周波数可変ダイオードレーザを光源とする 位相変調ホモダイン変位計測干渉計*

— 第1報：要素技術の開発 —

石下雅史* 松浦文生** 河杉正晃*** 星野雄太† バン クォック トゥアン†† 明田川正人†††

Phase Modulation Homodyne Displacement Measuring Interferometer using Tunable Laser Diode as Light Source

— 1st Report: Development of Elementary Techniques —

Masashi ISHIGE, Fumio MATSUURA, Masaaki KAWASUGI, Yuuta HOSHINO, Tuan BANH QUOC and Masato AKETAGAWA

Since an ultra precision technology, e.g. a lithography, have been progressing rapidly, displacement measuring methods with resolution of sub-nanometer or less are required. Displacement measuring interferometers are widely utilized in precision engineering industries. However, they suffer from problems of an imperfect interpolation error of nanometer order and an air refractive index fluctuation. In this paper, we propose and discuss a displacement measurement method with no interpolation error by combining a phase modulation homodyne interferometer with a tunable laser diode and the null method. We also discuss the capability to measure the air refractive index fluctuation.

Key words: nanometer, sub-nanometer, interferometer, phase modulation, interpolation, air refractive index, null method

1. 序 論

近年、半導体製造技術を始めとするナノテクノロジーの発展により、サブナノメートル～10 ピコメートルの分解能を有する変位測定法の必要性が高まっている¹⁾。現在、長さ・変位測定用にレーザ干渉計が広く使われているが、サブナノメートル以下の分解能を達成するには、次の2個の解決すべき問題がある。

(問題1・補間誤差)：干渉計での長さ基準は光源波長であるが、波長より小さな長さを決定するための位相補間プロセスの不具合により、補間誤差を発生する²⁾。

(問題2・空気屈折率変動)：干渉計で測定できるのは光路差(=屈折率×幾何学長)変化である。例えば波長633nm領域で、光路差を0.1 mとしたとき、温度・圧力・湿度の変化をそれぞれ+1 K, +10 Pa, +1 %とすると、光路差変化にはそれぞれ94 nm, 2.7 nm, -1 nm と大きな誤差を生ずる³⁾。

この論文では、上の2個の問題を解決すべく、次の目標を掲げる。

(目標1) 補間誤差が原理的に発生しないサブナノメートル以下の分解能を有する測定方法の開発。

(目標2) 空気屈折率変動を測定する手法の開発。将来的に10⁻⁹ オーダの屈折率変動を補償することも視野に入れる。

著者らは、以前から位相変調ホモダイン干渉計⁴⁾の研究を行っている⁵⁾。この干渉計は、光路差が波長の整数倍に一致したとき出力がゼロクロスするため、このときの光路差をピコメー

トル分解能で検出することができる⁵⁾⁻⁷⁾。一方で光源の光周波数を制御測定することで長さや変位を測定するレーザ干渉測長システムの開発が行われている⁸⁾⁻¹¹⁾。これらの手法⁸⁾⁻¹¹⁾は、従来のレーザ干渉計と異なり、干渉縞の動きを測定し、それから位相補間するものではない。これらは、光源周波数を制御し、零位法を用いて特定の干渉縞にロックし、従来法で得た位相変化を、光周波数の変化に変換することにより変位の測定を行う。特定干渉縞にロックするので干渉縞の移動がないため、原理的に補間の必要がなく補間誤差は発生しない。さらに、光周波数から長さを直接決定することが原理的に可能なため、現在の波長を基準とした方法よりもトレーサビリティにおいて優位である。そこで、著者らは位相変調ホモダイン干渉計の光源に周波数可変レーザを用い、零位法を適用した変位測定システムを提案する。これまでの光周波数を制御する手法はファブリー・ペロー共振器の共鳴現象を利用しておりモードマッチングのアライメントが難しいという問題があった。それに対し、我々の方法は単純なマイケルソン干渉計を用いているのでアライメントも簡単に導入も容易となる。

空気の屈折率変動測定としては、①温度計などの環境測定器で環境変動をモニタし屈折率を算出する方法⁴⁾¹²⁾、②熱変形を無視できる極低熱膨張材料(Ultra low thermal expansion material: 以下 ULTEM)で構成された屈折率モニタ干渉計を用い、屈折率変動をドブブラ周波数変化で捉える手法¹³⁾¹⁴⁾などが挙げられる。我々は上の②とほぼ同一であるが、ULTEMを用いてマイケルソン干渉計を構成し、その干渉計光路内の屈折率変動を光源の光周波数変化として測定する手法を提案する。この手法では、リアルタイムでの屈折率変動観測が期待される。なお、同じ原理ではあるがファブリー・ペロー共振器を用いて光源の光周波数変動から空気屈折率変動を捉えた例が報告されている⁸⁾。

本論文では、位相変調ホモダイン干渉計に周波数可変レーザを用いて、①光路差変化を光周波数変化として測定する方法、②光路差変化を測定する上で必要な光路差の直接決定法、③屈

原稿受付 平成21年5月25日

* 正会員 長岡技術科学大学大学院(現、㈱ミットヨ;川崎市高津区坂戸1-20-1)

** 長岡技術科学大学大学院(現、いすゞ自動車㈱;藤沢市土棚8)

*** 長岡技術科学大学大学院(現、東レエンジニアリング㈱;大津市園山1-1-1)

† 長岡技術科学大学大学院(現、新潟富士ゼロックス製造㈱;柏崎市安田田尻工業団地7546)

†† 学生会員 長岡技術科学大学大学院(長岡市上富岡町1603-1)

††† 正会員 長岡技術科学大学(長岡市上富岡町1603-1)

折率変動測定法, などの要素技術の実験結果を示す¹¹⁾¹⁵⁾¹⁶⁾. なお, 上の②が必要な理由は, 2.3, 2.4 で後述する.

2. 測定原理と装置

2.1 位相変調ホモダイン干渉計の原理と装置⁴⁾

図1に位相変調ホモダイン干渉計の概要を示す. この干渉計は, 光源レーザ, 光の位相を変調するための電気光学変調器 (EOM), マイケルソン干渉計を構成するための偏光ビームスプリッタ (PBS), 1/4 波長板 (QWP), コーナーキューブ (CC) と検光子 (P), 光検出器 (PD), 発振器 (OSC) と同期検波に用いるロックインアンプ (LIA) から構成されている. レーザ光源からの光の電場 E_0 はジョーンズ・ベクトル¹⁷⁾により次式で示される.

$$E_0 = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここでレーザ光源からの光は 45° 傾いた直線偏光である. この光を EOM により位相変調し, 干渉計光学系を通過させると電場 E_1 は次式のようになる.

$$E_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i(\delta+a\cos(\omega t))} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y e^{i(\delta+a\cos(\omega t))} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで, δ , a , ω はそれぞれ, 干渉計光路差に相当する位相差, 変調深さ, 変調周波数である. 45° に傾けた P を通過させた後に PD で検出される強度は次式で示すことができる.

$$\begin{aligned} I_1 &= |E_1|^2 = \frac{1}{2} \{E_x^2 + E_y^2 + 2E_x E_y \cos(\delta + a \cos(\omega t))\} \\ &= \frac{1}{2} I_0 \{1 + \Gamma \cos(\delta + a \cos(\omega t))\} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし,

$$I_0 = E_x^2 + E_y^2 \quad (4)$$

$$\Gamma = \frac{2E_x E_y}{E_x^2 + E_y^2} \quad (5)$$

であり, Γ は干渉縞のコントラストを示している. 式(3)の干渉計出力を LIA により同期検出するとその出力は次式となる⁴⁾.

$$\begin{aligned} I_{\text{lock-in}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\frac{1}{2} I_0 \{1 + \Gamma \cos(\delta + \cos(\omega t))\} \right] \cdot \cos(\omega t) \cdot d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2} I_0 \Gamma \sin(\delta) \cdot J_1(a) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, $J_1(a)$ は 1 次のベッセル関数である. この出力は, 図2に示すようにマイケルソン干渉計の出力が微分された状態となり DC オフセットが取り除かれ, 干渉計出力の暗縞と明縞がゼロクロスするようになる. このゼロ点において干渉計光路差と光源周波数には次の関係が成り立つ.

$$L = \frac{\lambda}{2n} N = \frac{c}{2fn} N \quad (7)$$

ここで, L , λ , c , f , n , N はそれぞれ, 光路差, 光波長, 光速, 光周波数, 媒質の屈折率, 干渉縞の次数である.

2.2 提案する変位測定システム

図3に我々が完成を目指す測定システム構成を示す. (以下略語は図3参照のこと.) このシステムは, ①周波数可変レーザ 1 (ECLD1) を光源とし, 位相変調ホモダイン干渉計を基本と

Fig.1 Phase modulation homodyne interferometer. EOM: electro optical modulator, OSC: oscillator, PBS: polarization beam splitter, QWP: quarter wave plate, CC: corner cube, P: polarizer, PD: photo detector, LIA: lock-in amplifier

Fig.2 Relationship between signals of the conventional homodyne interferometer and phase modulation homodyne interferometer

した実時間変位測定システム, ②周波数可変レーザ 1 と周波数可変レーザ 2 (ECLD2) を光源とした干渉計光路差を実時間測定可能な測定システム, ③周波数可変レーザ 3 (ECLD3) を光源とした実時間空気屈折率変動測定システムから構成される. 我々の目指すシステムでは, すべての測定が光周波数を基準で行うことができる. 我々は, 第一段階として上記①~③の要素それぞれに対し, 1 個ずつ装置を構成し原理実証と測定法の可能性を追求することとした. 次節以下では, それぞれの要素について詳細な原理や装置構成, そして実験結果と考察を述べていく.

2.3 1 個の周波数可変レーザを用いた変位測定

図3で示す ECLD1 を光源とする位相変調ホモダイン干渉計で可動 CC の変位を測定する. ECLD1 の光は, EOM1 で変調された後, 干渉計を通り PD1 で検出する. 変位を測定するには, 最初に ECLD1 の光周波数 f_1 を変化させ, LIA 出力を特定ゼロ点にロックする. その後, ステージを変位させるが, ロックしたゼロ点を維持するように ECLD1 の光周波数 f_1 を制御する. ステージ変位と光源周波数変化の関係は式(7)から, 2 次の微小量を見捨ると 1 次微小量を用いてテーラー展開で次のように近似できる.

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta f_1}{f_1} - \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta N}{N} \quad (8)$$

ここで, ΔL , Δf_1 , Δn , ΔN はそれぞれ 1 次微小量で, ステージ変位, ECLD1 の光周波数変化, 媒質の屈折率変動, 干渉縞の次

Fig.3 Total configuration of optical path difference change (displacement) measurement system with a direct optical path difference measurement system and an air refractive index change detection system. FC : frequency counter, PD : photo detector, HSPD : high speed photo detector, QWP : quarter wave plate, EOM : electro-optical modulator, CC : corner cube, ECLD : external cavity laser diode, OSC : oscillator, LIA : lock-in amplifier, ULTEM : ultra-low thermal expansion material, PC : personal computer, DAQ : data acquisition device, DSP : digital signal processor, PBS : polarization beam splitter, FSL : frequency stabilized laser

数変化である。式(8)は測定最初の (L, f, n, N) と 1 次微小変化 $(\Delta L, \Delta f, \Delta n, \Delta N)$ の関係を表している。特定のゼロ点にロックするように制御するので、干渉縞の次数変化に関わる項 $\Delta N/N$ は微小で無視することができ、次を得る。

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta f_1}{f_1} - \frac{\Delta n}{n} \quad (9)$$

ただし、1 次の微小量で近似しているの、近似が可能な範囲 (式(9)の $\Delta L/L$ が充分小さい範囲) で測定する必要がある。これは最大測定範囲 ΔL_{max} と測定最初の光路差 L で決まり、想定値はそれぞれ、 $10 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \text{ m} \sim 0.2 \text{ m}$ であり、1 次の微小量 $\Delta L_{max}/L$ は $10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5}$ オーダと小さく、充分近似可能である。測定範囲をさらに拡大する、すなわち ΔL_{max} を超えて変位測定を行うためには、式(9)の最初の光路差 L を改めて決め逐次積分を行う。本システムを使用するにあたり、前もって (特に逐次積分する場合は実時間で)、最初の光路差 L を決める必要がある。光路差 L は、式(10)に示す最隣接干渉縞次数間の周波数差である自由スペクトル間隔 (以下、FSR) から決定できる。

$$L = \frac{c}{2n \cdot \text{FSR}} \quad (10)$$

なお、変位の分解能をサブナノメートルとすれば、光路差 $L = 0.1 \text{ m}$ であれば、 $\Delta L/L$ を 10^{-9} オーダまで決定する必要がある。

2.4 2 個の周波数可変レーザを用いた実時間光路差測定

式(10)で示したとおり、FSR と屈折率 n を知ることによって光路差 L が計算できる。従来の FSR 測定法では、例えば図 1 において光源を ECLD としたとき、ECLD の光周波数を走査し、そのとき LIA 出力を監視し、隣り合った (あるいは N 次離れた) ゼロ点間の周波数差を何らかの方法 (例えば他の周波数基準レーザとのビート信号の観察) から割り出し、これより FSR を決定する。

この従来法は走査に時間を要し実時間測定でない。また、光路差が大きく変化した場合に対応不可である。この欠点を克服するため、図 3 において ECLD2 を追加する。ECLD1 と 2 の干渉縞次数が M 次離れた干渉縞 (すなわちゼロ点) にロックするように双方の光源周波数 f_1, f_2 を制御する。このとき FSR と光周波数 f_1, f_2 とには次の関係が成立する。

$$\text{FSR} = \frac{|f_1 - f_2|}{M} \quad (11)$$

光周波数 f_1, f_2 と光路差 L との間に以下の関係が成り立つ¹⁸⁾。

$$L = \frac{c}{2n \cdot \text{FSR}} = \frac{Mc}{2n \cdot |f_1 - f_2|} \quad (12)$$

つまり、2 個の ECLD の光周波数が M 次離れたゼロ点にロックされているとき、周波数カウンタ 2 (FC2) で ECLD1 と 2 のビート信号 $|f_1 - f_2|$ を実時間測定する。これを用いて式(10)あるいは式(11)~(12)より光路差 L を決定する。ただし、屈折率 n は、あらかじめ決めておく必要がある。

2.5 空気屈折率変動測定

光路差 L を $0.1 \text{ m} \sim 0.2 \text{ m}$ と想定すると、式(9)より変位分解能をサブナノメートルとするには空気屈折率測定分解能を 10^{-9} 以下とする必要がある。提案するシステムでは、図 3 に示すように ULTEM に光素子を固定した干渉計を変位・FSR 測定干渉計の周辺に置き、いずれの干渉計でも屈折率変動が同じとなるようにする。さらに、ECLD3 を光源とし、変位測定の場合と同様に LIA 出力のゼロ点を保持するように ECLD3 の光周波数 f_3 を制御することで次数変化を無くす ($\Delta N/N \rightarrow 0$)。ECLD3 の光周波数変化 Δf_3 は高速度光検出器 3 (HSPD3) と周波数カウンタ 3 (FC3) で測定する。このとき ULTEM においた干渉計では次式が成立する。

$$\frac{\Delta L_3}{L_3} = -\frac{\Delta f_3}{f_3} - \frac{\Delta n}{n} \quad (13)$$

ここで、ULTEM の線膨張率 α を 10^{-8} K^{-1} オーダ、温度変化 ΔT を 5 mK とすると、熱変形に係わる項 $\Delta L_3 / L_3$ は次の式(14)のようになり、屈折率分解能の目標値 10^{-9} に対して充分小さくなる。なお、このレベルの線膨張率および温度安定性の達成は可能である¹⁹⁻²⁰⁾。

$$\frac{\Delta L_3}{L_3} = \alpha \Delta T = 10^{-8} \times 5 \times 10^{-3} \approx 5 \times 10^{-11} \quad (14)$$

したがって、次の式(15)が成立する。

$$\frac{\Delta f_3}{f_3} = -\frac{\Delta n}{n} \quad (15)$$

これを式(9)と組み合わせると式(16)を得る。

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta f_1}{f_1} + \frac{\Delta f_3}{f_3} \quad (16)$$

式(16)より、変位測定において空気屈折率変動を補償可能である。ただし実時間で光路差 L を決定するために式(10)あるいは式(11)~(12)に注意する必要がある。

3. 実験

3.1 1 個の周波数可変レーザによる変位測定¹¹⁾

ECLD1 のみを光源とする位相変調ホモダイン干渉計を図 4 のように構成した。実験で使用した装置および実験条件の一覧を表 1 に示す。初期の L を式(10)より決定するため、事前に FSR を 2.4 で述べた従来法 (ECLD の光周波数走査による方法) で測定した。ステージを走査の始点に固定した状態で ECLD1 の光周波数を走査し、FSR を測定した。FSR の平均とそのばらつきは、1.015 GHz, ± 10.5 MHz となった。これと式(10)より光路長 L を式(17)で決定した。なお、屈折率 n は、環境条件から Ciddor⁴⁾の式で決めた。

$$L = \frac{2.99792458 \times 10^8}{2 \times 1.00027 \times 1.015 \times 10^9} \approx 147.7 \pm 1.5 \text{ mm} \quad (17)$$

本測定では商用ヘテロダイン干渉計 (Agilent Technology HP5517) の補間誤差測定を試みた。提案する干渉計の可動 CC と商用ヘテロダイン干渉計の可動 CC を同じステージへ設置してステージの変位を同時に測定した後、双方で取得された変位データの比較を行った。変位測定ではステージに駆動信号として三角波信号を印加した。結果として、変位約 800 nm・周期 20 s の走査を 5 周期行なった。この測定時には環境を整え測定時間約 110 秒間の温度・圧力変動をそれぞれ +5 mK 以下、+3 Pa 以下に抑止した。これは、 $\Delta n \sim 5 \times 10^{-9}$ の変動をもたらす、後述するように最大 0.7 nm 程度のゆらぎをもたらす可能性がある。しかし、この実験では以下のように近似した。

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta f_1}{f_1} \quad (18)$$

式(17)の光路差 $L = 147.7$ mm を用い、可動 CC を設置したステージの変位 ΔL を周波数変動から測定した。図 5 に測定結果を示す。横軸、縦軸はそれぞれ、提案する手法で得たステージ変位、双方 (ヘテロダイン干渉計と提案手法) の変位測定の差で

Table 1 Experimental instruments in the proposed system

Instrument	Manufacture Model
ECLD1,3	New Focus Velocity 6304 $\lambda=633$ nm
ECLD2	New Focus Vortex 6000 $\lambda=633$ nm
FSL	Spectra Physics 117A $\lambda=633$ nm
EOM1~3	New Focus 4002M Driving frequency = 2~10 MHz Modulation depth = 0.8~1.0 rad
PD1~3	Hamamatsu Photonics C5658
HSPD1~3	New Focus 1434
FC1~3	Agilent Technology 53132A
LIA	Mixer : R&K M1-X Low Pass Filter : NF Corporation E3201S Cut-off frequency = 1 kHz

Fig. 4 Experimental setup of comparison measurement between conventional heterodyne interferometer and the proposed system

Fig. 5 Displacement measurement comparison between the commercial heterodyne interferometer and the proposed method

ある。図 5 に示す結果は、ステージ走査の 5 周期分の差の平均を示している。なお、既に述べたとおり、この実験での光路差は約 147.7 mm なので、屈折率変動により $147.7 \text{ mm} \times (5 \times 10^{-9}) \sim 0.7$ nm のゆらぎが混入する可能性がある。図 5 はこの揺らぎが大きく影響しているものと考えられる。ただし、図 5 から、最大 4 nm の振幅の補間誤差が、周期 316 nm (半波長) で観察できた。この周期的な差はヘテロダイン干渉計の補間誤差であると考えられる。この結果から提案する手法の有効性が確認できる。

3.2 2 個の周波数可変レーザによる直接 FSR 測定¹⁵⁾

2.4 節で提案したシステムを用いて FSR の直接実時間測定を行った。実験で使用した装置および実験条件は表 1 の通りである。提案手法と従来法を比較するために、事前に従来法で FSR 測定を行った。事前決定された FSR は $1.020 \text{ GHz} \pm 12 \text{ MHz}$ であ

Fig.6 Beat frequency measurement when the two interferometer LIA signal are at the null points by controlling the two ECLDs frequencies. Interference fringe shift between the two ECLDs =6.

Fig.7 The photograph of ultra-low thermal expansion material interferometer

った。このばらつきの主因は空気屈折率変動と考えている。提案する測定は2個のECLDからの光が同一光路を通るようにアライメントし、それぞれの光周波数をLIAからの出力のゼロ点を維持するように制御する。一方で2個のECLDの周波数差をビート信号として観察することによりFSR(または $M \times FSR$)を直接測定する。2個のECLDを調整し、 $M=6$ の場合のビート信号の時間変化測定の結果を図6に示す。同図より6次離れたビート信号は6.0342 GHzであり、式(11)より、FSRは $1.0057 \text{ GHz} \pm 1.8 \text{ MHz}$ と決定した。従来法と提案する手法で得たFSRの相違は約1.4%であった。これは、ECLD1と2の光路にわずかに差があるためと推定する。ただし、ばらつき(ここでは標準偏差)は従来法に対し、新手法は15%まで減少させることができた。従来法は測定時間がかかり、屈折率変動の影響が大きかったものと推定する。この結果から、提案した手法はFSR決定においてばらつき縮小へ寄与するとともに、実時間測定が可能なが判った。この結果より式(10)、あるいは式(11)と式(12)を用いることで光路差 L を実時間測定可能である。

3.3 空気屈折率変動測定システムの検証¹⁰⁾

空気屈折率の算出はCiddor⁴⁾(またはEdlen¹²⁾)の式に温度、圧力、湿度、CO₂濃度を代入することで実行できる。Ciddorの方法と提案手法を定性的ではあるが比較を行った。図7に示したULTEM(オハラ Creacram66 線膨張率 $2.0 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$)で製作した干渉計光学系にECLDの光を導光し特定の干渉縞にロック

Fig.8 Measurement result of the refractive index fluctuation, (a) the environmental change, (b) the calculated refractive index fluctuation and the result by the proposed method

するようにECLD光周波数を制御し、この周波数変動を測定した。Ciddor法との比較のため干渉計付近に温度計(Automatic Systems Laboratories F200)、圧力計(東京鈴木製作所 Model T60)、湿度計(佐藤計量器製作所 PC-5000TRH-II)を設置した。この実験で使用した他の装置は表1の通りである。CO₂濃度は屈折率の算出に対し影響が小さいため気象庁発表の2006年度値381 ppmを使用した²¹⁾。この検証においては、干渉計光路および、温度計をはじめとする環境センサの設置されている空間の空気屈折率を変化させるため、白熱電球の発熱を利用しておおよそ50秒間にわたる温度外乱を2回与え、その結果として2Kの温度上昇を引き起こした。この間の圧力変動と湿度変動は、それぞれ20 Paと2%であった。測定された温度と湿度のデータを図8(a)に、Ciddorの式で算出された屈折率変動と提案したシステムで測定された屈折率変動を図8(b)に示す。同図より、屈折率変動は主として温度変動によることがわかる。また、同図においてCiddor法と提案手法では、結果が定性的に一致している。ただし、ここでは約 $4 \times 10^{-7} \sim 6 \times 10^{-7}$ オーダの双方の差異が観察できる。これはULTEMの熱変形が

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T = 2.0 \times 10^{-7} \times 2 = 4.0 \times 10^{-7} \quad (19)$$

であるので、双方の差異にはULTEMの熱膨張が大きく寄与しているものと考えられる。より精密な検証には、温度変動の小さい環境で実験を行う必要がある。これは今後の課題である。

4. 結 言

序論で掲げた問題を解決するために装置の開発を行い、次の結論を得た。

- (1) ECLD を光源とし変位を光周波数変化で検出するレーザ干渉計を提案した。
- (2) 上記システムと商用ヘテロダインレーザ干渉計と比較実験を行い、ヘテロダイン干渉計の補間誤差の検出を行った。
- (3) 提案手法の高精度化のため、2 個の ECLD を用い FSR の実時間測定を行った。測定のばらつきを従来法に比べ 15 % まで減少させることができた。これにより光路差を FSR から実時間で決定できる。
- (4) 空気の屈折率の変動を除去するために ECLD を用いた空気屈折率変動検出法を提案した。
- (5) 上記の屈折率変動検出法と Ciddor の式との比較を行い、定性的な一致を確認した。

今後は、提案した実時間光路差決定法と空気屈折率変動検出法を、実際の変位測定装置に組み込み測定の高精度化を図る。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、独立行政法人日本学術振興会科学研究費、財団法人三豊科学技術振興協会の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) International technology roadmap for semiconductors
<http://www.itrs.net/reports.html>.
- 2) C. Wu, J. Lawall, R. D. Deslattes: Heterodyne interferometer with subatomic periodic nonlinearity, *Appl. Opt.*, **38**, (1999)4089.
- 3) T. Keem, S. Gonda, I. Misumi, Q. Huang, T. Kurosawa: Removing nonlinearity of a homodyne interferometer by adjusting the gains of its quadrature detector systems, *Appl. Opt.*, **43**, (2004)2443.
- 4) P. E Ciddor: Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared", *Appl. Opt.*, **35**, (1996) 1566.
- 5) G. Basile, A. Bergamin, G. Cavignerio, G. Mana, "Phase modulation in high-resolution optical interferometer" *Metrologia*, **28**, (1991/92) 455.
- 6) P. Rerkkumsum, M. Aketagawa, K. Takada, T. Watanabe and S. Sadakata; Direct measurement instrument for lattice spacing on regular crystalline surface using a scanning tunneling microscope and laser interferometry, *Rev. Sci. Instrum.*, **74**, (2003) 1205.

- 7) M. Aketagawa, Y. Ikeda, N. Tanyarat, M. Ishige: Optical encoder calibration using lattice spacing and optical fringe derived from scanning tunneling microscope and optical interferometer, *Meas. Sci. Technol.*, **18**, (2007) 503.
- 8) T. R. Schibli, K. Minoshima, Y. Bitou, F-L. Hong, H. Inaba, A. Onae, H. Matsumoto: Displacement metrology with sub-pm resolution in air based on a fs-comb wavelength synthesizer, *Optics Express*, **14**, (2006) 5984.
- 9) R. M. Silver, H. Zou, S. Gonda, B. Damazo, J. Jun, C. Jensen, L. Howard: Atomic-resolution measurements with a new tunable diode laser-based interferometer, *Opt. Eng.*, **43**, (2004) 79.
- 10) J. R. Lawall: Fabry-Perot metrology for displacement up to 50mm, *J. Opt. Soc. Am. A*, **22**, (2005) 2786.
- 11) M. Ishige, F. Matsuura, M. Kawasugi, M. Aketagawa: Phase modulation homodyne interferometer with a 10-pm resolution using a tunable laser diode", *International Journal of Precision Engineering and Manufacture*, **8**, (2007) 80.
- 12) K. P. Birch and M. J. Downs: An updated Edlen equation for the refractive index of air, *Metrologia*, **30**, (1993) 155.
- 13) 10717A Wavelength Tracker, Agilent Technologies Inc.,
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/05517-90116.pdf>.
- 14) ZMI Compact Wavelength Compensator, ZYGO corp.
<http://www.zygo.com/?sup=/resource/manuals.cgi?type=zmi>.
- 15) 石下雅史, 河杉正晃, 星野雄太, 明田川正人: 周波数可変レーザを用いたピコメートル干渉測長法の開発—第 3 報: FSR を直接測定する手法の検証—, 2007 年度精密工学会春季大会学術講演会予稿集, **2007S**, (2007) D27.
- 16) Tuan Binh Quoc, 星野雄太, 石下雅史, 小林健, 明田川正人: Development of laser interferometer with picometer resolution using frequency tunable laser- The 5th report: Compensation of the displacement measurement due to the fluctuation of the air refractive index-, 2008 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, **2008S**, (2008) F02.
- 17) E. Hecht : Optics, 4th edition, Addison Wesley, (2002) 375.
- 18) Z. Bay : The use of microwave modulation of laser for length measurements, *Natl. Bur. Stand., (U. S.) Spec. Publ.*, **343**, (1971) 59.
- 19) 例えば, T. Nose, F. Takahashi, M. Nakabayashi, H. Morita and N. Kosugi : NEXCERA- ultra low thermal expansion ceramics, *Nippon Steel Technical Report*, **84**, (2001), 5.
- 20) 明田川正人, 高田考次, 野呂昌良, 小林慶子, 山田和敏, 竹島信人 李鍾斗, 中山義則, 結晶格子を基準とする微小長さ測定—第 3 報: 熱ドリフト誤差の抑制と測定範囲の数 μm レベルへの拡大—, 精密工学会誌, **65**, (1999) 121.
- 21) 気象庁, 二酸化炭素濃度の経年変化
<http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/ghghp/21co2.html>.