

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ファイバブラッググレーティングの高性能化と光通信デバイス応用に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	若林信一
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第7780号, 授与年月日:2009年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:水本 哲弥
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第7780号, Conferred date:2009/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

ファイバブラッググレーティングの高性能化と 光通信デバイス応用に関する研究

2009年9月

若 林 信 一

目次

第1章 序論	4
1-1 研究の背景	4
1-2 光通信用ファイバブラッググレーティング及び関連デバイスの研究動向	7
1-2-1 ファイバブラッググレーティング	7
1-2-2 合分波機能	8
1-2-3 分散補償, 光符号化	12
1-2-4 信頼性	14
1-3 本研究の目的	15
1-4 本論文の構成	16
第2章 光通信用ファイバブラッググレーティングの基本特性	19
2-1 はじめに	19
2-2 ファイバブラッググレーティング	19
2-2-1 構造と基本原理	19
2-2-2 種類とその設計	23
2-2-3 作製方法	29
2-3 ファイバブラッググレーティングの基本特性	31
2-3-1 反射特性／帯域特性	31
2-3-2 群遅延特性／分散特性	32
2-4 光通信へのファイバブラッググレーティングデバイスの応用例	33
2-5 ファイバブラッググレーティング及び応用デバイスの課題	37
2-6 まとめ	39
第3章 光通信デバイス用ファイバブラッググレーティングの高性能化	40
3-1 はじめに	40
3-2 広帯域化及び低群遅延リップル化のための設計	41
3-2-1 広帯域化のためのアポダイゼーション手法	41
3-2-2 低群遅延リップル化のための最適設計	45
3-3 広帯域チャープファイバブラッググレーティングの作製方法	54

3-4 広帯域チャープファイバブラッググレーティングの基本性能	58
3-4-1 反射特性	58
3-4-2 群遅延特性	59
3-5 まとめ	62
第4章 超高速伝送用ファイバブラッググレーティング型可変分散補償デバイス	63
4-1 はじめに	63
4-2 温度制御機構による可変分散補償デバイス	63
4-2-1 可変分散補償技術の必要性	63
4-2-2 温度制御による可変分散補償	65
4-2-3 デバイス構成	67
4-3 デバイス特性	69
4-3-1 反射特性／群遅延特性	69
4-3-2 可変分散特性	71
4-3-3 可変分散スロープ特性	72
4-4 超高速伝送への応用	73
4-4-1 超短光パルス伝送	73
4-4-2 160Gb/s 伝送システムへの適用	75
4-5 可変分散補償デバイスモジュール	78
4-6 まとめ	80
第5章 アナログ伝送用ファイバブラッググレーティング型固定分散補償デバイス	81
5-1 はじめに	81
5-2 分散補償用ファイバブラッググレーティングの設計と試作	83
5-3 ファイバブラッググレーティングによるアナログ伝送歪の補償	85
5-3-1 アナログ伝送システム	85
5-3-2 アナログ伝送2次歪の補償	86
5-4 ファイバブラッググレーティングリップルと伝送歪	87
5-4-1 波長分散で生じる2次伝送歪(理論計算)	88
5-4-2 ファイバブラッググレーティングリップルに起因する局所分散	91
5-4-3 変調帯域に応じた分散と2次伝送歪	93

5-5	まとめ	97
第6章	ファイバブラッググレーティングを用いた光符号化デバイス	98
6-1	はじめに	98
6-2	ファイバブラッググレーティングを用いた光符号化用スペクトル分離素子	98
6-2-1	スペクトル分離素子の提案とその設計	99
6-2-2	スペクトル分離素子の試作とその特性	102
6-3	フェムト秒パルスを用いたスペクトル領域の光符号化	104
6-3-1	スペクトル分離素子による多チャンネル波長の切り出し	104
6-3-2	フェムト秒パルスを用いたスペクトル領域の光符号化	106
6-4	光 FFH-CDMA における WDMA 多チャンネル一括符号器	110
6-4-1	サンプルグレーティングを組み合わせた一括符号器	110
6-4-2	多チャンネル一括符号化実験	112
6-5	まとめ	113
第7章	結論	115
7-1	本研究で得られた結論	115
7-2	将来の展望	117
付録		119
謝辞		122
参考文献		125
本研究に関する発表		132
本研究に関する発表論文		132
本研究に関する学会発表		132
その他の発表		136

第1章 序論

1-1 研究の背景

近年、光アクセスネットワークによる各種サービスがより身近な存在になって来ており、2007 年末の日本におけるブロードバンド回線の契約数は、2,830 万契約(対前年比 9.9%増)に達し、DSL(Digital Subscriber Line)契約数が 1,313 万契約で対前年比 7.7%減と減少傾向にある一方、FTTH(Fiber to The Home)契約数は同 42.7%増の 1,133 万契約と増加しており、ブロードバンド契約数に占める FTTH の割合は 40%を超えた。契約純増数の推移を見ると、DSL は純減傾向が続いている一方、FTTH は 2004 年以降一貫して純増となっており、FTTH がブロードバンド契約の増加をけん引している[1]。(なお、2008 年 6 月末段階の速報値によると FTTH 回線が 1300 万件を超え、DSL 回線を上回った。光回線普及率(人口ベース)は 10%強。)

今後、地上波デジタル放送の開始に伴う映像コンテンツの流通量の増大や携帯電話等の無線通信の高速化、個人間でのデジタルデータのやり取り等のため、通信トラフィックがさらに増大していくことは論を待たない。FTTH 回線という広帯域通信インフラが充実されることで、新しい広帯域サービスが始まり、それらがさらに次の広帯域インフラへつながるといふ正のスパイラルへと進んでいくものと思われる。

そのような環境下において、通信トラフィックの増大を支える最重要インフラの一つは光通信ネットワークである。今後も FTTH 回線数の増加やさらなる高速化はもとより、物理的な上位層である、コア(幹線)ネットワーク及びメトロネットワークも含めて全てのネットワーク階層において、高速大容量化が求められてくる。また、一方で、これまでは電気伝送が主流であった短距離伝送においても、機器間やモジュール間のもとより、チップ間の信号伝送にも光通信技術を利用していこうとする光インターコネクション技術や光配線技術も精力的に研究開発が行われている。このように、全ての物理階層において、光のポテンシャルを活かした“光化”が進んでいる。

これまでの光通信実用化の歴史では、デバイスやシステムを高速化・大容量化に対応させる研究開発を行い、従来よりも高機能化を図ることで、高速大容量化を実現し、結果的にビット当たりの伝送コストを低減させてきた。それは、公衆網や大陸間海底ケーブル等の電話回線網で用いられるデジタル伝送方式において、1980 年代から 90 年代中頃までの時間多重(TDM: Time Division Multiplexing)方式の進展による伝

送容量拡大に加え、90年代の光ファイバ増幅器開発がブレークスルーとなった波長多重(Wavelength Division Multiplexing)方式が加わり、大幅な伝送容量の増加が図られてきた。今後もその流れに沿った形での研究開発が推進されていくものと思われる[2].

また、実用化されている光通信方式にはデジタル方式の他にもアナログ伝送方式がある。このアナログ伝送方式は、映像信号や無線信号等のアナログ電気信号をそのまま光強度へ変換して伝送する方式であり、同軸線を用いた既存設備との親和性が高いことから、光CATVシステム等が比較的 low コストで構築できるため多用されている[3].

光通信や光伝送では、デジタル方式やアナログ方式にかかわらず、ほとんどのシステムでは複雑な信号生成や信号処理は電気領域で行われている。低損失で無誘導、波長多重化が容易等の特性を生かして光で伝送を行うことで、それぞれ電気と光とが得意分野を分担し、全体としての高いパフォーマンスを得ていると言える。しかしながら、信号生成や信号処理等の機能を光領域で実現させるための新たなアプローチがある[4]. 例えば、光領域でのスイッチング、信号符号化、メモリ動作等のデバイス開発が試みられている、

光ファイバは光信号を伝送する線路であり、光の入力信号を損失なく高品質を維持したまま伝送するための導波路と言える。伝送速度が大きくなり、波長多重や入力信号のハイパワー化等に伴って、光ファイバの損失低減や分散制御等の伝送路としての特性を制御した様々な光ファイバが開発され、さらにそれらの光ファイバをどのように伝送路全体として組み合わせて構築するかといった分散マネジメントの方法も同時に研究開発が進展した[5-7].

一方、光ファイバは単なる伝送路としてだけでなく、その特性をうまく利用して光学的機能を発現させる機能性デバイスとしても注目され、様々な研究開発が試みられてきている。光ファイバカプラやファイバ型偏光素子等の受動型光ファイバデバイス、光ファイバ増幅器に用いられるエルビウムドープファイバに代表される能動型光ファイバデバイス、光ファイバ中での非線形現象である誘導ラマン散乱を用いた光ファイバラマン増幅媒体や4光波混合を用いた波長変換器等の非線形型光ファイバデバイス等に分類されている[8]. また、クラッドやコアへの空孔を設ける新しい構造を持ったフォトリソニック結晶ファイバと呼ばれるファイバデバイスも登場している[9].

本研究の対象であるファイバブラッググレーティング(以下 FBG と略す)は、光ファイ

バのコア中に周期的屈折率変化による回折格子を形成し、その周期に応じた波長を反射する光フィルタを基本とする光ファイバ型デバイスである。その構造をベースに、新しい機能の創造、従来機能の伸長や効率化を伴った置換、小型化や低コスト化による代替等を図ることができる。応用デバイスも多くの種類が提案されている[10-16]。

また、FBG は光ファイバに追加的に構造を付与することができるため、例えば、伝送路である光ファイバとの接続が低損失で行えること、取り扱いが容易であること、光ファイバを利用する装置との組み合わせが容易なこと、構造制御によるデバイス特性を変化させることが可能であること等が特長である。

筆者が研究に着手した 1990 年代後半は、FBG 自身の特性を発現させる物理的なオリジンについては未解明な部分があったが、多くのデバイス提案やその試作がなされ、システムにおける評価が進められ始めた時期であった。その後、研究は物理的な基礎的な部分からシステム応用まで着実に進展していると言える。

しかしながら、現在までも、FBG はその機能性やデバイス応用展開性、小型化・低コスト化への可能性は示されているものの、実用システムに適用できるレベルには到達できていないと考えられる。それは、FBG 自身の高性能化や信頼性向上が不十分であるとともに、デバイスとしての突出した特長(例えば、他のデバイスでは実現できない機能、桁違いの特性向上、桁違いの低コスト化等)が示されていない。また、その特長を生かすシステムを提示できていない。

光通信に関する最近の状況としては、超高速光パルスの発生や伝送、制御に関する技術が進展し、ピコ秒からサブピコ秒の超短パルスを扱うことが容易になってきた。高速デジタル方式では実用化レベルで1波長あたりの伝送速度が 40Gb/s を越え、研究開発レベルでは 100Gb/s を越える伝送速度も示されている。一方、通信トラフィックのボトルネックが幹線系よりもメトロ系やその下の階層にあると言われており、伝送ルートの変更やハブの追加等が頻繁に行われるようなケースでは、伝送距離の変更等に対応したきめ細かで柔軟な光ファイバ網の構築が求められるようになっている。

光通信システムの研究開発の流れと現在の状況を鑑みて、FBG の持つ本質的なポテンシャルを活かすために、FBG 自身の高性能化、デバイス提案とその開発、適用すべきシステムの提示等が求められている。ネットワークの“光化”を進展させ、省エネルギーへの対応、安全・安心に配慮した設計等を満足する光通信インフラの高度化を図るため、全体最適を考慮したデバイスやシステムの特性を向上させることが現在の要請である。また、FBG の信頼性向上に関しては、作製条件による違いによる経時変

化等の安定性に関する詳細検討, また, デバイスとして安定動作させるための温度補償技術やその実装技術, システム内で安定動作させるためのフィードバック制御技術等が実用システムへの導入にとって必要な研究課題である.

1-2 光通信用ファイバブラッググレーティング及び関連デバイスの研究動向

光通信用 FBG とその関連デバイスの研究動向を概説する. 約30年前の光ファイバにおける光誘起屈折率変化の発見からの FBG 単体の研究動向を述べた後, デバイスの中でも代表的機能である, 合分波機能, 分散補償, 光符号化に着目し, そのデバイス応用に関する研究動向について述べる. また, 最後に FBG の信頼性についても述べる.

1-2-1 ファイバブラッググレーティング

FBG は光ファイバへの紫外線照射により屈折率が増加する「光誘起屈折率変化」を利用したものであり, 1978 年に Hill らによってこの現象が発見された[17]. 当時は, ファイバに入射された前進波とファイバ端面での反射による後退波の干渉によるグレーティングであったため, 反射波長がファイバに入力されるレーザ光波長に依存し, 任意の波長のグレーティングが形成できないという問題があった. その後, 1989 年に Meltz らによりファイバ側面方向から紫外線を照射し, コア内に任意の周期でグレーティングを作製する方法が提案された[18]. また, 1993 年にはファイバを水素で高圧処理することで感光性を高めることに成功し[19], FBG の特性向上が図られたために開発が加速した.

FBG の形成方法では, 1995 年前後まではレーザ光を分岐させた後に干渉させ, 干渉縞を用いてコア部分に周期的な屈折率変化を生じさせる前述した二光束干渉露光法[18]が多く用いられていたが, その後, 位相マスクを用いてレーザ光の干渉縞を形成する方法が主流となっている[20,21]. これは, 位相マスクパターンによって干渉縞のピッチを光ファイバの長手方向に変化させるチャープグレーティング構造の形成や, 長尺 FBG の製造等, 位相マスクを用いる方法が簡便でかつ再現性に優れていることが要因である. しかしながら, 最近では低コスト化のアプローチとして, 多波長化の試みやアポダイゼーション技術の導入[22]等, 二光束干渉露光法も見直されている.

FBG のデバイス応用としては, 主に計測用と通信用とに大別される. 計測用途では,

歪センサ、圧力センサ、温度センサ、化学センサ等が提案され、監視用システムやセキュリティシステム等への導入が検討されている[23-25]。通信用途については、波長フィルタ、波長ルータ、Add/Drop 回路、光源用の外部共振器ミラー、分散補償デバイス、光符号化／複合化等の様々なデバイスやシステムが提案されており、第2章で詳述する。

なお、FBG の範疇には入らないが、FBG と同様な屈折率変調構造を用いた長周期ファイバグレーティングも、光ファイバ増幅器用の利得均一化デバイスや光減衰器へのデバイス応用が進められている[26,27]。

1-2-2 合分波機能

次に、FBG と同様な構造もしくは同様な機能を有する光通信デバイスの研究動向について概略を述べ、それらの中での FBG の位置づけを俯瞰する。

FBG は光ファイバのコア中に周期的に屈折率変化を与えて回折格子を形成し、その周期に応じた波長を反射する光フィルタを基本とするデバイスである。そこで、このような回折光を利用する FBG のフィルタ・分波器としての構成と特性を、同様な回折光を利用する構造を持つ他のフィルタ・分波器と比較して示したのが表 1-1 である。この表には、①空間伝搬型、②アレー導波路回折格子 (AWG: Arrayed-waveguide Grating) 型、③FBG 型について示してある。なお、干渉を用いてフィルタ・分波器として動作する、ファブリペロー構造や多層膜構造は除いてある。

①空間伝搬型は、回折格子に入射した光がブラッグ条件を満足する方向に回折することを利用し、波長に応じて回折方向が異なる(回折角が分散性を有する)ため、フィルタとしての機能だけでなく分波器としても機能する。個別光部品で構成されており、性能は高いものの安定性やサイズに課題がある。

②AWG 型は、石英系のプレーナ光波回路 (PLC: Planar Lightwave Circuit) 技術を用いて開発された合分波デバイスであり、N 個の入出力導波路、スラブ導波路領域、およびそれらを結ぶ隣同士の導波路間で導波路長差 ΔL を有するアレー導波路から構成される。アレー導波路を伝搬する際に導波路長差 ΔL に応じた位相差が与えられ、出力側スラブ導波路内で互いに干渉し出力導波路に集光する。その際の位相差は波長に応じて異なるため角度分散が生じ、各波長に応じて異なる出力導波路から出力される。火炎堆積法 (FHD: Flame Hydrolysis Deposition) と反応性イオンエッチング (RIE: Reactive Ion Etching) を用いて正確な導波路パターンが形成され、空間伝搬型

の機能を光導波路で構築したものであり、低損失、高精度加工性が良いこと等が優れている[28]. しかしながら、光ファイバとの結合損失や導波路損失がやや大きく、温度安定性に課題がある.

③FBG 型は光ファイバ自身に回折格子を形成することから、ファイバとの結合の容易性、安定性には優れるものの、狭帯域フィルタとしての機能以外を付与するためには、特別な構造を導入すること等、別な機能を付加する必要がある.

FBG の特徴は、光ファイバ中に構造を形成し、光ファイバ中に機能を作り込むことができる点にある. つまり、デバイスとして使用する場合の光ファイバとの低損失結合による親和性が良いことが挙げられる. 空間伝搬型にせよ平面回路型にせよ、光ファイバ伝送に用いる際には必ず光ファイバ伝送路との低損失結合が必要となるため、FBG 型デバイスのこの特徴は必ず活かされる. また、デバイスの構成部品として光ファイバがベースであることから、機械的な安定性や信頼性が高いこともデバイスとしては重要な要素である.

また、FBG 型デバイスと空間伝送型や平面回路型のデバイスの同時使用は可能であり、空間伝送型や平面回路型と併用することで、光領域における機能を分担し、それぞれの特徴を補完的に利用することも可能であると考える.

表 1-1 回折光を利用するフィルタ・合分波器[7,28]

種類	構成	特性
空間伝搬型		
AWG型		
FBG型		

1-2-3 分散補償, 光符号化

光通信システムでの「分散補償」と「光符号化」に関して, FBG を利用する「分散補償」と「光符号化」は第2章以降で詳述することとして, 主に FBG 以外の方式による研究動向の概略を述べる.

「分散補償」には「能動型」と「受動型」がある. 「能動型」には非線形効果を利用して位相共役波[29]やソリトン[30]を発生させる, 外部位相変調器を利用してプリチャージングを行う[31], 電氣的にプリチャージを与える[32]等のものがあり, 「受動型」には第2章で述べる FBG 型を除いて, 分散補償ファイバや PLC 等を用いるものがある. ここでは, 「受動型」の分散補償ファイバ, ホーリーファイバ, PLC 及び VIPA (Virtually Imaged Phased Array) について延べる. また, 「可変分散補償」及び「可変分散スロープ補償」についても述べる. (分散には2次分散(通常“分散”と呼ばれる)以外に, 3次分散(分散スロープと呼ばれる分散の波長依存性, すなわち分散を波長で微分した値)以上の高次分散も存在する. 本論文では, 2次分散を“分散”, 3次分散を“分散スロープ”と表現することとする.)

「光符号化」では AWG について述べる.

(1)分散補償

分散補償ファイバ(DCF: Dispersion Compensation Fiber)は, 既設の $1.3\mu\text{m}$ 帯シングルモードファイバ(SMF)を, EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)が使用可能な $1.55\mu\text{m}$ 帯での高速信号伝送路として使用するために用いられる. SMF は $1.55\mu\text{m}$ 帯において約 17ps/nm/km の分散を有するため, その値をキャンセルするために絶対値が大きくかつ負の分散値を持つことが要求される. そのため, コアとクラッドの屈折率差を大きくし, コア径を小さくすることにより, 材料分散よりも構造分散の影響を大きくしてその特性を達成する. 代表的な DCF は, マッチドクラッド型, W 型, セグメントコア型がある. マッチドクラッド型は構造が単純であり, 低損失性・製造性に優れるが, 分散スロープ(分散の波長依存性)は SMF と同様に正值であるため, 伝送路全体が小さい値になる波長範囲は狭い. W 型及びセグメントコア型はマッチドクラッド型に比べ損失は大きい, 分散とともに分散スロープも負値にすることが可能であり, 補償された伝送路全体の分散を広い波長範囲にわたり小さな値とすることが可能となる. ただし, DCF は分散や分散スロープの変動を補償するための可変分散補償器としての機能の達成は困難である[7].

ホーリーファイバ(Holy Fiber, フォトニック結晶ファイバ(Photonic Crystal Fiber)とも呼ばれる)は, クラッド部に数 μm の空孔を設けることにより実効屈折率を下げファイバ内に大きな屈折率差を実現する. このため, 高 NA (Numerical Aperture), 大きいモード分布, 高非線形性という特徴を持つ. 分散特性としては, 空孔の大きさ等によって構造分散を大きく設定することができるため, 分散特性の制御性に優れており, ゼロ分散波長が赤外から可視光領域まで幅広く変化させることができる[9].

PCF のコア径を $1\mu\text{m}$ 程度に小さくすることで導波路分散を正常分散側へ大きく変化させ, 分散補償ファイバへの応用が考えられる. また, シリカの材料分散の分散スロープとほぼ逆の導波路分散スロープを持つよう設計することも可能で, 広い波長範囲で分散フラットな光ファイバが実現できる. 特に, 分散スロープと絶対値が同時に反転した導波路分散を持つよう設計することもでき, ゼロ分散かつ分散フラットな光ファイバも可能である. さらに, $1.55\mu\text{m}$ 帯で非常に大きな異常分散を持つため, 通常の SMF (17ps/km/nm @ $1.55\mu\text{m}$) の約 $1/5$ の長さで同等の機能を得ることができる[33].

PLC 型分散補償器は, 時間領域での光波の多重干渉を用いる光フィルタであり, 遅延線(非対称マッハツェンダ干渉計), 結合率可変カップラ(対称マッハツェンダ干渉計), 位相調整部(熱光学効果型位相シフタ)から構成されており, 図 1-1 に PLC 型分散補償器を構成するラティス型光回路を示す. 長いアームには短波長の信号が, 短いアームには長波長の信号が伝搬するよう調整されて負の分散を有する分散補償器として機能する. カップラの結合比調整と位相シフタの調整により可変特性を実現できるが, 狭帯域な特性である(ただし, 特性の周期性を利用して1つのデバイスで WDM 信号に対応可能である)[34].

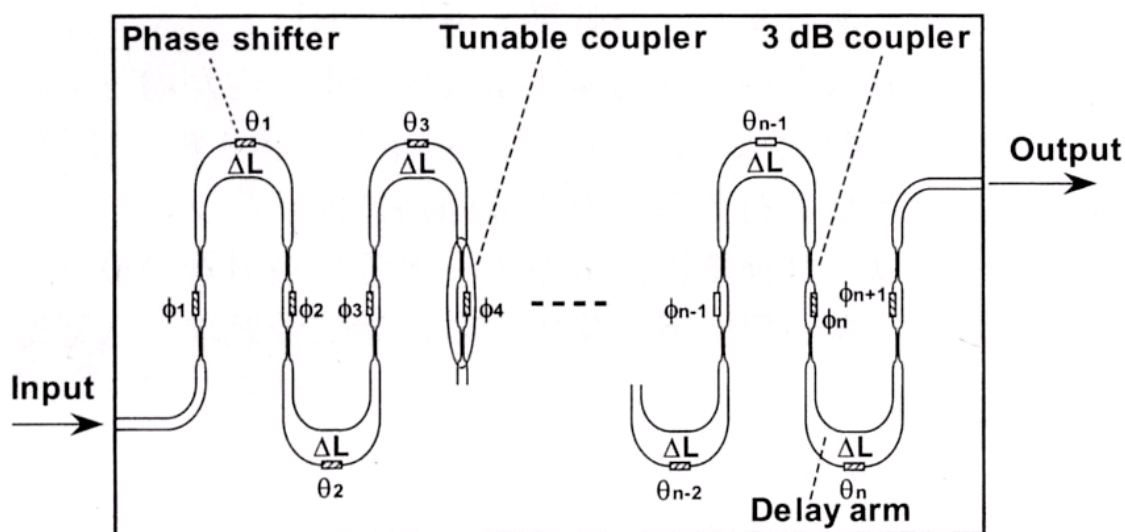


図 1-1 PLC 型分散補償器を構成するラティス型光回路[34]

VIPA は、薄膜の両面に反射膜をコーティングした波長分散素子 (VIPA 板)、反射ミラー及びコリメータレンズ、焦点レンズ等で構成されており、波長の違いによって形成されるビームウエストの位置が変わることで、波長に応じて光の走行距離を変化させる。図 1-2 に VIPA 型分散補償器を示す。

3 次元ミラーを平行移動させることにより、ミラーの反射位置を変えることで、勾配の異なる位置で反射するために光の出射方向が変化する。従って、3次元ミラーの形状に適当な勾配を形成することで波長に応じた光の走行距離 (遅延時間) を付与できるので、可変の分散補償機能を得る。また、回折格子を挿入することで、分散スロープの可変補償も可能と言われているが、実現例はまだない。空間的にミラーを移動させることの安定性、VIPA 板で数%程度しか光を利用できないために挿入損失が 10dB 程度とやや大きいことが課題である[35,36]。

分散補償器の性能指数を「分散 / 損失」で定義すれば、性能指数と帯域では DCF が優れており、PLC 型は可変性や小型化には有利であるが、フィルタ型構成であるため帯域特性が劣る。第2章で述べるチャープ FBG 型は性能指数も優れており、可変性も有するが、従来は帯域が PLC 等のフィルタ型構成と同程度であることが大きな課題であった。

なお、「可変分散補償」は様々な方式によるデバイス応用例が報告されているが、「可変分散スロープ補償」については FBG を用いた方式以外では今のところ実現されていない。

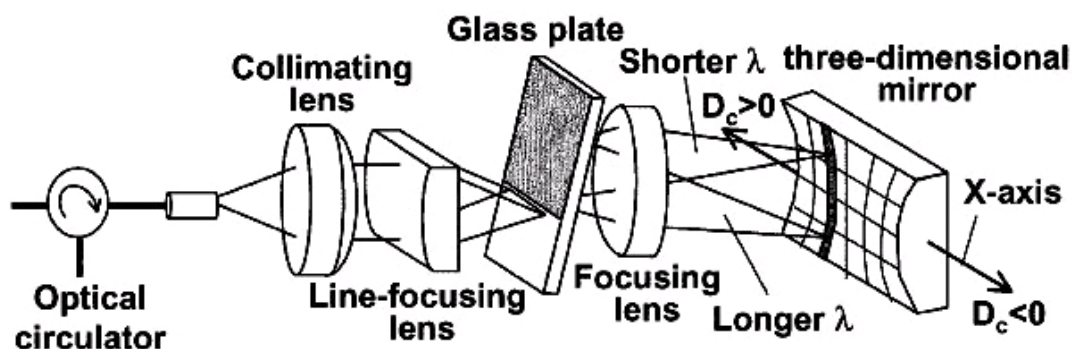


図 1-2 VIPA 型分散補償器[36]

(2) 光符号化

「光符号化」に関しては、AWG を利用して光信号のスペクトルを操作し、各種の光信号処理に適用することが提案され[37]、光符号分割多重 (OCDM: Optical Code Division Multiplexing) へ応用できることが報告されている[38]。また、AWG による光信号処理では周波数分解された各スペクトルに対して位相や振幅制御を行う必要があるが、その分光性能を向上させるための導波路内のミラー構造の導入やレンズの形状の形成等の試みがある[39]。

1-2-4 信頼性

FBG の信頼性に関しては、作製時の露光条件の違いによる経時変化の安定性等に関する詳細検討が必要である。また、作製される光ファイバの特性や FBG 形成前の高圧水素ロード条件による信頼性試験を着実に進めることも重要である。作製時には露光中の温度上昇に伴う経時変化を抑制するために、あらかじめ熱処理を施す試みも行われている[40]。

一方、デバイスとして安定動作させるための温度補償技術やその実装技術、システムとして安定動作させるためのフィードバック制御技術等が実用システムへの導入にと

っては必要な研究である. FBG の反射中心波長は約 $+0.01\text{nm}/^\circ\text{C}$ の温度依存性を持つが, この温度依存性を補償する実装技術として線膨張係数の FBG パッケージに関する研究がある. 例えば, 線膨張係数の異なる2種類の金属を組み合わせた構成とすることで, FBGに対して負の線膨張を与え, 一桁近い温度依存性の改善を図ることが可能となる. さらに, これらの温度補償パッケージを用いたデバイスの高温及び高温高湿試験(2000 時間)や温度サイクル試験における信頼性試験が行われている[41].

狭帯域フィルタのように中心波長変動の厳密なコントロールが必要な場合では, 上記温度補償技術等を行うことでシステム導入が可能な信頼性が確保される. なお, 利用する波長幅に余裕がある場合には, 中心波長変動があっても利用温度環境に応じたFBGの広帯域化を行うことでも信頼性を確保できる.

1-3 本研究の目的

本研究は, 光通信システムの高速度大容量化, 伝送距離の変化や伝送ルートの変更, ハブやノード等の追加による複雑な光ファイバ網の構築, デジタルとアナログとのハイブリッド伝送化等, 光通信ネットワークの高度化に対応するため, デバイスとしてのファイバブラッググレーティング(FBG)を高性能化し, さらにそれらを用いた研究に基づく, 新たな通信デバイスの提案とその実証を行うことを目的としている.

FBG の高性能化に対しては, 広帯域化と低群遅延リップル化を両立させるための屈折率分布, サイズ等の最適設計と, それを実現する露光方法の開発と FBG 作製を行うことで, 光通信デバイスに適用可能な FBG の実現を目指した. また, 具体的に新たな光通信デバイスとして, ①可変分散補償デバイス, ②固定分散補償デバイス, ③光符号化デバイスをそれぞれ提案し, 設計・試作を行うことで光通信システムへの FBG の応用可能性を明らかにする.

本研究の意義は, FBG の性能を高めるための方策並びにFBGを応用したデバイスに関する技術的知見を得ることである. さらに, それらの理解を基に, FBG の持つ本質的な優位性(光ファイバ内への構造形成による小型軽量, 取り扱いの容易性, 光ファイバとの接続)を活かしたシステムやサブシステムを提示し, ネットワークの高度化に“光領域”で対応する通信インフラ構築への一助となることにある.

1-4 本論文の構成

本論文は、今後さらに高度化する光通信システムにおける FBG の機能デバイスとしての高性能化を図り、さらに、光通信システムへの応用可能性を検討し、まとめたものである。具体的には、シミュレーション等に基づく理論検討並びに実デバイスの設計・作製を試みており、全7章で構成されている。本論文の構成と各章のつながりを図 1-3 に示す。

第1章では、本研究の背景となる光通信システム全般の状況と其中での FBG 研究開発の位置づけについて述べ、光通信用の FBG 及び関連デバイスの研究動向の概略を示し、本論文で述べる FBG の高性能化とそれを用いた光通信デバイスを開発する目的について示す。また、本論文の構成について述べる。

第2章では、光通信用 FBG の基本特性を検討する。FBG の基本原理、その種類と設計手法、作製方法について説明し、FBG の基本特性である帯域、反射特性、群遅延特性／分散特性について述べる。FBG の光通信への応用例を示し、従来の FBG 及び応用デバイスの問題点、課題について整理し、開発すべき内容を明らかにする。

第3章では、まず、FBG に要求される基本性能である広帯域化並びに低群遅延リップル化を両立させるための設計として、アポダイズ関数及びそのパラメータ比較による最適化、屈折率分布の階段状分割数によるシミュレーションを行う。次に、実デバイスを想定したサイズで実現するための FBG 形成方法の最適化についての検討結果を述べ、作製した FBG の諸特性を示すことで、光通信デバイスに適用するための FBG の高性能化が図れることを明らかにする。

第4章では、FBG の応用デバイスとして、超高速伝送用可変分散補償デバイスについて述べる。可変分散補償デバイスの必要性、使用するシステム構成、温度制御機構を導入する優位性、提案するモジュール構成を示す。作製したモジュールは C バンド全域をカバーする広帯域性を有しており、超高速伝送に対応する可変分散／可変分散スロープ特性を持つ。モジュールの超高速伝送への応用として、超短光パルス伝送並びに 160Gb/s 伝送システムに適用し、超高速伝送へ十分に適用可能であることを示す。

第5章では、FBG の応用デバイスとして、アナログ伝送用固定分散補償デバイスについて述べる。まず、アナログ伝送で発生する歪が波長分散と光源のレーザチャープで発生することを理論的に示す。次に、変調条件に応じたレーザ光のスペクトル広がり

を求め、その広がりを基に群遅延リップルから算出した“局所分散値”が 伝送2次歪の大きさを決定していることを明らかにする。それらから、FBG によるアナログ伝送歪の低減に関し、設定すべきシステムパラメータ等について考察する。

第6章では、FBG を用いた光符号化デバイスについて述べる。FBG を用いた光ファイバのカプラ構造によるスペクトル分離素子、それを用いた多チャンネルスペクトルの分離、スペクトル領域の光符号化について示す。また、CDMA 方式における WDMA 多チャンネル一括符号器としてサンプルグレーティングと温度制御を組み合わせた一括符号器の提案とその符号化実験結果について述べる。

第7章は、本論文の結論として、FBG の高性能化とそれらを用いた光通信デバイスへの応用についての研究成果を総括するとともに、本研究の将来展望として、提案した FBG 並びに FBG 応用デバイスが、光ファイバネットワークの大容量化やより複雑な網構成を実現していくためのキーデバイスとして重要な役割を果たすことを述べる。

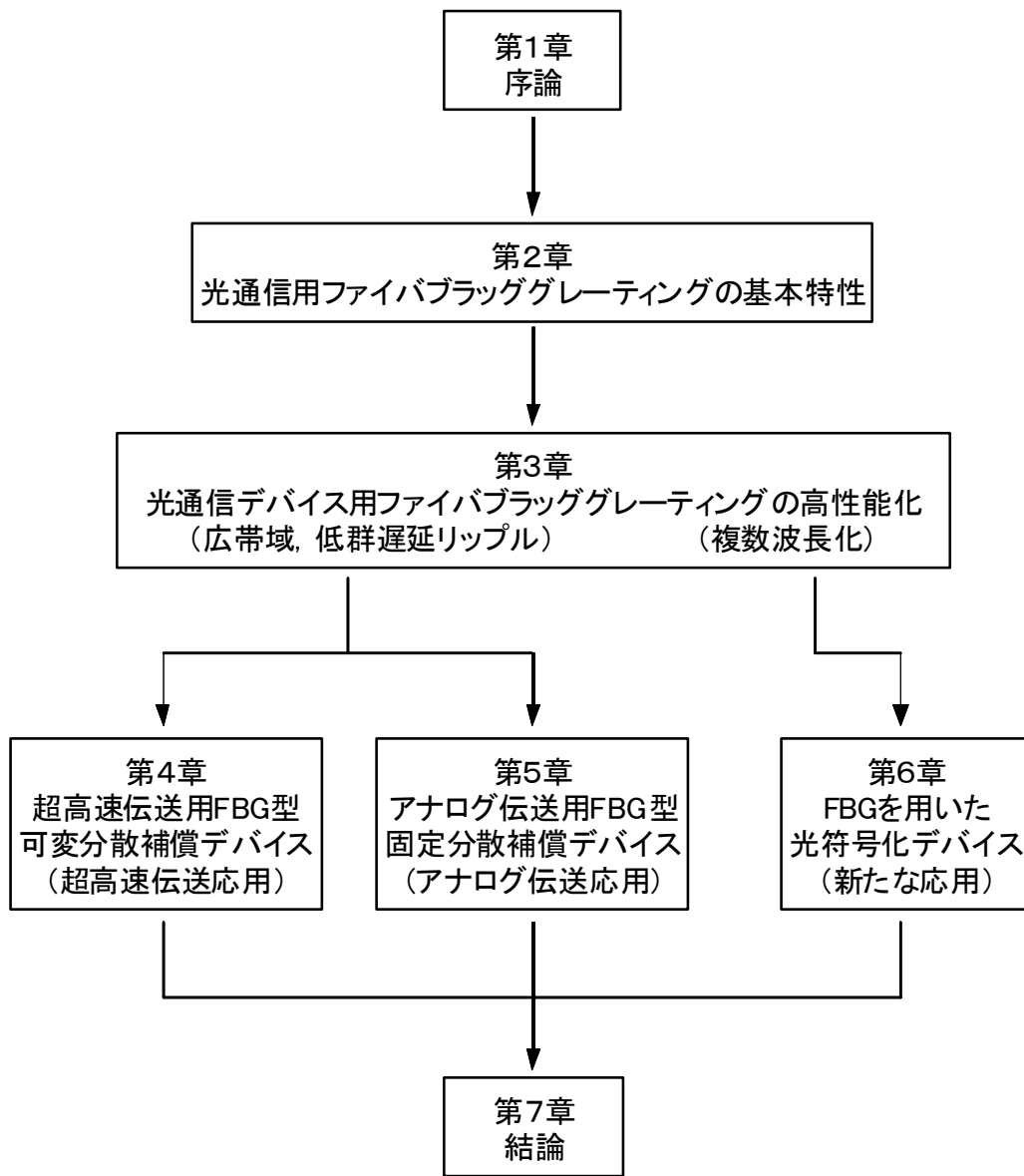


図 1-3 論文の構成

第2章 光通信用ファイバブラッググレーティングの基本特性

2-1 はじめに

ファイバブラッググレーティング(FBG)は基本的可能性の提示から30年程度が経過し、紫外線照射による屈折率増加現象の解明やその解析・分析をはじめ、製造方法の改良、設計手法の開発、応用デバイス開発やその実用化まで、波長多重通信システムへの適用のみならず、例えば可視光レーザ用反射ミラーとして大出力光源へ適用すること等、幅広い応用が検討されている。

本章では、FBGの基本特性について検討する。まず、FBGの構造とその動作原理、短周期FBGやチャープFBG等のFBGの種類とその設計、二光束干渉法並びに位相マスク法を用いたFBGの作製方法について示す。次に、FBGの基本特性として、本研究でも用いた短周期FBG及びチャープFBGの帯域特性、反射特性、群遅延特性／分散特性のこれまでの特性を例示し、それらの諸特性を用いた光通信への応用デバイス例を示す。

最後に、これまでのFBG及びそのデバイスの問題点、課題について示し、それらを解決するために行った本研究の要点について述べる。

2-2 ファイバブラッググレーティング

2-2-1 構造と基本原理

FBGは、光ファイバコアの屈折率を長さ方向に周期的に変動させて回折格子を形成し、その周期に対応する光の波長を反射する機能を持つ。ブラッグ波長にほぼ等しい波長を持つ光が選択的に反射されることを利用した反射型フィルタと言える。図2-1にFBGの構造図を示す。ブラッグ波長 λ_B (真空中の波長)は、伝搬モードの実効屈折率を n_{eff} 、グレーティングの周期を Λ ($\sim 0.5\mu\text{m}$)としたとき、 $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ ($\sim 1.55\mu\text{m}$)で与えられるが、反射特性等はグレーティングの層数や屈折率変化量に依存する。

回折格子の形成はゲルマニウム Ge(GeO_2 分子の状態)が添加されたコアを有する光ファイバに、波長が240nm付近の紫外光を照射することで屈折率が増加する現象を利用する。この紫外線誘起屈折率変化のメカニズムは完全には解明されていないが、Ge添加ガラスの酸素欠陥として生じているGe-Si結合欠陥が、紫外光エネルギー

で切断されて Ge-E' センタと呼ばれる欠陥に光化学的に変化し、新たな吸収帯による吸収スペクトルの変化がクラマースクローニツヒの関係によって屈折率変化として生ずる[42,43]という機構が一般的な理解である。また、前述した Ge-E' センタと、その際に生じた電子がトラップされた Ge(1)や Ge(2)で示される構造体との間に形成される双極子モーメントが光電場の軸に沿って配向し、ガラス内に形成される電場によって電気光学効果を引き起こして屈折率変化が生じる双極子モデルや、紫外光照射によってガラス結合が切断されガラス構造が潰れて密度が増大し屈折率が上昇する圧縮モデルなども提案されている[44].

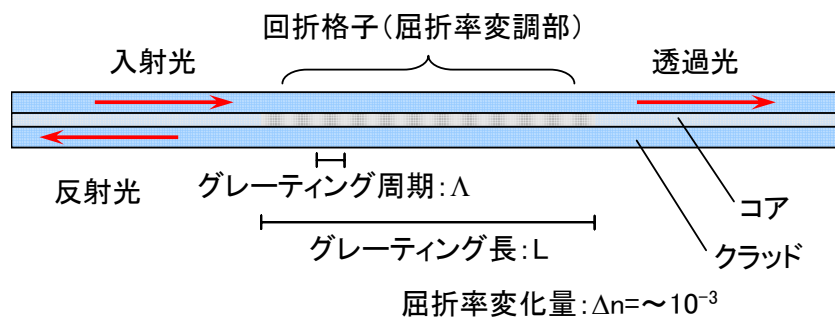


図 2-1 ファイバブラッググレーティングの構造

上記の屈折率変化メカニズムに従えば、Ge が高濃度になるほど欠陥数が増えるために屈折率変化が大きくなる。しかしながら、高濃度に Ge が添加された状態の光ファイバではコアとクラッドの屈折率差が大きくなるために通常使用から大きく逸脱してしまい、通信用途には望ましくない[11]。一方で、通常のシングルモードファイバのままでは Ge の濃度が低いために 10^{-4} 程度のわずかな屈折率変化しか得られなかった。しかし、高圧水素充填により光ファイバの紫外光に対する感光性が飛躍的に増大することが発見され、通常の光ファイバでも 10^{-3} 以上の大きな屈折率変化が容易に得られるようになった[19].

なお、別な見方をすれば、FBG の特性は使用する光ファイバの種類や光ファイバの前処理方法で大きく変化させることが可能であるため、通常のシングルモードファイバとの直接接続を伴わない場合や通信用途以外に用いる場合、例えば、分散補償ファイバや Ge 高濃度添加ファイバにグレーティングを形成する等、必要に応じて光ファイ

バを使い分けることも有効な手段である。

次に結合波方程式を用いた FBG の反射特性の解析について示す。光ファイバの長さ方向に z 軸をとり、グレーティング部を $0 \leq z \leq L$ として、この部分でのコアの屈折率 $n(z)$ が

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cdot \cos(Kz) \quad (2-1)$$

$$K = 2\pi/\Lambda \quad (2-2)$$

と表されるとする。 n_0 はグレーティング部のコアの平均屈折率、 Δn は屈折率変化量、 Λ はグレーティング周期である。このグレーティングは真空中の波長がブラッグ波長 λ_B 近傍の光を反射するフィルタとなる。

$$\lambda_B = 2n_0\Lambda \quad (2-3)$$

なお、平均屈折率 n_0 の代わりに実効屈折率 n_{eff} (光導波路内を伝搬する光の伝搬定数を波数で規格化: 光ファイバを伝搬する光が感じる平均的な屈折率であり、通常はコアとクラッドの屈折率の中間値) で表現する場合もあるが、コア屈折率を n_{core} としたとき、 $n_{eff} \cong n_0 \cong n_{core} + \frac{1}{2}\Delta n$ となるために、ここでは n_0 を用いる。

$\Delta n/n_0 \ll 1$, $\Lambda/L \ll 1$ が成立するとき、 λ_B 近傍の反射特性を結合波理論から解析する。ファイバ中を λ_B の光が伝搬している時、それを $+z$, $-z$ 方向に進行する成分に分け、それぞれの電界の複素振幅を $A(z)$, $B(z)$ とおく。全電界を E として

$$E = A(z)\exp(-j\beta z) + B(z)\exp(j\beta z) \quad (2-4)$$

$$\beta = 2\pi n_0/\lambda_B \quad (2-5)$$

とおくと A , B は次の結合波方程式に従う。 β は伝搬定数である。

$$\begin{aligned} dA/dz &= -j\kappa B \exp(2j\delta z) \\ dB/dz &= j\kappa A \exp(-2j\delta z) \end{aligned} \quad (2-6)$$

$$\kappa = (\pi \Delta n / \lambda_B) \eta, \quad \delta = \beta - \pi / \Lambda \quad (2-7)$$

ここで κ は結合係数であり, η はコア領域に含まれる伝搬光のエネルギーの割合である. ファイバに $z=0$ で光が入射した場合の境界条件 $A(0)=1, B(L)=0$ より, (2-6)式を解くと,

$\kappa^2 - \delta^2 \geq 0$ の場合

$$A(z) = \frac{-\{\delta \sinh[S(z-L)] + jS \cosh[S(z-L)]\}}{\delta \sinh(SL) - jS \cosh(SL)} \exp(j\delta z) \quad (2-8)$$

$$B(z) = \frac{\kappa \sinh[S(z-L)]}{\delta \sinh(SL) - jS \cosh(SL)} \exp(-j\delta z) \quad (2-9)$$

$$S = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2} \quad (2-10)$$

$\kappa^2 - \delta^2 \leq 0$ の場合

$$A(z) = \frac{-\{\delta \sin[Q(z-L)] + jQ \cos[Q(z-L)]\}}{\delta \sin(QL) - jQ \cos(QL)} \exp(j\delta z) \quad (2-11)$$

$$B(z) = \frac{Q \sin[S(z-L)]}{\delta \sin(QL) - jQ \cos(QL)} \exp(-j\delta z) \quad (2-12)$$

$$Q = \sqrt{\delta^2 - \kappa^2} = jS \quad (2-13)$$

グレーティングのパワー反射率は, (2-8)式で $z=L, B(L)=0$ とおいたときの

$R = |B(0)|^2 / |A(0)|^2$ で与えられる. すなわち,

$$R = \begin{cases} \frac{\kappa^2 \sinh^2(SL)}{\delta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)} & (\kappa^2 - \delta^2 \geq 0) \\ \frac{\kappa^2 \sin^2(SL)}{\delta^2 - \kappa^2 \cos^2(SL)} & (\kappa^2 - \delta^2 < 0) \end{cases} \quad (2-14)$$

となる.

ピーク波長における反射率は, (2-14)式において $S = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2} = \kappa$ とおくことにより,

$$R_B = \tanh^2(\kappa L) = \tanh^2\left(\frac{\pi \Delta n \eta L}{\lambda_B}\right) \quad (2-15)$$

で与えられる. また, 反射スペクトルの帯域幅(入射光の波長を λ_B から離調したとき最初に反射率が 0 となる λ_B の両側の波長間隔で定義)は,

$$\Delta\lambda_B = \left\{ \frac{\lambda_B^2}{\pi n_0 L} \right\} \sqrt{\pi^2 + (\kappa L)^2} = \left\{ \frac{\lambda_B^2}{\pi n_0 L} \right\} \sqrt{\pi^2 + \left(\frac{\pi \Delta n \eta L}{\lambda_B} \right)^2} \quad (2-16)$$

で表せる[7,12].

(2-15)式, (2-16)式から, $\kappa L \gg 1$ のときは, グレーティングを長くすると反射率 R_B は 1 に漸近し, L の増加による $\Delta\lambda_B$ の狭窄効果は小さくなりスペクトル帯域幅 $\Delta\lambda_B$ は $\lambda_B(\Delta n/n_0)\eta$ に近づく. 一方, $\kappa L \ll 1$ のときは, グレーティング長を長くすると L^{-1} 特性に従い $\Delta\lambda_B$ は狭くなるが, 反射率は小さい. FBG の光学的特性は, 屈折率変化量, グレーティング周期, グレーティング長の 3 つのパラメータで主に決定される. 例えば, $n_0 = 1.46$, $\lambda_B = 1555 \text{ nm}$, $L = 5 \text{ mm}$, $\Delta n = 3 \times 10^{-4}$, $\eta = 1$ の時には, $R_B = 0.990$, $\Delta\lambda_B = 0.460 \text{ nm}$ となる.

2-2-2 種類とその設計

ファイバグレーティングは周期構造の違いにより, (1)短周期グレーティング, (2)長周期グレーティング(LPFG: Long Period Fiber Grating)の2種類に大別できる. 短周期グレーティングは, ブラッグ波長に等しい波長を持つ光が選択的に反射されること利用し

たものであり、ファイバブラッググレーティング (FBG) とも呼ばれる。

長周期グレーティングは、グレーティング周期 Λ が数 $100\mu\text{m}$ 程度であり、コアを伝搬してきた光をクラッドモードへと結合させる条件で用いられる。クラッドモードを速やかに減衰させることにより、特定の波長領域のみに損失を与えるフィルタとして機能する [26,27]。ブラッグ波長の光を反射させる FBG とは異なるメカニズムであり、FBG が反射型フィルタと呼ばれるのに対して、長周期グレーティングは放射型フィルタとも呼ばれる。

短周期グレーティング (FBG) はさらに、①単一周期 FBG、②チャープ FBG、③その他 (例えば、サンプル型 FBG やスラント型 FBG 等) の3種類に分類できる。単一周期 FBG は、前項で述べたように、基本的には狭帯域のフィルタであり、その特性である反射率や帯域は屈折率変化量、グレーティング周期、グレーティング長の3つのパラメータで主に決定される。ただし、フィルタとしては、ブラッグ波長の両側に現れるサイドローブを抑圧する特性が要求されるため、そのためアポダイズという手法が用いられているが、これについては後述する。

(1) チャープ FBG

チャープ FBG (CFBG: Chirped Fiber Bragg Grating) は、グレーティング周期をファイバの長手方向に連続的に変化させた構造を持ち、ブラッグ波長 λ_B が連続的に変化することで、帯域阻止フィルタなどの比較的広い反射帯域が要求される用途や分散補償に用いられる。

その他の例として、ここではサンプル型 FBG とスラント型 FBG を紹介する。サンプル型 FBG は、屈折率変調構造にサンプリングをかけたものであり、くし状の等間隔の反射スペクトルをもつ。図 2-2 にファイバ長手方向の屈折率分布と反射スペクトルの概略を示す [8]。多チャンネルのフィルタや多チャンネルの分散補償器、光符合等に用いられる。

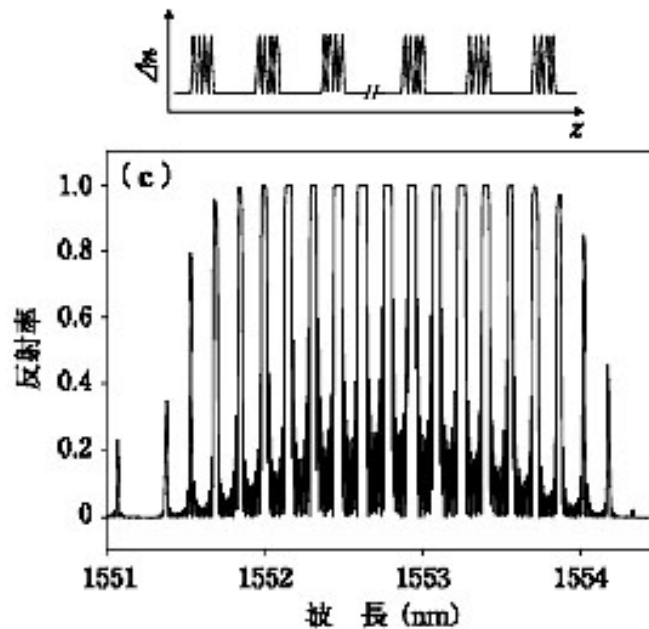


図 2-2 サンプル型 FBG[8]

スラント型 FBG とは、グレーティングの屈折率変調している面がファイバ軸に対して垂直ではなく、数度傾けてある構造の FBG である。図 2-3 にスラント型 FBG の概略を示す。この傾斜により、反射モードへの結合が減少し、クラッドモードへの結合による複数の損失ピークが大きくなる[16]。FBG をチャープ FBG にすると、これらのピークが波長方向に移動しながら連続的に重ね合わせられるため、特性としては長周期グレーティングと同様な損失スペクトルを実現することができる。これらを利用して、光ファイバ増幅器用の利得均一化デバイス等へ応用が進められている[45]。

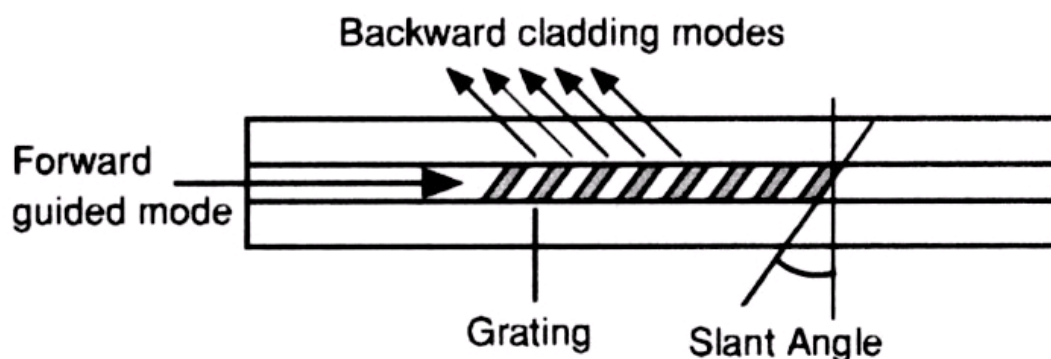


図 2-3 スラント型 FBG[16]

(2)アポダイズ

FBG の設計にあたってのアポダイズ手法について延べる. アポダイズ手法はブラッグ波長の両側に現れるサイドローブを抑圧するものであり, 単一周期 FBG にもチャープ FBG にも適用でき, 特に, 厳しい遮断特性が要求される WDM フィルタには最適である.

図 2-4(a)-(c)は通常の FBG とアポダイズを施した FBG のそれぞれの屈折率変調と反射スペクトルを計算より示したものである[46]. 図 2-4(a)はファイバの長手方向に均一な屈折率分布とその反射スペクトルであり, ブラッグ波長の両側にサイドローブが現れており, 所望のアイソレーションが得られずフィルタとしての切れ味を阻害している.

図 2-4(b)は屈折率変調が FBG の中心位置で最大となるように屈折率変調の振幅に分布を形成したアポダイズが施された FBG の反射スペクトルである. この場合, サイドローブを小さくする効果がある. 反射ピークの短波長側にリップルが生じているのはグレーティング両端付近の有効屈折率がグレーティングの中心付近の有効屈折率より小さいため, 両端付近の Bragg 波長がわずかに短波長へシフトし, 両端で共振器を形成しているためである.

このリップルをなくすためには, 有効屈折率がファイバの長軸方向で均一であるアポダイズを施さなければならない. 図 2-4(c)のように有効屈折率がファイバの長軸方向で均一であるアポダイズを施すと, 短波長側のリップルもなくなり, 消光比が大きい FBG を実現できる. 屈折率の包絡線関数としては Gauss 関数や tanh 関数等が利用されている[47,48].

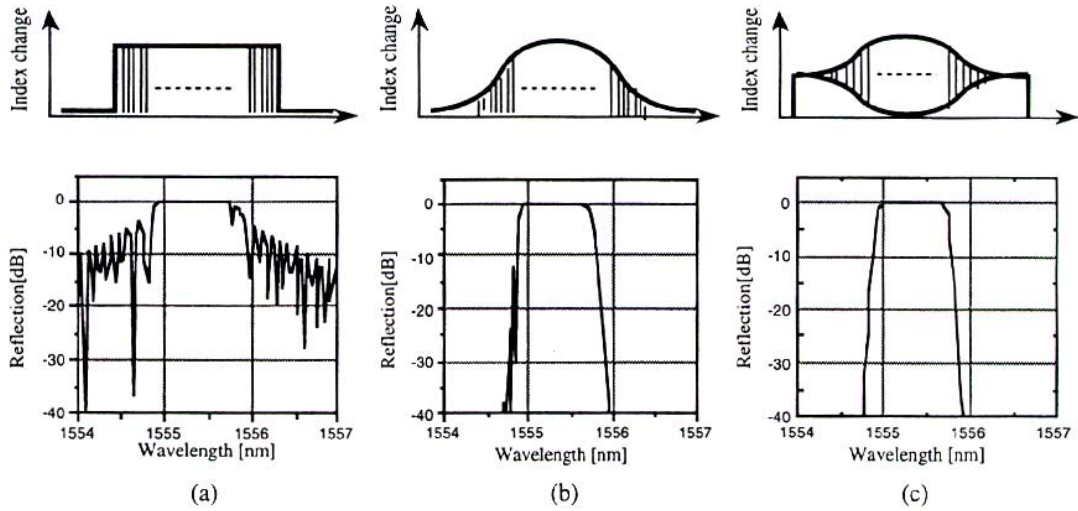


図 2-4 FBG の屈折率変調と反射スペクトル[46]

次に、主に分散補償に用いられるチャープ FBG 設計法として、分散とチャープ量、帯域幅等との関係について述べる。

チャープ FBG の分散を D (ps/nm) は、群遅延を τ (ps) とすると、波長 λ (nm) に対して、

$$D = \frac{\partial \tau(\lambda)}{\partial \lambda} \quad (2-17)$$

で与えられる。多くの場合、群遅延は波長に対して線形関数で十分に近似することができる。従って、分散 D を波長によらない定数であると仮定すれば、群遅延を τ 及び波長 λ に対して(2-18)式で記述できる。

$$D = \frac{\tau_L - \tau_S}{\lambda_L - \lambda_S} \quad (2-18)$$

λ_L , λ_S 及び τ_L , τ_S は考慮している範囲での波長、群遅延時間を表す。グレーティン

グ長を L , 中心のグレーティング周期を $\Lambda_0^{(CFBG)}$, チャープ量を $ch^{(CFBG)}$ とすると,

$$\Lambda^{(CFBG)}(x) = \Lambda_0^{(CFBG)} + x \cdot ch^{(CFBG)} \quad (2-19)$$

となる. チャープ量とは単位長さ当たりの変化量である. ここで x は中心からの距離であり, グレーティングの中心で $x=0$ である. CFBG 両端での周期はそれぞれ(2-20)式, (2-21)式で与えられる.

$$\Lambda_S^{(CFBG)} = \Lambda_0^{(CFBG)} - \frac{L}{2} \cdot ch^{(CFBG)} \quad (2-20)$$

$$\Lambda_L^{(CFBG)} = \Lambda_0^{(CFBG)} + \frac{L}{2} \cdot ch^{(CFBG)} \quad (2-21)$$

また, 実効屈折率を n_{eff} とすると両端のブラッグ波長はそれぞれ(2-22)式, (2-23)式で与えられる.

$$\lambda_S = 2n_{eff} \Lambda_S^{(CFBG)} = 2n_{eff} \left(\Lambda_0^{(CFBG)} - \frac{L}{2} \cdot ch^{(CFBG)} \right) \quad (2-22)$$

$$\lambda_L = 2n_{eff} \Lambda_L^{(CFBG)} = 2n_{eff} \left(\Lambda_0^{(CFBG)} + \frac{L}{2} \cdot ch^{(CFBG)} \right) \quad (2-23)$$

チャープ FBG での近端で反射される光に対して遅延はないとする ($\tau_S = 0$) と, 遠端反射での群遅延時間は, (2-24)式で表される.

$$\tau_L = \frac{2L}{v} \quad (2-24)$$

ここで, v は群速度であり, (2-24)式は(2-25)式のように表すことができる.

$$\tau_L = \frac{2L}{c/n_{eff}} \quad (2-25)$$

ここで、 c は真空中の光速を表す。従って、分散 D とチャープ量 $ch^{(CFBG)}$ との関係は (2-26) 式の通りとなる。

$$D = \frac{\tau_L - \tau_S}{\lambda_L - \lambda_S} = \frac{1}{c \cdot ch^{(CFBG)}} \quad (2-26)$$

実際のチャープ FBG の設計においては、分散値とともに帯域幅を考慮する必要があり、帯域幅はグレーティング長と(屈折率で換算された)チャープ量との積で与えられる。

最後に、短波長側透過帯域損失(クラッドモード結合損)について述べる[15]。紫外線誘起屈折率変化は Ge が添加されたコア領域のみで生じるため、通常のシングルモードファイバに FBG を形成した場合コア部分にのみ格子が形成される。一方、シングルモードファイバ中を伝搬する光の電界分布はコアのみでなく、クラッドまでしみ出しているため、コア・クラッド界面での回折が生じてしまう。この回折光が位相整合条件を満足する波長はブラッグ波長よりも短波長側にあるため、短波長側に放射損(クラッドモード結合損)が観測される。この放射損を抑制する方法として、電界分布がしみ出す領域よりも十分広いクラッド領域にも Ge を添加して FBG を形成する感光性クラッドファイバ[49]を用いるものがある。

2-2-3 作製方法

FBG の作製は波長 240nm 付近の紫外発光域の光源を用いて、サブ μm オーダーの屈折率変調構造を得るために、紫外線の干渉パターンを光ファイバ側面から照射する代表的な作製方法(概略)を図 2-5 に示す。(a)が二光束干渉法、(b)が位相マスク法である[7]。

二光束干渉法では、グレーティング周期 $\Lambda^{(FBG)}$ 、干渉角 θ (光ファイバに対する光照射角度)、紫外線波長 λ_{UV} の関係式(2-27)を利用すると、干渉角 θ の制御によって任意のグレーティング周期 $\Lambda^{(FBG)}$ を実現できる。

$$\Lambda^{(FBG)} = \lambda_{UV} / (2 \cdot \sin \theta) \quad (2-27)$$

ビームスプリッタで紫外光を二光束に分離し、ミラーで反射した後、それらを干渉させる光学系を構成するものである[18].

一方、位相マスク法では、石英ガラス基板の表面に凹凸を形成した位相変調型の透過型回折格子である位相マスクを用いて、+1次と-1次の透過回折光の干渉パターンを形成する[20,21]. グレーティング周期 $\Lambda^{(FBG)}$ は位相マスクの周期の半分となるため、作製の再現性に優れる. また、位相マスクは凹部と凸部の高さ d を(2-28)式となるように設定することで、位相マスクの凹部と凸部で紫外線の位相を π シフトさせ、0次光の透過率を抑制することができ、干渉パターンのコントラストを高めることができる.

$$d = \lambda_{UV} / 2(n-1) \quad (2-28)$$

どちらの方法も干渉パターンを光ファイバコアに照射させることで、屈折率変調構造が形成される. 紫外光源としては、KrF (フッ化クリプトン) エキシマレーザ (波長 248nm) やアルゴンイオンレーザの第二次高調波 (波長 244nm) が多く用いられている. なお、アポダイズ手法の導入や長尺グレーティングの製作には光学系に工夫が必要である.

光ファイバの紫外光に対する感光性を増大させるため、通常の光ファイバを常温で 100~200 気圧程度の水素雰囲気中に 1 週間から 4 週間程度保持してファイバ中に水素を拡散・溶融させることで 10^{-3} 以上の大きな屈折率変化が得られる[19].

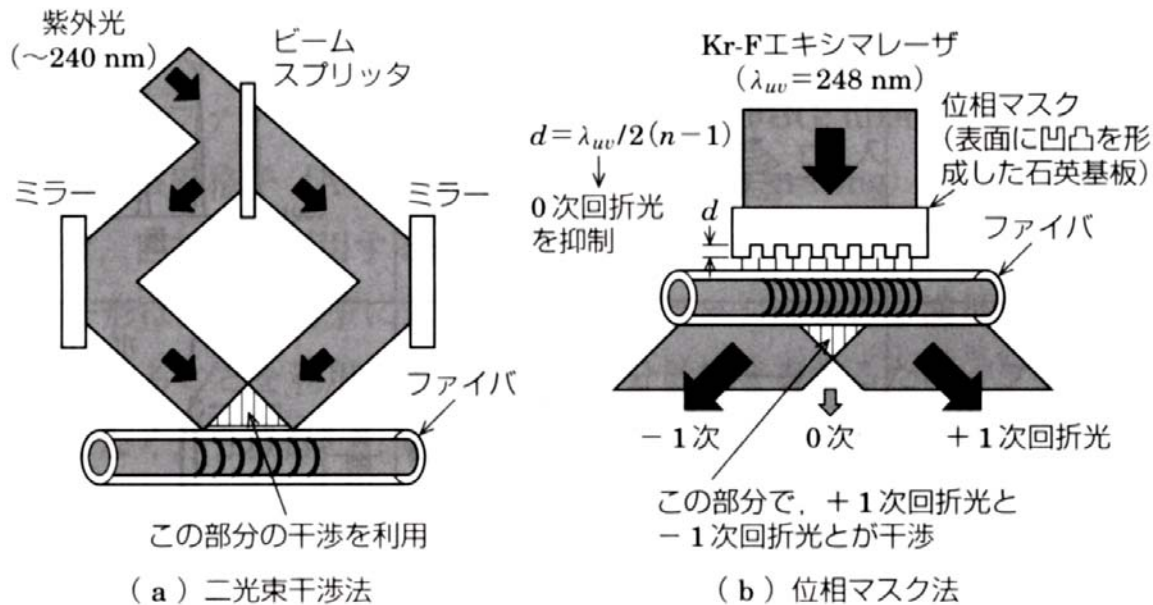


図 2-5 FBG の作製方法 (概略)[7]

2-3 ファイバブラッググレーティングの基本特性

2-3-1 反射特性／帯域特性

FBG の基本特性の一つである反射特性 (帯域特性) を単一周期 FBG の場合について述べる. 単一周期 FBG は狭帯域特性を示すが, 反射率や反射特性の急峻さ等は設計及び製造方法によってある程度は制御が可能なパラメータである.

一例として, 図 2-6 に狭帯域フィルタ特性を持つ単一周期 FBG の反射／透過スペクトルを示す. 波長間隔がそれぞれ, (a)100GHz (波長で言えば約 0.8nm), (b)50GHz (同約 0.4nm) で, DWDM 用途に開発されたものである. 屈折率周期は約 0.5 μm , グレーティング長は約 10mm であり, 隣接チャンネルにおける反射率, 反射帯域における透過率のいずれも -30dB 以下に抑制できる. また, 反射帯域に渡って反射率はフラットでほぼ 100% である[15]. 通常, 帯域を表現する際はフィルタと同様に 3dB 帯域の値が用いられる.

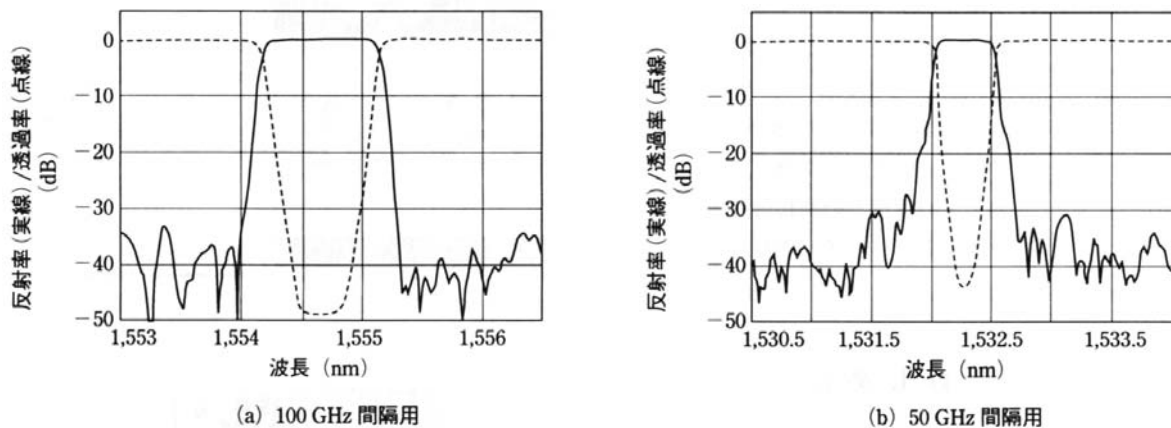


図 2-6 単一周期 FBG の反射／透過スペクトル特性[15]

2-3-2 群遅延特性／分散特性

チャープ FBG はグレーティング周期が連続的に変化している構造から比較的広い反射帯域を有する。反射波長位置が連続的に変化しているとも言えることから、反射波の応答時間の波長依存性を示す群遅延特性が一定ではなく、ある依存性を持つ。また、群遅延特性の傾き(群遅延時間を波長で微分した値)は波長分散もしくは分散と呼ばれる。通常はチャープ FBG のリップル成分を無視し、全体の傾きから算出される。

一例として、図 2-7 にチャープ FBG の反射特性及び群遅延特性を示す。(a)は中心波長 1550nm、分散が -114.2ps/nm のチャープ FBG、(b)は中心波長 1555nm で帯域、チャープ量(分散)の異なる 2 種類のチャープ FBG を示す。反射特性はフラットではなく反射帯域内に変動が見られる。反射率は 3dB から 5dB 程度のロスがある[50]。2-2-2項で述べたように、チャープ FBG の特性のうち、分散とチャープ量及びグレーティング長はそれぞれ独立には決められず、特定の関係で結ばれている。

例えば、チャープ FBG を分散補償に用いる場合の設計では、通常はファイバ伝送路の持つ分散量に応じて FBG のチャープ量(例えば、位相マスクを使用して形成する場合には位相マスクのチャープ量)、中心波長をまず決定し、次に伝送システムに応じて必要とされる帯域からグレーティング長を決める。

群遅延特性の反射帯域内での変動成分、すなわち群遅延リップルは反射信号の波形を歪ませる要因となり、高ビットレートのデジタル伝送システムにおいてビットエラー

一の増大が懸念される。また、群遅延リップルはアナログ伝送システムにおける歪やノイズ成分を増大させる原因となることが予想される。FBG はブラッグ反射を用いて、分散補償ファイバと比べれば極めて短い距離で分散補償を行うため、群遅延リップルをゼロにすることはできない。

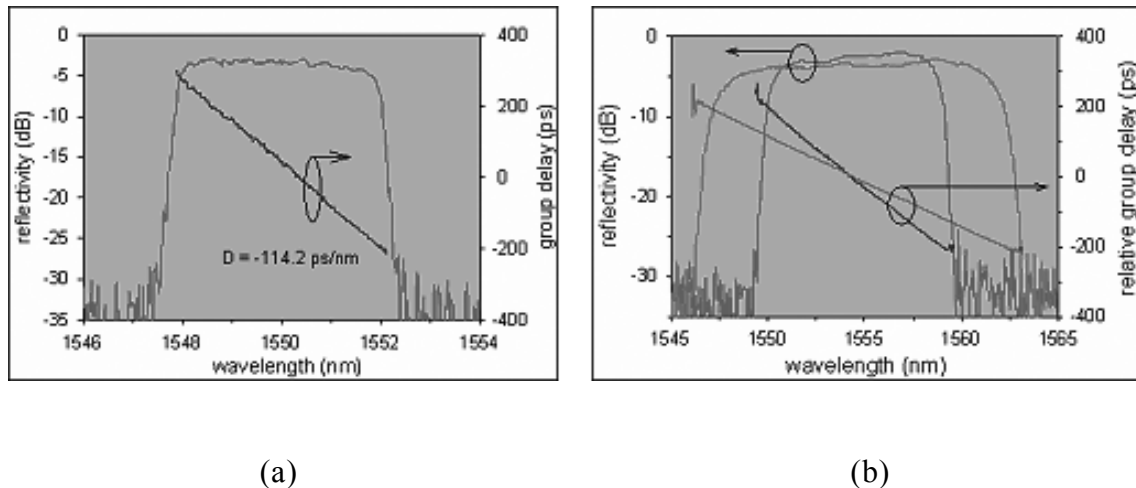


図 2-7 チャープ FBG の反射特性、群遅延特性[50]

2-4 光通信へのファイバブラッググレーティングデバイスの応用例

光通信システムに用いられる FBG 型デバイスは様々な種類が提案され、一部は実用レベルにある。2-3-1項で示した反射特性／帯域特性や、2-3-2項で示した群遅延特性／分散特性を利用し、FBG 単体もしくは他の光学部品との組み合わせや、複数の FBG を用いた構成等により機能を発現する。伝送路に挿入してインフラの一部として使用する場合や、デバイスを構成する部品として使用する場合等、使用される状況は様々である。

本項では単一周期 FBG 及びチャープ FBG の応用例として、光 ADM (Add and Drop Multiplexer)、分散補償デバイス、及び光符号化デバイスについて述べる。

(1) 光 ADM

光 ADM は FBG と3端子光サーキュレータが接続され、入力ポート、Drop ポート、Add ポート、出力ポートの4つのポートから構成される。図 2-8 にその構成例を示す。波長多重化された信号 ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$) が入力ポートに入ると、FBG のブラッグ波長に対応する波長 λ_k のみが光サーキュレータを介して Drop ポートから出力する。一方、他の波長 ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{k-1}, \lambda_{k+1}, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$) は Add ポートから入った波長 λ_k の信号とともに出力ポートに出力される。波長 λ_k のみの信号を抜き出すこと(Drop 機能)と加えること(Add 機能)が可能となる。FBG の(中心)反射波長や帯域に応じて使用できる波長範囲を設定できる。また、波長 λ_k はあらかじめ形成されたグレーティング周期に応じて設定できるが、FBG に反射波長を可変できる機構を導入することで、任意波長に対応した構成も可能になる。

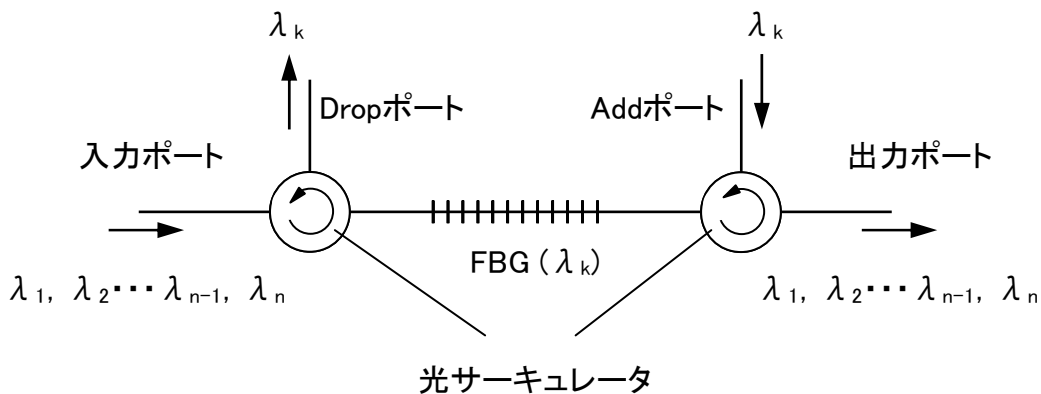


図 2-8 光 ADM の構成

(2) 分散補償デバイス

通常の SMF は $1.55\mu\text{m}$ 帯の使用波長において約 17ps/nm/km の分散を有するため、伝送距離に応じて存在する分散量をキャンセルするようにチャープ FBG の分散量が設計される。例えば、SMF で 100km 伝送の場合、分散は約 170ps/nm 存在するため、チャープ FBG には -170ps/nm の分散値が要求される。なお、光ファイバ以外の光デバイスが原因の分散はほとんどの場合無視して問題はない。

チャープ FBG を用いた分散補償デバイスの構成を図 2-9 に示す。光ファイバに入射された光パルスがある距離を伝送した後、光ファイバの持つ分散によってその光パ

ルス幅は広がる。入射時点では強度・位相が揃って短パルスを形成していたものが、光ファイバ伝送後には、光パルス前縁には波長の短い成分が、また光パルス後縁には波長の長い成分が存在するようになったと言える。このように広がった光パルスを元に戻すためには、光ファイバの持つ分散とは逆の効果を与えればよい。つまり、波長の短い成分を遠方(奥側)で反射させ、波長の長い成分を近方(手前側)で反射させることが必要になる。デバイス構成としては、チャープ FBG はグレーティング周期の大きい側をサーキュレータ側に接続すればよい。

ファイバ伝送路には分散以外に、分散スロープ等の高次分散も存在する。分散スロープ以上の高次分散の大きさは極めて微小であるため、通常の光通信システムでは伝送特性に影響を及ぼすことは少ないが、伝送速度が 100Gb/s を越えるような超高速パルスを扱う場合等に高次分散も考慮する必要がある。すなわち、高次分散が影響を与えるシステムの場合には、光ファイバ伝送路全体の分散値を高次分散まで含めて厳密に補償することが求められる。なお、チャープ FBG のリップルを除いた群遅延特性が完全に直線を示す場合、高次分散はゼロとなる。

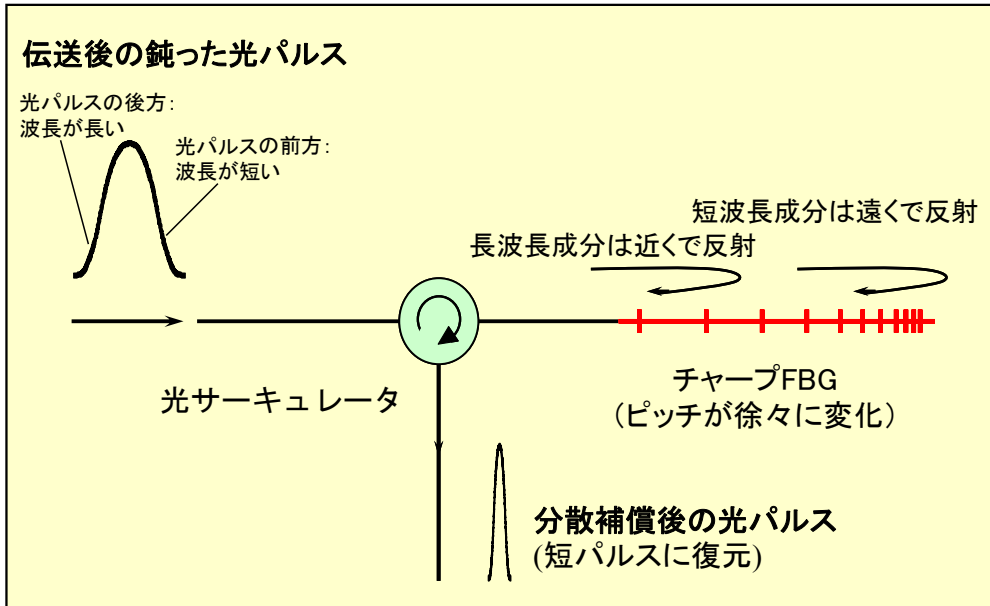


図 2-9 チャープ FBG を用いた分散補償デバイスの構成

(3) 光符号化デバイス

光符号化デバイスは光符号分割多重 (Optical Code Division Multiplexing: OCDM) に用いられる。OCDM とは伝送チャンネルごとに異なる符号を用いて信号を符号化する方式であり、これによりチャンネルを多重化する。チャンネルごとに時間スロットを割り当てる時間分多重 (TDM) や、チャンネルごとに異なる波長を割り当てる波長分割多重 (WDM) といった従来の方式に比べてチャンネルが多く確保できることや、符号ごとの帯域保証も可能になる。さらに、対応した復号器でなければ信号が再現できないため通信の秘匿性が高いといった特徴もある。また、光バーストスイッチングや光パケットスイッチングでは、コントロールパケット (ラベル) をデータ信号本体のバースト送信の前に送ってシグナリングを行い、高速にラベルを識別してフォワーディングを行うことが期待される。

FBG を用いた光符号化デバイスでは、例えば、光の波長と遅延時間の2つの組み合わせによる符号化が用いられる。波長ホッピング方式 (Fast Frequency Hopping: FFH) と言われ、異なる波長を反射する FBG を複数個ファイバ上の異なる位置に作製することで、波長と遅延時間の対からなるパターンを設定することで符号化を行う [51,52]。また、光ラベルルーティングでのラベル認識方式として、光符号を用いた方式が提案されている [53]。光符号を用いることで、自己相関/相互相関演算を光信号のままで行うことが可能となり、処理時間の短縮が実現できる。

FBG を用いた光符号化デバイスの構成を図 2-10 に示す。例えば、波長多重化されたパルス、もしくはインコヒーレント光が入力されると、符号器を構成する光源波長に対応する FBG の配置位置によって伝搬遅延による時間差が各光源波長の光パルス間に生じ、光パルス列が生成される。つまり、波長と遅延の組み合わせパターンによる符号化が行われる。復号する場合には、符号器と同一符号を用いることで、符号器で発生されたパルス間の時間差が補正され、元の波長多重化されたパルス (自己相関波形)、もしくはインコヒーレント光が得られる。もし、復号器と符号器の符号が一致しない場合には、さらに時間的に拡散されるため、自己相関波形を得ることはできない。

単一周期 FBG 及びチャープ FBG の応用ではいずれの場合においても、周囲の環境温度変動に伴う中心波長シフト (約 $0.01\text{nm}/^\circ\text{C}$) が発生する。屈折率及びグレーティング周期が温度上昇によって増加するため、その2つの変化量を考慮して対応することが実装上のポイントになる。(1) ペルチェ素子等で強制的に FBG の温度変動を抑制する、(2) 温度中心波長シフトを考慮したロバスト設計を施す、(3) 中心波長シフトとは

逆の温度特性(負の膨張温度)を持つ材料系で実装して温度補償する, 等の方法が用いられる.

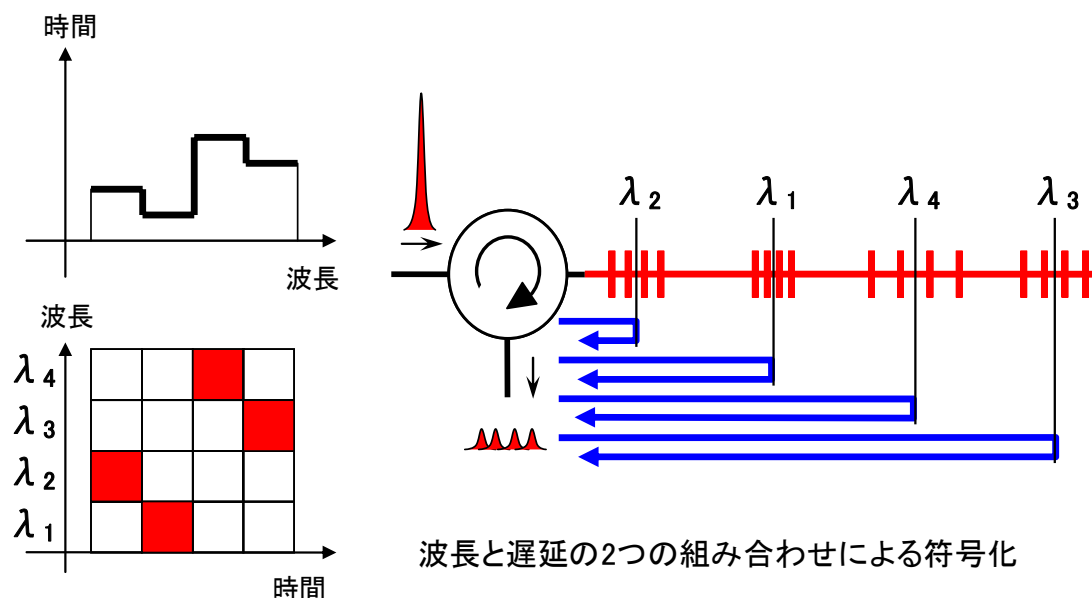


図 2-10 FBG を用いた光符号化デバイス構成

2-5 ファイバブラッググレーティング及び応用デバイスの課題

本項では FBG の課題を, (1)FBG 単体の課題, (2)FBG デバイスの課題の2つに整理して述べる. 帯域や反射特性, 群遅延や分散特性の静特性は FBG 単体ではほぼその特性が決定されるため, その特性は設計とともに作製方法に強く依存する. 一方, 各特性は必ずしも全て独立に決めることができず, 例えば, 反射率を大きくすると群遅延リップルの大きさを抑制しにくいこと等, ある制約条件の元で FBG を作製しなくてはならない. まず, FBG 単体の高性能化を図る上での課題を次に示す.

- ① C バンド全域をカバー可能な広帯域化のための適切な設計指針がない.
- ② 広帯域特性と低群遅延リップルを同時に達成するための実用的な作製方法がない.
- ③ 群遅延リップルの特性を表現する適切なパラメータがない.

また、FBGのデバイス応用の際には、その目的に応じたFBGの設計・作製以外に、特性を可変するための構造付加や実装を行うこと、帯域や反射特性、群遅延や分散特性等のFBGの各特性とデバイス特性との関係を明確にすること、新たな応用に対応するデバイス構成を提案すること等が求められる。本研究では、光通信デバイスへの応用として、可変分散補償デバイス、固定分散補償デバイス、光符号化デバイスを取り上げており、それらのFBGデバイスの課題を次に示す。

- ① OTDM/WDM混合システムにおける100Gb/sを越える超高速デジタル伝送の分散変動に対応できるデバイスがない。
- ② ①では分散とともに分散スロープを可変制御することが必要だが、その実証がなされていない。
- ③ アナログ伝送におけるFBG型分散補償の適用検討例が少なく、分散補償時の群遅延リップルと伝送特性の関係が未知である。
- ④ 光の広帯域スペクトル性を利活用できる符号化デバイスがほとんどない。

なお、②の課題に関しては、本研究とほぼ同時期にFBGへの温度印加による試みが三菱電機の研究グループによって進められていたが、この研究では、160Gb/s伝送(1波)に対応する約3-4nmの帯域を有するFBGを用いて、可変分散及び可変分散スロープ特性を実現し、160Gb/s伝送への適用可能性を示した。一方、本研究では、①FBGの広帯域化、②FBGペア構造による高精度制御、という異なったアプローチを行い、③160Gb/s伝送システムにおける可変分散スロープ補償の実証を実験的に行った。

上記に示した、(1)FBG単体の課題、(2)FBGデバイスの課題、それぞれに対応する方策及びデバイスを第3章から第6章で提示するが、各章で得られた主要な成果は次の通りである。

- ① 広帯域化と低群遅延リップルを両立するFBGの設計手法とそれを実現する作製方法を考案し、30nm以上の広帯域FBGを開発した。
- ② Cバンド全域をカバーでき、分散及び分散スロープを同時に可変補償できる温

度分布制御型の可変分散補償デバイスの設計・試作を行い、これを伝送システムへ適用してその有用性を実証した。

- ③ 分散とレーザチャープによって生じるアナログ伝送歪による特性劣化を示し、FBG の群遅延リップルに基づく局所分散パラメータを導入することで、変調度の大きさによる歪特性現象を解明した。
- ④ FBG を用いたスペクトル分離デバイスを考案し、広帯域スペクトルから複数の狭帯域スペクトルを切り出し、“スペクトル符号化変調”を実証した。また、サンプルグレーティングを用いて WDM の複数チャンネル用の一括符号化デバイスを提案した。

2-6 まとめ

本章では、光通信用 FBG の基本特性について説明した。

まず、FBG の構造、基本原理について、結合波方程式を用いた FBG の反射特性の解析を中心に述べた。次に FBG の種類(単一周期 FBG, チャープ FBG, サンプル型 FBG, スラント型 FBG)について紹介した後、アポダイズ手法とチャープ FBG の設計(分散とチャープ量, 帯域との関係)について述べた。

単一周期 FBG 及びチャープ FBG の基本特性として、帯域特性／反射特性、群遅延特性／分散特性における一般的な特性を例示し、それらの諸特性を用いた光通信への応用デバイスとして、光 ADM, 分散補償デバイス, 及び光符号化デバイスの動作原理と求められる特性を説明した。

最後に、従来の FBG 単体及びその応用デバイスの問題点、課題についてまとめた後、それらを解決するために行った本研究の要点についてまとめた。

第3章 光通信デバイス用ファイバブラッググレーティングの高性能化

3-1 はじめに

チャープ FBG を分散補償デバイスとして、超高速の OTDM/WDM 混合システムへ応用する場合には、C バンド全域をカバーできる広帯域性を有し、低い群遅延リップル特性を持つチャープ FBG を実現することが求められる。広帯域性は C バンド全域を一括補償するために必要であり、低群遅延リップル特性はビットエラーレート等の伝送品質が劣化することを抑制するために必要となる。

本章では、まず、実用デバイスを想定したときの適切なサイズ(主にグレーティング長)やチャープ FBG 作製時の再現性や安定性、効率やコスト等を考慮した上で、広帯域化特性と低群遅延リップル特性を満足する設計と、それを実現する位相マスク法による作製方法の最適化を検討した。

具体的には、チャープ FBG の中心位置で最大となるように屈折率変化の振幅に分布を形成するためのアポダイズ関数の比較と、選択したアポダイズ関数のパラメータ比較による設計の最適化を行った。また、作製時の露光条件の設定にあたっては、アポダイズ関数を階段形状で近似する際の分割数によるシミュレーションの比較から最適条件を決定した。さらに、光源の強度揺らぎの影響が少なくなる露光方法やその場観察によるチャープ FBG の高性能化のための作製手法について検討した。

最後に、作製したチャープ FBG の反射特性や群遅延特性の基本性能について示し、C バンド全域をカバーできる広帯域化と低群遅延リップル化を両立できる設計と作製方法が妥当であることについて述べる。

なお、第4章で示す可変分散補償デバイス応用については、上記のチャープ FBG を適用しているが、第5章のアナログ伝送用固定分散補償デバイスにおいては、帯域やチャープ量が異なったチャープ FBG を使用している。ただし、アポダイズ関数や作製方法については同じ手法を用いている。

また、第6章の光符号化デバイスについては、単一周期グレーティング(狭帯域特性)を有する複数の FBG を用いて検討しており、実験的な検討においても広帯域化や低群遅延リップル化の試みは適用していない。

3-2 広帯域化及び低群遅延リップル化のための設計

3-2-1 広帯域化のためのアポダイゼーション手法

分散補償を目的としたチャープ FBG の広帯域化には、カバーする帯域の異なる複数のチャープ FBG を縦続接続してトータルの帯域を大きくする方法[54]や、グレーティング長の長いチャープ FBG を作製して帯域を大きくする試み[55]等がこれまで提案されている。

WDM システムにおける分散補償は、それぞれの波長に対応したチャープ FBG を複数用意することでも対応は可能であるが、高速化に伴って1波あたりの占有する帯域が大きくなることや、光源波長のシフト、チャープ FBG の中心波長シフトがあること等から、1つのチャープ FBG で一括補償できることが望ましい。また、チャープ FBG の帯域はグレーティング長と(屈折率で換算された)チャープ量との積で与えられるため、もしチャープ量が同じならばグレーティング長を大きくすることで広帯域化は達成できる。しかしながら、デバイスサイズや可変機構付与等の実装方法を考慮すると、実用的なグレーティング長とすることが必要となる。

通常分散補償用のチャープ FBG 設計では、補償すべき分散量が決めれば、それに応じた FBG のチャープ量を設定し、必要な帯域を確保するためのグレーティング長を決める。FBG のチャープ量を大きくすることは分散量が小さくなること(すなわち分散補償量が小さくなること)に相当する。もしグレーティング長を一定とすれば、分散補償量と帯域とはトレードオフの関係にあり、言い換えれば、帯域を確保しようとするれば、分散補償量が小さくなることを意味している。つまり、帯域、分散補償量、グレーティング長の3者は独立に決定できないため、要求されるデバイス特性を考慮した上でチャープ FBG を設計しなければならない。

筆者は、C バンド(1530nm から 1565nm)全域をカバーすることができる帯域幅を、実用的なグレーティング長(100mmから200mm程度)で達成するためのチャープ FBG を目標とした。このようなチャープ FBG では当然ながら分散補償量は小さくなるが、筆者が適用を想定する超高速の OTDM/WDM 混合システムでは、SMF 伝送路に存在する大きな分散に対してはあらかじめ設置する分散量固定の分散補償ファイバで補償を行うため、チャープ FBG は残留分散(の変動分)に対応できる特性を有していれば良い。ただし、群遅延リップルは伝送特性の劣化をもたらすため、低群遅延リップル特性が求められる。

まず、広帯域化設計を行うためのアポダイゼーション手法の検討にあたり、FBG 形成におけるアポダイズ関数の比較を行う。図 3-1 に代表的なアポダイズ関数の例を示す。横軸はグレーティング長で規格化したファイバの長さ(位置)、縦軸は最大値で規格化した屈折率分布である[47].

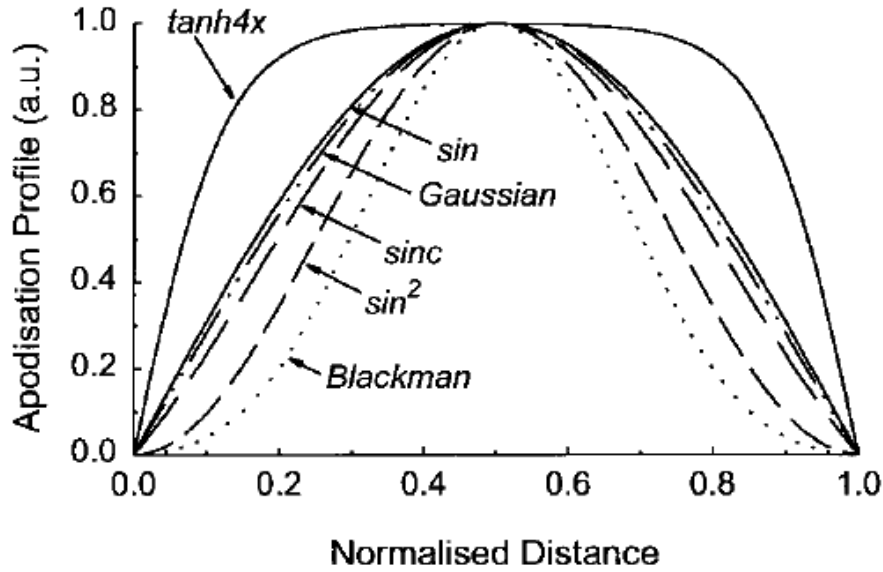


図 3-1 FBG におけるアポダイズ関数の例[47]

アポダイズ関数としては、 \sin^2 型、 \sin 型、 sinc 型、 \tanh 型(Positive tanh profile), Blackman 型、Gauss 型等が提案されており、その数式は以下に示される[47,48].

$$\sin^2: \quad f(z) = \sin^2\left(\frac{\pi z}{L}\right), \quad 0 \leq z \leq L \quad (3-1)$$

$$\sin: \quad f(z) = \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right), \quad 0 \leq z \leq L \quad (3-2)$$

$$\text{sinc}: \quad f(z) = \frac{\sin(x)}{x}, \quad x = \frac{2\pi\left(z - \frac{L}{2}\right)}{L}, \quad 0 \leq z \leq L \quad (3-3)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Positive tanh profile:} \quad f(z) &= \tanh\left(\frac{2az}{L}\right), \quad 0 \leq z \leq \frac{L}{2} \\
 &= \tanh\left(\frac{2a(L-z)}{L}\right), \quad \frac{L}{2} \leq z \leq L
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Blackman:} \quad f(z) &= \frac{1 + 1.19 \cos(x) + 0.19 \cos(2x)}{2.38}, \\
 x &= \frac{2\pi\left(z - \frac{L}{2}\right)}{L}, \quad 0 \leq z \leq L
 \end{aligned} \tag{3-5}$$

$$\text{Gauss:} \quad f(z) = \exp\left(-G\left(\frac{z}{L}\right)^2\right) \quad 0 \leq z \leq L \tag{3-6}$$

アポダイズ関数と特性との関連や、 \tanh 関数と他のアポダイズ関数との比較について解析的に示すデータはなく、現状ではFBGに要求される特性に応じてアポダイズ関数を使い分ける方法が一般的である。

図 3-1 からわかるように、それぞれのアポダイズ関数はすべてグレーティングの中心位置に対して左右対称形を示しており、関数によって形状が少しずつ異なる。これらの関数はどれも、反射特性のブラッグ波長両側に現れるサイドローブと群遅延リップルの両者を抑圧する効果がある。

例えば、Gauss型の場合、裾野が広い形状(Gの絶対値が大きい)ほど、サイドのリップルは抑制されるが、一方で、実効的なグレーティング長が短くなるため反射ピークの値が小さくなる。反射帯域の形状はGの絶対値が小さいほど矩形に近く、Gの絶対値が大きくなるに従いスロープ部の傾斜がなだらかになり、ピークの平坦性も丸みを帯びる。従って、広い波長帯域に渡って高い反射率を保持するのが難しいと言える。 \tanh 型の場合は、パラメータaの値が大きくなるほど矩形に近く、アポダイズ無しの通常グレーティングに近くなるためにサイドローブの抑圧効果が Gauss型に比べて小さくなる。一方、パラメータaの値が小さくなるにつれ、実効的なグレーティング長が短くなるため反射ピークの値は小さくなることが予想される。また、分散値と群遅延リップルについてそれぞれの関数の効果が比較されており、同じグレーティング長で同じ反射率を得ら

れる条件では、 \tanh 型が最も大きい帯域幅を得られることが実験的に示されている [47].

例えば、WDM 狭帯域フィルタ(0.8nm 間隔用)の設計において、サイドローブを抑圧し、反射帯域内でフラットな鋭いフィルタ特性が要求される場合には、アポダイズ関数として Gauss 関数が \tanh 関数よりも適している結果が得られた。デバイスとして要求されるサイドローブ抑圧比の値次第では、使用可能なアポダイズ関数が追加できる可能性もあるが、代表的なアポダイズ関数である Gauss 関数と \tanh 関数について主に比較検討を進め、チャープ FBG の広帯域特性という目的に合致させるため、 \tanh 型のアポダイズ関数を選択することとした。

次に、 \tanh 型アポダイズ関数のパラメータについて検討する。(3-7)式は(3-4)式で示された関数 $f(z)$ を、パラメータ β を用いて書き換えたものである。

$$\begin{aligned} \text{Positive tanh profile:} \quad f(z) &= \tanh\left(\frac{\beta(-z)}{L}\right), & 0 \leq z \leq \frac{L}{2} \\ &= \tanh\left(\frac{\beta(z-L)}{L}\right), & \frac{L}{2} \leq z \leq L \end{aligned} \quad (3-7)$$

様々なパラメータ β について、ファイバ位置 z に対して計算したプロファイルを図 3-2 に示す。グレーティング長は 100mm としている。図 3-2 から明らかなように、 β の絶対値が大きくなるほど、プロファイル形状は平坦部が大きくなり矩形形状に近づく。一方、完全な矩形形状ではアポダイズを施さない場合と同等であり、図 2-3(a)で示したように、ブラッグ波長の両側にサイドローブが現れ、リップルも大きくなってしまふ。我々の実験からもパラメータ β の絶対値を大きくしすぎるとリップルが大きくなるという結果が得られている。また、FBG の反射率が増加する時には、リップルの平均値が増加するという結果も得られている[56].

筆者のチャープ FBG の形成においては、グレーティング長とリップル特性とのバランスを考慮し、特に得られる広帯域性を重視し、 \tanh 型アポダイズ関数のパラメータ β をまずは -6 に設定した。ただし、パラメータ β の違いによってリップル特性が変わることは実験的・経験的にはわかっているが、数式等から解析的に求めた結果はない。シミュレーションから求めたリップルの大きさから、 β の絶対値が大きくなるほど(矩形形状に近くなるほど)大きくなる傾向は見られるため、リップル特性に関しては実験結果をベ

ースに β を決定することとし、 β が -2 のチャープ FBG も比較のために作製した。

なお、チャープ FBG を作製する際には、有効屈折率がファイバの長軸方向で等しくなるように、図 2-4(c) に示した上下対称型の屈折率分布を形成する。そのための作製方法についての詳細は 3-3 節で述べる。

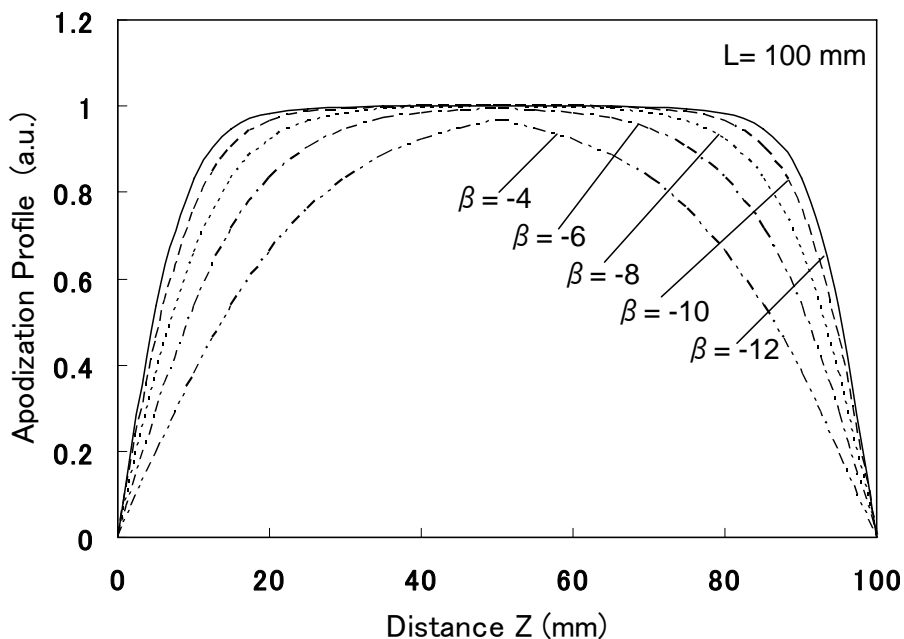


図 3-2 異なるパラメータにおける tanh 型アポダイズプロファイル

3-2-2 低群遅延リップル化のための最適設計

広帯域特性と低群遅延リップル特性との両立を得るためのチャープ FBG の設計について検討する。

グレーティングを実際に形成するためには、アポダイズ関数を伴った屈折率分布を階段形状で近似し、それを忠実に反映する作製方法を構築する必要がある。図 3-3 に階段状の屈折率分布モデルを示す。グレーティング長 L を Δz の長さで分割し、各位置における屈折率 n_i として階段形状の屈折率を近似する。

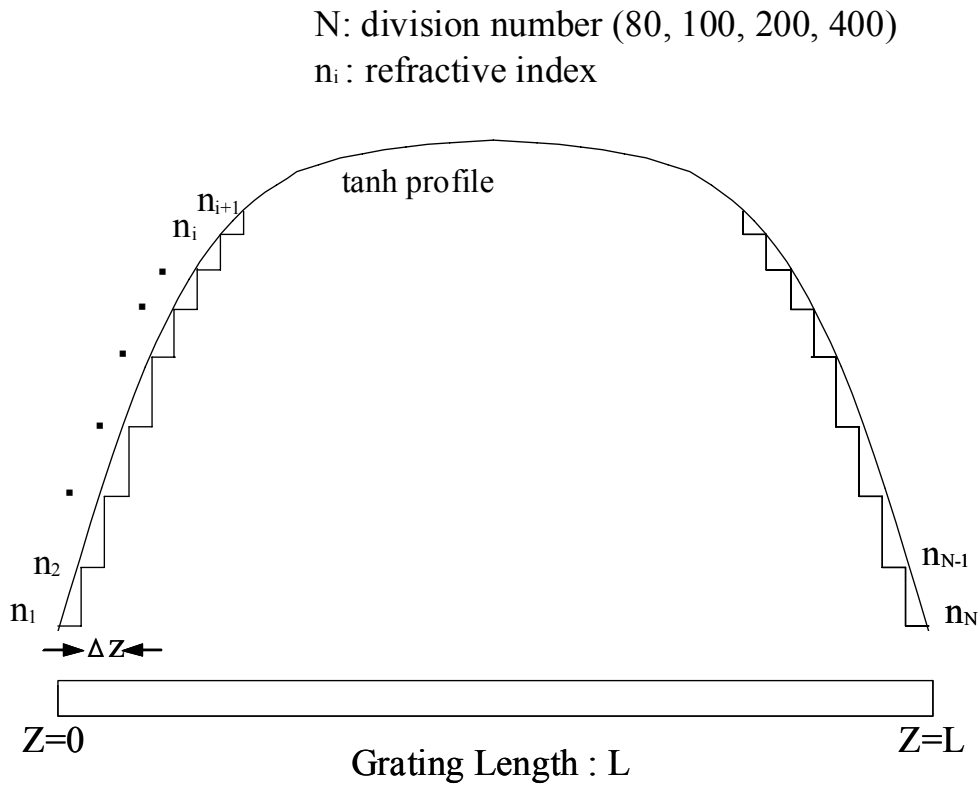


図 3-3 階段状の屈折率分布モデル

まず、階段状の屈折率分布モデルに基づきチャープ FBG の特性をシミュレーションから求めた。シミュレーションには Optiwave 社の“Opti-Grating”を用いた。アポダイズ関数を $\tanh(\beta=-2)$ 、グレーティング長 L を 35mm、最大屈折率変化量 Δn を 2×10^{-4} 、グレーティングのチャープ量 $ch^{(CFBG)}$ を 0.056nm/mm、分割数 N を 80 とした。図 3-4 に分割数 80 のシミュレーション結果として、(a)群遅延特性、(b)反射特性、(c)分散特性を示す。群遅延特性ではバンド端付近上下での非常に大きな群遅延リップルが見られ、また、分散特性は群遅延特性から算出されるため、同様に非常に大きな変動が見られる。従って、分割数が 80 程度では、群遅延リップルを抑制するには十分ではなく、もっと大きな分割数が必要であることがわかる。

図 3-5 には分割数の異なるモデルで計算した分散特性(分割数:(a)100 (b)200 (c)400)を示している。分割数を増加させると分散特性は改善され、帯域が広くなることと同時に群遅延リップルも抑制できる。また、200 以上の分割数では特性は分散特性に変化がないシミュレーション結果が得られており、分割数は作製時間(タクトタイム)

に直接影響を与えるため、作製時の最大分割数は 100 から 200 の間に設定すればよいことがわかる[56].

シミュレーション結果では群遅延リップルの値を 10ps/nm 以下にすることが難しいことがわかる. ただし, FBG の高い反射率を維持することが, 群遅延リップルを小さくできない理由の一つであるため, 反射率を小さく設定できれば群遅延リップルを抑制できる可能性はある[47]. 反射率を小さくすると, 分散補償器では反射光を出力として用いるため挿入損失が大きくなる. 従って, 群遅延リップルの大きさと反射率の大きさのトレードオフを考慮してチャープ FBG の設計をする必要がある.

これまでの広帯域 FBG の設計検討結果を踏まえ, C バンド全域をカバーできる帯域を想定して, グレーティング長 L を 150mm, グレーティングのチャープ量 $ch^{(CFBG)}$ を 0.2054nm/mm とした. グレーティング長とチャープ量から計算される帯域は約 44.0nm となる. なお, 中心波長は 1.5526 μ m とした.

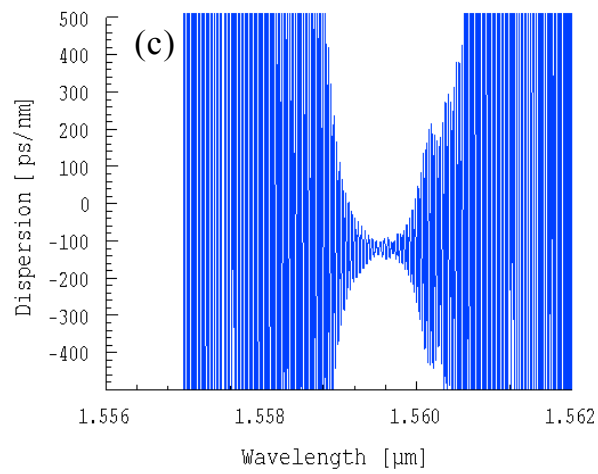
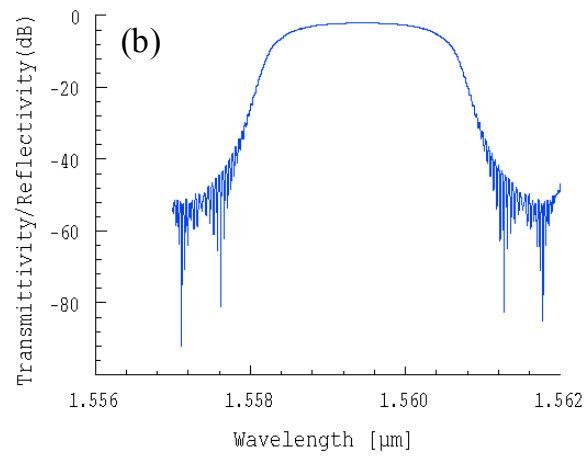
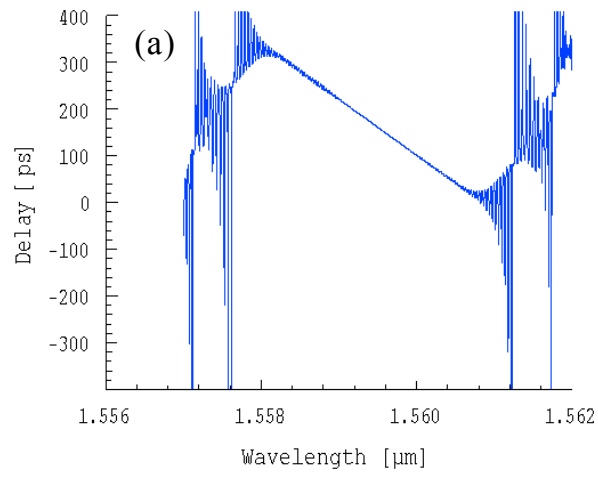


図 3-4 分割数 80 のシミュレーション結果
 (a)群遅延特性 (b)反射特性 (c)分散特性

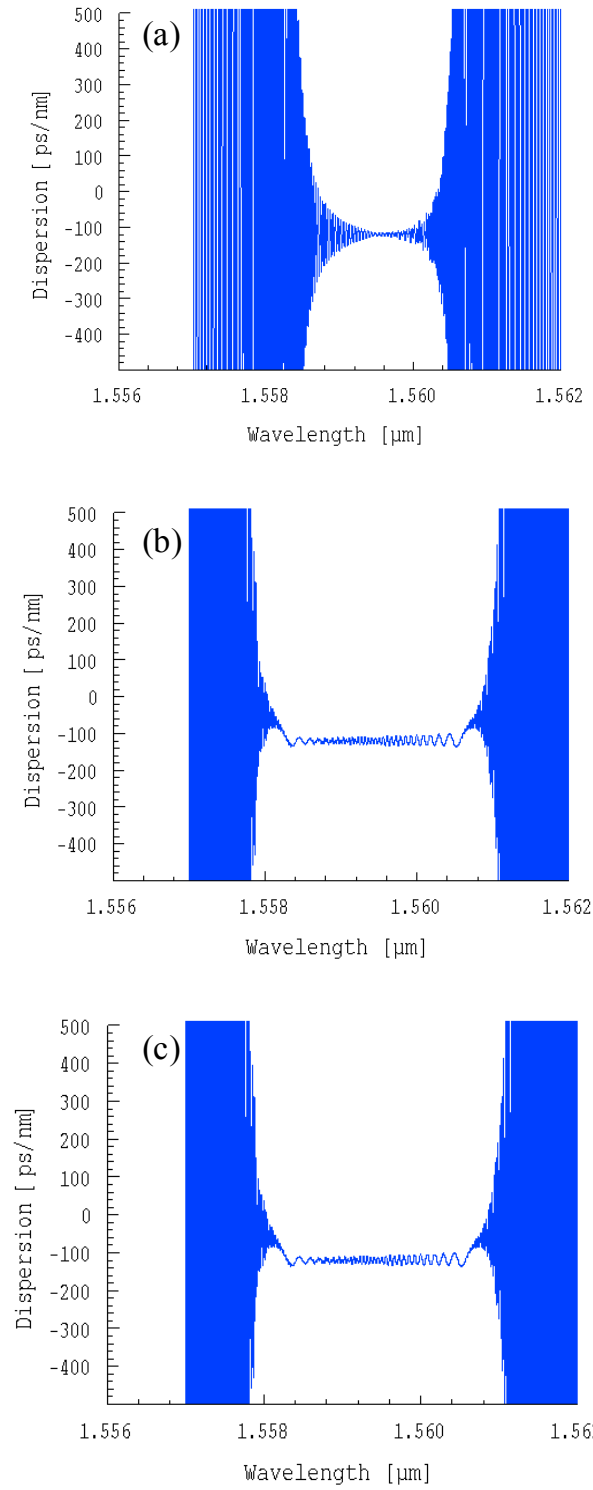


図 3-5 分割数の異なるモデルで計算した分散特性
 分割数:(a)100 (b)200 (c)400

なお、階段状の屈折率分布モデルを基にシミュレーションを行う際に、アポダイズの分割数や分割位置によってグレーティングの不連続点等が発生し、特性に影響を与えることがないかどうかの確認を行った。

シミュレーションモデルにおいて \tanh アポダイズ関数を階段形状で近似する際に、

- ① 階段形状の変化位置(分割位置)とグレーティングの境界が揃う
- ② 階段形状の変化位置(分割位置)とグレーティングの境界がずれる

それぞれの条件について特性を求めた。

具体的な条件として、グレーティング長 35mm に対してグレーティングピッチを $0.5\mu\text{m}$ に設定し、①分割数 $N=100$ 、と②分割数 $N=101$ 、にそれぞれ設定することで、①、②の条件を満足させる。アポダイズ関数は $\tanh(\beta=-4)$ とし、グレーティングピッチ $0.5\mu\text{m}$ とすることで中心波長はずれるが、それ以外のパラメータは変化させていない。シミュレーションにおける分割位置の違いによる屈折率分布モデルの概略を図 3-6 に示す。

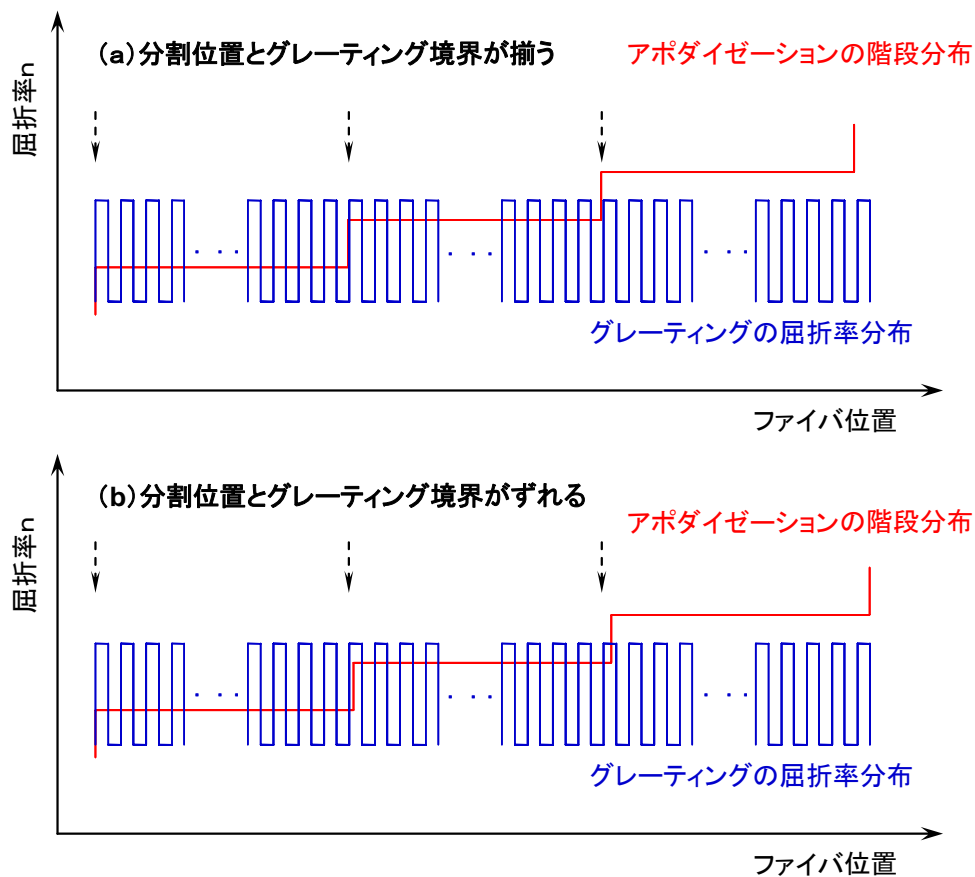


図 3-6 分割位置の違いによる屈折率分布モデル

図 3-7 シミュレーションから求めた反射特性を示す. (a)は分割数 $N=100$, (b)は分割数 $N=101$ の場合である. また, 図 3-8 には分散特性を示す. それぞれの場合において, 分散特性及び分散特性にほとんど差異は見られない. これは, FBG では屈折率変化 Δn が小さく, また, グレーティングピッチに比べて階段形状の1セグメント幅が大きいため(階段形状の1セグメントに含まれるグレーティングが数 100 から 1000 程度), 分割位置とグレーティングの境界がちょうど揃うような場合であっても特性への影響が少なくなるためと考えられる.

図 3-4 及び図 3-5 における計算例では, グレーティング長, グレーティングピッチと分割数それぞれの数値から考えて, 分割位置とグレーティングの境界がずる場合に相当するが, もし分割位置とグレーティングの境界がぴったり合った場合による不連続点等があっても特性変化は生じないことから, 今回のシミュレーション条件による解析の一般性は失われないと考えられる.

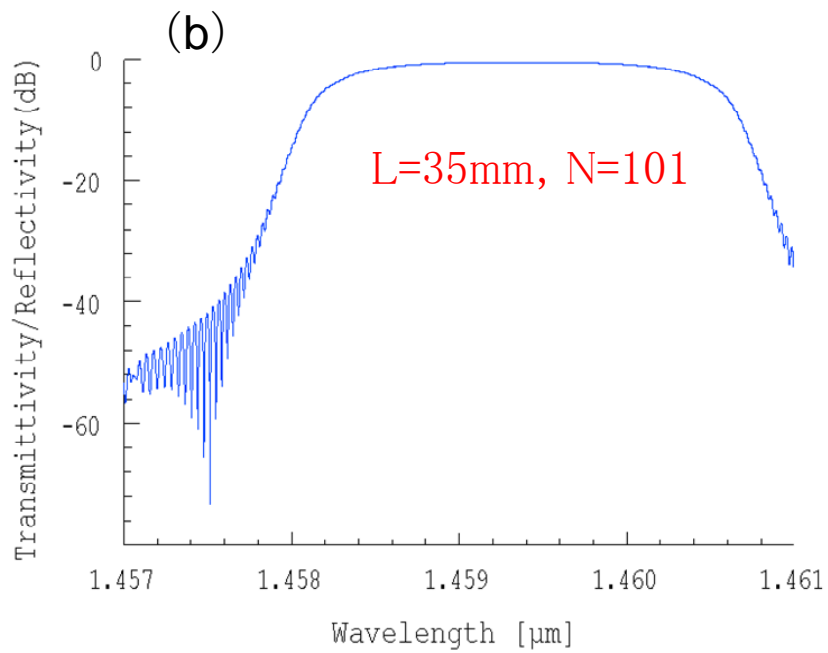
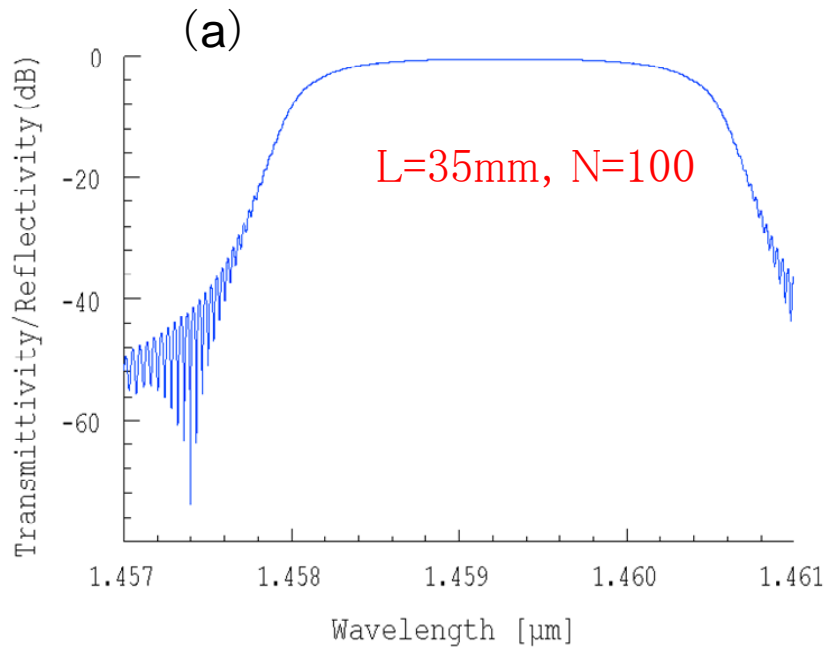


图 3-7 反射特性 (a)分割数 $N=100$, (b)分割数 $N=101$

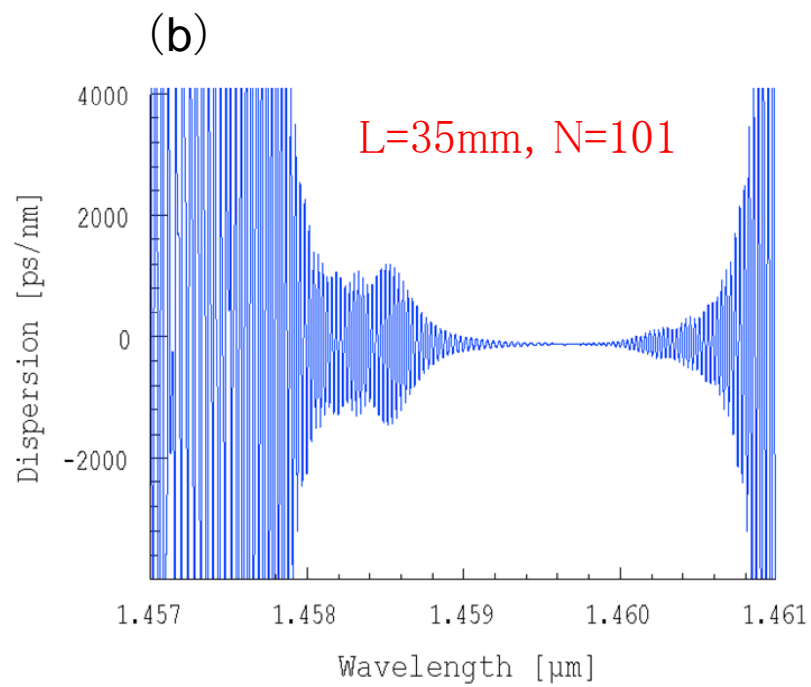
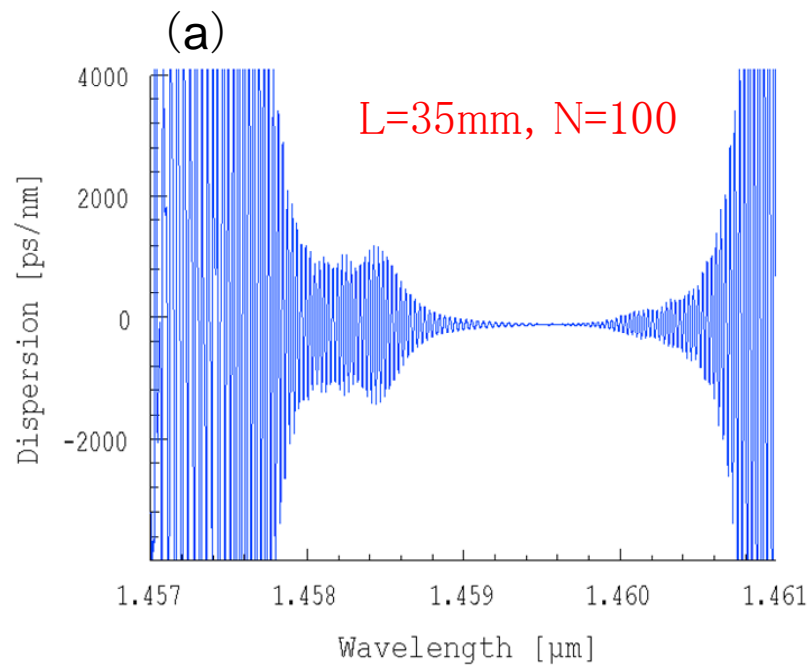


图 3-8 分散特性 (a)分割数 $N=100$, (b)分割数 $N=101$

3-3 広帯域チャープファイバブラッググレーティングの作製方法

前節で設計したグレーティング長 150mm のチャープ FBG を作製するための露光光学系の構築について述べる. 設計したチャープ FBG 構造を実現するため, 光源の強度揺らぎの影響が少なく, アポダイズ関数による屈折率分布が達成可能な露光方法, さらにその場観察等, チャープ FBG の高性能化のための作製方法について述べる.

光ファイバのコア中に屈折率の分布を形成するため, KrF (フッ化クリプトン) エキシマレーザからの紫外光を, 位相マスクを通して光ファイバに照射する. 位相マスクは 0 次光成分を抑制し, ± 1 次光成分が最大となるように設計されており, 設計効率としては, +1 次光が 37.8%, -1 次光が 38.3%, +0 次光が 0.3% である. 光ファイバは通常のシングルモードファイバ (SMF) を用いるが, 紫外光照射による屈折率変化量を大きくするため, FBG を形成するファイバは露光前に水素高圧処理 (120 気圧から 160 気圧の水素分圧下で1週間~4週間程度保持) を施している.

図 3-9 にチャープ FBG 作製の露光光学系の概略を示す[56,57].

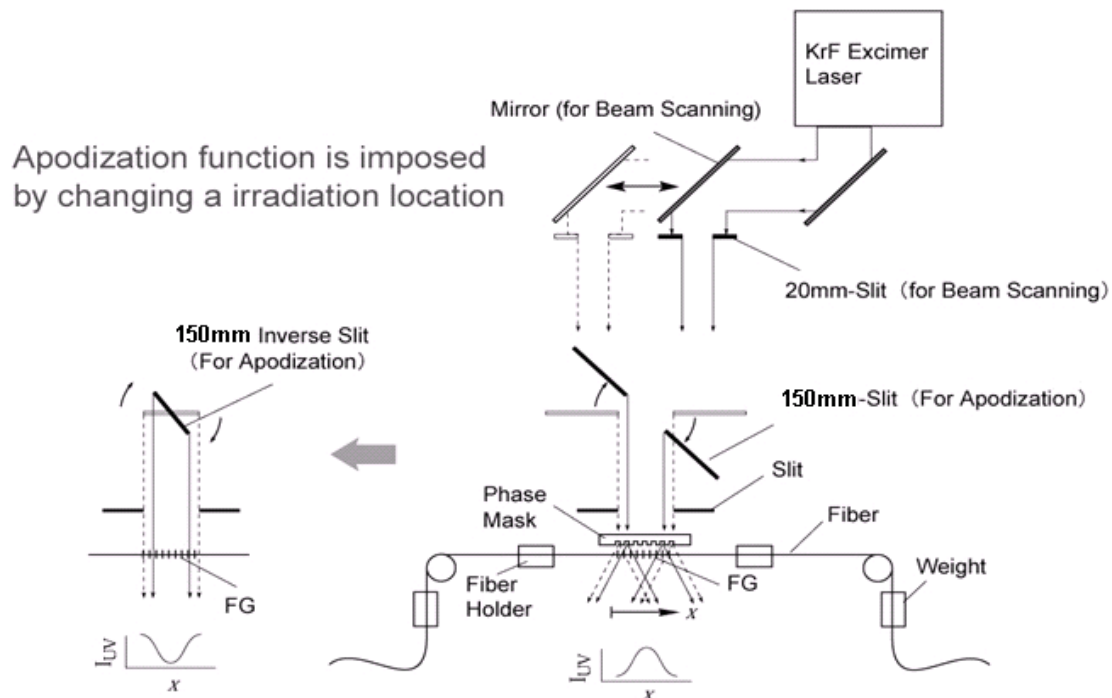


図 3-9 チャープ FBG 作製の露光光学系

露光光学系は、主に KrF エキシマレーザ光源、レーザビームを折り返しかつスキャンする可動ミラー、ビーム径を絞るスリット(幅 20mm)、アポダイズのための回転スリット(幅 150mm)と回転ネガスリット(幅 150mm)、チャープ構造の位相マスク、チャープ FBG が形成される光ファイバによって構成される。光ファイバは両端にわずかな加重をかけることで位相マスクとの位置ずれが生じないようにしている。

露光用光源は KrF エキシマレーザ(COMPEX205:LAMBDA PHYSIK 社製)を用いており、エキシマレーザから出射された紫外光は波長 248nm、パワー密度が約 $143\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、ビーム形状は $22\text{mm}\times 7\text{mm}$ の長方形である。ビームは空間的に強度分布を有しており、さらに時間的にも強度揺らぎを生じるため、レーザからの出射直後に、ミラーと 20mm スリットを自動ステージでスキャンさせてファイバに照射される光量が均一になるようにした。位相マスクを通過したレーザ光は+1 次光成分と-1 次光成分との干渉により干渉縞を形成し、光ファイバコア中に位相マスクのちょうど半分の周期的な屈折率変化を生じさせる。

次に、設計通りにアポダイズを施したチャープ FBG の作製について、回転スリットと回転ネガスリットの適用工程を中心に説明する。なお、アポダイズは前節のシミュレーション結果を基に、 \tanh 型分布を 160 に分割することで段階状形状に近似させている。

まず、光ファイバには位相マスク周期で決定される屈折率変調構造を形成しながら、同時に 150mm のスリットを少しずつ回転させ、ファイバ上での照射エリアを実効的に変えることでアポダイズを施す。回転スリットの開口部中心と位相マスク中心とを一致させておく。照射開始時には 150mm のスリットが全て開いており、ファイバ全体に照射されるが、スリットが回転するにつれて実効的にスリット幅が狭くなり、照射領域が狭くなる。光ファイバに屈折率変調を形成する中央部のみに照射したところ、すなわち回転スリットが 90 度回転したところで紫外線レーザ照射をストップさせる。

なお、このままの工程では有効屈折率の不均一なアポダイズが施されてしまうため、有効屈折率が均一のアポダイズにするために次の工程を加える。すなわち、位相マスクを外し先の工程で用いた回転スリットとは逆の形状であるネガスリットを用いる。この状態で先の工程と同様にスリットを少しずつ回転させて照射すれば、光ファイバ上でのトータルの照射量は均一になり、有効屈折率が均一のアポダイズによって制御された関数形状が形成される。

従来は紫外線照射に固定スリットを使用していたため、紫外線照射の強度分布の

変化と有効屈折率の均一化を図ることが困難で、チャープ FBG 終端面での急激な屈折率変化による干渉が影響し、群遅延曲線の上にリップル等が発生するが多かった。しかしながら、このチャープ FBG 製造方法によれば、遮光板としての回転スリットと回転ネガスリットに回転を加えた紫外線照射法を用いて2度の照射を行うことにより、光ファイバに対して紫外線照射強度分布の変化と有効屈折率の均一化とを与えることができ、チャープ FBG 形成部における急激な屈折率変化の変動を緩和できる。

チャープ FBG 作製の際には、SLD(Super Luminescent Diode)光源からの広帯域光を、チャープ FBG が形成される光ファイバに入射し、その透過光もしくは、サーキュレータを介した反射光を光スペクトルアナライザで直接測定することによって、その場観察を行う。形成されるチャープ FBG の反射特性をモニタリングすることで、紫外線レーザー照射時の時間変化の様子がわかり、作製効率化等を図ることができる。

図 3-10 にチャープ FBG 作製の露光光学系写真(1)を示す。オレンジ色のボックス内に KrF エキシマレーザーが格納されており、ここから出射したレーザー光が2つの固定ミラーで折り返され、スキャンする可動ミラーで反射し、ビーム径を絞るスリット(幅 20mm)を通過して、手前側にある回転スリット(ポジ型、あるいはネガ型に入れ替える)を通過する。回転スリットは自動回転ステージに搭載されており、ミラーを前後に動かすためのリニアステージとともに PC で動作をコントロールする。

また、図 3-11 は回転スリット及び光ファイバに照射される近傍の露光光学系を示しており、エキシマレーザー光は、位相マスクを通過して光ファイバに照射される。(写真には位相マスク及び光ファイバはない。)

第1工程では、位相マスク周期で決定される屈折率変調構造を形成しながら、同時にスリットを 160 分割されるように徐々に回転させ、ファイバ上での照射エリアを実効的に変えることで \tanh のアポダイズを施す。第2工程では、有効屈折率が均一のアポダイズにするため、位相マスクを外して回転ネガスリットを用いる。第1工程と同様にスリットを少しずつ回転させて照射することで、有効屈折率が均一のアポダイズによって制御された \tanh のアポダイズ形状が形成される。標準的な作製時間は、第1工程、第2工程の合計で 30 分程度である。

なお、反射率の値を変化させる場合は、ミラーを動かすリニアステージの可動速度を変化させ、露光時間を制御することで行う。

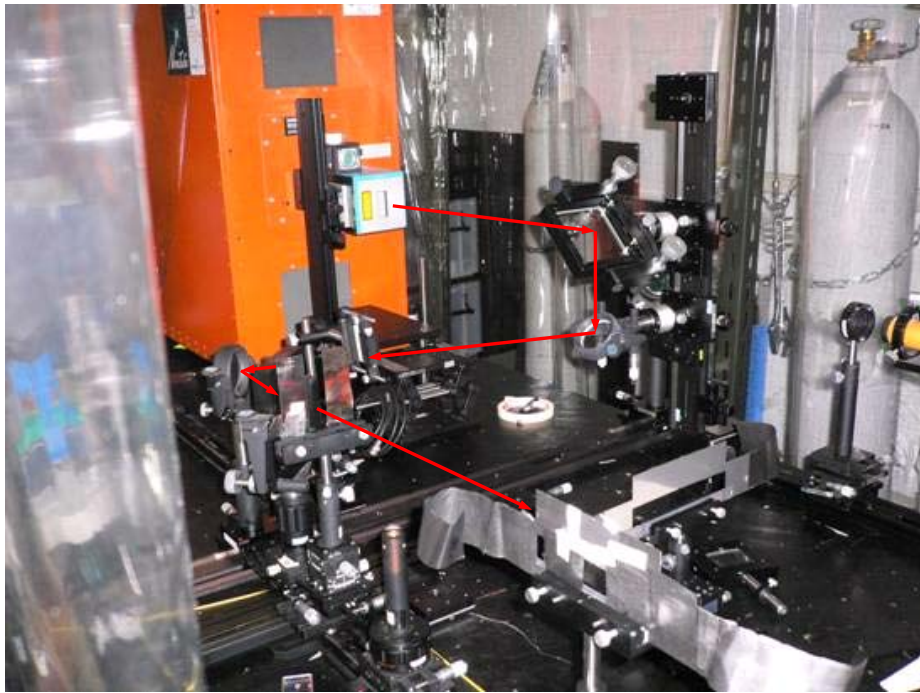


図 3-10 チャープ FBG 作製の露光光学系写真(1)

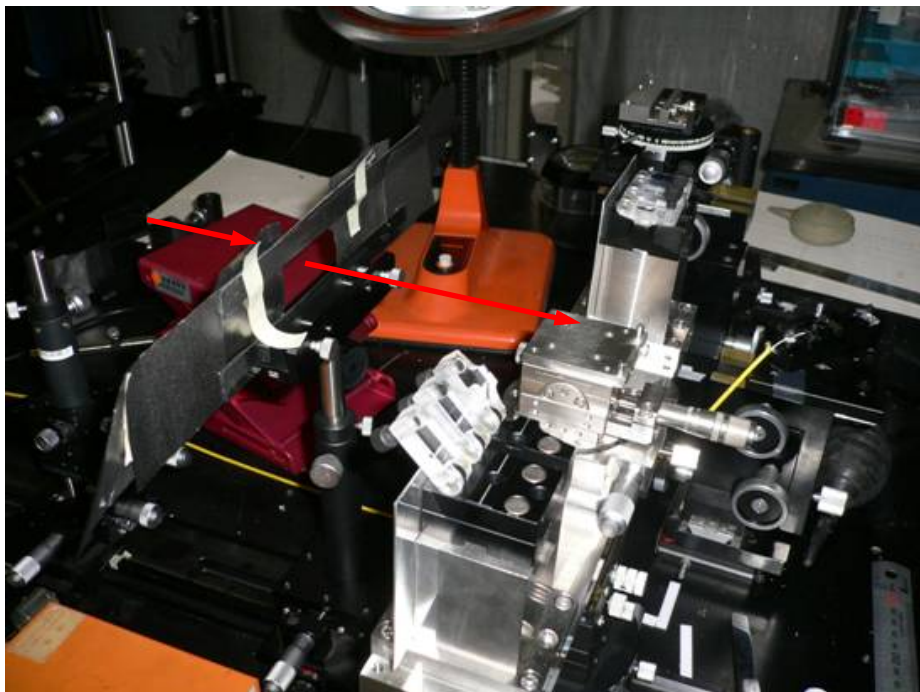


図 3-11 チャープ FBG 作製の露光光学系写真(2)

3-4 広帯域チャープファイバブラッググレーティングの基本性能

チャープ FBG の特性評価には、アドバンテスト社製の光ネットワーク・アナライザ (Optical Network Analyzer Q7760) を使用した。この測定器は変調位相シフト (Modulation Phase Shift) 法が用いられており、波長可変光源からの出力光に強度変調を加え、被測定物を通して受信器で受け、その受信信号の位相の波長依存性を解析することにより群遅延や分散が計算される。波長分解能は信号の変調周波数に依存し、波長分解能と測定確度は相反する関係にあるため、変調周波数が重要な測定パラメータとなる。

3-4-1 反射特性

まず、単体のチャープ FBG の反射特性を図 3-12 に示す。

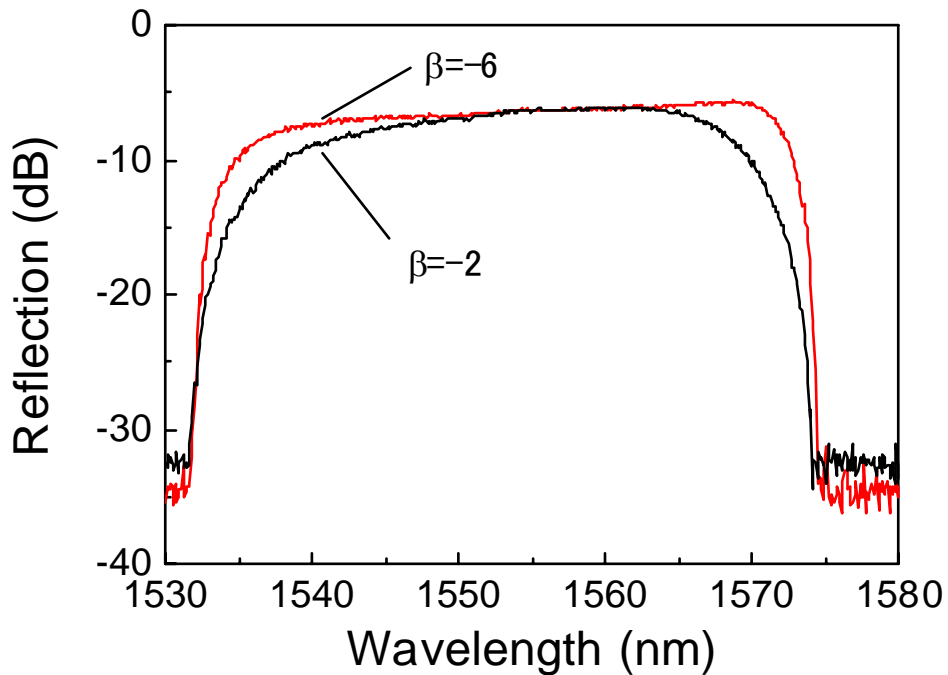


図 3-12 チャープ FBG の反射特性

\tanh 型アポダイズ関数のパラメータ β が -6, -2 とした 2 種類の特性である。測定は 3

端子光サーキュレータへ接続した状態で行っているため、光サーキュレータの損失を除くとおよそ 6dB 程度の割合大きい挿入損失がある。これは、リップルを抑制する目的で、反射率が小さくなるように露光条件を設定したためである。3dB 帯域は、それぞれ 35.9nm, 29.4nm が得られている。パラメータ β が -6 のほうが平坦な広帯域特性を示しており、C バンド全域をカバーできる[57]。

3-4-2 群遅延特性

図 3-13 にはチャープ FBG の群遅延特性を示す。グラフの傾きから算出される分散値は tanh 型アポダイズ関数のパラメータ β が -6, -2 とともにほぼ設計通りの -33.3ps/nm である。分散補償に適用可能となる帯域は両者共に 44.0nm が得られている。ただし、実際には反射率が低下している帯域の両端部分では、WDM の特定信号波長のパワーが落ちこむため、信号帯域全体で波長ごとのパワー均一化を図る必要が生じる。

なお、群遅延特性を測定する際の変調周波数は 2GHz であり、波長分解能は 32pm となっている。

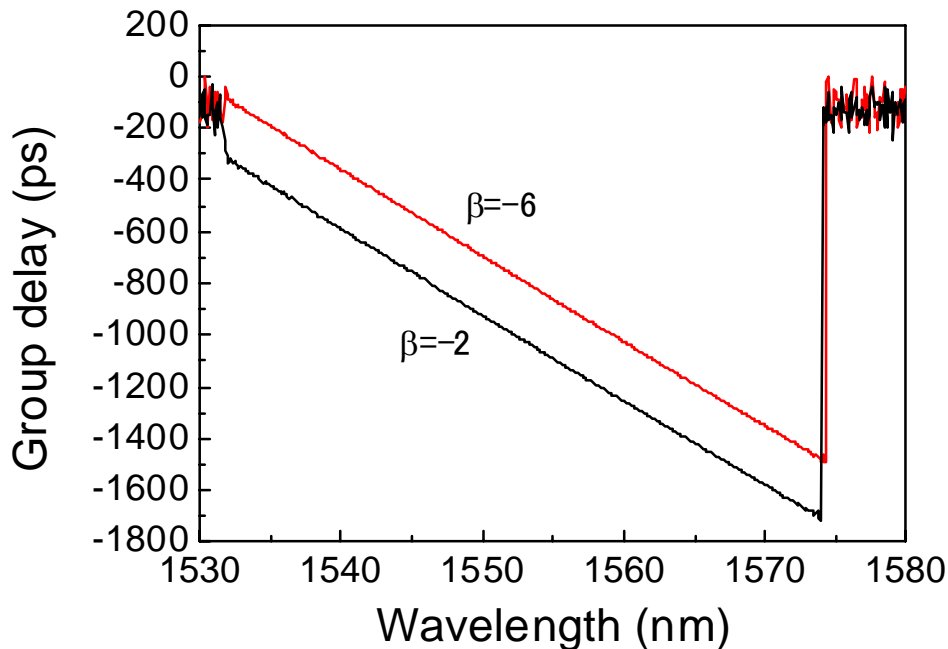


図 3-13 チャープ FBG の群遅延特性

図 3-14 にチャープ FBG の群遅延リップルを示す．群遅延特性の傾きを直線近似し，その値と測定値の差分をリップルとして示している．パラメータ β が -6, -2 とともに群遅延リップルは 5ps 以下に収まっており，反射率が小さくなるように露光条件を設定することで，群遅延リップルを抑制する効果があったと考えられる[57]．

位相マスクは群遅延特性が波長に対して直線的に変化するように設計したものである．しかしながら，作製したチャープ FBG はわずかに線形からずれており，下に凸の形状が残っている．これは，エキシマレーザ照射に伴う温度上昇によって，わずかにマスクや光ファイバが延伸することが影響していると考えられる．エキシマレーザのビーム径を絞ることで温度変化を抑制する，エキシマレーザ照射に伴う変化を見込んでマスク設計を行うことで変化分を吸収すること等の対策をとることで，作製条件のさらなる最適化を行えば，改善は十分に可能である[57]．

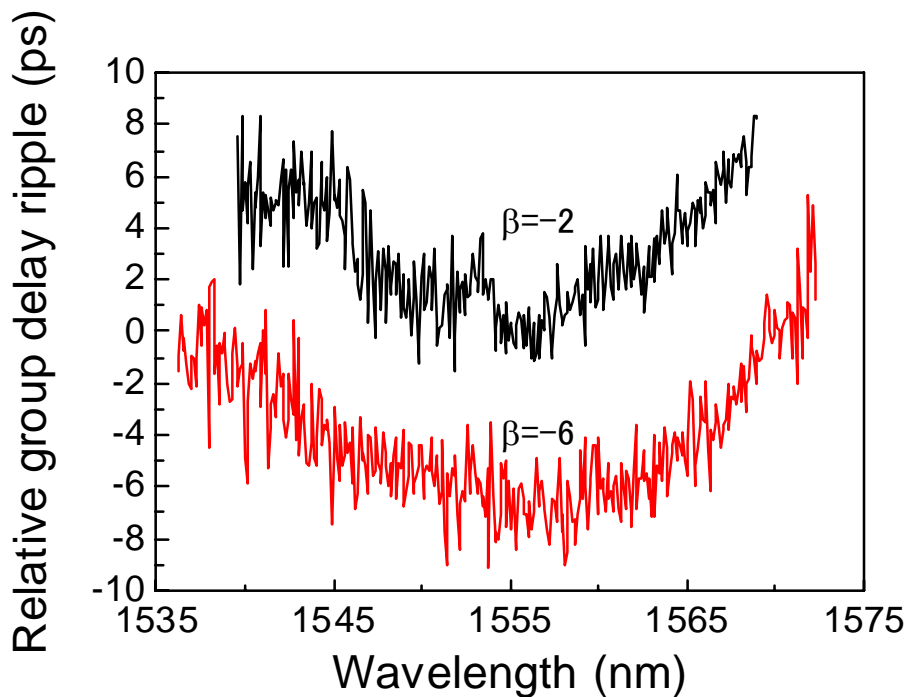


図 3-14 チャープ FBG の群遅延リップル

図 3-14 の結果から， β の違い($\beta=-2, -6$)による群遅延リップルを整理したものを図 3-15 に示す．リップルの大きさにほとんど差異は見られず，単純計算したリップル平均

値も、1.95 ($\beta=-2$), 2.05 ($\beta=-6$)と算出された。

一方、シミュレーションから β の違いによる 3dB 帯域を求めると、グレーティング長 150mm, チャープ量 0.2054nm/mm, 屈折率変化量 5×10^{-4} の条件で、それぞれ 27.4nm ($\beta=-2$), 38.0nm ($\beta=-6$) が得られる。また、その時の反射率はそれぞれ 81% ($\beta=-2$), 99% ($\beta=-6$) となる。同じ帯域幅の FBG で比較した場合に、例えば反射率を 99.9% から 90.0% まで抑制すると、リップルが 30ps から 10ps 程度まで減少する計算結果が得られており[59], すなわち、反射率を下げる(屈折率変化量を小さくする)ことで、帯域を維持したままリップルを抑制できることがわかる。

今回の検討では、 $\beta=-2$ と -6 の場合で、 $\beta=-2$ の方がわずかにリップルは小さいが、必要帯域をカバーするという観点から $\beta=-6$ を選択した。 β の絶対値をさらに大きくすると、矩形形状に近いアポダイズ条件となり、リップルが大きくなることが実験からもわかっているが、どの程度まで許容できるかは条件・用途によって変わると考えられる。

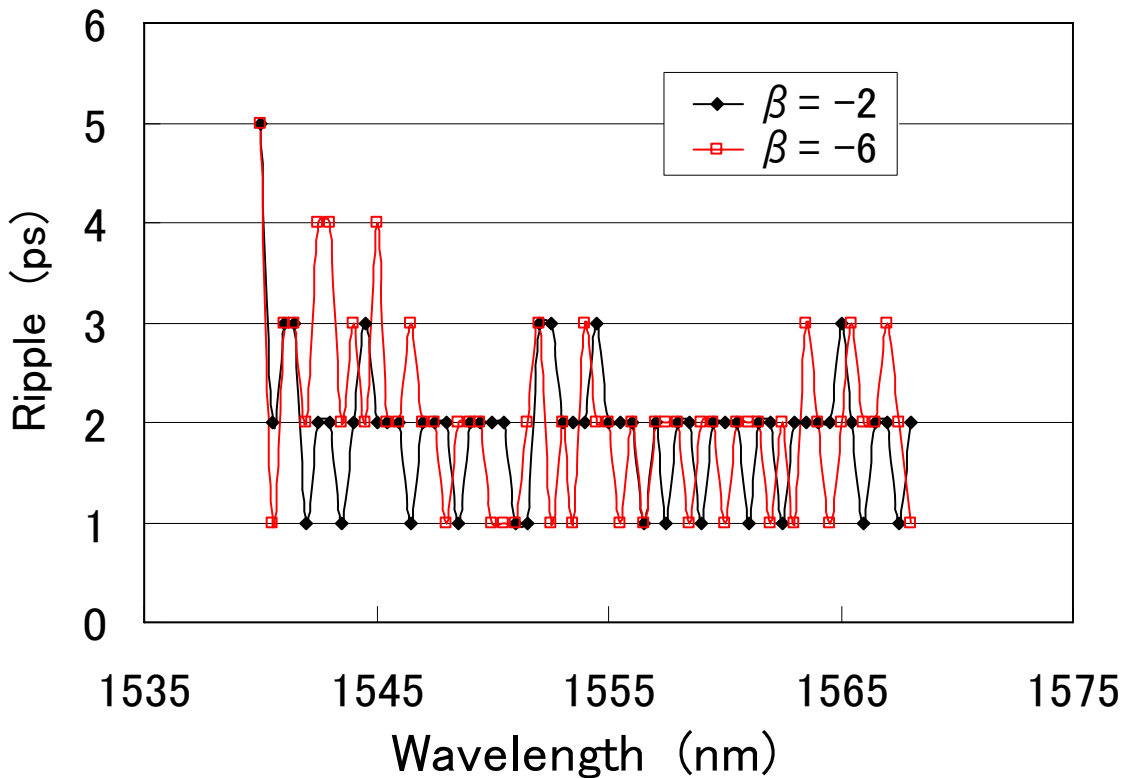


図 3-15 β の違いによるチャープ FBG の群遅延リップル

3-5 まとめ

本章では、チャープ FBG を広帯域分散補償等の光通信用デバイスに適用することを想定して、広帯域特性及び低群遅延リップル特性が得られるチャープ FBG の高性能化を図った。

そのために、実用デバイスを想定したときの適切なサイズ(主にグレーティング長)やチャープ FBG 作製時の再現性や安定性、効率やコスト等を考慮した上で、広帯域化特性と低群遅延リップル特性を満足する設計と、それを実現する位相マスクを用いた作製方法の最適化を検討した。

まず、チャープ FBG のアポダイズ関数を比較して、 \tanh 関数型のアポダイズが適当であると結論した。さらに、選択したアポダイズ関数のパラメータ比較による設計の最適化を行った。また、作製時の露光条件の設定にあたっては、アポダイズ関数を階段形状で近似する際の分割数による特性変化をシミュレーションで比較して、最適条件を決定した。

チャープ FBG の作製方法に関しては、光源の揺らぎの影響が少なくなるようにエキシマレーザービームの空間的な切り出しと、ビームの繰り返し可動による露光方法を見いだした。回転スリットやミラーを可動させるステージを PC でコントロールし、ほぼ自動で露光が行える。また、その場観察による作製手法から作製効率化等を図ることができた。

作製したチャープ FBG は 3dB 帯域として 35.9nm が得られており、C バンド全域をカバーできる平坦な広帯域特性を示した。およそ 6dB の挿入損失があるが、これはリップルを抑制する目的で、反射率が小さくなるように露光条件を設定したためである。

群遅延特性は設計通りのリニアチャープ特性が得られており、また、群遅延リップルは 5ps 以下に収まった。

広帯域チャープ FBG の設計と試作により、反射特性や群遅延特性の基本性能を示し、C バンド全域をカバーできる広帯域化と低群遅延リップル化を両立できる設計と作製方法を確立することができた。

第4章 超高速伝送用ファイバブラッググレーティング型 可変分散補償デバイス

4-1 はじめに

波長分散が比較的小さい分散シフトファイバ(DSF:Dispersion Shift Fiber)伝送路においても、中継区間ごとに平均零分散波長がばらつくことや、周囲の温度変動等により分散特性が変化するため、高速光伝送システムでは伝送路の最適化を目的とした可変分散補償技術が求められる。

本章では、まず可変分散補償の必要性と適用すべき伝送システムについて述べた後、筆者が提案するチャープ FBG を用いた可変分散補償デバイスを説明する。このデバイスは、フェムト秒クラスの光パルス伝送に対応可能となるデバイスとして、複数のチャープ FBG を用い、適切な温度勾配を加える構成で、高次分散も含めて極めて任意性の高い可変制御機能を有する。

次に、デバイスの基本特性として、反射特性／群遅延特性、可変分散特性、可変分散スロープ特性を示す。特に、本デバイスの特徴である、広帯域性、任意の分散制御について詳しく説明する。

最後に、超高速伝送への応用として、フェムト秒クラスの超短光パルス伝送と、160Gb/s の超高速伝送システムへ本デバイスを適用した実験結果を示し、本デバイスが超高速伝送システムへ適用可能であり、C バンド全域の可変一括補償の可能性を示す。

4-2 温度制御機構による可変分散補償デバイス

4-2-1 可変分散補償技術の必要性

DSF のゼロ分散波長は温度変化に対して約 $0.03\text{nm}/^\circ\text{C}$ で変化するため[58]、光ファイバ伝送路の敷設環境に 60°C 程度の温度変化がある場合、約 1.8nm のゼロ分散波長変動が生ずる。DSF の分散スロープは約 $0.07\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ であるため、 100km の伝送路を想定した場合には、ゼロ分散波長変動 1.8nm は分散量変化に換算すると約 $13\text{ps}/\text{nm}$ となる。例えば 160Gb/s の波長分散許容値は $10\text{ps}/\text{nm}$ であるため、波長分散の温度変動に対応して分散補償量を自動的に等化するシステムが必要となる。シング

ルモードファイバ(SMF)伝送路でも DSF 伝送路に比較すれば小さいものの、同様にゼロ分散波長は約 $0.025\text{nm}/^\circ\text{C}$ で変化するため[59], 可変分散補償技術が必要となる. 図 4-1 に温度変動によるファイバ伝送路及び伝送パルスの変化を示すが, 固定分散補償のみでは対応できないため, 可変分散補償が必要となることがわかる.

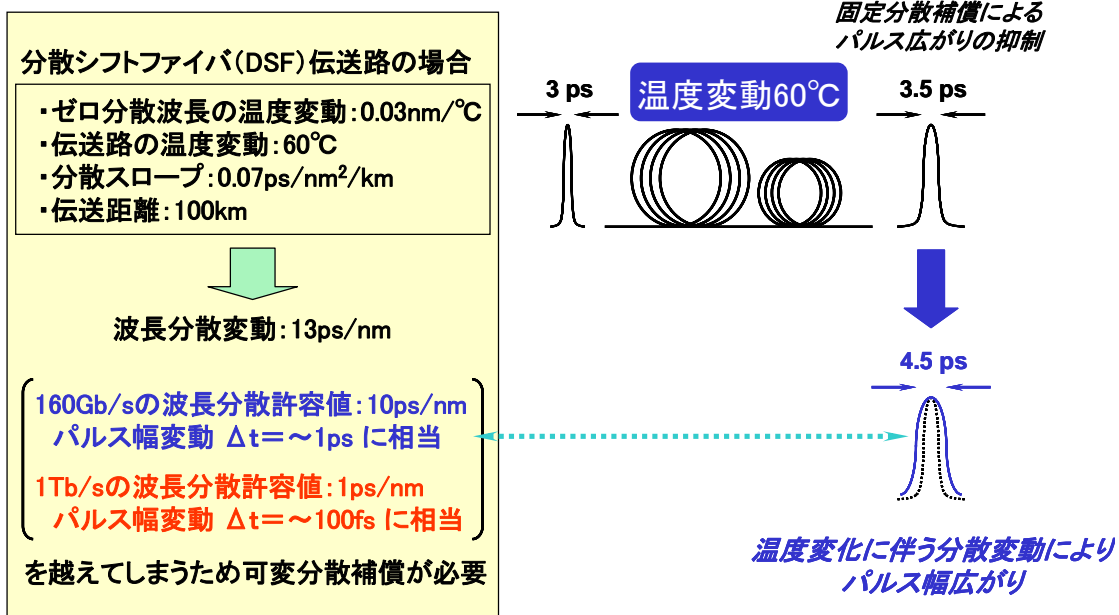


図 4-1 温度変動によるファイバ伝送路及び伝送パルスの変化

また, $100\text{Gb}/\text{s}$ 以上の短パルスを用いる高速伝送では, 数 100fs から数 ps の時間幅を有するパルスのスペクトル幅は数 nm から数 10nm に及ぶため, その帯域をカバーする広帯域性能が要求されるうえ, 帯域中にわずかな高次分散が存在するとパルス波形が劣化するため, ごくわずかな伝送距離の変化や高次分散にも対応する可変分散補償技術が必要となる.

ここで想定している超高速伝送システムでは, ファイバ伝送路に存在する分散に対しては分散補償ファイバ等の固定分散補償装置によりあらかじめ補償する. 温度変動等の環境変化に伴う分散変動分に対して可変分散補償デバイスで補償を行うため, 本デバイスには大きな分散補償量は必要としないが, 広帯域特性, 高次分散制御特性や高い可変精度が要求される. 実システムでは固定型との可変型の分散補償技術の役割分担を行わせることでシステムの最適分散補償を行うこと, すなわち, 受信側で

の適応等化が必要不可欠である。

4-2-2 温度制御による可変分散補償

FBG を用いた可変分散補償技術は大きく 2 種類に分類されるが、それは可変性を付与する方法が温度によるものと張力によるものである。図 4-2 にファイバブラッググレーティング型可変分散補償に関する代表的研究例を示す[60-64]。

温度印加方式では、光ファイバ周囲(クラッド)からグレーティングに温度分布を与えてグレーティングピッチを変化させることで、群遅延特性・分散特性を変化させる。また、張力印加方式では、光ファイバの長手方向に張力を加えグレーティングピッチを伸長させることで、群遅延特性・分散特性を変化させる。帯域はチャープ FBG 自体の帯域でほぼ決まるため、両方法での違いはない。一方、応答速度は張力方式が速いが、温度方式は遅い。また、張力方式では基本的にグレーティング全体にわたって一定張力がかかるため、線形のグレーティングピッチ変化のみとなるが、温度方式では局所的な温度変化を与えられるため、線形のグレーティングピッチ変化以外にも、適切な温度分布の付与によって任意のグレーティングピッチ変化を与えることができる。

可変量や可変精度は、設計値であるチャープ FBG のチャープ量にも依存するため、一概にどちらが有効との判断はできないが、報告例では2次分散の可変量は張力方式が大きくとれており、可変精度は温度方式が有利と言える。

研究機関・方式	性能・特性				
	帯域	可変量 ps/nm, ps/nm ²	可変精度	応答速度	ねらい・特徴
USC ・ピエゾ素子(張力)による可変機構 ・非線形チャープとサンプリング関数の利用	1-2nm	2次: 1600 3次: -	-	秒オーダー	WDM多波長一括補償
Nortel ・ピエゾ素子(張力)による可変分散 ・非線形(2次関数)チャープFG	0.8nm	2次: 850 3次: -	-	秒オーダー	可変量向上
NTT ・ピエゾ素子(張力)による可変機構 ・非線形チャープの利用	6nm	2次: 25 3次: -	-	秒オーダー	中心波長ヘシフトさせて, 分散・分散スロープを補償
AT&T ・抵抗ヒーターによる可変2次分散	2.5nm	2次: 60 3次: -	数ps/nm -	分オーダー	2次分散可変補償 160Gb/s以上高速伝送
三菱電機 ・32分割ヒーターによる可変機構 ・分散/分散スロープ補償	3-4nm	2次: 500 3次: 400	-	分オーダー	WDM高速伝送用 160Gb/sOTDM
本研究 ・ペルチェ素子等による可変機構 ・複数のFGによる微少量調整	8-35nm	2次: 5 3次: 1	0.1ps/nm	分オーダー	OTDM/WDM混合システム 広帯域分散補償

図4-2 ファイバブラッググレーティング型可変分散補償技術[60-64]

ここで想定する可変分散補償デバイスの適用システムでは、分散補償ファイバ等の固定分散補償技術との役割分担を行うことから大きな分散補償量は必要としないが、広帯域特性、高次分散制御特性や高い可変精度が求められることを勘案し、温度方式による可変機構が最適であるとの結論に至った。図4-3に可変分散補償デバイスの構成(概要)を示す。光サーキュレータを介してチャープFBGを縦続接続させており、各チャープFBGには長手方向の複数領域に分割した温度制御機構を付加している。個々のチャープFBGはほぼ同一の広い帯域で、線形もしくは非線形チャープ特性を持ち、それぞれの分散特性の重ね合わせによって、分散及び高次分散の制御を行う。

提案する可変分散補償デバイスの特徴をまとめると以下の通りとなる。

- ①FBGの重ね合わせ構成 (基本構成:グレーティングペア)
- ②分散、分散スロープの独立可変制御
- ③任意性の高い分散曲線
- ④温度印加機構の最適化

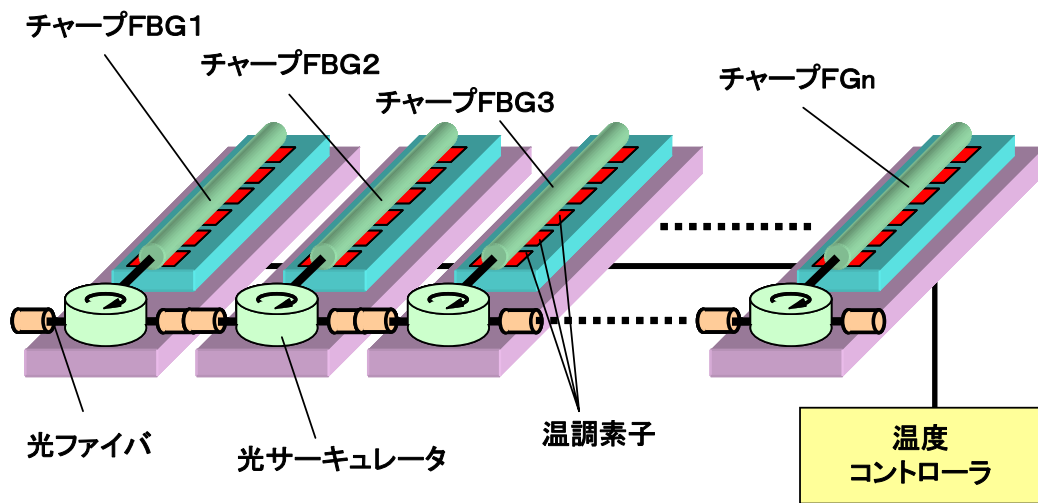


図4-3 可変分散補償デバイスの構成(概要)

4-2-3 デバイス構成

筆者が提案し、試作した可変分散補償デバイスの構造を図 4-4 に示す[65].

図 4-3 で示したデバイス構成から縦続接続している一部を取り出した構造となっている. すなわち, 2本のチャープ FBG が光サーキュレータを介して直列に接続したグレーティングペア構造で, 4端子光サーキュレータの第2ポートと第3ポートにそれぞれ特性が逆向きとなるようにチャープ FBG を接続し, 片方もしくは両方のチャープ FBG に複数個のペルチェ素子を用いて温度制御を行う. 使用するチャープ FBG は, グレーティング長 120mm, チャープ量 0.056nm/mm であり, 5つのペルチェ素子を搭載した銅ブロック(5mm幅)を20mm間隔で配置し, 光ファイバクラッドに接触させて温度分布を与える. 各ペルチェ素子近傍に温度センサを設置し, 各ペルチェ素子の温度を個別に制御する. 温度制御を加えない状態では分散はキャンセルされほぼゼロに設定されるが, 温度制御を加えた状態では, 分散や分散スロープを独立に高い精度で制御することが可能となる. 第3章で示した広帯域チャープ FBG とはグレーティング長及びチャープ量は異なり, 帯域は約 9.6nm と計算される.

チャープ量を小さく設定すると分散値は大きくなるため, 同じ温度勾配を与えた場合でも, 分散の大きい方が可変分散量を大きくとることができる. つまり, 可変分散量を稼ぐためにはチャープ量を小さく設定することが必要となるが, 逆に帯域は小さくなるため, 広帯域とするためにはグレーティング長を長く設定しなければならない. また,

光ファイバに直線的(1次関数的)な温度勾配や放物線的(2次関数的)な温度分布を与える場合、ファイバの熱伝導率が小さいため、所望の温度分布を与えるにはある程度のグレーティング長が必要となる。一方、グレーティング長が大きなチャープ FBG に滑らかな温度分布を与えるには温調素子の数が増加し、消費電力が大きくなるとともに制御すべき数も増加する。

本章では、分散及び分散スロープの制御を行い、可変特性の実証と伝送システムへの適用を行うため、チャープ FBG を1波の対応帯域として十分である、上記の特性に設定した。

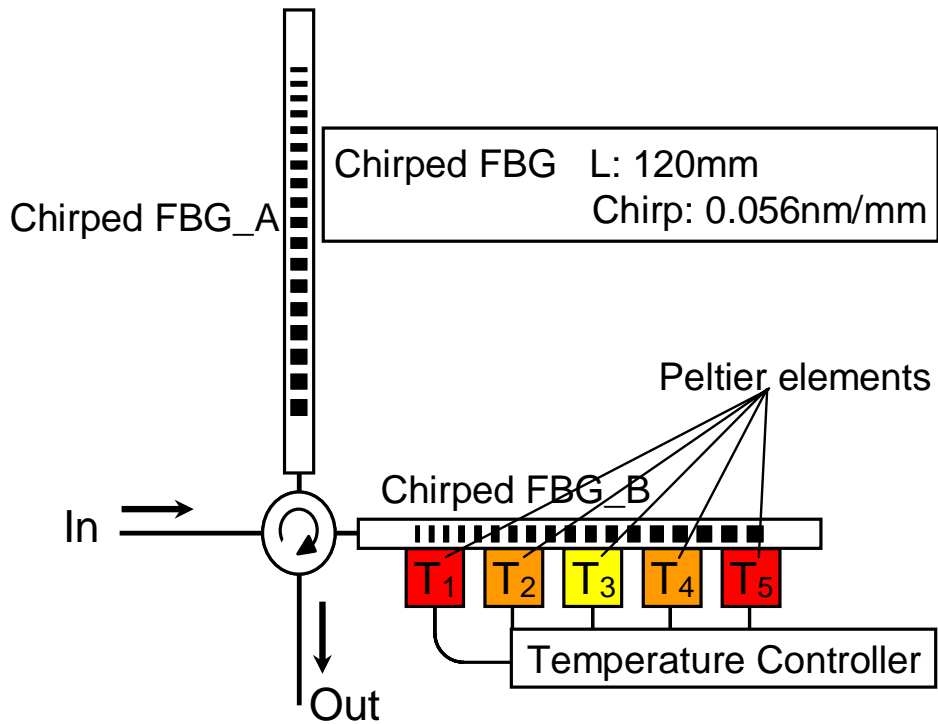


図 4-4 可変分散補償デバイスの構成(概要)

4-3 デバイス特性

4-3-1 反射特性／群遅延特性

図 4-5 にデバイス構成するチャープ FBG_B の(a)反射特性, (b)群遅延特性を示す. 単体のチャープ FBG では, 3dB 帯域 5.5nm, 挿入損失 2.1dB が得られており, また, 群遅延特性の傾きから算出される分散は -124.5ps/nm , 群遅延リップルが $\pm 2\text{ps/nm}$ 程度に抑えられている. 群遅延特性から見積もられる帯域は 8.6nm であるが, 反射特性がフラット形状ではないため 3dB 帯域とはかなり差異がある. なお, FBG 単体での挿入損が大きい理由は, 群遅延リップルを小さくするために反射率を抑制する条件で FBG を形成したためである[66,67].

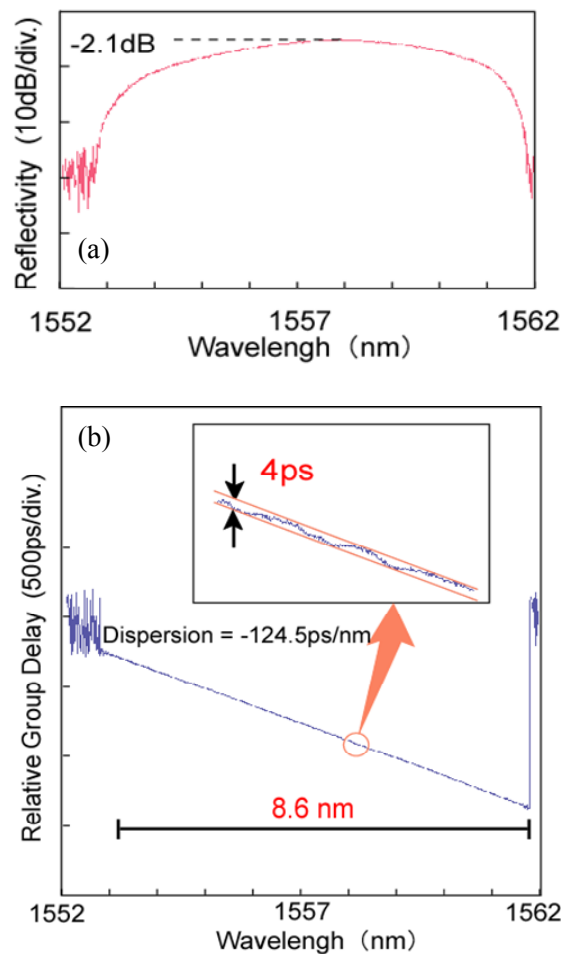


図 4-5 デバイスを構成するチャープ FBG の特性(単体)

図 4-6 にデバイス全体の(a)反射特性, (b)群遅延特性を示す. チャープ FBG_B には温度制御をかけていない状態で測定している. 4端子サーキュレータを含めたチャープ FBG_A とチャープ FBG_B の特性の重ね合わせを示しており, 3dB 帯域 4.0nm, 挿入損失は 6.8dB であるが, チャープ FBG2本合計の損失は約 4dB である. 群遅延特性の傾きから算出される分散は 0.46ps/nm で, それぞれのチャープ FBG の分散がほぼキャンセルされている. 群遅延リップルは 10ps/nm 以下には抑えられているが, 最大リップルはそれぞれのチャープ FBG の和で与えられると考えられる[66,67].

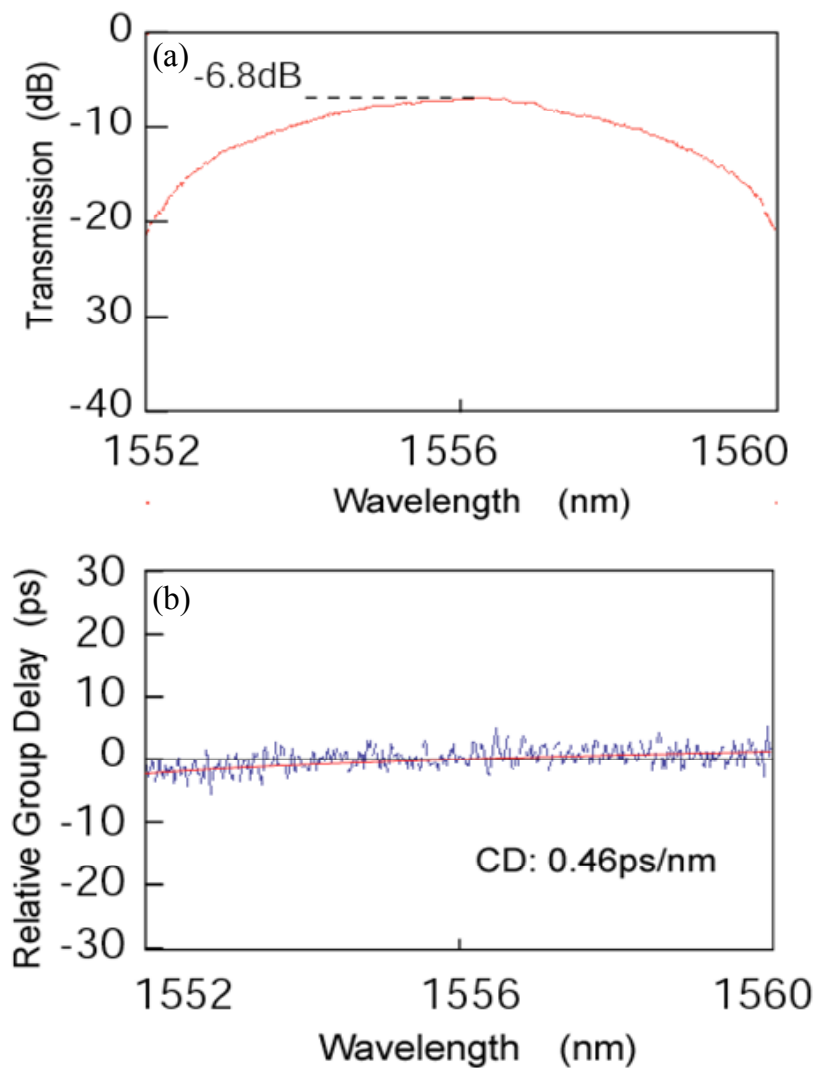


図 4-6 可変分散補償デバイスの特性

4-3-2 可変分散特性

可変分散補償デバイスのチャープ FBG_B へ温度制御を加えた場合の可変分散特性を示す。温度制御は2つのチャープ FBG へそれぞれ加えることも可能であるが、今回は片方のチャープ FBG のみに加えている。

図 4-7 に可変分散特性を示す。(a)に示すようにペルチェ素子を配列し光ファイバ近傍での温度をモニターしながら、PC による温度制御を行っている。温度制御はおよそ 0.1°C の精度で行えており、(b)に示すように1次関数的な温度勾配を与えたときの隣り合うペルチェ素子の温度勾配 $\Delta T (=T_4 - T_3)$ をパラメータとしている。 ΔT を変化させたときの可変分散特性を(c)に示す。分散は温度勾配の大きさに対してほぼ線形に変化しており、 -3.5ps から $+3.5\text{ps}$ の範囲において $0.67\text{ps/nm}^{\circ}\text{C}$ の割合で制御できている。なお、このときの分散スロープ変化はほとんど生じていない[66,67]。

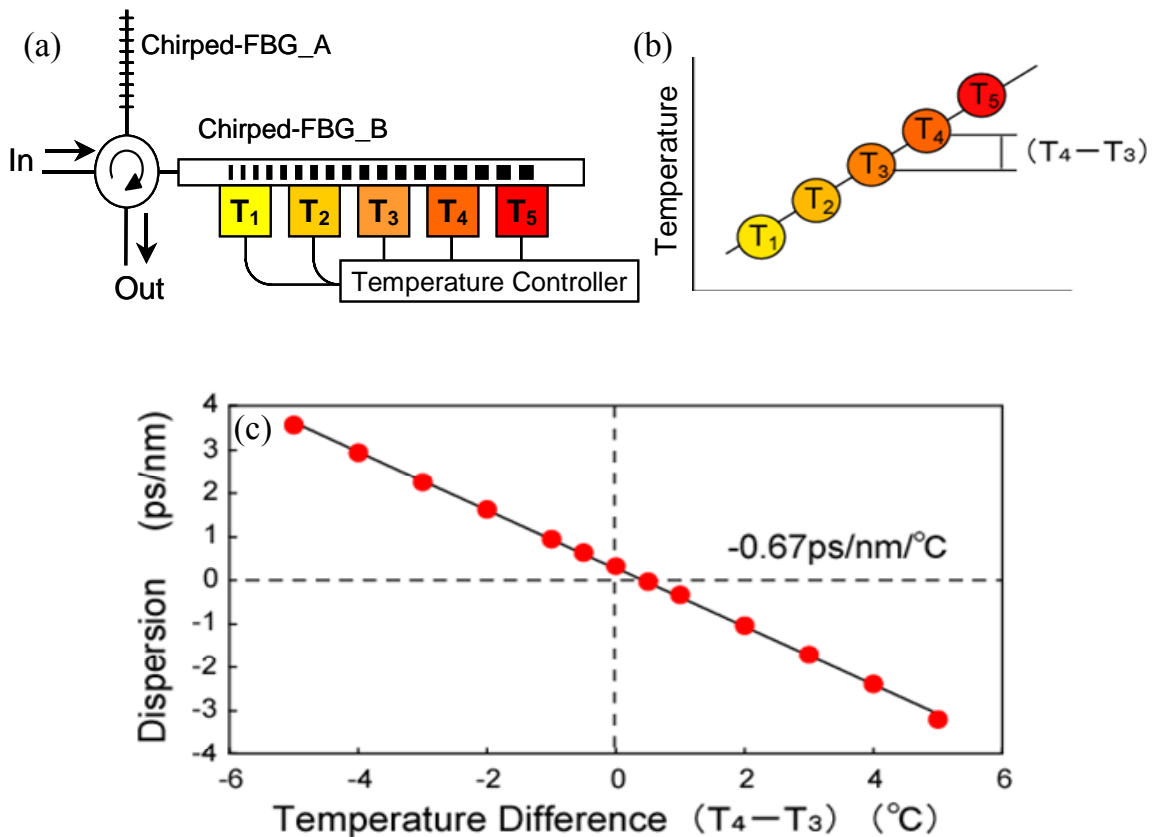


図 4-7 可変分散特性

4-3-3 可変分散スロープ特性

次に分散スロープの可変特性を図 4-8 に示す。分散スロープは(b)に示すように T_3 を中心に2次関数状に温度勾配を与えることで制御している。例えば、 T_1 と T_5 は 25°C に固定し、 ΔT_{3-1} を変化させることで、放物線状の温度分布を与える。残りの3つのペルチェ素子は、 $T_3=25+\Delta T_{3-1}$ 、 $T_2=T_4=25+\Delta T_{3-1}\times 3/4$ とする。 ΔT_{3-1} が 15°C のときは T_3 が 40°C 、 T_2 と T_4 は 36.2°C である。また、 ΔT_{3-1} が -10°C のときは T_3 が 15°C 、 T_2 と T_4 は 17.3°C にそれぞれ設定する。なお、より厳密な温度分布の制御は、ペルチェ素子数を増加させることで達成できる。

群遅延特性を2次関数近似して分散スロープを算出する。ここではペルチェ素子の最大温度差 $\Delta T_{3-1}(=T_3-T_1)$ をパラメータとしている。分散スロープは温度差に対してほぼ線形に変化し、 -3.5ps から $+1.5\text{ps}$ の範囲において $-0.14\text{ps}/\text{nm}^2/^\circ\text{C}$ の割合で制御できている。しかし、このときの分散は温度分布のため $0.2\text{ps}/\text{nm}$ から $0.8\text{ps}/\text{nm}$ の間で変動している[66,67]。

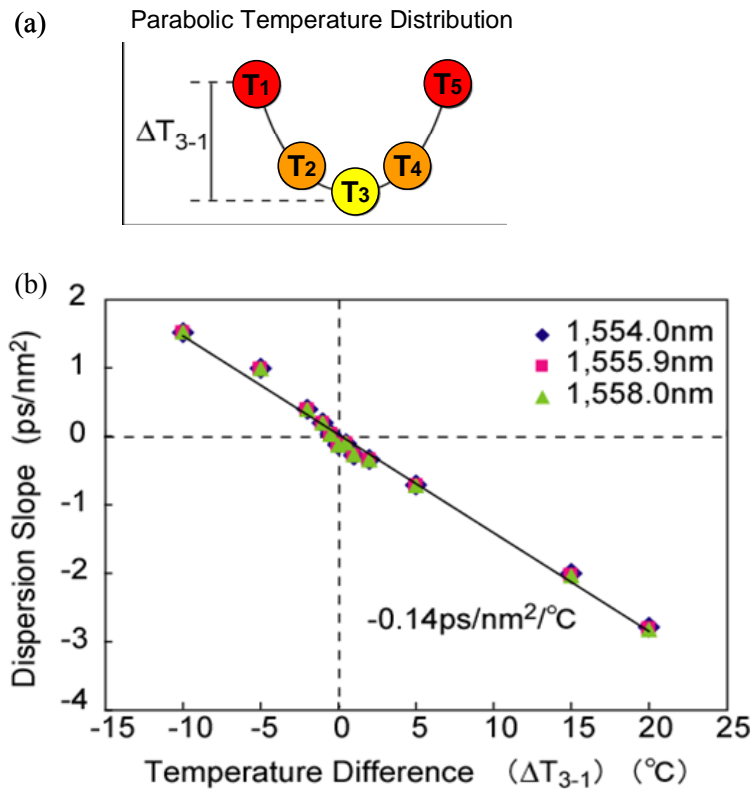


図 4-8 可変分散スロープ特性

分散及び分散スロープの可変特性から、両者をそれぞれ独立に制御できることがわかる。すなわち、本デバイス構成において、2つのチャープ FBG の温度制御を独立に行うことで分散と分散スロープの補償を同時に行える可能性を示した。

4-4 超高速伝送への応用

4-4-1 超短光パルス伝送

デバイスの可変分散スロープ制御機能を用いて、超高速伝送への応用として超短パルスの波形整形に適用する。

可変分散スロープ補償による短パルスの波形整形実験系を図 4-9 に示す。短パルス光源には、中心波長 1556.0nm、繰り返し 10GHz、パルス幅 2.2ps のモードロックファイバレーザを用いる。光ファイバ伝送路は波長 1556.0nm において分散が 0ps/nm、分散スロープが 0.9ps/nm² にあらかじめ調整された、15km の分散シフトファイバと 50m のシングルモードファイバで構成される。伝送されたパルスは可変分散補償デバイスを通過後、オートコリレータで波形が観測される。可変分散補償デバイスの温度分布を制御することで、伝送路全体の分散スロープが補償される。

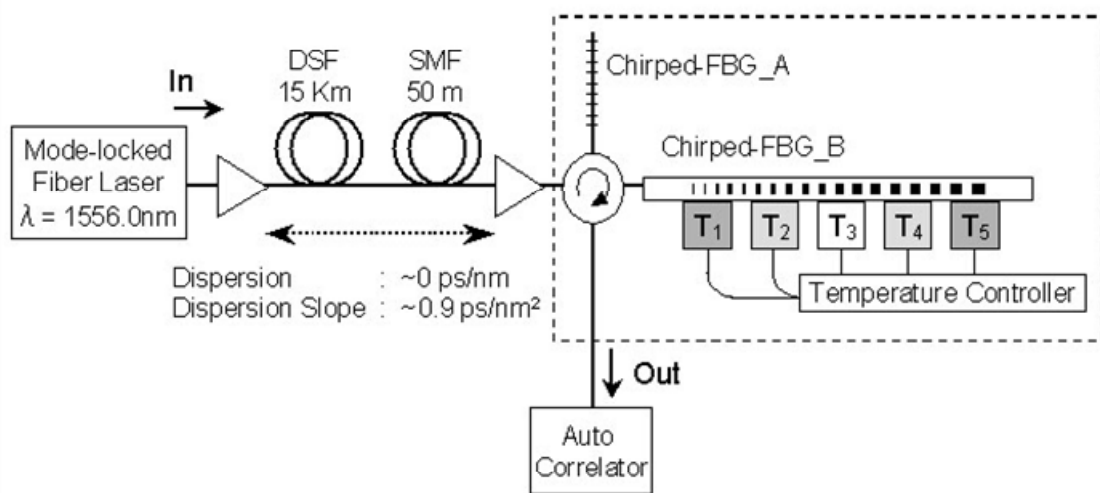


図 4-9 短パルス波形整形実験系

分散スロープ補償による短パルス伝送波形を図 4-10 に示す。デバイスの分散スロープを $-0.9\text{ps}/\text{nm}^2$ から $3.0\text{ps}/\text{nm}^2$ まで変化させた場合の波形変化を示しており、入射パルスも同時に示している。図中に記入した“DS”はデバイスの分散スロープ値である。

図 4-8 から、例えば、温度パラメータ ΔT_{3-1} が 0°C の場合、デバイスの分散スロープは $0\text{ ps}/\text{nm}^2$ 、温度パラメータ ΔT_{3-1} が -6.4°C の場合、デバイスの分散スロープは $1.0\text{ ps}/\text{nm}^2$ とそれぞれ設定できる。分散スロープが $-0.9\text{ps}/\text{nm}^2$ のときに伝送後のパルス幅は最小となり、分散スロープが大きくなるにつれて伝送パルスは広がると同時に裾広がり観測されるが、このパルスの裾広がり観測は分散スロープに起因していることが報告されている[68]。

分散スロープが $-0.9\text{ps}/\text{nm}^2$ のとき、伝送路全体の分散スロープは $0\text{ ps}/\text{nm}^2$ となり、パルス幅は最小の 3.0ps を示し、パルスの裾広がり抑制が観測されている。逆に、伝送路全体の分散スロープを拡大するように温度制御を行うと、顕著なパルスの裾広がり観測される。この結果から、本デバイスを用いた温度制御による分散スロープ補償効果を確認できた。なお、分散スロープを補償しても伝送後のパルスが入射パルス幅まで戻らない理由としては、分散スロープ制御時に分散値が変動してしまうことが一因と考えられ、分散スロープ補償と同時に分散補償を行うことで最適な補償を行えるものとする[67]。

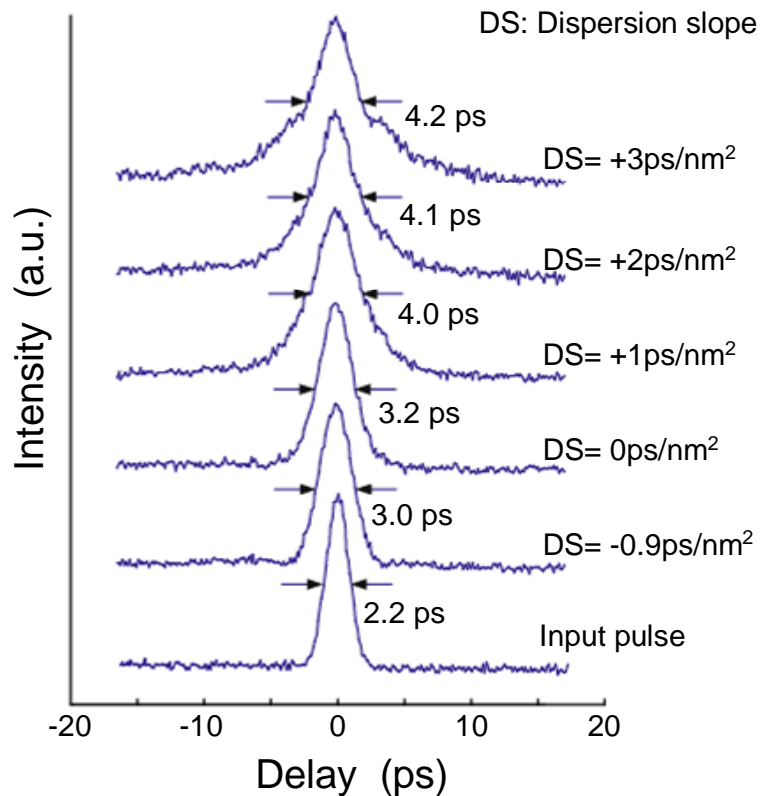


図 4-10 分散スロープ補償による短パルス伝送

4-4-2 160Gb/s 伝送システムへの適用

可変分散補償デバイスの分散スロープ補償機能を 160Gb/s の超高速伝送システムへ適用した結果について示す. 図 4-11 は 160Gb/s の伝送実験系である. 140km の伝送路は, シングルモードファイバ(SMF; 108.5km), 分散シフトファイバ(DSF; 19km), 分散補償ファイバ(DCF; 12.5km)で構成され, 伝送路全体として分散を 0ps/nm、分散スロープを 0.9ps/nm²となるように設定している. 光源としてはファイバレーザを用いており, 10Gb/s の信号を, PLC 型多重化装置を用いて多重化して 160Gb/s の信号を形成し, 光ファイバアンプで増幅し信号を伝送する. 可変分散補償デバイスの分散スロープを変化させた時の伝送特性を測定する. なお, 受信側では 160Gb/s 信号を光学的に 16 チャンネルに分割し, 10Gb/s 信号の BER を測定する.

また, 同じ伝送路において, 図 4-9 と同様な光源と測定器を用いて, 短パルスの伝送波形も測定した.

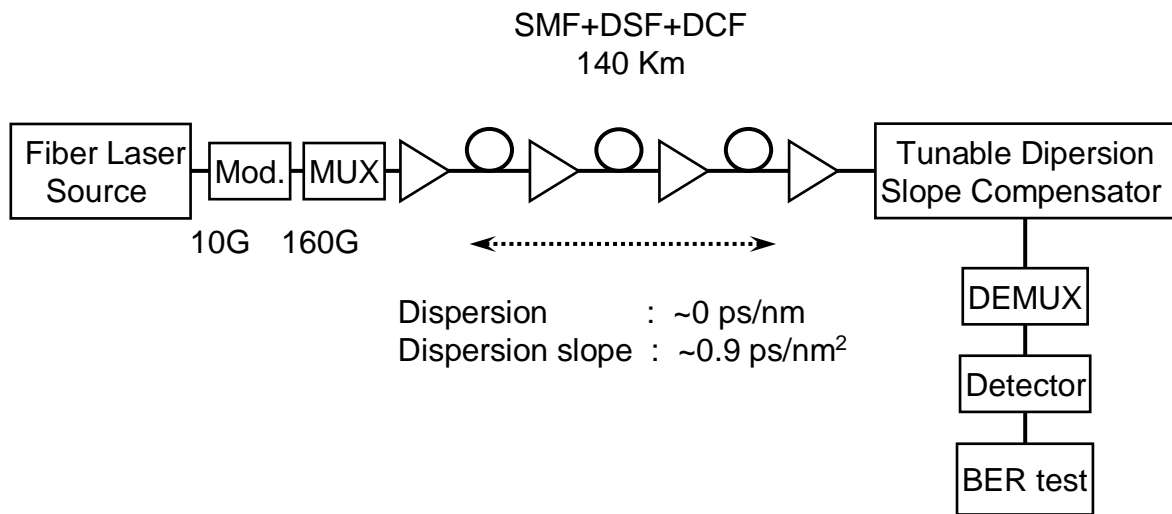


図 4-11 160Gb/s 伝送実験系

図 4-12 に 160Gb/s 伝送実験結果を示す. 可変分散補償デバイスの分散スロープを -0.9ps/nm^2 に設定して伝送路全体の分散スロープをゼロとした場合のビットエラー特性結果を示している. また, Back-to-back の結果も示している. 1dB 以下のパワーペナルティによるエラーフリー特性を得ている.

入力パルス波形と伝送後のパルス波形を示しているが, 伝送後パルスはパルス幅 2.86ps まで整形されており, 裾広がりもほとんど観測されていない.

160Gb/s の超高速信号を 140km の伝送に対して, 可変分散補償デバイスを用いて分散スロープ補償機能を実験的に示したのは初めてであり, 本可変分散補償デバイスが超高速伝送へ十分に適用できることを示した[67].

なお, 伝送システムに適用したデバイス帯域は 10nm 以下であるが, C バンド全域をカバーする帯域を有するチャープ FBG を適用しても, 可変精度, 可変量ともに対応可能であることが十分予想でき, C バンド内での可変一括補償が可能であると考え.

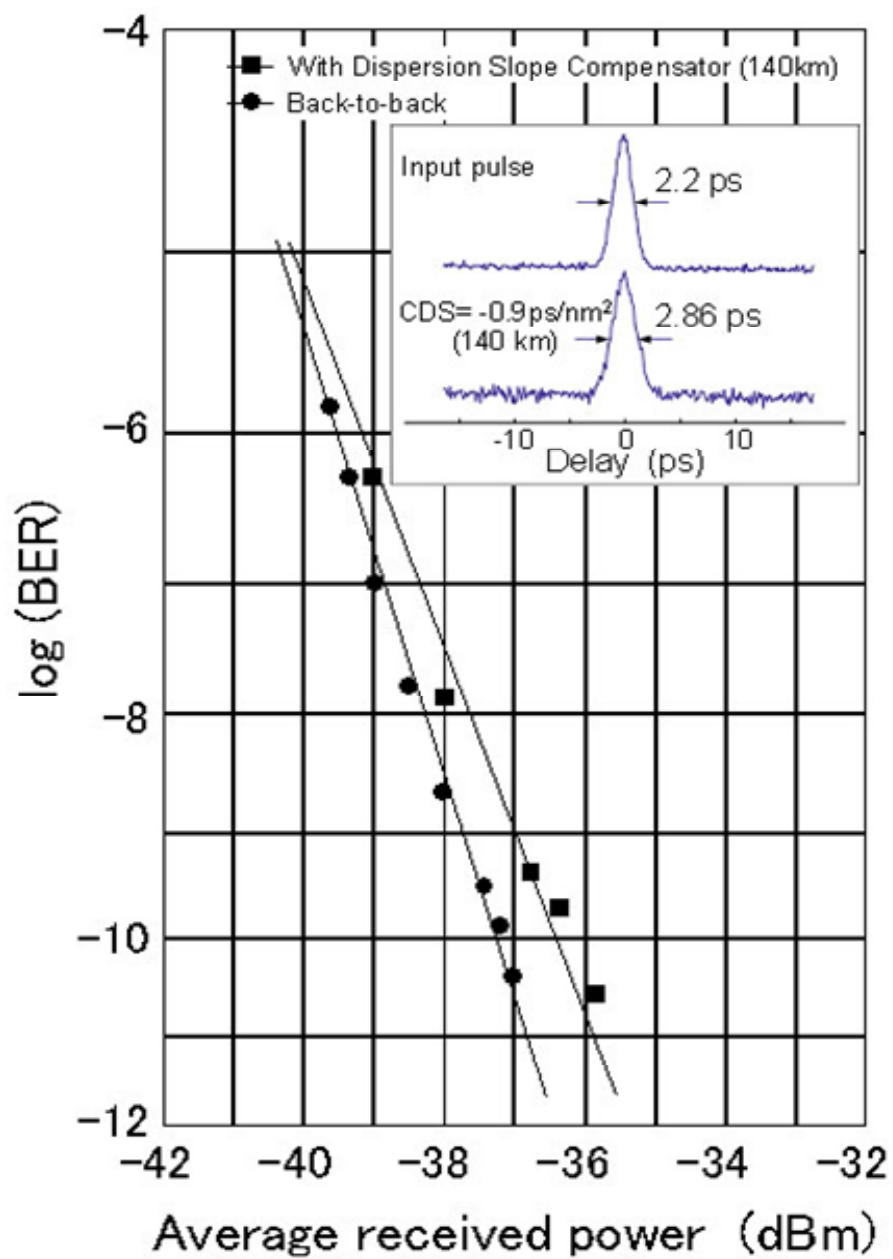


図 4-12 160Gb/s のビットエラー特性

4-5 可変分散補償デバイスモジュール

可変分散補償デバイスの小型モジュール化を試みた。チャープ FBG は、グレーティング長 150mm、チャープ量 0.205nm/mm、帯域 44.0nm の広帯域タイプを使用している。チャープ量 0.205nm/mm から求められる分散量は、チャープ量 0.056nm/mm に比べて 1/3 以下まで小さくなる。従って、同一の温度勾配を付与した場合に可変分散量が小さくなる。

小型モジュール化にあたり、高精度な可変制御を実現するための熱設計を行い、カスタム仕様の超小型ペルチェ素子の形状・配置を最適化した。モジュール底面にはペルチェ素子用のヒートシンクが取り付けられ、150mm長のチャープ FBG に対して、10個のペルチェ素子が搭載されている。単一グレーティング型(サーキュレータ外付け)とサーキュレータ内蔵グレーティングペア型をそれぞれ試作した。

図 4-13 に作製したデバイスモジュールの写真を示す。単一グレーティング型(サーキュレータ外付け)である。モジュールサイズは 170mm(L)×40mm(W)×15mm(H)である。

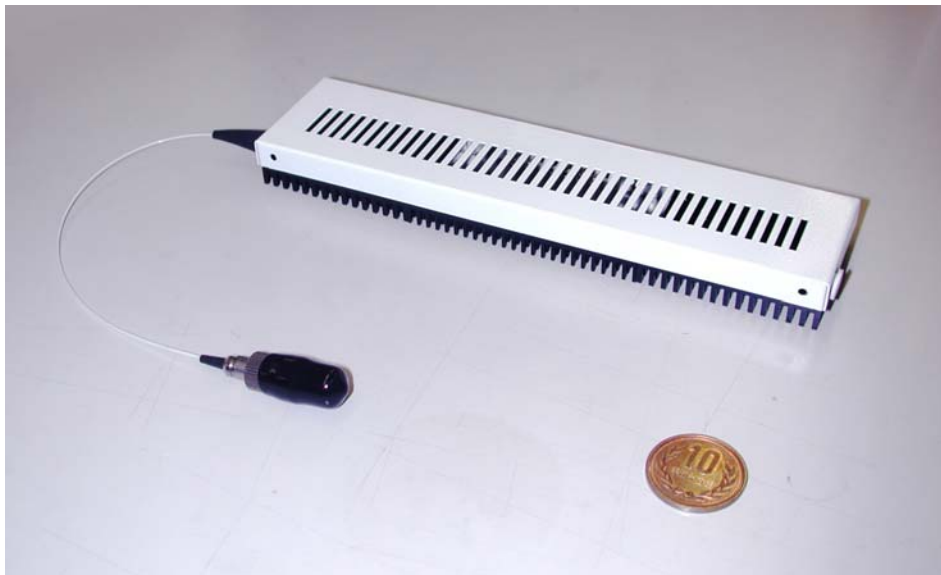


図 4-13 可変分散補償デバイスモジュール
[単一グレーティング型(サーキュレータ外付け)]

図 4-14 に作製したデバイスモジュールの写真を示す。サーキュレータ内蔵グレーティングペア型であり、モジュールサイズは 210mm(L)×70mm(W)×24mm(H)である。

分散補償ファイバとの比較では、デバイスサイズ比で約 1/20 以下の小型化と高精度制御の両立が可能となっている。応答速度は周囲温度によっても異なるが、およそ数分程度で所望の温度分布が達成できるため、分散制御にもほぼ同様な時間が必要である。また、今回使用しているペルチェ素子は、ファイバに沿って横長の長さ 6mm×幅 3mm×高さ 0.9mm のサイズで、吸熱量が1W のカスタム品である。消費電力は制御系を除いてほぼペルチェ素子の消費電力であり、現状では数 W が使われているが、ペルチェ素子の小型化や熱設計の最適化を行うことで小型化、低消費電力化が図れると考える。

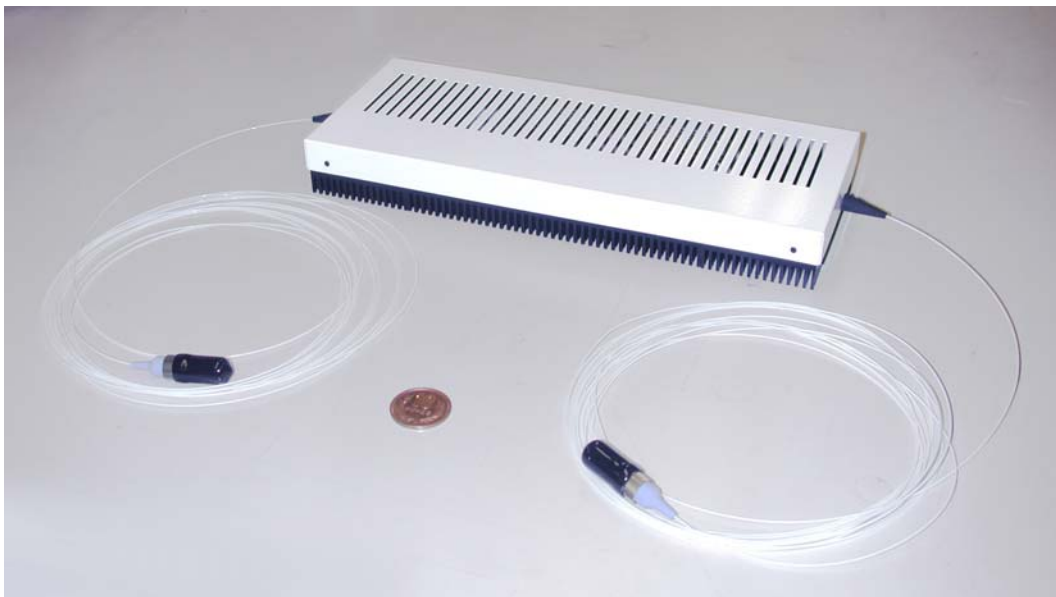


図 4-14 可変分散補償デバイスモジュール
[サーキュレータ内蔵グレーティングペア型]

4-6 まとめ

本章では、超高速伝送用ファイバブラッググレーティング型可変分散補償デバイスについて説明した。

まず、伝送速度の高速化の流れの中で、フェムト秒クラスの光パルス伝送に対応するためには、通常の固定式の分散補償技術に加えて、環境温度等の変化等に対応するための可変分散補償技術が必要となる理由、さらに適用すべき伝送システムについて述べた。

次に、筆者の提案するチャープ FBG を用いた可変分散補償デバイスを説明した。この可変分散補償デバイスの基本構成は、広帯域のチャープ FBG が光サーキュレータを介して縦続接続され、各チャープ FBG には長手方向の複数領域に分割した温度制御機構を付加している。個々のチャープ FBG はほぼ帯域で、線形もしくは非線形チャープ特性を持ち、それぞれの分散特性の重ね合わせによって分散及び高次分散の制御を行うものである。具体的なデバイスとして、2本のチャープ FBG が光サーキュレータを介して直列に接続したグレーティングペア構造の可変分散補償デバイスを設計・試作を行った。

デバイスの反射特性、群遅延特性である基本特性を述べた後、動的な特性である可変分散特性、可変分散スロープ特性を述べ、適切な温度分布を加えることで、高次分散も含めて極めて任意性の高い可変分散制御機能を有することを示した。

さらに、本デバイスを短パルス伝送、160Gb/s の超高速伝送へ適用し、本可変分散補償デバイスが超高速伝送へ十分に適用できることを示した。なお、可変分散補償デバイスを用いて分散スロープ補償機能を実験的に示したのは初めてである。

最後に、可変分散補償デバイスの小型モジュール化について示し、受信端での使用を想定した際のコンパクト化に十分適用可能であることを示した。

第5章 アナログ伝送用ファイバブラッググレーティング型 固定分散補償デバイス

5-1 はじめに

既設の $1.3\mu\text{m}$ 帯シングルモードファイバ(SMF)伝送路上で $1.55\mu\text{m}$ 波長帯の半導体レーザ光源を用いる残留側波帯振幅変調(AM-VSB: Amplitude Modulation - Vestigial Side Band)方式は, 多数のノードの使用や長距離伝送への対応が可能なことから, アナログテレビ放送の映像信号伝送に広く用いられている. 10km から 50km 程度の伝送距離を有する中長距離アナログ光 CATV 伝送は, 電気信号を光信号にそのまま変換するため電気伝送方式との親和性が高く, 従来設備の大幅な変更が不要なこと, 低コストで簡便なシステム構築が可能であること等, その有用性は高い.

一般にアナログ信号を用いる光ファイバ伝送においては, 伝送歪やノイズが伝送特性の決定要因となっており, デジタル伝送方式におけるビットエラーレート特性とは異なる評価が必要となる. また, TV 周波数や無線周波数等, 数多くの周波数を混合させる多チャンネル伝送方式(SCM: Sub-carrier Multiplexing 方式)では, 2次歪や3次歪を抑制することが必須となる. その伝送歪は半導体レーザの発振波長チャープングや波長分散に起因しており[32,69,70], 伝送歪の低減には分散補償が有効であることが検討されている[71,72].

最近では, アナログ光伝送システムの歪低減のための分散補償に分散補償ファイバではなく, チャープ FBG を用いる検討もなされている[73-75]. また, 群遅延リップルのあるチャープ FBG を用いた分散補償時の CSO(Composite Second Order)の見積もりが行われており[76], チャープ FBG の分散補償デバイスとしての適用性の検討が始められている.

チャープ FBG を分散補償デバイスとして用いるメリットは,

- ① 分散補償ファイバはファイバ長に伴うレイリー散乱によるノイズ上昇があるが, チャープ FBG では生じないこと
- ② 分散補償ファイバに比した小型化や省スペースによるシステムの柔軟性があること

が挙げられる.

一方, チャープ FBG は周期構造を有することから生じる群遅延リップルによる特性

への影響が避けられないが、リップルの特性に与える影響はこれまで十分に検討がなされていない。

本章では、このような背景を踏まえ、強度振幅方式を用いたアナログ光伝送システムの分散補償にチャープ FBG を適用する際の伝送歪を低減することを目的として、群遅延リップル特性と伝送歪特性との関係を明らかにするため、解析的及び実験的な検討を行った結果を述べる。

まず、伝送システムを想定して、10km の SMF 伝送路の分散を補償するためのチャープ FBG の設計・試作を行い、その特性から、リップルを有するチャープ FBG の群遅延特性から局所分散値を定義し、分散補償用に設計された全体分散値と局所分散値の2つの分散値を考慮することでチャープ FBG の特徴を抽出する方法を検討する。

次に、リップル特性の影響がもっとも大きく現れる2次相互変調歪 (IM2: Second-order Intermodulation Distortion) の伝送特性評価実験結果に基づき、群遅延リップルの大きさと IM2 との関係を示す。

群遅延リップルの大きさと IM2 との関係を検討するため、波長分散とレーザチャープが存在するときの IM2 を理論的に導出し、導出した式を用いて、測定した IM2 から分散値を求め、変調に応じた実効分散を求める。さらに変調の大きさをパラメータとして、半導体レーザ変調時のスペクトル(変調スペクトルと波長シフトに起因するスペクトル広がり)と群遅延リップル(リップルの大きさとリップル周期)から推定される局所的分散値との関係を推定し、変調の大きさによって IM2 の大きさが異なり、特に変調度が小さい領域ではチャープ FBG では IM2 が抑制できない理由を考察する。

最後に、以上の検討から、チャープ FBG はアナログ伝送システムの変調度が大きい領域では分散補償ファイバ並の補償効果が得られることと、変調度が小さい領域では分散補償効果が得られないことを明らかにした。

なお、本章で用いたチャープ FBG は第3章や第4章で検討した広帯域チャープ FBG とは、帯域やチャープ量は異なっているが、設計や作製方法については同じ手法を用いている。

5-2 分散補償用ファイバブラッググレーティングの設計と試作

アナログ光伝送に用いる分散補償用のチャープ FBG は、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯の光信号に対して SMF10km の伝送距離を補償するための補償量 (-170ps/nm) を有する設計とした。そのため、グレーティング長 L は 50mm 、グレーティングのチャープ量は 0.393nm/mm としており、グレーティング長とチャープ量から計算される帯域は約 2.8nm となる。中心波長は $1.5502\mu\text{m}$ とした。帯域は変調周波数 (10MHz から 2GHz 程度) から求められる必要な変調帯域に比べると十分広い。また、光源である半導体レーザに中心波長シフトが生じても十分に対応できる帯域としており、半導体レーザの温調を施さない場合にも十分対応が可能である。

チャープ FBG の作製には、第3章で検討した群遅延リップルを抑制できる作製条件を踏襲している。使用した光ファイバは通常の SMF であり、 \tanh 関数形状のアポダイズ関数を用い、ポジ型・ネガ型のスリットはグレーティング長 50mm に合わせたサイズに変更し、露光時の分割数は 160 とした。また、比較のために群遅延リップルが非常に大きくなる(アポダイズを施さない)作製条件でのサンプルも作製した。作製後のチャープ FBG には UV 硬化樹脂による保護層等の加工は施していない。

作製したチャープ FBG の特性を図 5-1 に示す。反射特性から 3dB 帯域は約 2.0nm 、反射率では挿入損失が 1.5dB 程度がある。また、群遅延特性の傾きから算出した分散は -184.5ps/nm が得られている。 -170ps/nm の設計値からのズレはやや大きいですが、分散補償の効果(直線近似した傾きから算出される全体分散とリップルの傾きから算出する局所分散)を比較検討するうえでは、問題にはならないと考える[77]。

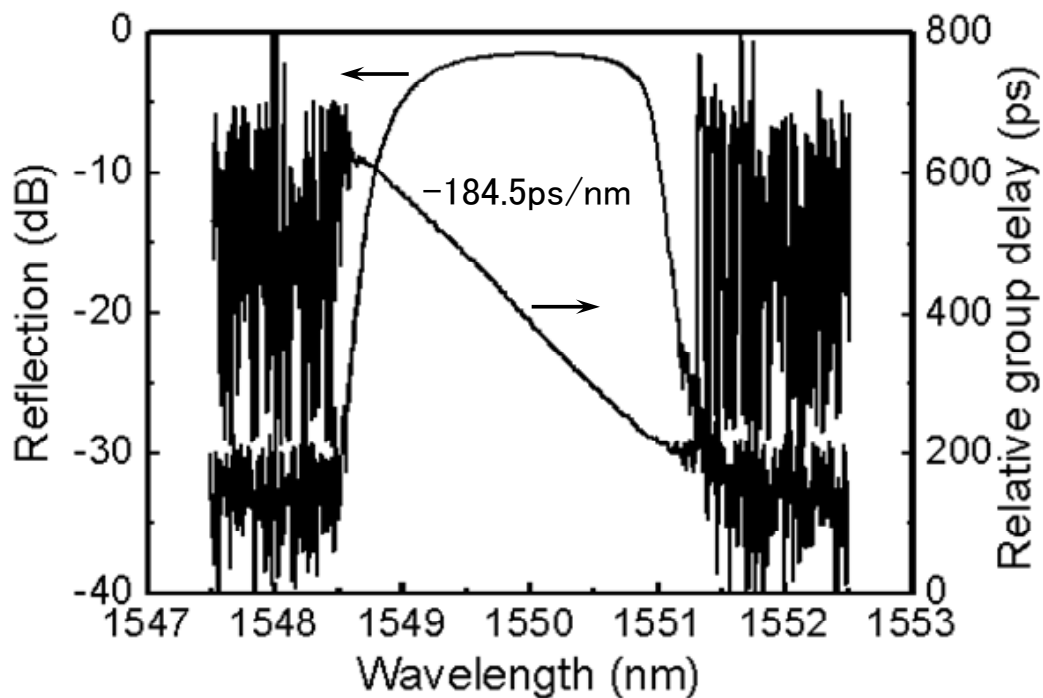


図 5-1 固定分散補償用チャープ FBG の特性

図 5-2 に作製したチャープ FBG の群遅延リップル成分のみを拡大して示す. これは図 5-1 の群遅延特性から直線近似で算出した分散値を差し引いて, リップル成分のみを算出している[77].

全体に波長に対して緩やかに(周期約 1nm) sin 関数的に変動があると同時に, 細かい群遅延リップルが存在する. 長い周期の変動は作製に使用した位相マスク固有のものではないため, 可動ステージの繰り返し移動時の揺らぎ等の作製条件に依存したものと考えられるが, 詳細はわからない. 群遅延リップルは最大で 6ps 程度, その周期は 0.05nm 程度の値が読み取れる.

ここで, 群遅延リップルの傾きから求められる局所的な分散値を, “局所分散 (Local Dispersion)”と定義し, 通常定義されている全体的な分散値である“全体分散 (Global Dispersion)”と区別して検討を進める.

なお, 特に断らない場合, “分散”は全体分散を示すこととする.

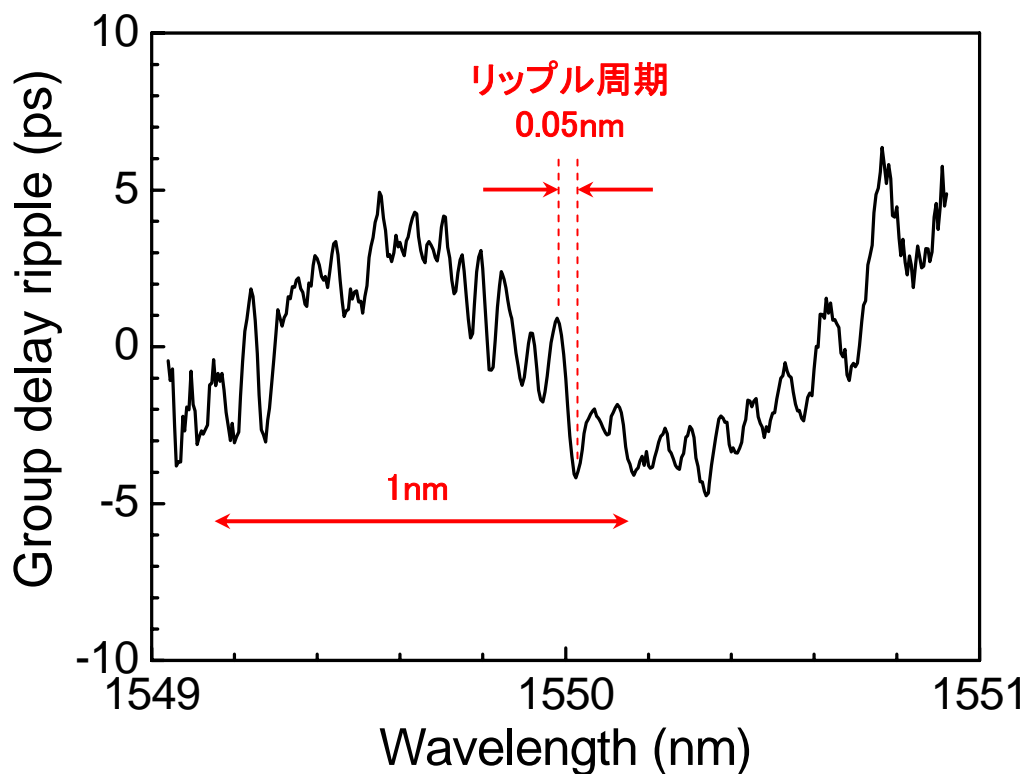


図 5-2 チャープ FBG のリップル成分

5-3 ファイバブラッググレーティングによるアナログ伝送歪の補償

5-3-1 アナログ伝送システム

分散補償用のチャープ FBG の有無により、歪特性を測定することでアナログ伝送特性を評価する。図 5-3 にアナログ伝送特性評価実験系を示す。100MHz から 2GHz 程度までの変調周波数の2つの信号を混合して DFB レーザを直接変調し、10km の SMF を伝送後、フォトダイオードからの電気信号をスペクトルアナライザで測定する。3つのアイソレータは DFB レーザへの反射戻り光を抑制するために挿入されており、チャープ FBG を接続している 3dB カプラは光サーキュレータの代わりに使用している。これは使用したサーキュレータの Directivity があまり大きくない特性であったためである。Back-to-back, SMF-10km (チャープ FBG なし), SMF-10km (チャープ FBG あり) のそれぞれの場合で測定する。

なお、DFB レーザの発振波長は 1550nm であり、チャープパラメータ ΔF は約 180MHz/mA であるが、その値はバイアス電流 $I_b = I_{th} + 40\text{mA}$ の条件において、FM (周波数変調) 成分と AM (強度変調) 成分の測定を行うことから算出した。

2次相互変調歪 (IM2: Second-order Intermodulation distortion) は、2120MHz と 100MHz の 2信号を光源に入力し、2120MHz, 100MHz におけるキャリアレベルと、2信号の差信号成分である 2020MHz のレベルとの差から算出する。DFB レーザのバイアス電流は $I_{th} + 40\text{mA}$ に固定し、変調度は入力する電気信号と電気アッテネータを用いて調整し、変調度は光信号段階でのキャリアレベルと信号レベルとで設定し、0.04 から 0.5 まで変化させながら測定する。

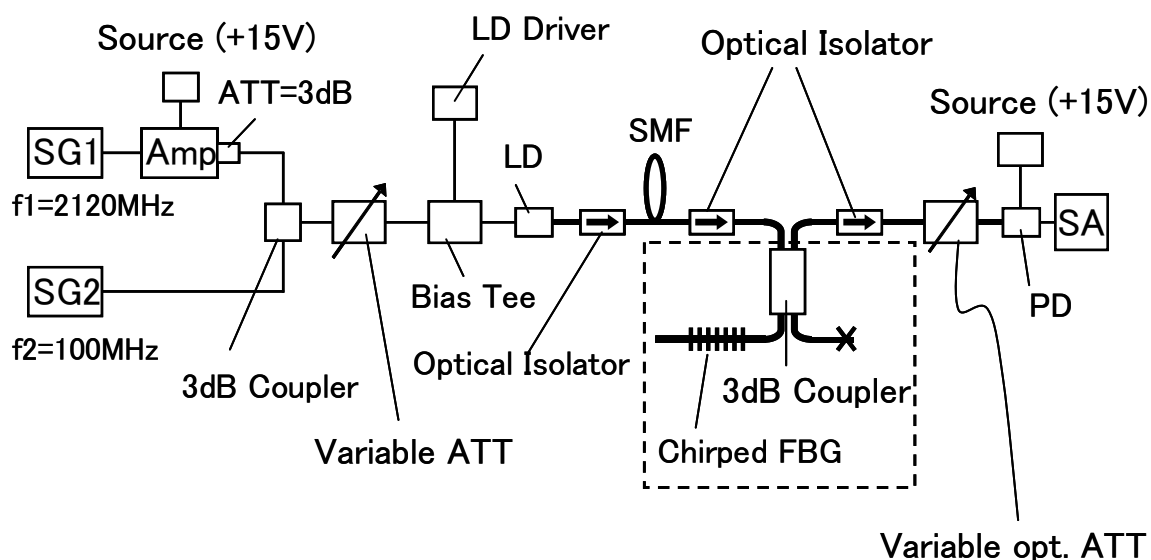


図 5-3 アナログ伝送特性評価実験系

5-3-2 アナログ伝送2次歪の補償

図 5-4に 変調度に対する IM2 の測定結果を示す。Back-to-back, SMF-10km (チャープ FBG なし), SMF-10km (チャープ FBG あり) それぞれの場合について示している。SMF-10km (チャープ FBG なし) では Back-to-back に比べて、変調度の小さい領域で 13dB 以上、変調度の大きい領域でも 5dB 以上 IM2 が大きくなっており、特性が悪化している。

SMF-10km (チャープ FBG あり) の特性に注目すると、変調度が 0.3 以上では

Back-to-back のレベルまで IM2 が低下しており, チャープ FBG による分散補償効果によって IM2 の抑制が図れている. 一方, 変調度が 0.2 以下になると IM2 が増加に転じ, 変調度 0.1 以下では SMF-10km (チャープ FBG なし) に比べても明らかに IM2 が増加している[83].

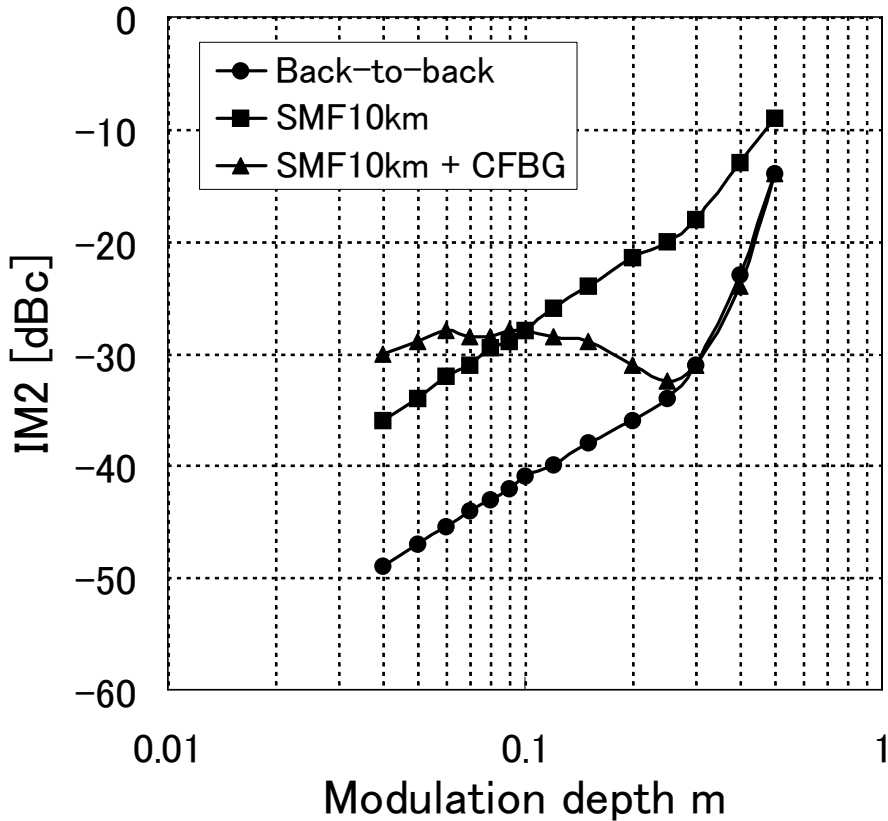


図 5-4 IM2 と変調度の関係

5-4 ファイバブラッググレーティングリップルと伝送歪

チャープ FBG を用いた分散補償時の IM2 の検討にあたり, まず光ファイバ分散とレーザチャープがあるときの IM2 の導出を行い, 群遅延リップルに起因する局所分散値から IM2 の大きさを求め, それが実験値に一致することを示す. さらに群遅延リップルがある場合には, 半導体レーザの変調帯域の違いによる実効的な分散が IM2 の大きさを決定することを推定し, IM2 と変調度との関係を明らかにする.

5-4-1 波長分散で生じる2次伝送歪(理論計算)

直接変調-直接受光方式においては、高調波歪や相互変調歪が発生し、特に、通常の SMF 中を 1.55 μm 帯波長帯の光信号が伝送される場合に問題になる。その伝送歪発生メカニズムは、半導体レーザの発振波長チャープと波長分散に基づき説明されている[32,69,70].

レーザのチャープ FBG を用いた分散補償時の IM2 と変調度の関係(前節で示した実験結果)を検討するにあたり、まず、光ファイバの分散と光源である半導体レーザにチャープがあるときの受信端における IM2 の導出を行う[77].

半導体レーザへの入力電流を $i(t)$ 、レーザ出力を $p_0(t)$ 、レーザの微分量子効率を ξ とすると、(5-1)式が成立する。

$$p_0(t) = \xi i(t) \quad (5-1)$$

なお、以下の解析においては、レーザ中での歪は発生しないとする。

光ファイバ長 L 、単位あたりの損失 a [dB/km] とすると、受信端でのレーザ出力 $p_r(t)$ は、

(5-2)式で表される。

$$p_r(t) = 10^{-aL/10} p_0(t - L/v) \quad (5-2)$$

ここで v はファイバ内の光の伝搬速度であり、 v は光の波長により大きさが変わる。そのため(5-3)式が成り立つ。

$$\begin{aligned} 1/v &= 1/v_0 + \Delta\lambda \partial(1/v)/\partial\lambda \\ &= 1/v_0 + \Delta\lambda D \end{aligned} \quad (5-3)$$

v_0 は基準の波長時の伝搬速度、 $\Delta\lambda$ は波長の偏移量、ファイバの波長分散 D は(5-3)式第二項の微分項である。SMF の波長 1.55 μm における分散値は約 17ps/nm/km である。

レーザの発振波長はレーザに流す電流で変化するが、これはレーザ内の温度やキャリア密度が変化し、キャビティの屈折率が変わるためである。信号電流振幅 1mA 当

たりの光周波数のチャープ量を ΔF とする. なお, 本実験では ΔF はほぼ 180MHz/mA である. ここで, レーザの発振波長の偏移量 $\Delta\lambda$ は(5-4)式で表される.

$$\Delta\lambda = -(\lambda^2/c)\Delta F i(t) \quad (5-4)$$

ここで, λ はレーザの発振波長, c は光速で, 波長のチャープは信号電流に対してリニアに変化し歪は生じないとする. すると, 遅延時間 τ は(5-5)式で表される.

$$\begin{aligned} \tau &= L\Delta\lambda D \\ &= -(DL\lambda^2/c)\Delta F i(t - L/v_0 - \tau) \end{aligned} \quad (5-5)$$

今, レーザへ周波数が f_1 と f_2 の2チャンネルの信号を入力すると, $i(t)$ は(5-6)式の通り示される.

$$i(t) = (I_b - I_{th})m\{\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)\} \quad (5-6)$$

(5-1), (5-2), (5-3)式を組み合わせて整理すると, 受信端でのレーザ出力 $p_r(t)$ は,

$$\begin{aligned} p_r(t) &= 10^{-\alpha L/10} p_0(t - L/v) \\ &= 10^{-\alpha L/10} \xi i(t - L/v_0 - \tau) \\ &= 10^{-\alpha L/10} \xi I \{\cos(2\pi f_1(t - L/v_0 - \tau)) + \cos(2\pi f_2(t - L/v_0 - \tau))\} \\ &= 10^{-\alpha L/10} \xi I \left\{ \begin{aligned} &\cos(2\pi f_1(t - L/v_0) + 2\pi f_1(DL\lambda^2/c)\Delta F i(t - L/v_0 - \tau)) \\ &+ \cos(2\pi f_2(t - L/v_0) + 2\pi f_2(DL\lambda^2/c)\Delta F i(t - L/v_0 - \tau)) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (5-7)$$

(5-7)式を整理すると,

$$p_r(t) = 10^{-\alpha L/10} \xi I \left\{ \begin{aligned} &\cos[2\pi f_1 t + \beta_1(\cos(2\pi f_1 t') + (\cos(2\pi f_2 t')))] \\ &+ \cos[2\pi f_2 t + \beta_2(\cos(2\pi f_1 t') + (\cos(2\pi f_2 t')))] \end{aligned} \right\} \quad (5-8)$$

$$\begin{aligned}
\beta_k &= 2\pi f_k (DL\lambda^2/c) \Delta F I(I_b - I_{th}) m \quad (k=1,2) \\
t &= t - L/v_0, \\
t' &= t - L/v_0 - \tau
\end{aligned} \tag{5-9}$$

ここで I_b , I_{th} はレーザのバイアス電流と閾値電流, m は1チャンネル当たりの変調度であり, $\beta_k \ll 1$, $\tau \ll 1$ の場合について, (5-8)式を展開するとベッセル関数を用いて (5-10)式で $p_r(t)$ が整理できる. 【展開の詳細は付録】

$$p_r(t) \cong 10^{-\alpha L/10} \xi I \left\{ \begin{aligned} & \left[J_0(\beta_1)^2 - J_0(\beta_1)J_2(\beta_1) - 2J_1(\beta_2)^2 \right] \cos 2\pi f_1 t \\ & + \left[J_0(\beta_2)^2 - J_0(\beta_2)J_2(\beta_2) - 2J_1(\beta_1)^2 \right] \cos 2\pi f_2 t \\ & - \left[\begin{array}{l} J_0(\beta_1)J_1(\beta_1) + J_1(\beta_1)J_2(\beta_1) \\ + J_0(\beta_2)J_1(\beta_2) + J_1(\beta_2)J_2(\beta_2) \end{array} \right] \sin 2\pi(f_1 - f_2)t \\ & - \left[\begin{array}{l} J_0(\beta_1)J_1(\beta_1) + J_1(\beta_1)J_2(\beta_1) \\ + J_0(\beta_2)J_1(\beta_2) + J_1(\beta_2)J_2(\beta_2) \end{array} \right] \sin 2\pi(f_1 + f_2)t \\ & - J_0(\beta_1)J_1(\beta_1) \sin 4\pi f_1 t \\ & - J_0(\beta_2)J_1(\beta_2) \sin 4\pi f_2 t \\ & - \left[J_1(\beta_1)^2 + J_0(\beta_2)J_2(\beta_2) - J_2(\beta_2)^2 \right] \cos 2\pi(2f_1 - f_2)t \\ & - \left[J_1(\beta_2)^2 + J_0(\beta_1)J_2(\beta_1) - J_2(\beta_1)^2 \right] \cos 2\pi(f_1 - 2f_2)t \end{aligned} \right\} \tag{5-10}$$

ここで, $J_n(\beta)$ は β を変数とする n 次のベッセル関数である. 【付録】

従って, 周波数 $(f_1 \pm f_2)$ における $IM2$ は, 次式の通り表される.

$$IM2 = \frac{J_0(\beta_1)J_1(\beta_1) + J_1(\beta_1)J_2(\beta_1) + J_0(\beta_2)J_1(\beta_2) + J_1(\beta_2)J_2(\beta_2)}{J_0(\beta_1)^2 - J_0(\beta_1)J_2(\beta_1) - 2J_1(\beta_2)^2} \tag{5-11}$$

$$\cong \frac{J_1(\beta_1) + J_1(\beta_2)}{J_0(\beta_1)} \tag{5-12}$$

$$\cong \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \tag{5-13}$$

なお、受信器や光学デバイス等による発生歪を $IM2_0$ としたとき、 $IM2'$ は $IM2$ と $IM2_0$ との振幅加算で表現される。

$$IM2' = 20 \log \left[(\beta_1 + \beta_2) / 2 + 10^{(IM2_0/20)} \right] \quad [dBc] \quad (5-14)$$

$IM2$ は主にファイバ分散によって生じており、その値はファイバの波長分散 D 、変調度 m 、レーザのチャープパラメータ ΔF 、バイアス電流 I_b 、変調周波数 f_1, f_2 を用いて計算される。

5-4-2 ファイバブラッググレーティングリップルに起因する局所分散

筆者は $IM2$ の大きさが変調度に大きく依存する実験結果について、チャープ FBG が通常の分散補償ファイバとは異なる分散補償効果を有することを推定した。これは、チャープ FBG を用いた分散補償時の CSO (Composite Second Order) の群遅延リップルの効果について、リップルの大きさと周期から CSO を見積もっていること[9]などからも裏付けられる。

まず、前項で導出した分散が存在する場合の $IM2$ 等の式と、図 5-4 に示されており $IM2$ の測定結果を用いて、各変調度における“実効分散 (Effective Dispersion, $(DL)_e$)”を計算する。“実効分散”とは、FBG の全体分散とリップルに起因する局所分散も含めたトータルの分散値を示している。

図 5-4 に示される Back-to-back の値が受信器や光学デバイス等による発生歪 $IM2_0$ を表していると仮定すると、各変調度に対応した $IM2'$ から $IM2_0$ を除いた残りが分散に基づく歪となる。従って、実効分散 $(DL)_e$ は (9), (13), (14) 式を用いて、(15) 式で示される。

$$\begin{aligned} (DL)_e &= \frac{c}{2\pi\lambda^2 \Delta F (I_b - I_{th}) m} \cdot \frac{\beta_1 + \beta_2}{f_1 + f_2} \\ &= \frac{c}{\pi\lambda^2 \Delta F (I_b - I_{th}) m} \cdot \frac{10^{(IM2'/20)} - 10^{(IM2_0/20)}}{f_1 + f_2} \end{aligned} \quad (5-15)$$

(5-15)式を用いて実効分散(DL_e)を計算すると、各変調度に対する実効分散(DL_e)の値が求められ、その結果を図 5-5 に示す。この図からも明らかなように、変調度 m が 0.25 を越えた範囲では実効分散が 0 となる。すなわち、この領域では完全に分散補償が実行され、分散に基づく歪の発生がないことを示しており、チャープ FBG による分散補償が有効に機能していることを示している。

一方、変調度 m が 0.2 以下の領域では、実効分散は変調度 m が小さくなるにつれて増大し、変調度 m が 0.07 以下では 1000ps/nm を越える。つまり、変調度 m に応じて光が感じる分散値が変化していることを示していると考えられる。

チャープ FBG は 10km の SMF の分散補償用に設計されており、群遅延リップルが存在しなければ実効分散はゼロとなるはずである。しかしながら変調度 m の小さい領域で実効分散が存在するのは、群遅延リップルに起因する局所的な分散の影響によるものと推定する[83]。

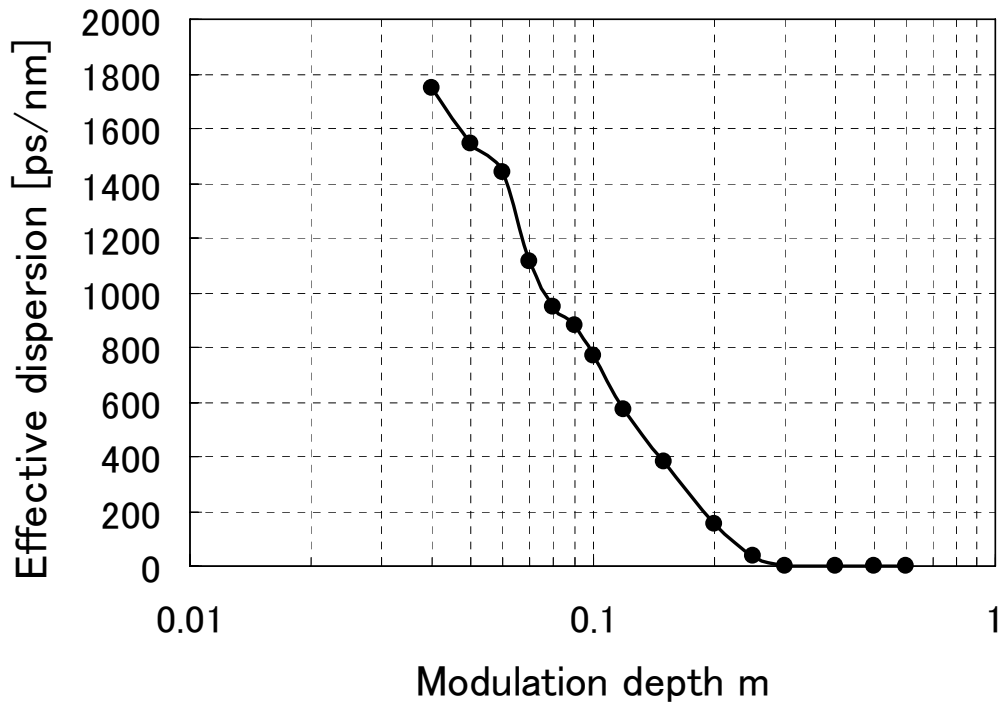


図 5-5 計算した実効分散値と変調度の大きさの関係

5-4-3 変調帯域に応じた分散と2次伝送歪

変調度 m に実効分散が変化することに関して、半導体レーザ変調時の光信号のスペクトル幅を導入して考察する. 図 5-6 に半導体レーザの無変調時及び変調時のスペクトル広がりや発振波長シフトの関係の概略を示す. $\Delta\lambda_s$ は変調時のスペクトル広がり, $\Delta\lambda_m$ は発振波長シフトを示し, $\Delta\lambda_s$ は変調によって引き起こされ, $\Delta\lambda_m$ はチャープに起因し, 変調度及び変調周波数に依存する. $\Delta\lambda_m$ は(5-4)式で与えられ, 今回の実験条件では変調度が 0.5 の場合に $\Delta\lambda_m$ は $=3.6\text{GHz}$ が算出され, 同じ条件で場合に $\Delta\lambda_s$ は $=5\text{GHz}$ が算出されるため, 変調度が 0.5 の場合の全体スペクトル広がりや両者の和である $8.6\text{GHz}(=0.07\text{nm})$ となる. また, 変調度が 0.04 の場合の全体スペクトル広がりや $0.3\text{GHz}(=0.003\text{nm})$ となる.

すなわち, 無変調時にスペクトル広がりはないが, 変調時には $\Delta\lambda_s$, $\Delta\lambda_m$ 両者の効果によってスペクトル広がり生じ, チャープ FBG の群遅延リップル周期と合致する程度となる.

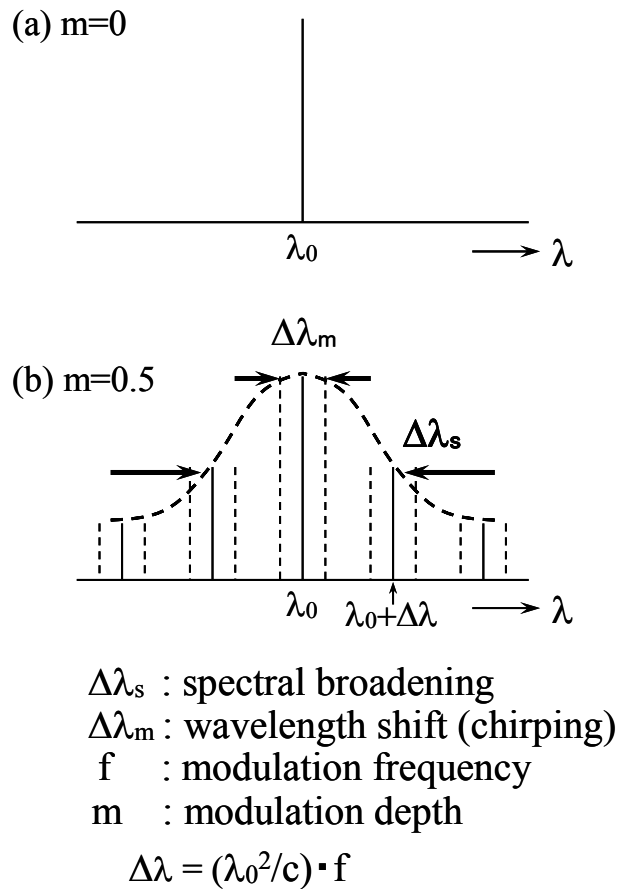


図 5-6 スペクトル広がりや発振波長シフトの関係

ここで算出したスペクトル広がりやチャープ FBG の群遅延リップルについて検討する。図 5-7 にスペクトル広がりやに対応した局所分散値を示す。測定した群遅延リップルのグラフから、波長 1550nm における異なった3つの傾きから分散値を見積もると、それぞれ-12ps/nm, -100ps/nm, -1000ps/nm となるが、これらは異なったスペクトル幅 0.8nm, 0.05nm, 0.003nm に応じて算出したものである。

変調度が 0.5 の場合のスペクトル広がり $\Delta\lambda$ (=0.07nm)は、リップル周期 0.05nm よりも大きく、この光信号に対応する分散の大きさ(絶対値)は 100ps/nm 以下(図中の傾きが緩やかになる)となる。一方、変調度が 0.04 の場合のスペクトル広がり $\Delta\lambda$ (=0.003nm)はリップル周期 0.05nm よりかなり小さくなり、この光信号に対応する分散の大きさ(絶対値)は 1000ps/nm 以上(図中の傾きがきつくなる)となる。図 5-5 に示される変調度が小さい領域での実効分散値の大きさは、10km の SMF を補償するための分

散値(-170ps/nm)よりも絶対値がはるかに大きく、群遅延リップルに起因する局所分散が変調度の小さい領域で IM2 を悪化させる原因であると考えられる[77].

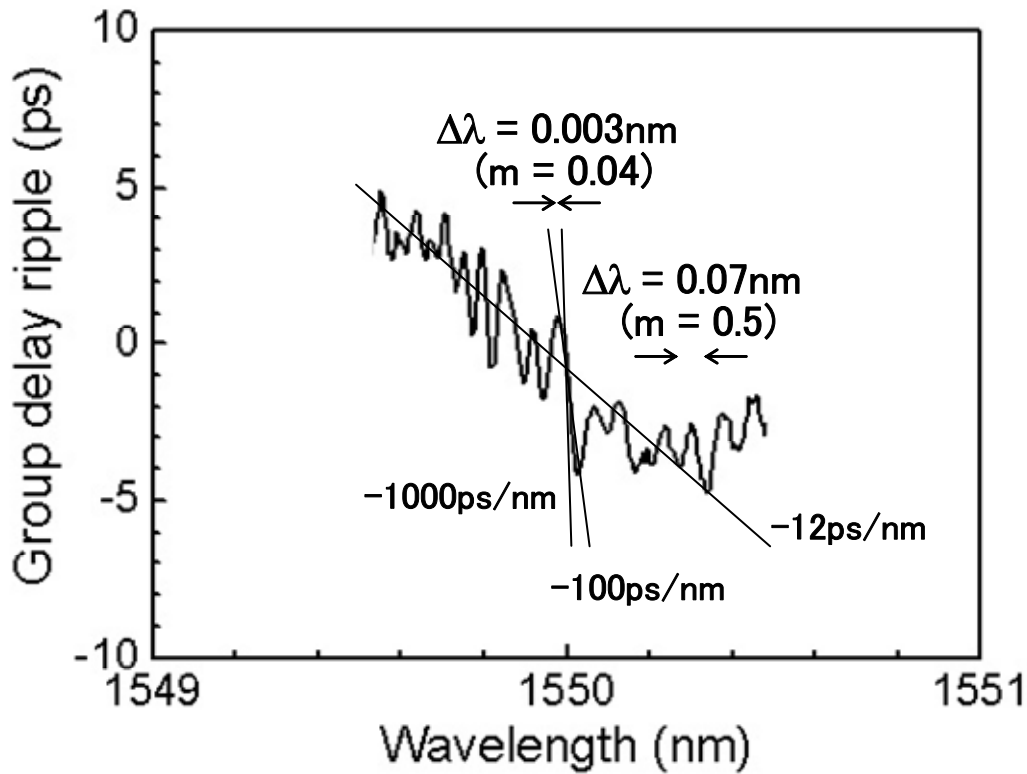


図 5-7 スペクトル広がりに対応した局所分散値

最後に、比較のために群遅延リップルが大きい(アポダイズを施さない)チャープ FBG についての結果を検討する. 同様な伝送実験系を用いてチャープ FBG 挿入時の IM2 を測定し, その結果より実効分散を算出する.

図 5-8 に 群遅延リップルが大きいサンプルの(a)リップル成分, (b)計算した実効分散値と変調度の大きさの関係を示す. 図 5-5 に比較して変調度の小さい領域での実効分散値は一桁近く大きく, また, (a)のリップル成分の傾きから見積もられる局所分散値と実効分散値とはオーダ一的に一致している. 群遅延リップルの大きくなるチャープ FBG であっても, 局所分散の大きさが変調度の小さい領域では IM2 を悪化させる原因であることが推定される[83].

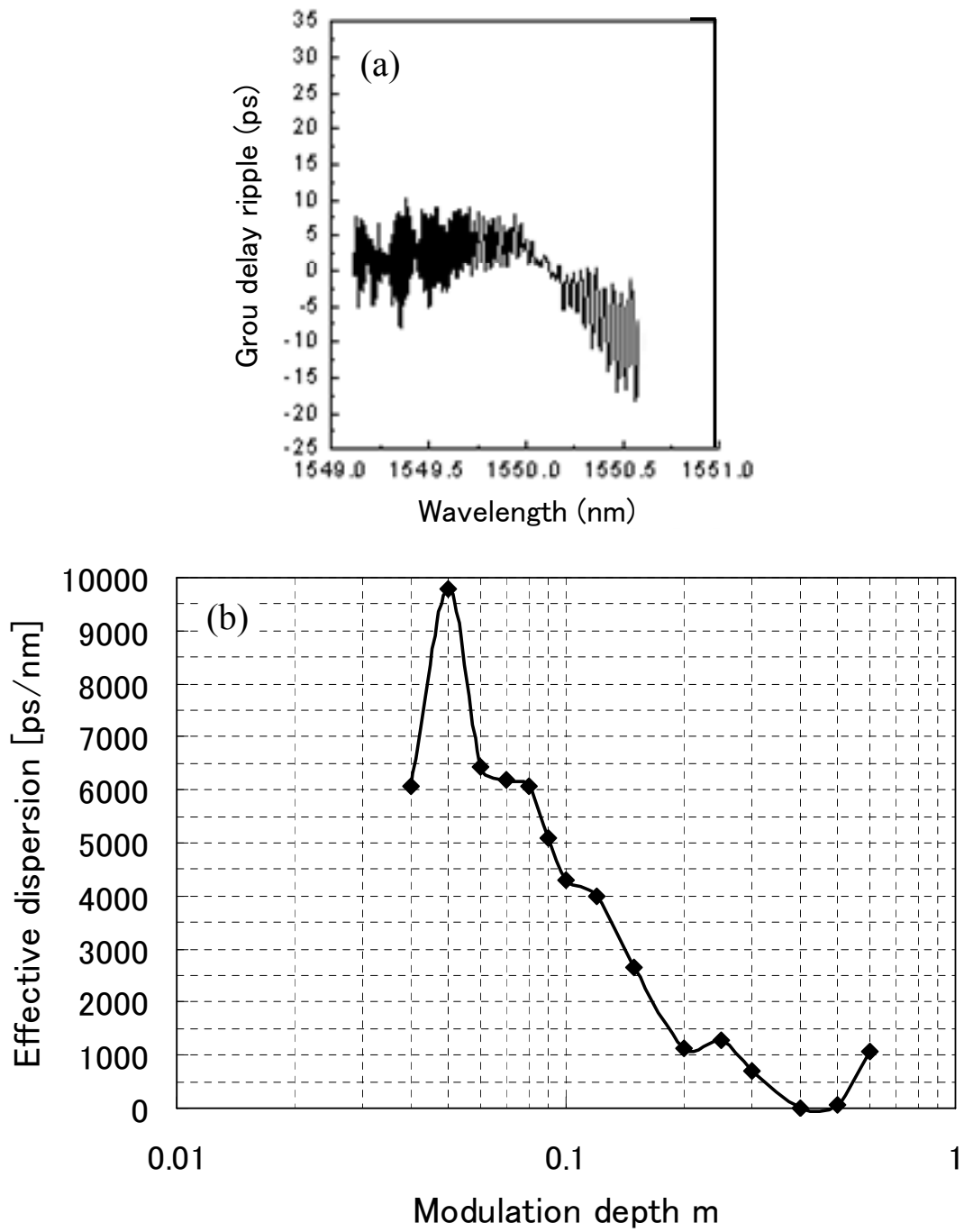


図 5-8 群遅延リップルが大きいサンプルの場合
 (a)リップル成分, (b)計算した実効分散値と変調度の大きさの関係

5-5 まとめ

本章では、アナログ伝送用ファイバブラッググレーティング型固定分散補償デバイスについて説明した。

まず、伝送システムを想定して、10kmのSMF伝送路の分散を補償するためのチャープFBGの設計・試作を行い、その特性から、リップルを有するチャープFBGの群遅延特性から局所分散値を定義し、全体分散値と局所分散値の2つの分散値を考慮することでチャープFBGの特徴を抽出する方法を示した。

次に、チャープFBGのリップル特性の影響が出やすい2次相互変調歪(IM2: Second-order Intermodulation distortion)の伝送特性評価実験結果に基づき、変調度の大きさによってチャープFBGの分散補償効果に差異があることを提示した。

次に、群遅延リップルの大きさとIM2との関係を検討するため、波長分散とレーザチャープが存在するときのIM2を理論的に導出した。導出した計算式を用いて、測定したIM2から分散値を逆算し、変調度に応じた実効分散を求めた。これにより、変調度に応じて実効分散の値が異なることを示し、変調度の大きい領域では分散補償の効果が十分現れているが、変調度の小さい領域では局所分散に起因する分散が残留することを示した。

さらに、変調度の大きさによって実効分散が異なる理由を考察するため、変調度の大きさをパラメータとして、半導体レーザ変調時のスペクトル幅(変調スペクトルと波長シフトに起因するスペクトル広がり)を導入し、変調度の大きさによってIM2の大きさが異なり、特に変調度が小さい領域ではIM2が抑制できない理由を、群遅延リップル(リップルの大きさとリップル周期)から推定される局所分散との関係から明らかにした。

光CATVやRadio on Fiber等のアナログ光伝送へチャープFBGを分散補償デバイスとして用いるシステムを考える場合、伝送特性(歪特性)改善には分散補償が有効であり、チャープFBGを用いることで、分散補償ファイバ(DCF)並の特性を得ることが可能である。しかし、適用するシステム条件を十分検討することの注意が必要である。

なお、分散補償時のFBGの挿入位置としてファイバ伝送後の受信端近傍を想定する際には、非線形効果は問題にはならないと考え、FBGへのハイパワー入力時の特性評価は行っていないが、FBGへのハイパワー入力時の非線形特性等は今後検討すべき課題の一つである。

第6章 ファイバブラッググレーティングを用いた光符号化デバイス

6-1 はじめに

本章では, FBG を用いた光符号化デバイスについて検討する. デバイス構成や目的の異なる2種類のデバイス提案と試作結果, 動作実証等について示す. 本光符号化デバイスを符号化多重(Code Division Multiple Access)方式等に適用することで, 伝送容量の改善等が図れると考えている.

1つめのデバイスは, FBG を形成した光ファイバから構成されるファイバカップラを用いたスペクトル分離を行うデバイスであり, 広帯域スペクトルから狭帯域スペクトルを取り出す機能を有する.

まず, そのスペクトル分離素子の設計・試作について述べる. FBGを形成した光ファイバの側面研磨を行い, その2つのファイバどうしを近接させることでファイバカップラ構造とする. 次に, 広帯域スペクトルから切り出した狭帯域スペクトル成分をキャリア信号光として, 各信号光に2値符号化(強度変調)を行い, スペクトル領域での符号化検証を行う.

2つめのデバイスとして, サンプル型 FBG を用いた符号化デバイスを提案する. FBG の配置位置によって波長と遅延の組み合わせパターンによる符号化方式に対応するが, WDM 複数チャンネルを一括で符号化できるデバイスである.

シミュレーション及び実験により, WDM 複数チャンネルの一括符号化, さらに C バンド全域の一括符号化の可能性について示す.

6-2 ファイバブラッググレーティングを用いた光符号化用スペクトル分離素子

光符号化やパルス整形等, フェムト秒クラスの超短光パルスの広帯域スペクトルに着目した研究は数多く報告されているが[37,38,78-83], FBG を用いた研究例は少ない.

筆者の提案する FBG を用いた光符号化用スペクトル分離素子は, 光カップラ構造を基本としているが, 従来の光カップラが分岐・結合や合波・分波等の単純な機能を持つことに比べ, 広いスペクトルを操作するため, 複数スペクトル分離や, スペクトル結合等の機能を併せ持つ. 導波路として光ファイバを用いた固体デバイスであり, 外部結合

は光コネクタにより容易に行うことができ、伝搬損失も小さく安定であるという光ファイバやFBGの特徴を有する。

6-2-1 スペクトル分離素子の提案とその設計

光スペクトル分離素子にはスペクトル成分を分離する機能があり、この機能を実現するため SMF と FBG とによる新しい構成の素子を提案する[84,85].

図 6-1 に FBG を用いたスペクトル分離素子(概略)を示す. これは FBG を2ヶ所形成した2チャンネル素子である. SMF 及び FBG のコアどうしを接近させる光カプラとなっており, FBG 側 (P_{in})に入力されたスペクトルのうち, 位相整合条件を満たしたスペクトル成分のみを SMF 側 (P_2)に取り出すことができる. グレーティングピッチ Λ は P_2 から取り出す波長に対応する値に設定する. なお, FBG は単一周期であり, FBG を形成する SMF には, FBG の形成が容易なゲルマニウム(Ge)が高濃度に添加された SMF を用いる.

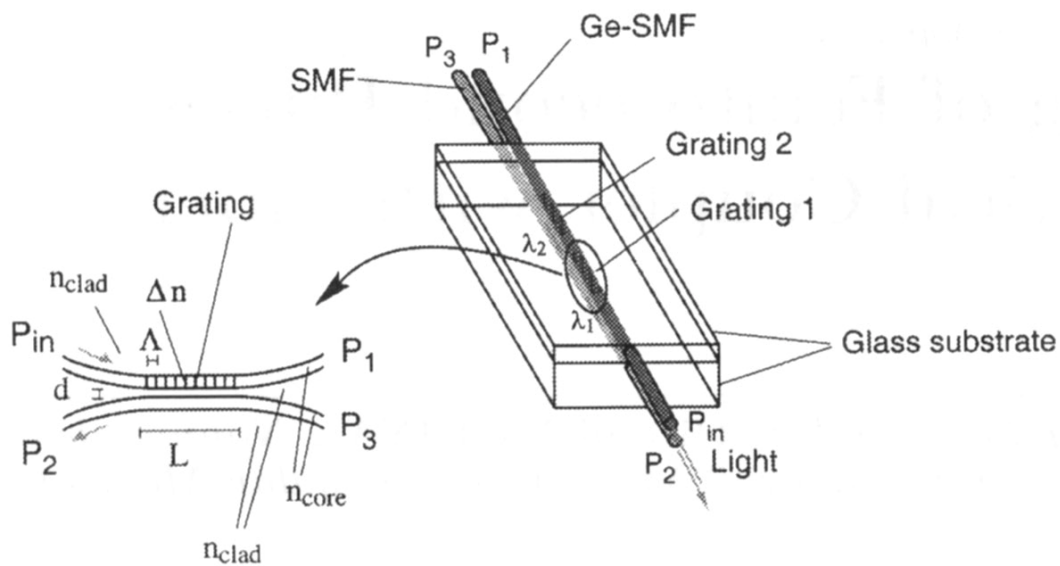


図 6-1 FBG を用いたスペクトル分離素子(概略)

スペクトル分離素子の光学設計について述べる. FBG が形成された SMF の伝搬定数を β_1 , もう一方の SMF の伝搬定数を β_2 とした場合, $\beta_1 \neq \beta_2$ となるような非同期方向性

結合器とする. 非同期方向性結合器の場合は光結合せず P_{in} から入力した光は P_1 へ出力する. しかし SMF に FBG あると, 位相整合条件(6-1)式を満たす波長 λ の光は P_3 へ出力する.

$$\beta_1(\lambda) - \beta_2(\lambda) = 2\pi / \Lambda \quad (6-1)$$

ここで Λ はグレーティングのピッチでおよそ $500 \sim 1000 \mu\text{m}$ となる. 同様に P_2 へ出力する場合は $\beta_2(\lambda)$ を $-\beta_2(\lambda)$ として(6-1)式は,

$$\beta_1(\lambda) + \beta_2(\lambda) = 2\pi / \Lambda \quad (6-2)$$

を満たす場合となり, グレーティングピッチは数 100nm となる. それぞれの場合について位相整合条件からのずれは, (6-1)式, (6-2)式より

$$\delta_3(\lambda) = \beta_1(\lambda) - \beta_2(\lambda) - 2\pi / \Lambda \quad (6-3)$$

$$\delta_2(\lambda) = \beta_1(\lambda) + \beta_2(\lambda) - 2\pi / \Lambda \quad (6-4)$$

とすると, 波長変化に対する位相整合条件のずれ量 $(d/d\lambda)\delta(\lambda)$ は $\delta_3(\lambda)$ の場合と比べて, $\delta_2(\lambda)$ の方が 3 桁小さい値となり, (6-2)に従った P_2 への光取り出しの方が波長選択性に優れることがわかる. 従って P_2 へ波長選択して光を取り出すデバイスをとした.

次に, デバイスサイズ等のパラメータについて検討する. 結合長は FBG と SMF との交差角度で決まる. 結合長を 3mm 確保するには通常のコア径 $10\mu\text{m}$ では交差角度を約 0.4° にする必要がある. 結合波モード方程式を計算し, 結合長 L , 導波路間距離 d , 屈折率変化 Δn についての最適化設計を行う. 図 6-2(a)は結合長に対する P_2 への透過率を示したものである. いろいろな導波路間距離 d の場合について示している. 結合長 L を長くすれば透過率は増加するが, 導波路間距離 d が $1.5\mu\text{m}$ 以下であると透過率 50% 付近で飽和してしまう. 一方, d が $4\mu\text{m}$ 以上では長い結合長が必要となる. そこで, 結合長を実用的な長さ $3500\mu\text{m}$ としたときの導波路間距離 d に対する透過率を求めた. 図 6-2(b)に屈折率変化 $\Delta n = 0.5 \times 10^{-2}$, 1.0×10^{-2} の場合について示した. グラフより光導波路間距離は $3 \sim 3.5\mu\text{m}$ 程度が適切であることがわかる.

以上の結果より、デバイスのパラメータを屈折率変化 $\Delta n=0.5 \times 10^{-2}$ 、導波路間距離 $d=3\mu\text{m}$ 、結合長 $L=3500\mu\text{m}$ として、 P_2 への透過スペクトルを計算した。計算結果を図 6-3 に示す。計算からは透過率約 80%、帯域約 1nm という良好な波長選択性で光を取り出せることが明らかになった。また、 P_2 から入力し、 P_{in} から取り出すような場合についても計算したところ、全く同様のスペクトルを得ることを確認している。[84]

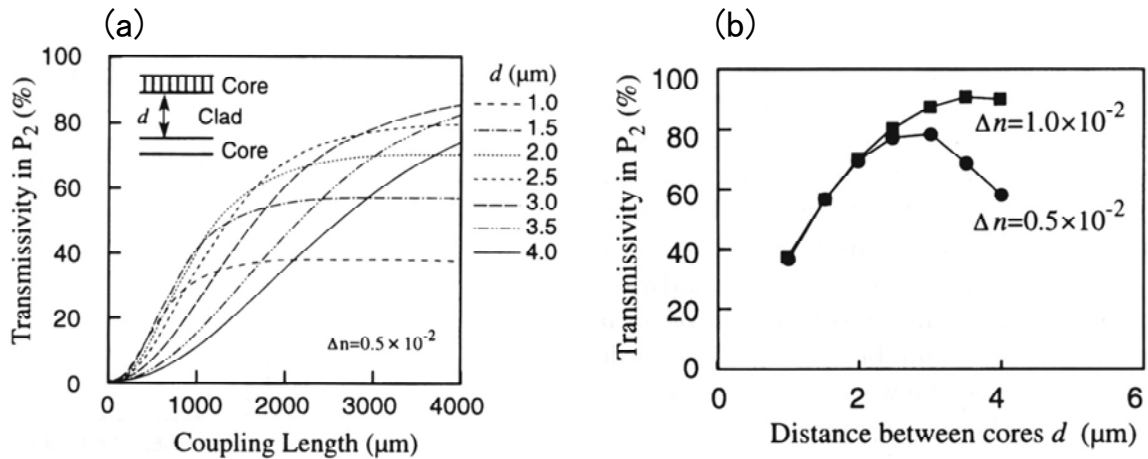


図 6-2 スペクトル分離素子の設計例

(a)結合長に対する P_2 への透過率、 (b)屈折率変化に対する P_2 への透過率

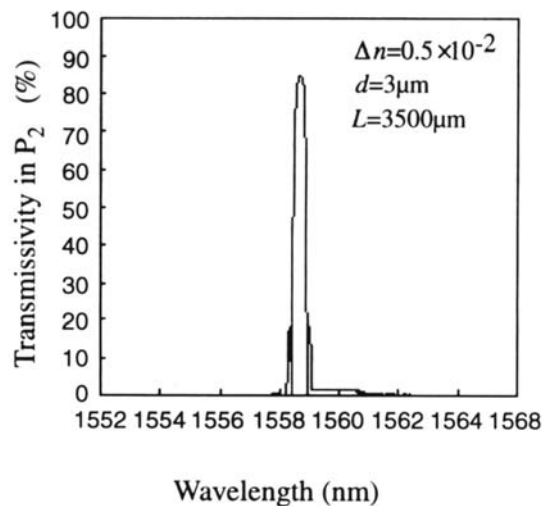


図 6-3 透過スペクトル(計算)

もし、グレーティングピッチの異なる FBG を形成し、それらを対向させてグレーティングカプラを構成した場合には、対応するそれぞれの反射波長に対し独立に機能し、相反性の原理に従って入射ポートに対応する出力ポートから、それぞれスペクトル分離を行うことが可能となる。狭帯域スペクトルを分離するためには、入力ポートと出力ポートの位置関係からカプラの入力ポートと出力ポートを波長によって適切に選択する必要があるが、両者を FBG 構造としたスペクトル分離素子に対して入力信号を分岐して入力する等の工夫を行うことで、新しいデバイス構成として活かせるものと考えられる。

今回のデバイス試作では、屈折率変化を大きくするため FBG を形成する光ファイバには高 Ge ドープ SMF を使用しているが、実験的には通常のシングルモードファイバへ FBG を形成することで、特性がそれぞれの波長に対し対称となる。

6-2-2 スペクトル分離素子の試作とその特性

スペクトル分離素子に用いる単一周期 FBG の作製には、第3章から第5章で述べてきた KrF エキシマレーザ光を、位相マスクを通して SMF に照射する方法を用いる [20]。ただし、アポダイズは施していない。これは、なるべく大きな反射率を持つ FBG を形成することと、機能実証を優先したためである。

また、屈折率変化を大きくするために、FBG を形成する光ファイバには高 Ge ドープ SMF を使用し、加工前に水素の高圧処理を施す [86]。グレーティングピッチはそれぞれ 533.4nm, 536.4 nm, 537.7 nm, 538.5 nm となる4種類の位相マスクを使い分けており、必要に応じて、1チャンネルから4チャンネルの FBG を一本の光ファイバに形成する。グレーティング長は 5mm としている。

スペクトル分離素子は、ガラス基板表面の溝中に埋め込んだ FBG 及び SMF の側面を精密研磨し、研磨面を張り合わせることで形成する。V溝加工を施したガラス基板表面に FBG 及び SMF をそれぞれ埋め込み加工し、ガラス基板と一緒にファイバの側面をおよそ 55 μ m 程度研磨(ラッピング)した後、研磨面を張り合わせるによりスペクトル分離素子が作製される [85]。

結合効率の測定から、2 μ m 以内の研磨精度と 1 μ m 以内の研磨均一性が約 50mm の長さにわたり得られている。デバイスサイズは、70(L)mm \times 25 (W) mm \times 20 (H) mm である。図 6-4 に試作したスペクトル分離素子写真を示す。

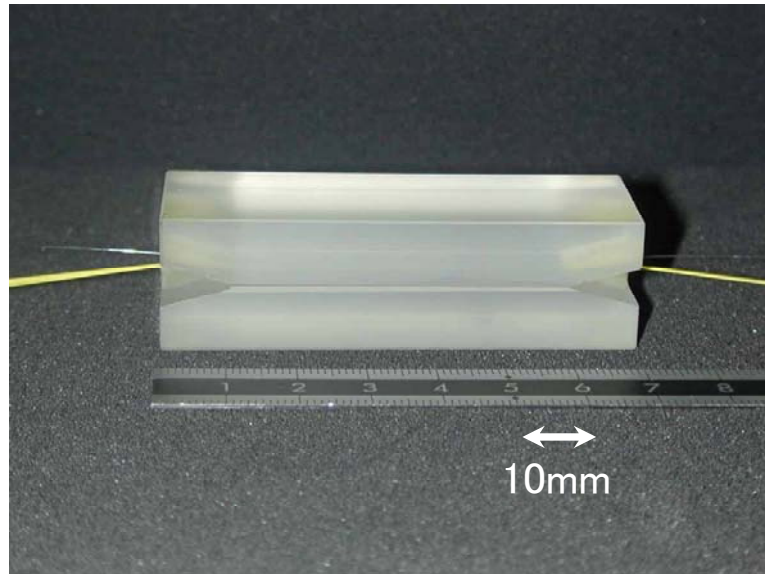


図 6-4 試作したスペクトル分離素子写真

6-3 フェムト秒パルスを用いたスペクトル領域の光符号化

試作したスペクトル分離素子を用いて、スペクトル領域の光符号化実験を行う。広帯域スペクトルから狭帯域スペクトルを取り出し分離し、その狭帯域スペクトル成分をキャリア信号光として、各信号光に2値符号化(強度変調)を行い、スペクトル領域での符号化変調を行う。

6-3-1 スペクトル分離素子による多チャンネル波長の切り出し

試作したスペクトル分離素子を用いたスペクトル分離実験系について示す。図 6-5 に実験系及び入力光源である、(1)スーパーluminescentダイオード (SLD), (2)Er ドープファイバレーザのスペクトル波形をそれぞれ示す。それぞれの光源ともに非常に広いスペクトルを有しており、実験に用いたFBGすべて波長域をカバーしている。Er ドープファイバレーザのパルス光は、パルス幅 200fs, スペクトル幅 40nm である。なお、スペクトル分離素子には4つのグレーティング(4チャンネル)が描かれているが、2つのグレーティング(2チャンネル)のサンプルも試作している。

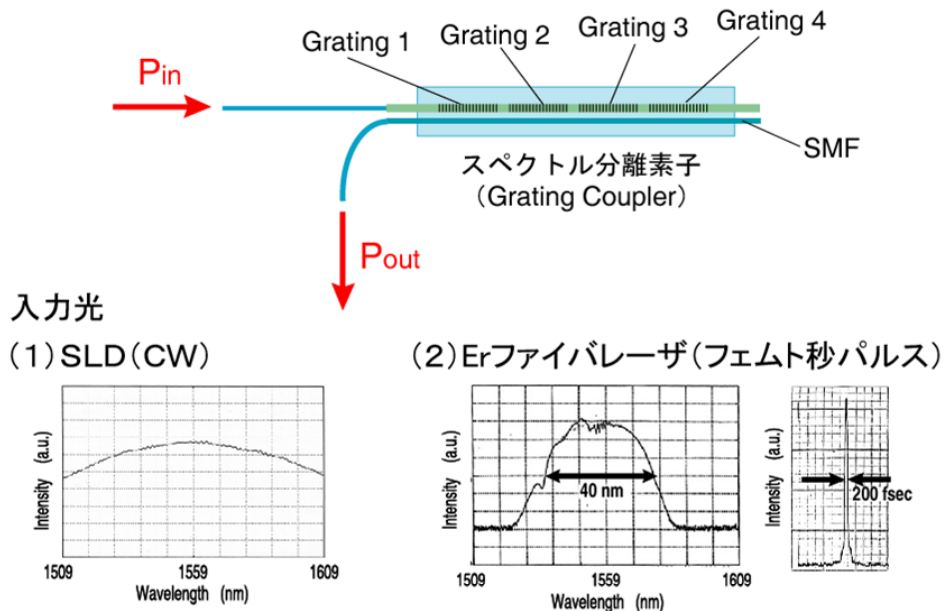


図 6-5 スペクトルの分離実験系

図 6-6 に(a)SLD 入力及び(b)フェムト秒パルス入力を用いた場合の分離スペクトル波形を示す。フェムト秒パルス入力時は2チャンネル分離素子結果も同時に示す。(a)SLD 入力ではグレーティングピッチに対応した4チャンネルのスペクトル分離ができている。スペクトル間の結合効率ばらつきが 20%程度であり、1 μm 以内の研磨均一性が得られていると考えられる。

また、(b)フェムト秒パルス入力時も、2チャンネル、チャンネルの分離が示されている。短波長側の強度が小さいのは、入力スペクトル強度を反映しているためであり、作製方法の改善によりコアどうしの間隔をほぼ最適化しているため、結合効率は各チャンネルで 30%以上が得られていると考えられる[91]。

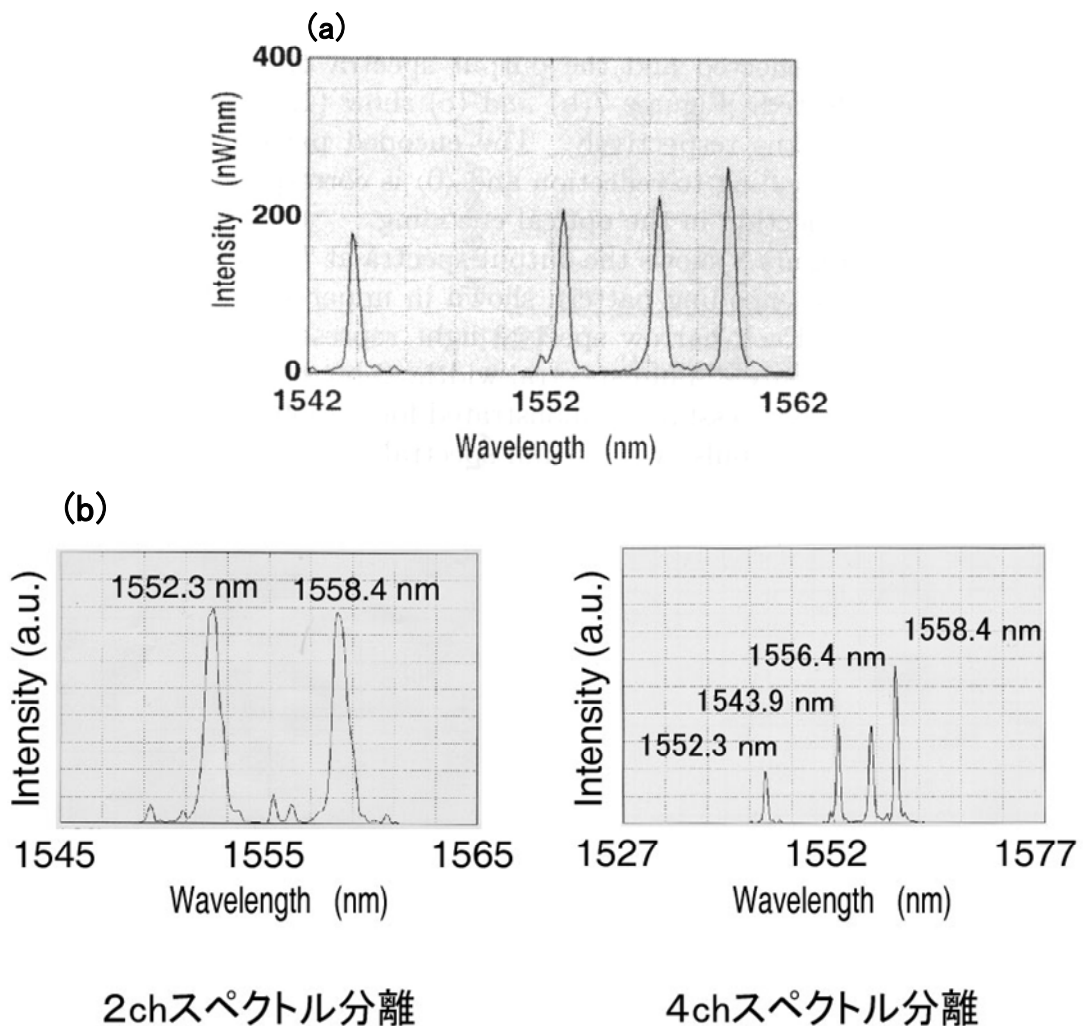


図 6-6 分離スペクトル波形 (a)SLD 入力 (b)フェムト秒パルス入力

6-3-2 フェムト秒パルスを用いたスペクトル領域の光符号化

フェムト秒クラスの超短パルスの持つ広いスペクトル成分を利用し、スペクトル分離素子を用いた光符号化変調実験を行う。

スペクトル符号化変調とは、フェムト秒クラスの非常に短い光パルスが持つ広いスペクトル特性を利用する新しい符号化方式である。広いスペクトルからN個の狭いスペクトル成分を分離し($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_N$), λ_1 に第1ビット, λ_2 に第2ビット, λ_3 に第3ビット, ……., λ_N に第Nビットをそれぞれ対応させ、各スペクトル成分を変調することでNビット信号を重畳させる。変調後の各スペクトル成分を再び結合させた時には時間的に変化したパルス列が生成される。すなわち、複数の狭いスペクトル成分に分離し、各スペクトル成分への変調による符号化を行い、再び結合しパルス列を生成する。

図 6-7 に光符号化実験系を示す。1つのフェムト秒パルスが入力すると、スペクトル分離素子により、位相整合条件を満たしたスペクトル成分は分離される。分離されたスペクトル成分は光サーキュレータを介して変調素子に入り、別途作製した分離スペクトル波長に対応したFBGのフィルタ特性により符号化が行われる。変調信号として強度信号を与えるため、スペクトル成分を反射させる場合を<1>, 反射させない場合を<0>に対応させ、それぞれのスペクトルにビット信号を乗せることとしている。

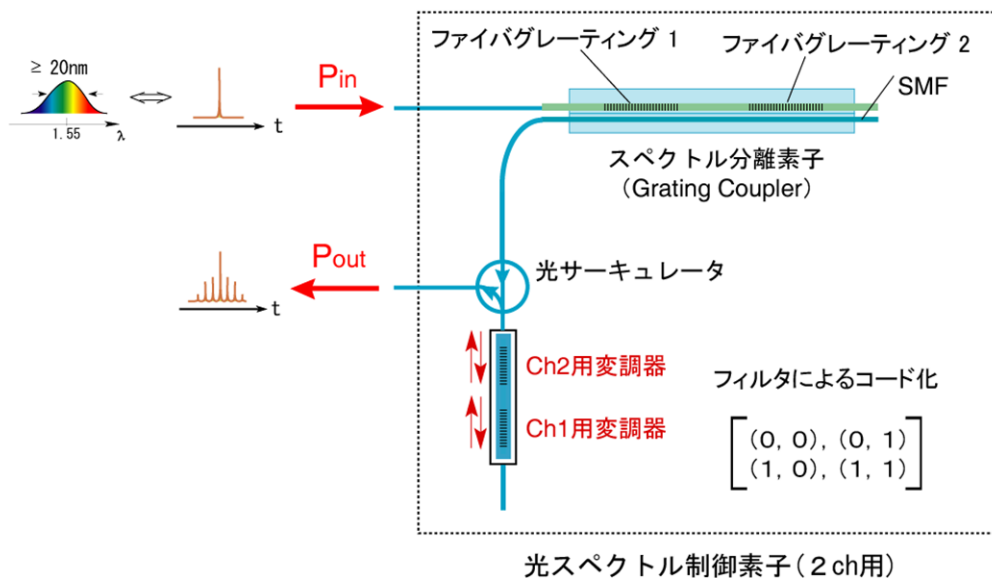


図 6-7 光符号化実験系

フィルタ特性に従って符号化されたスペクトル成分は結合し、出力光(パルス列)となる。復号化はスペクトル分解で観測する。

図 6-8 には符号化を行うため作製した FBG のフィルタ特性を示す。ここでの符号器は反射フィルタとして機能し、符号化パターン〈1〉は反射、符号化パターン〈0〉は非反射(透過)に相当する。2チャンネル分離素子では、2つのスペクトルはそれぞれ、1552.3nm, 1558.4nm であるため、符号器としては、(a)は(0, 1), (b)は(1, 0), (c)は(1, 1)にそれぞれ対応する。また、4チャンネル分離素子では、4つのスペクトルはそれぞれ、1543.9nm, 1552.3nm, 1556.4nm, 1558.4nm であるため、符号器としては、(a)は(0, 0, 1, 1), (b)は(1, 1, 0, 0), (c)は(0, 1, 1, 1)にそれぞれ対応する。

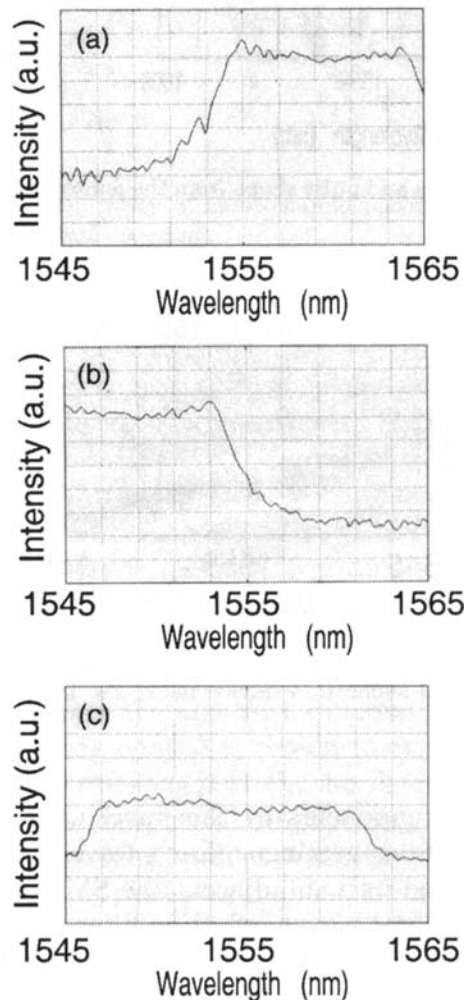


図 6-8 符号化用 FBG の特性

次に符号化実験結果を示す。図 6-9 に2チャンネル符号化出力, 図 6-10 に4チャンネル符号化出力である。

2チャンネルの場合, フィルタによって符号化されたスペクトル波形はそれぞれ(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)のビット信号に対応する強度変調を加えられていることがわかる。また, 4チャンネルの場合, フィルタによって符号化されたスペクトル波形はそれぞれ(0, 0, 1, 1), (0, 1, 1, 1), (1, 1, 0, 0), (1, 1, 1, 1)のビット信号に対応する強度変調を加えられている。

すなわち, スペクトル各図の上部に示す符号化パターンに対応した信号が観測されており, 全てのパターンではないが, 2ビット信号, 4ビット信号に対応した符号化が行われている。

強度変調を加える FBG フィルタの反射率が異なるため信号強度に差異が見られるが, 反射率の最適化で改善は可能である。スペクトル分離素子では, 分離できるスペクトル幅として1nm 以下が得られており, スペクトル間隔を1nm に設定した場合でも10ビット(10チャンネル)以上のスペクトル分離は可能であり, また, 変調用のFBGに狭帯域特性を持つ素子を利用すれば, それらのスペクトル成分の符号化も十分可能であると考えられる[85]。

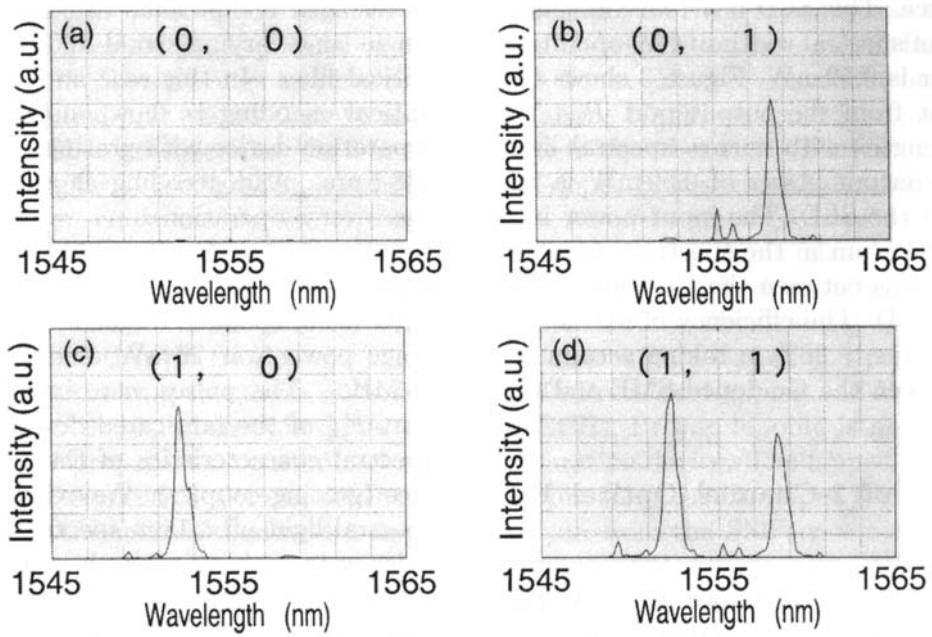


図 6-9 2チャンネル符号化出力

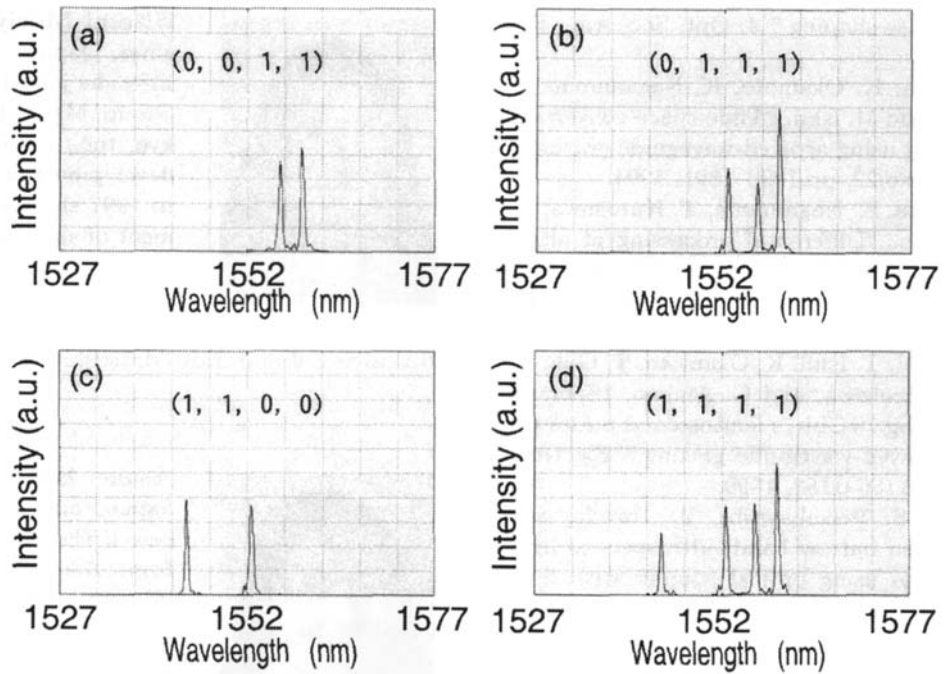


図 6-10 4チャンネル符号化出力

6-4 光 FFH-CDMA における WDMA 多チャンネル一括符号器

通常の FBG 型符号器は、反射波長 (グレーティングピッチ) の異なる複数の FBG を用いて特定の波長域で動作する。そのため、WDM 複数チャンネル (複数の波長区域) で機能するには、各チャンネルに対応した複数個の符号器を準備する必要がある。しかし、サンプル FBG はくし状の等間隔の反射スペクトル (すなわち、とびとびの異なる狭帯域波長) をもつため [87,88], グレーティングピッチの異なる複数のサンプル FBG さえ用意しておけば、複数チャンネル (各波長域) すべてを一括で符号化できる符号器が実現できる。

6-4-1 サンプルグレーティング組み合わせた一括符号器

サンプル FBG を用いた符号化デバイスを提案する [89]。図 6-11 にサンプル FBG を用いた符号化デバイスの構成を示すが、単なる短周期の FBG の代わりにサンプル FBG (同一特性) を 6 個縦続接続した構造となっており、各サンプル FBG にはペルチェ素子を接続させ、温度制御によりサンプル FBG に温度調整を加えることで、デバイスの安定化と反射波長シフトを行うことができる。

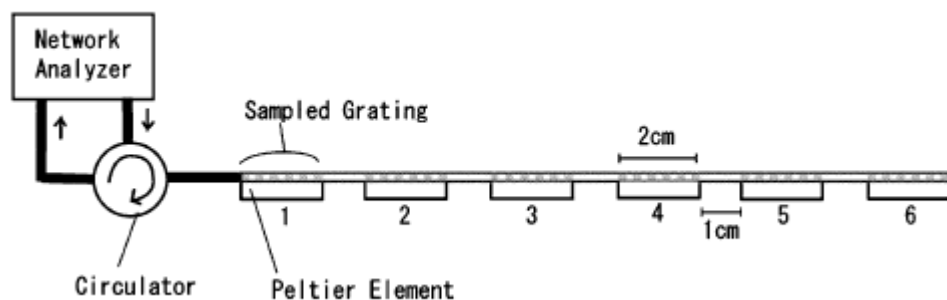


図 6-11 サンプル型 FBG を用いた符号化デバイスの構成

提案する WDM 用多チャンネル一括符号器について説明する。図 6-12 に WDM 用多チャンネル一括符号器の機能を示している。縦軸は反射率 (波線) / 遅延 (実線), 横軸は波長を示す。(a) はサンプル FBG1 の反射及び遅延を示しており、反射帯及び遅延はサンプル FBG の特性から明らかのように、波長軸に沿った周期的な繰り

返しパターンを表す. はじめは, すべてのサンプル FBG は同一の反射特性を示すが, もし温度印加を行うと, それぞれの反射特性は波長軸に沿ってシフトする. 例えばサンプル FBG2に温度を加えて, サンプル FBG1よりも高温に保ちグレーティングピッチが大きくなると, (b)に示すように波長シフトが生じる. 同様にサンプル FBG3にも温度を加えると, (c)に示すように波長シフトが生じる. このようにすれば, (d)に示すような W1, W2, W3...の波長領域(WDM チャンネル)において, 特定の遅延パターン組合せによる符号化が行える. すなわち, 1種類のサンプル FBG を複数個並べ, それぞれを異なる温度に設定することで, 広帯域の波長ホッピング方式[54]の一括符号化デバイスとして機能する.

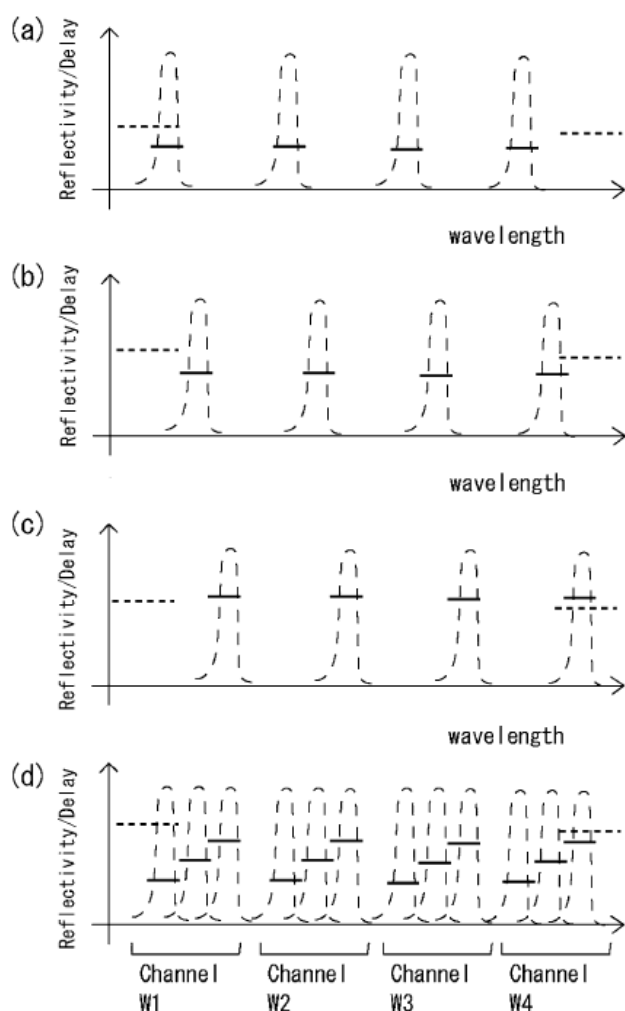


図 6-12 WDM 用多チャンネル一括符号器

6-4-2 多チャンネル一括符号化実験

WDM用多チャンネル一括符号器の試作と、それを用いた波長と遅延パターンを組み合わせた符号化実験の結果について示す。

サンプルFBGは作製露光時に600 μm ピッチで250 μm 幅のスリットを持つ金属のマスクを位相マスクに重ねることで形成している。6つのサンプルFBGを0 $^{\circ}\text{C}$ から80 $^{\circ}\text{C}$ までの温度範囲でそれぞれを変化させている。図6-13に符号化実験結果を示す。

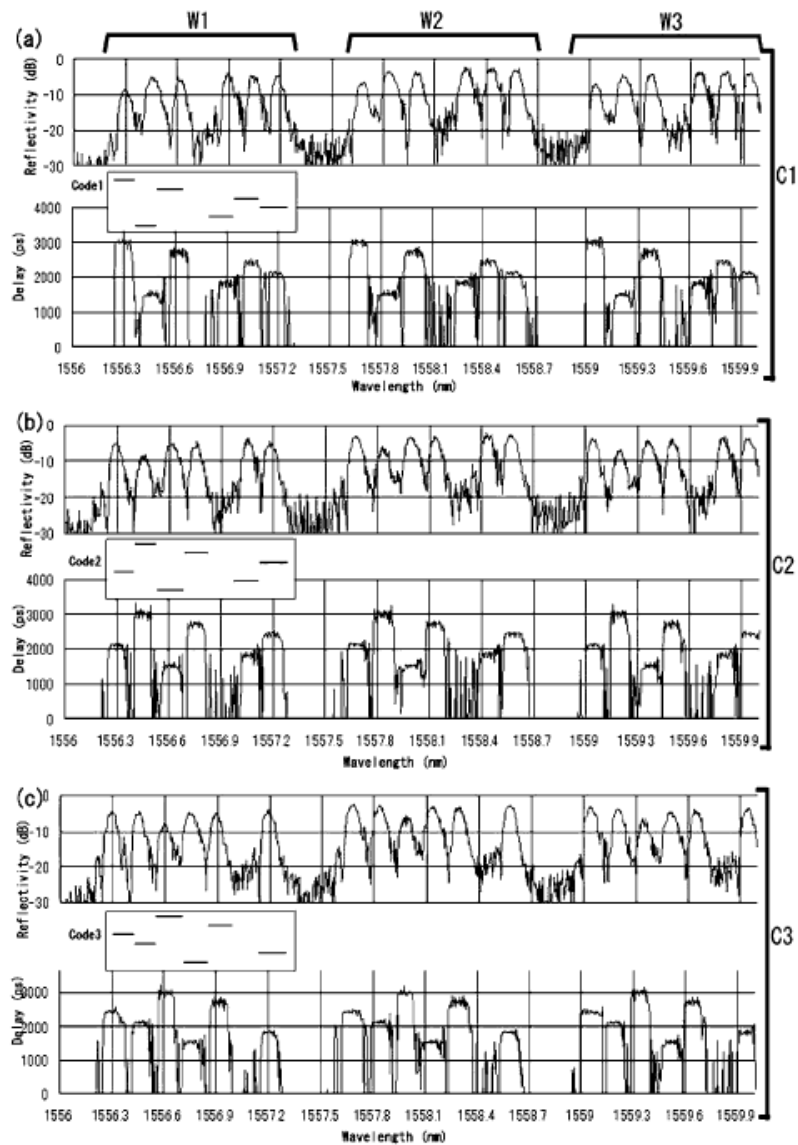


図 6-13 一括符号器の符号化実験結果

(a), (b), (c)はそれぞれ異なる符号化パターンによる結果を示し、上図は反射特性、下図は遅延である。符号化パターンにおける1チップの波長幅は約 0.15nm であり、7つの波長幅のうち6チップから構成される符号化パターンを持つ。符号化パターンは各サンプル FBG の温度を調整し、波長と遅延の組合せを変えることで生成する。また、(a), (b), (c)はサンプル FBG の効果から、波長軸に沿って3つの波長域(W1, W2, W3)にレプリカパターンを示している。各図に挿入されている“code”は符号化パターンを示しており、C1, C2, C3 は波長ホッピング方式でよく知られている C1 から C7 までの7つの符号化パターンから選択され、それぞれ C1(1,4,6,5,2,0), C2(2,5,0,6,3,1), C3(3,6,1,0,4,2)を示している[90]。

なお、図中には割合大きなリップルが見られるが、これはサンプル FBG 作製時にアポダイズを行っていないために生じるリップル成分と、サンプル FBG が他のサンプル FBG の波長域に重なっているクロストークによるものの両者が原因と考えられる。

3つの異なる符号化パターンに対応する波長と遅延の組合せが実現でき、各符号化パターンはそれぞれ W1 から W3 の波長域で繰り返し現れていることから、多チャンネル一括符号化が達成できていることがわかる。サンプル FBG の設計最適化や FBG 作製方法の改善を行うことにより、反射特性や群遅延リップル特性等をチューニングすることで、C バンド全域に対応する一括符号化デバイスも可能と考えられる。

6-5 まとめ

本章では、ファイバブラッググレーティングを用いた光符号化デバイスについて説明した。

まず、FBG を形成した光ファイバから構成されるファイバカプラ構造に基づくスペクトル分離素子を提案し、そのスペクトル分離素子の設計・試作について述べた。狭帯域スペクトルを効率よく取り出すための詳細設計と、それを実現する作製方法を検討し、複数チャンネルの狭帯域スペクトルを切り出すデバイスを試作した。

スペクトル分離素子を用いて広帯域光源から切り出した狭帯域スペクトル成分を、キャリア信号光として、各信号光に2値符号化(強度変調)を行い、スペクトル領域での符号化検証を行い、2チャンネル、4チャンネルにおける符号化が行えることを実証した。

次に、サンプル型 FBG を用いた符号化デバイスを提案した。FBG の配置位置によ

り、波長と遅延の組み合わせパターンによる符号化方式に対応するため、温度制御によって、1種類のサンプル FBG を用いて WDM 複数チャンネルを一括で符号化できるという特徴を有するデバイスである。

シミュレーション及び実験により、WDM 複数チャンネルの一括符号化が行えることを示し、C バンド全域での広帯域符号化の可能性について示した。

符号化多重(Code Division Multiple Access)方式の一つとして、FBG を用いた2種類の符号化デバイスを提案し、それらの有効性を確認した。FBG を用いたスペクトル分離素子によるスペクトル符号化変調の実証、及びサンプル FBG による WDM 用多チャンネル一括符号実験を初めて実現したものである。

なお、これらの光符号化デバイスを用いた具体的なシステム提案までには至っておらず、例えば符号化多重(Code Division Multiple Access)の伝送方式に応用した際、トータルの伝送容量がどの程度まで増大可能か、伝送品質はどうなるか等の検討は今度の課題の一つである。

第7章 結論

7-1 本研究で得られた結論

本研究は、光通信システムの高速大容量化や高度化に対応するため、光ファイバ伝送路や各ノード等で用いられるファイバブラッググレーティング(FBG)デバイスに着目し、FBG 単体の高性能化を図ること、それらを用いたデバイスの高機能化や新機能の実現を目的とした。

FBG の高性能化のための設計及び作製方法を提案し、光通信デバイスに適用可能なFBG を実現した。また、FBG を用いた光通信デバイスとして、可変分散補償デバイス、固定分散補償デバイス、光符号化デバイスについて、それぞれ提案・試作を行い、独自構造設計や動作解析、機能実証を行い、その有効性を検討したものである。得られた成果を以下に示す。

1. チャープ FBG を広帯域分散補償等の光通信用デバイスに適用することを想定し、広帯域特性及び低群遅延リップル特性を有するチャープ FBG の高性能化のための設計及び作製方法を検討し、それを明らかにした
- (1) 実用デバイスを想定した際の適切なサイズ(主にグレーティング長)やチャープ FBG 作製時の再現性や安定性、効率やコスト等を考慮した上で、広帯域化特性と低群遅延リップル特性を満足する設計として、チャープ FBG のアポダイズ関数比較と、選択したアポダイズ関数のパラメータ比較による設計の最適化手法を示した。
- (2) 作製時の露光条件設定にあたり、アポダイズ関数を階段形状で近似する際の分割数によるシミュレーションの比較から最適条件を決定した。光源の揺らぎの影響が少なくなるようにエキシマレーザービームの空間的な切り出しと、ビームの繰り返し可動による露光方法を見いだした。回転スリットやミラーを可動させるステージを PC でコントロールし、ほぼ自動で露光が行える作製手法を実現した。
- (3) 作製したチャープ FBG は 3dB 帯域として 35.9nm が得られ、C バンド全域をカバーできる平坦な広帯域特性を示した。群遅延特性は設計通りのリニアチャープ特性が得られており、また、群遅延リップルは 5ps 以下に収まることを示した。

2. フェムト秒クラスの光パルス伝送に対応するため、固定分散補償技術に加え、環境温度等の変化等に対応する可変分散補償技術を実現するデバイスを提案・設計・試作を行い、基本特性及び伝送システムへの適用可能性を示した。
 - (1) 提案したチャープ FBG を用いた可変分散補償デバイスは、複数の広帯域のチャープ FBG への温度制御機構を付加することで、それぞれの分散特性の重ね合わせによって分散及び高次分散の可変制御を高精度に行えることを示した。
 - (2) デバイスの基本特性及び動的な特性である可変分散特性、可変分散スロープ特性から、適切な温度分布を加えることで、高次分散も含めて極めて任意性の高い可変制御機能を有することを示した。
 - (3) デバイスを短パルス伝送、160Gb/s の超高速伝送へ適用し、超高速伝送へ十分に適用できることを示した。分散スロープ補償機能を 160Gb/s の超高速伝送へ実験的適用したのは初めてである。
 - (4) 可変分散補償デバイスの小型モジュール化を行い、受信端での使用を想定した際のコンパクト化に十分適用可能であることを示した。

3. アナログ光伝送における分散補償に用いるチャープ FBG の適用可能性を検討し、伝送特性(歪特性)改善には分散補償が有効であることを示した。また、チャープ FBG のリップルと伝送2次歪の関係を明らかにし、適用可能なシステム条件や領域を示した。
 - (1) 分散補償用チャープ FBG の設計・試作を行い、その特性から、リップルを有するチャープ FBG の群遅延特性から局所分散値を定義し、全体分散値と局所分散値の2つの分散値を考慮することでチャープ FBG の特徴を抽出する方法を示した。
 - (2) チャープ FBG のリップル特性の影響が出やすい2次相互変調歪の伝送特性評価実験結果に基づき、変調度の大きさによってチャープ FBG の分散補償効果に差異があることを示した。
 - (3) 群遅延リップルの大きさと IM2 との関係を検討するため、波長分散とレーザチャープが存在するときの IM2 を理論的に導出し、その計算式を用いて変調度に応じた実効分散を求めた。変調度に応じて実効分散の値が異なることを示し、変調度の大きい領域では分散補償効果が十分あるが、変調度の小さい領域では局所分散に起因する分散が残留することを示した。
 - (4) 変調度の大きさによって実効分散が異なる理由を考察し、変調度が小さい領域で

はIM2が抑制できない理由を、半導体レーザ変調時のスペクトル幅と群遅延リップルから生じる局所分散との関係から明らかにした。

4. 符号化多重(Code Division Multiple Access)方式の一つとして、FBGを用いた2種類の符号化デバイスを提案し、それらの機能を実証し有効性を示した。

(1) FBGとSMFから構成されるスペクトル分離素子を提案し、そのスペクトル分離素子の設計・試作を行い、狭帯域スペクトルを効率よく取り出すための詳細設計方法と、それを実現する作製方法を示し、デバイスを実現した。

(2) スペクトル分離素子を用いて広帯域から切り出した狭帯域スペクトル成分が多波長分離できることを示し、各信号光への符号化検証を行い、2チャンネル、4チャンネルにおける符号化が行えることを示した

(3) 波長と遅延の組み合わせパターン符号化方式に対応するため、サンプル型FBGを用いた符号化デバイスとして、1種類のサンプルFBGを用いたWDM複数チャンネル一括符号器を提案し、そのシミュレーション及び実験検証から、複数チャンネルの一括符号化が行えることを示した。

7-2 将来の展望

本論文の研究成果は、ファイバブラッググレーティング(FBG)の高性能化の方策とともに、新しい応用デバイスへの適用可能性を提示したことであり、その技術的知見を示すことで光ネットワークの高度化へ貢献できたものと考えている。特に、通信トラフィックの大容量化には高速化とともに広帯域化が必要不可欠であり、“高速化”と“広帯域化”に対応する光デバイス研究は今後も最重要テーマの一つである。

現在のところ、100Gb/sを越えるデジタル方式の超高速伝送は商用化されておらず、そのシステムに適用する可変分散補償技術の市場ニーズはまだ少ない。また、光領域ではなく電気領域で分散補償を行うというアプローチもある。しかしながら、電気での分散補償のみではやはり厳しいとの学会報告等もあり、光ファイバという導波路内に作り込めるFBGは極めて魅力的な伝送用の機能デバイスであるため、例えばリップル低減化の限界を把握するというアプローチも必要である。また、本研究では検討していないが、偏波分散補償も重要な技術課題である。

一方、第5章でも示したアナログ伝送システムでは、いわゆるRadio on Fiber方式で

ある携帯電話基地局間光伝送やミリ波帯光伝送などは、無線分野と光伝送との融合として有望なマーケットであるものの、FBG による分散補償技術の適用については未だ検討が少ない。アナログ伝送ではデジタル伝送とは異なるデバイス特性が要求される場合も多く、デバイスの高性能化アプローチとしてもっと検討すべきである。

FBG を用いた光符号化については、電気に比べて複雑な機能は得にくいものの、まだ検討は始まったばかりであり、今後検討すべき問題も多く、新たなアプリケーション展開を提示するための研究・開発を進めていかなければならない。

また、最近では、光領域での符号化や処理を行うことで、トータルの消費電力を低下させる可能性という観点からの研究も進められており、環境配慮や省エネルギーという観点からの研究もより重要になっている。さらに、光インターコネクションの適用範囲(物理階層)が、機器間、モジュール間やチップ間まで広がってきており、光伝送システムや光通信システムにおけるインフラ構築のみならず、FBG の持つ本質的な優位性(光ファイバ内への構造形成による小型軽量、取り扱いの容易性、光ファイバとの接続)を活かすためのシステムやサブシステムを提示できる可能性は高まってきたとも言える。

さらに、SHG を用いた緑色レーザには励起光源の反射ミラーとしてFBG が実用化されている例もあり、光通信以外への応用展開も広がる可能性はある。

付録

ベッセル関数 $J_n(\beta)$ は以下の通り.

$$\cos(\beta \cos \theta) = J_0(\beta) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\beta) \cdot (-1)^n \cos 2n\theta \quad (\text{A-1})$$

$$\cos(\beta \sin \theta) = J_0(\beta) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\beta) \cdot \cos 2n\theta \quad (\text{A-2})$$

$$\sin(\beta \cos \theta) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\beta) \cdot (-1)^n \cos(2n+1)\theta \quad (\text{A-3})$$

$$\sin(\beta \sin \theta) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\beta) \cdot \cos(2n+1)\theta \quad (\text{A-4})$$

ベッセル関数 $J_n(\beta)$ を用いたレーザ出力 $p_r(t)$ の展開は以下の通り。

$$\begin{aligned}
p_r(t) &= 10^{-\alpha L/10} \xi I \left\{ \begin{array}{l} \cos 2\pi f_1 t \cdot \left[\begin{array}{l} \cos(\beta_1 \cos 2\pi f_1 t') \cdot \cos(\beta_1 \cos 2\pi f_2 t') \\ - \sin(\beta_1 \cos 2\pi f_1 t') \cdot \sin(\beta_1 \cos 2\pi f_2 t') \end{array} \right] \\ - \sin 2\pi f_1 t \cdot \left[\begin{array}{l} \sin(\beta_1 \cos 2\pi f_1 t') \cdot \cos(\beta_1 \cos 2\pi f_2 t') \\ - \cos(\beta_1 \cos 2\pi f_1 t') \cdot \sin(\beta_1 \cos 2\pi f_2 t') \end{array} \right] \\ + \cos 2\pi f_2 t \cdot \left[\begin{array}{l} \cos(\beta_2 \cos 2\pi f_1 t') \cdot \cos(\beta_2 \cos 2\pi f_2 t') \\ - \sin(\beta_2 \cos 2\pi f_1 t') \sin(\beta_2 \cos 2\pi f_2 t') \end{array} \right] \\ - \sin 2\pi f_2 t \cdot \left[\begin{array}{l} \sin(\beta_2 \cos 2\pi f_1 t') \cdot \cos(\beta_2 \cos 2\pi f_2 t') \\ - \cos(\beta_2 \cos 2\pi f_1 t') \cdot \sin(\beta_2 \cos 2\pi f_2 t') \end{array} \right] \end{array} \right\} \\
&\cong 10^{-\alpha L/10} \xi I \left\{ \begin{array}{l} \cos 2\pi f_1 t \cdot \left[\begin{array}{l} [J_0(\beta_1) - 2J_2(\beta_1)\cos 4\pi f_1 t] \cdot [J_0(\beta_1) - 2J_2(\beta_1)\cos 4\pi f_2 t] \\ - 2J_1(\beta_1)\cos 2\pi f_1 t \cdot 2J_1(\beta_1)\cos 2\pi f_2 t \end{array} \right] \\ - \sin 2\pi f_1 t \cdot \left[\begin{array}{l} 2J_1(\beta_1)\cos 2\pi f_1 t \cdot [J_0(\beta_1) - 2J_2(\beta_1)\cos 4\pi f_2 t] \\ + [J_0(\beta_1) - 2J_2(\beta_1)\cos 4\pi f_1 t] \cdot 2J_1(\beta_1)\cos 2\pi f_2 t \end{array} \right] \\ + \cos 2\pi f_2 t \cdot \left[\begin{array}{l} [J_0(\beta_2) - 2J_2(\beta_2)\cos 4\pi f_1 t] \cdot [J_0(\beta_2) - 2J_2(\beta_2)\cos 4\pi f_2 t] \\ - 2J_1(\beta_2)\cos 2\pi f_1 t \cdot 2J_1(\beta_2)\cos 2\pi f_2 t \end{array} \right] \\ - \sin 2\pi f_2 t \cdot \left[\begin{array}{l} 2J_1(\beta_2)\cos 2\pi f_1 t \cdot [J_0(\beta_2) - 2J_2(\beta_2)\cos 4\pi f_2 t] \\ + [J_0(\beta_2) - 2J_2(\beta_2)\cos 4\pi f_1 t] \cdot 2J_1(\beta_2)\cos 2\pi f_2 t \end{array} \right] \end{array} \right\} \\
&\cong 10^{-\alpha L/10} \xi I \left\{ \begin{array}{l} [J_0(\beta_1)^2 - J_0(\beta_1)J_2(\beta_1)]\cos 2\pi f_1 t - 2J_1(\beta_1)^2 \cos 2\pi f_2 t \\ + J_1(\beta_1)^2 \cos 2\pi(2f_1 - f_2)t + [J_2(\beta_1)^2 - J_0(\beta_1)J_2(\beta_1)]\cos 2\pi(2f_2 - f_1)t \\ - [2J_1(\beta_1)^2 + J_0(\beta_1)J_1(\beta_1)]\cos 2\pi(2f_1 + f_2)t \\ + [J_2(\beta_1)^2 - J_0(\beta_1)J_2(\beta_1)]\cos 2\pi(2f_2 + f_1)t \\ - J_0(\beta_1)J_2(\beta_1)\cos 2\pi(3f_1) \\ + J_2(\beta_1)^2 \cos 2\pi(3f_1 + 2f_2)t + J_2(\beta_1)^2 \cos 2\pi(3f_1 - 2f_2)t \end{array} \right\} \\
- 10^{-\alpha L/10} \xi I \left\{ \begin{array}{l} J_0(\beta_1)J_1(\beta_1)\sin 4\pi f_1 t \\ + [J_0(\beta_1)J_1(\beta_1) + J_1(\beta_1)J_2(\beta_1)]\sin 2\pi(f_1 + f_2)t \\ + [J_0(\beta_1)J_1(\beta_1) + J_1(\beta_1)J_2(\beta_1)]\sin 2\pi(f_1 - f_2)t \\ + J_1(\beta_1)J_2(\beta_1)\sin 2\pi(3f_1 + f_2)t \\ + J_1(\beta_1)J_2(\beta_1)\sin 2\pi(3f_1 - f_2)t \end{array} \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 10^{-\alpha L/10} \xi I \left\{ \begin{aligned} & \left[J_0(\beta_2)^2 - J_0(\beta_2)J_2(\beta_2) \right] \cos 2\pi f_2 t - 2J_1(\beta_2)^2 \cos 2\pi f_1 t \\ & + \left[J_2(\beta_2)^2 - J_0(\beta_2)J_2(\beta_2) \right] \cos 2\pi(2f_1 - f_2)t \\ & - J_1(\beta_2)^2 \cos 2\pi(2f_2 - f_1)t \\ & - \left[J_1(\beta_2)^2 + J_0(\beta_2)J_2(\beta_2) \right] \cos 2\pi(2f_1 + f_2)t \\ & - J_1(\beta_2)^2 \cos 2\pi(2f_2 + f_1)t \\ & - J_0(\beta_2)J_2(\beta_2) \cos 2\pi(3f_2)t \\ & + J_2(\beta_2)^2 \cos 2\pi(2f_1 + 3f_2)t + J_2(\beta_2)^2 \cos 2\pi(2f_1 - 3f_2)t \end{aligned} \right\} \\
& - 10^{-\alpha L/10} \xi I \left\{ \begin{aligned} & J_0(\beta_2)J_1(\beta_2) \sin 4\pi f_2 t \\ & + \left[J_0(\beta_2)J_1(\beta_2) + J_1(\beta_2)J_2(\beta_2) \right] \sin 2\pi(f_1 + f_2)t \\ & + \left[J_0(\beta_2)J_1(\beta_2) + J_1(\beta_2)J_2(\beta_2) \right] \sin 2\pi(f_1 - f_2)t \\ & + J_1(\beta_2)J_2(\beta_2) \sin 2\pi(f_1 + 3f_2)t \\ & + J_1(\beta_2)J_2(\beta_2) \sin 2\pi(f_1 - 3f_2)t \end{aligned} \right\} \\
& \cong 10^{-\alpha L/10} \xi I \left\{ \begin{aligned} & \left[J_0(\beta_1)^2 - J_0(\beta_1)J_2(\beta_1) - 2J_1(\beta_2)^2 \right] \cos 2\pi f_1 t \\ & + \left[J_0(\beta_2)^2 - J_0(\beta_2)J_2(\beta_2) - 2J_1(\beta_1)^2 \right] \cos 2\pi f_2 t \\ & - \left[\begin{aligned} & J_0(\beta_1)J_1(\beta_1) + J_1(\beta_1)J_2(\beta_1) \\ & + J_0(\beta_2)J_1(\beta_2) + J_1(\beta_2)J_2(\beta_2) \end{aligned} \right] \sin 2\pi(f_1 - f_2)t \\ & - \left[\begin{aligned} & J_0(\beta_1)J_1(\beta_1) + J_1(\beta_1)J_2(\beta_1) \\ & + J_0(\beta_2)J_1(\beta_2) + J_1(\beta_2)J_2(\beta_2) \end{aligned} \right] \sin 2\pi(f_1 + f_2)t \\ & - J_0(\beta_1)J_1(\beta_1) \sin 4\pi f_1 t \\ & - J_0(\beta_2)J_1(\beta_2) \sin 4\pi f_2 t \\ & - \left[J_1(\beta_1)^2 + J_0(\beta_2)J_2(\beta_2) - J_2(\beta_2)^2 \right] \cos 2\pi(2f_1 - f_2)t \\ & - \left[J_1(\beta_2)^2 + J_0(\beta_1)J_2(\beta_1) - J_2(\beta_1)^2 \right] \cos 2\pi(f_1 - 2f_2)t \end{aligned} \right\}
\end{aligned}$$

謝辞

本研究を遂行するに当たり、暖かいご指導とご激励、ご鞭撻を賜りました、東京工業大学大学院理工学研究科の水本哲弥教授に心から深く感謝致します。

また、本論文をまとめるに当たり、ご指導とご助言をいただきました、東京工業大学大学院理工学研究科の荒井滋久教授、同西山伸彦准教授、東京工業大学精密工学研究所の小山二三夫教授、同植之原裕行准教授、茨城大学大学院理工学研究科の佐々木豊教授に深く感謝致します。

筆者の大学、大学院時代の恩師である、東京工業大学の日野太郎名誉教授、東京工業大学大学院理工学研究科の岩本光正教授、東京工業大学大学院総合理工学研究科の石原宏教授、東京工業大学の故古川静二郎名誉教授からは、研究に取り組む姿勢、研究テーマに対する考え方から細かな実験手法まで、研究に対する基礎をご指導いただきました。また、学位取得に際してのご助言をいただき、心から感謝致します。

本研究は、著者が松下電器産業(株)(当時)において、NEDO 技術開発機構(新エネルギー・産業技術総合開発機構)からの委託により推進された国家プロジェクト「フェムト秒テクノロジーの研究開発」に参画し、そのテーマの一部として行った研究成果をベースにまとめたものであります。

筆者が現在所属し、日頃ご指導いただき、パナソニック(株)役員の上野山雄博士、先行デバイス開発センター所長の竹中信之博士、同センター光学デバイスグループグループマネージャーの鈴木正明博士には、学位取得に関する的確なアドバイスをはじめ、日々激励をいただき、深く感謝致します。

筆者が松下電器産業(株)(現パナソニック(株))へ入社以来、上司及び先輩として何かとご配慮いただくとともに、暖かい激励をいただきました、(株)キノテック・ソーラーエナジーの木野幸浩博士、アジレントテクノロジー(株)の笠原征夫博士、三原稔博士、高知工科大学工学部の成沢忠教授、(財)工業所有権協力センターの豊田幸雄博士、(財)光技術産業振興協会の中島真人博士、宇宙航空開発研究機構の大木芳正博士、千葉大学大学院工学研究科の工藤一浩教授、(株)キノテック・ソーラーエナジーの武内喜則博士、(株)パナソニック半導体オプトデバイスの高森晃博士、パナソニックモバイルコミュニケーションズ(株)の根岸英彦氏、セキテクノロン(株)の武藤勝彦博士の各氏に深く感謝致します。

国家プロジェクトを通じて本研究の機会を与えていただきました，パナソニック(株) (現長崎総合科学大学 理事・大学院教授)の吉村進博士，同安立正明博士，同高尾正敏博士，同(現科学技術振興機構 技術参与)江田和生博士，同飯島賢二博士に深く感謝致します。

国家プロジェクトテーマの遂行に際しまして，数々のご指導やご助言をいただきました，パナソニック(株)先端技術研究所(現大阪大学大学院工学研究科 教授)の瀬恒謙太郎博士，同(現産学連携推進センター グループマネージャー)大仲清司博士，同(現パナソニックエレクトロニクスデバイス(株) 取締役 開発技術センター 所長)久保実博士，同(現映像デバイス開発センター 参事)森田清之博士，パナソニック(株)の藤戸克之博士，同内海邦明氏，同朝倉宏之氏，同石野正人博士，同布施優博士，パナソニックモバイルコミュニケーションズ(株)の浅野弘明氏に深く感謝致します。

筆者がパナソニックモバイルコミュニケーションズ(株)在籍中にご指導やご助言をいただきました，パナソニックモバイルコミュニケーションズ(株) (現(株)松下エコテクノロジーセンター 社長)の富田和之氏，同川崎修博士，同(現パナソニックエレクトロニクスデバイス(株)開発技術センター デバイス技術開発研究所 所長)守時克典氏に深く感謝致します。

「フェムト秒テクノロジーの研究開発」テーマの遂行に当たり，多くのご助言をいただきました，フェムト秒テクノロジー研究機構(現多摩大学大学院経営情報学研究科 客員教授)の齋藤富士郎博士，同(現(独)産業技術総合研究所光技術研究部門 シニアアドバイザー)桜井照夫博士に深く感謝致します。

共同研究者として，議論や実験等を共に行い，また，ご協力いただきました，パナソニック(株)の馬場彩子氏，同守屋仁美氏，同柴田元司博士，同伊藤彰宏氏，同(現(株)デンソーアイティラボラトリー)安達仁吾氏，同橋立雄二氏，日本電気(株)の鈴木明博士，沖電気工業(株)の長谷川達志氏，(独)産業技術総合研究所の王曉民博士に深く感謝致します。

松下電器産業(株) (現パナソニック(株))入社以来，R&D 知財権センターの山本浩明博士には，光ネットワークや光デバイスの研究開発に関する数々のご協力やご助言はもとより，論文をまとめるにあたって多くのご助言をいただきました。心より感謝致します。

筆者が東京工業大学大学院理工学研究科水本研究室に社会人博士として在籍中，ご協力，ご助言いただきました水本研究室の皆様，ご助言やご指導をいただきま

した東京工業大学大学院理工学研究科電気系の波動・光および通信グループの皆様
様に深く感謝致します。

本研究は以上のほか、数多くの方々のご指導とご協力により達成されたものであり、
ここに謹んで感謝の意を表します。

最後に、本研究の遂行に際し、陰ながら筆者を支えてくれました、父春巳、母照江、
妻由美に心から感謝致します。また、子供たちからは元気や勇気をもらい、研究を継
続する力になりました。伸悟、海人、さとみ、なるみ、どうもありがとうございました。

参考文献

- [1] 例えば, 情報通信白書平成 20 年度版, 2008.
- [2] 末松康晴, 伊賀健一: 光ファイバ通信入門 (第4版), オーム社, 2006.
- [3] T. E. Darcie, “Subcarrier multiplexing for multiple-access lightwave networks,” *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-5, pp. 1103-1110, 1987.
- [4] 例えば, “超高速光デバイスの最新動向と次世代フォトニックネットワークへの応用,” 月刊オプトロニクス, No.6, pp. 103-173, 2005.
- [5] 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫: 光ファイバ, オーム社, 1983.
- [6] G. P. Agrawal: 非線形ファイバー光学 (原書第 2 版), 吉岡書店, 1997.
- [7] 佐藤登: IT 時代を支える光ファイバ技術, 電子情報通信学会, 2001.
- [8] 山下真司, “光ファイバー型デバイスの現状と展望,” 応用物理, vol. 73, pp. 1385-1395, 2004.
- [9] 中沢正隆, “フォトニック結晶ファイバーの特性とその応用,” 応用物理, vol. 73, pp. 1409-1417, 2004.
- [10] Kenneth. O. Hill, “ブラッググレーティング・ファイバデバイス,” 月刊オプトロニクス, pp. 135 -141, 1995.
- [11] 小向哲朗, 中沢正隆, “光ファイバグレーティング,” 電子情報通信学会誌, 79 巻, pp. 1245-1247, 1996.
- [12] 井上享, 岩島徹, 角井素貴, 茂原政一, 服部保次, “ファイバグレーティングとその応用,” 応用物理, vol. 66, pp. 33-36, 1997.
- [13] 水波徹, “光ファイバー回折格子,” 応用物理, vol. 67, pp. 1209-1034, 1998.
- [14] 大田育生, 津田寿昭, 篠崎敦, 淀重人, 太田寿彦, 繁松孝, 小柳諭, 指宿康弘, 麦野明, “WDM システム用光ファイバグレーティングの開発,” 古河電工時報, 第 104 号, pp. 63-68, 1999.
- [15] 金森弘雄, “ファイバグレーティング,” 電子情報通信学会誌, vol. 82, pp. 731-739, 1999.
- [16] 奥出聡, 和田朗, “ファイバグレーティング技術とその動向,” 電子情報通信学会論文誌, vol. 83-c, pp. 1060-1068, 2000.
- [17] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, “Photosensitivity in optical fiber waveguides : Application to reflection filter fabrication,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, pp. 647-649, 1978.
- [18] G. Melts, W. W. Morey and W. H. Glenn, “Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method,” *Optics Lett.*, vol. 14, pp.

823-825, 1989.

- [19] P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi and W. A. Reed, "High pressure H₂ Loading as a UV photosensitivity in GeO₂ doped optical fibers," *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 1191-1193, 1993.
- [20] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 1035-1037, 1993.
- [21] D. Z. Anderson, V. Mizrahi, T. Erdogan and A. E. White, "Production of in-fiber gratings using a diffractive optical element," *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 566-568, 1993.
- [22] 岩田弘, 安藤真紀, 中山恵介, 溝測博紀, 泉川栄二, 水谷康男, 横内孝史, 須崎嘉文, 江島正毅, "2 二光束干渉計を用いて作製したファイバープラッググレーティングの反射特性におけるアポダイゼーション," *光学*, vol. 37, pp. 186-193, 2008.
- [23] 森田和章, 中村雅弘, 香月史朗, 桑本和博, 中村雅弘, 岩野雕一, 古川敏宏, "センシング用 FBG," *昭和電線レビュー*, vol. 54, pp. 18-22, 2004.
- [24] 高濱利光, 横谷篤至, 黒澤宏, "FBG 走査型狭帯域フィルタを使用した FBG センサ用測定器の開発," *電気学会論文誌 E*, vol. 127, pp. 19-24, 2007.
- [25] 水間幸大, 佐々木一正, "光ファイバの防災センサへの応用," *電子情報通信学会誌*, vol. 91, pp. 714-720, 2008.
- [26] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan and J. E. Sipe, "Long-period fiber grating as band-rejection filters," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 58-65, 1996.
- [27] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano and C. R. Davidson, "Long-period fiber-grating as-based gain equalizers," *Optics Lett.*, vol. 21, pp. 336-338, 1996.
- [28] 鈴木扇太, "アレー導波路回折格子 (AWG) デバイス," *電子情報通信学会誌*, vol. 82, pp. 746-752, 1999.
- [29] 左貝潤一: 位相共役光学, 朝倉書店, 1990.
- [30] 中沢正隆, 木村康郎, 鈴木和宣, "光ファイバ中の非線形光学効果と光ソリトン通信技術の展望," *NTT R&D*, vol. 42, pp. 1317-1326, 1993.
- [31] N. Henmi, T. Saito and T. Ishida, "Prechirp technique as a linear dispersion compensation for ultrahigh-speed long-span intensity modulation directed detection optical communication systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, pp. 1706-1719, 1994.
- [32] H. Gysel and M. Ramachandran, "Electrical predistorsion to compensate for combined effect of laser chirp and fibre dispersion," *Electron Lett.*, vol. 27, pp. 421-423, 1991.

- [33] 大藪和正, 姚兵, 滑川嘉一, “高機能ホーリーファイバの開発,” 日立電線, vol. 26, pp. 71-76, 2007.
- [34] 瀧口浩一, “導波路型分散補償器の研究開発動向,” 電子情報通信学会論文誌, vol. 88-C, pp. 397-406, 2005.
- [35] M. Shirasaki and S. Cao, “Compensation of chromatic dispersion and dispersion slope using a virtually imaged phased array,” presented at the OFC2001, Anaheim, 2001, Paper TuS1.
- [36] H. Ooi, K. Nakamura, Y. Akiyama, T. Takahara, T. Terahara, Y. Kawahata, H. Isono and G. Ishikawa, “40-Gb/s WDM Transmission With Virtually Imaged Phased Array (VIPA) Variable Dispersion Compensators,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, pp. 2196-2203, 2002.
- [37] T. Kurokawa, H. Tsuda, K. Okamoto, K. Naganuma, H. Takenouchi, Y. Inoue and M. Ishii, “Time-space-conversion optical signal processing using arrayed-waveguide grating,” *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 1890-1891, 1997.
- [38] H. Tsuda, H. Takenouchi, T. Ishii, K. Okamoto, T. Goh, K. Sato, A. Hirano, T. kurokawa and C. Amano, “Spectral encoding and decoding of 10Gbit/s femtosecond pulses using high resolution arrayed-waveguide grating,” *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 1186-1188, 1999.
- [39] 津田裕之, “超高速光信号用アレー導波路回折格子,” 電子情報通信学会論文誌, vol. 88-C, pp. 421-427, 2005.
- [40] 横内孝史, 藤田圭生, 増田裕二, 中川清, 須崎嘉文, 江崎正毅, 水谷康男, 山内誠, 木村雅則, 木村進, “二段階方式によるファイバグレーティングの温度補償,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J87-C, pp. 696-702, 2004.
- [41] 佐藤忍, 石神良明, 高杉哲, 荒井英明, 大久保博行, “次世代分岐・挿入型 WDM 用グレーティングデバイス,” 日立電線, vol. 21, pp. 11-14, 2002.
- [42] P. Bernardin and N. W. Lawandy, “Dynamics of the formation of Bragg gratings in germanosilicate optical fibers,” *OPTICS COMMUNICATIONS*, vol. 79, pp. 194-199, 1990.
- [43] D. P. Hand and P. S. J. Russell, “Photoinduced refractive-index changes in germanosilicate fibers,” *Optics Lett.*, vol. 15, pp. 102-104, 1990.
- [44] 井上享, “ファイバグレーティング,” レーザー研究, 第 23 巻, pp. 68-77, 1995.
- [45] 丹羽敦彦, 二本柳明展, 奥出聡, 田中大一郎, 須藤正明, “スラント型ファイバグレーティングを用いた利得等化器,” フジクラ技報, 第 103 号, pp. 1-4, 2002.
- [46] S. Okude, K. Shima, N. Tanaka and A. Wada, MOC//GRIN '97 Tokyo, 1997, Paper L6.
- [47] D. Pastor, J. Capmany, D. Ortega, V. Tatay and J. Marti, “Design of Apodized Linearly Chirped Fiber Gratings for Dispersion Compensation,” *J. Lightwave*

- Technol.*, vol. 14, pp. 2581-2588, 1996.
- [48] K. Ennser, M. N. Zervas and R. I. Laming, "Optimization of Apodized Linearly Chirped Fiber Gratings for Optical Communications," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 34, pp. 770-778, 1998.
- [49] E. Devaque, S. Boj, J. F. Bayon, H. Poignant, J. Lemell, M. Moerie, P. Niay and P. Bernage, "Optical fiber design for strong gratings photoimprinting. with radiation mode suppression," presented at the OFC1995, San Diego, 1995, Paper PD-5.
- [50] (株)アルネアラボラトリ社 "広帯域分散補償 FBG TDC-100," 資料データ
- [51] H. Fathallah, A. Leslie, A. Rusch and S. LaRochelle, "Passive optical fast frequency-hop CDMA communications system," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 58-65, 1999.
- [52] H. Tamai, H. Iwamura, N. Minato and S. Oshiba, "Experimental Study on Time-Spread/Wavelength-Hop Optical Code Division Multiplexing with Group Delay Compensating En/Decoder," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 335-337, 2004.
- [53] 大柴小枝子, 湊直樹, 沓沢聡子, 岩村英志, 西木玲彦, 北山研一, "FBG 符号拡散器を用いたデータレート拡張型時間拡散/波長ホップ光符号分割多重方式に関する実験検討," 電子情報通信学会技術報告 OCS2002-92, 102, No.447, pp. 17-20, 2002.
- [54] L. D. Garrett, A. H. Gnauck, R. W. Tkach, B. Agogliati, D. Scarano, V. Gusmeroli, C. Tosetti, G. D. Maio and F. Forghieri, "Cascaded Chirped Fiber Gratings for 18-nm-Bandwidth Dispersion Compensation," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 12, pp. 356-358, 2000.
- [55] M. Durkin, M. Ibsen, M. J. Cole and R. I. Laming, "1m long continuously-written fibre Bragg grating for combined second-and third-order dispersion compensation," *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 1891-1893, 1997.
- [56] S. Wakabayashi, A. Itoh and J. Adachi, "Tunable dispersion compensator module based on chirped fiber gratings with 40 nm bandwidth for OTDM/WDM systems over 160 Gbit/s," presented at the 9th OptoElectronics and Communications Conference 3rd International Conference on Optical Internet (OECC/COIN2004), Yokohama, 2004, 16d2-1.
- [57] S. Wakabayashi, A. Baba, A. Itou and J. Adachi, "Design and Fabrication of Apodization Profile in Linearly Chirped Fiber Bragg Gratings for Wide Band > 35 nm and Compact Tunable Dispersion Compensator," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 25, pp. 210-217, 2008.
- [58] H. Onaka, K. Otsuka, H. Miyata and T. Chikama, "Measuring the Longitudinal Distribution of Four-Wave Mixing Efficiency in Dispersion-Shifted Fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, pp. 1454-1456, 1994.

- [59] W. H. Hatton and M. Nishimura, "Temperature Dependence of Chromatic Dispersion in Single Mode Fibers," *J. Lightwave Tech.*, vol. LT-4, pp. 1552-1555, 1986.
- [60] K. M. Feng, J. X Chai, V. Grubsky, D. S. Starodubov, M. I. Hayee, S. Lee, X. Jiang, A. E. Willner and J. Feinberg, "Dynamic dispersion compensation in a 10-Gb/s optical system using a novel voltage tuned nonlinearly chirped fiber Bragg grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 373-375, 1999.
- [61] J. A. J. Fells, S. E. Kanellopoulos, P. J. Bennett, V. Baker, H. F. M. Priddle, W. S. Lee, A. J. Collar, C. B. Rogers, D. P. Goodchild, R. Feced, B. J. Pugh, S. J. Clements and A. Hadjifotiou, "Twin fiber grating tunable dispersion compensator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 984-986, 2001.
- [62] T. Inui, T. Komukai and M. Nakazawa, "A wavelength-tunable dispersion equalizer using a nonlinearly chirped fiber Bragg grating pair mounted on multilayer piezoelectric transducers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 1668-1670, 2000.
- [63] J. A. Rogers, B. J. Eggleton and J. R. Pedrazzani, "Distributed on-fiber thin film heaters for Bragg gratings with adjustable chirp," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, pp. 3131-3133, 1999.
- [64] T. Sugihara, K. Shimomura, K. Shimizu, Y. Kobayashi, K. Matsuoka, M. Hashimoto, T. Hashimoto, T. Hirai, S. Matsumoto, T. Ohira, M. Takabayashi, K. Yoshiara and T. Mizuoichi, "Automatically tracked dispersion compensation with penalty-free tunable dispersion equalizer for 40 Gbit/s systems," presented at the Optical Fiber and Communication Conference, 2002, Paper ThAA2.
- [65] S. Wakabayashi, H. Moriya, A. Baba, M. Shibata and Y. Takeuchi, "Adaptive Dispersion Slope Equalizer using Twin Chirped Fiber Bragg Gratings with Temperature Gradient," presented at the OECC2002, Yokohama, 2002, Paper 10p-37.
- [66] S. Wakabayashi, A. Baba, H. Moriya, X. Wang, T. Hasegawa and A. Suzuki, "Tunable dispersion slope compensator based on chirped FBGs with temperature distribution for 160 Gbit/s," presented at the Optical Fiber and Communication Conference, Atlanta, 2003, Paper MF27.
- [67] S. Wakabayashi, A. Baba, H. Moriya, X. Wang, T. Hasegawa and A. Suzuki, "Tunable dispersion and dispersion slope compensator based on two twin chirped FBGs with temperature gradient for 160 Gbit/s transmission," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E87-C, pp. 1100-1105, 2004.
- [68] M.D. Pelusi, Y. Matsui and A. Suzuki, "Phase modulation of stretched optical pulses for suppression of third-order dispersion effects in fibre transmission," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1675-1677, 1998.
- [69] S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito and T. Kimura, "Direct Frequency Modulation in AlGaAs Semiconductor Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, pp. 582-595, 1982.

- [70] M. R. Phillips, T. E. Darcie, D. Marcuse, G. E. Bodeep and N. J. Frigo, "Nonlinear distortion generated by dispersive transmission of chirped intensity-modulated signals," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, pp. 481-483, 1991.
- [71] D. Piehler, X. Zou, C. Y. Kuo, A. Nisson, J. Kleefeld, G. Garcia, J. D. Ralston and A. Mathur, "55 dB CNR over 50 km of fibre in an 80-channel externally-modulated AM-CATV system without optical amplification," *Electron Lett.*, vol. 33, pp. 226-228, 1997.
- [72] H. H. Lu, "Performance comparison between DCF and RDF dispersion compensation in fiber optical CATV systems," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 48, pp. 370-373, 2002.
- [73] W.H. Loh; R.I. Laming; N. Robinson; A. Cavaciuti; F. Vaninetti; C.J. Anderson; M.N. Zervas and M.J. Cole, "Dispersion compensation over distances in excess of 500 km for 10-Gb/s systems using chirped fiber gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.8, pp. 944-946, 1996.
- [74] H. H. Lu and C. T. Lee, "Dispersion compensation in externally modulated transport system using chirped fiber grating as well as large effective area fiber," *Opt. Eng.*, vol. 40, pp. 656-657, 2001.
- [75] Alfonso Martínez, Daniel Pastor and José Capmany, "Full distortion induced by dispersion evaluation and optical bandwidth constraining of fiber Bragg grating demultiplexers over analogue SCM systems," *OPTICS EXPRESS*, vol. 10, pp. 1526-1533, 2002.
- [76] Q. Ye, F. Liu, R. Qu and Z. Fang, "The effect of the group delay ripple of chirped fiber grating on composite second-order in optical CATV system," *Optic communications*, vol. 247, pp. 319-323, 2005.
- [77] S. Wakabayashi, A. Itou and T. Mizumoto, "Reduction of second-order intermodulation distortions using chirped fiber Bragg grating with low group delay ripples for application to fiber-optic analog transmission", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 25, pp. 1442-1448, 2008.
- [78] J. A. Salehi, A. M. Weiner and J. P. Heritage, "Coherent ultrashort light pulse code-division multiple access communication systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, pp. 478-491, 1990.
- [79] R. A. Griffin, D. D. Sampson and D. A. Jackson, "Modification of optical coherence using spectral phase coding for use in photonic code-division multiple access systems," *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 2214-2216, 1993.
- [80] W.D Cornwell, N. Wada, K.-L. Kitayama and I. Andonovic, "Experimental demonstration of coherent coding of picosecond pulses," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 204-205, 1998.
- [81] A. De Souza, M. C. Nuss, W. h. Knox and D. A. B. Miller, "Wavelength-division multiplexing with femtosecond pulses," *Opt. Lett.*, vol.

- 20, pp. 1166-1168, 1995.
- [82] A. M. Weiner, J. P. Heritage and E. M. Kirschner, "High resolution femtosecond pulse shaping," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. B5, pp. 1563-1572, 1988.
- [83] H. Takenouchi, H. Tsuda, K. Nagamuma, T. Kurokawa, Y. Inoue and K. Okamoto, "Differential processing of ultrashort optical pulses using arrayed-waveguide grating with phase-only filter," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1245-1247, 1998.
- [84] A. Baba, H. Moriya, S. Wakabayashi, Y. Toyoda and Y. Takeuchi, "Separation of Narrow Bandwidth Spectral Light from Femtosecond Pulses Using an Optical Coupler with a Fiber Grating," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E83-C, pp. 824-829, 2000.
- [85] S. Wakabayashi, H. Moriya, A. Baba and Y. Takeuchi, "Optical Encoding and Decoding of Femtosecond Pulses in the Spectral Domain using Optical Coupler with Fiber Gratings," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E85-C, pp. 135-140, 2002.
- [86] P. J. Lemaire, A. M. Vengsarkar, W. A. Reed, V. Mizrahi and K. S. Kranz, "Refractive-index changes in optical fibers sensitized with molecular hydrogen," presented at the OFC94, San Jose, 1994, Paper Tu11.
- [87] B. J. Eggleton, P. A. Krug, L. Poladian and F. Ouellette, "Long periodicsuperstructure Bragg gratings in optical fibers," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 1620-1622, 1994.
- [88] M. Ibsen, M. K. Durkin, M. J. Cole and R. I. Laming, "Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 842-844, 1998.
- [89] J. Adachi, A. Itoh, Y. hashidate and S. Wakabayashi, "Simultaneous Encoding/Decoding in Multiple WDMA Channels for Optical FFH-CDMA," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 2221-2223, 2005.
- [90] L. Bin, "One-coincidence sequences with specified distance between adjacent symbols for frequency-hopping multiple access," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, pp. 408-410, 1997.

本研究に関する発表

[主著]

本研究に関する発表論文

- [1] S. Wakabayashi, H. Moriya, A. Baba and Y. Takeuchi, "Optical Encoding and Decoding of Femtosecond Pulses in the Spectral Domain using Optical Coupler with Fiber Gratings," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E85-C, pp. 135-140, 2002.
- [2] S. Wakabayashi, A. Baba, H. Moriya, X Wang, T. Hasegawa and A. Suzuki, "Tunable dispersion and dispersion slope compensator based on two twin chirped FBGs with temperature gradient for 160 Gbit/s transmission," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E87-C, pp. 1100-1105, 2004.
- [3] S. Wakabayashi, A. Baba, A. Itou and J. Adachi, "Design and Fabrication of Apodization Profile in Linearly Chirped Fiber Bragg Gratings for Wide Band > 35 nm and Compact Tunable Dispersion Compensator," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 25, pp. 210-217, 2008.
- [4] S. Wakabayashi, A. Itou and T. Mizumoto, "Reduction of second-order intermodulation distortions using chirped fiber Bragg grating with low group delay ripples for application to fiber-optic analog transmission," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 25, pp. 1442-1448, 2008.

本研究に関する学会発表

(国際会議)

- [1] S. Wakabayashi, H. Moriya, A. Baba and Y. Takeuchi, "2-channel Optical Encoding and Decoding of Femtosecond Pulses using Optical Coupler Structures with Fiber Gratings," The 8th International Workshop on Femtosecond Technology (FST2001), June, 2001.
- [2] S. Wakabayashi, A. Baba, H. Moriya and Y. Takeuchi, "Adaptive Broadband Dispersion Compensator using Chirped Fiber Bragg Gratings with Temperature Gradient," The 9th International Workshop on Femtosecond Technology (FST2002), June, 2002.
- [3] S. Wakabayashi, H. Moriya, A. Baba, M. Shibata and Y. Takeuchi, "Adaptive Dispersion Slope Equalizer using Twin Chirped Fiber Bragg Gratings with Temperature Gradient," 7th OptoElectronics and Communications Conference(OECC2002), July, 2002, Paper 10p-37.
- [4] S. Wakabayashi, A. Baba, H. Moriya, X. Wang, T. Hasegawa and A. Suzuki, "Tunable dispersion slope compensator based on chirped FBGs with temperature distribution for 160 Gbit/s," *Optical Fiber Communication*

Conference 2003 (OFC2003), March, 2003, Paper MF27.

- [5] S. Wakabayashi, A. Itoh, A. Baba and H. Moriya, "Tunable dispersion compensator based on chirped FBGs with 30 nm bandwidth for ultra-short pulse shaping over 160 Gbit/s," The 10th International Workshop on Femtosecond Technology (FST2003), July, 2003.
- [6] S. Wakabayashi, A. Itoh and J. Adachi, "Tunable dispersion compensator module based on chirped fiber gratings with 40 nm bandwidth for OTDM/WDM systems over 160 Gbit/s," 9th OptoElectronics and Communications Conference 3rd International Conference on Optical Internet (OECC/COIN2004), July, 2004, Paper 16d2-1.

(国内学会, 研究会)

- [1] 若林信一, 守屋仁美, 馬場彩子, 武内喜則, "ファイバ回折格子を用いたフェムト秒パルスの4チャンネルスペクトル分離," 第62回応用物理学会学術講演会, 2001年9月, 11p-B-5.
- [2] 若林信一, 守屋仁美, 馬場彩子, 武内喜則, "光コード化素子の試作とその基本動作実証," 第62回応用物理学会学術講演会, 2001年9月, 12a-Y-4.
- [3] 若林信一, 馬場彩子, 守屋仁美, 柴田元司, "広帯域CFBGを用いた超短パルス伝送用波形整形デバイス," 2002年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2002年9月, C-3-12.
- [4] 若林信一, 伊藤彰宏, 守屋仁美, 馬場彩子, 王曉民, 長谷川達志, 鈴木明, "超短パルス伝送用FBG型可変分散補償デバイス," 2003年電子情報通信学会総合大会, 2003年3月, C-3-116.
- [5] 若林信一, 伊藤彰宏, 守屋仁美, 馬場彩子, "超広帯域FBGを用いた可変分散補償デバイス," 2003年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2003年9月, C-3-52.
- [6] 若林信一, 伊藤彰宏, 安達仁吾, "CバンドをカバーするFBG型可変分散補償デバイス," 2004年電子情報通信学会総合大会, 2004年3月, C-3-91.
- [7] 若林信一, 伊藤彰宏, 安達仁吾, "広帯域化した可変分散補償小型モジュール," 2005年電子情報通信学会総合大会, 2005年3月, C-3-120.
- [8] 若林信一, 馬場彩子, 伊藤彰宏, 安達仁吾, "分散補償用超広帯域FBGの設計と製作," 東京工業大学21世紀COEプログラム「フォトニクスナノデバイス集積工学」最終成果報告シンポジウム, 2006年12月.
- [9] 若林信一, 馬場彩子, 伊藤彰宏, 安達仁吾, "超広帯域FBG型可変分散補償デバイス," 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2006年12月, OPE2006-127.

(総説, 解説, 著書等)

- [1] 若林信一, “光スペクトル制御素子の開発,” レーザ加工学会誌, vol. 9, pp. 82-84, 2002.
- [2] 鈴木明, 若林信一, “短パルスの分散補償技術,” 月刊オプトロニクス, pp. 161-165, 2002.
- [3] 若林信一, “FBG を用いた広帯域可変分散補償デバイス,” 月刊オプトロニクス, pp. 167-173, 2005.

[共著]

本研究に関する発表論文

- [1] A. Baba, H. Moriya, S. Wakabayashi, Y. Toyoda and Y. Takeuchi, “Separation of Narrow Bandwidth Spectral Light from Femtosecond Pulses Using an Optical Coupler with a Fiber Grating,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. E83-C, pp. 824-829, 2000.
- [2] J. Adachi, A. Itoh, Y. Hashidate and S. Wakabayashi, “Simultaneous Encoding/Decoding in Multiple WDMA Channels for Optical FFH-CDMA,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.17, pp. 2221-2223, 2005.

本研究に関する学会発表

(国際会議)

- [1] A. Baba, H. Moriya, Y. Toyoda, S. Wakabayashi and Y. Takeuchi, “Spectral Separation of Femtosecond Pulses Using Optical Coupler with Fiber Grating,” APCC/OECC’99, C6S8, Oct. 1999.
- [2] A. Baba, H. Moriya, S. Wakabayashi and Y. Takeuchi, “2-channel Spectral Separation of Femtosecond Pulses Using Fiber,” The 7th International Workshop on Femtosecond Technology (FST2000), June, 2000.

(国内学会, 研究会)

- [1] 馬場彩子, 守屋仁美, 豊田幸雄, 若林信一, 武内喜則, “ファイバ回折格子を用いたフェムト秒パルスのスペクトル分離,” 第 60 回応用物理学会学術講演会, 1999 年 9 月, 2p-ZB-16.
- [2] 馬場彩子, 守屋仁美, 若林信一, 武内喜則, “ファイバ回折格子を用いたフェムト秒パルスの 2 チャンネルスペクトル分離,” 第 61 回応用物理学会学術講演会, 2000 年 9 月, 3a-Q-24.

- [3] 馬場彩子, 守屋仁美, 若林信一, “ファイバグレーティングペアによるパルス波形整形,” 2002 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2002 年 9 月, C-4-36.
- [4] 馬場彩子, 守屋仁美, 柴田元司, 若林信一, “超短パルス波形整形のための広帯域ファイバグレーティング,” 第 63 回応用物理学会学術講演会, 2002 年 9 月, 26a-ZH-20.
- [5] 伊藤彰宏, 馬場彩子, 守屋仁美, 若林信一, “超短パルス波形整形のための広帯域ファイバグレーティングの作製,” 第 50 回応用物理学会学術講演会, 2003 年 3 月, 28p-K-10.
- [6] 伊藤彰宏, 馬場彩子, 守屋仁美, 若林信一, “広帯域ファイバグレーティングペアによる可変分散特性,” 第 64 回応用物理学会学術講演会, 2003 年 8 月, 31p-YH-17.
- [7] 伊藤彰宏, 安達仁吾, 若林信一, “超広帯域ファイバブラッググレーティング,” 第 51 回応用物理学会学術講演会, 2004 年 3 月, 29p-ZS-3.
- [8] 安達仁吾, 伊藤彰宏, 若林信一, “C バンドをカバーする可変分散補償小型モジュール,” 2004 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2004 年 9 月, C-3-28.
- [9] 伊藤彰宏, 安達仁吾, 若林信一, “伝送歪特性に対するチャープファイバブラッググレーティング(CFBG)の群遅延リップルの影響,” 2004 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2004 年 9 月, C-3-39.
- [10] 伊藤彰宏, 安達仁吾, 若林信一, “可変分散補償用超広帯域ファイバグレーティング,” レーザー学会学術講演会第 25 回年次大会, 2005 年 1 月, 21p-8.
- [11] 安達仁吾, 伊藤彰宏, 若林信一, “光 FFH-CDMA における WDMA 多チャンネル一括符号器,” 2005 年電子情報通信学会総合大会, 2005 年 3 月, C-3-7.
- [12] 伊藤彰宏, 安達仁吾, 若林信一, “伝送歪特性に対するチャープファイバブラッググレーティング(CFBG)の群遅延リップルの影響(2),” 2005 年電子情報通信学会総合大会, 2005 年 3 月, C-3-37.

その他の発表

(発表論文)

- [1] K. Mutoh, S. Wakabayashi, K. Mutoh, Y. Toyoda and M. Nakajima, "Simultaneous Fabrication of Vertical and 45° Mirrors of InP for Surface-Emitting Lasers Using Inclined Cl Ion Beams," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 30, pp. 67-71, 1991.
- [2] S. Wakabayashi, K. Mutoh, M. Nakajima and Y. Toyoda, "InGaAsP/InP horizontal cavity surface-emitting Lasers radiating in two opposite directions", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, pp. 1499-1501, 1992.
- [3] 武内喜則, 川合英雄, 若林信一, "デジタル・スマートピクセル", 光学, 32巻, pp. 431-433, 2003.

(国際会議)

- [1] S. Wakabayashi, T. Tsuruta, K. Idota, Y. Takeuchi, M. Ohshima and Y. Toyoda, "Side-Diode-Injection Laser for Optical Logic", *Proceeding of Photonic Switching 90*, 1990, pp. 114-117.
- [2] S. Wakabayashi, Y. Toyoda and T. Narusawa, "2x2 Side-Diode-Injection Laser Array for Optical Logic", *Conference on Electro-Optics (CLEO91)*, 1991, Paper CWF18.
- [3] S. Wakabayashi, H. Tougou, K. Inoue, F. Sogawa, T. Narusawa and Y. Toyoda, "Time-resolved Photoluminescence Properties from AlGaAs/GaAs Quantum-Well Wires fabricated by Two-step Etching", *1st International Workshop on Quantum Functional Devices (QFD'92)*, 1992, Paper P-26.
- [4] S. Wakabayashi, H. Tougou, Y. Toyoda and Y. Takeuchi, "New Optical frequency modulation Method using Wavelength Conversion in DFB LD with Light Injection", *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP'96)*, 1996, Paper TUP-3.