

## 〔研究〕

# 周波数シフト帰還型半導体レーザー

## Frequency-Shifted Feedback Laser Diode

吉澤明男 土田英実  
A. YOSHIZAWA H. TSUCHIDA

A laser cavity closed by an acousto-optic modulator is known as a frequency-shifted feedback laser, which uses the frequency-shifted first-order diffracted beam as a feedback to the gain medium for laser oscillation. We have developed such a laser with an external cavity laser diode, and confirmed the existence of frequency chirping axial cavity modes in the laser oscillation. Furthermore, the demonstration of displacement measurement using the laser as a frequency chirping light source is presented with a resolution of the order of millimeter

### §1 はじめに

周波数シフト帰還型レーザーは音響光学変調器を共振器内に挿入して周波数シフトした1次回折光を利得媒質に帰還するレーザーである。当初、1次回折光帰還は色素レーザーの電氣的波長同調に用いられ、共振器内周波数シフトによるチャープコム発生が発振スペクトル理論解析過程で予言された<sup>1)</sup>。このとき、チャープ率は周波数シフト量と共振器フリースペクトラルレンジに依存した。S.Balleらは共振器フリースペクトラルレンジに対して周波数シフト量が非常に小さな条件で色素レーザーを構成してチャープコムを観測することに成功した<sup>2)</sup>。これに対して、我々は周波数シフト量が共振器フリースペクトラルレンジを超えるような場合にもチャープコムが発生することを実験で確認した<sup>3)</sup>。更に、K.NakamuraらはNd:YVO<sub>4</sub>結晶を用いた半導体レーザー励起全固体型周波数シフト帰還型レーザーを開発し、短共振器化と周波数シフト量の増大で数百PHz/sの超高速チャープを実現した<sup>4)</sup>。広帯域・高速な周波数チャープは光リフレクトメトリーの距離分解能を改善するため、周波数シフト帰還型レーザーを利用した新しい計測技術の開発も着手されている<sup>5,6)</sup>。

本論文では、外部共振器型半導体レーザーを基本構成とした周波数シフト帰還型レーザーについて報告するが<sup>7)</sup>、半導体レーザーには

- 1) 小型化・軽量化が容易
- 2) 色素レーザー・固体レーザーと異なり励起用光源が不要
- 3) 電流注入により容易に発振

など他のレーザーと比較して多くの利点が挙げられる。そこで、我々は、周波数シフト帰還型レーザーの実用化に半導体レーザーが最適であると考えて本研究を行った。尚、本研究は平成5~10年度に実施された工業技術院特別研究「光デバイス多元評価技術の研究」の一環として行われたものである。

さて、本論文の構成は以下の通りである。§2ではチャープコム発生メカニズム、即ち、周波数シフト帰還型レーザーの動作原理について述べる。§3では周波数シフト帰還型半導体レーザーの構成、及び、チャープコム観測実験、§4では周波数シフト帰還型半導体レーザーを利用した微小変位計測について述べる<sup>6)</sup>。

KEY WORDS: 外部共振器型半導体レーザー, 音響光学変調器, 周波数シフト, 周波数チャープ, チャープコム

## §2 動作原理

### 2.1 受動共振器モデル

周波数シフト帰還型レーザーによるチャープコム発生について検討するために、Fig.1に示すような受動共振器モデルを考える。この場合、共振器長は $L$ 、共振器を構成する半透明鏡 (SM) は真空中に設置され、それぞれ  $z=0, L$  である。更に、音響光学変調器 (AOM) が  $z=z_a$  に置かれ、単一パス当たりの周波数シフト量は  $\Delta f$  である。簡単のために回折効率は1とするが、周波数シフトを受けた1次回折光のみが一巡時間  $T=2L/c$  で共振器内を循環する。そこで、 $j$  番目の縦モード瞬時周波数を  $f_j(t)$  とすれば、共振器の周波数境界条件  $f_j(t+nT)=f_j(t)+2n\Delta f$  から直ちに  $f_j(t)=f_j(0)+\gamma t$  を得る<sup>1)</sup>。但し、チャープ率は周波数シフト量  $\Delta f$  と共振器長  $L$  に依存し、 $\gamma=c\Delta f/L$  である ( $c$ : 光速)。また、周波数と微積分関係にある位相に同様な境界条件を課すことで縦モード間隔を求めることができる。詳細は省略するが、

$$\Delta F \equiv f_j - f_{j-1} = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

で与えられる縦モード間隔は音響光学変調器を除いた共振器、即ち、ファブリ - ペロー共振器のフリースペクトラルレンジに一致する<sup>7)</sup>。従って、チャープ率は周波数シフト量とファブリ - ペロー共振器のフリースペクトラルレンジの双方に依存する。一般に、周波数シフト帰還型レーザーでは利得幅が縦モード間隔より十分広いため、複数のチャープモードが同時に励振されてチャープコムが発生する。

### 2.2 共振器内周波数変化

前節で求めた瞬時周波数  $f_j(t)$  が  $z=0$  で観測されると考えれば、周波数チャープを受けた縦モードが共振器内を伝播するために

$$f_j^\pm(z, t) = f_j(0) + \gamma t \mp \frac{\gamma}{c} z \pm \Delta f u(z - z_a) \quad (2)$$

のような共振器内周波数変化が得られる。ここで、右辺最初の3項は光速  $c$  で共振器内を伝播するチャープに対応し、 $f_j(t)=f_j(0)+\gamma t$  を  $f_j(t \mp z/c)$  で置換したものである。但し、“ $\pm$ ”は $z$ 軸上の進行方向を示す。また、第4項は位置  $z=z_a$  に置かれた音響光学変調器による周

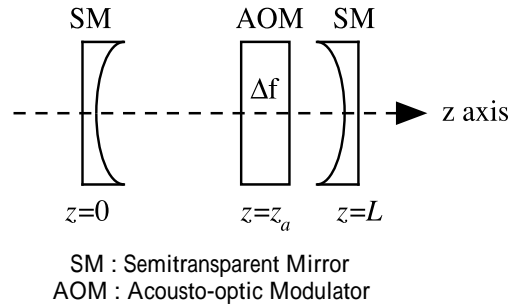


Fig.1 受動共振器モデル

波数シフトを表し、関数  $u(z)$  は  $z>0$  のとき1、他では零となるステップ関数である。左右鏡のある位置  $z=0, L$  で両進行波の周波数は一致するから、前述の通りチャープ率は  $\gamma=c\Delta f/L$  である。

第3章では、周波数シフト帰還型半導体レーザーを構成してチャープコム発生を確認するために共振器内周波数変化を測定する。

## §3 実験

### 3.1 実験方法

Fig.2に外部共振器構成による周波数シフト帰還型半導体レーザーを示す。外部共振器は半導体レーザーチップ (LD Chip) とリトロ配置の回折格子 (GM: 900本/mm) で構成されている。ここで、回折格子はレーザーチップの縦モードを制限する目的で使用され、360GHzの分解能を持つ。また、半導体レーザーチップは片面が減反射コートされ (AR: 0.5%)、他面が高反射コート (HR: 95%) されている。更に、音響光学変調器は210MHzで駆動され、ビームはセルフォックレンズ (SL) でコリメートされている。但し、共振器内周波数変化を測定するために無偏光ビームスプリッター (NBS) を外部共振器内に挿入し、相対向する光波の一部を外部に取り出した (同図 Beam1, 2)。そして、両ビームを等距離で光ファイバー結合器に入射・混合し、高速光検出器で電気信号に変換してRFスペクトラムアナライザーで周波数分析した。

さて、(2)式よりビーム1, 2には縦モード周波数

$$f_j^\pm(z_b, t) = f_j(0) + \gamma t \mp \frac{\gamma}{c} z_b \pm \Delta f u(z_b - z_a) \quad (3)$$

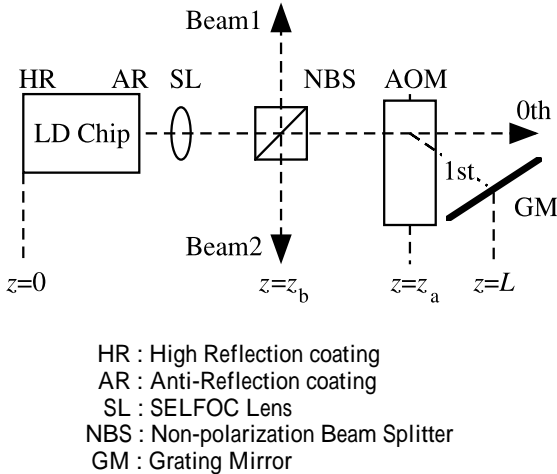


Fig. 2 周波数シフト帰還型半導体レーザー

がそれぞれ含まれている。このとき、 $i$  番目と  $j$  番目の縦モードから成るビート信号周波数は

$$f_b(z_b) = |f_i^+(z_b, t) - f_j^-(z_b, t)| \quad (4)$$

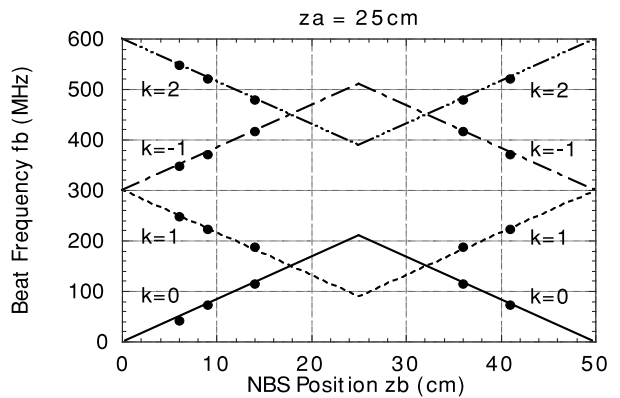
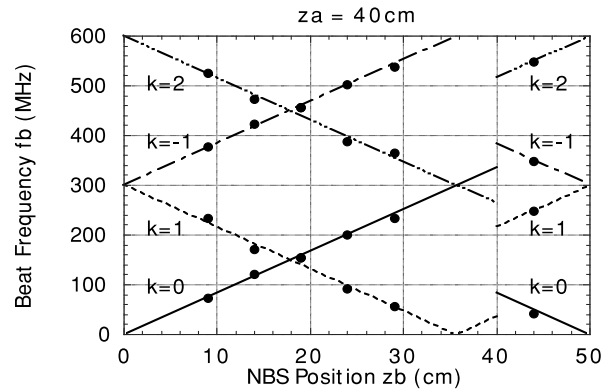
となる。但し、 $z_b$  はビームスプリッターの位置である (Fig. 2 参照)。(3) 式と  $k=i-j$  を上式に代入すれば

$$f_b(z_b) = \left| k\Delta F - 2\frac{\gamma}{c}z_b \pm 2\Delta f u(z_b - z_a) \right| \quad (5)$$

を得る。従って、共振器内に挿入したビームスプリッターを移動しながらビート周波数  $f_b(z_b)$  を測定すれば、縦モード間隔  $\Delta F$ 、チャープ率、共振器内周波数シフト  $\Delta f$  を持つチャープコムが存在を確認することができる。

### 3.2 実験結果

無偏光ビームスプリッターを共振器内で  $z_b=6\text{cm}$  から  $z_b=44\text{cm}$  まで移動してビート周波数の測定を行った。Fig.3中の黒丸(●)は実測値であり、上段は音響光学変調器の位置が  $z_a=40\text{cm}$  の場合、下段は  $z_a=25\text{cm}$  の場合である。但し、Fig.2では無偏光ビームスプリッターと音響光学変調器の位置関係が  $z_b < z_a$  となっているが、 $z_b < z_a$  とする場合には無偏光ビームスプリッターを音響光学変調器と回折格子の間に置いた。また、測定中、周波数シフト帰還型半導体レーザーの共振器長は  $L=50\text{cm}$  に固定され、音響光学変調器の周波数シ



上段:  $z_a=40\text{cm}$   
下段:  $z_a=25\text{cm}$

Fig.3 ビート周波数  $f_b(z_b)$  測定結果

フト量は  $\Delta f=210\text{MHz}$  である。これより、 $\gamma=126\text{PHz/s}$  を得るが、コム間隔は(1)式で与えられ、 $\Delta F=300\text{MHz}$  である。ここで、図中の直線(実線、点線、一点鎖線など)は、 $\Delta f=210\text{MHz}$ 、 $\gamma/c=4.2\text{MHz/cm}$ 、 $\Delta F=300\text{MHz}$  を(5)式に代入した理論値であり、それぞれ、 $k=0, \pm 1, 2$  に対応している。実測値(黒丸)と理論値は良く一致しているが、スペースの都合上、他の高次のビート周波数の測定結果は割愛する。さて、本実験結果から、周波数シフト帰還型半導体レーザーの発振時に(2)式で特徴づけられる縦モード周波数が存在していることが確認できた。

## § 4 微小変位計測

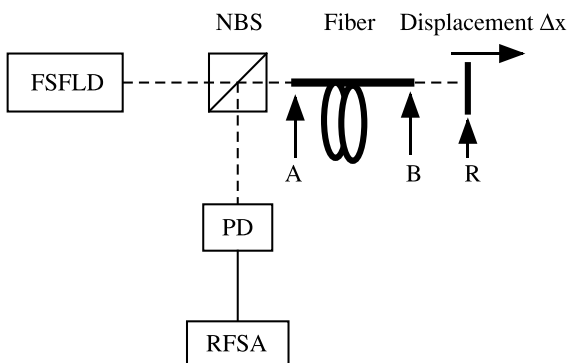
### 4.1 実験方法

本章では、周波数シフト帰還型半導体レーザーを

光源とする光応用計測の一例としてビート周波数測定による微小変位計測<sup>6)</sup>について述べる。Fig.4に実験系を示すが、周波数シフト帰還型半導体レーザー(FSFLD)の基本構成はFig.2から無偏光ビームスプリッターを除いたものである。但し、共振器長は $L=37.5\text{cm}$ に固定され、音響光学変調器の周波数シフト量は $\Delta f=187.5\text{MHz}$ である。これより、 $\gamma=150\text{PHz/s}$ を得るが、(1)式で与えられるチャープコム間隔は $\Delta F=400\text{MHz}$ である。また、遠隔計測を視野に入れて、反射体(R)を長さ $30\text{m}$ のファイバ先方に設置し、零次回折光をファイバに入射する。更に、反射体の移動に伴う微小変位を測定するために、ファイバ端面(A)と反射体(R)からの戻り光によるビート信号を光検出器(PD)とRFスペクトラムアナライザ(RFSA)で周波数分析する。但し、Rの移動 $\Delta x$ によるビート周波数変化は $f_r(\Delta x)=2\gamma\Delta x/c$ で与えられる。一般に、チャープコムによるビート測定ではコム間隔の整数倍で複数個のビート周波数が観測されるが、変化量は同一であるため任意のビート周波数を選択して測定する。また、ファイバ端面(B)とRからの戻り光によるビート信号も同時に測定されるが、ファイバ端面(B)を無反射コート処理すれば不要なビート信号は除去できる。

#### 4.2 実験結果

Fig.5に反射体(R)の移動に伴うビート周波数変化を示す。図中の黒丸(●)は実測値であり、長さ $30\text{m}$ のファイバ先方に設置した反射体を $1\text{mm}$ ステップで移動しながら測定した。また、直線は理論値であり、 $2\gamma/c=1\text{MHz/mm}$ の傾きを持っている。但し、同図に



FSFLD : Frequency-Shifted Feedback Laser Diode  
RFSA : Radio Frequency Spectrum Analyzer

Fig. 4 微小変位計測システム

は、 $\Delta x=0$ のビート周波数( $=110.4\text{MHz}$ )からの変化量 $f_r(\Delta x)$ のみが示されている。理論値と実験値の一致から、本実験の微小変位計測精度はミリメートルオーダーであることが確認できる。尚、精度向上にはチャープ率やチャープ幅の増大が必要であり、今後検討しなければならない。

#### §5 まとめ

外部共振器構成による周波数シフト帰還型半導体レーザーを開発し、共振器内周波数変化の測定によりチャープコム発振を確認した。チャープコム間隔は共振器フリースペクトラルレンジに等しく、チャープ率は周波数シフト量と共振器フリースペクトラルレンジの双方に依存した。また、周波数シフト帰還型半導体レーザーを光源とする光応用計測の一例としてビート周波数測定による微小変位計測について述べ、長さ $30\text{m}$ のファイバ先方に設置した反射体の微小変位をミリメートルオーダーの精度で測定することに成功した。最近、半導体レーザー励起全固体型周波数シフト帰還型レーザーを用いた液面計測がT.Haraらにより提案されたが<sup>8)</sup>、このような実用化を目指した研究開発が開始されたことは意義深い。一方、半導体レーザーによる周波数シフト帰還型レーザーは小型化・軽量化が容易であり操作も簡便なことから、将来、実用的な周波数シフト帰還型レーザーとして新しい計測分野を開拓するものと期待される。

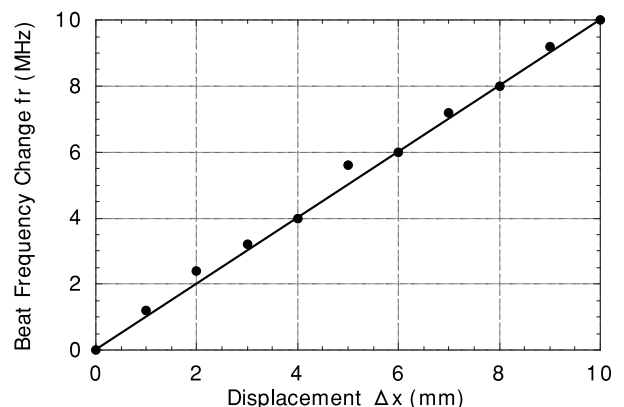


Fig. 5 ビート周波数測定結果

## 参 考 文 献

- 1) W. Streifer, "Analysis of a dye laser tuned by acousto-optic filter", *Appl. Phys.* 17 (1970) 335.
- 2) S. Balle, I M. Litter, K. Bergmann and F. V. Kowalski, "Frequency shifted feedback dye laser operating at a small shift frequency", *Opt. Commun.*, 102 (1993) 166.
- 3) A. Yoshizawa and H. Tsuchida, "Chirped-comb generation in frequency-shifted feedback laser diodes with a large frequency shift", *Opt. Commun.*, 155 (1998) 51.
- 4) K. Nakamura, F. Abe, K. Kasahara, T. Hara, S. Sato and H. Ito, "Spectral characteristics of an all solid-state frequency-shifted feedback laser", *IEEE J. Quantum Electron.*, 33 (1997) 103.
- 5) T. Miyahara, M. Osaka, T. Hara, K. Nakamura and H. Ito, "Long distance optical reflectometry with high resolution using a frequency-shifted feedback laser", *Proceedings of 19<sup>th</sup> Meeting on Lightwave Sensing Technology, LST 19-13, Japan, 1997*, 89.
- 6) A. Yoshizawa and H. Tsuchida, "Optical reflectometry using a frequency-shifted feedback laser diode", *Extended Abstracts of Optics Japan '98, 19p1D06, Japan, 1998*, 305.
- 7) A. Yoshizawa and H. Tsuchida, "Frequency-shifted feedback laser diode", *Proceedings of 23<sup>rd</sup> Meeting on Lightwave Sensing Technology, LST 23-15, Japan, 1999*, 105.
- 8) T. Hara, K. Nakamura and H. Ito, "Distance measurement to a liquid surface by using a frequency-shifted feedback laser", *Proceedings of 21<sup>st</sup> Meeting on Lightwave Sensing Technology, LST 21-10, Japan, 1998*, 61.

( 2000.3.1受付 )