

光ファイバ通信システム用磁力誘起グレーティング型ファイバフィルタに関する研究

代表研究者

坂田 肇

静岡大学 工学部 教授

1. はじめに

将来にわたり光ファイバ通信システムが通信網の根幹を担っていくための重要な基盤技術として、光信号の増幅、分波、スイッチング、送受信、センシングなどがある。そのための幾つかの構成部品はファイバから一旦光を取り出しバルク素子で処理を行った後再びファイバ内へ光を戻す仕組みを必要としている。その過程で損失、信号劣化、装置大型化、電力消費などの問題が生じる。そこで、ファイバ内ですべて処理可能なデバイスが求められている。

長周期ファイバグレーティング（以下、LPFG）は周期数百 μm のファイバグレーティングであり、ファイバブラッググレーティング（FBG）の周期 $0.5 \mu\text{m}$ と比べて大きな周期を有する。LPFG は伝搬コアモードとクラッドモードとの間のモード結合を利用する帯域阻止フィルタとして知られる [1], [2]。反射光を発生しないため、光増幅器やファイバレーザとの相性が良く、また通信路に敷設しても雑音原因とならない特徴を有する。一般に、LPFG はエキシマレーザなど遠紫外線光源を照射して光屈折率効果によりファイバコアの屈折率を周期的に変調して得られる。そのため、仕様は固定であり、且つ損失機能のみのため、応用は光増幅器の利得等化器や監視波長の除去あるいはセンシング応用に限られている [2]-[4]。この LPFG の諸特性が外部制御可能となれば、可変利得等化器、可変アテネータ、モード交換器、波長可変ファイバレーザなど新たな応用展開が進むと考えられる。LPFG の摂動周期は $100 \mu\text{m}$ から 1mm であり、設計・作製手法に自由度が高く、可変化についてもさまざまな手法が報告されている。たとえば、ファイバへの加圧、引張り、曲げ、捻りなど機械的手段によるものや加熱制御によるものなどが挙げられる [5]-[7]。しかし、機械装置の煩雑さ、ファイバ耐久性、損失振幅と波長の独立制御などに課題がある。

本報告では、永久磁石ないし電磁石とコイルばねとを組み合わせ、ファイバ中に周期性マイクロバンドを誘起させる方式 [8] により、共鳴波長と損失振幅を独立に制御可能で、消去・再構成も可能な LPFG を提案し、その特性評価の結果について報告する。

2. 周期性マイクロバンドによる LPFG の解析

LPFG は周期摂動を利用して基本モードを順方向高次モードへ結合させるファイバ素子であり、シングルモードファイバの場合、高次モードはクラッドモードに相当する。クラッドモードを除去することで、コアモード伝搬光の透過スペクトルには共鳴損失が現れる。ファイバへ与える周期摂動を可変化するため、上述したファイバコアの屈折率変調ではなく、ファイバの軸を上下に変位させる周期性マイクロバンドを採用した。図 1 に断面構造を示すように、コア-クラッド境界が周期構造となりモード結合を促す。クラッド-被覆境界はコアモードの界分布が及ばないためモード結合に寄与しない。ここで、被覆の屈折率がクラッドより高い場合、クラッドモードは漏洩モードとなる。この構造では、モード結合の強さはファイバ軸の変位 $2d$ で変わり、その周期 Λ を変化させることで共鳴波長が制御される。

ここで、マイクロバンドにより形成されるファイバ中の屈折率分布は円筒座標系を用いて以下のように表される [9]。

$$n(r, \phi, z) = n_0(r) + \frac{\partial n_0}{\partial r} f(z) \cos \phi \quad (1)$$

上式中、 $n_0(r)$ はファイバ変形前の屈折率分布を表し、 $f(z)$ はファイバ軸の変形を与え、変位振幅 d と周期 Λ から以下のように表される。

$$f(z) = d \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \quad (2)$$

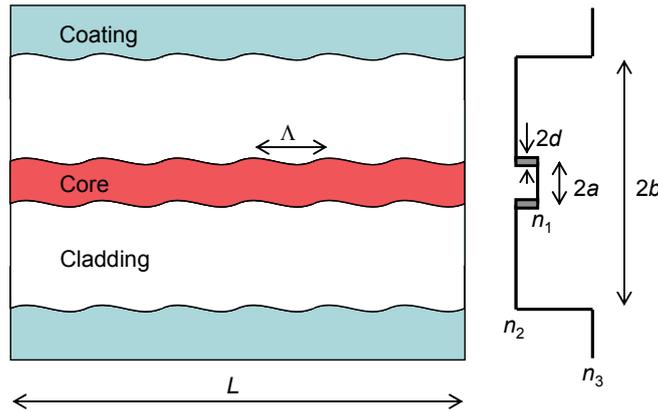


図1 マイクロバンド型 LPFG の構造と屈折率分布

周期性マイクロバンド中でコアモードは、 $\cos \phi$ 依存性を有する LP_{1m} 漏洩クラッドモードと共鳴波長において強く結合すると考えられ、コアモードの伝搬損失は LP_{01} コアモードの電界と LP_{1m} クラッドモードの電界から導かれる結合係数 C_{1m} を用いて以下のように表される [10], [11]。

$$\alpha = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} C_{1m}^2 \cdot \Phi(\beta_{01} - \beta_{1m}) \quad (3)$$

ここで、 Φ は自己相関関数の空間パワースペクトルを示し、 β_{01} と β_{1m} はそれぞれ LP_{01} モードと LP_{1m} モードの伝搬定数を表す。空間パワースペクトルは結合長を L として以下のように表される。

$$\Phi = \frac{1}{L} \left| \int_{-L/2}^{L/2} f(z) \exp[-j(\beta_{01} - \beta_{1m})z] dz \right|^2 \quad (4)$$

解析モデルとして、シングルモードファイバ ($\Delta n = 0.0055$, $D_{co} = 8.2 \mu\text{m}$) 中のモード電界分布を計算した結果を図 2 に示す。モード間結合はコア界面の摂動領域 (図中の二重線) で生じるものとする。クラッドモードの電界は摂動領域で強調されている様子が分かる。コアモードとの良好な結合が予想される。図 3 は素子長を 15 mm および 50 mm とした 2 例について透過光スペクトルを計算した結果である。ファイバ軸変位 $2d$ はそれぞれ $0.6 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ と増加させた。ファイバ軸変位に応じて共鳴波長における損失が増加する様子が掴める。素子長を長くした場合、浅い変位で十分な損失が生じ、かつ、損失帯幅が狭くなる。応用に要求される帯域幅に応じて素子長は決定される。

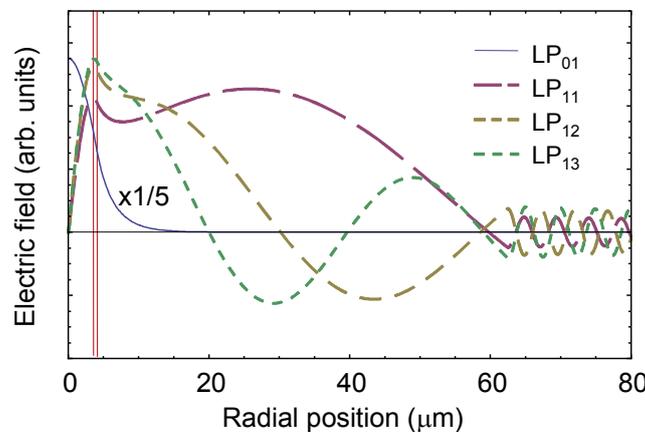


図2 コアモードと漏洩クラッドモードの電界分布

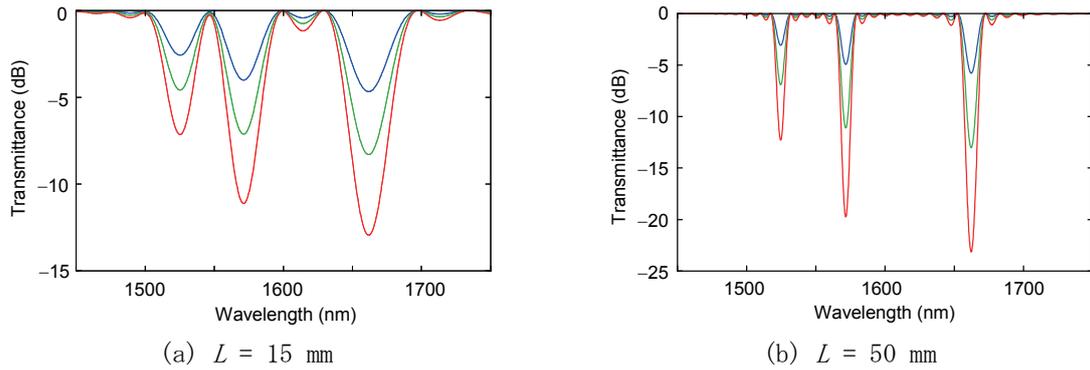


図3 透過光スペクトル計算例

3. 永久磁石を用いた損失制御

マイクロベンズの構造パラメータを外部制御するため、図4に示すように鋼製のコイルばねを利用した [11], [12]。LPFG 周期はコイルばねの伸張で変えられ、ファイバ軸変位はファイバを挟んでコイルばねを磁力で吸引することで得られる。コイルの中心線とファイバを磁力方向で一致させるため、非磁性のU字型ばねホルダを使用した。磁力の制御はばねホルダと永久磁石間のギャップ制御で行った。コイルばねは外径 6 mm を使用し、内部には鉄心を挿入して磁力強化を図った。

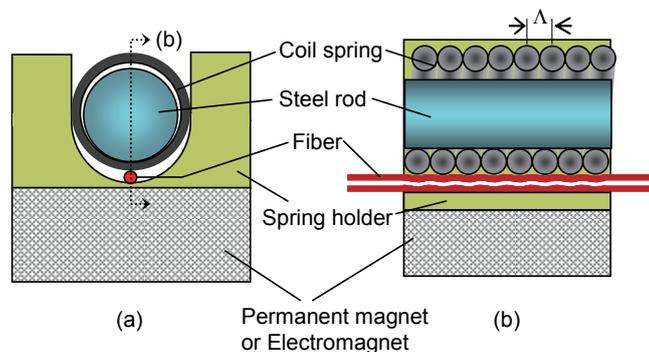


図4 磁力誘起による可変 LPFG の基本構成

図5はワイヤ径 0.6 mm のコイルばねと長さ 40 mm の鉄心を使用し、Nd-Fe-B 磁石とばねホルダ間のギャップを 0 から 5 mm まで変化させたときの透過光スペクトルの変化を示す。3つの損失帯はそれぞれ、短波長側から順に、 LP_{11} 、 LP_{12} 、 LP_{13} 漏洩クラッドモードへの結合に起因する共鳴波長に相当する。ギャップを狭くするにつれて、共鳴波長での損失振幅の増大する様子がわかる。磁力が加わらない状態からの損失振幅の変化は 15 dB 程度が得られ、共鳴外波長での損失は比較的小さいものであった。図6は磁石-ホルダ間ギャップと損失振幅の関係を示す。ギャップの二乗にほぼ逆比例して損失の増加する様子がわかる。

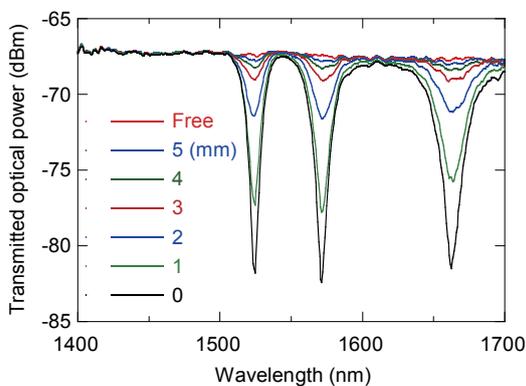


図5 磁石ギャップによる透過光スペクトルの変化

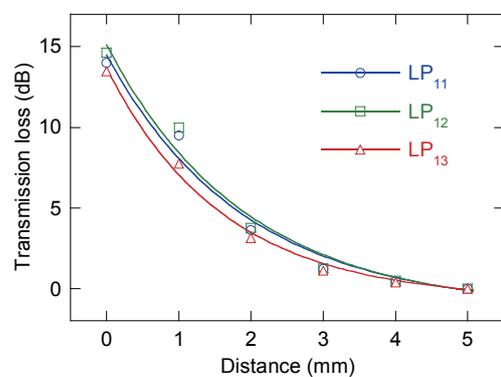


図6 磁石ギャップによるピーク損失の変化

4. 電磁石を用いた電圧損失制御

損失振幅の電気制御を行うため、図4と同様のばねホルダ下に電磁石を装着した。コイルばねには鉄心を内挿し、ファイバ圧着領域長を95 mmとした。電磁石への印加電圧を変えたときの透過光スペクトル変化を図7に示す。電圧0 Vにおいては透過光スペクトルに変化は見られないが電圧印加に応じてLP₁₁、LP₁₂、LP₁₃クラッドモードに相当する損失ピークが現れた。電圧を25 Vまで上昇させたとき損失振幅は8 dBほど変化した。素子長が長いので、損失帯幅は図5の結果より細くなり、たとえばLP₁₁共鳴波長において約8 nmであった。次に、電磁石に0 Vから25 Vの間で電圧印加を繰り返し与えたときの損失ピーク振幅の推移を図8に示す。損失振幅は往路と復路の間で経路のずれが見られる。これは電磁石のヒステリシスに起因すると考えられる。繰り返しの再現性はおよそ0.5 dB以内に収まっている。

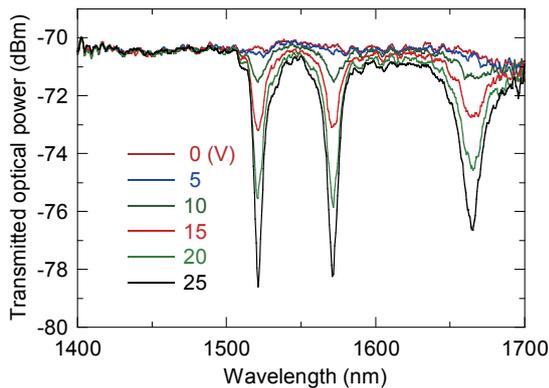


図7 電磁石電圧に応じて変化する透過光スペクトル

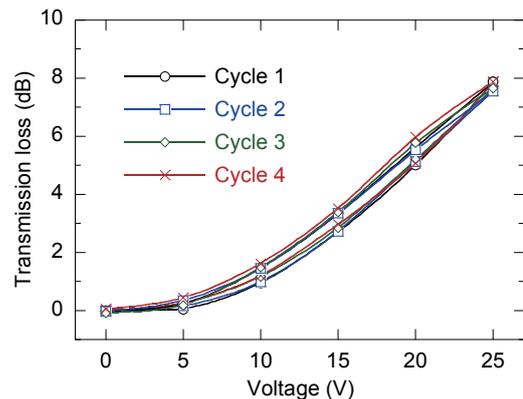


図8 ピーク損失の電圧依存性

5. 電磁石+永久磁石による制御

電磁石はNd-Fe-B磁石と比較すると単位長さあたりの磁力が小さいため、必要な素子長が長くなる傾向にある。帯域幅を広げる場合、より短い素子長にする必要がある。そこで、図9に示すように、Nd-Fe-B磁石で磁化したコイルばねをファイバ上部に密着し、ばねホルダの下より電磁石による磁力でコイルばねを引き付けることでファイバ中に周期的歪みを与えた。この場合、コイルばねには鉄芯を内挿していない。このようにしてLPFGを形成したファイバの透過光スペクトル特性を広帯域光源と光スペクトラムアナライザで測定した結果を図10に示す。損失帯幅は図7の結果と比べて大きくなっている様子が分かる。この構成では、電磁石電圧を加えない状態でも磁化したコイルばねと電磁石のコアが引き付け合い共鳴損失が生じるが、負電圧を印加することで損失は消失した。電磁石の駆動電圧を-25 Vから+15 Vの間で変えたところ、共鳴波長における透過損失を0 dBから11 dBにわたって制御可能であった。

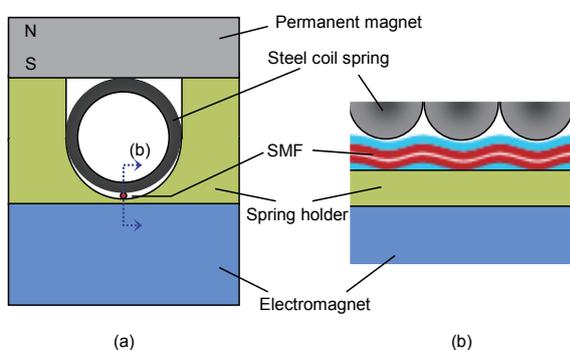


図9 永久磁石+電磁石駆動によるLPFGの形成

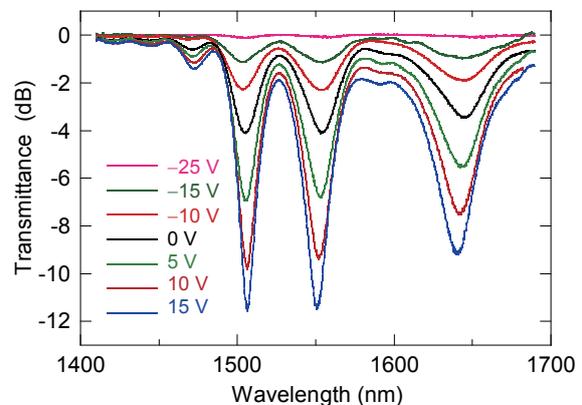


図10 正負電圧駆動による透過損失制御

次に、電磁石を電圧 10 V、周波数 10 Hz でパルス駆動させたときの LPFG 透過光の応答波形を測定した。図 1 1 の結果に示すように、立上り、立下りの応答時間はそれぞれ 16 ms、18 ms であった。これは、電磁石コイルのインピーダンスによる時定数にファイバの弾性歪みに起因する遅れが加わったものと考えている。また、駆動電圧を -25 V から +15 V の間で繰り返し動作させた結果、初期ループを除いて安定な透過損失を得ることができた。

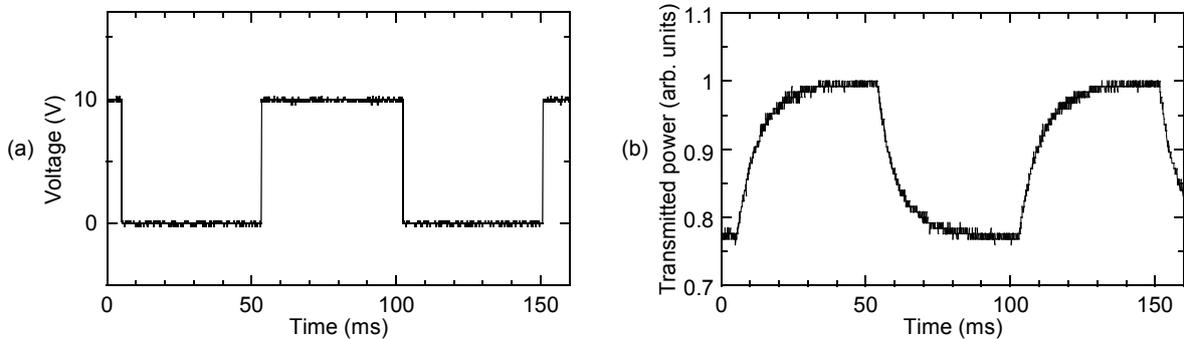


図 1 1 透過損失の時間応答特性：(a) 駆動電圧波形、(b) 透過光応答波形

6. LPFG 周期による共鳴波長の制御

コイルばねをマイクロベンド形成に使用したのは伸張することで容易に周期可変が得られることにある。図 1 2 は、ワイヤ径 0.5 mm のコイルばねを用いて、LPFG 周期を 560 μm から約 43 μm ずつ変化させて得られた透過光スペクトルの様子である。各クラッドモードに基づく損失ピークが長波長側へ順次シフトしている。LPFG 周期と共鳴波長の関係を詳細にプロットした結果を図 1 3 に示す。周期変化 520~680 μm に対して、損失ピーク波長は 200 nm にわたり変化し、ほぼ線形の関係が見られた。周期-波長係数は、例えば LP_{01} - LP_{12} 間の結合では $d\lambda/d\Lambda = 1.47 \text{ nm}/\mu\text{m}$ になった。周期-波長係数はクラッドモード次数が高いほど大きい傾向にある。

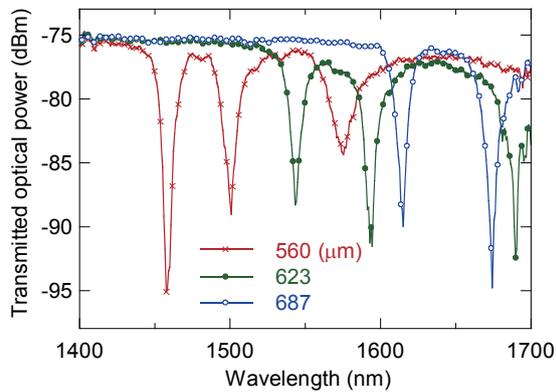


図 1 2 LPFG 周期による透過光スペクトル変化

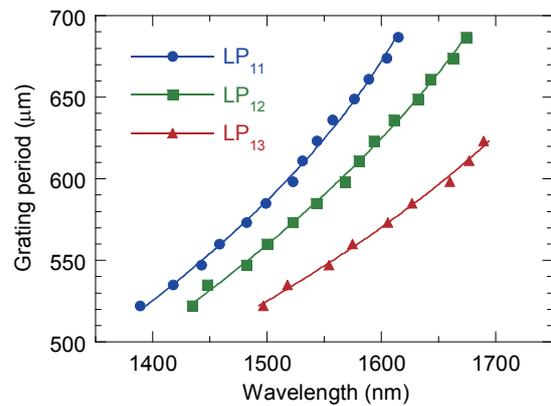


図 1 3 周期制御による共鳴波長シフト

7 エルビウム添加ファイバ光源への応用

可変 LPFG の応用として、光ファイバ増幅器の利得等化や ASE 光源の発光スペクトル平坦化は重要である。本研究では可変 LPFG をチューナブルノッチフィルタとして使用し、ASE 光源のスペクトル平坦化を試みた。図 1 4 の実験配置に示すように、1.48 μm 帯レーザダイオードで励起したエルビウム添加ファイバ (EDF) の後段に可変 LPFG を接続することによって、発光スペクトルを修正した。まず、LPFG の共鳴波長を EDF の発光ピークに同調させ、次に損失量を調整してスペクトル平坦化を行った。発光スペクトルの変化を図 1 5 に示す。まだ不十分ではあるが発光ピークが低減されている様子が掴める。

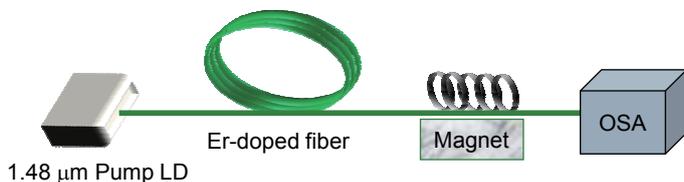


図 1 4 ASE スペクトルの平坦化実験配置

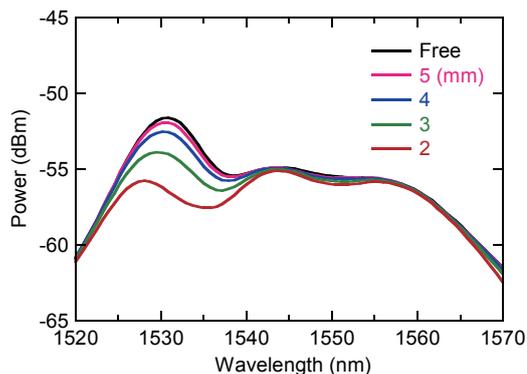


図 1 5 LPMG による修正を加えた発光スペクトル

さらに、EDF リングレーザにおける共振器内チューナとして可変 LPMG を検討した。図 1 6 の構成に示すように、EDF は 1.48 μm 帯レーザダイオードの発光によって波長分割多重 (WDM) カプラを介して励起した。レーザ出力光はファイバ溶融カプラで分離し、光パワーメータ (OPM) と光スペクトラムアナライザ (OSA) で測定した。コイルばねには短い鉄芯を挿入することにより、LP₁₁ と LP₁₂ クラッドモードに結合する損失帯の帯域幅を広げ、損失帯間に存在する通過帯を形成した。通過帯を移動させることで、共振器利得が最大となる波長の制御が行える。図 1 7 にはコイルばねを伸張させることで得られた発振スペクトルの変化を示している。発振波長は 1546 nm から 1566 nm の間でシフトした。

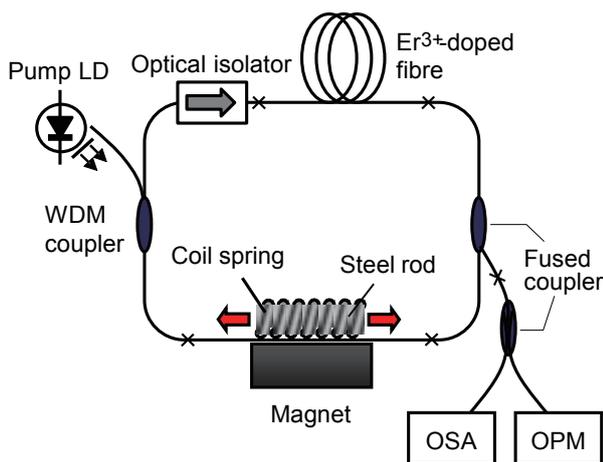


図 1 6 可変 LPMG を利用した波長可変ファイバレーザ

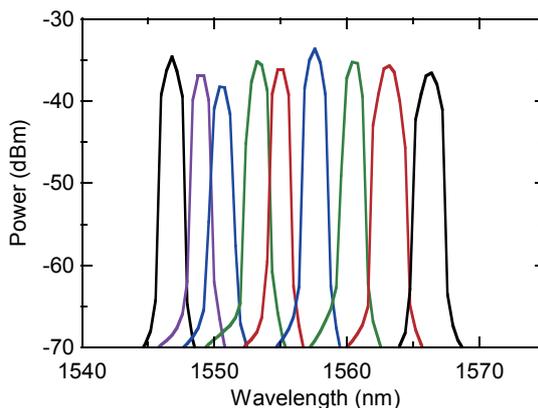


図 1 7 波長可変発振スペクトル

7 まとめ

消去・再構成可能で、共鳴波長と損失振幅を独立に制御できる長周期ファイバグレーティング (LPMG) を提案し、その可変フィルタとしての動作原理を実証した。素子の構成は極めて簡易で、コイルばねと永久磁石ないし電磁石とからなる。さらに、特徴的な応用事例としてエルビウム添加ファイバと組み合わせ、ASE 光源の発光スペクトル平坦化、およびファイバレーザの発振波長制御を行った。

【参考文献】

[1] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," J. Lightwave Technol., vol.15, no.8, pp.1277-1294, Aug. 1997.

- [2] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J. E. Sipe, "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. Lightwave Technol.*, vol.14, no.1, pp.58-65, Jan. 1996.
- [3] P. F. Wysocki, J. B. Judkins, R. P. Espindola, M. Andrejco, and A. M. Vengsarkar, "Broad-band erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.9, no.10, pp.1343-1345, Oct. 1997.
- [4] V. Bhatia, "Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing," *Opt. Express*, vol.4, no.11, pp.457-466, May 1999.
- [5] S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, and H. J. Shaw, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, vol.25, no.10, pp.710-712, May 2000.
- [6] C. Y. Lin and L. A. Wang, "A wavelength- and loss-tunable band-rejection filter based on corrugated long-period fiber grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.13, no.4, pp.332-334, Apr. 2001.
- [7] C.-H. Lin, Q. Li, A. A. Au, Y. Jiang, E. Wu, and H. P. Lee, "Strain-induced thermally tuned long-period fiber gratings fabricated on a periodically corrugated substrate," *J. Lightwave Technol.*, vol.22, no.7, pp.1818-1827, July 2004.
- [8] H. Sakata and K. Yamahata, "Magnetic-force-induced long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, vol.37, no.7, pp.1250-1252, Apr. 2012.
- [9] D. Marcuse, "Microdeformation losses of single-mode fibers," *Appl. Opt.*, vol.23, no.7, pp.1082-1091, Apr. 1984.
- [10] H. G. Unger, *Planar Optical Waveguides and Fibers*, Oxford University Press, Oxford, 1977.
- [11] C. B. Probst, A. Bjarklev, and S. B. Andreasen, "Experimental verification of microbending theory using mode coupling to discrete cladding modes," *J. Lightwave Technol.*, vol.7, no.1, pp.55-61, Jan. 1989.
- [12] T. Yokouchi, Y. Suzuki, K. Nakagawa, M. Yamauchi, M. Kimura, Y. Mizutani, S. Kimura, and S. Ejima, "Thermal tuning of mechanically induced long-period fiber grating," *Appl. Opt.*, vol.44, no.24, pp.5024-5028, Aug. 2005.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Loss tunable long-period fiber gratings controlled by electromagnet	IEEE Photonics Technology Letters	2012年10月
磁力誘起長周期ファイバグレーティングの偏光特性評価	電子情報通信学会総合大会	2013年3月
再構成可能な長周期ファイバグレーティングの波長・損失制御	電子情報通信学会ファイバ応用技術研究会	2013年1月
磁力誘起による長周期ファイバグレーティングの損失・波長可変制御	Optics & Photonics Japan	2012年10月
コイルスプリングの磁化圧着による長周期ファイバグレーティングの作製と損失制御特性	電気関係学会東海支部連合大会	2012年9月
電磁石を用いた長周期ファイバグレーティングの損失可変動作	応用物理学会学術講演会	2012年9月