

# ファイバグレーティングの反射波長制御と外部共振器型半導体レーザーへの応用

柿沼 智志\*・三上 修\*\*\*\*・大貫 紳一\*\*・斎藤 崇記\*\*・衣川 茂\*\*・高幣謙一郎\*\*・伊藤 晃宏\*\*\*

\*東海大学電子情報学部 〒259-1292 平塚市北金目 1117

\*\*アンリツ株式会社 〒243-0032 厚木市恩名 1800

\*\*\*パイロットプレジジョン株式会社 〒254-0013 平塚市田村 1667

## Reflection Wavelength Control of Fiber Grating and Its Application to External Cavity Laser Diode

Satoshi KAKINUMA\*, Osamu MIKAMI\*, Shinichi OHNUKI\*\*, Takanori SAITOH\*\*, Shigeru KINUGAWA\*\*, Kenichiro TAKAHEI\*\* and Teruhiro ITOH\*\*\*

\*School of Information Technology and Electronics, Tokai University, 1117, Kitakaname, Hiratsuka 259-1292

\*\*Laboratory, Anritsu Co., Ltd., 1800, Onna, Atsugi 243-0032

\*\*\*Pilot Precision Co., Ltd., 1667, Tamura, Hiratsuka 254-0013

We have fabricated a fiber grating external cavity laser diode (FG-LD) emitting at  $1.55\ \mu\text{m}$  composed of a fiber Bragg grating (FBG) and a Fabry-Perot laser diode and studied on the emitting wavelength control. The fabricated FG-LD was equipped with two PZT actuators to induce tensile strain into the FBG. The emitting wavelength of the FG-LD was monitored through a  $\text{C}_2\text{H}_2$  gas cell. For pre-tuning of the emitting wavelength, the FBG was pulled by the PZT actuators to make the Bragg wavelength nearer to the  $\text{C}_2\text{H}_2$  absorption line. Then fine tuning of the wavelength was achieved by adjusting the LD injection current. By combination of these tunings, it was shown that the precise control of the emitting wavelength of FG-LD could be accomplished.

**Key words:** WDM (wavelength division multiplexing), FBG (fiber bragg grating), FG-LD (fiber grating external cavity laser diode), PZT actuator,  $\text{C}_2\text{H}_2$  absorption line, LD injection current

### 1. はじめに

近年の高度情報化社会の進展に伴い、通信需要が急速に増加してきた。現在この改善のために高速・大容量な通信技術を必要としている。その実現のために、波長分割多重(WDM)通信の開発が盛んに行われている。WDM通信は光信号を複数の異なる波長にのせて、それらを合波して多重化することで高速・大容量通信を行う技術である。外部共振器型半導体レーザーは、波長安定性および制御性にすぐれているためにWDM通信への応用が期待され、またWDM通信以外の他の波長域においても、分光や計測等への応用も可能である。WDM通信は波長ごとに情報

を配列するために、高精度な波長を有する高安定な光源が必要とされている。本研究は、ファイバグレーティングを外部共振器として用いた半導体レーザー(FG-LD)の波長安定化を目的としている。そこで多くの研究機関では、LDへの注入電流のみでFG-LDの発振波長制御を行っていた。今回の研究では、PZT (piezoelectric transducer)による伸張ひずみ印加とLDへの注入電流の2段階制御を行う点が新しい試みである。

まず、ファイバグレーティング(FBG)とファブリー・ペローレーザーを組み合わせたFG-LD<sup>1)</sup>を作製し、FG-LDのFBG部にPZTアクチュエーターを用いて伸張ひ

\*\*\*\*E-mail: mikami@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

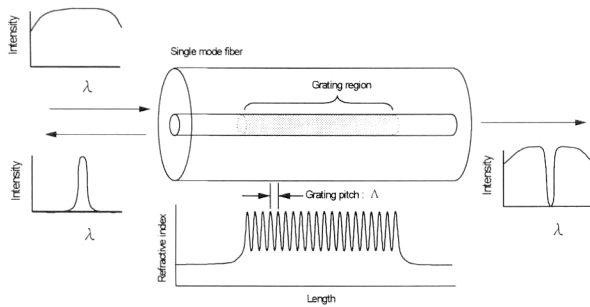


Fig. 1 Basic structure of fiber Bragg grating.

ずみ印加を行い発振波長変化を測定するとともに、アセチレンガスセルを用いてさらに高精度な発振波長制御を試みた。

## 2. FBG の構造

ゲルマニウム (Ge) が添加されたファイバーのコア部分に紫外線を照射すると屈折率が増加することが知られている。FBGはこの現象を利用し、ファイバーの紫外光誘起屈折率変化によってファイバーのコア中に形成される屈折率の周期的変化である。Fig. 1にFBGの基本構造を示す。入射した光は、グレーティングのブラッグ回折格子部分で、実効屈折率  $n_{\text{eff}}$  とグレーティングピッチ  $\Lambda$  のパラメーターに対応したブラッグ反射波長  $\lambda_B$  の光のみを選択的に反射する。このときのブラッグ反射波長  $\lambda_B$  は、

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

となる。反射した光の波長は非常に狭帯域であり、それ以外の光は透過光としてグレーティング部を通過する。

## 3. FBG の反射波長制御

FBGの反射波長は式(1)のように実効屈折率  $n_{\text{eff}}$  とグレーティングピッチ  $\Lambda$  の積の2倍によって決定される。FBGに熱や応力を加えることで  $n_{\text{eff}}$  や  $\Lambda$  を変化させることができる<sup>2,3)</sup>。ここでは熱を用いた方法と伸張ひずみを用いた方法のそれぞれについて実験的検討を行った。

### 3.1 マイクロヒーターを用いた波長制御

FBGへの熱印加方法としてマイクロヒーターを用いて波長制御を行った。今までの熱印加法としては、電気抵抗体のジュール熱を用いた方法などがあったが<sup>4,5)</sup>、マイクロヒーター方式を採用することにより熱容量が少なくなるため、より高速な温度変化が期待される。Fig. 2にマイクロヒーター(ニクロム線)を巻きつけたFBGの模式図を示す。FBGは一次被覆の状態、初期の反射中心波長 1546.256 nm、反射率は99.9%以上のものを用いた。FBGには直径70  $\mu\text{m}$ のニクロム線を60回巻き、巻きつけた部分の長さは25 mm、抵抗値は85.6  $\Omega$ となった。

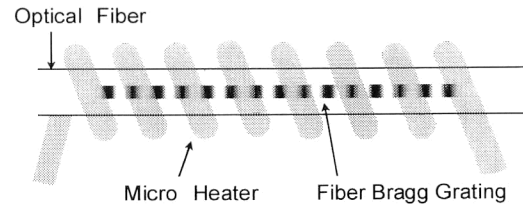


Fig. 2 Schematic structure of micro heater.

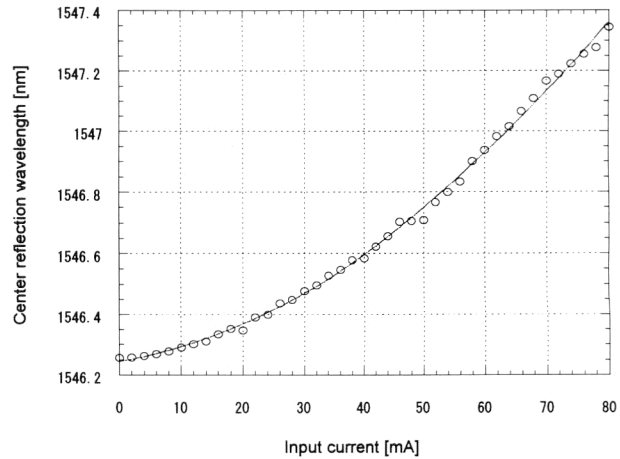


Fig. 3 Center reflection wavelength vs. input current to the micro heater.

次に、マイクロヒーターを巻きつけたファイバグレーティングの反射波長変化を測定した。Fig. 3に印加電流に対するFBGの反射中心波長を示す。0~80 mAの電流を印加し、1.1 nmの反射中心波長変化を得た。波長変化は温度に正比例して変化することが実験的に証明されているが、マイクロヒーターによる熱印加の場合、ヒーター温度が印加電流の2乗に比例することから、波長変化は二次曲線状になる。

### 3.2 電動微動台を用いた波長制御

次にFBGへの伸張ひずみ印加法として、電気パルス制御の超微動ステージを用いた。この方法の特徴としては、電氣的制御や精密制御が可能なが挙げられる。分解能は1パルス印加につき移動距離1  $\mu\text{m}$ である。Fig. 4に実験系を示す。FBGを含むファイバーの片端をエポキシ接着剤を用いて固定し、もう一方は微動ステージに同様に固定した。固定点間の距離は23 mmとした。FBGは詳細な特性をみるために一次被覆なしのものを用いた。このとき、FBGの初期の反射中心波長は1546.12 nmである。

実験では、FBGの波長変化を繰り返し行うことができることを確認するために波長変化を10回繰り返し行った。ファイバーが弛んだ状態から微動台を移動し、反射波長に変化が現れたところをゼロ点とし、最高39パルスまで微動台の移動を行った。Fig. 5にパルス印加に対するFBG

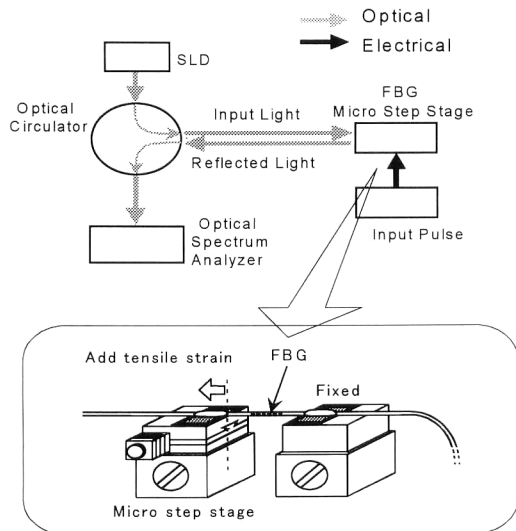


Fig. 4 Experimental setup of reflection wavelength control of the fiber Bragg grating using a micro step stage.

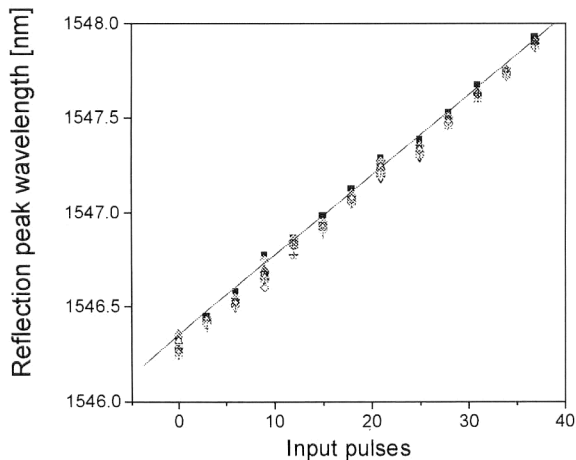


Fig. 5 Center reflection wavelength of the fiber Bragg grating vs. input pulses to the micro step stage.

の反射中心波長の変化を示す。微動ステージを移動することで反射中心波長はパルス数と比例して長波長側にシフトする。ファイバーの伸び  $1 \mu\text{m}$  (1パルス) に対する平均波長変化量は  $0.044 \text{ nm}$  であった。

#### 4. FG-LD への応用

##### 4.1 構造

今回筆者らは FBG を外部共振器に用いた FG-LD を作製した。Fig. 6 に FG-LD の構造を示す。FG-LD は片面無反射コーティング付きのファブリー・ペローレーザーと低反射率 (90%) の FBG を組み合わせて作製されたものである。DFB や DBR レーザーと同様の単一縦モードレーザーの動作が可能である。今回使用した FBG の全長は約  $10 \text{ mm}$ 、最大屈折率変調  $\sim 10^{-4}$ 、FWHM  $0.3 \text{ nm}$  のもの

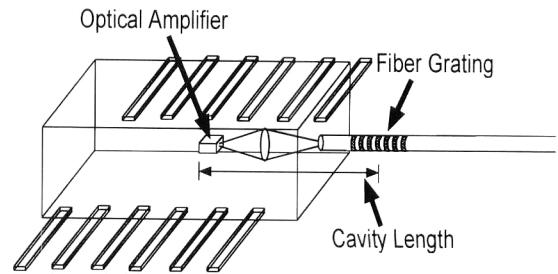


Fig. 6 Structure of fiber grating external cavity laser diode.

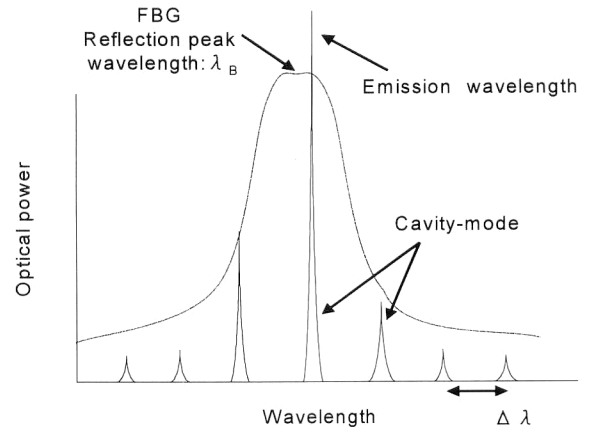


Fig. 7 Emission principle of the fiber grating external cavity laser diode.

である。通信用光源として利用されている DFB-LD は、変調や温度変化をさせても常に単一モード発振し、温度特性もよく、発振波長のモードホップ現象も起こることが少ない。システム応用では、小型、簡便性等を求められており、光通信用光源としてよく用いられている。これに対し FG-LD は変調や温度変化をさせると多モード発振や、モードホップ現象が発生してしまう。さらに、共振器長が長いことから高速変調には不適である。しかし有利な点として、非常に狭帯域な発振特性を有していることや、LD と FBG が独立位置にあることから、個別に制御可能であることが挙げられる。

FG-LD では、反射器が FBG であることにより、共振器内で増幅されるモードが FBG 反射スペクトルにより制限され、FBG 中心波長付近以外の縦モードを抑圧する<sup>6)</sup>。Fig. 7 に FG-LD の発振原理図を示す。いま、ファブリー・ペロー共振モード間隔を  $\Delta\lambda$  と置くと、

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2nL} \quad (2)$$

で示される。また FBG のブラッグ反射波長  $\lambda_B$  は式(1)のようになる。FBG 温度制御や LD 温度制御、FBG への伸張ひずみ印加によって  $\Delta\lambda$  と  $\lambda_B$  のパラメーターが変化することにより、FG-LD が発振する。

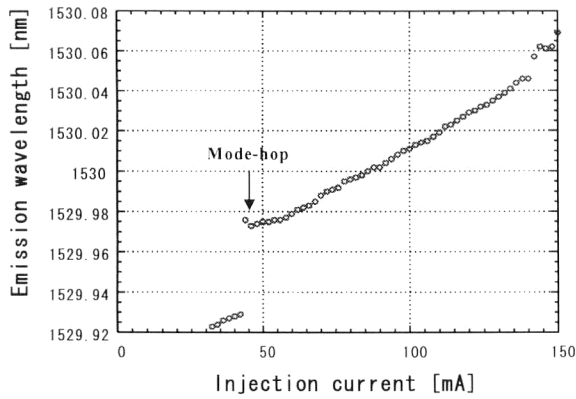


Fig. 8 Emission wavelength vs. injection current of the fiber grating external cavity laser diode.

#### 4.2 FG-LDの注入電流による波長制御

Fig. 8に注入電流に対する発振波長の変化を示す。0~150 mAまで電流を印加し0.16 nmの波長変化を得た。そしてこのときの波長変化率は0.87 pm/mAであった。印加電流40~50 mA付近でモードホップ現象がみられ、約0.05 nm変化した。今回使用したFG-LDのモード間隔は0.05 nm (6.2 GHz)であることから、発振している共振器モードは、1つ長波長側のモードに移動した。

#### 4.3 PZT駆動FG-LDの発振波長制御

FG-LDのFBG部に伸張ひずみ印加を行うための構造をFig. 9に示す。今回、FG-LDのFBG部に伸張ひずみを印加する方法としてPZTアクチュエーターを使用した。PZTアクチュエーターは積層圧電素子であり、電圧を印加することによって素子長が伸縮するという特徴を持っている。PZTアクチュエーターは縦10 mm、横10 mm、奥行き20 mmの大きさであり、ファイバーの長手方向に伸張する。伸張ひずみを印加することにより、FBGのブラッグ反射波長が長波長側にシフトする。FG-LDはFBGのブラッグ反射波長に対応した発振をするために、FG-LDの発振波長を変化させることができる<sup>7)</sup>。

次に、このPZT駆動型FG-LDを用いた発振波長制御の測定を行った。測定の際、LD温度25°C、LDへの注入電流60 mA一定とした。Fig. 10はPZTアクチュエーターに電圧を0~75 Vまで印加したときの発振波長変化と、同時に測定したブラッグ反射波長変化である。単一モード発振を維持しながら、発振波長は長波長側にシフトした。そして20 V、40 V、60 V付近でモードホップ現象がみられた。発振波長変化において最大波長変化量は0.8 nm、モードホップを含んだ波長変化率は0.011 nm/Vとなり、また1モード当たりの波長変化率は0.0049 nm/Vとなった。PZTアクチュエーターに電圧を0~75 Vまで印加し

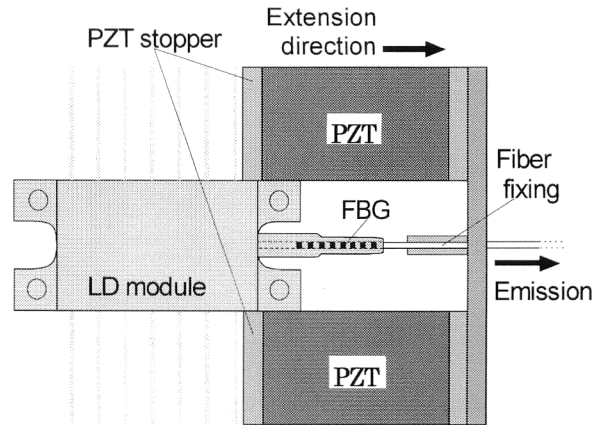


Fig. 9 Structure of PZT-driven fiber grating external cavity laser diode.

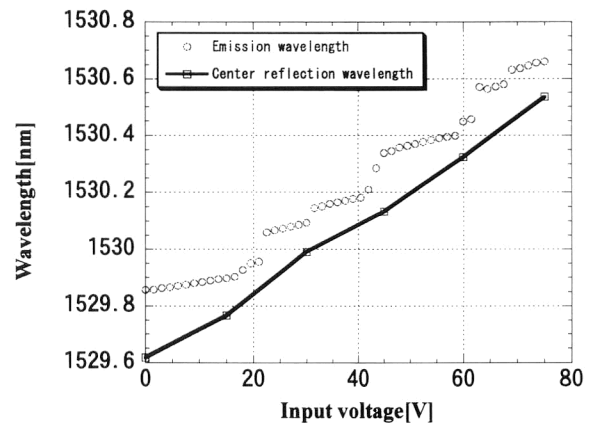


Fig. 10 Emission wavelength and fiber Bragg wavelength vs. PZT input voltage.

たときの反射波長変化率は0.012 nm/Vとなった。

#### 4.4 アセチレングラスセルを利用した高精度発振波長制御

本研究は、PZTによる伸張ひずみ印加とLDへの注入電流の2段階制御を行う点新しい試みである。より高精度な発振波長制御を行うには、波長基準への初期整合と波長補正の2種類の制御が必要となる。PZTによる伸張ひずみ印加では0.8 nmと大きく可変できるが、高速変調には適さないため波長基準への初期整合に適している。そして従来から用いられてきた波長制御方法である、LDへの注入電流を波長補正に採用し、この2段階の制御を行うことにより発振波長の安定化を容易に行うことができる。

まずここでは波長基準について検討した。LDの微小な波長のゆらぎを補正するための波長基準であることから、外部環境の影響を受けにくい、高安定なものが必要である。これには気体原子や分子の吸収スペクトルが有望である。本研究で用いるLDの発振波長や1.5 μm帯に吸収スペクトルを有する気体分子はCO<sub>2</sub>、CO、H<sub>2</sub>O、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>等

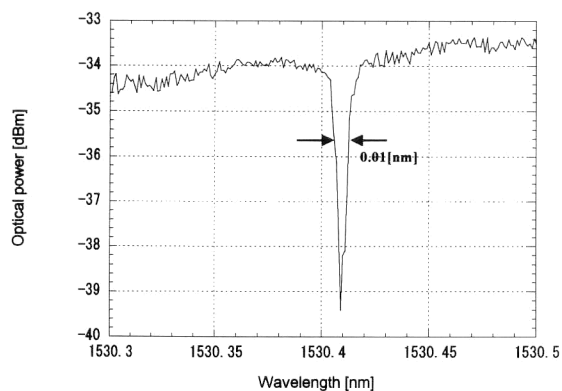


Fig. 11 Measured  $C_2H_2$  absorption spectrum.

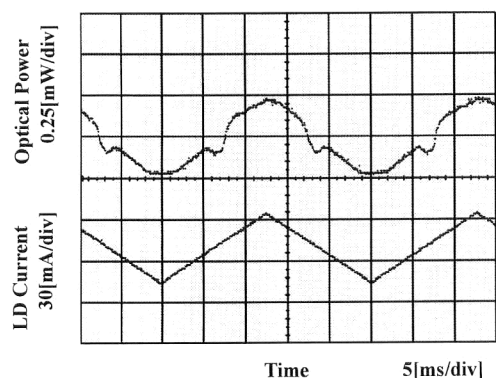


Fig. 12 Measured  $C_2H_2$  absorption line.

がある。この中で吸収が最も大きいのはアセチレン ( $C_2H_2$ ) である。よってスペクトルの位置や吸収強度の関係から、 $C_2H_2$  が適していることがわかる。 $C_2H_2$  を用いた波長制御は、LD の周波数変動が 200 MHz からフィードバック処理を施すことによりほぼゼロに抑えられていることが確認されている<sup>8-10)</sup>。このことから一般適用可能であり精度もよいと考えられる。

次に、実際のアセチレンガスに光を通過させることで吸収線の位置確認をした。測定法として波長可変レーザーを用いて 0.001 nm ずつ波長を移動させ、光強度を読み取ることで吸収線の測定を行った。アセチレンガスは筒状のガラス管に封入されており、光の伝搬方向に奥行きが 40 mm の長さとなっている。このときのガス圧は約 20 torr とした。Fig. 11 に観測されたアセチレン吸収スペクトルを示す。観測値より、波長 1530.41 nm の吸収線が最も吸収が大きいことを確認し、同時に吸収線幅は約 0.01 nm、吸収量は 5.4 dB となった。

次に、PZT 駆動型 FG-LD から発振した光よりアセチレンガス吸収線の検知実験を行った。PZT 駆動型 FG-LD からの光をコリメーターレンズを用いてアセチレン内を伝搬させ、その光吸収量から伝搬している光の波長を割り出

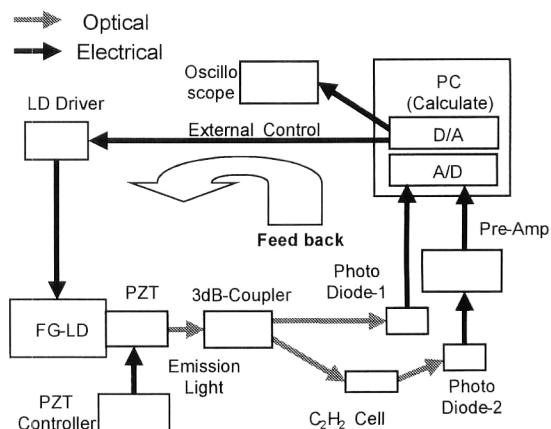


Fig. 13 Experimental setup of high precise control of the emission wavelength using PZT-driven fiber grating external cavity laser diode.

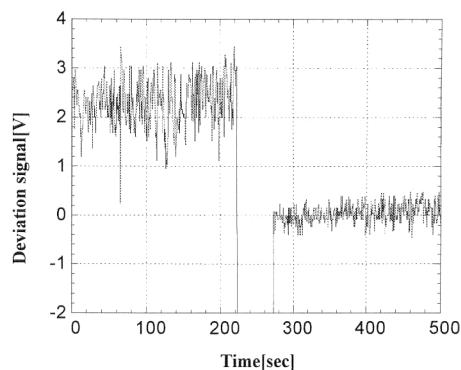


Fig. 14 Measured deviation signal.

すことができる。光吸収量の大きな 1530.41 nm の吸収線を用いた。第一段階として PZT 駆動型 FG-LD 発振波長の初期整合を行った。PZT コントローラーによって FBG 部のブラッグ反射波長を調節し、アセチレンガスセルの最も大きい吸収線である波長 1530.41 nm よりやや短波長側にくるように調節した。次に波長変化によって吸収線が観測できることを示すため、LD への注入電流を 50~100 mA と変化させることで波長を長波長側へ移動させた。注入電流の変化は、LD ドライバーの外部制御ポートを用いており、ファンクションジェネレーターによって作り出した三角波を LD ドライバーに印加し、これを基本信号としてゲインを調節することで、50~100 mA の振幅をもった信号を作り出して LD へ印加した。Fig. 12 に観測したオシロスコープ波形を示す。上の波形が検出されたアセチレンガス吸収線で、下の波形が 50~100 mA までの印加電流である。注入電流の増減に対応して光強度が変化していることがわかる。光強度が減少する部分が検出されたアセチレン吸収線である。

次にフィードバック信号処理を行った。Fig. 13 にフィ

ードバック信号処理の実験系を示す。信号処理は、A/D、D/A 機能を付加したパーソナルコンピュータ (PC) を用いた。PC の D/A 変換部より出た制御信号が LD ドライバーに入り、注入電流に変換される。PZT 駆動型 FG-LD から発振した光は、3 dB カップラーを介して片方はフォトダイオード (PD) 1 に、もう片方はアセチレンガスセルを透過して PD2 に入力される。そして PC で A/D 変換された信号は比較され、アセチレン吸収線に対し波長がずれた場合の PD1 と PD2 の出力差が偏差信号となる。この信号をもとに LD へ印加する注入電流の補正信号を計算し、D/A 変換部から出力される。このようにしてフィードバックを行った。また今回、波長補正前と補正後の偏差信号が観測できるように、D/A 変換部から出た信号をオシロスコープによって観測した。

Fig. 14 に、オシロスコープによって観測した PZT 駆動型 FG-LD の波長補正前と補正後の偏差信号を示す。左の補正前に比べ、右の補正後のほうが偏差信号が減衰していることがわかる。このことから、PZT 駆動型 FG-LD の発振波長を安定させることができることを確認できた。

## 5. 結 論

近年の情報通信需要の増加に伴い、現在よりも高速大容量な通信が求められている。そこで期待されているものが WDM 通信である。WDM 通信の波長は高精度のものが要求され、光源は高安定なものが必要とされている。今回筆者らは熱、伸張ひずみそれぞれの手法で FBG の反射波長制御を行い、その諸特性を確認した。そして FBG を用いて PZT 駆動 FG-LD を作製し、PZT アクチュエーターを用いて FBG 部に伸張ひずみ印加を行い発振波長変化を確認した。そして、この特性を踏まえて PZT 駆動 FG-LD の高精度な発振波長制御を行った。波長基準にはアセチレンガス吸収線を用いた。初期整合については、FBG 部に PZT アクチュエーターによる伸張ひずみを印加する

方法を用い、波長補正については LD へ印加する注入電流の制御によって行った。この結果、PZT 駆動型 FG-LD の発振波長を安定させることができることを確認した。

実験を進めるにあたりご協力いただいた、大学院生宇野弘幸氏 (現在、日本コロムビア株式会社) に感謝いたします。

## 文 献

- 1) 山田和則, 三上 修: “ファイバグレーティングを用いた簡易外部共振器型レーザー”, 応用物理学会秋季大会, 3a-ZC-10 (1997).
- 2) 山田和則, 柴野 敦, 福本裕一, 三上 修: “光ファイバグレーティングのジュール熱を用いた光スイッチング”, 電子情報通信学会技術研究報告, OPE96-127 (1996).
- 3) 山田和則, 柴野 敦, 福本裕一, 三上 修: “ジュール熱によるファイバグレーティング光スイッチング”, 電子情報通信学会論文誌, **J80-C-I** (1997) 292-293.
- 4) 小向哲郎, 山本貴司, 今井健之, 中沢正隆: “高品質ファイバグレーティングの作製とその波長チューニング”, 電子情報通信学会論文誌, **J-79-C-I** (1996) 413-419.
- 5) 立川吉明, 長岡新二, 鈴木与志雄, 上西祐司: “チューナブルファイバグレーティングフィルタの構成法”, 電子情報通信学会総合大会, C-3-43 (1997).
- 6) 浜川篤志, 加藤隆志, 茂原政一, 佐々木吾朗: “波長多重ファイバグレーティング外部共振器レーザーアレイ”, 電子情報通信学会総合大会, C-3-153 (1997).
- 7) 柿沼智志, 宇野弘幸, 三上 修, 大貫紳一, 斎藤崇記, 伊藤晃宏: “PZT 駆動ファイバグレーティング外部共振器型半導体レーザー”, 応用物理学会春季大会, 30p-N-15 (2000).
- 8) S. Sudo, Y. Sakai, H. Yasaka and T. Ikegami: “Frequency-stabilized DFB laser module using 1.53159  $\mu\text{m}$  absorption line of  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **1** (1989) 281-284.
- 9) S. Sudo, Y. Sakai, H. Yasaka and T. Ikegami: “Frequency stabilization of 1.55  $\mu\text{m}$  DFB laser diode using vibrational-rotational absorption of  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  molecules,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **1** (1989) 392-394.
- 10) Y. Sakai, S. Sudo and T. Ikegami: “Frequency stabilization of laser diode using 1.51-1.55  $\mu\text{m}$  absorption lines of  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  and  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ ,” *IEEE Quantum Electron.*, **28** (1992) 75-81.