

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26289015

研究課題名（和文）多色光源による同時共鳴周波数追尾による空気中での絶対長さ測定

研究課題名（英文）Absolute length measurement in air using multiple-color frequency stabilized light source

研究代表者

明田川 正人（AKETAGAWA, MASATO）

長岡技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：10231854

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：多色にわたる周波数の安定した光源を用い空気中での絶対長さ測定を試みた。レーザダイオード（LD）に正弦波周波数/位相変調法を適用しその中心周波数のヨウ素及びルビジウム飽和吸収線へのロックを行った。633nm帯で相対周波数安定性 $10^{-1}$ を780nm帯で、相対周波数安定性 $10^{-0}$ を達成した。またこれらを光源とする干渉計を構築し、干渉信号に含まれる高調波成分からリサージュダイアグラムを描き、数nm～10nmの測定不確かさで変位を決定できた。絶対長さ測定のための多色光源干渉計の構築に目処を得た。

研究成果の概要（英文）：Using sinusoidal frequency/phase modulation, central frequencies of laser diodes (LDs) are locked to saturated absorption lines of Iodine(633nm) and Rubidium(780nm). Relative frequency stabilities for 633nm and 780nm are  $10^{-1}$  and  $10^{-0}$  orders respectively. These LDs are used for light sources of displacement measuring interferometers. From the harmonic signals, which are contained in the interference signals, the Lissajous diagram can be drawn. From the diagram, the displacements of the target mirrors in the interferometers can be determined with the uncertainties of several nm - 10nm. From the above results, the possibility to perform multiple-color absolute length determination.

研究分野：精密工学

キーワード：多色法 周波数安定化 飽和吸収線 正弦波周波数変調 正弦波位相変調 変位計測 絶対長さ測定

1 . 研究開始当初の背景

超微細加工技術の進展に伴い、加工精度にナノメートル (nm) 以下を要求する事例が増えている。加工精度は相対的なものでなく絶対的となり、かつ製品寸法の大きさに無関係になるものと予想する。比較的大きな寸法 (1m オーダ) の製品でも将来的には全体の絶対加工精度に nm 以下を要求する時代が来る (例えば EUV リソグラフィ 投影ミラーの寸法と形状公差はそれぞれ 1m オーダ、10pm である) 。もし最大 1m の任意の長さを 10pm オーダ不確かさで、絶対計測すれば、革新的工業製品の創成が可能である。

しかも、この計測技術はメートル標準 (光速度を介した周波数測定) に準拠することが求められる。現在、産業界で多用され準工業標準となっている商用レーザ干渉計などは、ヨウ素安定化レーザなどの周波数安定化レーザで校正され、メートル定義にトレーサブルである。ただし、1) その測定結果に nm かそれ以上の位相補間の不具合による周期誤差が混入すること、2) 空気屈折率変動の影響を無視できない、という 2 個の理由で、空气中において任意の絶対幾何学長測定には不向きである。1m までの任意絶対幾何学長を空气中で 10pm の不確かさ (相対不確かさ = 測定不確かさ / 計測長さ = 10pm/1m=10<sup>-11</sup>) で計測する手法は現在のところ確立されていない。

2 . 研究の目的

この研究は最大 1メートルまでの任意の絶対幾何学長を 10 ピコメートルの不確かさで決定することが目的である。

研究開始時の要素技術開発は以下の通りであった。

(旧要素 1) 光共振器の共鳴周波数と再隣接共鳴モード間周波数差 (FSR) の同時追尾による任意の絶対光学長の測定を行う。相対不確かさ (= 測定不確かさ / 最大測定長さ 1m=10<sup>-12</sup>) を目指す。

(旧要素 2) 上の手法を多色 (例えば基本波と 2 倍高調波の 2 色) に適用し、絶対空気屈折率補正を行う。相対不確かさ 10<sup>-11</sup> を目指す。

(1) と併せて絶対幾何学長測定の相対不確かさ 10<sup>-11</sup> を目指す。

(旧要素 3) 空气中において測定範囲 1m で測定不確かさ 10pm の 1 次元絶対幾何学長測定機を開発する。

しかしながら、上の要素開発には (A) 周波数計測であり測定時間がかかる、(B) 多波長法を利用するので広範囲にわたる波長で基準となる周波数安定化光源が必要となり計測システムが複雑でかつ高価になる、等の理由で現実に開発可能な以下の要素開発を目指すことにした。

(新要素 1) 安価なレーザダイオード (LD) を光源とする正弦波周波数 / 位相変調干渉法を開発する。

(新要素 2) レーザダイオードの周波数安定

化 (相対安定度 10<sup>-12</sup> オーダ) を目指す。

(新要素 3) 複数の波長の異なるレーザダイオードの周波数安定化を図り、これらを光源とする多色干渉計を開発する。

(新要素 4) 変調周波数を 10MHz オーダとしターゲットの高速運動 5~10m/s を計測できるようにする。

(新要素 5) 干渉信号からの変位をピコメートルまで向上させる正弦波周波数 / 位相変調干渉法向けの直接位相検出法を開発する。

3 . 研究の方法

次の方法を行いつつ現在も行っている。

(1) スペクトル幅の狭いレーザダイオード LD のキャリア周波数をヨウ素 (633nm と 532nm) とルビジウム (780nm) の飽和吸収線に正弦波周波数変調あるいは正弦波位相変調を用いて固定する。

(2) 上で開発した周波数安定化レーザダイオードを光源とする干渉計を構築する。干渉信号に含まれる変調周波数の高調波成分よりリサージュダイアグラムを得、干渉計ターゲットミラーの変位を決定する。

(3) 上の (2) の干渉計を多色化し空気屈折率の影響を排除し絶対長さを決定する。

(4) 変調周波数を 10MHz オーダまで向上させる。

(5) 正弦波周波数 / 位相変調干渉法向けの直接位相検出法を開発する

4 . 研究成果

上で述べた研究の方法の内成果を上げたものを以下に示す。

(1) 633nm 帯レーザダイオードの正弦波周波数変調による周波数安定化と変位計測

図 1 に構築した計測システムを示す。

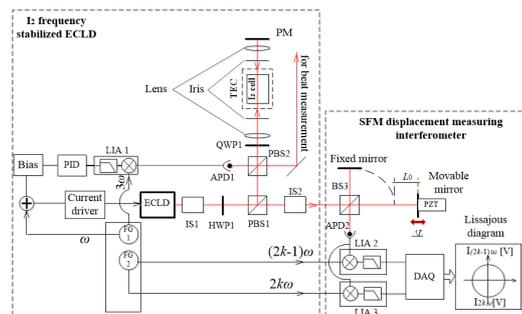


図 1 周波数安定化システムと変位計測干渉計

この図において、633nm 帯外部共振器型レーザダイオード ECLD に正弦波周波数変調を加え、ヨウ素飽和吸収線に、ECLD の中心周波数をロックした。測定時間 100 秒で、相対的な周波数安定性 (中心周波数に対する変動周波数成分の比) として 10<sup>-11</sup> オーダを達成した (図 2 参照)。

図 1 に示すように、これを光源とする変位計測干渉計を構築した。干渉縞信号に含まれる変調信号の奇数倍と偶数倍の隣り合った高

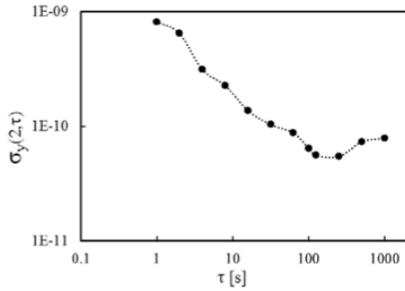


図2 正弦波周波数変調レーザダイオードの周波数安定性：ヨウ素安定化 HeNe レーザとの比較結果 横軸は測定時間 縦軸はアラン分散

調波成分からリサーチダイアグラムを描くことが出来、そのダイアグラムからターゲットミラーの運動方向と変位を決定できる。図3 (a)(b)に光路差が4メートルときのリサーチダイアグラムを示す。(a)は生のリサーチダイアグラム(b)はそれを正規化したものである。同図3 (c)はこれらのリサーチダイアグラムから変位を算出したもので

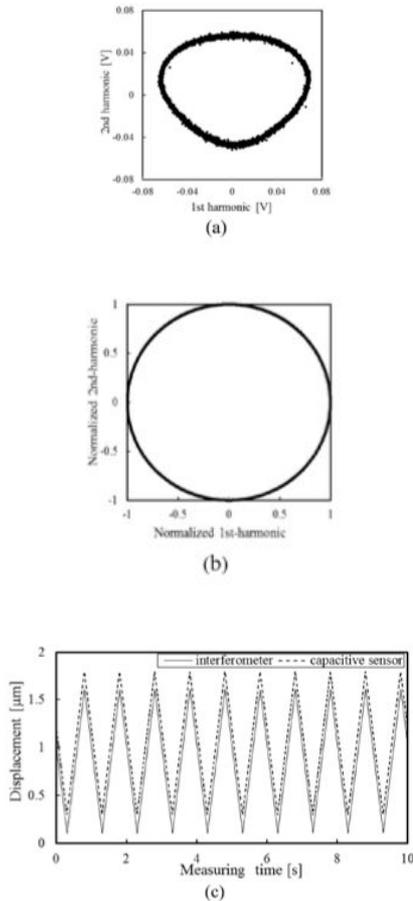


図3 光路差 4 メートルでの変位計測結果 (a) 2次と3次高調波による生のリサーチダイアグラム, (b) 上の(a)を正規化したリサーチダイアグラム, (c) 上の(b)からえた変位計測の結果(静電容量型変位計との比較)

ある。光路差 4~10 メートル範囲で、ターゲットミラーの変位を 10nm で決定することが出来た。図4に光路差が、それぞれ6, 8, 10メートルでの生のリサーチダイアグラムを示す。(掲載ジャーナル参照)

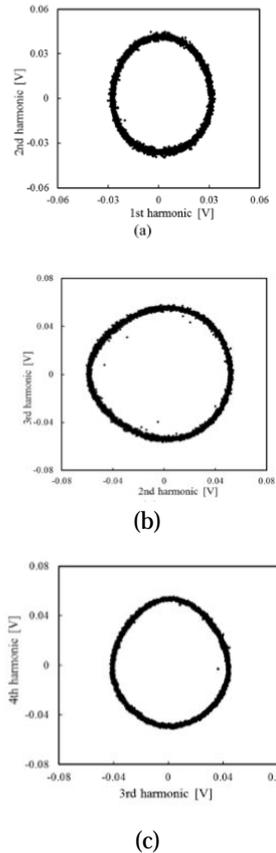


図4 生のリサーチダイアグラム。(a)光路差 6メートル 1次と2次の高調波, (b) 光路差 8メートル 2次と3次の高調波, (c) 光路差 10メートル 3次と4次の高調波。

(2) 633nm 帯レーザダイオードの正弦波位相変調による周波数安定化と変位計測

ECLDの正弦波周波数変調でなく、電気光学素子(EOM)を用いた正弦波位相変調法により、ECLDのキャリア周波数を633nmのヨウ素の吸収線にロックすることに成功した。測定時間1000秒で、相対的な周波数安定性  $10^{-11}$  オーダを達成した(図5参照)。またこれを

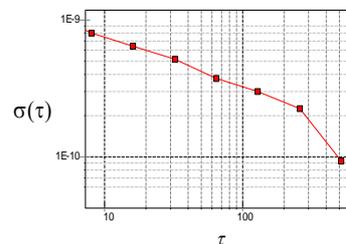


図5 正弦波位相変調レーザダイオードの周波数安定性：ヨウ素安定化 HeNe レーザとの比較結果 横軸は測定時間 縦軸はアラン分散

光源とする変位計測干渉計を構築し光路差 1メートルまでの範囲で、ターゲットミラーの変位を数 nm の不確かさで決定できた(図6参照)(雑誌投稿準備中につき、詳しくは学会発表資料参照)

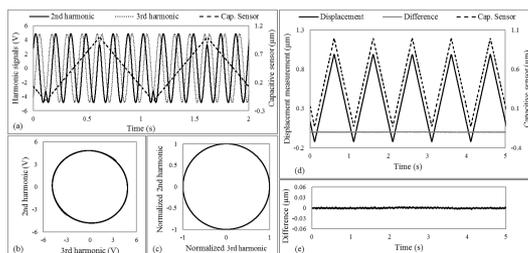


図6 正弦波位相変調レーザダイオードを光源とする干渉計の計測結果。光路差 1メートルの場合。(a)干渉縞信号,(b)生及び正規化したリサージュダイアグラム,(c)変位計測結果(静電容量変位計との比較),(d)干渉計と静電容量型変位計の差(〜10nm)

(3) 780nm 帯分布ブラッグ反射型レーザダイオード(DBR-LD)の周波数安定化

780nm 帯の分布ブラッグ反射型レーザダイオード(DBR-LD)の周波数を正弦波状に変調し、そのキャリア周波数をルビジウムの飽和吸収線にロックした。実験システムを図7に示す。測定時間 100 秒でおよそ相対的な周波数安定性  $10^{-9}$  から  $10^{-10}$  を得た。

(雑誌投稿準備中につき、詳しくは学会発表資料参照)

(4) 532nm 帯分布帰還型レーザダイオード(DFB-LD)2倍高調波の周波数安定化

532nm 帯分布帰還型レーザダイオード(DFB-LD)2倍高調波のヨウ素飽和吸収線へのロックを現在進めている。

以上の成果より、532nm、633nm、780nm 帯のその周波数が正確に決められている多色

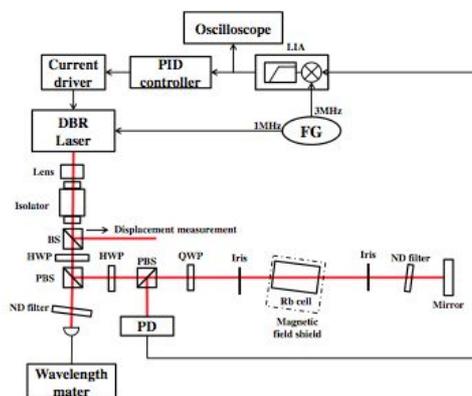


図7 780nm 帯の分布ブラッグ反射型レーザダイオード(DBR-LD)のルビジウムによる周波数安定化システム

光源を確保出来る見通しを得た。さらにこれらを光源とする干渉計で変位計測可能であることが判った。これより多色法で絶対長さ測定が可能となる。(2017年6月現在で進行中)

(5) 正弦波周波数/位相変調干渉法向けの直接位相検出法を開発

従来は変調深さがある一定値でないと位相直接検出法が使えなかったが、これを任意の変調深さでも利用できるようにアルゴリズムを開発した。(雑誌投稿準備中につき、詳しくは学会発表資料参照)

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2件)

(1) Thanh-Tung Vu, Masato Higuchi and Masato Aketagawa, Accurate displacement-measuring interferometer with wide range using an I2 frequency-stabilized laser diode based on sinusoidal frequency modulation, Measurement Science and Technology, Vol. 27,(2016), 105201.

(2) Vu, T.-T., Maeda, Y., Aketagawa, M. Sinusoidal frequency modulation on laser diode for frequency stabilization and displacement measurement, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, Vol. 94, (2016), pp. 927-933.

〔学会発表〕(計4件)

(1) Duong Quang Anh, 長谷川文唯, 明田川正人, Frequency stabilized laser diode to saturated absorption of  $^{127}\text{I}_2$  molecule at 633nm based on phase modulation for displacement measurement, 精密工学会 2017 年春季大会, 2017, D19.

(2) 樋口雅人, 浅野仁, 韋冬, 明田川正人, 正弦波周波数変調変位計測干渉計における直接位相検出法の開発, 精密工学会 2017 年春季大会, 2017, D02

(3) 浅野仁, 樋口雅人, 韋冬, 明田川正人, レーザダイオード正弦波周波数変調変位計測干渉計における強度変調の影響, 精密工学会 2017 年春季大会, 2017, D21.

(4) 山本巴, 長谷川文唯, 樋口雅人, Duong Quang Anh, Vu Thanh Tung, 韋冬, 明田川正人, ルビジウム飽和吸収線を用いた 780nm 帯 DBR 周波数安定化レーザの開発と変位計測への応用, 精密工学会 2017 年春季大会, 2017, D04. [図書](計 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

明田川正人 (AKETAGAWA MASATO)  
長岡技術科学大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10231854

(2) 研究分担者

平田研二 (HIRATA KENJI)  
長岡技術科学大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：40314364

(3) 研究分担者

韋冬 (WEI DONG)  
長岡技術科学大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：70610418