

2022年1月18日

報道関係者各位

慶應義塾大学
産業技術総合研究所

デュアルコム分光を用いた平板光学材料の超高精度な屈折率・厚さ計測手法を開発 — 光学素子の高精度設計に期待 —

研究当時、慶應義塾大学大学院理工学研究科の住原花奈（現在は修了）、同大学理工学部物理学科岡野真人元専任講師（現防衛大学校准教授）、渡邊紳一教授、産業技術総合研究所物理計測標準研究部門光周波数計測研究グループの大久保章主任研究員、稲場肇研究グループ長の研究グループは、平板材料の厚さと屈折率を、同時に極めて高精度に計測する技術を開発しました。

光学レンズをはじめとした光学素子の設計には、材料を構成する物質の屈折率（※1）を正確に決定することが不可欠です。また、光学レンズ加工前の平板材料の正確な厚さの決定も重要です。今回、光の位相変化量を正確に直接計測できるデュアルコム分光法（※2）を用いて、平板シリコン材料の厚さと屈折率を、非接触で、多波長に対して高精度に同時計測する手法を開発しました。本手法は、材料の屈折率を、平板形状のまま、究極的な精度で計測できる画期的なものです。今後、各種光学材料の正確な屈折率計測に応用することで、光学素子の高精度設計につながることを期待できます。

本研究成果は、2022年1月12日（現地時間）に『Optics Express』で公開されました。

1. 本研究のポイント

- ・デュアルコム分光法を用いた、平板光学材料の厚さおよび屈折率の同時計測法を新たに開発。
- ・シリコン平板に対し、試料の加工が不要な同時計測法として最高の厚さ測定精度（相対値 3×10^{-6} ）および屈折率測定精度（相対値 2×10^{-5} ）を達成。
- ・多様な光学材料の厚さ・屈折率を精密に計測することにより、光学素子・装置の高精度設計に期待。

2. 研究背景と結果の概略

屈折率は物質の基本的な物理量の一つです。2つの物質における屈折率の違いによって、その境界面で光の屈折がおき、これがレンズを用いた集光の基礎となります。光の屈折角は屈折率に依存するため、光学レンズをはじめとした光学素子の設計には、素子を構成する物質の屈折率を正確に求めることが不可欠です。また、一般に光学レンズは平板ガラスを研磨して作ります。そこで、平板形状の物質について、その屈折率と厚さを同時に正確に計測できる技術があると大変便利です。

屈折率の値を高精度に求めるためには、古くから分光学的手法が用いられてきました。特に、最小偏角法（※3）が最も計測精度の高い手法として知られており、その相対精度は 2×10^{-6} に達します。しかしながら、最小偏角法は物質をプリズム形状に加工する必要があるため煩雑な前処理が必要でした。今回我々は、光の位相変化量を正確に直接計測できるデュアルコム分光法を用いることで、物質をプリズム形状に加工することなく、平板のまま、広い波長域における屈折率、および厚さを同時に高精度に計測する手法を開発しました。

3. 研究内容・成果

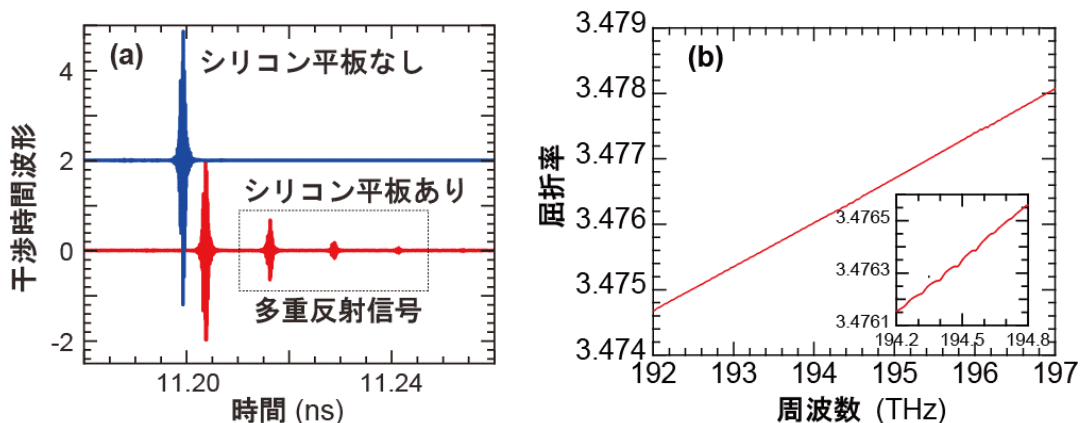
本研究では、屈折率の良く知られた物質であるシリコンの平板を試料として用いました。デュアルコム分光法を用いて、波長 $1.52\ \mu\text{m}\sim 1.57\ \mu\text{m}$ にわたって試料を透過した光に対する透過率と位相変化を調べました。図(a)はシリコン平板があるときとないときの干渉時間波形です。シリコン平板があるときは、試料の表面・裏面から複数回の光の反射（多重反射）が起こるため、それに起因する信号が現れます。この信号は物質内部での光の位相変化量を反映します。我々は、この多重反射信号を詳細に解析することでシリコン平板内部での光の位相変化量を求め、各波長での屈折率を求めました。

一般に、試料の厚さは長さの基準である「光の波長」に比べて非常に大きく、光が試料内に何波長分存在するのかが分からないので、観測される光の位相変化も正確に分かりません。その結果として計測される屈折率の精度が低くなります。今回、データ積算を重ねて各周波数での位相変化量の測定値のばらつきを抑えたこと、および光が何波長分試料に存在するかを決める新しい解析法を開発したことにより、試料に対する屈折率および厚さの測定精度が飛躍的に向上しました。さらにこの手法では、広い波長域における高精度な屈折率測定を同時に実施することが可能です。図(b)は、今回の手法で測定したシリコン平板屈折率の光周波数依存性です。例えば波長 $1550\ \text{nm}$ における屈折率測定値 3.47563 に対して精度は 6×10^{-5} でした（相対値： 2×10^{-5} ）。また同時に、試料の厚さ $520.473\ \mu\text{m}$ に対して精度 $1.5\ \text{nm}$ （相対値： 3×10^{-6} ）という高い精度で厚さを決定することにも成功しました。

なお、今回の実験では環境温度の評価不足のため、シリコン平板の屈折率の相対精度は 2×10^{-5} に留まりましたが、測定値のばらつき（標準偏差）は 4×10^{-6} であり、精度評価の結果から、一般的な高精度の環境温度評価を行えば、最小偏角法の計測精度と同等の相対精度 4×10^{-6} が達成できると考えています。今後は環境温度も正確に評価しながら注意深く計測を進め、各種光学材料の正確な屈折率値を調査します。

4. 今後の展開

今後は、本手法を各種光学材料の精密屈折率計測に応用するとともに、デュアルコム分光法を用いたさらなる高精度物性計測に取り組みます。



図(a)：シリコン平板があるときと無いときのデュアルコム分光によって計測した干渉時間波形。

図(b)：今回決定したシリコン平板の屈折率（挿入図は拡大図）。

<原論文情報>

K. A. Sumihara, S. Okubo, M. Okano, H. Inaba, and S. Watanabe, " Ultra-precise determination of thicknesses and refractive indices of optically thick dispersive materials by dual-comb spectroscopy", Optics Express vol. 30, 2734-2747 (2022).

<用語説明>

※1 屈折率：真空中の光速 c と、物質中の光速 v の比であらわされる量。同じ厚さの場合、屈折率が大きい物質のほうが、物質内部での光の位相変化量は大きくなる。

※2 デュアルコム分光法：広い波長域において、等しい周波数間隔で多くのレーザーが位相まで揃った状態で発振する「光周波数コム光源」を 2 台使い、その干渉計測によって片方のコム光源の振幅と位相の変化量を広い波長にわたって正確に求める手法。

※3 最小偏角法：プリズム形状の物質に入射する単色平行光線の入射光線と射出光線のなす角（偏角）の最小値を調べることで、物質の屈折率を高精度に計測する方法。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 教授 渡邊 紳一（わたなべしんいち）

TEL : 045-566-1687 FAX : 045-566-1672 E-mail : watanabe@phys.keio.ac.jp

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門 稲場 肇（いなば はじめ）

TEL : 029-861-6807 E-mail : h.inaba@aist.go.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室（澤野）

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

Email : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

広報部 報道室

TEL : 029-862-6216

E-mail : hodo-ml@aist.go.jp <https://www.aist.go.jp/>