

機関番号：10101
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560030
 研究課題名（和文） 微小試料の段差・歪みを並列測定する光周波数走査顕微干涉システムの開発
 研究課題名（英文） Optical frequency scanning microscope to measure the step-height and the deformation of a small specimen.
 研究代表者
 覚間 誠一（KAKUMA SEIICHI）
 北海道大学大学院工学研究院・助教
 研究者番号：90204338

研究成果の概要（和文）：

周波数走査を広範囲に行える面発光型半導体レーザを2個同時に使用する顕微干涉システムを構築した。その特色は2つのレーザを同時かつ互いに逆方向に周波数走査することで被検物体の幾何的サイズ・歪みを同時に測定できる点にある。検証試験を行ったところ、200 μm 立方の金属試料の形状を測定でき、かつ温度膨張量の検出も行えることが示された。

研究成果の概要（英文）：

A frequency scanning type interferometric laser microscope has been developed using a pair of vertical-cavity-surface-emitting-laser-diodes capable of frequency scanning with a broad scan range. The presented system can measure both the geometric height and the deformation of the test piece simultaneously. As a result of the experiments, the profile and the thermal expansion of the metal sample with a 200 micron-cube.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学（応用物理学）

科研費の分科・細目：工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：光周波数走査、干涉計、半導体レーザ、長さ変化、形状計測、光計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 半導体レーザは他のレーザに比べて小型・安価であることに加え、発振光周波数の変調・連続走査を電流制御により極めて容易に行なえることから、幾何的長さを高精度に測定するための周波数走査干涉計用の光源として多用されている。

(2) 非接触に長さ測定を行えるレーザ周波数走査干涉計は、微細加工や MEMS デバイ

スの新機能の開発のみならず、微小金属物体熱膨張率の結晶軸依存性の解明、薄膜物性をはじめとする各種の物性物理、材料科学分野においても極めて有用な測定用ツールとなる可能性を持っている。

(3) しかしながら原理的に周波数走査干涉計の測定対象は試料の幾何的寸法に限られており、試料に温度・応力その他の物理的条件の変化を与えたときに生じる極めてわずかな変形量を精密に検出することはできな

い。

(4) また本手法に付随する技術的課題として、周波数走査中に動的変形が生じると干渉縞位相シフト量に大きなオフセットが生じて幾何的寸法の検出が不可能になり、試料寸法・変形に関する情報が全く得られなくなってしまう点が挙げられる。このような理由により、動的変形状態下にある試料サイズ測定を可能とする周波数走査干渉システムの開発が必要となる。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、従来型の半導体レーザより1桁以上幅広い周波数走査の可能な面発光型半導体レーザ (VCSEL) を光源に用いて周波数走査顕微干渉計を構築し、常に熱的変形状態にある物体ではこれまで検出不可能であった物体サイズの高精度測定実現を第1の目的とする。

(2) 次に物体変形量の高分解能検出を同時に行なう実用的顕微干渉システムを開発し、動的・静的を問わず試料サイズ・変形の情報取得できるシステムを実現する。

3. 研究の方法

(1) はじめに図1のような1個の VCSEL を用いる周波数走査干渉計を製作し、静的長さ測定の精度評価を行なう。良好な測定精度を得るためには周波数走査幅を正確に決定する必要がある。そこでブロックゲージを用いた基準干渉計を導入してそこから得られる2つのインターフェログラムの位相シフト量を用いる。MEMS および金属単結晶粒のサイズに近い $100\mu\text{m}$ レベルの寸法測定を正確に行えることを実験的に確認する。

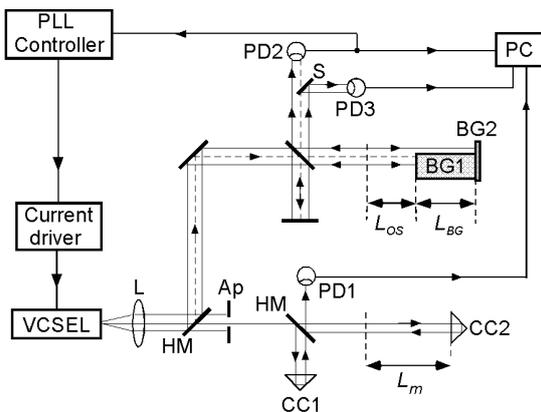


図1 静的長さの測定システム

(2) 次のステップとして、図2に示すような VCSEL を2個用いるシステムを構成し、

両 VCSEL の発振周波数を同時かつ相互に逆方向に走査させてインターフェログラムを取得し、コンピュータ上で計算により復調された位相シフト量の差分から光路長に付加したミラー変位量を検出する。この変位量は試料の熱的変形量を模したものである。

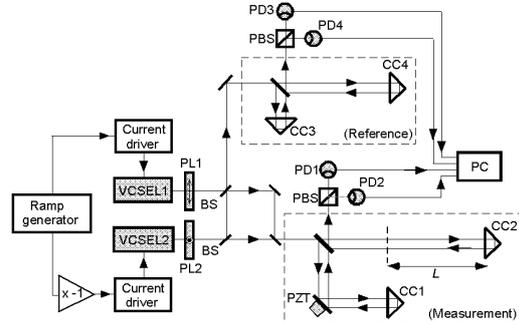


図2 静的長さ・動的変位検出システム

(3) 干渉計部分に拡大結像光学系を導入して顕微干渉計化し、精密切削加工された微小金属試料の高さ分布を干渉縞画像から計算し、試料形状を計算機内で再構成する。このとき試料に外部から温度変化を与えて熱膨張を誘起し、ナノメートルレベルと予測される極めてわずかな変形を捉える。

4. 研究成果

(1) 静的長さの測定実験では干渉縞位相変化の勾配を用いて長さ算出の高精度化を計る目的で、図3に示すような位相同期ループ (Phase-Locked-Loop: PLL) システムを設計・製作した。このシステムを用いると周波数走査速度が安定化され位相勾配の高精度決定が可能となるとともに、次ステップの検証実験で2つの VCSEL の周波数走査範囲を正確に一致させることが可能になる。

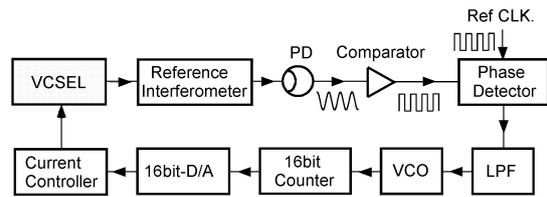


図3 製作された PLL システムのブロック図

(2) 図4は実験で取得されたインターフェログラムおよびPLLの参照クロックである。W1は測長干渉計、W2、W3は基準干渉計のインターフェログラムで、製作した PLL システムの効果でW3が基準クロック WPLL に位相同期されていることがわかる。図5はこれらインターフェログラムのスペクトル、図6はこれらスペクトルからフーリエ変換法で算出された位相シフトの一例をそれぞれ

示しており、PLLの効果により全て直線となっている。これらの位相勾配値を最小自乗近似で求めて長さを測定したところ、ミクロンレベルの測長精度が得られており、微小試料のサイズ測定に対して十分有効であることがわかった。

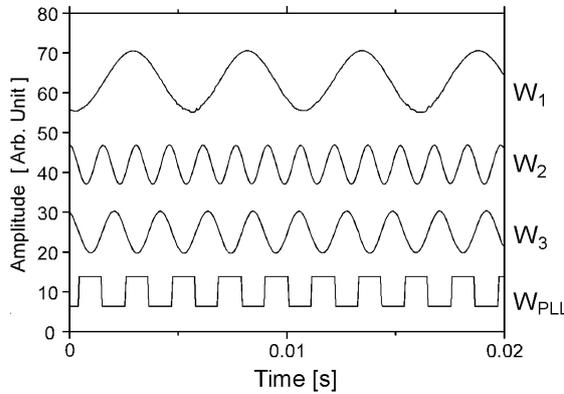


図4 インターフェログラムと基準クロック

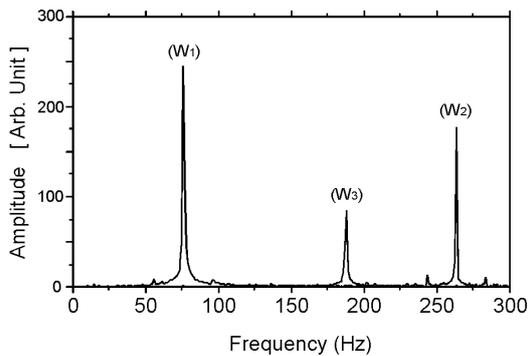


図5 各インターフェログラムのスペクトル

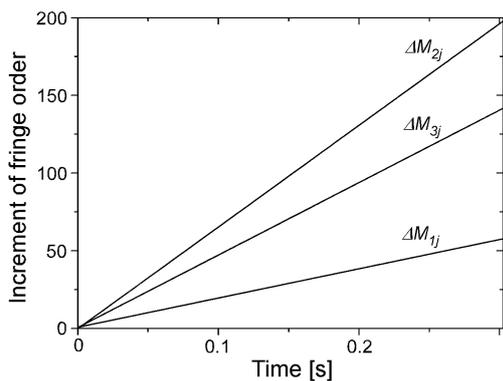


図6 復調された各位相シフト

(3) 図1のシステムをもとに構築された図2のシステムにおいてPZTにより測長干渉計に与えたミラー変位を検出したところ、PZTに印加した電圧と本システムで検出された変位量の間にはよい一致が見られた。本測定結果から見積もられたPZTの電圧伸び

率は $0.15\mu\text{m}/\text{V}$ となり、メーカー公表値とよく一致した。

(4) 次に図7に示すように、干渉計ミラー面上に試験サンプルを設置し、参照ミラー光束との間で生じる干渉縞を非球面レンズによりCCD上に拡大結像させた。試験サンプルとしてCu材質の1cm四方ブロック表面に精密加工技術で作製された $200\mu\text{m}$ 立方の微小立方体構造を用いた(図8)。光学系の結像倍率は3倍である。

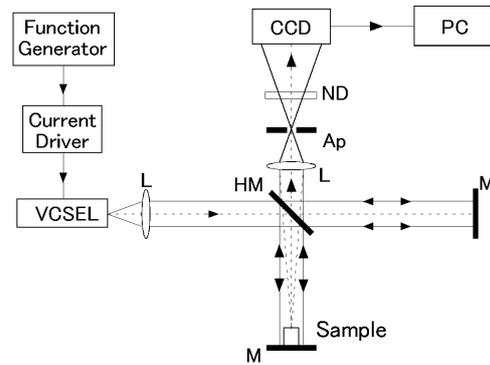


図7 微小立方体試料の形状測定システム

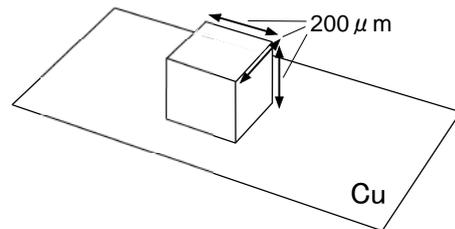


図8 試料物体の外観

(5) 図9はCCDで捉えた干渉縞画像を示しており、画面中央部に立方体構造が位置している。VCSELの周波数を走査すると画面全体に分布する干渉縞位相がシフトし、CCD上のある1画素において図10に示すようなインターフェログラムが取得される。各画素について同様のインターフェログラムが取得され、その位相シフト量から各画素座標における試料の高さ分布を再構成したものを図11に示す。画素数は 100×100 画素である。このように被検試料の形状を正確に検出されていることがわかる。

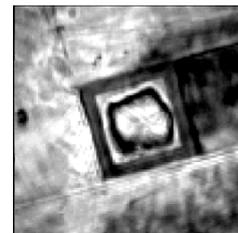


図9 取得干渉縞画像の一例

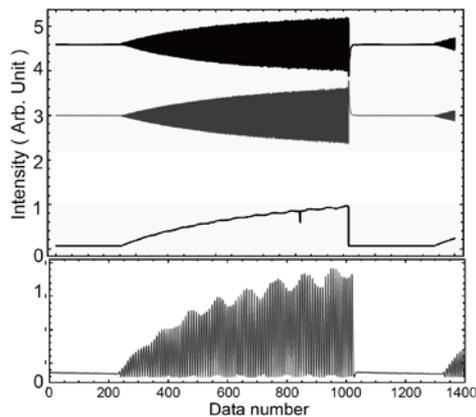


図 10 CCD 画素上における
取得インターフェログラムの一例

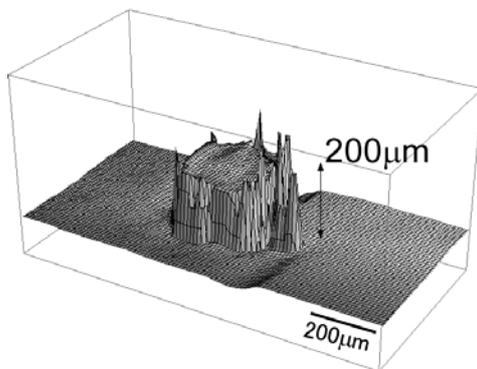


図 11 全画素データからコンピュータ内
で再構成された試料形状

(6) 干渉計構成はそのままの状態として、光源に 2 個の VCSEL を使用し、同時・逆方向に各周波数を走査させてインターフェログラムを取得した。このときペルチェ素子により試料温度を数十 $^{\circ}\text{C}$ 程度上昇・下降させたところ、各 VCSEL の位相シフト量の差分量から試料の変形量 ($\sim 1\text{nm}$) が良好に検出された。この数値は Cu の温度膨張係数および試料高さから理論的に見積もられる数値とよく一致している。以上述べたように、本研究における当初の目標はほぼ達成されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

1) S. Kakuma and Y. Katase: Resolution improvement in vertical-cavity-surface-emitting-laser diode interferometry based on linear least-squares estimation of phase gradients of phase-locked fringes, *Opt. Rev.*, Vol.17, 2010, pp.481-485, 査読有

2) 覚間誠一、片瀬康彦: 波長走査半導体レ

ーザによる高精度長さ測定、光アライアンス、20 巻、2009、pp.41-45、査読無

[学会発表] (計 7 件)

1) 覚間誠一、片瀬康彦: 面発光型半導体レーザー顕微干涉計による微小物体の精密形状計測、精密工学会秋季大会学術講演会、平成 23 年 9 月 21 日、金沢大学工学部 (金沢県金沢市)

2) 片瀬康彦、覚間誠一: 広領域周波数走査面発光半導体レーザー干渉計による微小物体の 3 次元形状計測、*Optics & Photonics Japan 2010*、平成 22 年 11 月 10 日、中央大学駿河台記念館 (東京都千代田区)

3) 覚間誠一、片瀬康彦: 面発光型半導体レーザーを用いた広領域波長走査干渉測長法、光計測シンポジウム、平成 22 年 6 月 9 日、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)

4) 覚間誠一、片瀬康彦: PLL 型波長走査干渉計を用いた干渉縞位相勾配推定による絶対長さ測定、2009 年度精密工学会秋季大会学術講演会、平成 21 年 9 月 12 日、神戸大学 (神戸市)

5) 片瀬康彦、覚間誠一: PLL 型周波数走査 VCSEL を用いたキャリア位相勾配推定による精密長さ測定、*Optics & Photonics Japan 2009*、平成 21 年 11 月 26 日、新潟朱鷺メッセ (新潟市)

6) 覚間誠一、片瀬康彦: 双方向周波数走査面発光レーザーを用いる高安定・高分解能干渉測長、第 56 回応用物理学会関係連合講演会、平成 21 年 4 月 1 日 筑波大学 (つくば市)

7) 覚間誠一、片瀬康彦: 一対の面発光レーザーによる高精度周波数走査干渉測長法、2009 年度精密工学会春季大会学術講演会、平成 21 年 3 月 12 日、中央大学 (東京都千代田区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

覚間 誠一 (KAKUMA SEIICHI)

北海道大学・大学院工学研究院・助教