

大規模歪に対応した Roll-to-Roll マスクレス露光装置の開発

堀 正和, 内藤一夫, 中野貴之, 伊倉良幸, 橋場成史, 鬼頭義昭

Development of Roll-to-Roll Maskless Exposure System for Large-Scale Pattern Deformation

Masakazu HORI, Kazuo NAITO, Takayuki NAKANO, Yoshiyuki IGURA, Seiji HASHIBA and Yoshiaki KITO

フレキシブル基材の上に電子デバイスを作製したフレキシブルエレクトロニクスは、その柔軟性により従来のシリコンプロセスでは実現できなかった新しい機能が実現でき、多くの研究・応用がなされている。その製造技術として基材を連続的に処理する Roll-to-Roll 技術を用いると基材のハンドリング難易度が下がり歩留まり・生産性の向上が見込まれている。さらに Roll-to-Roll 技術は長さ方向のサイズ制限を受けず、長大なデバイスが生産できるため、鋭意研究・開発が進んでいる。

ところが、ポリマー材料を始めとするフレキシブル基板は従来のガラス、シリコン等と比較して熱的・機械安定性が格段に低く、電子デバイスの製造工程で従来と比較して100倍以上の大きな変形が生じることが分かっている。従来の露光装置ではこの大きな変形量を補正できず、フレキシブル基材上に電子デバイスを作製することは困難であった。

そこで、基材の変形量に対応できる補正ストロークの大きなマスクレス露光装置の開発を行った。この露光装置は基材の変形計測と露光を並列処理し連続的に露光が行える。開発した装置を使用して、A3サイズフィルムと Roll-to-Roll フィルムに対して露光評価を実施した。A3サイズ基板で実際のデバイス作製に近い条件において重ね合わせ $\pm 1.8 \mu\text{m}$ 、Roll-to-Roll 基板で重ね合わせ $\pm 4.0 \mu\text{m}$ の精度を達成したので詳細を報告する。

Flexible electronics, which is fabricated with electronic devices on flexible substrates, have been researched and applied, because of flexibility which was not realized in conventional silicon processes. By using Roll-to-Roll (R2R) technology, which continuously processes the substrate material, it is expected to reduce the difficulty of handling the substrate material and improve yield and productivity. In addition, R2R technology has merits for long-sized devices which is not subject to size restrictions in the length direction. However, flexible substrates such as polymer materials can be easily deformed during electronic device manufacturing process, like 100 times larger than conventional glass or silicon substrates, because of mechanical and thermal instability. It is difficult to fabricate electronic devices on flexible substrates with conventional exposure apparatuses, because they cannot compensate for large amount of deformation.

We have developed a maskless exposure system with a large correction stroke that can correspond to the amount of base material deformation. This exposure apparatus processes deformation measurement of the base material and exposure in parallel, and exposure is performed continuously. Exposure evaluation was performed for A3 size film and Roll-to-Roll film. We have achieved an overlay accuracy of $\pm 1.8 \mu\text{m}$ for A3 size substrates and $\pm 4.0 \mu\text{m}$ for R2R substrates, so we will report the details.

Key words 露光装置, マスクレス露光装置, フレキシブルエレクトロニクス, 重ね合わせ, ロールトゥロール exposure system, maskless exposure system, flexible electronics, overlay accuracy, roll-to-roll

1 はじめに

硬い基板の上に電子部品を形成してきた従来の電子デバイスに対して、柔らかい基板の上に作製された電子デバイスはフレキシブルエレクトロニクスと呼ばれている。フレキシブルエレクトロニクスは軽く、薄く、柔軟であり、伸縮性も持たせることが可能であるため従来のエレクトロニクスにない応用が期待されている [1]。例えば、基材が柔

軟で曲げや収縮に対応でき生体親和性に優れるため、人体情報を取得するための人体と一体となった人工皮膚や [2]–[4]、軽量で割れに強いモバイル用途のディスプレイや曲面ディスプレイなど幅広い分野での研究がなされている [5]–[7]。

基材として使用されるポリマー基板（以下、フィルム基板）は薄く・柔軟であるがためにハンドリングが課題となっている。ハンドリングの解決方法の一つとして、硬い

基材と張り合わせて従来の工程でデバイスを作製し最後に剥離する方法が提案されている [8]–[10]。この方法は剥離工程が追加に必要な事と、デバイス作製時に発生した応力が剥離工程で一度に発生してしまうことから膜構成の工夫が必要となりコストが増大する要因となる。そこで別の解決方法として、印刷などで古くから使用されている Roll-to-Roll の搬送技術を使う方法が検討されている。Roll-to-Roll の搬送技術とは、ロール状の基材を巻きだして、ローラーでガイドして再びロール状に巻き取る搬送技術のことであり、連続的にシワや座屈を発生させずに基材を取り扱うことができ、生産性の向上や歩留まりの向上が期待できる。また、Roll-to-Roll 工程は連続的にフィルムを取り扱うため、フィルム基板の送り方向がデバイスサイズの制約を受けず、従来にはない長大なデバイスの作製も考えられる [11]–[13]。

このような Roll-to-Roll 技術でフィルム基板上にデバイスを作製する試みは広くなされてきたが、主に単層の配線工程やサイズの大きな電極構造の作製などの範囲にとどまり、電子デバイスを試作した例は限られていた。これは、フィルム基板は従来のガラス、シリコン等と比較して熱的・機械的安定性が格段に低く、電子デバイスの製造工程で従来と比較にならない大きな変形が生じることに起因する。従来の露光装置などではこの大きな変形量を補正できず、フィルム基板上に直接電子デバイスを作製することが困難であった [14]。

そこで本課題を解決するためフィルム基板の大きな変形量に対応できるマスクレス露光装置の開発を行った。Fig. 1 に開発した装置の写真を示す。この露光装置は Roll-to-Roll でフィルム基板を搬送しながら、その変形計測と露光を並列処理し搬送を止めることなく連続的に処理できる装置となっている。

フィルム基板上にパターンを形成する上で、解決すべき課題が存在する。本報告では、装置開発の技術的な課題とそれに対する解決コンセプトの説明を行い、次に開発した装置の概要と露光システムとアライメントシステムについて述べ、それらを評価した結果を示す。最後に今回開発したマスクレス露光装置を用いて試作したサンプルデバイスと Roll-to-Roll での露光結果を報告する。

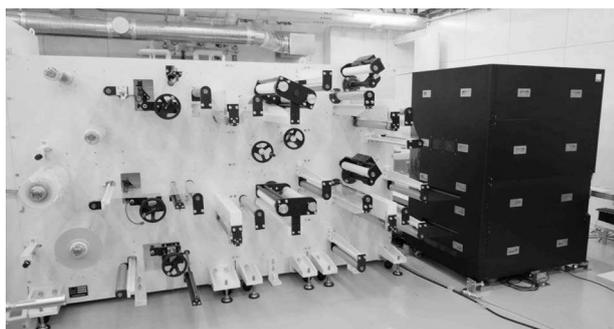


Fig. 1 開発した直描露光装置と搬送ユニットの写真

2 技術的課題と対策

フレキシブル基板上に高い重ね合わせ精度での露光を実現するために、以下のコンセプトで装置開発を行った。

①フィルムのハンドリングに対する課題

機械的強度が低いフィルムは搬送時のわずかな張力変動にも敏感に反応して変形を起こしてしまう。このためフィルムをアライメントしてから露光するまでの搬送時に外力が加わるとフィルムは変形を起こし、高精度の重ね合わせ露光が実現できない。アライメントから露光までの間の搬送中はフィルムが変形しないように保持をする必要がある。一般的な露光装置では平面ステージに基板を吸着させてアライメントと露光を行うが、面で吸着を行うため、薄くて柔軟なフィルムを吸着する場合は吸着時に大きな変形やシワが発生することが問題となってくる。そこで、大きなローラーにフィルムを巻き付かせて摩擦力でフィルムを保持しつつ、ローラーの回転でフィルムを搬送する構成をとる事とした。ローラーにフィルムが接触する瞬間は、線接触で固定されていくため変形が最小限にとどめられる。ロール上でアライメント測定を行い、そのままロール上で露光を実施する構成となるため、センサ類の配置もすべてロールの曲率に沿った配置とした。ローラーはフィルムの搬送用ローラーとしてもそのまま使用するため、Roll-to-Roll で連続的にフィルムを処理できる構成をとっている。

②大きなフィルム変形に対する課題

始めに述べたように、フィルム基板は、工程時の熱や膜応力などによってガラスの100倍の 1000 ppm 近く変形を起こす。また、パターン作製時の加工で部分的に応力が発生し、パターン形状に依存した局所的な非線形変形を引き起こす。そこで、発生する変形に対応でき補正ストロークを大きく取ることが可能なマスクレスの直描露光方式を採用することとした。マスクレスの直描露光方式にはいくつか種類があるが、露光をローラーの曲面上で行う事としたため、面で露光を実施する方式の場合、ロールの稜線から外れた両端分は焦点深度から外れてしまう。そこで、面で露光を行わず一次元の直線で露光することが可能なポリゴンによるスキャン方式とした。

③生産性に対する課題

マスクレス露光装置は画像データを元に露光を実施するため、フィルム基板の変形を測定し、元画像をデジタル的に補正し露光を実施することで大きな補正に対応できる。しかし、測定から画像生成・画像展開には時間が掛り、連続的に処理を実施する時に高い障害となる。また、画像をデジタル的に補正する場合、画像が量子化で段ずれを起こし、配線の断線などにつながる可能性がある。画像の解像度を上げる事で量子化の影響は低減できるが、データサイズが解像度の2乗に比例して増加する事から、画像処理にさらに時間が掛ってしまう。そこで、露光画像データは変

更せずに光学・機械的に露光パターンを変形させる方式を採用した。また、現実的に量産が行える露光速度を目標とする。詳細に関しては装置説明にて行う。

3 開発装置の詳細

3.1. 装置の全体構造概要

開発した、Roll-to-Roll 直描露光装置の全体構造概略を Fig. 2 に示す。

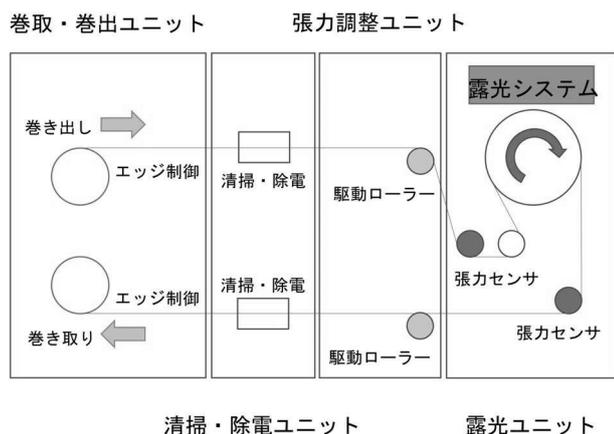


Fig. 2 露光装置の全体構成概略図

ロールから巻き出されたフィルムは、露光ユニットを経由して再びロールとして巻き取られる構成となっている。巻き出しロールと巻き取りロールを同じ側に設置し全体としてU字型にフィルムを搬送し装置の全長を短くしている。

ロールから出た直後のフィルムのエッジをセンサで測定し、フィルムのエッジ位置が装置に対して常に一定となるように巻き出しロールを動かす。これにより露光ユニットに導入されるフィルムの位置が安定化し、蛇行の少ない状態で露光を実施できる。装置に搭載できるロールフィルムは 100 μm 厚のフィルムの場合、最大 200 m まで対応できる。

フィルム基板はロールとの擦れ、剥離などにより帯電する。帯電したフィルムはフィルム上のデバイスを破壊したり空気中のパーティクルを引き寄せたりし、欠陥の原因となる。そのためフィルムを除電するユニットとゴミを除去するための清掃ユニットも併せて取り付けている。フィルム基板は不導体であり複数のローラーで搬送されるため特に除電は重要となってくる。

露光ユニットにあるローラーの回転速度が装置全体の搬送速度となるためメインローラーと呼ぶ。このメインローラーの回転速度を一定に制御することにより、露光位置や露光量の安定性を確保している。フィルムをメインローラーに巻き取る前後のローラーには張力センサがついており、メインローラーに導入されるフィルムの張力を測定している。フィルムの張力は張力調整ユニットによりメイン

ローラーと駆動ローラーの速度差によって一定に制御し、フィルムの搬送方向の伸縮を一定に保っている。

露光システムは連続的に搬送されてくるフィルムに対してアライメント計測を並行で行いながら、アライメントで計測されたパターンの位置に合わせて露光を行う。露光システムの詳細を次に述べる。

3.2. 露光システム

開発した露光システムの概略を Fig. 3 に示す。露光システムは、露光を行う露光モジュール、フィルム形状の計測を行うためのアライメント顕微鏡、メインローラーの位置を検出するためのエンコーダ読み取りヘッドとエンコーダリングで構成されている。センサ等の構成部品はメインローラーの曲面に沿った配置をとっている。

全体の露光幅を拡大するために、露光モジュールを2列の千鳥配置で計6つ配置している。1つの露光モジュールの露光幅は 50 mm であり、6つの露光モジュールで合計 300 mm 幅の露光領域を確保している。露光モジュールはポリゴンを用いた直描露光方式であり、線状のパターンを露光するため、曲率を持つローラー上でもデフォーカスを生じさせず露光が可能となっている。

直描露光の単位画素サイズは 2 μm \square とした。アライメント顕微鏡を各モジュールの継ぎ部に計7本配置し、露光幅全体でアライメント計測が可能となっている。

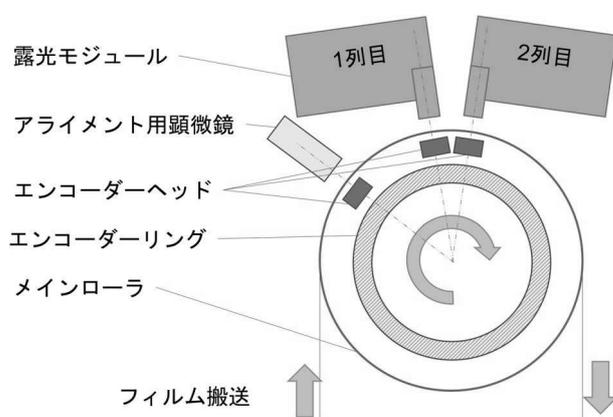


Fig. 3 露光システムの側面概略図

メインローラーの回転量を読み取るために、メインローラーの両側面にエンコーダリングを配置した。2列配置の露光モジュールに合わせて、エンコーダヘッドも2列配置としアッペの原理を満たした構成とし測定誤差を低減している。エンコーダは3相タイプを採用し、それぞれのエンコーダヘッドはエンコーダリング上の共通のZ相を用いて各エンコーダの原点校正がされる。Fig. 3 を平面に展開したものを Fig. 4 示す。

ポリゴンミラーを用いた直描露光方式の場合、露光光がポリゴンミラーの角の部分にかかる間は露光が出来ないため、ポリゴンミラーを100%使用することができない。Fig.

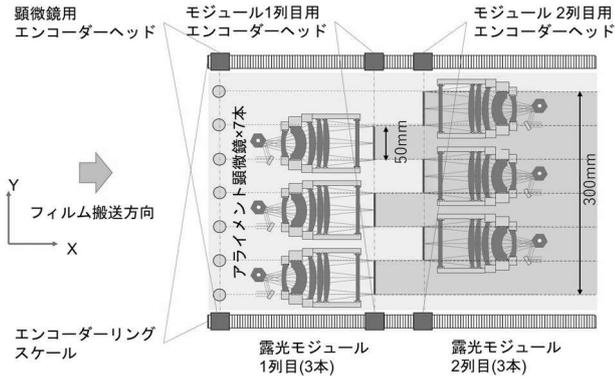


Fig. 4 露光システムの展開概略図

5にポリゴンの利用可能角度と露光タイミングチャートの模式図を示す。下記例では八角形のポリゴン1面の内、例えば1/3の領域しか露光に使用できる角度を確保できない場合、その光源の利用効率は1/3となってしまう。そこで光源を各モジュール間で共通化し、時間分割で3つのポリゴンに分配する方式とし光源の利用効率を高める。そのため各ポリゴンの位相を15度ずつシフトさせて、露光可能なポリゴンの角度が時間的に一致しないように調整する。これにより常にいずれかのポリゴンが露光状態となり、光源利用効率がほぼ100%と高い生産性を確保できる。

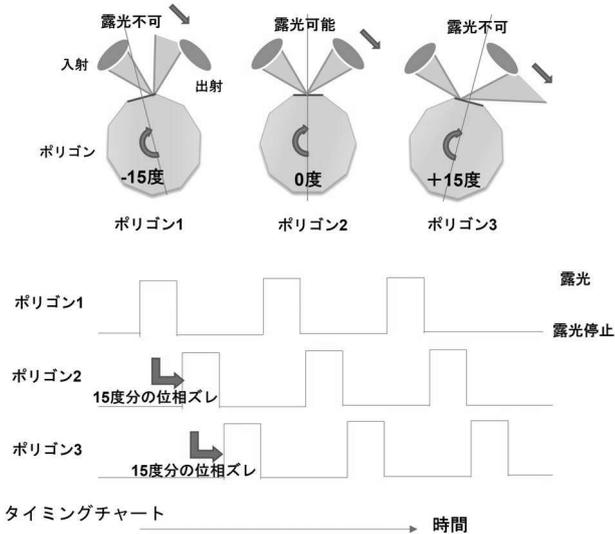


Fig. 5 ポリゴンの高利用率化

3.3. 露光結果

本露光システムを用いて実際に露光した解像力チャートの写真を Fig. 6 に示す。Cu を 100 nm 蒸着した PET フィルム上にフォトレジスト OFPR-5000LB (東京応化工業, 神奈川, 日本) を 1 μm コートし, 露光を行った。露光後, 現像を濃度 2.38% の水酸化テトラメチルアンモニウム (TMAH) で 1 分間行った。Fig. 6 は装置に登録した BMP 形式の画像データを元に露光されており, 各モジュール最小で解像力 4 μm L/S が解像していることが確認できる。幅 300 mm の範囲で, 実用的には L/S = 6 μm の任意画像デー

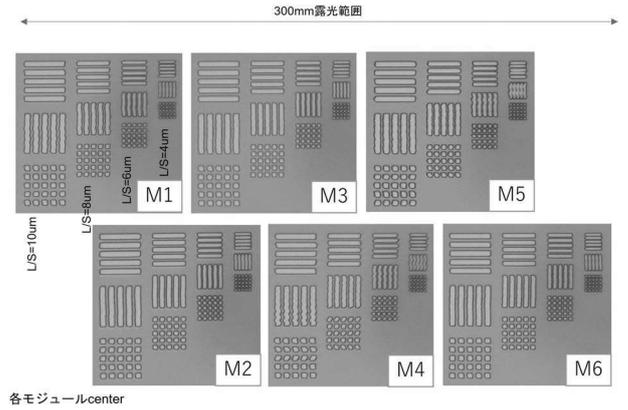


Fig. 6 解像力チャートパターンの露光結果

タを元とするパターンを形成ができることが確認できた。

3.4. 露光パターンの変形手法

開発した露光装置は、露光画像データは変更せずに描画位置を光学的・機械的にリアルタイムに変更させることで露光パターンの変形を実現している。6つの各露光モジュールで分割された領域において、ポリゴンミラーでスキャンされる露光線をリアルタイムに変化させることで、複雑で大きな変形を補正する。変化させる成分は、Fig. 7 に示す4つの成分(シフトY・Y倍率・X倍率・回転)に分けられる。それぞれの成分での変形手法について以下に述べる。

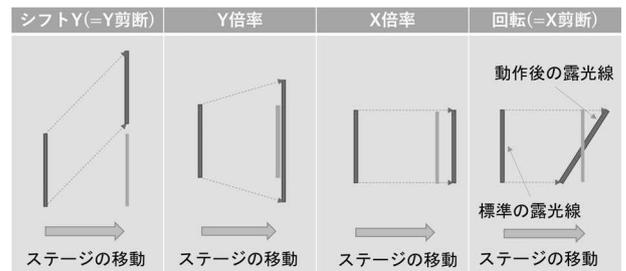


Fig. 7 各補正動作のイメージ

3.4.1. シフト Y (=Y 剪断)

Y 方向はポリゴンスキャンの方向となっている。ポリゴンスキャンの開始タイミングに時間的なオフセットを入れることで露光位置を Y 方向にシフトさせることができる。ローラーの回転とシフト Y 動作を組み合わせることで Y 剪断の変形が可能となっている。Fig. 8 (a) にシフト Y を連続的に変更しながら露光を行った結果のベクトル図を示す。

3.4.2. Y 倍率

Y 倍率は、光源の発光周期を変更させることにより露光間隔を僅かに変更させて、全体としてスケーリングを発生させる。周期変調はポリゴン 1 面毎に変更が可能であり、連続的に倍率を変化させながら露光が行える。Fig. 8 (b) に Y 倍率を連続的に変更させた結果のベクトル図を示す。

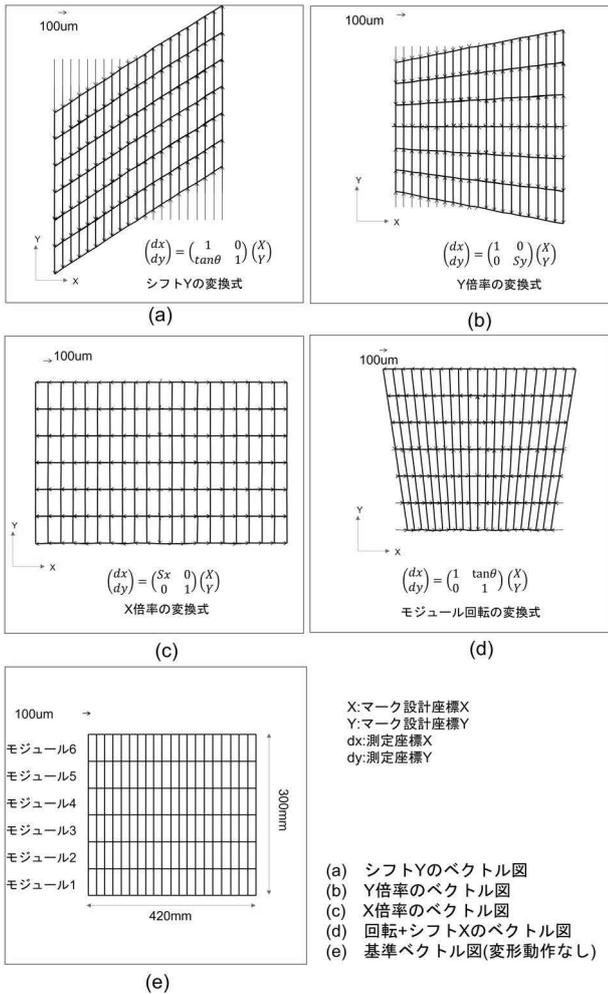


Fig. 8 パターン変形露光結果のベクトル図

3.4.3. X倍率

X方向は、ローラーの回転方向となっている。ローラーの速度とポリゴンの回転速度の関係を変更する事でX倍率の変更を行う。例えば、ステージが等速で動いている状態で、ポリゴンの回転数を上げると露光密度が増えるため露光パターンは縮み、逆に回転数を下げるとパターンは伸びる。Fig. 8 (c) にX倍率をかけた結果のベクトル図を示す。

3.4.4. 回転 (=X 剪断) / シフト X

50 mm の露光範囲を持つモジュールの中心を回転基準として機械的にモジュールを回転できる機構が搭載されている。この機構によって露光パターンの回転を行うことができる。ローラーでフィルムを搬送する動きと組み合わせることで、X 剪断方向の変形となる。

また、モジュールには露光位置を X 方向にシフトさせる光学素子が搭載されている。この素子を露光中に駆動させることで、モジュール毎に個別のシフト X を行うことができる。

Fig. 8 (d) に連続的にモジュールを回転させた結果のベクトル図を示す。各モジュールの回転量は同一だが、シフト X と組み合わせることで台形の変形が可能となる。

Fig. 8 に示した各変形動作のリニアリティの測定結果を

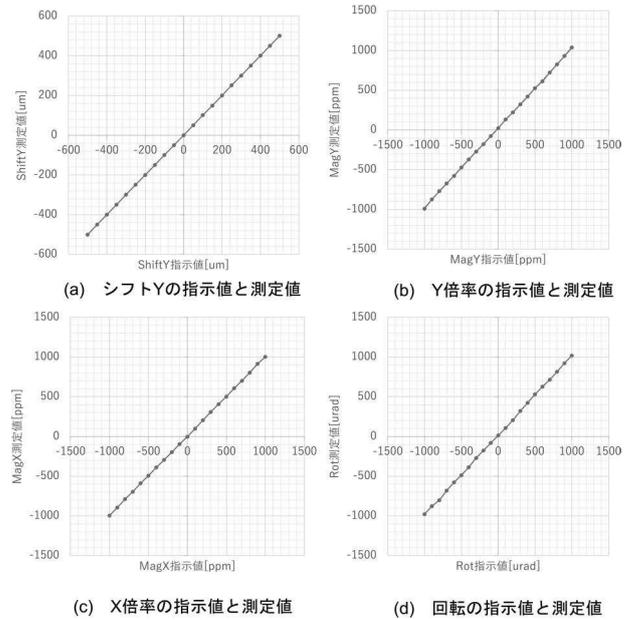


Fig. 9 露光指示値と実測値の関係

Fig. 9 に示す。X 軸は露光機目標値で、Y 軸が実際に測定した変形量を示している。Fig. 9 (a) のシフト Y は $-500 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$ の範囲、Fig. 9 (b) の Y 倍率は $-1000 \text{ ppm} \sim 1000 \text{ ppm}$ の範囲、Fig. 9 (c) の X 倍率は $-1000 \text{ ppm} \sim 1000 \text{ ppm}$ の範囲、Fig. 9 (d) の回転は $-1000 \mu\text{rad} \sim 1000 \mu\text{rad}$ の範囲でリニアに動作している事が確認できる。

4 重ね合わせ露光

開発した装置のアライメント計測について以下に述べる。フィルムを搬送させながらエンコーダー位置と同期して計測を行うことにより、フィルムの X 方向の位置を計測する。アライメント顕微鏡は Y 方向に配列されているため、顕微鏡基準でフィルムの Y 方向の計測を行う。アライメント顕微鏡で測定したマークの設計値と計測したマークのズレ量から、フィルムの変形量の計算が可能となる。この動作は各モジュールで行われるが、アライメントカメラは隣り合うモジュールで共通のものを使用するため、モジュール間で連続的な計算が可能となっており、露光モジュールの継ぎ部やアライメント列の切り替えが発生してもパターンの連続性を担保している。アライメント計測結果からパターン変形の各成分の補正値を算出した後は、その補正値に従って露光ユニットが露光を実施する。Fig. 10 にアライメントの計算モデルを示す。アライメント顕微鏡の計測結果と設計座標からモデル式を用いて、補正量を計算する。この計算を列毎に繰り返し実施する事で、Roll-to-Roll のような連続パターンにも対応できるようになっている。

4.1. 重ね合わせ精度評価と結果

アライメント計測および重ね合わせ露光を評価した結果

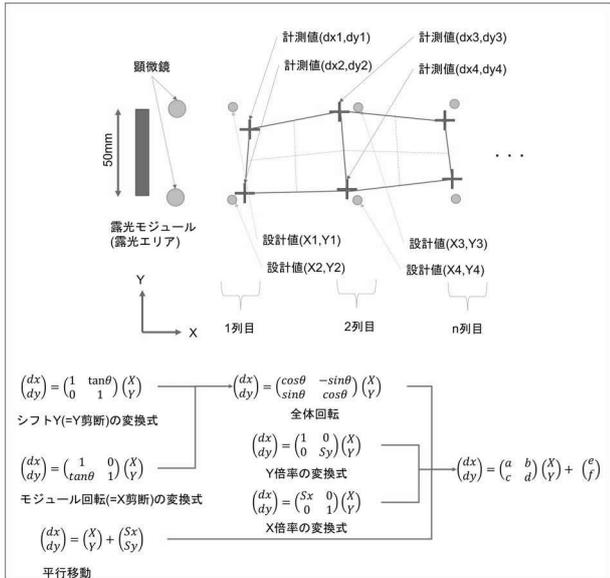


Fig. 10 アライメントの計算モデル

について述べる。A3サイズのフィルムに積層構造体を作製した際の結果と、Roll-to-Rollでフィルムを搬送し積層構造体を作製した結果をそれぞれ示す。

4.1.1. A3サイズフィルムでの評価結果

A3サイズのPIフィルム上にAl/SiO₂/Al/保護膜等からなる多層構造を作製した。各レイヤーで金属配線の加工・開口パターンの加工をフォトリソグラフィーで実施した。また、途中のレイヤーでは200度で1時間のアニールも実施した。保護膜を加工する際のフィルムの形状のベクトル図 Fig. 11 (a) と、重ね合わせ露光を実施した際の誤差量を測定したベクトル図 Fig. 11 (b) を示す。

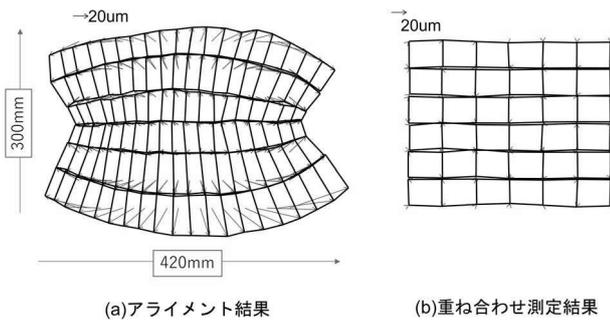


Fig. 11 A3フィルムへの重ね合わせ精度評価結果

Fig. 11 (a) のフィルム形状は、膜応力・アニール等によってフィルムが長手方向で収縮形状、短手方向では膨張形状をとっていることが確認できる。通常の露光装置ではこのような形状に対して重ね合わせ露光をすることは困難であるが、開発した露光装置はフィルムの変形に沿って露光が行えている。露光したフィルムの重ね合わせ誤差量のヒストグラムを Fig. 12 に示す。重ね合わせ精度は平均+3σでX, Yともに±1.8μmとなっている。また、ほかのすべてのレイヤーで装置はフィルムの変形に追従し重ね合わせ露光を行えることが確認できた。

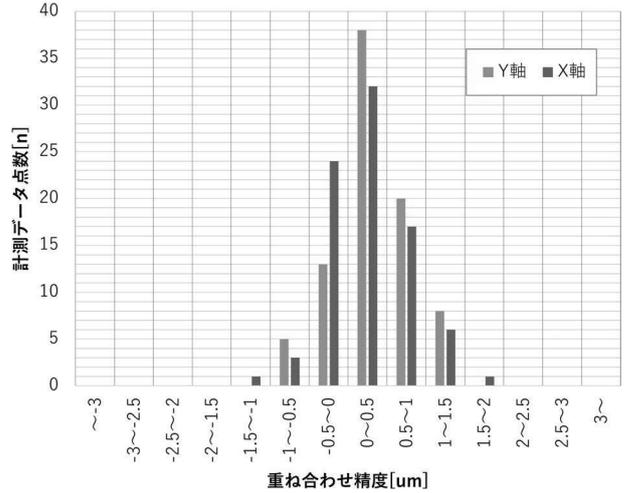


Fig. 12 A3フィルム重ね合わせ誤差量のヒストグラム

4.1.2. Roll-to-Roll での評価結果

Roll-to-Rollで20mに渡り連続的にAl配線を形成した後、絶縁層の成膜・アニールを実施した。この状態のフィルムに対してアライメントをしながらフォトリソグラフィーにて開口パターンを形成した。この時フィルム形状と、そのフィルムに対してアライメント露光を行った際の重ね合わせ露光の計測結果を Fig. 13 に示す。

X方向の伸び、およびY方向の蛇行成分、工程起因と思われる変形がアライメント結果から見て取れるが、重ね結

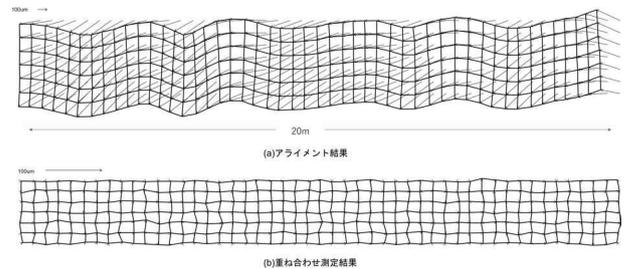


Fig. 13 Roll-to-Roll 露光時の重ね合わせ精度評価結果

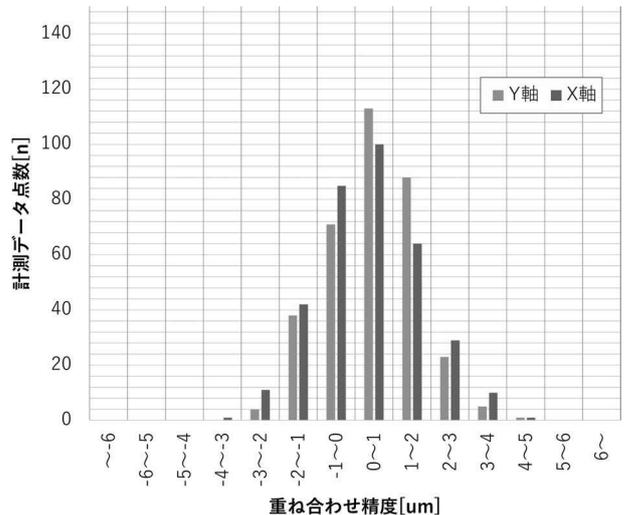


Fig. 14 Roll-to-Roll 重ね合わせ誤差量のヒストグラム

果は十分に補正され Fig. 14 に示すヒストグラムから重ね合わせ精度 $\pm 4 \mu\text{m}$ 以内となっていることが分かる。フィルムに対して以前もパターンニングを行った結果を報告したが、その時よりもより実際の工程に近い条件で、高精度に長い距離パターンニングができる事が確認できた [15]。

5 パターン作製例

露光装置を用いて積層構造、単層の配線パターンなど、広くフィルム上にパターンが形成可能である事が確認できた。Fig. 15 に実際に試作した長尺のパターンを示す。露光工程以外にも Roll-to-Roll 工程に対応した設備を開発し、全 Roll-to-Roll 工程で作製した 20 m 以上の連続的なパターンとなっている。デバイスを試作する際には、各工程でプロセスチェックを行いパターン修正・変更などを実施するが、本装置はマスクレスの直描露光装置であるため、CAD データの変更だけで対応が行え、試作のサイクル、試行頻度を上げることが可能である。また、フレキシブルエレクトロニクスの様にフレキシブル性を利用したデバイスを作製する場合、対象の形状・用途に合わせたデバイス作製が重要となってくる。マスクレスであれば、画像データの更新で個々の用途に応じたオンデマンド製造が可能であり、長尺のフィルム内で複数の異なる形状のデバイス試作なども可能となる。任意のパターンの露光デモとして、富嶽三十六景の画像データから作製したパターンを Fig. 16 に示す。Fig. 16 (b) が元の原画であり、 $800 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ のサイズ



Fig. 15 試作した長尺パターン



(a)



(b)

Artist Katsushika Hokusai
Title Under the Wave off Kanagawa, also known as The Great Wave, from the series Thirty-Six Views of Mount Fuji (Fugaku sanjūrokkei)
Place Japan (Object made in)
Date 1826–1836
 The Art Institute of Chicago

Fig. 16 マスクレス露光機で露光した富嶽三十六景

として露光したものが Fig. 16 (a) となる。微小な領域に水しぶきまで確認できる緻密なパターンが得られていることが分かる。

6 まとめ

変形の大きなフィルムに対して高精度に重ね合わせ露光を行えるマスクレス露光装置を開発した。A3サイズのフィルムから 20 m 以上の長尺フィルムまで、高精細にアライメントが必要な積層構造フィルムを作製できることが確認できた。特に A3サイズでは成膜・アニール工程を経た変形の大きなフィルムに対して $6 \mu\text{mL/S}$ 以下のパターンを全面で $2 \mu\text{m}$ 以下の精度で重ね合わせることが確認できた。また CAD データの変更のみで露光パターンを変更できるため、試作やオンデマンドのパターンに対して、特に有効な装置であることが確認できた。本露光装置を用いれば多種・多様なフレキシブル電子デバイスを、Roll-to-Roll 方式でオンデマンドに作製することができる。本装置がフレキシブルエレクトロニクスの発展へ寄与することを期待する。

引用文献

- [1] K. Kuribara *et al.* "Organic transistors with high thermal stability for medical applications," *Nature Communications*, Vol. 3, 723, 2012.
- [2] B. Wang *et al.* "Foundry-compatible high-resolution patterning of vertically phase-separated semiconducting films for ultraflexible organic electronics," *Nature Communications*, Vol. 12, 4937, 2021.
- [3] M. Kaltenbrunner *et al.* "Ultrathin, highly flexible and stretchable PLEDs," *Nature Photonics*, Vol. 7, pp. 811-816, 2013.
- [4] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano and H. Hosono, "Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors," *Nature*, Vol. 432, pp. 488-492, 2004.
- [5] L. Zhou, A. Wang, S. Wu, J. Sun, S. Park and T. N. Jackson, "All-organic Active Matrix Flexible Display," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, 083502, 2006.
- [6] I. Yagi *et al.* "A Full-Color, Top-Emission AM-OLED Display Driven," *SID 07 DIGEST*, Vol. 63-2, pp. 1753-1757, 2007.
- [7] M. Mizukami *et al.* "Flexible AM OLED Panel Driven by Bottom-contact OTFTs," *IEEE Electron. Dev. Lett.*, Vol. 27, pp. 249-251, 2006.
- [8] Y. Nakajima *et al.* "Improvement in Image Quality of a 5.8-inch OTFT-Driven Flexible AMOLED Display," *Journal of the SID*, Vol. 19, pp. 94-99, 2011.
- [9] M. Nakata *et al.* "Development of Flexible Displays Using Back-channel-etched In-Sn-Zn-O Thin-film Transistors and Air-stable Inverted Organic Light-emitting Diodes," *Journal of the SID*, Vol. 24-1, pp. 3-11, 2016.
- [10] T. Aoyama *et al.* "An 8.34-inch 1058-ppi 8K x 4K Flexible OLED Display," *SID 2017 DIGEST*, Vol. 24-3, pp. 338-341, 2017.
- [11] J. Yoon *et al.* "World 1st Large Size 18-inch Flexible OLED Display and the Key Technologies," *SID 2015 DIGEST*, Vol. 65-1, pp. 962-965, 2015.
- [12] J. Hong *et al.* "The First 9.1-inch Stretchable AMOLED Display Based on LTPS Technology," *SID 2017 DIGEST*, Vol. 5-5, pp. 47-50, 2017.
- [13] H. Shin *et al.* "Advanced OLED Display Technologies for Large-Size Semi-Flexible TVs," *SID 2017 DIGEST*, Vol. 45-2, pp. 609-612, 2016.
- [14] Y. Kito *et al.* "Direct Imaging Exposure Equipment with High Overlay Accuracy for Flexible Substrate in Roll-to-Roll Method," *Proceeding of IDW 16*, pp. 515-518, 2016.
- [15] Y. Kito *et al.* "Novel Direct Imaging Exposure System with High Productivity for Flexible Substrate in Roll-to-Roll Method," *Proceeding of IDW 17*, pp. 500-512, 2017.

堀 正和 Masakazu HORI
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

内藤一夫 Kazuo NAITO
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

中野貴之 Takayuki NAKANO
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

伊倉良幸 Yoshiyuki IGURA
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

橋場成史 Seiji HASHIBA
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

鬼頭義昭 Yoshiaki KITO
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit