

学位論文 博士（理学）

デュアルコム偏光分光法を用いた  
光学異方性物質の精密複素屈折率計測技術の開発

2020 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

住原 花奈

# 主 論 文 要 旨

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	住原 花奈
主 論 文 題 名： デュアルコム偏光分光法を用いた光学異方性物質の精密複素屈折率計測技術の開発				
(内容の要旨) デュアルコム分光法は、繰り返し周波数が僅かに異なる 2 台の光周波数コム光源を干渉させ、数百 THz の光の振幅と位相の情報を、計測が容易なラジオ周波数帯（数十 MHz）で計測する手法である。本分光法は、光周波数コム光源特有の高周波数精度、高周波数分解能を有するため、これまで原子分子分光を中心に応用されてきた。一方、光の振幅と位相を計測できると、試料の有無による光の振幅透過率と位相差から、物質の複素屈折率ひいては複素誘電率を決定できる。そのため本分光法は、固体物性分光の観点においても重要な技術である。実際に、本分光法を固体物性分光に応用する試みとして、物質の群屈折率計測や薄膜の厚さ計測などの報告がある。 多くの物質は異方性を持つ。そのため、物質の光学特性を正しく理解するためには、偏光計測を通じて複素屈折率の異方性を計測する必要がある。従って、デュアルコム分光法を精密物性計測に応用するためには、本分光法を用いた精密偏光計測手法を確立する必要がある。しかしこれまでに、本分光法を用いて光の振幅・位相・偏光を同時かつ精密に計測し、物質の光学異方性を求めた報告はほとんど存在しなかった。 そこで本研究では、デュアルコム分光法と精密物性計測の足掛かりを創るために、本分光法を用いた光の振幅・位相・偏光計測手法を開発し、計測した実験パラメーターから試料の有無による光の振幅透過率・位相差・偏光状態の変化を求め、その結果から物質の複素屈折率及びその異方性を求める解析法を確立した。まず第三章では、本分光法と回転補償子による偏光分析法を組み合わせ、光の振幅・位相・偏光を同時計測する手法を開発した。しかし、第三章の実験配置では、試料の有無による光の位相差を計測することはできない。そこで、第四章では、電気光学変調器を用いて実験配置を工夫した。その結果、試料の有無による光の振幅透過率・偏光状態の変化に加え、位相差も求めることに成功した。更に、確立した手法を用いて、試料の屈折率分散がないという仮定の下で、複素屈折率の異方性を求めることにも成功した。 第五章では、発展研究として、屈折率分散を持つ試料の複素屈折率を計測した。デュアルコム分光法で得られる光の位相の定義域は、 $[0, 2\pi)$ であるのに対し、試料の有無による光の位相差は一般的に $2\pi$ 以上である。従って、デュアルコム分光法で得られる位相				

の値には、 $2\pi$ の整数倍の不定性が生じる。この不定性は、屈折率に分散がある試料の複素屈折率を求める際に、重要な問題となる。本章では、この問題を解決し、屈折率分散を持つ試料の複素屈折率を求めることに成功した。

本研究内容はデュアルコム分光法を用いた精密物性計測をするための橋渡しとなり、様々な物質の精密複素屈折率・誘電率を計測する際に重要な基盤技術となりうるものである。

Thesis Abstract

No. \_\_\_\_\_

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	Kana Sumihara
Thesis Title Development of Method to Determine Complex Refractive Index of Anisotropic Material Using Polarization-sensitive Dual-comb Spectroscopy			
Thesis Summary <p>Dual-comb spectroscopy (DCS) is an emerging technique which works by combining two optical frequency combs (OFCs) with slightly different repetition rates. Using DCS, amplitude and phase of light in the optical frequency region (~100 THz) are down-converted to the radio frequency region (~10 MHz), which are easier to observe. As DCS has many of the remarkable features of OFCs such as extremely high frequency accuracy and high frequency resolution, DCS is often used for precise molecular spectroscopy. In addition, the ability to measure both amplitude and phase of light makes it possible to determine complex refractive index and dielectric constant of material from transmittance and phase shift induced by the sample. Indeed, there have been a few attempts to apply DCS for solid-state spectroscopy such as the determination of group refractive index and thickness of thin film.</p> <p>Most materials have anisotropic optical property. Therefore, precise information about the anisotropy in the complex refractive index is indispensable for our better understanding of their optical responses. As the polarization measurement is a powerful solution in that regard, method to measure polarization using DCS is necessary for the application of DCS to precise material estimation. However, there have been few reports on simultaneous and precise measurement of amplitude, phase, and polarization of light and the determination of anisotropy using DCS.</p> <p>In my doctorate dissertation, in order to make a bridge between DCS and precise material investigation, firstly I developed a method to measure amplitude, phase, and polarization of light using DCS. Secondly, I derived transmittance, phase shift, and change in polarization state with and without the sample from the experimental data. Finally, I developed an analytical method to determine anisotropic complex refractive index. In Chapter 3, I combined conventional rotating compensator polarimetry and DCS, and developed a method to measure amplitude, phase, and polarization of light. However, the experimental configuration do not allow to measure phase shift induced by the sample. In Chapter 4, I used the electro-optic modulator and changed the experimental configuration. Using this method, I successfully determined the phase shift in addition to the transmittance and change in polarization state with and without the sample. As a result, I successfully determined the anisotropic complex refractive index under the assumption that the sample does not have dispersion.</p> <p>In Chapter 5 for a future perspective, I determined the complex refractive index of dispersive media using DCS. The range of phase obtained by DCS is <math>[0, 2\pi)</math>, but the phase shift induced by the sample is generally larger than <math>2\pi</math>. Thus, the value of phase obtained from DCS contains the ambiguity of the</p>			

integer multiple of  $2\pi$ . This ambiguity is a critical problem for one to determine the complex refractive index. In this chapter, I solved this problem and successfully determined the complex refractive index of dispersive media.

This research is a bridge between dual-comb spectroscopy and precise material investigation. This research will serve as the basic technology for the precise determination of complex refractive index and dielectric function of materials.