

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「イメージ分光方式を用いた超高速全面膜厚測定技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年 3月

委託者 経済産業省 近畿経済産業局

委託先 財団法人奈良県中小企業支援センター

目次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 第1章 研究開発の概要..... | 1 |
| 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標..... | 1 |
| 1-2 研究体制..... | 4 |
| 1-3 成果概要..... | 6 |
| 1-4 当該研究開発の連絡窓口..... | 7 |
| 第2章 本論..... | 8 |
| 2-1 イメージ分光測定環境の開発..... | 8 |
| 2-1-1 イメージ分光ユニットの開発..... | 8 |
| 2-1-2 イメージ分光用レンズの開発..... | 9 |
| 2-1-3 イメージ分光用ライン照明の開発..... | 9 |
| 2-2 リアルタイム膜厚算出手法の開発..... | 11 |
| 2-2-1 全面膜厚測定アルゴリズムの開発..... | 11 |
| 2-2-2 厚膜にも対応した膜厚算出アルゴリズムの開発..... | 12 |
| 2-2-3 高速化手法の開発..... | 14 |
| 2-2-4 連続検査手法の開発..... | 17 |
| 2-3 試作実験機による評価と検証..... | 19 |
| 2-3-1 FPD用試作実験機 (TM-LZ2) による検証..... | 19 |
| 2-3-2 フィルム用試作実験機 (TM-LZ3) による検証..... | 21 |
| 最終章 全体総括。..... | 24 |
| 研究成果..... | 24 |
| 研究開発後の課題..... | 24 |
| 事業化展開..... | 25 |

第1章 研究開発の概要

液晶などのフラットパネルディスプレイ（以下、FPDと呼ぶ）産業では、近年のパネルの大型化に伴い、製品の品質、短納期、低コストへのニーズが高まっている。フィルム産業においても同様で、液晶ディスプレイ用偏光フィルムなどをはじめとする高機能フィルムは、品質の要求が強い一方、FPDの低価格化が進むにつれ、コスト削減、短納期が大きな課題となっている。しかし、これらの製品の品質を左右する膜厚の均一性の検査は、いまだに人間の目視官能に頼っている。本研究開発では大幅な生産効率の向上を目指し、検査作業を人間の目に代わり機械で自動化する高度な組込み画像処理ソフトウェアを開発し、イメージ分光方式を用いた超高速全面膜厚測定技術を確立する。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

【背景】

デジタル機器の多様化、普及に伴って、半導体、FPDの製造装置も伸びている。快適なデジタル機器をより高性能かつ低コストで生産するというニーズが高まる一方、FPDの大型化、高画質化、低コスト化に伴う大面積の高速膜厚測定技術が大きな課題となっている。液晶ディスプレイは、コストダウン、製造工程の効率化を進めるため、マザーガラス基板のサイズが大型化しており、既に第8世代の生産ラインが稼働中で、第10世代の3m近いサイズのガラス基板を使った量産ラインも導入されている。

FPDの製造工程においては、ガラス基板全面に薄膜を成膜するプロセスが複数工程あり、この薄膜の均一性がディスプレイの表示品位を左右することから、各工程で成膜された薄膜の均一性に対する要求は厳しい。一般に、ガラス基板は大型になればなるほど、全面に均一な膜を生成することは困難で、製造ラインでの膜厚管理は重要な命題である。しかし、成膜した膜の詳細な分布測定を、生産現場の生産タクトに対応して in-situ 測定を行うには、さまざまな困難がある。人間の官能に頼った目視検査は、精度はよいものの人的コストが高むうえ、検査員のスキルに負うところが大きく、検査結果にバラツキがある。したがって、安定した検査精度を維持できない。さらに、ミスの許されない目視検査では、長時間の注視作業が作業者の目と体に大きな負担となり疲労の原因となっている。このため、目視検査に替わる自動検査方法や膜厚測定方法が提案されてきた。

計測機器を利用して非接触で膜厚を測定する場合は、一般に光プローブを用いた多重反射干渉法（Tolansky 法）やエリプソメトリーを利用した製品が多く販売されている。これらの【光プローブ+分光器+受光器】という構成の膜厚測定装置は測定ポイントが1点の詳細な分析に適しているが、数ミリピッチの高精細な二次元（面）の膜厚分布の測定には膨大な時間がかかってしまう。効率を上げるためには多数の高価なプローブが必要等、コスト面でも問題があることから、全数検査ではなく抜き取りで数か所のみ膜厚測定に用いるか、あるいはオフラインで評価用に利用されるのみであった。

FPD用偏光フィルムなどをはじめとする高機能フィルムの分野でも同様に、FPDの低価格化が進むにつれ、コスト削減、短納期化が求められる一方、品質への要求は強く、製造工程における薄膜の膜厚管理は大きな課題となっている。フィルム製造においては、基板の軽量化、フレキシブル化、大面積大量生産化によるコスト削減を訴求できるメリットから、ロール状の基板へ成膜するロール to ロール方式が多く採用されている。また、近年話題となっているフレキシブルディスプレイの分野でもロール to ロール方式は多いに注目されている。枚葉基板の場合、各工程間の搬送、位置決め装置が必要で設備の大型化に繋がるのに対して、この方式では基板は装置の間を連続的に流れることになり、搬送に伴う手間や装置を大幅

に省け、コストダウンが期待できるからである。しかし、このロール to ロール方式でのリアルタイム膜厚測定はきわめて難しい。例えば、ウェット・コーティング工程において、乾燥後は膜特性が変化するためコーティング直後に膜厚測定を行いたいという要求がある。しかし、高速回転する複数のローラー間をフィルムが連続的に流れている生産現場で、薄膜の均一性のインライン検査を行うには、大量データの超高速処理が必要であり、高度な技術力が求められる。その上、販売されている高精度な膜厚測定装置は 1000 万円超と高価であり、ロール to ロール方式のメリットであるコストダウンからはかけ離れたものである。それゆえ、現状では人間の目視検査か、フィルムの一部を切り取って膜厚測定装置で評価しているのみある。

こういった背景から、本研究開発では、測定対象物の膜厚を一度のスキャンで高速測定する膜厚測定技術を確認する。さらに、高機能フィルムの生産工程、特にロール to ロール工程でのインライン検査も想定し、リアルタイム連続測定術を開発する。

【目的】

本研究開発では、FPDの製造工程において、高性能化、機能の向上、大幅な生産効率の向上を目的として、薄膜の品質管理のためのイメージ分光方式を用いた高速全面膜厚測定技術を確認する。さらに、高機能フィルムの生産工程、特にロール to ロール工程でのインライン検査も想定し、リアルタイムに連続測定が可能な膜厚測定技術を開発する。

【目標】

1. 組込みソフトウェアにおいて達成すべき高度化目標

・高性能化及び機能の向上

従来のポイント測定方式では時間がかかるため、インライン検査は困難である。特にフィルムのように長尺物の測定物が連続的に流れている生産工程における膜厚測定では、極めて高速かつ多品種に対応した装置が必要である。そこで従来からよく利用されている分光センサーの特徴を生かし、高速化を図るため、測定物の1ライン分の分光特性を一瞬で取得できるイメージ分光ユニットを開発し、取得した大量のデータを高速に処理する組込みソフトウェアを開発し、リアルタイム測定を実現する。

・生産性の向上

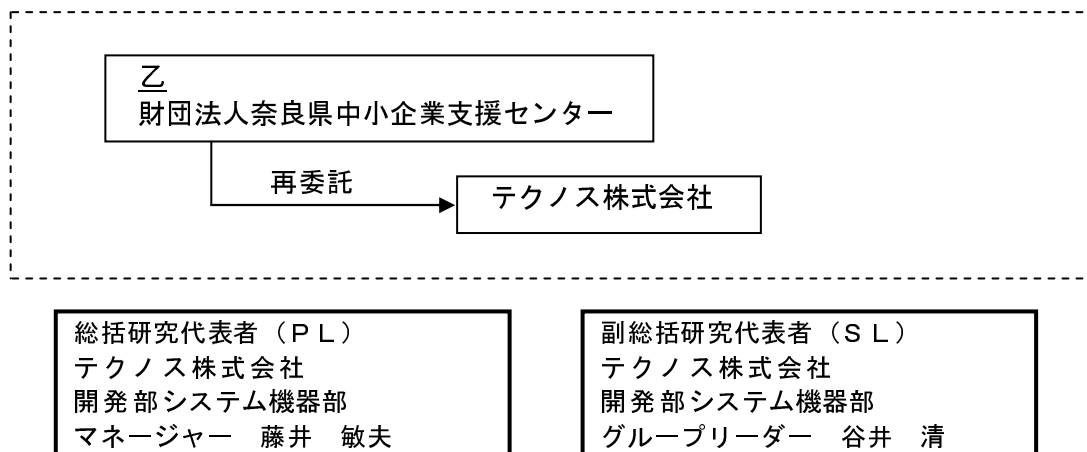
品質を保持しつつ生産性を向上させるために、生産の早い段階で欠陥を検出することが重要である。接触式の検査機が多く使われているが、品質の面では非接触式の膜厚測定装置のほうが好ましい。しかし、高速測定が難しいため、現状は評価目的のみの利用である。生産性の向上を達成するために、高速処理が可能な全面膜厚測定技術を確認する。

2. 技術的目標

| 対象 | FPD、枚葉タイプのフィルム | ロール to ロール方式 フィルム |
|--------|---|--|
| 高速化目標値 | <p>・サイズ 3000mm×3000mm を、 測定ピッチ 3mm、 測定タクト 30sec で測定</p> <p>・スキャン速度 <u>30msec / ライン</u> (= 30sec / (3000mm/3mm))</p> <p>※参考 テクノス株式会社従来機 サイズ：2200mm×2500mm を 測定ピッチ 3mm、 測定タクト 40sec</p> | <p>・フィルム巾 1000mm を、 測定ピッチ 5mm、 送り速度 60m/min で測定</p> <p>・スキャン速度 <u>5msec / ライン</u> (= 5sec / (60m/min))</p> |
| 適用薄膜 | <p>適用薄膜の種類の拡大 従来機の ITO 膜に加え、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・カラーフィルターの RGB 膜、BM 膜 ・フィルム上の薄膜 | <p>適用膜厚範囲の拡大 膜厚範囲 0.3 μm～50 μm</p> <p>※参考 FPD適用膜厚範囲： 0.3 μm～10 μm</p> |

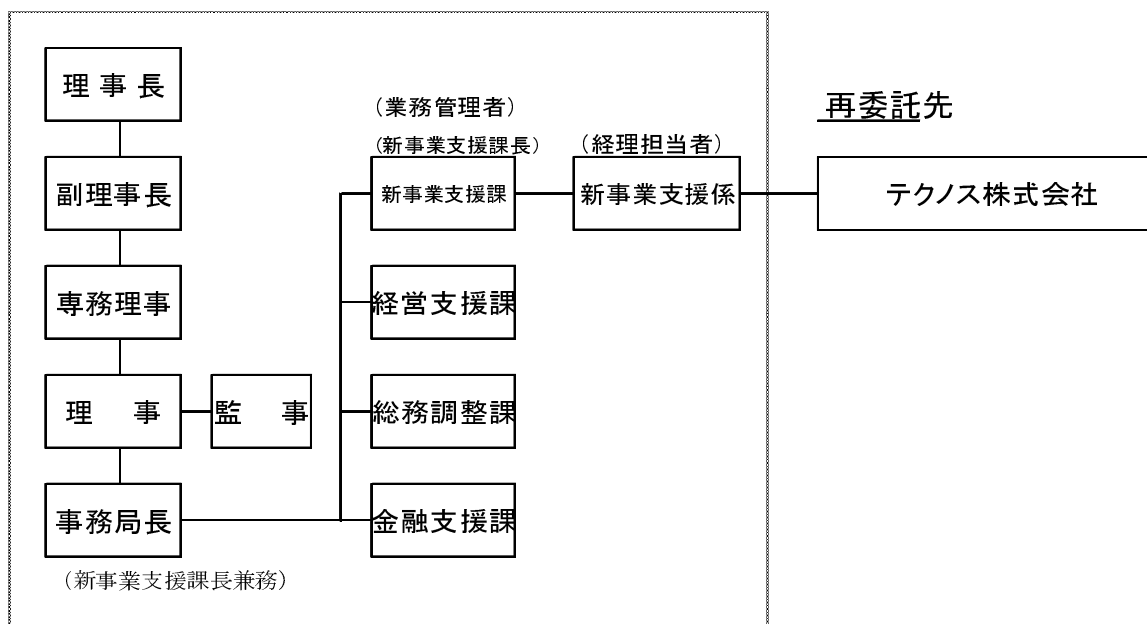
1-2 研究体制

1. 研究組織及び管理体制 【研究組織（全体）】

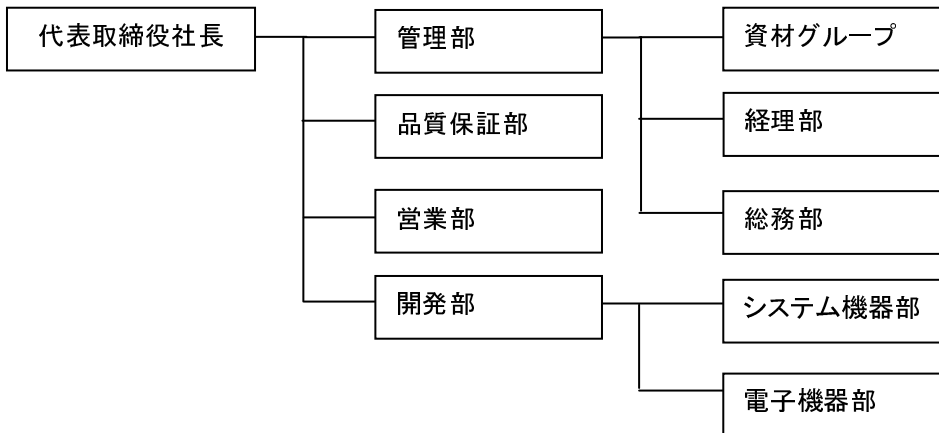


【管理体制】

① 事業管理機関



② (再委託先)
テクノス株式会社



2. 管理員及び研究員

【事業管理機関】

財団法人奈良県中小企業支援センター

①管理員

| 氏名 | 所属・役職 |
|-------|----------------------|
| 金澤 良浩 | 事務局長 |
| 泉 弘一郎 | 新事業支援課 新事業支援係 係長 |
| 杉山 淳一 | 新事業支援課 新事業支援係 主査 |
| 小森 和美 | 新事業支援課 新事業支援係 |
| 山田 裕士 | 新事業支援課 ものづくり支援アドバイザー |

【再委託先】

テクノス株式会社

②研究員

| 氏名 | 所属・役職 |
|-------|---------------------|
| 藤井 敏夫 | 開発部システム機器部 マネージャー |
| 谷井 清 | 開発部システム機器部 グループリーダー |
| 渡辺 泰弘 | 開発部システム機器部 グループリーダー |
| 中嶋 孝 | 開発部 統括部長 |
| 米浪 徹 | 開発部電子機器部 グループリーダー |
| 利弘 俊策 | 開発部システム機器部 チーフエンジニア |

3. 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理機関】

財団法人奈良県中小企業支援センター

(経理担当者) 新事業支援課 新事業支援係 小森 和美
(業務管理者) 事務局長(新事業支援課長兼務) 金澤 良浩

【再委託先】

テクノス株式会社

(経理担当者) 管理部資材グループ グループリーダー 濱村 新太郎
(事業管理者) 開発部 システム機器部 マネージャー 藤井 敏夫

4. 他からの指導・協力者の所属、氏名

| 氏名 | 所属 | 備考 |
|-------|--|--------|
| 大森 裕 | 国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 量子電子情報工学専攻 量子電子デバイス工学部門 エレクトロニクスデバイス講座 有機エレクトロニクスデバイス領域 教授 | アドバイザー |
| 松井 正光 | 有限会社ピー・アール・ティー FPD事業部 課長 | アドバイザー |

1-3 成果概要

本研究開発では、従来のポイント測定方式では困難であった高速全面膜厚測定技術の確立を目指した。その結果、成果として以下の点を挙げる。

- ・ カラーフィルターのRGB膜、BM膜及びより広範な種類の薄膜に対応できるように、可視光から近赤外の波長帯 400nm~1000nm をカバーするローコストなイメージ分光ユニットの開発
- ・ 多様な測定物に対応するため、プログラムによる自動絞り制御式のイメージ分光用レンズユニットの開発
- ・ 受光光学系の特性を考慮し、測定物の分光特性を的確に取得でき、大型測定物にも柔軟に対応可能かつローコストな高照度ライン照明の開発
- ・ 分光特性データから膜厚を算出するアルゴリズムの考案
リアルタイム検査を実現するために、より高速処理が可能な方法を見出すことに主眼を置いた。
- ・ 0.3 μ m~5 μ m 厚程度の FPD では通常の膜厚測定に加え、50 μ m 程度までの厚膜にも対応した膜厚算出アルゴリズムの開発
- ・ 連続分光イメージは、全面の各点における分光特性を含んでいる膨大な量のデータである。これらのデータを高速に演算処理するための手法の開発
具体的には下記を行った。
 - ①「撮像スピードを上げる」：感度ムラの少ない CCD 方式で高速な撮像素子を持ち、ノイズの低い信号出力を得られるハイスピードカメラの選定
 - ②「データ量を減らす」：測定の信頼性を保持しながらデータ量を少なくするために、効率のよいデータ間引き処理方法を開発
 - ③「データ処理速度を上げる」：膜厚算出処理をハードウェアで行う膜厚処理ボードの開発
- ・ フィルムを測定対象とし、ロール to ロール生産方式を想定した場合の、連続測定・検査を行う必要がある。このため、撮像→膜厚算出→欠陥検査を一連の流れとしてリアルタイムに行う手法の開発

これらを実現し、試作実験機を用いて検証した結果、予定していた性能を満たしていることを確認した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【プロジェクト全体に関すること】

社名：財団法人奈良県中小企業支援センター

住所：奈良県奈良市柏木町129-1

TEL：0742-36-8312

FAX：0742-36-4010

担当者名：金澤 良浩

【プロジェクトの技術内容に関すること】

社名：テクノス株式会社

住所：奈良県奈良市法蓮町197-1

TEL：0742-36-3051

FAX：0742-36-3052

担当者名：藤井 敏夫

第2章 本論

2-1 イメージ分光測定環境の開発

適用薄膜の種類を、カラーフィルターの RGB 膜、BM 膜やフィルム上の薄膜などより広範な膜に適用できるように、可視光から近赤外の波長帯 400nm~1000nm をカバーするローコストなイメージ分光ユニットを開発する。このように多様な測定膜に対応するため、コントローラーからプログラムによって絞りを制御できるイメージ分光用レンズユニットを開発する。また、本方式に最適なライン照明を開発する。

2-1-1 イメージ分光ユニットの開発

FPD、フィルムを測定対象とし場合でも、3mm ピッチ 3000mm を 30 秒以下の測定タクトと高速化目標において、カメラの撮像スキャンは少なくとも 15 秒程度で、67fps 以上のスキャンレートが必要である。しかし、これでは露光時間が短く、撮像画像が暗くなってしまう。このため、光伝送効率の高いイメージ分光ユニットを開発すべく、最適なイメージ分光方式を選定する。

市販のイメージ分光器で、採用されている反射型グレーティング方式は、全ての光の経路が反射であるため、分光ユニット全体の光の透過率は良い。しかしながら、精度の高いミラーや特殊なグレーティングが必要なため、価格が高くなってしまふ。PGP 方式の場合、プリズムとグレーティングを使用しているため、光がスリット→レンズ→プリズム→グレーティング→プリズム→レンズと多くの部品を透過する必要があり、透過率は悪くなる。そこで、本研究開発では透過率と価格のバランスが取れるように、図 1 に示すような透過型グレーティングと安価なレンズを使用することで透過率も確保でき、しかも安価なユニットを開発した。当該ユニットは透過型グレーティング方式を採用し、スリット、コリメートレンズ、回折格子、結像レンズから成る。価格的には、対物レンズ、コリメートレンズ、結像レンズを市販の安価なレンズにすることで、より低価格化が実現できる。

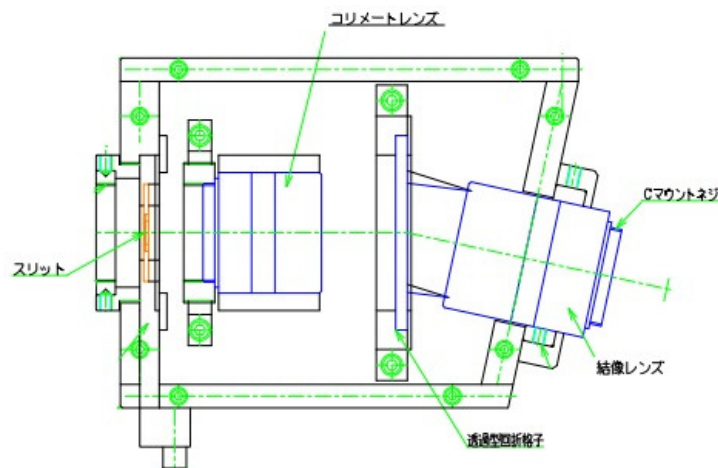


図 1 透過型グレーティング方式イメージ分光ユニット

一般に、測定物をカメラで撮影した場合、カメラからの撮影角度、レンズ特性から画像の中央部と周辺部とで分光特性は異なる。そのため、基準値を設けて補正する必要がある。そこで、当該ユニットに、カメラを接続して撮像した画像の特性を評価し、補正すべき項目について検討した。実験の結果、視野角以外に膜厚算出に影響を及ぼす要素はないことが判明したので、視野角（撮像位置）により算出した

膜厚値に適切な係数を乗ずることで実際の膜厚値に補正するアルゴリズムを考案した。

2-1-2 イメージ分光用レンズの開発

反射率は測定物によって異なるので、多様な測定物に対応するためには、コントローラーからプログラムによって絞りを制御する必要がある。対応波長は 400nm～1000nm、焦点距離は 4mm～10mm で、Cマウント仕様とする。価格を抑えるため市販のレンズを使用し、ステッピングモーターでレンズの絞りを制御するモーター制御基板を自社で開発した。1枚の基板で最大8個のレンズまで接続・制御可能な構成である。これにより、より安価で再現性の高い制御機構を備えた自動絞りレンズのシステムを構築できる。図2にモーター制御基板の外観を示す。



図2 レンズ絞りモーター制御基板

レンズ絞り制御の性能評価と検証を行った結果、制御機構の動作の再現性はかなり高いことが判明した。また、カメラを接続して撮像した画像の特性を評価し、レンズの歪などによる膜厚算出への影響がないことを確認した。

2-1-3 イメージ分光用ライン照明の開発

CCDエリアカメラの分光特性を考慮し、測定物の分光特性を的確に取得できる光源を選定する。下記の条件を満たすライン照明の開発を目指した。

- ① 測定対象物とイメージ分光ユニットに即して、400nm～1000nm の波長範囲をカバーする。
- ② ロール to ロール方式のフィルム製造現場での高速撮影を可能にする高照度化
- ③ FPDを測定対象とした場合、10世代の大型ガラス基板も1度のスキャンで膜厚測定できる3m長の大型化が可能であること。フィルム自体が安価な場合が多く、コストダウンの要求が厳しいことから、強度面、コスト面とも検討する。

ハロゲン、LED、蛍光管、メタルハライド、無電極プラズマランプなどの光源の照度と分光特性を測定・評価した。その結果、安定した分光特性を得られることと価格面を考慮し、ハロゲンランプを選択した。高速撮影のための高照度を確保するため、従来品で多く使われているハロゲンロッド方式ではなく直接照射方式を採用した。さらに光量をアップするために、以下の改良を行った。

- ① ランプ光源自体の高輝度化
最終的には、AC100V 100W $\phi 70$ のハロゲンランプを使用した。AC タイプを採用したことで、トランス等の変電機構が不要になり、大型照明でも安価に製作できる。
- ② 直射光放射
ランプを並べる構成のため、ランプの直下が明るくランプ間は暗くなり、照射ムラが発生する。照明ムラを低減するために、当初はランプの照射方向を鉛直方向からずらしていたが、光量ロスにつながる事が判明した。そこで図 3 のように、ランプの向きを鉛直方向に近づけ、照明ムラを低減するための拡散板を導入する改善を行った。またランプの向きを調整できる機構も設け、照度とムラの条件を最適化できるようにした。
- ③ 側面反射板の追加
照射エネルギーのロスを少なくするため、筐体側面に反射板を取り付けた。

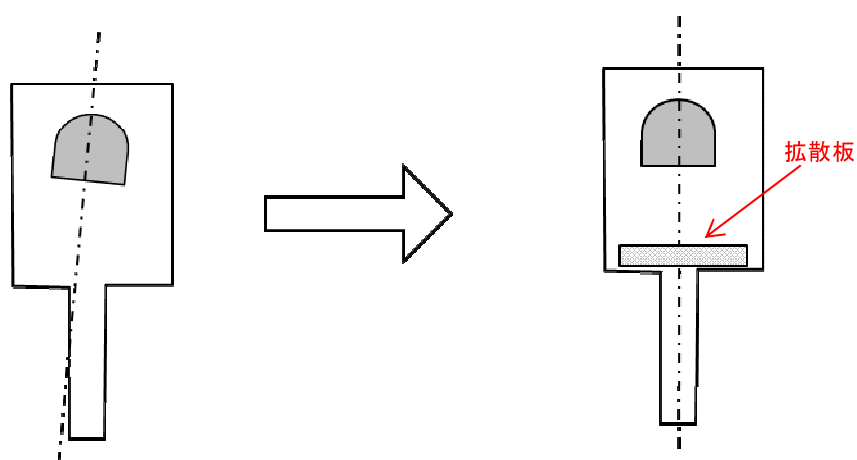


図 3 光量アップの改善

図 4 に示す照明は、フィルム幅 1000mm を想定したもので、照射口のサイズを 1000mm×15mm としている。



図 4 開発したハロゲンライン照明

2-2 リアルタイム膜厚算出手法の開発

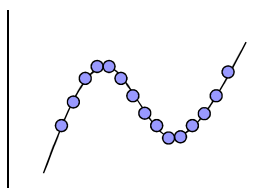
2-2-1 全面膜厚測定アルゴリズムの開発

イメージ分光ユニットの出力は各点における分光特性波形であり、この分光波形データから膜厚を算出するアルゴリズムを開発する。多重反射干渉法などが一般によく使われるが、リアルタイム検査を実現するためには、より高速に処理する方法が必要である。

測定対象となる膜の反射率、屈折率、入射角などをパラメータとする関数を用いた解析的手法は処理時間もかかり、関数の解法も難しい。そこで、予め、光学シミュレーションを用いて算出した測定対象膜の各膜厚値に対する分光反射率（以下、膜厚参照テーブルと呼ぶ）と、実測の波形データを照合し、膜厚の最確値を求める手法を採用する。ただし、実測波形データはデータ量が多く照合に時間がかかるため、波形データの特徴を抽出し、処理時間の短縮と単純化を図る。以下の 1. ～4. の 4 つの特徴抽出方法を検討した。図 5 を参照されたい。

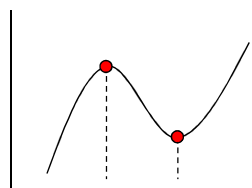
1. 相関法
各サンプリング点について実測の分光波形データと、膜厚参照テーブルの分光波形データとの相関度を計算し、その値が最大となる場合の膜厚値をその点の膜厚値とする。
2. 山谷法
実測分光波形データの山と谷（すなわち極値）を探し出し、それらを波形の特徴として、膜厚参照テーブルと照合する方法である。データ量を大幅に削減できる。
3. 主成分分析法
各膜厚値に対する分光波形データから主成分分析を行い、結果を特徴として膜厚値を特定する方法である。主成分分析法とは、多次元データを出来る限り情報の損失無しに、低次元データで表現するための統計的解析手法である。各膜厚値に対応する分光波形データから、第 1 主成分、第 2 主成分、第 3 主成分・・・という形で、波形データの分割数だけ主成分を計算する。
4. スペクトル法
FPDでは $0.3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 程度の薄膜が主であるが、フィルムの場合は厚い膜も考えられる。 $50\mu\text{m}$ 程度の厚膜の分光波形は、波形数が極端に増える。そのため、上記の 1. ～3. の方法では、波形数が多くなるにつれ、波形のカーブ形状・山谷位置・主成分の情報のみで膜厚を特定することが困難となる。厚膜の場合の膜厚算出アルゴリズムについては、次項 2-2-2 で詳しく述べる。

1. 相関法



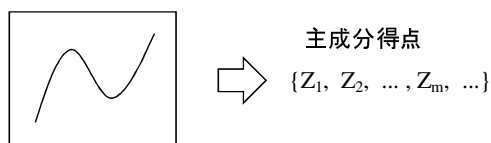
測定データより単純にサンプリング

2. 山谷法



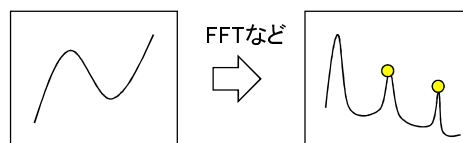
測定データの極値を抽出

3. 主成分分析法



測定データの「主成分」を計算

4. スペクトル法



測定データの周波数成分を計算

図5 膜厚算出アルゴリズム

2-2-2 厚膜にも対応した膜厚算出アルゴリズムの開発

フィルムを測定対象とした場合、厚い膜も考えられる。そこで、膜厚測定範囲の目標を、 $0.3\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ とし、膜の厚い側に測定範囲を拡大するための技術開発を行った。

$5\mu\text{m}$ 以下の膜厚における分光波形は、図6(左)のように数個の正弦波のような波形からなる。 $50\mu\text{m}$ 程度の厚膜の分光波形は、図6(右)のように、波形数が極端に増える。このように多数の波形から膜厚値を算出するには、周波数解析を行い、得られた各周波数成分の絶対値(パワースペクトル)を事前計算データと比較するスペクトル法がよいと考える。そこで、ウェーブレット変換や最大エントロピー法、FFT(高速フーリエ変換)などの周波数解析手法の調査した結果、FFT法を採用し、さらに高精度化を目指すこととした。

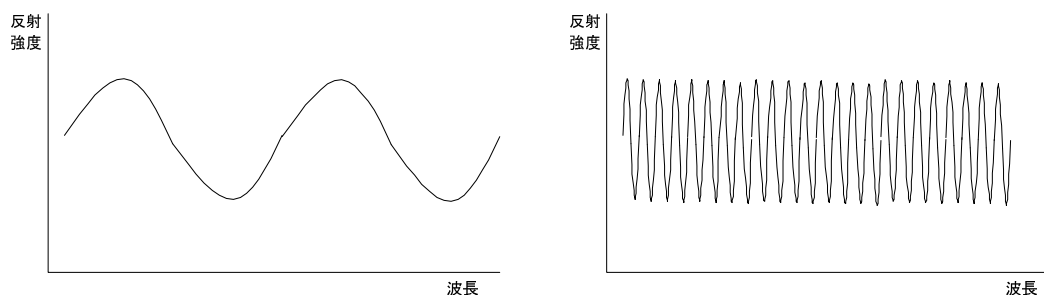


図6 薄膜(左)と厚膜(右)の分光波形

一般に、分光干渉の波形は、「高周波側で密/低周波側で疎」になるため、この波形をFFT法で解析してもパワースペクトルの単独ピークを得ることはできない。また、FFT法では、入力点数と同じ点数の解析結果しか得られず、中央値が最大周波数に相当するので有効データはその半分となり、所望の分解能が得られないという問題がある。そこで、これらの問題を解決するため、以下を行った。

① 分光データを単一周波数波形に変換する手段

反射率が波長の逆数に対して周期関数になることから、得られた分光波形

を、波長逆数に対して一定間隔になるように加工する。加工後の波形は一定周期となり、パワースペクトル分布に鋭いピークが得られる。

- ② ①で得られたパワースペクトルデータより厳密な最大点を算出する手段さらに厳密なピーク位置を算出するために加重平均法をとり、厳密なピーク位置を求める。

図7は、波長範囲400nm~800nmを1000pixel幅で受光するようにカメラを設置した時のイメージ分光波形である。目標上限の約50 μ m厚サンプルにおいても分光波形の山谷が確認できた。

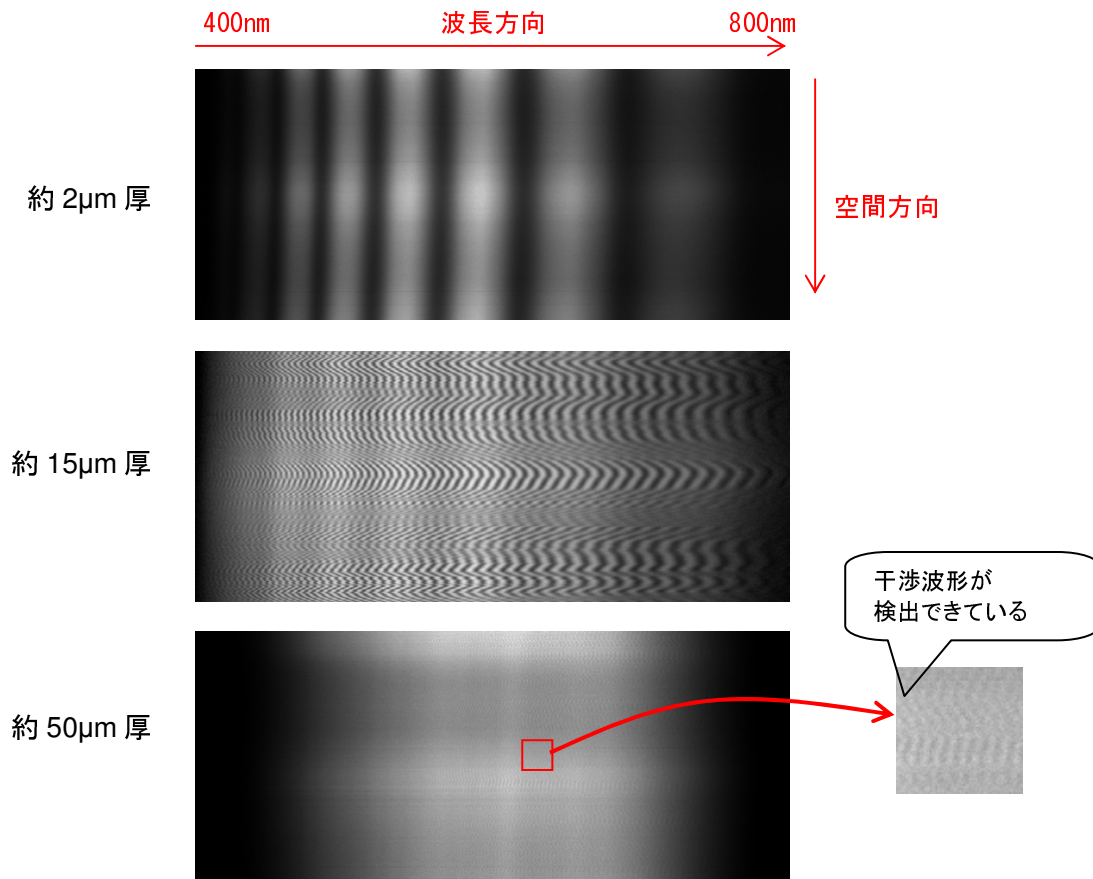


図7 イメージ分光画像

図8に、約50 μ m厚のポリエチレンフィルムのイメージ分光画像が膜厚を算出した結果を示す。このことから、目標上限の50 μ m付近についても測定結果が得られることが分かり、本手法の有効性を確認した。

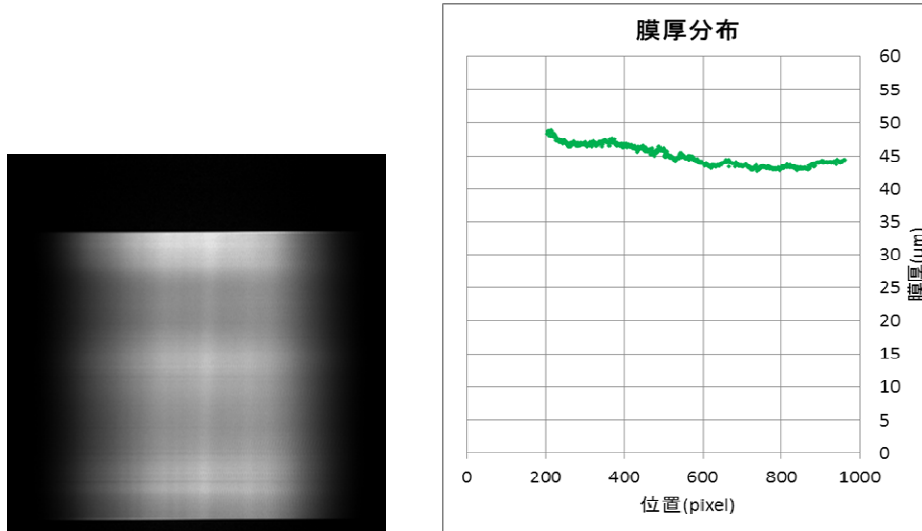


図8 厚膜のイメージ分光画像(左)とその測定例(右)

2-2-3 高速化手法の開発

スキャン速度の高速化を実現するには、照明の照度アップはもちろん、撮影やデータ処理など全ての処理速度を向上させる必要がある。ここでは、1. 撮像スピードを上げる、2. データ量を減らす、3. データ処理速度を上げる、という方法で開発を行った。具体的には、以下を行った。

1. 撮像スピードを上げる——高速データ処理用カメラの選定
撮像スピードを上げるためには高速撮影対応のカメラが必須である。本研究開発では、検討の結果、市販カメラ ICL-B0620 (IMPERX 社製) を用いることとした。
2. データ量を減らす——データ間引き手法の開発
膜厚計算のデータ量を削減し、膜厚計算の時間を短縮することが効果的である。そこで、結果の信頼性を保持しながらデータ量を減らす処理方法について検討した。空間方向のデータ間引きでは、膜厚計算の時間は短くなるが、当然の結果として測定点数も少なくなる。測定点数は維持したいので、ここでは分光波長方向のデータ間引きについて検討した。
波長方向にデータ間引きを行うにあたって、どのようなデータ処理を行えば、膜厚計算の信頼性を保持できるか、シミュレーション計算によって評価する。間引き後のデータ処理手段として、以下の3方式(図9を参照)を検討した。
 - ① サンプリング：元データより一定間隔でデータを抽出
 - ② 平均：区間データから平均値を計算
 - ③ 多項式近似：区間データより多項式関数を当てはめ

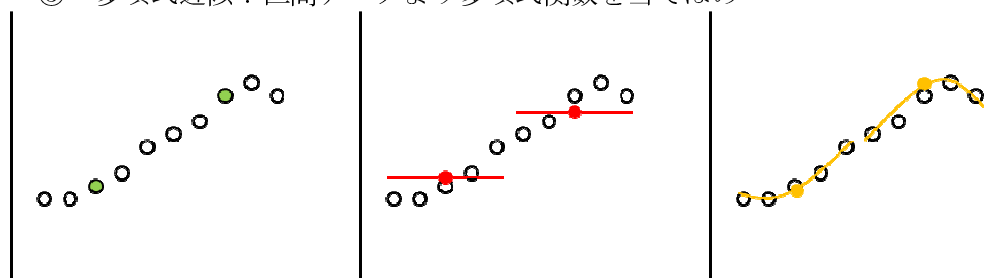


図9 データ処理 ①サンプリング(左) ②平均(中央) ③多項式近似(右)

膜厚 300nm~5000nm (0.3 μm ~5 μm) における分光波形の理論カーブを繋ぎ合わせた理想画像を作成し、これにホワイトノイズを加算したテスト画像 100 枚に対して、上記の 3 方式で波長方向に間引き演算を行った後、相関法にて膜厚算出を行い、正しい膜厚値が算出された枚数をカウントした。正答率が高いものほど信頼性が高い。

この結果より、

多項式近似 > 平均 > サンプリング

の順に信頼性が高いことが分かった。

処理速度は明らかに、

サンプリング > 平均 > 多項式近似

の順になる。特に多項式近似方式は複雑な演算処理となるためハードウェア化(画像処理ボードへの組込み)には向かない。またソフトウェア処理では処理時間を要するので、高速化という目的に適さない。

これらの考察より、イメージ分光における間引き処理方式としては平均処理が最も適切であると考えられる。

3. データ処理速度を上げる——画像処理ボードの開発

全面膜厚測定を高速にリアルタイム処理するために、処理時間のかかるデータ処理をハードウェアで行う画像処理ボードを開発した。図 10 にその構造を示す。ベースボード、前処理ボード、膜厚処理ボード、通信処理ボードから成る。カメラの撮像データはベースボードでレベル変換後、前処理ボードへ送られ、そこで、後の膜厚算出処理の準備として、輝度補正→歪み補正の補正処理を行う。膜厚算出ボードでは、相関法と主成分分析法の 2 つの方法を実装し、膜厚算出の高速化を図った。

表 1 に相関法を、表 2 に主成分分析法の膜厚処理ボードの実装機能を示す。

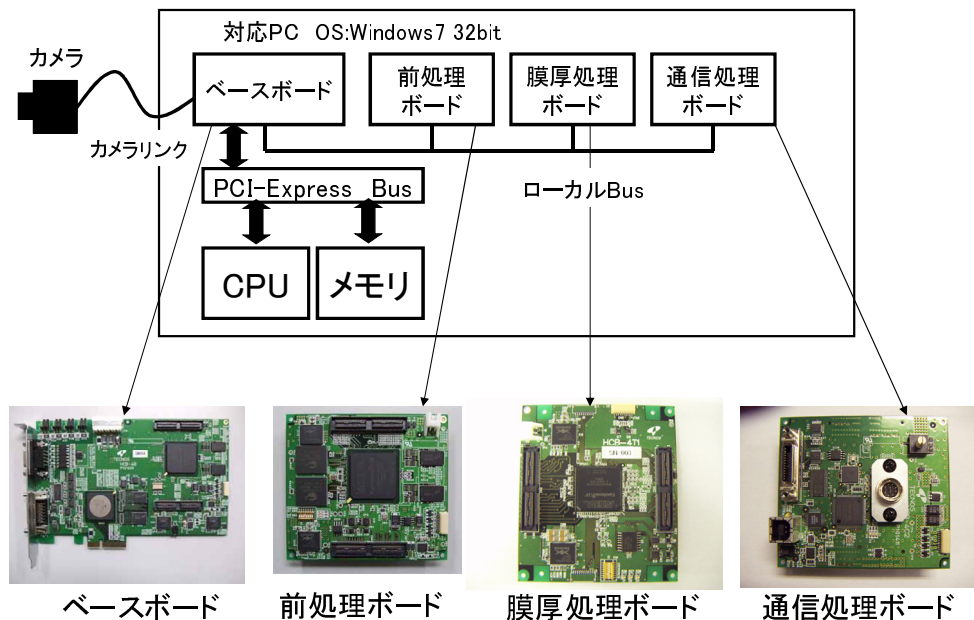


図 10 画像処理ボードの構成

表 1 相関法の膜厚算出処理ボードの実装機能

| 処理 | 内容 |
|-------------|--|
| 分光特性取得 | 前処理ボードから分光方向の輝度特性をロード |
| 分光特性平均間引き処理 | 平均間引き処理を行う 間引き方法は以下のパラメータで指定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 分光特性の開始位置 ・ 間引き数 ・ 間引き後の要素数 |
| 相関係数算出 | 間引き処理後の分光特性と膜厚参照テーブルとの相関係数を求める 相関係数を求める際のパラメータを指定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 膜厚テーブルの開始位置 ・ 移動平均数 |
| 膜厚候補算出 | 相関係数を求めた結果から膜厚値（極値）を求める 膜厚候補値を求める際のパラメータを指定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 移動平均数 ・ 相関係数しきい値 |
| 結果出力 | 最大相関位置、極値候補値、膜厚候補数 |

表 2 主成分分析法の膜厚算出処理ボードの実装機能

| 処理 | 内容 |
|-------------|---|
| 分光特性取得 | 前処理ボードから分光方向の輝度特性をロード |
| 分光特性平均間引き処理 | 平均間引き処理を行う 間引き方法は以下のパラメータで指定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 分光特性の開始位置 ・ 間引き数 ・ 間引き後の要素数 |
| 主成分算出 | 分光特性の各要素に規定の係数を乗算し、主成分係数を求める <ul style="list-style-type: none"> ・ 主成分係数は最大 20 個まで算出 ・ 主成分係数を求めるために以下のパラメータを指定 主成分係数群（最大 200 個×20 有効 6 桁） |
| 平均自乗誤差演算 | 算出した主成分と膜厚参照テーブルとの平均自乗誤差を求める 平均自乗誤差を求める際に以下のパラメータを指定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 膜厚テーブルの開始位置 ・ 移動平均数 |
| 膜厚候補算出 | 平均自乗誤差を求めた結果から、膜厚候補値を算出する 膜厚候補値を求める際のパラメータを指定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 移動平均数 ・ 平均自乗誤差しきい値 |
| 結果出力 | 最大誤差位置、膜厚候補値、膜厚候補数 |

2-2-4 連続検査手法の開発

FPDのように測定対象物が独立した1枚1枚の枚葉基板の場合は、撮像→膜厚算出→欠陥検査を順番に処理することができた。しかし、フィルムのようなロールtoロール生産方式の場合は、撮像を行いながら並行して膜厚算出、欠陥検査を行う必要がある。ここでは連続的に検査を行うための手法を開発する。

一般的に、欠陥は、周辺に対して特性値が大きく異なっている箇所を欠陥と定義する。このため、欠陥検査は、2次元の分布データに基づいて行う。ロールtoロール生産方式のように連続的に検査を行う場合、欠陥検査に工夫が必要である。

ここでは、代表的な欠陥種別を想定し、部分的な膜厚情報を用いて欠陥検出処理が高速に実行できる手法を検討した。想定する欠陥種別は、点状欠陥である「ピンムラ」と、線状欠陥である「スジムラ」とした。図11を参照されたい。

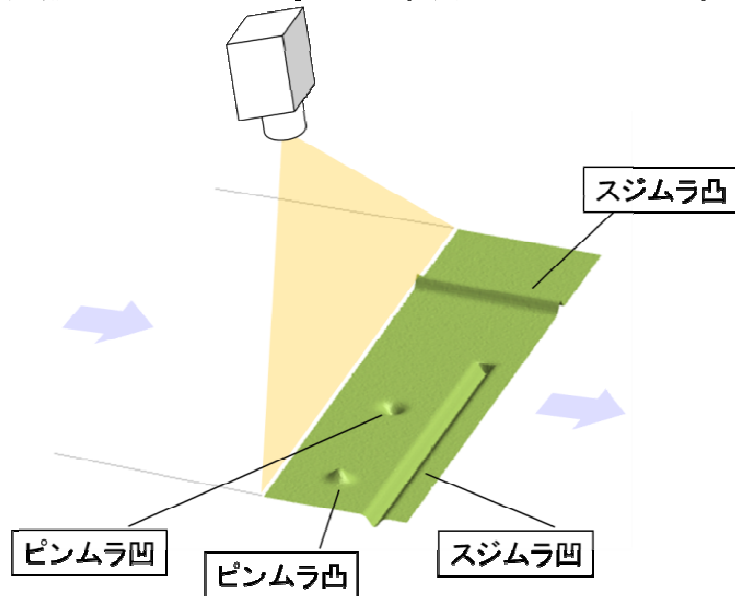


図11 想定する欠陥種別

連続的に測定・算出する膜厚データより、部分的な情報を切り出す考え方について図12に示す。膜厚データを単純に分割すると、分割境界付近に存在する欠陥が検出されない恐れがあるため、オーバーラップさせながら切り出し処理を行う。

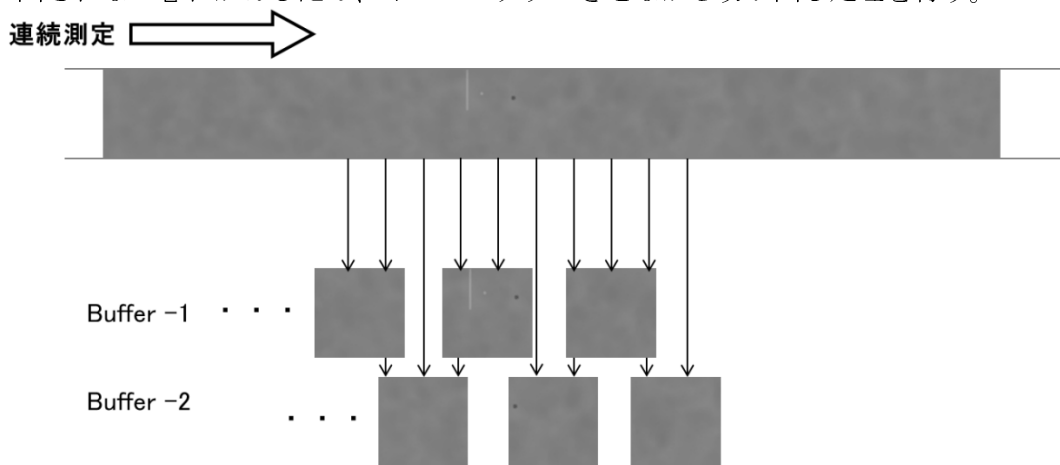
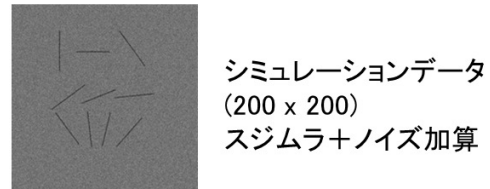


図12 膜厚データより部分情報の切り出し

欠陥検出方式として画像処理におけるエッジ検出フィルタを検討した。エッジ検

出フィルタは、2次元的に隣接する位置同士の特性差を捉えて数値化する。ここでは、フィルタ処理によって膜厚変動を求め、この変動量が所定の値（しきい値）以上になれば欠陥とみなす。Laplacian、Prewitt の2方式に加え、独自に考案した高精度エッジ検出フィルタ（以後、**Enhanced-Kirsch フィルタ**と呼ぶ）について、検出性能・処理速度等を比較した。評価のための入力データとして、欠陥を織り込んだ膜厚分布データをシミュレーション作成した。



| 種類 | 処理結果(中央画像=ノイズを検出しない限界しきい値) | 処理時間 |
|-----------------|----------------------------|-----------------|
| Laplacian | | 0.4ms 高速 |
| Prewitt | | 1.8ms |
| Enhanced-Kirsch | | 2.7ms |

図 13 欠陥検出シミュレーション結果

図 13 に結果を示す。シミュレーション作成したデータはノイズを加算しているので、しきい値を下げるとノイズまで欠陥として検出する（過検出）。ノイズを過検出しない限界しきい値での検出結果が図 13 おける「中央画像」であるが、Laplacian フィルタ、Prewitt フィルタでは検出すべきスジムラが幾分か欠けている（未検出）。Enhanced-Kirsch フィルタでは検出すべきスジムラは明瞭で、高精度に欠陥検出されていることが分かった。一方、処理時間については精度とトレードオフの関係にあり、Enhanced-Kirsch フィルタが最も遅かった。

この結果に基づき、連続検査を行う場合のタイミングをシミュレートした。図 14 に示す。欠陥検出を行う切り出しデータの単位は 200×200 点なので、これだけのデータを蓄積するには、

$$200 \times 5\text{msec} = 1000\text{msec}$$

を要する。単純な分割では境界付近に存在する欠陥を検出できない可能性がある。そこで、オーバーラップさせながら切り出し処理を行い、そのオーバーラップ量を前後 1/4 だけ設けて切り出すと想定すると、

$$200 \times (3/4) \times 5\text{msec} = 750\text{msec}$$

となる。よって欠陥検出処理は 750msec 毎に実行すればよい。フィルタ処理時間が最も長い Enhanced-Kirsch フィルタでも、このサイズにおけるデータ処理時間は 2.7msec であり、検出データの時間間隔に対して圧倒的に速いことがわかった。よって、欠陥検出としてエッジ検出フィルタを用いる方式ならば相当複雑なフィルタ設

計を行っても、リアルタイムな連続測定が可能である。

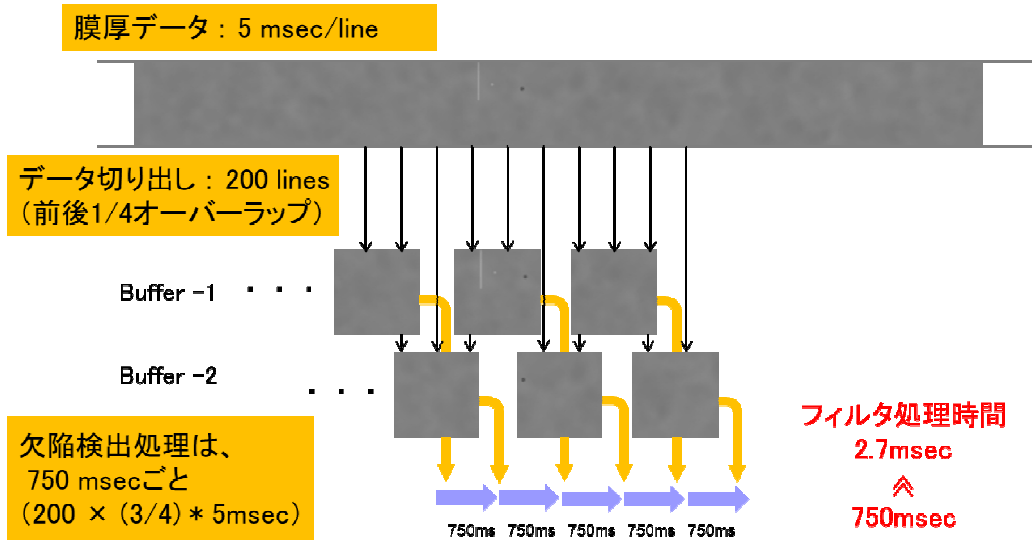


図 14 連続測定のタイミングチャートシミュレーション

このように、ロール to ロール生産方式において、撮像→膜厚算出→欠陥検出→データ保存の一連の流れをリアルタイムで実行する連続検査手法を開発した。部分的な膜厚情報から欠陥を高速検出し、さらにデータを部分的にバッファリングしマルチタスク処理を行い、欠陥を検出した結果のみ保存することで現実的なリアルタイム測定を実現した。

2-3 試作実験機による評価と検証

2-3-1 FPD用試作実験機 (TM-LZ2) による検証

技術的目標値を評価・検証するため、図 15 に示す FPD のような枚葉基板を測定対象とした試作実験機を開発した。測定データと実際の膜厚値との誤差、測定データの繰り返し精度、測定タクト等を検証する。

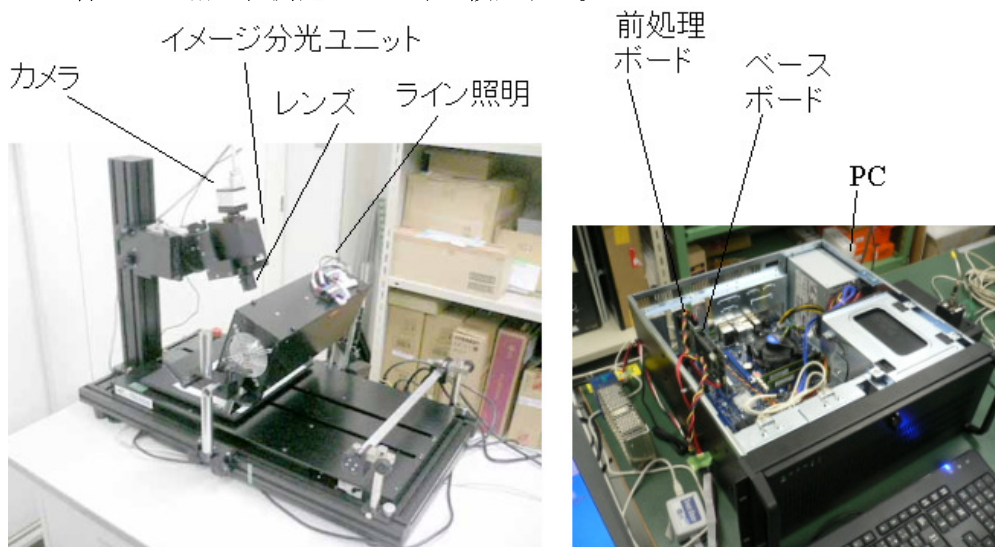


図 15 FPD用試作実験機 (TM-LZ2) の外観

【誤差評価】

表 3 に、各測定サンプルについて、ポイント式膜厚計 (Filmetrics F20) で測定した膜厚値と試作実験機で測定した膜厚値の誤差の平均値をまとめた。

表 3 各測定サンプルにおける測定誤差一覧

| No. | サンプル名 | 基板 | 膜の種類 | 膜厚 | 平均誤差 |
|-----|----------------|----|------------------|-----------|-------|
| ① | 標準ウエハ | 硝子 | SiO ₂ | 2000nm | 0.04% |
| ② | シリコン酸化膜 | 硝子 | SiO ₂ | 300~500nm | 0.41% |
| ③ | 液晶用カラーフィルターのPS | 硝子 | 透明レジスト樹脂 | 4000nm | 0.21% |
| ④ | 液晶用カラーフィルターのR | 硝子 | 赤色レジスト樹脂 | 2000nm | 0.31% |
| ⑤ | 液晶用カラーフィルターのG | 硝子 | 緑色レジスト樹脂 | 2000nm | 0.31% |
| ⑥ | 液晶用カラーフィルターのB | 硝子 | 青色レジスト樹脂 | 2000nm | 0.85% |
| ⑦ | 硝子基板上的ITO膜 | 硝子 | ITO | 300nm | 0.15% |

表 3 の平均誤差を見ると、おおむね良好な結果が得られた。

【繰り返し精度の評価】

試作実験機にて表 3 と同じ液晶用カラーフィルターのPSをサンプルとして、30回測定し、測定結果の繰り返し精度を評価した。本研究成果の方式で膜厚測定を行った場合の、データの信頼度を検証する。試作実験機による膜厚測定の結果画面を図 16 に示す。

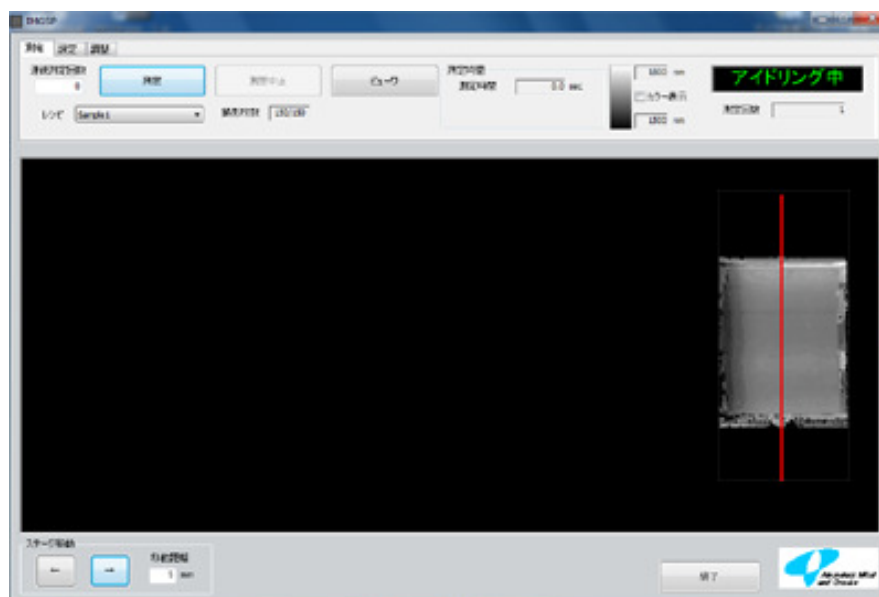


図 16 試作実験機による膜厚測定結果の表示画面

図 16 の赤色ライン部分について、30 回測定した膜厚データプロファイルを図 17 に示す。繰り返し再現性については良好な結果が得られている。平均膜厚 4007 nm に対して、標準偏差は 3.88 で、平均膜厚に対する標準偏差の割合は約 0.1% である。全面の膜厚分布を捉えるには十分な精度であると考えられる。

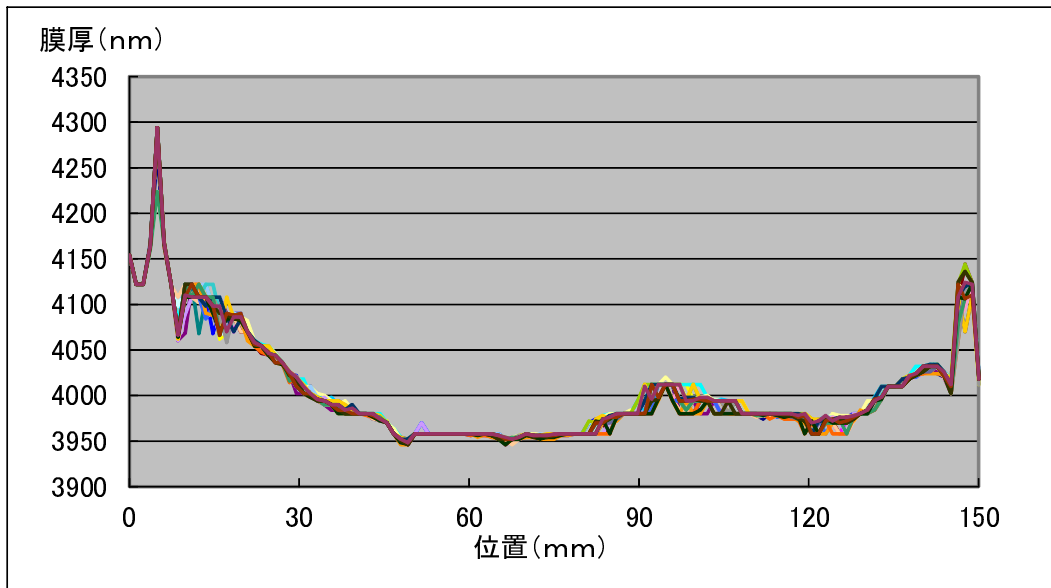


図 17 膜厚データプロフィール (30 回分)

2-3-2 フィルム用試作実験機 (TM-LZ3) による検証

技術目標に対する評価・検証のため、図 18 に示すようなロール to ロール方式のフィルム用試作実験機を開発した。測定データと実際の膜厚値との誤差、測定データの繰り返し精度、測定タクト等を検証する。

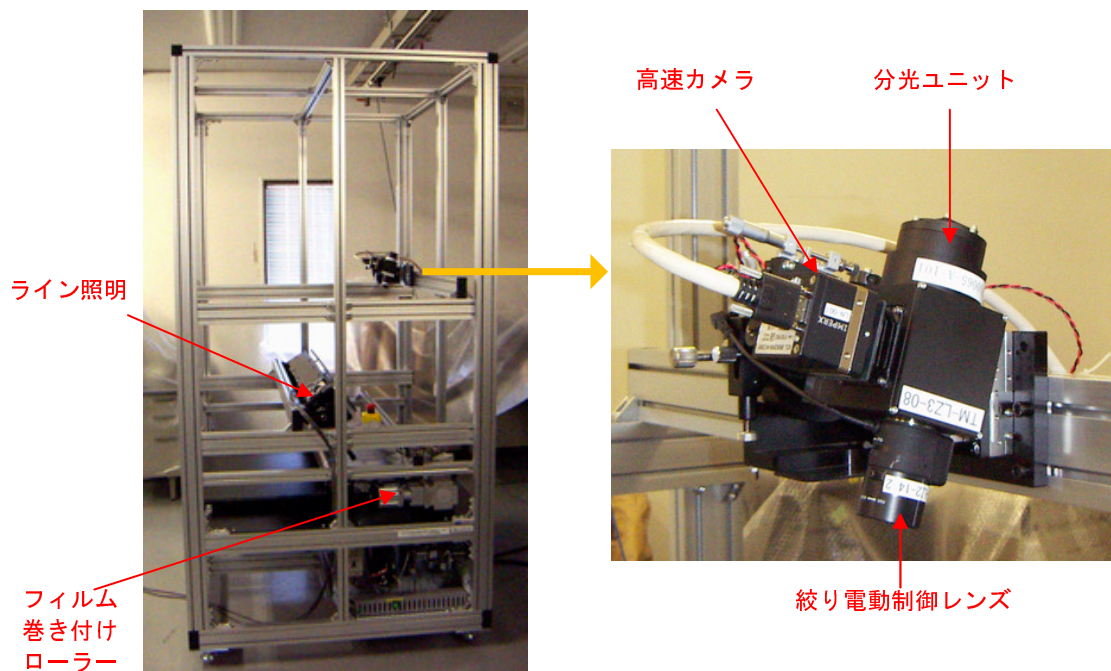


図 18 フィルム用試作実験機 (TM-LZ3) の外観 (機構部と光学系)

ITO 膜付きガラス基板 (膜厚 700nm 程度) 500×500mm をサンプルとして、測定した。まず、ガラス基板の同一ライン位置を、5msec/ラインの最高速で連続測定した。

膜厚算出はハードウェア処理ボードを用い、相関法を適用した。サンプルの全幅が収まるように測定幅は 560mm に設定した。空間方向の pixel 数は 648 なので空間分解能は約 0.86mm/pixel である。図 19 は、試作実験機による膜厚測定結果の表示画面である。このことから、5msec/ラインでの測定が可能であることが確認できた

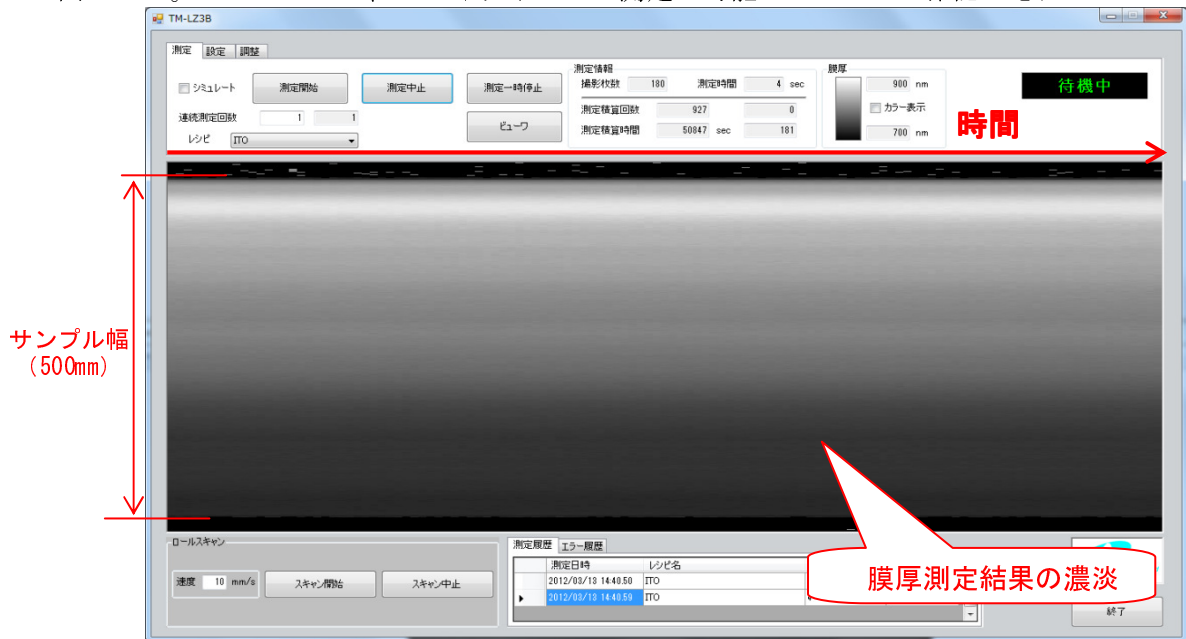


図 19 200 ライン/sec での膜厚測定結果の表示画面

【誤差評価】

ITO 膜付きガラス基板の測定結果を図 20 に示す。「TM-LZ3B」が試作実験機、「Filmetrics F20」がポイント式膜厚計の測定結果である。ポイント式膜厚計では 50mm 間隔で測定した。

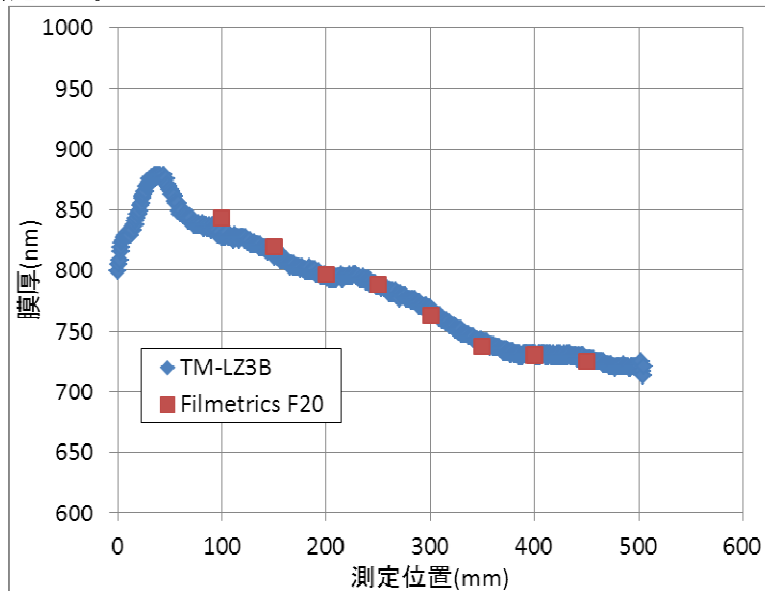


図 20 試作実験機とポイント式膜厚計の測定結果比較 (ITO 膜付きガラス基板)

全 8 点における平均誤差は 0.6%と良好で、試作実験機の膜厚測定値に十分な信頼性があることが分かった。

【繰り返し測定精度の評価】

前述の ITO 膜付きガラス基板を用い、繰り返し測定精度の評価を行い測定データの信頼性を検証する。200 ライン/sec の最高速で同一箇所を連続測定した結果より 100 回分のデータを抽出した。測定位置は前述と同じ直線上で、評価点数は 593 点である。

593 箇所点の評価点ごとに 100 回の膜厚算出値の標準偏差を計算した。結果は、最小 0.35nm/最大 1.89nm/平均 1.09nm であった。この間の平均膜厚は 782nm なので、平均膜厚に対する標準偏差の割合は 0.14%と、繰り返し再現性についても良好な結果が得られた。測定 10 回分を抜き出して膜厚分布をグラフ化したものを、図 21 に示す。

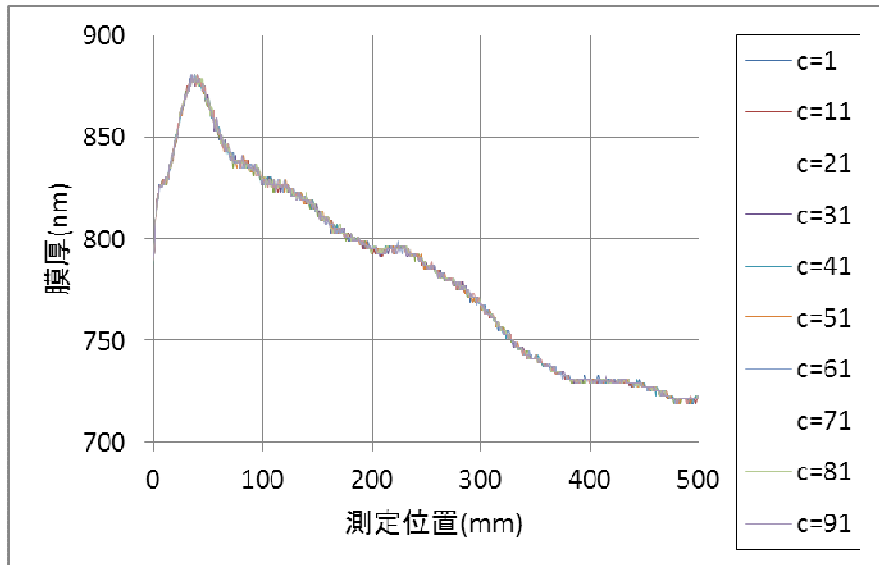


図 21 繰り返し測定結果 (ITO 膜付きガラス基板)

本研究開発の成果物としてのフィルム用試作実験機を使用して、目標に対する達成度合いの確認のための評価を行った。ITO 膜付きガラス基板を用いた評価により、当初目標の 5msec/ライン という超高速膜厚測定を実証できた。また、その測定精度や繰り返し測定の再現性も非常に良好であることが確認できた。フィルムサンプルの測定については、適切なサンプル入手が叶わなかったため、新たなサンプル入手の後に評価していきたい。

最終章 全体総括。

研究成果

本研究開発で、当初設定していた技術目標はすべて達成した。FPDなど枚葉タイプの基板を測定対象とした場合及びロール to ロール方式のフィルムを測定対象とした場合とも、当初の高速化目標値をクリアした。適用薄膜の種類は、FPDのITO膜に加え、カラーフィルターのRGB膜、BM膜、フィルム上の薄膜にも対応できるように適用範囲を広げた。また、適用膜厚範囲について、 $0.3\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ と適用範囲を拡大した。 $0.3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 厚の測定対象物に対しては相関法、主成分分析法を用い、干渉波形のピーク数が多い $5\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ 程度の膜厚算出にはFFT法が有効であることを示した。ただし、FFT法を応用した膜厚算出アルゴリズムは、ハードウェア化（画像処理ボードへの組込み）が実現しておらず、高速化が今後の課題として残る。

研究開発後の課題

以下に、研究開発後の課題を挙げ、簡単に説明する。

- ・ 膜付きフィルムサンプルの入手と連続スキャン測定評価
フィルム用試作実験機を使用した、ITO膜付きガラス基板の測定では測定精度及び繰り返し測定の再現性も良好な結果が得られた。しかし、フィルムサンプルの測定については、適切なサンプル入手が叶わなかったこともあり、検証できる有効な結果を得られなかった。今後は、評価に適切な膜付サンプルを入手するとともに、ロール to ロールでの連続スキャン測定を行い、速度、測定精度、繰り返し測定の再現性を検証したい。
- ・ ライン照明のさらなる高照度化
23年度の目標速度である5msec/ラインでのイメージ分光画像の撮影が可能で、比較的安価に製作できる高照度ライン照明を開発した。しかし、照度の当初目標には到達していない。今後もFPD及びフィルム生産工程の高速化は進む一方であることを考慮すると、さらなる高照度化が必要である。照度アップを目指すと共に、輝度補正などの画像処理による改善も検討していきたい。
- ・ 厚膜測定計算の高速化
FFT法をベースとし、さらに高精度化を図るため、分光データから単一周波数波形への変換手法及び厳密な最大点の算出方法を組み合わせた厚膜の算出アルゴリズムを考案した。しかし、FFT法のような周波数成分の解析はデータ処理に時間がかかり、リアルタイム処理が難しく、測定計算の高速化が課題として残った。
- ・ スペクトル法の改善
厚膜の膜厚算出の周波数解析のために、FFT法をはじめ、ウェーブレット変換、最大エントロピー法などのスペクトル法を検討したが、この他にも多くの手法が提案されている。本研究開発では、FFT法が有効と判断したが、今後は、MARS等、他の解析手法の検討も行い、高速化のための改善をしたい。
- ・ 装置の操作性向上（校正、ユーザインタフェース、エラー処理）
本研究開発で試作した実験機は、研究用に開発したもので、生産工程で検査装置を利用するユーザにとって使い勝手がよいものではない。商品化の観点からは、優れたユーザビリティが求められる。校正方法の確立、ユーザにとってわかりやすく使いやすいユーザインタフェースの開発、柔軟なエラー処理を実現したい。
- ・ 信頼性（連続動作の安定性や耐久性、安全対策、耐環境性能、自己診断）
生産工程で使用する検査装置には高い信頼性が求められる。長時間の連続

稼働でも安定した測定結果が得られること、耐久性や事故につながらないような安全対策、環境によって変わることのない性能、自己診断機能を備えた装置の商品化を目指す。

- ・ 価格競争力（コストダウン）
アジア諸国の目覚ましい発展で、製品のみならず生産設備機器の低価格化は避けられない。他企業との競争に勝ち残るために、製造費・人件費ともに考慮した低コスト検査装置の開発が必要である。

事業化展開

前述の課題を踏まえて、本研究開発で試作したFPD用測定試作実験機（TM-LZ2）とフィルム用試作実験機（TM-LZ3）の改善と商品化を行う。表4に、各装置の機能と特徴、ターゲットとする市場、本研究開発終了後3か年の販売見込みを示す。

表4 事業化展開

| | | | |
|---------------|--|---------------------------------------|-----------|
| 商品化製品 | FPD、 枚葉タイプのフィルム向け 膜厚測定装置（TM-LZ2） | ロール to ロール フィルム向け 連続膜厚測定装置（TM-LZ3） | |
| 機能と特徴 | バッチ測定 小サイズ 簡易 低価格 | 連続測定 大面積（複数カメラ搭載） 高速 高機能 | |
| ターゲット | タッチパネル 半導体 | 高機能フィルム 太陽電池 二次電池 | |
| 販売 見込 み | 1年目 | 30,000千円 | 50,000千円 |
| | 2年目 | 100,000千円 | 200,000千円 |
| | 3年目 | 300,000千円 | 500,000千円 |