

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360163
 研究課題名（和文）波長分散を利用した超高速・超広帯域波長可変モード同期光ファイバレーザとその応用
 研究課題名（英文）High-speed and wideband wavelength tunable mode-locked fiber lasers using chromatic dispersion and their applications
 研究代表者
 山下 真司（YAMASHITA SHINJI）
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号 40239968

研究成果の概要：

本研究では、共振器中の分散を利用した分散チューニングにより高速かつ広帯域で波長可変な光ファイバレーザを実現した。可変帯域 178.7 nm（波長 1.5 μ m 帯）、142.8 nm（波長 1.3 μ m）および掃引速度 200 kHz が得られた。更に、構築した波長可変レーザを光ファイブグレーティングセンサに応用し、40 kHz 以上での動的な歪みを観測することに成功した。更なる改善として、波長帯の拡大と高出力化を検討し実現した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2007 年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2008 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光デバイス・集積化

1. 研究開始当初の背景

波長多重(WDM)光ファイバ通信技術の発展に伴い、スペクトル(波長軸)上での利用効率が重要視されてきており、WDM システムで用いられる帯域はどんどん広がり、またチャネル間隔はどんどん狭められてきている。また、さらに高度な光ネットワーク技術として、波長により経路制御を行う光クロスコネクタや光パケットスイッチングなども研究されており、これに対応して、光デバイスの技術も広帯域かつ高波長分解能へと進化しつつある。特にレーザ光源は高い波長安定性と広い波長可変性(チューナビリティ)を両立したものが求められ、実際に製品として提供されている。

このような広い波長可変性をもつ波長可変レーザ光源は、光ファイバ通信のみならず、光センシングや光計測においても非常に有用である。なぜならば、広い波長可変性は光センシングや光計測においては高い測定分解能を意味するからである。実際に、波長可変レーザ光源は、光デバイスの群遅延特性測定や光ファイバセンサの光源としてや、光コヒーレンストモグラフィ(Optical Coherence Tomography: OCT)と呼ばれる生体断層イメージングのための光源として用いられている。

光センシング・計測におけるもうひとつの重要なファクターは測定時間である。静止状態にあるものが測定対象である場合にはこれは大きな問題にはならないが、振動を検知

する光ファイバセンサや生体の OCT などの応用では高速な測定が求められる。これは波長可変レーザ光源にとっては、高速に波長をスキャンできることが求められる、ということの意味している。特に OCT に関しては高速かつ広帯域な波長チューニングが必要であり、ひとつの目安としては 100nm 以上の帯域を 100kHz 以上のスキャンレート (1 スキャン 10ms 以下) が求められている。このような高速・広帯域波長可変レーザ光源は、前述の波長軸上の光クロスコネクタや光パケットスイッチングなどの用途のためにも求められている。

最も一般的な波長可変レーザは、外部共振器付き半導体レーザであり、多くの企業 (アジレント、アンリツ、サンテック、など) から製品化されている。これは外部共振器を構成する回折格子 (グレーティング) により発振波長が選択され、回折格子を機械的に回転させることによりチューニングを実現している。外部共振器付き半導体レーザは、半導体レーザの広いゲイン帯域のため可変帯域は広く、典型的には 100nm 以上あるが、機械的に回転させるためにスキャンを速くすることには限界があり、せいぜいスキャン時間で 100ms 程度、スキャンレートにして数 10Hz 程度である。MEMS 技術などを利用することにより、スキャンレートを上げることができるが、それでも 1kHz 程度である。

OCT などの研究には、レーザ共振器中に高速・広帯域に可変できる光フィルタを用いた波長可変レーザ光源が利用されている。そのような光フィルタとしては、 piezoelectric 素子によりスキャンされる光ファイバフリップロー (FP) 光フィルタが挙げられる。光ファイバ FP フィルタは 2 枚のファイバミラーからなる単純な構成で、広帯域 (>200nm) な波長スキャンが可能であり、いくつかの企業 (マイクロンオプティクス、など) から製品化されている。しかしながら、この場合も機械的な掃引のため数 10kHz が限界である。これに対し、AOTF は超音波により波長可変ができる光フィルタであり、数 100kHz の高速な波長スキャンが可能であるが、帯域は 100nm 程度が限界で、また AOTF 自体が高価であり損失も大きい。この他に、回転する多面体ミラーを利用して高速・広帯域波長スキャンを実現した例もあるが、構成が複雑で小型も困難である。

2. 研究の目的

本研究では、光フィルタを必要としない超高速・超広帯域波長可変光ファイバレーザ光源を実現し、その光センシングおよび光通信応用を図ることを目的とする。波長可変の方法としては、共振器中に波長分散をもつモード同期光ファイバレーザの発振波長がモード同期周波数により可変にできる (分散チュ

ーニング) ことを利用する。申請者は、分散チューニングにより超高速・超広帯域波長可変ができることを最近見いだした。本研究では、従来からある波長可変レーザ光源では実現し得なかった波長チューニング速度と帯域を両立させることをめざす。さらに、実現した超高速・超広帯域波長可変レーザ光源を光ファイバセンサや OCT システムに応用してその優れた性能を実証してゆく。

3. 研究の方法

(1) パラメータの最適化による波長可変帯域の広帯域化とスキャンレートの高速化

レーザ共振器の種々のパラメータを変えて、分散チューニングによる波長可変帯域の広帯域化を極限まで追求した。パラメータとしては、分散を与える分散補償光ファイバ (DCF) の長さ、分散量、出力光ファイバカップラ分岐比、半導体増幅器 (SOA) 帯域幅、モード同期のための周波数、および変調の深さ、等がある。また、可変帯域が広いだけでなく、瞬時スペクトルが狭い (およそ 0.1nm 以下) ことも求められており、これについての検討も行った。

(2) 線形共振器構成波長可変レーザの検討

これまでの分散チューニングモード同期波長可変レーザは基本的にリングレーザ構成であったが、ここではより低コスト化と小型化が期待できる線形共振器構成を実現する。SOA の片端を高反射ミラーとした半導体ゲインチップが市販されており、これと分散媒質として例えば回折格子を用いることにより、超小型ながら十分な分散をもつ線形共振器構成が可能だと考えている。またこれにより、リング型では実現が難しい波長帯 (例: 800nm 帯) での波長可変レーザも実現できる。

(3) 光ファイバセンサ・OCT への応用

上記の成果を元に、分散チューニングモード同期波長可変レーザを光ファイバセンサシステムおよび OCT システムに応用した。

4. 研究成果

(1) パラメータの最適化による波長可変帯域の広帯域化とスキャンレートの高速化

図 1 に波長 1.5 μm 帯の分散を利用した波長可変ファイバレーザの実験系を示す。レーザはリング型共振器であり、全ての素子はシングルモードファイバで構成している。増幅媒質には偏波無依存型 SOA を用いている。SOA の注入電流を RF シンセサイザの電気信号で直接変調することで、アクティブモード同期を実現している。また、モード同期周波数を周波数変調することで、発振波長を掃引することが可能である。共振器中の分散は DCF により与えてあり、その分散値は約 -95ps/nm/km である。共振器中の光は、9:1

カプラを通して 10% だけ出力光として取り出される。本実験系の共振器の FSR は 650 kHz である。

モード同期周波数を 410MHz 付近において手動で変化させた場合の発振スペクトルの様子を図 2 に示す。モード同期周波数の変化量に対する発振波長の変化量は 138.1nm/MHz である。発振範囲は 178.7 nm であり、スペクトルの線幅は約 1.1 nm、光パワーは約 1.3 dBm であった。

図 3 はモード同期周波数を三角波で周波数変調することにより発振波長を掃引したときの出力で、スキャンレートが 100kHz 程度まで劣化のない高速掃引が実現できている。

また、波長 1.3 μm 帯についても同様の実験を行った。実験系は SOA などのデバイスを 1.3 μm 帯のものに代えたほかは同じである。波長可変幅 140 nm で出力約 0.78dBm、線幅 0.9 nm が得られた。動特性もほぼ同じで、100kHz 以上の高速掃引が実現できた。

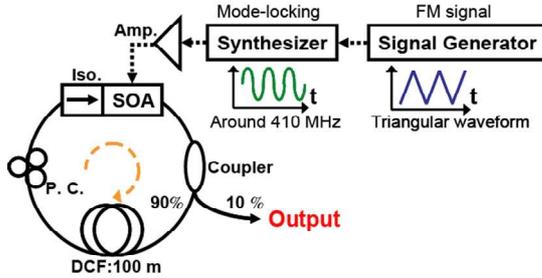


図 1 1.5 μm 帯波長可変ファイバレーザ

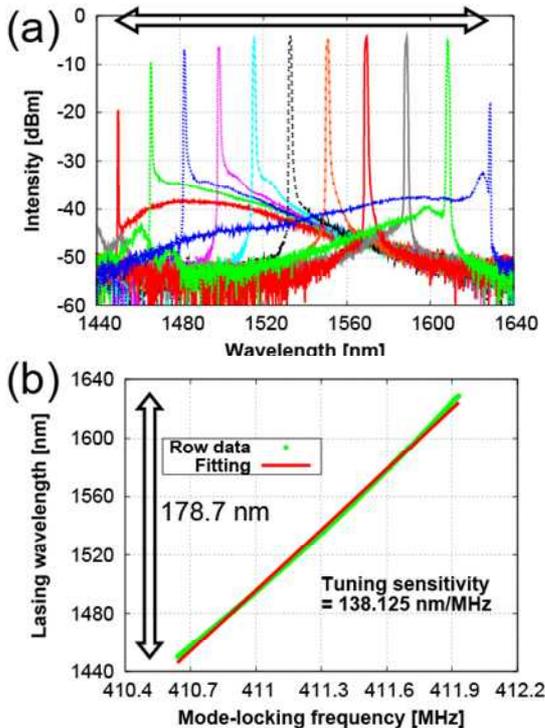


図 2 波長可変ファイバレーザの静特性

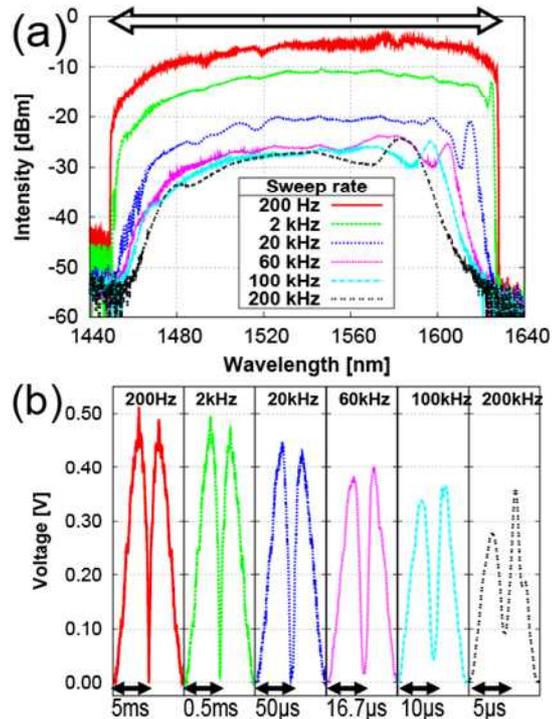


図 3 波長可変ファイバレーザの動特性

(2) 線形共振器構成波長可変レーザの検討

図 1 のようなリング型では共振器中にアイソレータが必要であるが、これを線形の共振器にすることによりアイソレータが不要となり、アイソレータが入手できない波長帯でもこの波長可変レーザを構成できる。

予備実験として波長 1.5 μm 帯の線形共振器構成波長可変光ファイバレーザを構成し、(1)と同様に高速・広帯域波長可変が可能であることを確かめた。さらに、波長 0.8 μm 帯で線形共振器構成波長可変光ファイバレーザを構成した。この波長帯で高分散光ファイバがないため特性は(1)ほど良くはないが、45nm の波長可変幅と 20kHz の掃引速度を実現することができている。

(3) 光ファイバセンサ・OCT への応用

(1)の波長 1.5 μm 帯光ファイバレーザを用いたダイナミック光ファイバグレーティング(FBG)センサを構成した。図 4 のように 4 つの FBG からなるセンサシステムを試作し、波長可変光ファイバレーザで波長を掃引することで個々の FBG のブラッグ波長変化を読み出す構成である。得られる信号の例を図 5 に示す。

図 6 は FBG の一つを静的に引っ張ったときのブラッグ波長変化を示す。引っ張りと波長変化はほぼ比例していることがわかる。図 7 は動的な振動を加えたときの例で、150Hz の振動でも追従できていることがわかる。

また、OCT についても基礎的な検討を行った。カバーガラスを対象とすることで、その断層画像取得に成功している。

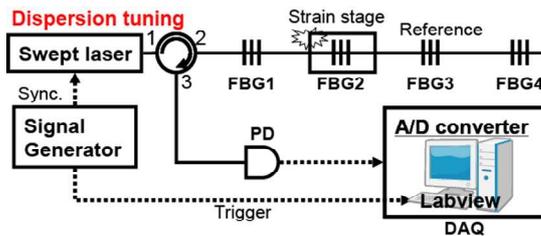


図 4 FBG センサシステム

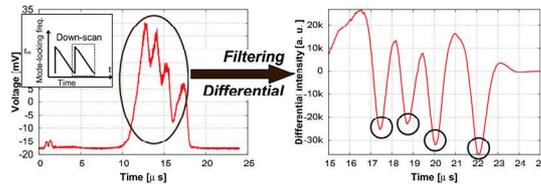


図 5 FBG センサ信号

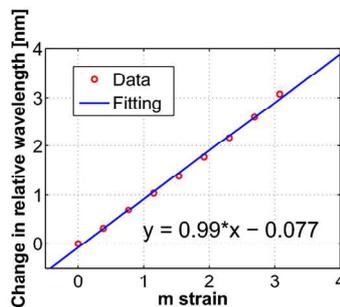


図 6 FBG センサの静特性

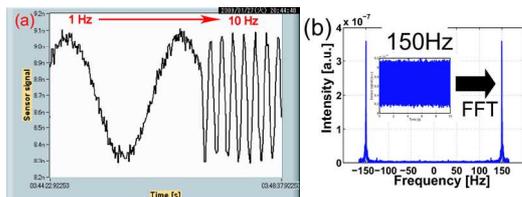


図 7 FBG センサの動特性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 3 件)

- [1] S. Yamashita, Y. Nakazaki, R. Konishi, and O. Kusakari, "Wide and fast wavelength swept fiber laser based on dispersion tuning for dynamic sensing (invited)," Journal of Sensors, A Special Issue on Fiber and Integrated Waveguide-Based Optical Sensors, to be published.
- [2] Y. Nakazaki and S. Yamashita, "Fast and wide tuning range wavelength swept fiber laser based on dispersion tuning and its application to dynamic FBG sensing," Optics Express, vol.17, no.10, pp.8310-8318, May 2009.

- [3] S. Yamashita and M. Asano, "Wide and fast wavelength-tunable mode-locked fiber laser based on dispersion tuning," Optics Express, vol.14, no.20, pp.9299-9306, Oct. 2006.

(学会発表)(計 11 件)

- [1] Y. Nakazaki and S. Yamashita, "Wide and fast wavelength-tunable mode-locked fiber lasers based on dispersion tuning at 1.5μm and 1.3μm bands," Optical Fiber Communication Conference (OFC 2009), no.OWB2, March 2009.
- [2] 中崎裕一, 山下真司, "OCT 光源用高速・広帯域分散チューニング波長可変ファイバレーザ," 電子情報通信学会 2009 年総合大会, no.C-4-1, Mar. 2009.
- [3] 中崎裕一, 山下真司, "分散チューニング波長可変ファイバレーザの広帯域化・高速化," 第 42 回光波センシング技術研究会講演会, no.14, Dec. 2008.
- [4] 小西諒生, 山下真司, "直線型共振器を用いた 800nm 帯における広帯域・高速波長可変モード同期ファイバレーザ," 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会(OPE), Nov. 2008.
- [5] Y. Nakazaki, S. Yamashita, K. Hsu, "Wide and fast wavelength-swept mode-locked fiber laser based on dispersion tuning and its application to dynamic FBG sensing," Int. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS2008), no.7004-123, Apr. 2008.
- [6] 中崎裕一, 山下真司, "共振器中の分散を利用した高速・広帯域波長可変モード同期ファイバレーザの FBG センサ応用," 電子情報通信学会 2008 年総合大会, no.C-4-35, Mar. 2008.
- [7] 草刈修, 山下真司, "光ファイバ増幅器と強度変調器を用いた高速広帯域波長可変モード同期レーザ," 電子情報通信学会 2008 年総合大会, no.C-4-32, Mar. 2008.
- [8] 中崎裕一, 山下真司, "共振器中の分散を利用した高速・広帯域波長可変モード同期ファイバレーザの FBG センサへの応用," 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会(OPE), no. OPE2007-188, Mar. 2008.
- [9] R. Konishi, S. Yamashita, and K. Hsu, "Widely and fast wavelength-tunable mode-locked linear cavity fiber laser," Micro-Optics Conference (MOC '07), no.L7, Oct. 2007.
- [10] 小西諒生, 山下真司, Kevin Hsu, "直線型共振器を用いた広帯域・高速波長可

変モード同期ファイバレーザ,” 2007
年電子情報通信学会ソサイエティ大会,
no.C 4-4, Sept. 2007.

- [11] M. Asano, S. Yamashita, and K. Hsu,
“Widely and fast wavelength-tunable
mode-locked fiber laser at 1.55µm
region using intracavity
dispersion,” Conference on Lasers
and Electro Optics (CLEO 2006),
no.CWD3, May 2006.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 真司 (YAMASHITA SHINJI)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 40239968

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

保立 和夫 (HOTATE KAZUO)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 60126159
何 祖源 (HE ZUYUAN)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 70322047