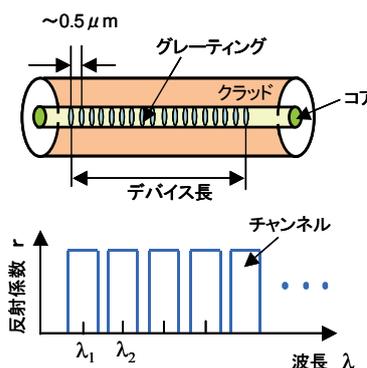


高チャンネルファイバグレーティングの実現と超高速・広帯域波長多重光通信システムへの応用

李 洪 譜 静岡大学工学部准教授

1 はじめに

光ファイバのコア部分に波長オーダーの周期的な屈折率変化を書き込んだファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG) は、波長多重 (WDM) 光通信システムや光ファイバ・センシング・システムに不可欠なデバイスである。多チャンネル FBG は、図1に示すように単一チャンネルのFBGと同程度の長さで、多波長フィルタなどの機能を持つFBGである。最近、現存するファイバリングの広帯域波長分散補償について、ファイバに基づく有望な解決策の一つとして、高チャンネル数ファイバブラッググレーティング (FBG) が強い関心を集めている。しかしながら、波長多重 (WDM) Cバンドの全域をカバーする分散補償器に用いる高チャンネル数FBGは、かなり高い屈折率変化と高精度のFBGライティング機器が要求されるため、ほとんど実証されていない。本研究では、位相マスクのグレーティング書き込み技術を用いて、近接場回折効果と製造誤差が考慮された新しい連続的な位相のみのサンプリング関数を提案する。具体的には、10～12cm程度の短いファイバに、WDM光通信システムにおいて重要度の高い2種類のキーデバイス：『広帯域分散補償器』と『広帯域な分散と分散スロープの同時補償器』を設計し、新しい設計・製作法の妥当性と有用性を実証する。



応用: WDMフィルタ、分散補償器、光合分波器、多波長ファイバレーザ、高繰り返し光源等

図1 FBGの構造と多チャンネルFBGの反射スペクトル

2 FBGのサイドライティングのための回折補償位相マスクの理論

位相のみのサンプリングFBGには、FBGの位相特性に位相シフトをもたらす位相ステップが必要であることが知られている。FBGの製作に用いられる位相シフト位相マスクは、0次回折光を除去する位相グレーティングである。図2のように、照射した紫外光はマスクで回折し、±1次の回折方向に分割される。フェイズ

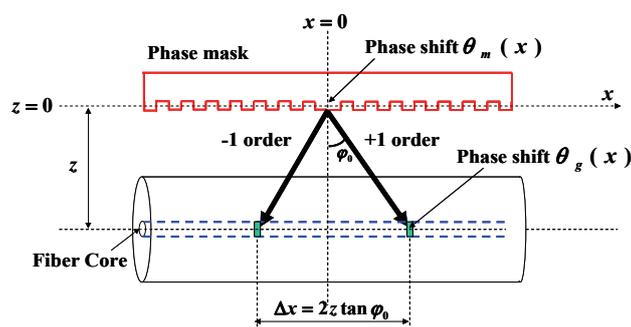


図2 位相シフトマスクの回折原理

マスクのフェイズシフト関数を $\theta_m(x)$ とし、この回折効果を考慮すると、コアに書き込まれる位相 $\theta_g(x)$ との関係は

$$\theta_g(x) = \theta_m(x) \otimes [\delta(x - \Delta x / 2) + \delta(x + \Delta x / 2)], \quad (1)$$

と表される。ここで \otimes は畳み込みであり、 Δx はマスクから距離 z の位置でのコア中の回折光の広がりを表す。上式をフーリエ変換することによって

$$\tilde{\theta}_g(f) = 2 \cos(\pi f \Delta x) \tilde{\theta}_m(f), \quad (2)$$

を得る。ここで、 $\tilde{\theta}_g$ 、 $\tilde{\theta}_m$ は位相プロファイルのフーリエ変換、 f はマスクの空間周波数である。(2)式は $f = 1/(2\Delta x)$ でグレーティングの位相変化が消されてしまうことを意味している。そこで我々は

$$\tilde{\theta}_m(f) = \tilde{\theta}_g(f) / 2 \cos(\pi f \Delta x), \quad (3)$$

とすることによりコアへの回折効果を補償するマスクを設計する。

3 高チャンネル数FBGのための連続的な位相のみのサンプリング

3-1 サンプリング関数より多チャンネル数FBGの生成

サンプリングの手法は感光性ファイバの限られた長さに多チャンネルFBGを実現させるためによく用いられる。サンプリングFBGは1チャンネルシードグレーティングを基に、空間領域に周期的なサンプリング関数をもつように作られたグレーティングである。一般的に誘起される屈折率変化 Δn は

$$\Delta n(x) = \text{Re} \left\{ \frac{\Delta n_1(x)}{2} \cdot \exp \left(i \frac{2\pi x}{\Lambda(x)} \right) \cdot s(x) \right\}, \quad (4)$$

ここで $\Delta n_1(x)$ は最大屈折率変化、 x はグレーティングに沿った位置、 $\Lambda(x)$ はグレーティングの周期、線形チャープグレーティングの場合は $\Lambda(x) = \Lambda_0(1 - C_g x)$ で表す。ここで、 Λ_0 はグレーティングの初期周期、 C_g はグレーティングのチャープレートである。 $s(x)$ は周期 P_0 を持つサンプリング関数であり、一般的に下記のようなフーリエ展開式で表わす。

$$s(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_m \exp \left(i \frac{2m\pi x}{P_0} \right), \quad (5)$$

ここで、 m はフーリエ次数、 S_m は複素フーリエ係数である。式(5)を式(4)に代入すると、屈折率変化 Δn は次のように書き直すことができる。

$$\Delta n(x) = \text{Re} \left[\frac{\Delta n_1(x)}{2} \exp \left(i \frac{2\pi x}{\Lambda_0} (1 + C_g x) \right) \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_m \exp \left(i \frac{2m\pi x}{P_0} \right) \right], \quad (6)$$

式(6)より、サンプリング関数の使用することにより、同じスペクトル応答の多チャンネル FBG が得られることが明らかである。しかし、 $\Delta n_m(z)$ の絶対値、すなわちmチャンネルの屈折率変化は、次に示すようにフーリエ係数 S_m に直接比例する。

$$\Delta n^m(x) = \text{Re} \left[S_m \frac{\Delta n_1(x)}{2} \exp \left(i \frac{2\pi x}{\Lambda} (1 + C_e x) \right) \times \exp \left(i \frac{2\pi m x}{P_0} \right) \right], \quad (7)$$

そのため、一般的に多チャンネル FBG を作るためには、全て帯域内で (チャンネル数 N の) フーリエ係数 S_m が等しくなるように位相のみサンプリング関数を最適化する必要がある。

3-2 位相のみのサンプリング関数

次に位相のみのサンプリング関数を検討する。通例どおり周期 P のサンプリング関数 $s(x)$ を式(8)のように表す。

$$s(x) = s_b(x) \otimes \sum_m \delta(x - mP), \quad (8)$$

ここで $s_b(x)$ は基本となる 1 周期のサンプリング関数である。一般に、議論される基本となるサンプリング関数 $s_b(x)$ は離散的に与えられるが、実際のところ、連続的な位相関数も分析的な形式でサンプリング関数を構築するために用いることができるので

$$s_b(x) = \exp\{i\theta_g(x)\}, \quad (9)$$

と表す。これがどう働くかを示すために、我々は初めに周期 P の基本的な正弦関数である位相関数 $\theta_g(x)$ を検討する。そうすると、基本となるサンプリング関数は式(10)で書くことができる。

$$s_b(x) = \exp\{ia_1 \sin(2\pi x / P)\} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(a_1) \exp[im2\pi x / P], \quad (10)$$

ここで a_1 は一定とし、 J_m は第 m 次ベッセル関数を表す。フーリエ解析の見地から、たとえ $\theta_g(x)$ が一つの空間周波数 $1/P$ だけを持っていても、発生するチャンネル数は、 $a_1 \gg 1$ であるときにとっても大きくなり得るベッセル係数の大きさに依存すると思われる。しかしながら結果として生ずるチャンネルの振幅は同一にはならない。高いチャンネル数を得るために、式(11) 一般形のように $\theta_g(x)$ を持つと仮定できる。

$$\theta_g(x) = \sum_{n=1}^M \alpha_n \cos(2\pi n x / P + \beta_n), \quad (11)$$

ここで係数の項の数 M は最小化し、そして α_n と β_n をチャンネルスペクトルが注目する帯域にわたり均一となるように最適化する。回折効果を考慮して、位相マスクを前もって補償した位相が等式(3)に従って得られ

る。

$$\theta_m(x) = \sum_{n=1}^M \frac{\alpha_n}{2 \cos(\pi \Delta x / P)} \cos(2\pi m x / P + \beta_n), \quad (12)$$

もし回折効果が考慮されていなければ、サイドライティング技術を用いた後にファイバコア内に得られる実際の位相は式(13)で表されるように歪んだものとなる。

$$\theta_g^R(x) = \sum_{n=1}^M \alpha_n \cos(2\pi m x / P + \beta_n) \cdot \cos(\pi \Delta x / P) \quad (13)$$

3-3 焼きなまし法による位相のみのサンプリング関数の最適化

式(11)において、各項に二つの自由なパラメータがあるため、一般にこの級数のM個の項により少なくとも2M個の均一なチャンネルが達成されると仮定される。焼きなまし演算法を用いて、要求されるチャンネルの均一性と回折効率 η が得られるように α_n, β_n の組を最適化する。焼きなましは温度Tと呼ばれる制御パラメータを次第に減少させるとともにコスト関数を減らすメトロポリス法演算法である。コスト関数は式(14)のように定義される。

$$E(x) = \sum_{-N}^N \left[\left| S_m(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M) \right|^2 - \frac{\eta}{2N+1} \right]^2 \quad (14)$$

ここで S_m は基本となるサンプリング関数 $S_g(x)$ の第m次フーリエ係数で、 η は帯域内の2N+1のチャンネル全てに対する目標の回折効率である。初めに $n=1, \dots, M$ での α_n, β_n の組の初期解がランダムに選ばれる。コスト関数は等式(6)、(8)、(11)を用いて計算される。そして α_n, β_n のそれぞれは確率一様密度に従ってランダムにシフトする。これをk回繰り返す、もし α_n, β_n の動きがコストの減少 $\Delta E_k = E_k - E_{k-1} \leq 0$ をもたらせば、新たな α_n, β_n の値が受け入れられる。 $\Delta E_k > 0$ の場合、新たな α_n, β_n の値は式(15)の確率分布に従い受け入れられる。

$$h(\Delta E_k) = \exp(-\Delta E_k / T) \quad (15)$$

焼きなましは統計力学の類似に基づき、多変数パラメータをとまう非線形過程の全体的な最適解を得るためによく用いられる。上記の連続的な位相のみのサンプリング関数について、様々な設計を行った45、81チャンネルに対する結果をそれぞれ図3、図4に示す。ここで、原型の位相特性式(8)と回折効果を受けた位相特性、式(10)は両方とも図(a)に示され、2つのフーリエスペクトルに相当するものはそれぞれ図(b)、(c)に示される。ファイバクラッド内で生じる屈折(クラッドの屈折率1.45に対して)とクラッドの半径を考慮してファイバとマスクの間隔は $z=10\mu\text{m}$ と仮定し、そして $\Delta x=25\mu\text{m}$ となる。便宜上、サンプリング関数の周期は規格化している。高い回折効率を得るために、45、81チャンネルに対してそれぞれ23の高調波項、41の高調波項を選択した。原型のサンプリング設計は、焼きなまし演算法による最適化で得られた回折効率がそれぞれ92%、84%、チャンネル強度の不均一性は1%、2.4%となり、かなり合理的であることが分かる。しかしながらマスク回折により位相分裂効果を受けている場合は結果として生ずる、チャンネルがかなり歪み(図3(c)、図4(c))、それゆえサイドライティング技術で高チャンネル数のサンプルドFBGを書き込むときは回折効果補償が必要であることを意味する。

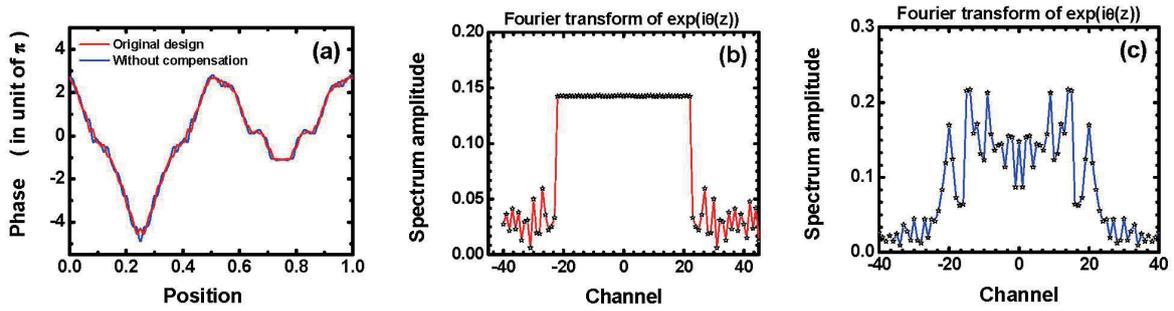


図3 4チャンネルサンプリング関数：(a) 位相プロファイル，(b) フーリエスペクトル（回折補償あり）(c) フーリエスペクトル（回折補償なし）

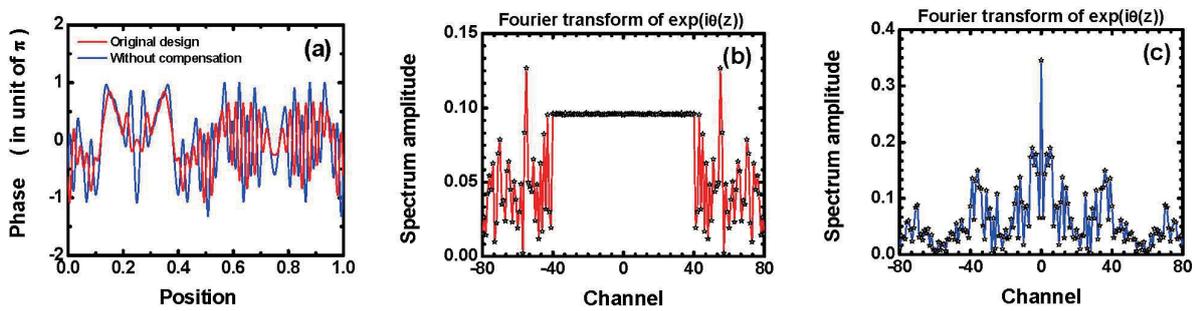


図4 81チャンネルサンプリング関数：(a) 位相プロファイル，(b) フーリエスペクトル（回折補償あり）(c) フーリエスペクトル（回折補償なし）

4 高チャンネル数FBGによる広帯域分散補償器の作成

4-1 設計結果

上節に完成した設計を確認するために、layer peeling 法を用いて得られる1チャンネルFBGにサンプリング関数を掛けた。そしてサンプルドFBGの反射スペクトルを伝達行列法で計算した。間隔100GHz、波長分散 -1360ps/nm を持つ線形チャープ45チャンネルFBGと間隔50GHzを持つ81チャンネルFBGの結果を図5、図6にそれぞれ示す。

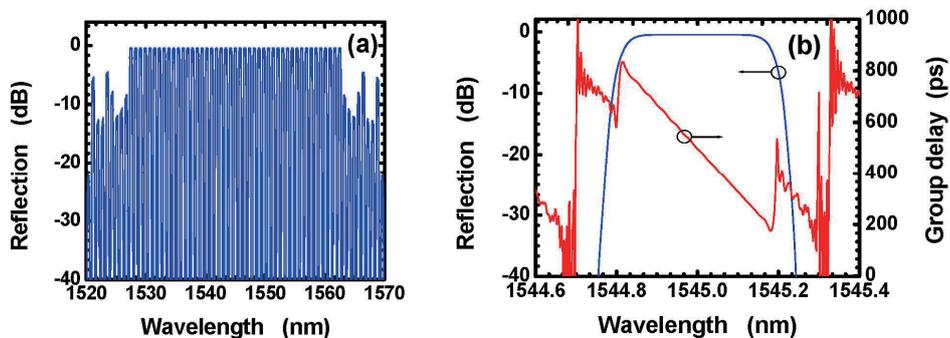


図5 理論データ：45チャンネルFBGの反射スペクトル

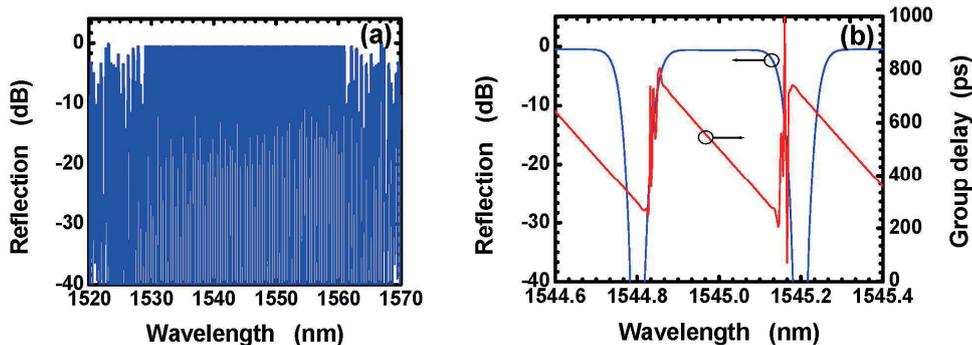


図6 理論データ：81チャンネルFBGの反射スペクトル

4-2 実験結果

次に、我々の数値計算結果を確認するため、いくつかの45チャンネルFBGと81チャンネルFBGを製作した。図7は1つの典型的な45チャンネルFBG測定結果を示す。チャンネル間隔100GHz、使用可能帯域幅0.21nm、波長分散約-1350ps/nmを持つほぼ同一の45チャンネルが得られていることが分かる。これらの結果は我々の設計データととてもよく一致する。この種の質の高い高チャンネル数FBGは、すでに640km SMFファイバでの伝送においてCバンド全域の分散補償器として用いられていることを特に言及する。図8は1つの典型的な81チャンネルFBGの測定結果を示す。この場合もチャンネル間隔50GHz、使用可能帯域幅0.11nm、波長分散約-1400ps/nmを持つほぼ同一の81チャンネルが得られていることが分かる。図8(b)にみられる群遅延リプルは少し大きく、バンド中心チャンネルの均一性は図7(b)に示される45チャンネルより悪いが、おそらくは、より高い屈折率変化とマスクとファイバの間隔のより厳密で正確な制御のためで、これは81チャンネルまでのサンプルドFBGでは初めての報告であり、これらの結果は以前提案した回折補償をともなった連続的なサンプリングが合理的であることを確認する。

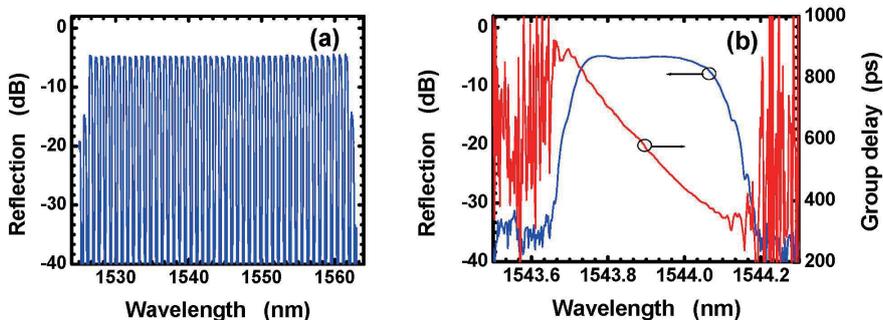


図7 実験データ：45チャンネルFBGの反射スペクトル

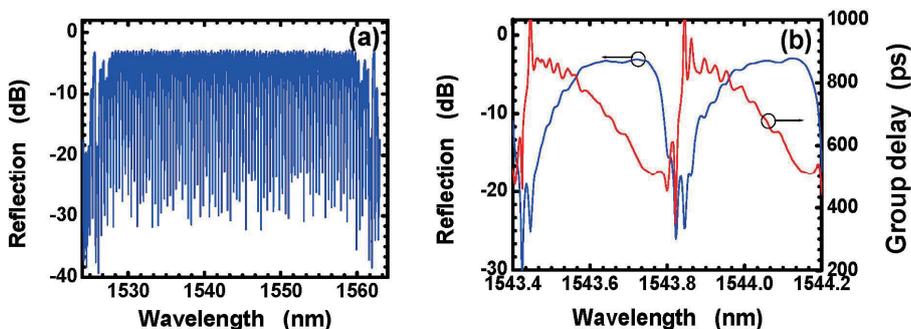


図8 実験データ：81チャンネルFBGの反射スペクトル

5 高チャンネル数 FBG による広帯域な分散と分散スロープの同時補償器の作成

上に述べられるように、位相のみサンプリング法が多チャンネルの分散補償にうまく適用された。しかし、45 あるいは 81 チャンネルすべての分散は補償されたが、分散スロープの補償には至らなかった。このような背景から、回折効果を補償したマスクで作られ、分散と分散スロープを補償できる、位相のみのサンプルド FBG の研究を行った。

5-1 サンプリング周期をチャープした位相のみサンプルド FBG の理論

分散と分散スロープの同時補償器を実現されるために、サンプリング周期をチャープする方法を紹介する。サンプリング周期は $P(x) = P_0(1 + C_s \cdot x)$ とし、ここで P_0 は初めのサンプリング周期、 C_s は線形変化係数である。一般的に $C_s \ll 1$ なので式(5)を近似して表すことで

$$s(x) \approx \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_m \exp \left[i \frac{2m\pi x}{P_0} (1 - C_s \cdot x) \right]. \quad (16)$$

を得る。式(16)を式(4)に代入すると、屈折率変化 Δn は次のように書き直すことができる。

$$\Delta n(x) = \text{Re} \left\{ \frac{\Delta n_1(x)}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp \left[i \frac{2\pi x}{\Lambda_0} (1 + C_{\text{eff}} \cdot x) \right] \cdot S_m \exp \left[i \frac{2m\pi x}{P_0} \right] \right\}, \quad (17)$$

ここで $C_{\text{eff}} (= C_g - C_s \cdot m\Lambda_0/P_0)$ はグレーティング周期のチャープレートと同等である。サンプリング周期のチャープがグレーティング周期のチャープと同等であると近似でき得ることが明らかに分かる。分散の大きさはチャンネル数 m の線形関数 C_{eff} に逆比例し、全チャンネルの分散が同一にはならないが、要求される分散と分散スロープは、最適として選ばれた C_g と C_s によってそれぞれ近似的に得ることができる。ここで、 C_{e1} 、 C_{e2} はそれぞれ、位相のみのサンプルド FBG の等価グレーティング周期チャープレートである。以上より、サンプリング周期のチャープはグレーティング周期のチャープと近似的に等しいことがわかる。波長分散補償器として使われる、サンプリング周期をチャープした位相のみのサンプルド FBG を設計するためには、波長分散と非線形にチャープされた FBG との関係を推論することが必要であると考えられる。線形チャープされたサンプリング周期を持つ位相のみのサンプルド FBG は波長分散補償器、分散スロープ補償器を設計するために用いられる。線形にチャープされたサンプリング周期が考えられるだけなので、次のように書く事ができる。

$$CD = \frac{-1}{c \cdot \Lambda_0 \cdot C_{e1}} \quad (18)$$

したがって、等価チャープレート $C_{e1}(m)$ はそれぞれのチャンネルに対応する波長分散によって一意的に決定される。中心チャンネルはフーリエ級数 $m=0$ のときに対応するので、 C_g は中心波長の分散によって容易に決定される。したがって、それぞれのチャンネル設計される分散は C_s の適切な設定によって得られる。しかし、図 9 に示すように、線形チャープされたサンプリング周期のチャープレートはただ一つなので、各点に対して相対誤差を最小にするように直線を描き、チャープレートとして傾きを用いる。

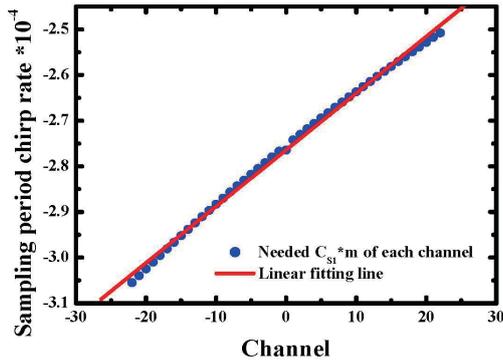


図9 $C_{s1}(m) \cdot m$ の値と $C_{s1}(m)$ を表す近似直線

5-2 分散と分散スロープの同時補償器のため51チャンネル位相のみサンプルドFBG

まず、第3章に紹介した設計方法を用いて、51チャンネル位相のみサンプルドFBGの設計を行い。図10は51チャンネル位相のみサンプリング関数のプロファイル及びフーリエスペクトルである。図11は設計した51チャンネルFBGの屈折率変調のプロファイルを表す。屈折率変調の最大値は 5.8×10^{-4} であり、水素をドーピングした感光性ファイバによって作られる。対応する反射スペクトルを図12に示す。補償器は51チャンネルで、チャンネル間隔は0.8nmである。設計したサンプルドFBGの反射スペクトルはサンプリング周期を線形にチャープした影響を受けているが、すべての反射スペクトルの最大誤差は高々0.25dBであり、51チャンネルに対してはとても小さいものである。

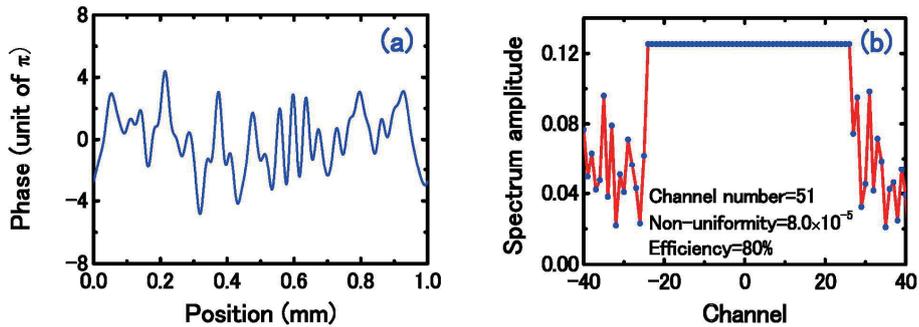


図10 51チャンネルサンプリング関数 (a) 位相プロファイル, (b) サンプリング関数フーリエスペクトル。

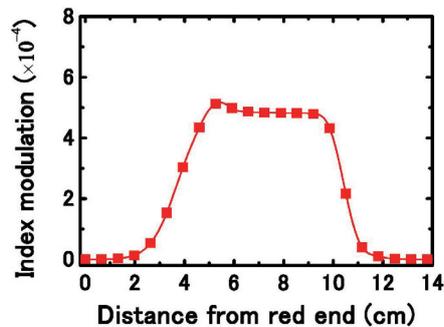


図11 設計したFBGの屈折率変化

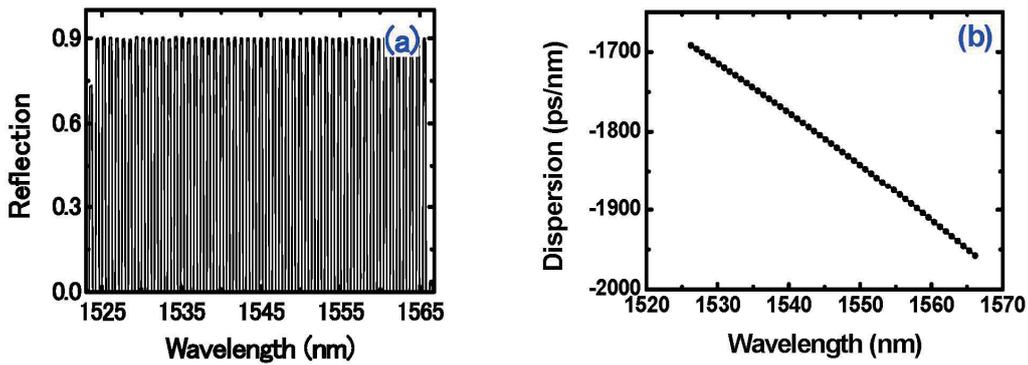


図 1 2 設計した 51 チャンネル FBG の反射スペクトル(a) 反射スペクトル(b)分散スペクトル

次に、数値計算結果を確認するため、いくつかの 51 チャンネル FBG を製作した。図 1 3 は 1 つの典型的な 51 チャンネル FBG での測定結果を示す。チャンネル間隔 100GHz、使用可能帯域幅 0.4nm(1dB 帯域)、波長分散(1545nm に)約 -1650ps/nm 。波長分散スロープ -5.6ps/nm^2 が得られていることが分かる。これらの結果は我々の設計データととてもよく一致する。サンプリング周期はグレーティングの位置に沿って線形に変化するので、分散はチャンネル指数 m に対して正確に直接的に比例するわけではない。分散とチャンネル指数との関係は図 1 3 のような線形的に近似することによって正確に示される。

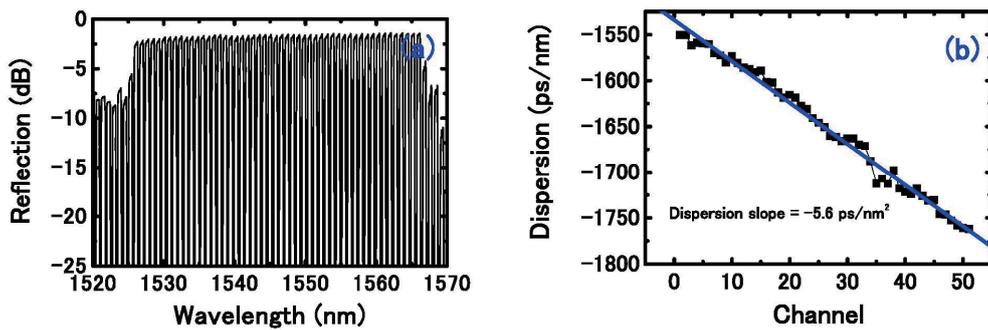


図 1 3 51 チャンネル FBG の実験データ (a) 反射スペクトル、 (b) 各チャンネルの分散スペクトル。

6 おわりに

本研究では、位相シフトマスクの近界回折効果と製作誤差が考慮された、新しい連続的な位相のみのサンプリング関数を提案した。優れたチャンネル均一性と高い帯域内エネルギー効率を持つ 45、51 と 81 チャンネルサンプリング関数の最適化が、焼きなまし演算法を用いて成し遂げられた。試作したデバイスの反射及び群遅延時間の波長依存性を測定した。ほぼ C バンド全体の分散補償のための 45 チャンネル(間隔 100GHz) と 81 チャンネル(間隔 50GHz)FBG 広帯域分散補償器が得られていることが分かった。また、チャンネル間隔 100GHz、使用可能帯域幅 0.4nm(1dB 帯域)、波長分散(1545nm に)約 -1650ps/nm 。波長分散スロープ -5.6ps/nm^2 、ほぼ全 C バンドに分散と分散スロープの同時補償できる 51 チャンネル FBG が得られていることが分かった。製作した FBG の測定結果は理論的結果とよく一致することを明らかにした。

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
非対称サニャックループ干渉計による多チャンネルファイバブラッググレーティングの分散特性の測定	電子情報通信学会 2008 総合大会 C-3-89(2008)	2008. 3
Advanced design of a complex fiber Bragg grating for multi-channel triangular filter	電子情報通信学会 2008 総合大会、電子情報通信学会総合大会、C-3-90(2008).	2008. 3
Chromatic dispersion measurement for multi-channel FBG based on a novel asymmetrical Sagnac loop interferometer	<i>OSA Topical meeting BGPP, Quebec(Canada), 2007, Paper. BTuB3</i>	2007. 9
Influences of Writing-Beam Size on the Performances of Dispersion-Free Multi-Channel Fiber Bragg Grating	<i>CLEO/Pacific Rim 2007, Seoul (Korea), 2007, Paper. Thp_107.</i>	2007. 8
Advances in the design and fabrication of high channel-count fiber Bragg gratings	<i>OECC/IOOC 2007, Yokohama(Japan), Paper. 13C3-1.</i>	2007. 7

学術論文

1. “Influences of writing-beam size on the performances of dispersion-free multi-channel fiber Bragg grating,” M. Li and H. Li, *Optical Fiber Technology*, Vol. 14, No. 4, In Press (2008).
2. “Reflection equalization of the simultaneous dispersion and dispersion-slope compensator based on a phase-only sampled fiber Bragg grating,” M. Li and H. Li, *Optics Express* Vol. 16, No. 13, pp. 9821-9828 (2008).
3. “Chromatic dispersion measurement for multi-channel FBG based on a novel asymmetrical Sagnac loop interferometer,” M. Li and H. Li, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 19, No. 20, pp.1601-1603 (2007).
4. “Advances in the design and fabrication of high channel-count fiber Bragg gratings,” H. Li, M. Li, Y. Sheng, and J. E. Rothenberg, *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 25, No. 9, pp. 2739-2750 (2007).