

	ふな	ば	ただ	ゆき
氏	名	船	場	忠 幸
授 与 学 位		博 士	( 工 学 )	
学 位 授 与 年 月 日		平 成 1 1 年	3 月 2 5 日	
学 位 授 与 の 根 拠 法 規		学 位 規 則 第 4 条	第 1 項	
研 究 科、専 攻 の 名 称		東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科	( 博 士 課 程 ) 電 子 工 学 専 攻	
学 位 論 文 題 目		光 スペクトル 領 域 干 渉 を 用 いた 反 射 計 測 法 と そ の 応 用 の 研 究		
指 導 教 官		東 北 大 学 教 授	伊 藤 弘 昌	
論 文 審 査 委 員	主 査	東 北 大 学 教 授	伊 藤 弘 昌	東 北 大 学 教 授 宮 城 光 信
		東 北 大 学 教 授	内 田 龍 男	

## 論 文 内 容 要 旨

[背景・目的] 光スペクトル領域干渉を用いた反射計測法は、参照光と物体光を分光してスペクトルエレメントごとに干渉させ、そのとき得られる干渉スペクトルに対してフーリエ逆変換を実行し、数値計算のみで反射位置計測を行うユニークな計測法である。光のコヒーレンスを応用した計測法の一つに、低コヒーレンス光を用いて参照光路の掃引によって生じる干渉を利用して反射計測を行う OADR (Optical Coherence Domain Reflectometry) がある。OADR は、その簡便性と高い空間分解能を武器にして医療分野への応用が精力的に研究されている。本論文では、OADR と同等の性能を有し、参照光路を掃引すること無しに反射計測が可能な光スペクトル領域干渉を用いた反射計測法を提案し、その解析と計測応用の研究を行った。

[原理] 本計測法においては、参照光と物体光を分光してスペクトルエレメントごとに干渉させ、そのとき得られる干渉スペクトルに対してフーリエ逆変換を実行して反射計測を行う。光源として用いるのはスペクトル幅の広い光源であり、OADR で用いる低コヒーレンス光と同義のものであるが、これを用いてマイケルソン干渉系を構成して計測を行う。ここで、参照光と物体光 (測定対象からの反射光) が同時に分光器に入射しており、一定の光路差が与えられているものとする。分散素子によってスペクトルエレメント毎に分けられた参照光と物体光は、分光器の出射部においてスペクトルエレメントごとに干渉させられる。この干渉光は光源のスペクトル幅が広いために波長軸方向で並列に生じる。あるスペクトルエレメントにおいて干渉光強度が最大となっているとすると、隣のスペクトルエレメントでは波長が異なるためにその波長からみた光路差が見かけ上変化し位相差が生じるため干渉光強度が変化する。これがすべてのスペクトルエレメントに関して起こるために、波長軸方向に一定の周期で干渉光強度の変化が生じることになる。これを多チャンネル検出器を用いてスペクトルエレメントごとに 2 乗検波すると、波長軸方向に生じた干渉光強度の変化の結果である干渉スペクトルを得ることができる。このスペクトルは光源のパワースペクトルを変調した形となっており、変調周期は光路差の逆数に比例したものとなる。従って、この干渉スペクトルにフーリエ逆変換を実行することにより、光路差に起因する参照光からの物体光の遅延時間が求められ、これより光路差を求めることができる。

本論文では第 2 章において、分光器と多チャンネル検出器の組み合わせによるスペクトル検出系を仮定し、その装置関数をレクタングル関数とコム関数の組み合わせで表現することにより、シンプルな計算によって光スペクトル領域での干渉から OADR と等価な反射計測が可能であることを示した。解析では、一般化のために広帯域でフラットな分布をもつ光源を仮定して計算を行い、計算手順を示した。そして、実際に実験で使用する光源である多モードレーザと SLD (スーパーluminescent diode) の 2 種類の光源のパワースペクトル分布を既知の関数で近似することにより、計測時に得られる信号波形を求めて計測時諸特性の予測を行った。多モードレーザの場合は、モードスペクトルをローレンツ関数、全モードのスペクトル分布をガウス関数を用いて近似し、前述の装置関数を導入して解析を行った。その結果、多モードレーザを光源として用いた場合には、空間分解能は全モードのスペクトル分布の半値全幅によって決まり、最大計測可能範囲はモード間隔周波数によって制限を受けることを明らかにした。SLD の場合はガウス関数を用いてスペクトル

ル分布を近似し、多モードレーザの時と同様の解析を行った。その結果、参照光と物体光の光路差が大きくなるに従って干渉縞のコントラスト低下が起こるために反射光分布強度が低下し、最大計測可能範囲が決まることを明らかにした。この反射光分布強度の低下は、干渉に寄与するスペクトル純度が一定の幅を持つことによって起こり、スペクトル純度は分光系の分解能によって決まる。

[基礎実験] 本論文第2章での解析結果の検証のため、第3章において原理確認実験と諸特性の測定を行った。実験は多モードレーザとSLDを光源とした実験系を構成し、それぞれの系において光源の特性と反射計測時の特性を測定した。多モードレーザを用いた実験においては、全モードスペクトルの半値全幅を注入電流を制御することにより変化させて実験的に求めた空間分解能と解析的に求めた空間分解能とがよく一致した結果となり、空間分解能は全モードスペクトルの半値全幅によって決まることが示された。実測による本実験条件（注入電流90mA、ケース温度20°C）での空間分解能は24 $\mu\text{m}$ であった。また、参照面と物体面に全反射ミラーを用いて、一方のミラーを光軸方向に移動させることにより光路差を変化させミラーの移動量（すなわち光路差）と反射位置を測定した結果、500 $\mu\text{m}$ を過ぎたところから逆方向に移動したものとして反射位置が求められるため、この位置以降は反射位置が特定できないことがわかった。この値は、多モードレーザのモード間隔周波数から逆算される位置と一致しており、最大計測可能範囲がモード間隔周波数によって制限され、その値が500 $\mu\text{m}$ となることがわかった。反射光分布ピーク強度に関しても光路差に対して測定を行ったが、モードスペクトル幅から解析的に求められる減衰曲線に沿って強度が低下していることがわかった。以上の結果は、第2章での解析に基づいて計算した結果と良く一致した結果となった。SLDを用いた実験においても、多モードレーザを用いた実験の時と同様に、参照面と物体面に全反射ミラーを用いて、一方のミラーを光軸方向に移動させることにより光路差を変化させミラーの移動量と反射位置、反射光分布ピーク強度及び空間分解能を測定した。その結果、反射位置は光路差に対して直線性良く求められるものの、空間分解能は光路差が大きくなると低下することがわかった。反射光分布ピーク強度は光路差が大きくなるに従って低下していくことがわかり、分光・検出系の分解能を基に計算した干渉縞のコントラスト低下の曲線と非常に良く一致した結果となった。従って、最大計測可能範囲は分光・検出系の分解能によって決定され、実測により3500 $\mu\text{m}$ となることがわかった。SLDを用いた実験においても第2章での解析に基づいて計算した結果と良く一致した結果が得られ、第2章における解析の有用性が実証された。以上により、本研究における解析法を用いることにより、計測に応用したときの特性の予測が可能であることが示された。

解析結果の検証と諸特性の測定を行うとともに、サンプル測定と計測結果の安定性の測定も行った。多モードレーザを光源とした場合は複数枚のPETフィルムで、SLDを光源とした場合は複数枚のカバーガラスを用いて多層物体をシミュレートした計測実験を行い、それぞれの境界に相当する位置に反射光分布が得られた。これらの結果から求めた反射位置は屈折率を考慮した厚みから予測される反射位置と良く一致しており、本計測法により多層物体の反射計測が可能であることが示された。また、カバーガラスをサンプルとして24時間にわたって厚み計測を行った結果、SLDを光源として用いた系では多モードレーザを用いた系の1/10程度のばらつきで測定結果が得られ、SLDを用いた系の方が安定性が高いことがわかった。これらの知見を用いて第4章の計測応用を行うシステム設計・データ処理に関する指針が得られた。

[計測応用] 本論文第4章においては、光スペクトル領域干渉を用いた反射計測法による計測応用について検討を行った。最初に、第3章で得られた知見を元に計測システムの構築を行い、その基礎的な特性の測定と解析を行った。本研究で構築した計測システムは広帯域光を用いて分光干渉をおこなうため、光学系による損失を低減する目的で空間光学系のみでコンパクトに構成された。光源にはSLDを用いており、対物レンズによるサンプルの照射・集光部と GPIB 制御の自動ステージを導入し、計測プログラムと画像化プログラムの開発を行った。これによって、サンプルを自動ステージに取付けて任意の位置を最小1 $\mu\text{m}$ ステップで走査できるようになり、形状計測や断層計測が可能となった。計測システムを構築した後、空間分解能や横方向分解能、信号検出特性等のシステムの基本的な特性を測定し解析を行った。その結果、対物レンズを挿入することにより、対物レンズの焦点位置よりサンプル面が離れるに従って空間分解能と信号強度が低下することがわかり、反射光分布ピーク強度に関しては10倍対物レンズの場合500 $\mu\text{m}$ 、5倍の対物レンズでは1200 $\mu\text{m}$ で最大値の10%程度に低下することが分かった。また横方向分解能は2000 $\mu\text{m}$ の範囲までであれば、10倍対物レンズの場合で15~30 $\mu\text{m}$ 、5倍の対物レンズでは20 $\mu\text{m}$ 前後となることがわかった。これらの結果をもとにして、システムの最適化を行い計測応用実験を試みた。

最初はガラスブロック上の溝形状の計測を行った。その結果、サンプルを対物レンズの焦点位置から500 $\mu\text{m}$ 以内に設置すれば、比較的正確なプロファイルが得られることがわかった。次に、長ねぎと垣根の芽をサンプルとして用い生体試料の断層計測への応用を試みた。長ねぎにカッターで傷を入れてその部分を横切るように計測した結果、傷の部分のプロファイルと内部の層状の構造を観測することができた。また、垣根の芽の断層測定に関しても内部構造が観測でき、断層計測への応用が可能であることがわかった。最後に、ディ

コンボリューションと相関演算による波形処理プログラムの2種類のプログラムを開発し処理を行った。形状計測結果に対する処理の結果より、反射率が高く構造のはっきりとした測定対象では相関演算による空間分解能の向上を確認できた。また、生体試料の断層計測結果のように構造の境界が不鮮明な測定対象には、ディコンボリューションが画像ノイズの除去及び信号回復に関して一定の効果があることが確認できた。これらの結果より、測定対象と目的によって波形処理を使い分けることにより計測画像の品質を向上させることが可能であることがわかった。

[結論] 本論文においては、光スペクトル領域干渉を用いた反射計測法に関して提案・解析を行い実験的に検証するとともに、計測システムを構築して応用の可能性を検討した。その結果、本計測法の有用性が示され、形状計測や断層計測に応用可能であることが実証された。本計測法は基本的に光源の種類を選ばず、LEDやTi:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の蛍光のようなより広帯域な光源を用いることで高空間分解能化が可能である。本研究によって、本計測法の基盤が確立され、多様な分野への応用の道が開かれた。

## 審査結果の要旨

光計測技術は非接触かつ高精度に物体の位置やスペクトル情報を取りこむことが出来ることから、工業や医療をはじめとする様々な分野で広く用いられている。特に近年、空間的にはコヒーレント性が高く、スペクトル的には広帯域な光源を用いた反射計測法が大きな発展を遂げているが、干渉計の一方の光路長を変化させて距離情報を得るという煩わしさを有していた。著者は干渉部を分光検出することにより得られる干渉スペクトルを用いることにより、可動部を一切必要としない新たな反射計測法を提案し、その特性解析と実験的検証、ならびに計測システムの構築を行ったもので、全文5章より成る。

第1章は総論である。

第2章では、参照光と物体光を分光・干渉させて得られる干渉スペクトルに対して、フーリエ逆変換を実行することにより反射計測を行う光スペクトル領域干渉を用いた反射計測法を提案し、分光・検出系の装置関数を導入して解析を行い反射計測が可能であることを示している。また、多モードレーザとスーパーluminescent diode (SLD) のパワースペクトルを既知の関数で近似することにより、これらの光源を用いて反射計測を行う場合の計測特性の予測を行っている。

第3章では、第2章で提案と解析を行った光スペクトル領域干渉を用いた反射計測法に関して、多モードレーザとSLDを光源として検証実験を行い、理論と良く一致した結果を得ており、空間分解能や計測可能範囲等の基本的な特性と分光・検出系の関係を明らかにしている。また、多層物体を用いて実験を行い、多層の反射計測が可能であることを示している。これは、重要な結果である。

第4章では、第3章までの解析と実証実験により得られた知見をもとに計測システムを構築し、その基本特性を得るとともに、反射計測結果の画像化を行っている。その結果形状計測と断層計測への応用が可能であることを示した。画像データ処理を併用することにより、分解能向上等の品質改善が可能であることを示している。これらは有用な知見である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、光スペクトル領域での干渉を利用して可動部を一切用いない反射計測を実現する新規な計測法を提案し、理論の構築から検証実験を行うとともに、計測応用の可能性を示したもので、光エレクトロニクスおよび光計測工学分野の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。