

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 27 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760366

研究課題名(和文)空間周波数コム光源を用いた計測システムの開発

研究課題名(英文)Development of dimension measurement system using spatial frequency comb

研究代表者

崔 森悦(Choi, Samuel)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：60568418

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：光干渉計は、光波の干渉を利用して測定物体の様々なパラメータ(長さ、形状、断層、膜厚、歪み、分光特性等)を測ることができる。そのため、古くから産業界での製品検査装置から医療検査装置まで幅広く用いられている。我々は、通常の白色干渉法では計測が難しい薄膜の反射面形状計測に主眼を置き、とびとびの離散的な周波数成分から成る波長幅の広い特殊な光の周波数成分を走査可能な光源をSuper luminescent diodeと空間周波数フィルタ及び空間光変調器を用いて制作し、その干渉特性を生かした新しい計測システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：The optical interferometer has been widely used in not only the industrial inspection but medical field, since the interference of light wave provides the dimension metrology technique to measure parameters such as length, shape, thickness, distortion, spectrum. In this study, we place the focus on the utilization of the interference phase based on the multi-frequency sweeping in the surface profile measurement of thin films, which is difficult for a conventional low-coherence interferometry. By using a super luminescent diode and a spatial frequency filter such as a liquid crystal spatial light modulator, a tunable multi-frequency light source which can sweep the interval frequency and center frequency independently was developed for novel optical measurement system. We revealed the relationship between the interference phase and multi-frequency scanning, and conducted thickness profile measurements of a glass thin film for experimental confirmation of the proposed principle.

研究分野：計測工学

科研費の分科・細目：光源技術

キーワード：形状計測 光周波数コム 光空間変調 干渉計測 光コヒーレンストモグラフィ

### 1. 研究開始当初の背景

国内外の光周波数コムを用いた距離計測手法は主に位相同期（モード同期）されたモードの干渉ビート信号の位相を計測する手法である。日本の 1m 原器にも使用されるモード同期ファイバレーザを用いた距離計測や 2 台の共振器型光周波数コムの干渉ビート信号とレーザドップラー振動計の原理を用いた 3 次元計測システムが代表的である。これらの共振器構造を持つコム光源は GHz 以上のコム間隔で周波数間隔可変な広帯域光コム生成が困難であるため、数 mm 付近の近距離での精密形状計測や断層計測への応用には向いていない。

研究代表者らは、離散的な多波長成分による高次の干渉ピークに着目し、光コム干渉法を提案してきた。この方法は帯域幅 80 nm の 25 GHz 周波数可変スーパーコンティニウム光によって実現され、30 μm 程度の分解能で深さ 1 mm までのガラス板の 3 次元断層計測が行われた。以上のような研究経緯から、①「対称的な周波数間隔掃引」による測定時間及び分解能向上、②「局所的コム構造を持つスペクトル」による測定レンジの拡張、③光コム干渉法の「フィゾー干渉計への導入」、及び④「正弦波位相変調 (Simusoidal phase modulation:SPM) の導入」による測定精度向上の着想に至った。

本研究は、現在基礎実験が行われている③と④の技術に加え、新たに①と②のアイデアを導入した空間的周波数走査によって疑似的な周波数コムを生成する光源を用いた新たな干渉計測法の開発を進める。

### 2. 研究の目的

従来の干渉縞解析法では  $2\pi$  の位相曖昧さのため測定レンジが波長以下に制限され、白色干渉（低コヒーレンス干渉）法では参照ミラーの掃引範囲によって制限される。新たに光コムの離散的な多波長成分を用いることによって測定範囲を飛躍的に広めることが可能になる。さらに、既存の白色干渉では不可能であった共通光路干渉計（フィゾー干渉計など）への導入が可能となり波及効果が予想される。

本研究では、光コムの空間周波数走査手法を用いた干渉計測システムの開発する。数 mm から数 10 m に及ぶ広い測定レンジで nm 精度の距離、膜厚、表面形状、及び生体内部構造の精密計測を実現する。以下に計測システムの具体的な性能目標と従来手法との比較をまとめる。

	光周波数コム距離計測	光コム干渉計測	本方式の目標
光源	フェムト秒レーザ (共振器型コム光源)	位相変調器+SC光 (非共振器型)	空間周波数コム光源 (非共振器型)
測定精度	~1 μm(10 <sup>-9</sup> )	~1 μm(10 <sup>-9</sup> )	~10 nm(10 <sup>-8</sup> )
測定分解能	10 μm 程度	30 μm 程度	1 μm 程度
測定レンジ	数 10 m~数 100 m	数 mm~数 10 mm	数 mm~数 100 m
周波数間隔	~100 MHz 程度	10~25 GHz	数 10 MHz~100THz
周波数掃引幅	固定	~500 MHz	ほぼ無制限
位相計測	ビート信号の位相計測	x	SPMによる位相計測

表 1. 本方式の目標と従来手法との比較

### 3. 研究の方法

本研究で開発する光干渉計測装置は、以下の図 1 に示す様な測定原理に基づいている。

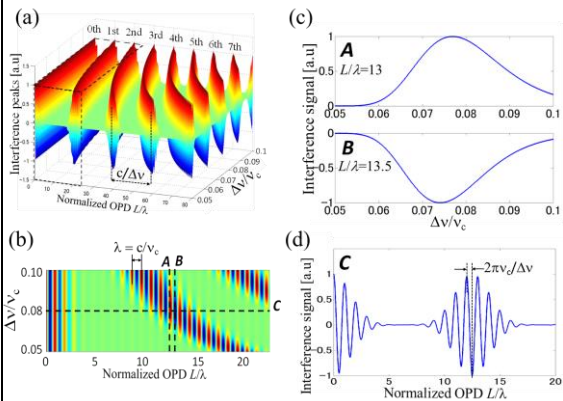


図 1. 多波長光源の干渉特性

光コムのような多波長光源では、図 1(a)及び (b)に示す様に光路差軸上に周波数間隔に反比例する距離ごとに干渉振幅ピーク（高次の干渉ピーク）が存在する。従来の白色干渉法のように光路差を変化させた場合は、図 1(d)のように干渉フリンジが観測される。一方、周波数間隔を対称的に変化させた場合は、図 1(c)のようにフリンジの無い干渉振幅の変化が観測される。この場合、干渉位相に依存して振幅の極性と大きさが変化する。

つまり、干渉が包絡線として検出されるので、ピーク位置の特定が早くなり、測定時間が短縮される。更に、中心波長をシフトすることで以下の図に示す様に一定の条件の元で干渉ピークを消光（キャンセリング）することが可能となる。

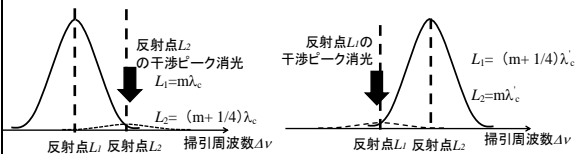


図 2. 干渉ピークのキャンセリング効果

例えば、膜厚計測の場合、隣り合う二つの反射点が測定分解能よりも短い距離で隣接していると、干渉信号が重なって二つの反射点が識別できなくなる。このような場合、光源の中心波長を全体的にシフトすることで片方のピークを消光でき、二つの反射点が識別できる。下図のように反射点の位置 L1 か L2 で中心波長を四分の  $\lambda_c$  程度シフトすると干渉ピークは null 出力となって消光される。空間周波数コム光源を用いることによって、制限のない波長シフトが実現できる。

上記の干渉特性を実験によって検証し、実際の計測（特に薄膜形状計測）へ応用するために、図 3 に示す様な多波長走査光源と光学干渉計を設計した。制作した多波長走査光源は空間周波数フィルタの導入により周波数間隔を対称的に掃引でき、中心周波数も独立的に走査することが可能である。

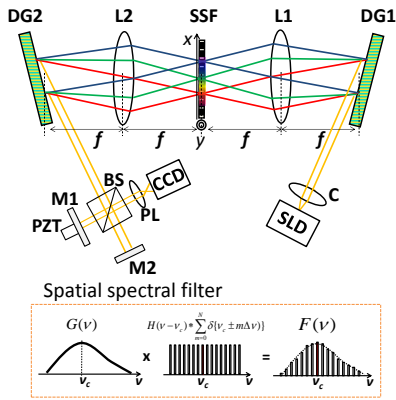


図3. 多波長走査光源の概念

光源では、広帯域光源からの光を回折格子とレンズの  $f$ - $f$  配置によって空間上に光周波数（波数）スペクトルを生成する。このスペクトルの結像面にマスクまたは液晶空間光変調器（SLM）で制作した空間周波数フィルタを配置し、空間的な強度および位相変調を可能にする。SLM からの透過または反射した光を再度集光することによって、コム状のスペクトルを持つ、多波長の操作が可能な疑似的光コムが生成される。

#### 4. 研究成果

本研究では、上記の測定原理及び光源を用いて、干渉特性の実験的検証及び薄膜表面形状計測実験を通じた応用可能性について検討した。

##### (1) 多波長走査光源の開発

図4に構築した光源の出力スペクトルを示す。離散的多波長成分を持つ疑似光コムを生成することができた。また、図5に示す様に周波数間隔と中心周波数を独立的且つ線形に走査することができた。

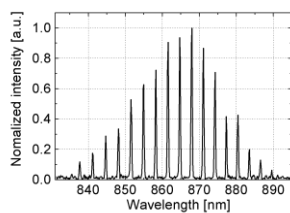


図4. 生成された疑似光コムのスペクトル

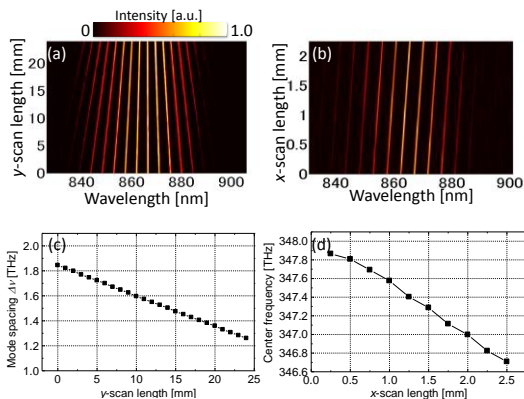


図5. 周波数間隔掃引と中心周波数走査

##### (2) 干渉特性の実証

上記で述べた干渉特性の実験的検証のために実際に干渉計測を行った。測定対象を平面ミラーとし、周波数間隔の対称的掃引と中心周波数の走査による干渉ピークの変化について調べた。図6に中波数間隔の対称的掃引による干渉フリンジの無い干渉振幅の変化を観測した結果を示す。

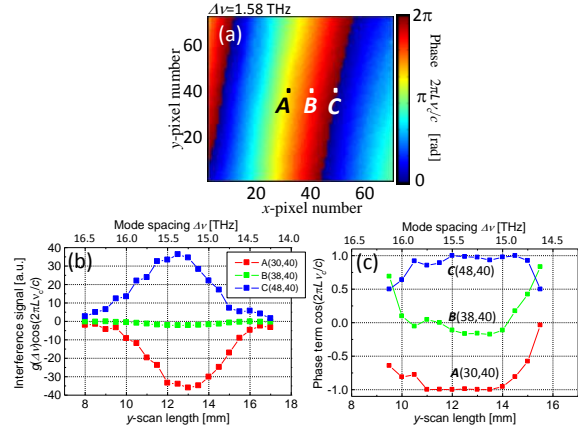


図6. 干渉特性実証結果, (a)平面ミラーの表面位相分布と対称的周波数間隔掃引時の (b) 干渉振幅と (c) 位相の変化

次に干渉位相と中心周波数の関係について検証を行った。図7に示す様に、周波数変化による位相の変化量が次数に比例して増加することが確認された。

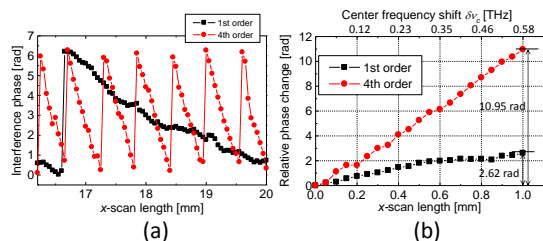


図7. 中心周波数走査による干渉位相の変化量

以上の実験により、多波長走査光源を用いた場合の干渉特性が定量的に実証された。

##### (3) 空間光変調器の導入

マスクを用いた空間周波数フィルタは機械的な動きを伴うため周波数走査に外乱による変動や誤差が生じ易い欠点があった。新たな試みとして電子的な制御のみで周波数走査が可能な空間光変調器（SLM）を導入し多波長スペクトルの生成と干渉特性の計測を行った。図8に実験系を示す。

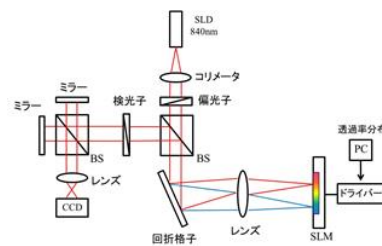


図8. SLMを用いた多波長走査光源



SLM の光振幅変調を用いることで空間状に分布するスペクトルを整形し，図 9 に示す様な多波長スペクトルを得ることができた。

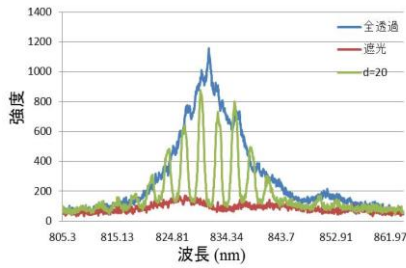


図 9. SLM により生成した多波長スペクトル

高次の干渉は 3 次まで確認することができた。また対称的周波数間隔掃引によって干渉ピーク位置が変化することを確認した。図 10 に得られたスペクトルのフーリエ変換によってシミュレーションした周波数間隔に対応する干渉ピーク位置を示す。干渉ピークの掃引可能範囲は 0.19 ~ 0.96 mm であった。

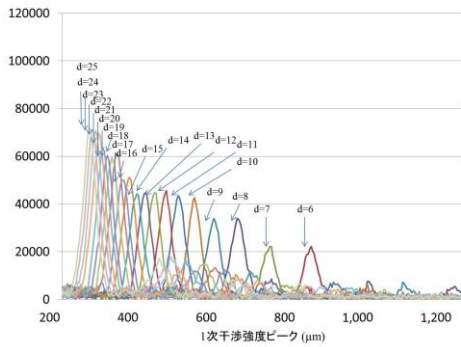


図 10. 高次干渉ピークのシミュレーション

生成した多波長光を光源とするマイケルソン型干渉計を用いて平面ミラーの干渉画像を観測し，周波数間隔変化に対する干渉縞の強度変化と中心周波数変化に対する干渉縞の移動を図 11 に示す。図 11(b) に示すように，周波数間隔掃引による干渉ピークが確認された。また，図 11(c) に示すような中心周波数走査による干渉強度の変化から，干渉位相のシフトが確認できた。

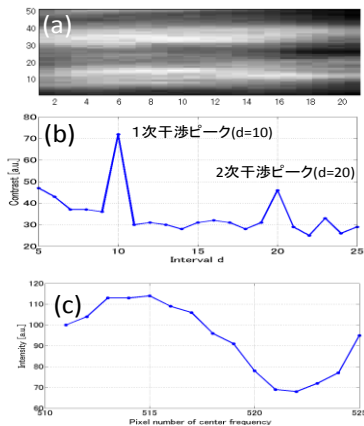


図 11. 干渉特性の観測結果

#### (4) 薄膜状計測への挑戦

図 3 に示した光学系に測定物体として膜厚が約 20  $\mu\text{m}$  のガラス薄膜を置き表面と裏面からの 1 次干渉を観測した。周波数間隔は 1042 GHz から 2213 GHz まで掃引した。また，中心周波数を変化させて干渉位相を約  $\pi$  rad シフトして 2 回の計測を行った。図 12 に二つの異なった中心周波数に対する干渉強度と位相分布を示す。表と裏面の反射位置が干渉強度ピークとして観測され，それぞれの干渉強度ピーク付近の位相分布の違いから二つの干渉を区別できた。得られた位相分布に傾きが生じている原因は，空間周波数フィルタのマスクを機械的に移動した際の傾きによる誤差と考えられる。また，異なる中心周波数で生成された干渉振幅は位相が  $\pi$  程度シフトされているので，ピークの正負が逆転していることが確認できた。

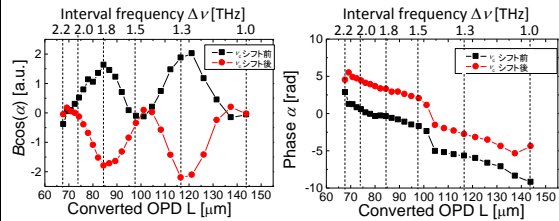


図 12. ガラス薄膜の干渉振幅と位相

それぞれの反射面からの干渉振幅ピーク付近の干渉位相分布が得られるので高精度な断面形状の計測が可能となる。表面と裏面の干渉ピーク点での 2 次元位相分布から求めた面形状を図 13 に示す。

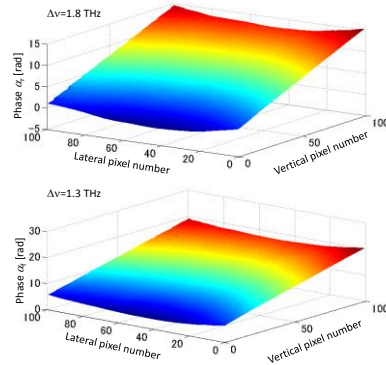


図 13. 膜厚 20  $\mu\text{m}$  薄膜の表面と裏面の形状

以上のように，空間周波数フィルタを用いた多波長走査光源を開発し，薄膜形状計測への応用が可能であることが示された。マスクを用いる場合は，マスクの精度と機械的な動きに対する誤差が課題として残る。また，SLM を用いる場合は，空間分解能による制限と，反射率の低さから光パワーの効率が制限される問題がある。今後の性能向上と応用展開のためには，透過型の SLM の導入または，LN 位相変調器の導入による全ファイバ光学系と時間的変調による光コム生成が好ましいと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

[1] S. Choi, R. Sato, H. Kato, O. Sasaki, and T. Suzuki, "Multi-frequency scanning interferometry using variable spatial spectral filter," *Opt. Commun.*, 査読有, vol. **316**, 2014, 168–173.

DOI: 10.1016/j.optcom.2013.12.015

[2] S. Choi, K. Kashiwagi, S. Kojima, Y. Kasuya, and T. Kurokawa, "Two-wavelength multi-gigahertz frequency comb-based interferometry for full-field profilometry," *Appl. phys. express*, 査読有, vol. **6**, 2013, 106601-4.

DOI: 10.7567/APEX.6.106601

[3] T. Suzuki, H. Matsui, S. Choi, and O. Sasaki, "Low-coherence interferometry based on continuous wavelet transform," *Opt. Commun.*, 査読有, vol. **311**, 2013, 172-176.

DOI: 10.1016/j.optcom.2013.08.018

[4] S. Choi, K. Otsuki, O. Sasaki, and T. Suzuki, "Profile measurement of glass sheet using multiple wavelength backpropagation interferometry," *Appl. Opt.*, 査読有, vol. **52**, 2013, 3726 - 3731.

DOI: 10.1364/AO.52.003726

[5] 柏木謙, 崔森悦, 塩田達俊, 田中洋介, 黒川隆志, マルチギガヘルツコム発生技術とその応用, アドコムメディア, O plus E, 査読無, Vol. 35, No. 10, 2013, 1155-1160.

<http://jglobal.jst.go.jp/public/20090422/201302288099323351>

[6] S. Choi, K. Kashiwagi, Y. Kasuya, S. Kojima, T. Shioda, and T. Kurokawa, "Multi-gigahertz frequency comb-based interferometry using frequency-variable supercontinuum generated by optical pulse synthesizer," *Opt. Express*, 査読有, vol. **20**, 2012, 27820–9.

DOI: 10.1364/OE.20.027820

[7] O. Sasaki, S. Hirakubo, S. Choi, and T. Suzuki, "Utilization of frequency information in a linear wavenumber-scanning interferometer for profile measurement of a thin film," *Appl. Opt.*, 査読有, vol. **51**, 2012, 2429- 2435.

DOI: 10.1364/AO.51.002429

[8] T. Suzuki, T. Adachi, O. Sasaki, and S. Choi, "Phase-shifting laser diode interferometer using pulse modulation," *Appl. Opt.*, 査読有, vol. **51**, 2012, 4109-4112.

DOI: 10.1364/AO.51.004109

[9] 崔森悦, 柏木謙, 黒川隆志, 多波光応用技術 光周波数コムの発生と干渉計測への応用, アドコムメディア, O plus E, 査読無, Vol. 34, No. 4, 2012, 314-319.

[10] T. Suzuki, R. Nagai, O. Sasaki, and S. Choi, "Rapid wavelength scanning based on acousto-optically tuned external-cavity laser diode," *Opt. Commun.*, 査読有, vol. **284**, 2011, 4615 –8.

DOI: 10.1016/j.optcom.2011.06.012

<http://jglobal.jst.go.jp/public/20090422/201202289355502780>

〔学会発表〕(計 8 件)

[1] 佐藤 瞭子, 崔 森悦, 佐々木 修己, 鈴木 孝昌, "空間スペクトラルフィルタを用いた多波長走査干渉計測", *Optics & Photonics Japan 2013*, 14pC4, 2013 年 11 月 14 日, 奈良県新公会堂.

[2] 高塚 駿亮, 崔 森悦, 佐々木 修己, 鈴木 孝昌, "液晶型空間光変調器を用いた多波長光

の生成と干渉計測への応用", *Optics & Photonics Japan 2013*, 14pC4, 2013 年 11 月 14 日, 奈良県新公会堂.

[3] S. Choi, O. Sasaki, T. Watanabe, T. Suzuki, "OCT based on multi-frequency sweeping Fizeau interferometer with phase modulating method," *Proceedings of SPIE*, Vol. 8839, 2013 年 8 月 25 日, San Diego convention center.

[4] S. Choi, S. Takatsuka, O. Sasaki, T. Suzuki, "Multi-frequency light source using spatial light modulator for profilometry," *The 10th conference on lasers and electro-optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013) WPF-15*, 2013 年 7 月 3 日, 国立京都国際会館.

[5] S. Choi, O. Sasaki, and T. Suzuki, "Multi-frequency sweeping interferometry using spatial optical frequency modulation", *Proceedings of SPIE*, Vol.8563, 2012 年 11 月 6 日, Beijing international convention center.

[6] S. Choi, J. Hukumoto, O. Sasaki, and T. Suzuki, "Multi-frequency Sweeping Sinusoidal Phase Modulated Fizeau Interferometer for OCT", *The 17th OptoElectronics and Communications Conference*, 2012 年 7 月 5 日, BEXCO Busan.

[7] 加藤 平一, 崔 森悦, 佐々木 修己, 鈴木 孝昌, "空間周波数フィルタを用いたコム光源を用いた干渉計測" *Optics & Photonics Japan 2011*, 29aF4, 2011 年 11 月 29 日, 大阪大学吹田キャンパス.

[8] S. Choi, H. Kato, O. Sasaki, and T. Suzuki, "Frequency comb generator using spatial frequency optical filter and its interferometric characteristics", *The ninth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering*, 2011 年 9 月 8 日, Radisson Blue Marina Palace Hotel.

〔その他〕

ホームページ等

<http://optlab.eng.niigata-u.ac.jp/res.html>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

崔 森悦 (CHOI, Samuel)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：60568418