の最適化

式(10),(11)を利用して γ と $\Delta\beta$ を正確に評価するために, 測定のための条件を考える必要があることが分かった。以下に 今回考察を行った測定条件の検討を記す。

(イ)ポンプ光強度は,被測定光ファイバとポンプ光源の線幅で決まるSBSのしきい値以下の強度で動作させる必要がある。

(口)プローブ光強度がポンプ光強度よりも25 dB小さい値 に設定する。

これは方程式(9)で用いた,DFWM系の中でポンプ光が支 配的になる,という仮定を保証するためである。

以上の二つの条件下で,実際の測定・評価を行った。測定は 10 kmの条長を有する RDF に対して行った。ポンプ光波長は 1553 nm に設定した。具体的には式(4)を用いて γ から n_2/A_{eff} を,また式(5)を用いて $\Delta\beta$ から波長分散係数Dを評価した。 測定結果を図6に示す。横軸はポンプ光波長とプローブ光波長 の間隔 $\Delta\lambda$ であり,縦軸はそれに対応する測定結果である。

図6より, n_2/A_{eff} とDの評価値は一般に $\Delta\lambda$ に依存して変わる こと, $\Delta\lambda$ =0.22 nm 近傍で大きく値が変化することが分かる。 同ファイバの波長分散係数を位相シフト法により独立に測定し



図8 RDF 830 mにおける波長分散 と n_2/A_{eff} の測定結果 Result of the chromatic dispersion and n_2/A_{eff} . RDF length is 830 m.

たところ,波長1553 nmにおいて-15.45 ps/nm/kmであった。 このことから, $\Delta\lambda$ >0.22 nmにおいては正確な評価が行われて いないことが分かる。すなわち,式(10)による近似が適用で きないことになる。

図7にポンプ光波長を固定してプローブ光波長を変えて(入 射強度は一定として)測定した結果を示す。

 $\Delta\lambda$ が大きくなるに連れて徐々に変換効率が劣化していき, $\Delta\lambda$ =0.22 nm近傍で極小値をとり,また増加していく。コヒー レント長の議論で現れた式(6)はファイバ長を決めたときに, 帯域を制限する式として解釈することもできる。このときに制 限される帯域は図7でいう,上述の極小値に対応する¹⁾。すな わち,この測定では $\Delta\lambda$ 0.22 nmの範囲でなければ意味がない。

図6の結果から最適に評価できるΔλの値は0.21 nmであっ た。本測定においてはΔλの間隔を最適に選ばないと評価が誤 差を含むこと,そのためには各ファイバに対して図7に対応す る測定を行い,Δλを大きくしていったときに現れる変換効率 の最初の極小値を与えるΔλ近傍の値の元で測定・評価を行う 必要があることが分かった。この結論はいくつかの異なる RDFの測定を通じても成り立つことが確認された。

6.3 RDFの測定結果

古河電工時報

条長の異なる4本のRDFに対して測定を行った。おのおの 条長は0.83 km,5 km,10 km,20 kmである。各測定におい て,ポンプ波長の値3 nm刻みで変えて測定を行うことで,図 8に示すような結果を得られる。この結果から分散スロープが 求まる。

測定を行った4本のRDFにおける n_2/A_{eff} の評価結果を, XPM法で独立に求めた結果と合わせて表2に示す。同じく波 長分散及び分散スロープの評価結果を位相シフト法での測定結 果と併せて示す。

異なる条長に対して,波長分散及び分散スロープはほぼ位相 シフト法での測定結果と一致する。これに対して, n₂/A_{eff}の 値は条長が長くなるに連れて誤差が増えるという結果を得た。 これは,長尺ファイバになるほど無視できなくなる減衰係数α の効果を方程式(9)の近似を行う際にとり入れなかった結果

表2 RDFにおける n_2/A_{eff} と波長分散特性の同時測定結果. 測定による n_2/A_{eff} とXPM法による n_2/A_{eff} 結果との比較. 分散特性は,位相シフト法による分散特性の測定結果と 比較される. Result of the simultaneous measurement of the n_2/A_{eff}

and chromatic dispersion of some RDFs. Comparison of the results from the measured $n_2/A_{\rm eff}$ from the XPM method. Chromatic dispersion characteristics is compared with the results obtained by phase shift method.

	n ₂ /A _{eff} (W ⁻¹)		波長分散D (@1550 nm) (ps/nm/km)		分散スロープ (@1550 nm) (ps/nm²/km)	
ファイバ長L	本検討	XPM法	本検討	PS法	本検討	PS法
0.83 km	1.200	1.20	-15.36	-15.30	-0.053	-0.049
5 km	0.764	1.19	-15.05	-15.30	-0.042	-0.049
10 km	0.520	1.17	-15.35	-15.30	-0.048	-0.049
20 km	0.366	1.39	-15.11	-15.10	-0.039	-0.024

だと考えられる。

6.4 長尺ファイバに対する考察

長尺光ファイバにこれまでの方法を適用するために,減衰係 数を考慮する必要がある。このために,ポンプ光とプローブ光 がDFWMとは独立かつ一様に減衰するという近似²⁶⁾を考え る。この近似を用いると式(10)及び(11)は以下のようにな る。

$$G_{\rm c} = \gamma^2 P_{\rm p}^2 L^2 \exp(-3\alpha L) \left[\frac{\sin(gL)}{gL}\right]^2$$
(12)

$$g_{\equiv} \sqrt{\frac{1}{4} \Delta \beta (\Delta \beta + 4 \gamma P_{\rho} e^{-\alpha L})}$$
(13)

これらの式を用いて改めて評価を行ったところ, n_2/A_{eff} の値がファイバ長に依存せずにXPM法の値と一致することが確認できた²³⁾。

7. まとめと今後の課題

我々は本報告において,光ファイバ中で発生するFWMを利 用して,広帯域全光一括波長変換を実現する技術,及び光ファ イバの非線形係数と波長分散の同時測定技術の検討を行った。

短尺化された HNL-DSF を利用することにより,波長分散の 長手方向のばらつき,プローブ光とポンプ光間の偏光不一致の 問題,を同時に解決することができることを示した。非偏波保 持光ファイバとしては最も広い波長帯域23.3 nm にわたる一括 波長変換が出来ることを実験的に示した。

従来,正常分散領域において全光系で光ファイバの非線形係 数の測定が困難であった。今回の検討において,DFWM技術 と非線形関数の最小自乗法を組み合わせることにより,電気に よる信号処理を伴うことのない非線形係数の測定法を開発し た。本方法を適用する際における測定条件の最適化も行った。 最適化された条件のもとで,非線形係数と波長分散を同時に測 定できることを示した。これらの値は,従来のXPM法及び位 相シフト法によるおのおのの測定結果と良く一致する。本方法 は原理的に異常分散領域やゼロ分散近傍でも適用できる。今後, これら異常分散領域やゼロ分散近傍での測定を通じて,技術の 検証・確立に向けて検討を行う。

謝辞

本研究を行うに当たり,HNL-DSF及びRFDの製造を通して 御協力頂いた,ファイバ製造部ファイバ開発センタ,鈴木好久 主査,八木 健主査,杉崎隆一主任,荒井慎一主任,武笠和則 氏に感謝いたします。また,本研究を通して有益な議論をして 頂いた,ファイテル製品事業部,大越春喜光機器部長に感謝い たします。最後に日頃御指導頂く,宮澤秀久チーム長に感謝い たします。

参考文献

- 1) G.P.Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics-Second Edition", Academic Press, San Diego, CA, USA, (1995) Chap. 10. (邦訳,小田垣孝,山田興一,非線形ファイバー光学,吉岡書店,(1997),第10章).
- 2) 山本杲也,光ファイバ通信技術,日刊工業新聞社,(1995),第 11章.
- C. Lin, W. A. Reed, A. D. Pearson and H. -T. Shang, Opt. Lett., 6, 10, (1981) 493.
- 4) 谷内俊弥,西原功修,非線形波動,岩波書店応用数学叢書, (1977)3章.
- 5) G. Cappelini and S. Trillo, J. Opt. Soc. Am. B, 8, 4, (1991) 824.
- K. O. Hill, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki and R. I. MacDonald, J. Appl.Phys., 49, 10, (1978) 5098.
- R. H. Stolen and J. E. Bjorkholm, J. Quantum Electron., QE-18, 7,(1982) 1062.
- 8) S. J. B. Yoo, J. Lightwave Technol., 14, 6, (1996) 955.
- K. E. Stubjaer, A. Kloch, P. B. Hansen, H. N. Poulsen, D. Wolfson, K. S. Jepsen, A.T. Clausen, E. Limal and A. Buxens, IEICE Trans. Electron., E82-C, 2, (1999) 338.
- 10) N. Antoniades, S. J. B. Yoo, K. Bala, G. Ellinas and T. E. Stern, J. Lightwave Technol., 17, 7, (1999) 1113.
- S. Watanabe, S. Takeda, G. Ishikawa, H. Ooi, J. G. Nielsen and C. Sonne, European Conference on Optical Communication(ECOC) 97, post-deadline paper TH3A, (1997) 1.
- S. Watanabe, S. Takeda and T. Chikama, ECOC' 98, post-deadline paper (1998) 85.
- O. Aso, M. Tadakuma and S. Namiki, Proc. ECOC'99, vol. II, (1999), 226.
- 大越春喜,電子情報通信学会誌,82,7,(1999)718,およびその 引用文献.
- 15) A. R. Chraplyvy and R. W. Tkach, J. Quantum Electron., 34, 11, (1998) 2103.
- 16) K. Mukasa, Y. Akasaka, Y. Suzuki and T. Kamiya, ECOC'97, (1997) 127.
- Y. Miyamoto, K. Yonenaga, A. Hirano, N. Shimizu, M. Yoneyama, H. Tanaka, K. Noguchi and K. Tsuzuki, ECOC' 98, post-deadline, (1998) 55.
- 18) M. Murakami, T. Matsuda and T. Imai, ibid., (1998) 79.
- 19) R. H. Stolen and C. Lin, Phys. Rev. A, 17, 4, (1992) 1448.
- 20) A. Wada, T. O. Tsun, and R. Yamauchi, ECOC' 92, (1992) 71.
- 21) S. V. Chernikov and J. R. Taylor, Opt. Lett., 21, 24, (1996) 1966.
- 22) S. Bigo and M. W. Chbat, Symposium on Optical Fiber Measurement, (1998), p.77
- 23) M. Tadakuma, O. Aso and S. Namiki, Proc. ECOC'99, vol. II, (1999) , 228.
- ibid, Optical Fiber Measurement Conference Program, (1999) , 71.
- 25) W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vertterling and B. P. Flannery, "Numerical Receipes in C, Second Edition", Cambridge University Press, N.Y., USA (1992) Chap.15.
- 26) L. F. Mollenauer, P. V. Mamyshev and M. J. Neubelt, Opt. Lett., 21, 21, (1996) 172

— 51 —