

ビート周波数可変軸ゼーマンレーザーを用いたヘテロダイン・フィードバック干渉計

重岡 利孝・今西 慎悟・河田 聰

大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻 〒565 吹田市山田丘 2-1

Heterodyne-Feedback Interferometer Using Beat-Frequency-Tunable Longitudinal Zeeman Laser

Toshitaka SHIGEOKA, Shingo IMANISHI and Satoshi KAWATA

Department of Applied Physics, Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita 565

A heterodyne-feedback interferometer, in which the phase of interference fringe is locked, is developed with the use of a beat-frequency-tunable longitudinal Zeeman laser as its light source. The beat frequency of the Zeeman laser is automatically tuned to compensate the phase difference between the reference beam and the signal one in the interferometer. The maximum measurement range and the resolution can be controlled by changing the length of the reference path in the developed heterodyne feedback interferometer. Experimental results verifying the usefulness of the developed system are shown.

1. はじめに

光ヘテロダイン干渉法とは、発振周波数がわずかに異なる2つの光を用いて、その2つの光を干渉させることにより、光波に付与された情報をビート信号として取り出し、その情報を読み取る方法である。その特徴としては、①高いSN比が得られる、②高感度かつ高精度な位相検出が可能、③位相情報を取り出す場合に光源の強度のふらつきに強い、などの利点をもつ。しかし、従来のヘテロダイン干渉法では位相差が $\pi/2$ を超えるごとに測定が不連続になるという欠点もあった。この不連続を克服する方法として、リファレンス信号とリファレンス信号の位相を $\pi/4$ ずらした信号を用意し、この2つのリファレンス信号と信号光の位相を比較し、不連続を補間する方法などが工夫されている。

本論文では、ヘテロダイン干渉法において、干渉計で得られた位相情報を光源の発振周波数にフィードバックする、というまったく新しいヘテロダイン・フィードバック干渉法を提案する。干渉計の位相情報を光源にフィードバックする試みは、光源にレーザーダイオードを用い、干渉計からの位相情報をホモダイイン法により検出し、レーザーダイオードの注入電流を変化させる方法が

芳野らによって試みられているが¹⁾、本干渉法では位相差が $\pi/2$ となる測定対象の変化量（例えば距離測定の場合、測定距離）を自由に決定することを特徴とする。

提案するヘテロダイン・フィードバック干渉法は干渉計で得られた位相情報を光源の発振周波数にフィードバックするため、ビート周波数を変えることのできる光源が必要となる。我々は、光学的アライメントが簡便であり、また、そのビート周波数の帯域が電気回路での取扱いが容易であるため、実用的に用いられている軸ゼーマンレーザーを用いた。レーザー管に磁場を印加するためソレノイドコイルを用い、印加する磁場をソレノイドコイルに流れる電流を変化させることにより、ビート周波数を変えることのできるビート周波数可変軸ゼーマンレーザーを用いた。

2. ヘテロダイン・フィードバック干渉法の原理

はじめに、フィードバックループをもたない通常のヘテロダイン干渉法の原理について簡単に述べる。ヘテロダイン干渉法では、まず、周波数が異なる2つの偏光成分をもつ光源が必要である。それには、しばしばゼーマンレーザーが用いられる。最近ではAO変調素子や

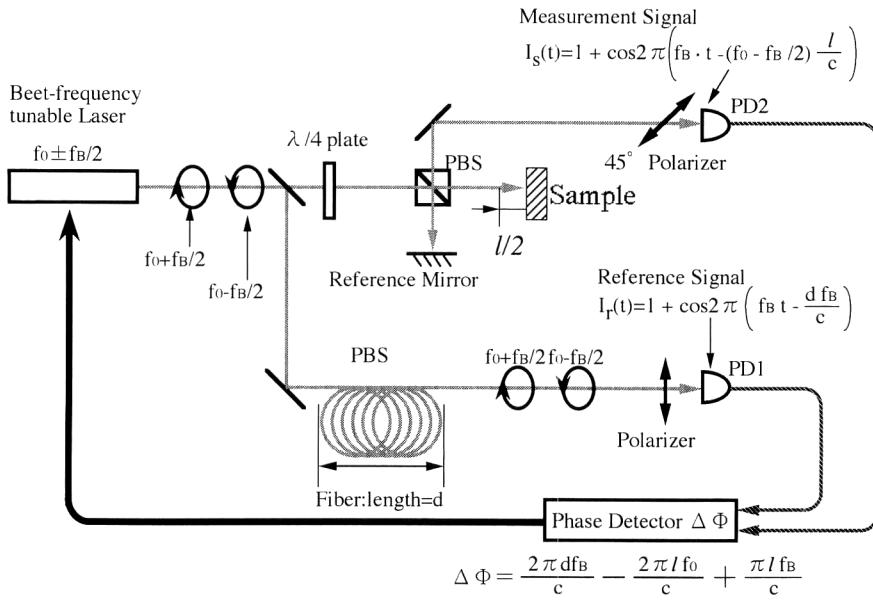


Fig. 1. Principle of heterodyne feedback interferometer.

波長掃引型の半導体レーザーを用いることもある²⁻⁵⁾。2 偏光成分のうち一方の偏光が測定対象試料に照射され、他方は参照固定光路を通る。測定偏光成分は試料によって位相変調を受け、その結果、2 偏光間に位相差が生じる。この 2 偏光は検光子で結合され、干渉信号として光電検出される。この干渉光と、あらかじめ試料に照射される前に 2 偏光成分を検光子によって結合させた参照信号光との位相差を積分測定することによって、試料による位相変調量を求める。

一方ここで提案するヘテロダイン・フィードバック干渉法では、この位相量が一定になるように位相変化を光源にフィードバックさせる。その原理図を Fig. 1 に示す。レーザー光の 2 偏光の平均発振周波数を f_0 、2 つの偏光間の発振周波数差（ビート周波数）を f_B 、2 偏光成分の通る経路の距離差を l とすると、干渉信号光強度は、

$$I_s(t) = 1 + \cos 2\pi(f_B t - (f_0 - f_B/2)l/c) \quad (1)$$

一方、参照信号は、2 偏光間に互いに距離差 l はないが、信号光経路よりファイバーの屈折率も考慮に入れた光学長 d だけ長いとすると、

$$I_r(t) = 1 + \cos 2\pi(f_B t - df_B/c) \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 c は光速を表す。

式(1)、(2)より、干渉信号と参照信号の位相差は、

$$\Delta\Phi = 2\pi(df_B/c - (f_0 - f_B/2)l/c) \quad (3)$$

で与えられる。

ここで、典型的な値として例えれば、 $f_0 = 500$ THz ($\lambda =$

600 nm), $f_B = 3$ MHz, とすると、式(3)の第 3 項は、第 2 項と比べて十分に小さいため無視することができ、

$$\Delta\Phi \approx 2\pi(df_B - f_0)/c \quad (4)$$

となる。すなわち、干渉信号と参照信号の位相差 $\Delta\Phi$ は、測定距離差 l に近似的に比例することがわかる。第 1 項についても、 $df_B \ll lf_0$ より無視することができることが多いが、 d を数百 m ほどまで十分長くすると、 df_B も考慮しなければならない。

位相差 $\Delta\Phi$ の変化量を打ち消すように、レーザーのビート周波数 f_B を変化させると、常に、 $\Delta\Phi = 0$ となり、測定長さ l は、

$$l = df_B/f_0 \quad (5)$$

で与えられる。すなわち、 $\Delta\Phi = 0$ となるようにビート周波数 f_B を変調し、その値を測定すれば、距離 l が求められる。

3. ビート周波数可変軸ゼーマンレーザー

ビート周波数 f_B を変調する方法としては、AO 变調器を用いる方法やレーザーダイオードの注入電流を変調する方法がよく知られている。これらの方に比べて、ゼーマンレーザーの印可磁場を変調する方法はビート周波数 f_B を最も大きく変調することができる。そこで、ビート周波数可変軸ゼーマンレーザーの試作を行った⁶⁻⁸⁾。

レーザーの管長方向に磁場を印加すると、レーザー媒

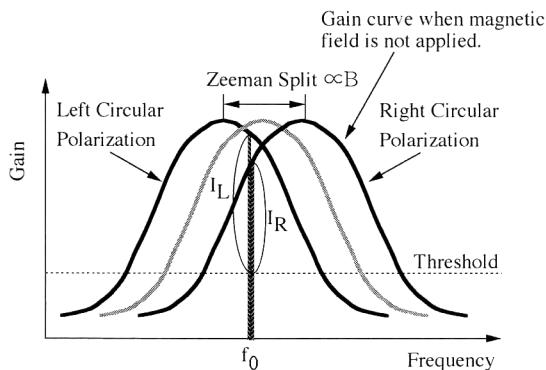


Fig. 2. The gain curve shown as a broken line is split into two curves shown as two solid lines when axial magnetic field is applied to the cavity.

質は、Fig. 2 に示すように、ゼーマン効果により吸収波長が異なる 2 つの成分にスプリットされ、レーザーの利得曲線は 2 つに分かれる⁹⁾。ここで、 I_L 及び I_R は、それぞれ左回りおよび右回りの円偏光の強度を表す。このとき、屈折率分散曲線も、Fig. 3 に示すように 2 つに分かれる。左右各円偏光に対して異なる屈折率分散曲線が存在するので、同一縦モードであっても、共振器の実効長は 2 つの偏光成分に対して異なる。そこで、2 つの左右円偏光の発振周波数差は、互いにごくわずかに異なり、2 つの左右円偏光間にビート周波数が発生する。特に利得曲線のピーク最近傍のモードに対しては Fig. 3(b) に示すように、他と比べて大きなビート周波数差を得る。

縦モードを、磁場を加えていないときの吸収中心に固定して考え、印加する磁場を次第に強くしていくと、左右円偏光の吸収中心波長の変移量は、加えられた磁場に比例することから、左右円偏光の屈折率分散曲線の吸収中心近傍の直線部分では、2 つの発振周波数は、加えられた磁場にほぼ比例する。

Fig. 4 に、実際に試作したビート周波数可変軸ゼーマンレーザーの印加電流とビート周波数の関係を測定した結果の例を示す。ソレノイドコイルに流す電流に対して、ビート周波数がほぼ直線的に変化していることがわかる。印加電流を 2.2 A から 12.2 A まで変化させることにより、ビート周波数を 0.7 MHz から 3.4 MHz まで変化させることができた。レーザー管は NEC 製の GLG 2520 縦シングルモードレーザーを用いた。縦シングルモードレーザーを用いたのは、縦多モードレーザーでは、モードごとにビート周波数が異なり、複数のビート周波数が観測されるためである。レーザー管はこのほかにもいくつか試みたが、管によってはビート信号の得

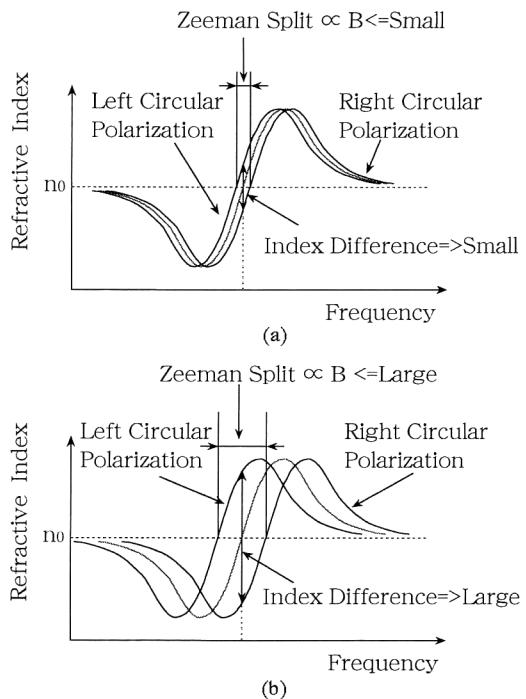


Fig. 3. Zeeman effect on the refractive-index spectra with He-Ne gas. (a) Magnetic field is small, (b) Magnetic field is large.

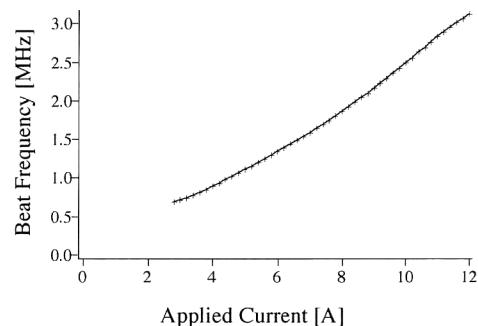


Fig. 4. Experimentally obtained relationship between the applied current to the solenoid coil for generating magnetic field and the resultant beat frequency with the tunable Zeeman laser we have developed.

られないものがあった。この理由については明らかではない。磁場はレーザー管長（約 110 mm）より長い直径 38 mm、長さ 300 mm のセラミックチューブに直径 1 mm のエナメル線を 600 回巻いたソレノイドコイルに流す電流を変調させることによって磁場の強さを制御した。また、縦モードが、周囲の温度変化によって変動するとビート周波数が変化するので、左右円偏光の強度

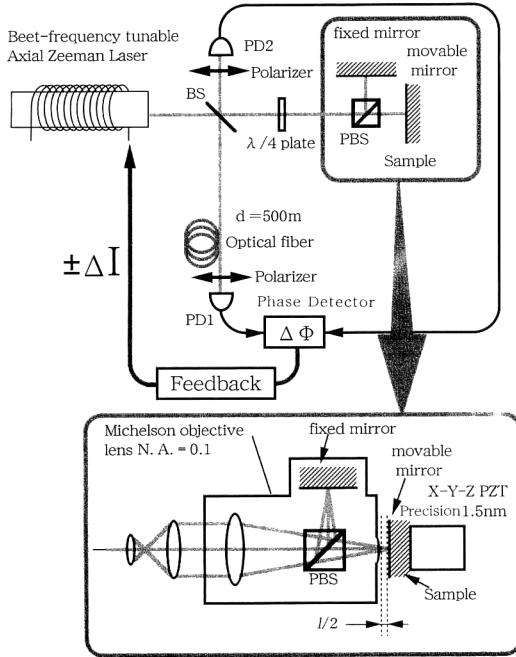


Fig. 5. Experimental set up.

(I_L, I_R) が等しくなるように温度を制御し、縦モードを磁場を印加しないときの利得分布の中央にロックした。

4. ヘテロダイン・フィードバック干渉計の実験

提案する原理に基づいた検証実験系を試作した。Fig. 5にその光学系を示す。参照光路には、光学長 $d = 500$ m の光ファイバーを設置し、参照光を透過させた。信号干渉光用光路の干渉計にはマイケルソン干渉対物を用いた。参照光および信号光用のディテクターで受けた信号は、位相比較器によって、それらの間の位相差が検出される。この位相差信号に比例させて、ソレノイドコイルに流す電流を制御する。

被測定用反射鏡は、精度 1.5 nm のピエゾ素子上に固定し、ピエゾ素子を光軸方向に走査し、移動後、 $\Delta\phi = 0$ となるように f_B をフィードバック制御するためソレノイドコイルに流れる電流を変調した。ピエゾ素子の移動量 l とビート周波数 f_B との関係の測定結果を Fig. 6 に示す。本ゼーマンレーザーのビート周波数の可変範囲は 0.7 MHz から 3.4 MHz までの 2.7 MHz であるので、これにより長さの測定範囲は、 $l = f_B d / f_0 = 2.7 \times 10^9 / (4.7 \times 10^{14}) d = 5.7 \times 10^{-6} \cdot d$ となる。実験において光学長 d が 500 m があるので、 l の測定可能範囲は、最長約 2900 nm となる。これよりピエゾ素子の駆動量とし

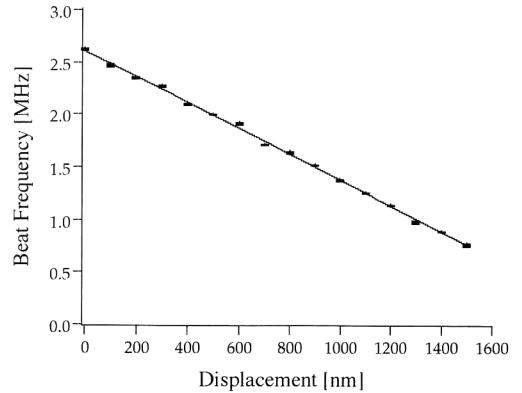


Fig. 6. Relationship between the displacement of a mirror driven by a piezo-stage and the beat frequency.

Table 1. Maximum measurement length upon fiber length.

d [m]	10	10^2	10^3	10^4
l [μm]	0.03	0.3	3	30

$$l \propto df_B, f_B \sim 1-3 \text{ MHz}, f_0 \sim 470 \text{ THz}.$$

ては、その $1/2$ の約 1450 nm が位相アンラッピングが不要な測定範囲となる。Fig. 6 では、ピエゾ素子の駆動量がほぼ 1500 nm の範囲で、フィードバック電流が直線的に増加し、この間で位相の不連続な飛びがなく測定されていることがわかる。また、測定値のはらつきがみられるが、この理由については不明であり、測定精度は今後の検討課題である。

Table 1 に、理論式から求めた、いくつかの光学長の光ファイバーを用いた場合に、位相飛びがなく測定できる l の値を示す。ファイバーの光学長 d を 10 km 程度にすると、測定可能な範囲として 30 μm もの長さを実現できることがわかる。

5. ま と め

ヘテロダイン・フィードバック干渉法という新しい方法を提案し、ビート周波数可変軸ゼーマンレーザーを用いて、実際にその装置を試作したうえでその諸特性を実験的に確認した。

今後、このヘテロダイン・フィードバック干渉法をレーザー走査顕微鏡に導入し、多波長による干渉法などを用いずに、広ダイナミックレンジでかつ高精度で表面形状を測定することができる顕微鏡の開発などを行っていく予定である。

ビート周波数可変軸ゼーマンレーザーの作成におい

て、レーザー管およびさまざまな技術情報をご提供いただいた、日本科学エンジニアリング株式会社、山田政幸氏に、また、偏光ビームスプリッターを用いたマイケルソン対物レンズをご提供いただいた、株式会社ニコン陸川克二氏に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) T. Yoshino, M. Nara, S. Mnatzakanian, B. S. Lee and T. C. Strand: "Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurements," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 892.
- 2) 高橋太一, 岩田泰彦, 高柳淳夫, 梅田倫弘: "光注入変調による半導体レーザー (LD) FM ヘテロダイイン光源", レーザー顕微鏡研究会第15回講演会論文集 (1995) p. 24.
- 3) J. Chen, Y. Ishii and K. Murata: "Heterodyne interferometry with a frequency-modulated laser diode," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 124.
- 4) 山浦 均: "ヘテロダイイン光源", O plus E, No. 150 (1992) 97.
- 5) N. Umeda, M. Tsukiji and H. Takasaki: "Stabilized ^3He - ^{20}Ne transverse Zeeman laser," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 442.
- 6) 重岡利孝, 河田 聰: "ピート周波数可変の軸ゼーマンレーザー", 1994年秋季応用物理学会予稿集 (1994) p. 791.
- 7) 今西慎悟, 重岡利孝, 河田 聰: "周波数可変の軸ゼーマンレーザー(2) - ピート波形の改善 - ", 1995年春季応用物理学学会予稿集 (1995) p. 893.
- 8) 今西慎悟, 重岡利孝, 河田 聰: "縦単一モードレーザーを用いたピート周波数可変ゼーマンレーザー", 1995年光学連合シンポジウム予稿集 (1995) p. 163.
- 9) I. Tobias, M. L. Skolnick, R. A. Wallace and T. G. Polanyi: "Derivation of a frequency-sensitive signal from a gas laser in an axial magnetic field," *Appl. Phys. Lett.*, **6** (1965) 198.