

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560047

研究課題名(和文) フィードバック型広帯域干渉計による位相・群屈折率分散計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of system for measurement of phase refractive and group refractive dispersions by broadband interferometer

研究代表者

平井 亜紀子 (Hirai, Akiko)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：00357849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：光科学、光学産業の多くの分野で、光学材料の屈折率やその波長依存性(分散)の正確な情報が必要とされているが、 $10^{-5}$ から $10^{-6}$ オーダーで信頼性が確保できる技術は少なく、またこれまではレーザーや輝線スペクトルのような離散的な単一波長における屈折率の値しか直接精密測定できなかった。

本研究では、発光スペクトル領域の広いブロードバンド光源を用い、バリエブルパス(光路長可変)干渉法、光路長補償系と分光器を組み合わせることにより、光学材料の位相屈折率分散および群屈折率分散を精密に直接計測する手法を提案し、シミュレーションにより原理を確認した。

研究成果の概要(英文)：Precise information on refractive index and its dispersion of optical material is required in many fields of optical science and industry. There are only a few measurement techniques to measure refractive index with the order of  $10^{-5}$  to  $10^{-6}$  uncertainty and these techniques can be available only for monochromatic light source such as lasers and emission lines of spectral lamps. Therefore these techniques directly provide only the refractive index at a certain wavelength but don't provide refractive index dispersion.

A new technique that directly measures phase refractive index dispersion and group refractive index dispersion is proposed. The technique is a combination of a broadband light source, variable path interferometer, optical path compensation system and a spectrometer. The principle of the proposed technique was confirmed by simulation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用工学・量子光工学

キーワード：屈折率 群屈折率 分散 干渉計測 広帯域光干渉計 チャンネルドスペクトル 光計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 背景

半導体露光装置や光通信など、最先端の光技術分野では、設計された光学系性能を最大限発揮するために、光学部品の屈折率やその波長依存性(分散)、空間分布、温度特性などを $10^{-6}$ 程度の精度で正確に測定、管理する必要がある。屈折率には、光波の等位相面の伝播速度に関する位相屈折率と、光エネルギー(光波のかたまりの包絡線ピーク位置)の伝播速度に関する群屈折率とがある。位相屈折率は、半導体露光装置、デジタルカメラ、天文等の分野で重要となる光学材料の性質であり、群屈折率は、光通信、フェムト秒レーザー応用、光コヒーレンストモグラフィ(OCT)等の分野で重要となる光学材料の性質である。

位相屈折率を測定する場合、国内外で最も広く用いられている方法は、試料をプリズム形状に加工し、放射ランプの輝線スペクトルやレーザーで頂角と屈折角を測定する最小偏角法である。位相屈折率分散は複数波長における位相屈折率を測定し、波長分散曲線の近似式の係数を求めることが一般的である。しかし、角度測定の高精度化・信頼性確保が困難、吸収波長があると分散曲線が歪み近似式では分散が正しく求められない、適当な輝線スペクトルがない波長領域が存在する、という問題がある。そのため、連続スペクトルのブロードバンド光を用いた位相屈折率分散曲線の直接測定が望まれているが、筆者の知る限り報告例はない。

一方、群屈折率やその分散の測定には、試料を平行平板状に加工し、ブロードバンド光の干渉を利用する方法(低コヒーレンス干渉法)が国内外で多く提案されている。しかし一般的に、試料の幾何学的厚さを別途測定する必要がある、干渉縞が歪まないように波長分散の小さい試料や薄い試料、あるいは狭い波長範囲に適用が限られているなどの制限があるとともに、測定精度も $10^{-3}$ から $10^{-4}$ と不十分であった。

(2) 既存手法

研究代表者らは、固体の位相屈折率測定用にバリアブルパス干渉計を利用して長さ測定に基づいた高精度な位相屈折率測定法を提案・開発している。干渉による屈折率測定では、被測定試料の幾何学的厚さと光学的厚さ(幾何学的厚さと屈折率の積)を測定し、その比から屈折率を求める。

長さ測定は高精度化・信頼性確保が容易であり、また、試料を厚くすると、相対測定精度を向上できるという特長がある。従来の干渉による固体屈折率測定は、被測定試料の幾何学的・光学的な「厚さの絶対値」を測定していた。しかし厚さの絶対値を精度良く測定することは困難であり、 $10^{-6}$ オーダーの屈折率測定精度の報告はない。研究代表者らが開発したバリアブルパス干渉法は、幾何学的・

光学的な「厚さの変化量」を測定するもので、「厚さの絶対値」を測定するのに比べて高精度な屈折率測定を行うことができるという特長がある。バリアブルパス干渉法は、厚さ変化が容易な気体や液体での高精度測定例はあるが、固体では試料厚さを変化させることが困難であった。研究代表者らが2つのプリズムを利用する手法を世界で初めて提案し、試料厚さを約10mm変化させて、He-Neレーザー波長(633nm)において、 $1.1 \times 10^{-6}$ の位相屈折率測定精度を達成した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、白色LEDのように連続スペクトルを持つブロードバンド光にバリアブルパス干渉法を適用し、分光器と組み合わせることで位相屈折率分散、群屈折率分散の直接測定技術を開発することである。しかし、スペクトル幅の広いブロードバンド光では光源の可干渉距離が短くなり(一般に $100 \mu\text{m}$ 以下)、厚さ変化量が光源の可干渉距離より大きくなると、分光器を用いて波長を分離しても干渉縞が消滅し測定できない。この問題を解決するため、フィードバック型干渉計を導入し、厚さ変化量が多い場合もその変化量を補償してブロードバンド光の干渉縞測定可能な技術を開発する。そして、同一の干渉計で位相屈折率分散と群屈折率分散を同時に $10^{-5}$ の精度で測定するシステムを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 群屈折率分散測定法

図1に開発システムを示す。ブロードバンド光源からの光をビームスプリッターで二分割し、一方を被測定プリズムを透過する測定光、もう一方を参照光とし、再び重ね合わせて分光器で観測する(試料中光路長測定干渉計 Int 1)。被測定プリズムを透過した光が斜面で全反射せず外部に出射するように、別のプリズム(出射プリズムと呼ぶ)と屈折率マッチング液を利用する。干渉計 Int 1 から出

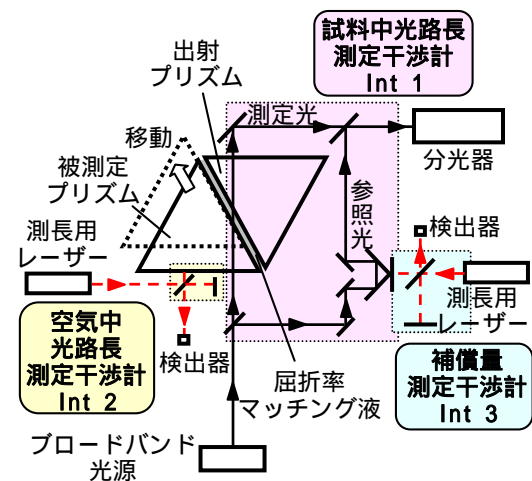


図1 屈折率分散測定システム

たブロードバンド光の干渉信号を分光すると、スペクトル中に構造が観測される。これはチャンネルドスペクトルと呼ばれ、波数（波長の逆数）軸の周期は干渉計の光路長差の逆数である。光路中の媒質に屈折率分散がある場合は、波長により光路長差が異なりチャンネルドスペクトルの周期も異なる。スペクトルの局所的周期から各波長における光路長差が求められる。次に、なめらかに走査できる高精度長距離移動ステージを用い、被測定プリズムを、出射プリズムに対向する面に沿って移動させる。移動後のチャンネルドスペクトルから再び光路長差を計算し、移動前の光路長差との差を取ると、波長毎の試料中の光路長変化量が求められる。このとき同時に、被測定プリズムの底面（光軸に垂直な面）を反射面として、空気中光路長測定干渉計 Int 2 で空気中光路長変化を測定する。

ブロードバンド光の可干渉距離以上の光路長差を与えた場合は干渉縞が消滅し、チャンネルドスペクトルの構造が細くなり測定できない。よって図 1 に示すように、測定光路長変化を参照光路長の変化により補償し、補償量測定干渉計 Int 3 でその補償量を測定することにより、試料中の光路長変化量を求める。屈折率の波長分散のため、測定光路長の変化量は波長により異なるが、中心波長における測定光路長変化量を補償するにすれば、通常の媒質の波長分散では測定波長帯域全体でチャンネルドスペクトルが観測可能である。

#### (2) 群屈折率分散測定

チャンネルドスペクトルからは、光エネルギーの伝播という観点からの光路長が求められる。そのため、空気中光路長変化と試料中光路長変化の比から、空気に対する試料の相対群屈折率分散が求められる。空気の群屈折率は、気温と気圧から経験式を用いて精密に得られるので、これに乗じて試料の絶対群屈折率分散が求められる。出射プリズムや屈折率マッチング液は測定中変化しないため、出射プリズムの頂角や屈折率、屈折率マッチング液の屈折率は結果に影響を与えず、任意の値のものを用いることができる。

#### (3) 位相屈折率分散測定法

位相屈折率分散を測定する場合は、光波の等位相面の伝播という観点からの光路長変化を求めなければならない。そのため、測定光路長変化をリアルタイムに補償しながら、各波長の干渉信号の位相変化を連続的に取得する。位相変化量から求めた空気中光路長変化と試料中光路長変化の比から、空気に対する試料の相対位相屈折率分散が求められる。空気の位相屈折率は、群屈折率の場合と同様に経験式を用いて補正する。群屈折率の場合と同様、出射プリズムや屈折率マッチング液の仕様は結果に影響を与えない。

## 4. 研究成果

提案原理を確認するため、シミュレーションを行った。ブロードバンド光源は中心波長 750 nm、半値全幅 120 nm のガウス型スペクトルとした。被測定プリズムの材質は BK7 とし、メーカーが提供している位相屈折率のセルマイヤーの分散式および係数を用いた。Int 1 の光路差がゼロの状態の時の、被測定プリズムの底面の位置、および参照光路中のコーナリフレクターの位置をそれぞれ原点とする。被測定プリズムの底面の光軸方向の位置を  $-5000 \mu\text{m}$  から  $+5000 \mu\text{m}$  まで変化させ、それにより生じる光路差を補償するため、Int 1 の参照光路の光路長を  $-2564.55 \mu\text{m}$  から  $+2564.55 \mu\text{m}$  まで変化させた。参照光路の光路長変化量は、波長 688 nm で常に光路差がゼロになり、光源のスペクトル範囲内全体にわたって分散が適度に補償されるよう、決定した。ここで、簡単のため、空気屈折率は 1 とした。

#### (1) 位相屈折率分散

被測定プリズムおよび参照光路中のコーナリフレクターを移動させたときの波長 650 nm, 750 nm, 850 nm の干渉縞の一部を図 2 に示す。干渉縞は、それぞれの振幅の最大値で正規化している。実効的な光路差は、それぞれの波長における被測定プリズムの位相屈折率と、光路長が補償されている波長 688 nm における被測定プリズムの位相屈折率の差に影響されるため、干渉縞の周期は、通常の空気中の干渉計のように波長に比例していない。

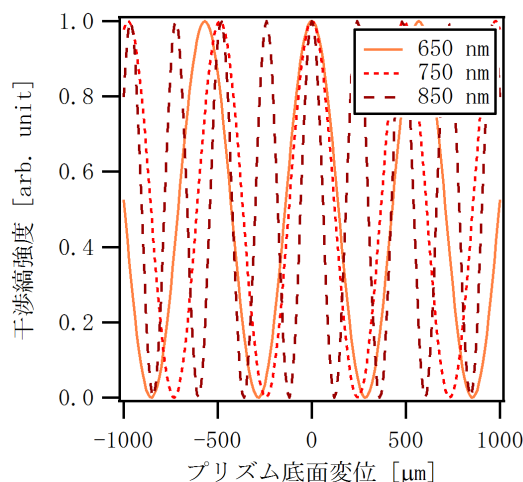


図 2 単一波長における干渉縞

これらの各波長の干渉縞から、フーリエ変換法を用いて位相変化量を求め、各波長における実効的な光路差の変化量を求める。この結果と Int 2、Int 3 で測定される被測定プリズムの底面の移動量、参照光路のコーナリフレクターの移動量から、各波長における位相屈折率を計算した。

いくつかの波長における結果を、メーカー提供のセルマイヤーの分散式および係数が

ら求められた位相屈折率分散とともに図3に示す。波長 700 nm 以外では、メーカーが提供している情報から計算された値とよく一致している。波長 700 nm での値がずれている原因は、実効光路差がゼロとなる波長 688 nm と近いため、波長 700 nm での実効光路差もゼロに近く、干渉縞の周波数が低くなり、フーリエ変換法におけるキャリア周波数成分の切り出しがきれいに行えなかったためである。このような場合は、実効光路差がゼロとなる波長が変わるように参照光路の航路長変化量を変えて再測定するか、干渉縞の周波数が低くても光路長変化量が正しく求められるような別の解析方法を用いれば良い。

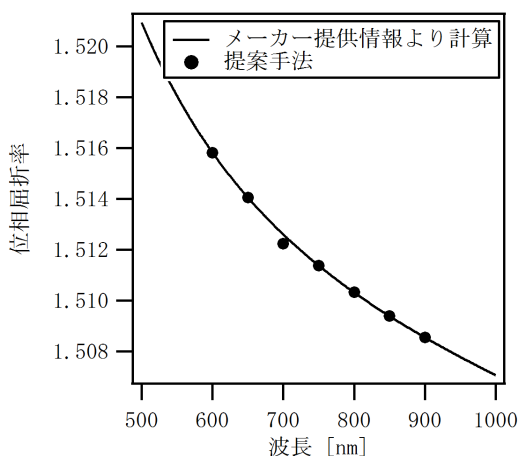


図3 位相屈折率

## (2) 群屈折率分散

被測定プリズムおよび参照光路中のコーナーリフレクターの移動前におけるチャネルドスペクトルを図4に示す。移動後も、光路差の符号が逆なだけで絶対値は同じため、チャネルドスペクトルの形状は同じである。

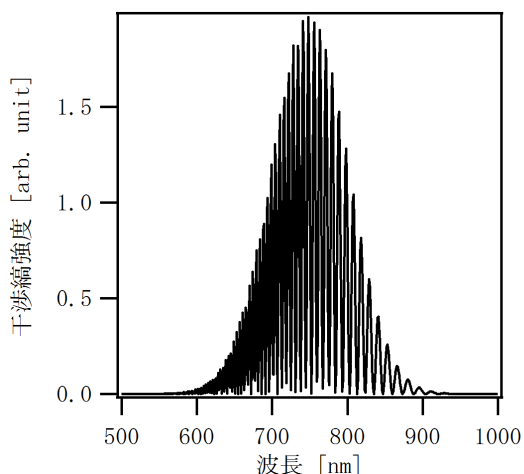


図4 プリズム移動前のチャネルドスペクトル

移動前後のチャネルドスペクトルから、フーリエ変換法を用いて、各波長における実効

的な光路差の変化量を求める。この結果と Int 2、Int 3 で測定される被測定プリズムの底面の移動量、参照光路のコーナーリフレクターの移動量から、群屈折率分散を計算した。比較対象となる群屈折率分散は、メーカー提供のセルマイヤーの分散式および係数から求められた位相屈折率分散から定義に基づいて計算した。メーカー提供情報より計算された群屈折率とともに提案手法による結果を図5に示す。光源のスペクトル領域内ではメーカー提供値とよく一致している。

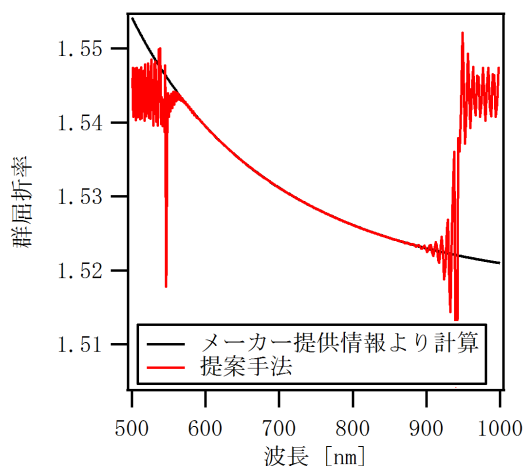


図5 群屈折率

これらの結果より、提案手法の測定原理が正しく、精密に位相屈折率分散、群屈折率分散が求められることが確認された。

## 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)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nmij.jp/~lgt-dms/lgt-std/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平井 亜紀子 (HIRAI, Akiko)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：00357849