

令和2年度  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「インクジェット技術を利用した次世代フラットパネルディスプレイ  
用フォトリソスト塗布装置及び専用フォトリソストの研究開発」

研究開発成果等報告書

令和3年5月

担当局 九州経済産業局  
補助事業者 公益財団法人くまもと産業支援財団

## 目 次

第1章	研究開発の概要 .....	3
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標 .....	3
1-2	研究体制 .....	7
1-3	成果概要 .....	7
1-4	当該研究開発の連絡窓口 .....	8
第2章	本論 .....	9
2-1	インクジェット式レジスト塗布設定 .....	9
2-1-1	レジスト吐出制御 .....	9
2-1-2	レジスト基盤親和性調整 .....	11
2-1-3	ステージ開発 .....	12
2-2	レジスト塗布課題への対応 .....	13
2-2-1	ノズル乾燥防止機構の搭載 .....	13
2-2-2	レジスト循環濾過システムの搭載 .....	14
2-2-3	塗布エリア制御ソフトウェアの搭載 .....	14
最終章	全体総括 .....	16
3-1	3年の研究開発成果 .....	16
3-2	薄膜塗布目標達成状況 .....	17
3-3	研究開発後の課題・事業化展開 .....	18

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### ○研究開発の概要

TV やスマートフォンの液晶画面は「フラットパネルディスプレイ（Flat Panel Display、以降 FPD と記述）」と呼ばれる。現在、AI（人工知能）や IoT（Internet of Things）等の登場によって、FPD 業界においては大型化と並行し急速な高精細化（画質の向上）が求められており、その高精細化の鍵を握るのは FPD の製造の際に用いるフォトマスクである。

本事業はフォトマスクの高精細化に必須となるインクジェットレジスト塗布装置、及び専用レジストの開発を目的とする。

#### ○研究開発の背景

##### 1. 前提条件解説（FPD パネルと FPD フォトマスク）

###### ① FPD パネル

FPD は赤緑青 3 色の組み合わせで色を表現する。FPD パネルとは、赤緑青を 1 画素として、それを画面内に敷き詰めたものである（図 1）。FPD パネルは発光を制御する電子配線部である TFT（Thin Film Transistor：薄膜トランジスタ）と、色を出す部分のカラーフィルタの 2 つが最重要な要素部品となる。特に TFT の内部は微細な電子配線構造であり、現在配線の最小線幅  $1.5\mu\text{m}$  程度であるが、微細化要求が進み、今後は  $1\mu\text{m}$  未満が達成目標になる（ $1\mu\text{m}$  は  $0.001\text{mm}$ ）。

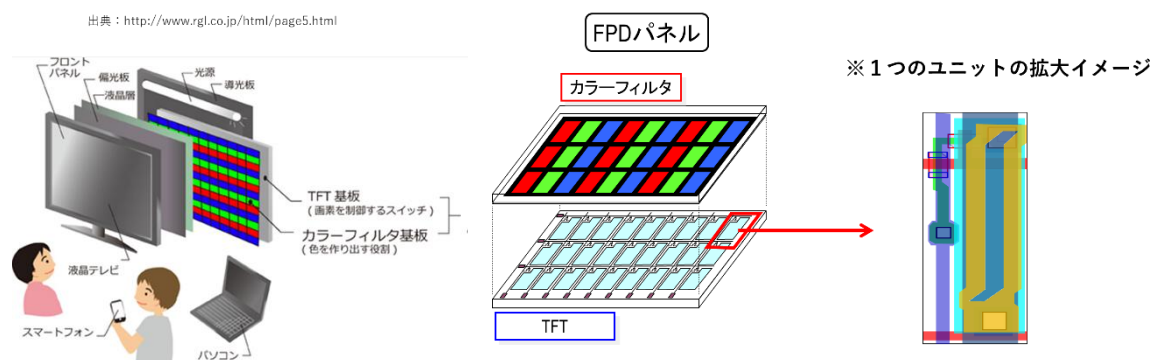


図 1 FPD パネルの構造 出典：(株) FSCE による作図

###### ② FPD フォトマスク

前述した微細構造の TFT やカラーフィルタを製作する際に必要となる光学治具がフォト

マスクである。TFT とカラーフィルタは版画と同じ原理で製作する（図 2）。フォトマスクはパネルを製作するための原版である。版画のように重ねて行くことでカラーフィルタと TFT が完成する。

版画では版木に塗料を付け紙に写し取っていくが、それに対し FPD パネルの製造工程では写真の技術を応用したフォトリソグラフィという技術を用いる。光を使ってフォトマスク上の設計パターンをパネルに転写していくことで FPD パネルが完成する。従って、FPD パネルの製作にはフォトマスクが不可欠である。

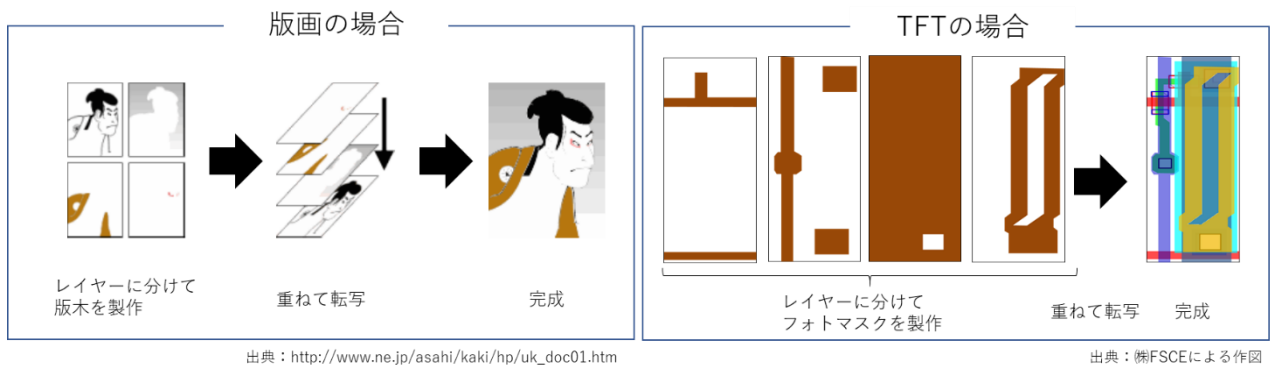


図 2 TFT の製造方法

【フォトレジスト塗布技術】

フォトレジストはレジストコーター（レジストを基板に薄く均一に塗布するための装置）を使用してフォトマスク基板に塗布される。技術開発ロードマップを達成していく上で最も重要となるのが、フォトレジストを薄く塗布する薄膜塗布技術である（以下、薄膜化）。

薄膜化の目的はフォトマスク上に形成するパターンの解像性向上である。フォトマスク描画機の光量設定には限界がある。描画装置の最も弱い光量設定でより細い線幅のパターンを解像させる（パターンを正しく形成する）ためには、レジスト膜厚は薄い方が良い。フォトマスクメーカーがマイクロ技研株式会社に対して要求するレジスト塗布膜厚は 300nm である。それに対し現状は膜厚 500nm が限界である（1nm は 0.001  $\mu\text{m}$ ）。



図 3 レジスト薄膜化のメリット 出典：(株)FSCE による作図

既存レジストコーターで薄膜化出来ない理由は、塗布膜厚の均一性を保てないからである。1m を越える大サイズ基板に塗布する技術は、高速スピン時の気流の影響や塵埃による異物（ゴミ）の問題があり非常に難しい技術である。既存レジストコーターには、「スピン方式」と「CAP（キャピラリー（Capillary））方式」がある。

①スピンコート方式：基板を回転させながら、基板上にフォトレジストを滴下して高速回転塗布する方式

②CAP 方式：毛細管現象を用いて、基板下面側から少量ずつレジストを塗布する方式

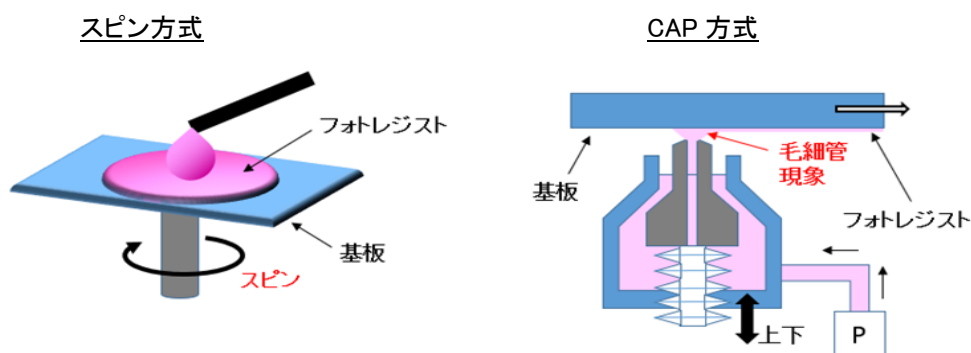


図 4 従来の塗布方式

#### ○従来技術に代わる新技術の概要

新技術を実現するために解決すべき研究課題に対し当開発は以下に対応する。

フォトマスクレジスト塗布技術の課題解決にあたり、本研究開発ではインクジェット技術を採用する（図 5）。

インクジェット技術は近年その技術力の向上が目覚ましい。既に多くの分野で展開されており、半導体向け（半導体シリコン基板：最大直径 300mm の円形基板）ではインクジェットコート方式で膜厚 100nm 以下の薄膜化実績がある。但し、1m を越える大型基板に対しての塗布実績は世の中には無く、FPD のフォトマスク用のインクジェット方式レジストコーターは世界初（マイクロ技研㈱による調査※1）の革新的な技術となる。

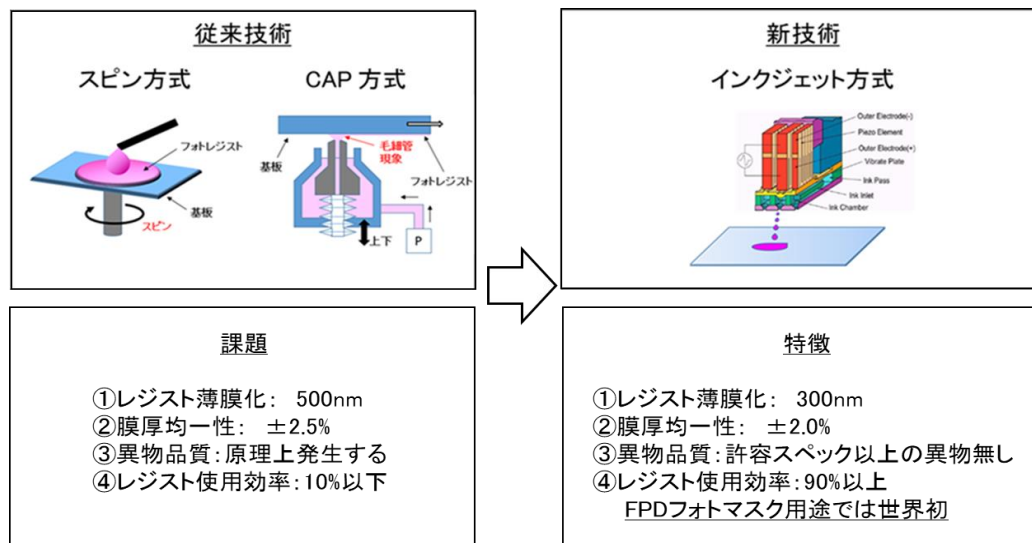


図 5 FPD フォトマスク向けレジストコート技術（方式） 出典：(株) FSCE による作図

インクジェット方式でフォトレジストを基板に塗布するためには、「レジスト吐出条件」と「レジストと基板の親和性」の条件を確立する必要がある。併せて膜厚の均一塗布を実現するためのステージ連動も重要である。

インクジェット塗布方式で課題となるのは塗布ノズルの乾燥である。吐出ノズル口径が非常に微細（10～100 $\mu$ m）であり、吐出液滴量も極微量の制御が必要である事からノズルの乾燥対策がシビアとなりるので、その対策が必要である。

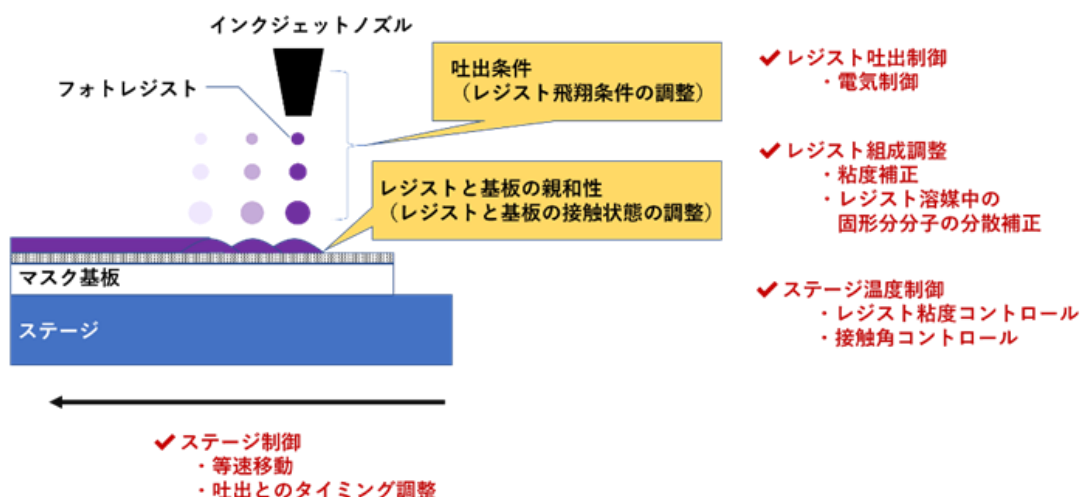


図 6 インクジェットとレジスト特性のマッチング 出典：マイクロ技研(株)による作図

## ○本研究開発で取り組む目標

本研究開発で、取り組む目標を下表に示す。

表 1 本研究で取り組む目標

高度化目標	本開発の取り組み	
	解決課題	取り組みの概要
ア.高機能化・精密化・軽量化	レジスト膜厚(薄膜化)	<b>【1.】</b> インクジェット式 レジスト塗布設定
	塗布膜厚均一性の向上	【1-1】レジスト吐出制御(ノズル-フォトレジスト条件設定) ・レジスト吐出電圧制御(電圧調整) ・レジスト組成調整(粘度・分散度調整) ※レジスト組成は化学分析結果を踏まえて補正 【1-2】レジスト基板親和性調整(基板-フォトレジスト条件設定) ・レジスト表面張力制御(粘度補正) ・レジスト組成調整(粘度・分散度) ※レジスト組成は化学分析結果を踏まえて補正 【1-3】ステージ開発 ・G6世代フォトマスクサイズ対応高精度ステージの設計
ウ.品質の安定性・安全性の向上	ノズル乾燥対策	<b>【2.】</b> レジスト塗布課題 への対応
	異物(ゴミ)混入対策	
カ.生産性・効率化の向上、低コスト化	レジスト消費量の削減	【2-1】ノズル乾燥防止機構の搭載 【2-2】レジスト循環濾過システムの搭載 【2-3】塗布エリア制御ソフトウェアの搭載
オ.環境配慮		

アドバイザー



アドバイザー



ワイエイシイテクノロジーズ株式会社  
 特別顧問 佐藤 康男  
 ・マスク製作技術(エッチング処理の知見)  
 ・装置大型化の知見

熊本県産業技術センター  
 ものづくり室 研究主幹兼室長 森山 芳生  
 研究主任 松枝 寛  
 ・フォトリソグラフィプロセスの知見  
 ・FPD製造プロセスの知見

図 7 本研究開発の実施体制図

### 1-3 成果概要

○インクジェット技術を利用した次世代フラットパネルディスプレイ (FPD) 用フォトレジスト塗布装置の研究開発

装置の設計、部品選定、調達、組み立てを行い、レジスト吐出機構、ステージ、ノズル乾燥防止機構、レジスト循環濾過システム、および塗布エリア制御ソフトを搭載したインクジェット方式 FPD 用フォトレジスト塗布装置を完成することができた。

完成後、川下ユーザーのマスク製造ラインでユーザー評価を行う予定であったが、コロナ禍の影響で、まだ、ユーザー評価が実施できていない。

○専用レジストの研究開発

インクジェット技術を利用した次世代FPD用フォトレジスト塗布装置の能力を最大に発揮するための専用レジストを開発できた。上述の通り、インクジェット塗布装置での川下ユーザー評価はコロナ禍の影響で実施できていないが、従来のスピナー塗布機での川下ユーザー評価では、既存レジストよりも密着性等について、性能がよいと好評価であった。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

• 事業管理機関

公益財団法人くまもと産業支援財団 産業振興部 産学連携推進室 山内信義

TEL 096-280-3300、e-mail ; [yamauchi@kmt-ti.or.jp](mailto:yamauchi@kmt-ti.or.jp)

• ミクロ技研株式会社 九州工場 機械設計 マネージャー 眞柄洋平

TEL 096-235-7201、e-mail ; [y-magara@micro-eng.co.jp](mailto:y-magara@micro-eng.co.jp)

• 株式会社FSCE 技術部 シニアエンジニア 石川雄大

TEL 096-288-7117、e-mail ; [yuu.ishikawa@fsce.co.jp](mailto:yuu.ishikawa@fsce.co.jp)

## 第2章 本論

インクジェット方式でレジストを塗布する装置の開発は世界で初めてであり、未知の技術である。本研究開発のターゲットであるFPDのマスクで最も生産量が多いのはG6サイズと呼ばれているフォトマスクサイズで800×920mmのもの（以降G6サイズ）であるが、最初からそのサイズのインクジェット・ヘッドの吐出条件等を開発するのはリスクが大きい。そこで、初年度は、小型のA4サイズ（210×297mm）の評価を行い、レジスト塗布に必要なインクジェット・ヘッドの吐出条件等の開発とG6サイズ塗布機の外形等の設計、部品発注を並行し進めた。2年目、3年目でG6サイズに対応したデモ機を完成させた。

専用レジストの開発に関しては、初年度、材料の成分分析を行い、2年度で組成調整を実施し、3年度に完成させ、川下ユーザーでのサンプル評価を行った。

### 2-1 インクジェット式レジスト塗布設定

#### 2-1-1 レジスト吐出制御

＜レジスト吐出電圧制御（電圧調整）＞

インクジェットでは、定位置に正確にレジストを飛ばす技術の確立が必要である。インクジェット・ヘッドは、ピエゾ素子を電気制御で上下・振動させる事によって液滴を吐出する（図8）。レジスト吐出状況を飛翔観察システムでモニターし、電気信号の調整で液滴の大小、噴霧状など様々な形状を作り出す事で、フォトリソの吐出に最適な電気信号条件を設定する。

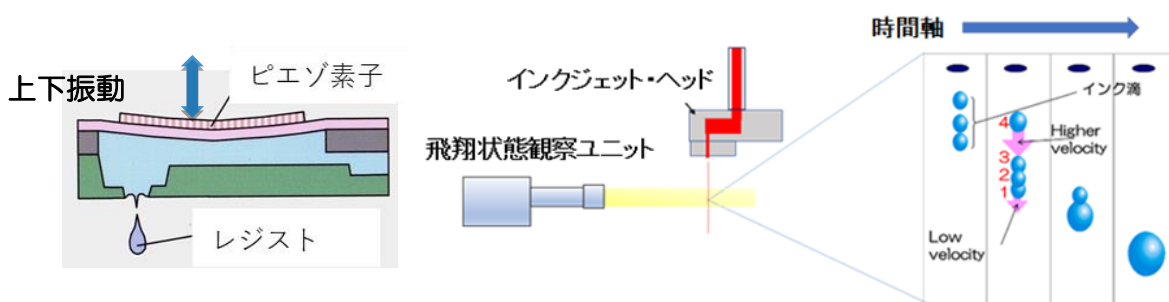


図8 インクジェット機構（左）及び 飛翔観測システム概略 出典：(株)FSCEによる作図

そこで、飛翔観察装置準備、A4評価機ステージ準備、インクジェット・ヘッドの選定を行った。上図のように2種類のインクジェット・ヘッド「UH-MA810」、「Samba」の2種類の小滴から大滴までの安定性、液滴サイズのバリエーションを比較評価し、Samba ヘッ

ドを選定した。

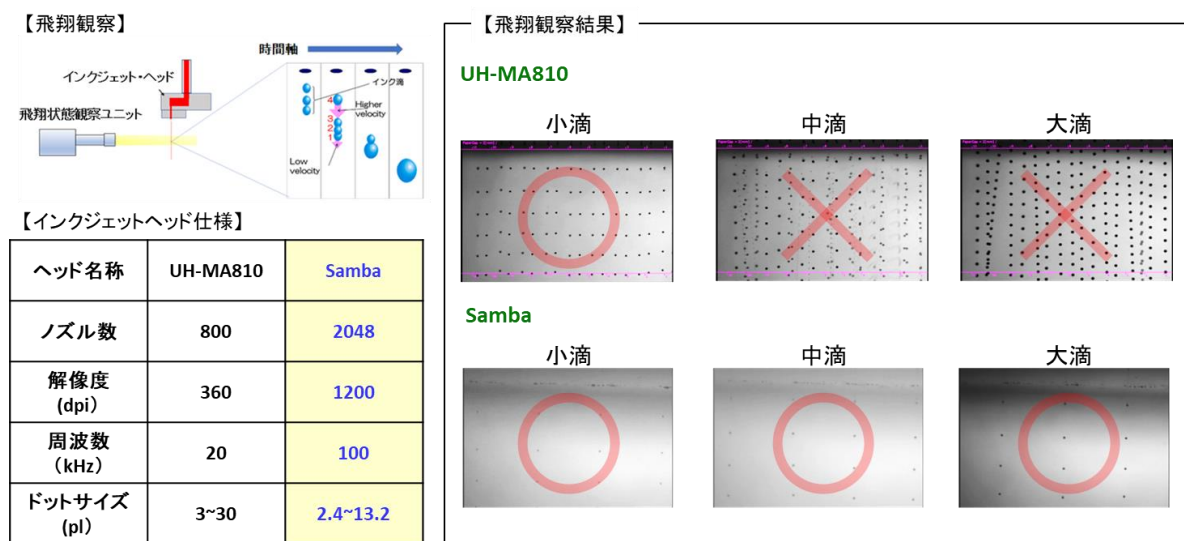


図 9 インクジェット・ヘッドの違いによる飛行観測結果の違い

<レジスト組成の決定>

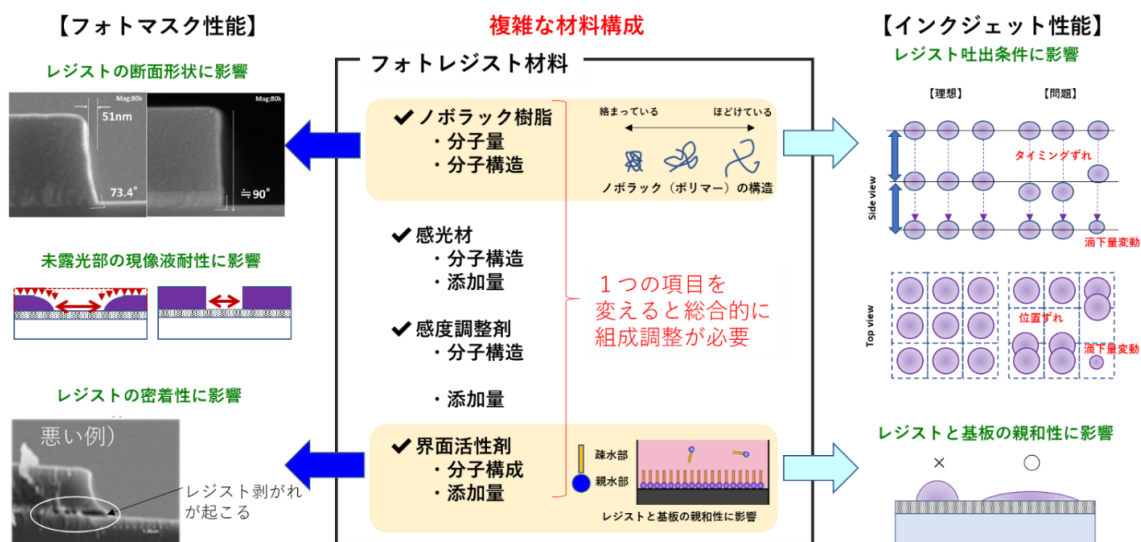


図 10 インクジェット対応組成調整と制約(レジスト基本性能維持)イメージ 出典: 株式会社FSCEによる作図

インクジェット吐出及び塗布制御が可能となる様に、組成調整・検証を進めたが、並行してフォトレジストの基本性能である解像性、コントラスト（断面形状）、感度（線幅制御性）等が従来レジストより性能が高い事が重要となる（図 10 参照）。よって、インクジェッ

ト塗布の為のレジスト組成調整の都度、フォトレジストの性能である感度やコントラストなどの確認を行った。

その結果、断面形状、飛翔試験、塗布試験結果が良好であったノボラック A を選定した。

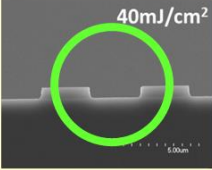
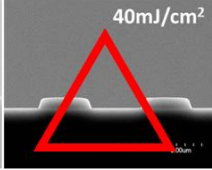
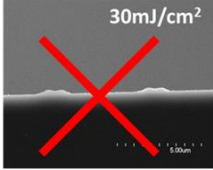
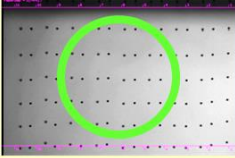


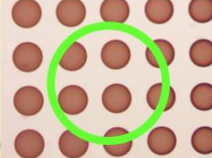
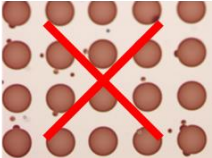
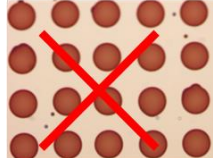
	ノボラックA	ノボラックB	ノボラックC (既存レジストに近い組成)
P-クレゾール比率	71%	39%	23%
レジスト性能 (断面形状)			
インク性能 (飛翔試験)			
インク性能 (塗布試験)			

図 11 樹脂の違いによるレジスト性能、インク性能の評価結果

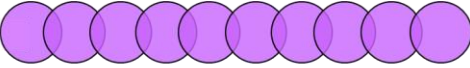
2-1-2

レジスト基盤親和性調整

<レジスト表面張力制御>


レジストコーターにハロゲンヒーターを搭載する手法で、基板を加熱するシステムを構築し、フォトレジストを温まった基板上（40～60℃）に着弾する事で表面張力を下げ、接触角

一列のみ塗布した場合の液滴の合一性



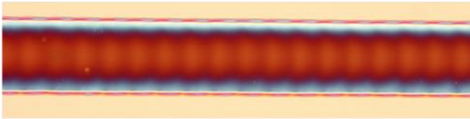
をコントロールすることを検討したが、下図のように

常温時  
(基板温度23℃)



液同士が均一に馴染んでいる

基板温度変更時  
(基板温度55℃)



液同士が均一に馴染んでいない

滴下時に基板を加熱すると液滴同士が馴染まず、合一化しないことが分かった。そこで、温度制御はしないこととした。

図 12 塗布部分の基板加熱評価結果

<レジスト組成調整>

従来のスピンドーター用レジストでは、界面活性剤が添加されているため、同様に界面活性剤を添加し、合一化を進める予定であったが、下図のように界面活性剤があると液滴同士が合一化しないことが分かった。それで界面活性剤は添加しないこととした。

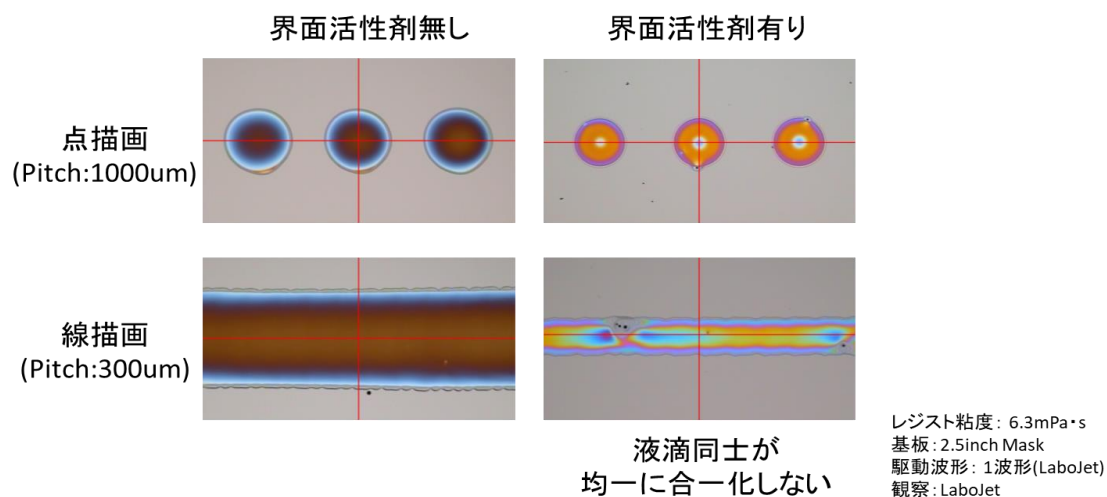


図 13 界面活性剤の有無による合一化評価結果

2 - 1 - 3

ステージ開発

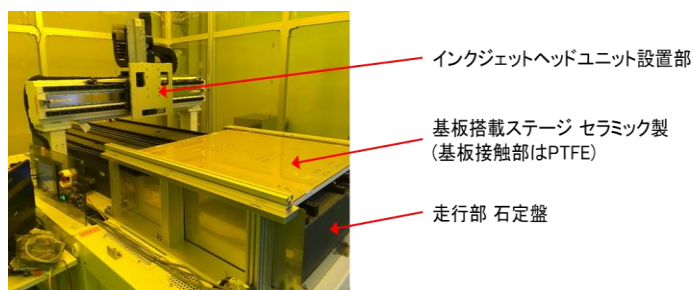


図 14 ステージ部分組み立て後写真

図 14 に開発したステージ部分の外観を示す。表 2 が組立後のステージ精度の測定結果である。十分に許容値を満たしていることがわかった。

表 2 組立後のステージ精度測定結果

No.	検査項目	許容値	実測値
1	繰り返し位置決め精度	X軸 ± 0.1 mm	± 0.0003 mm
		Y軸 ± 0.001 mm	± 0.0003 mm
		Z軸 ± 0.1 mm	± 0.0002 mm
2	走り真直度A(上下)	Y軸 0.01 mm	0.0033 mm
3	走り真直度A(水平)	Y軸 0.01 mm	0.0048 mm
4	走り真直度B(上下)	X軸 0.1 mm	0.0061 mm
5	走り真直度B(水平)	X軸 0.1 mm	0.0177 mm

## 2-2 レジスト塗布課題への対応

### 2-2-1 ノズル乾燥防止機構の搭載

レジストは塗布時には液体の状態であるが、レジスト吐出の際にノズル周辺でレジストが乾燥して固形化するとノズルが目詰まりし、不吐出領域発生の原因となる。その対策として、下図に示す乾燥防止機構を開発した。

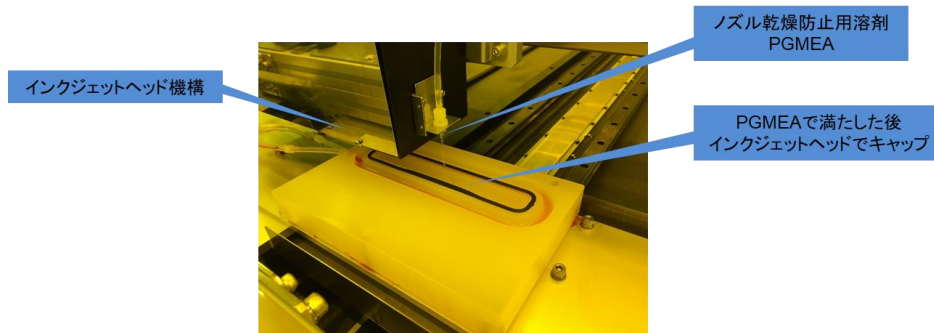
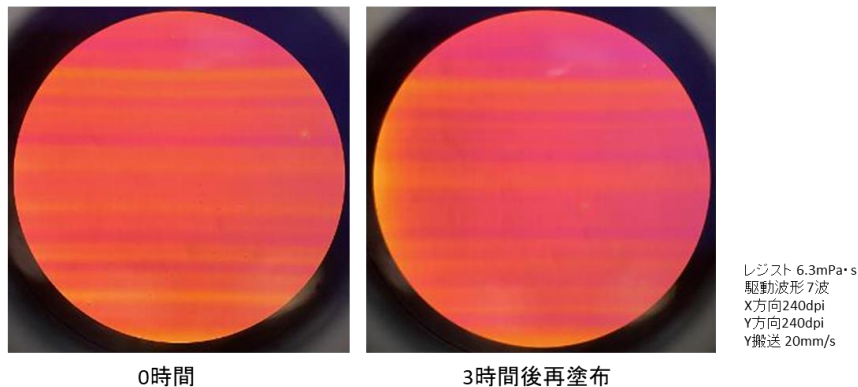


図 15 製作したノズル乾燥防止機構

#### 3時間後再塗布の比較

- ・通常の塗布後、装置は乾燥防止機構でノズル面をキャップし待機
- ・3時間経過後、同一条件で再塗布



3時間後再塗布でもノズルの吐出抜けは見られない

図 16 ノズル乾燥防止機構の効果確認結果

その結果、上図に示すように、3時間の間隔をあけても再塗布した場合の吐出抜け不良は発生しなかった。マスク生産ラインの現場でも本乾燥防止機構は十分に成果を発揮すると思われる。

## 2-2-2 レジスト循環濾過システムの搭載

薬液供給システムの川下側（装置側）にて常時レジストの循環動作を行いながらフィルターを通す手法で、レジスト液中の固形成分の凝集による異物化を防止する。また、外部からの混入異物も除去する下図のような機構を設けた。

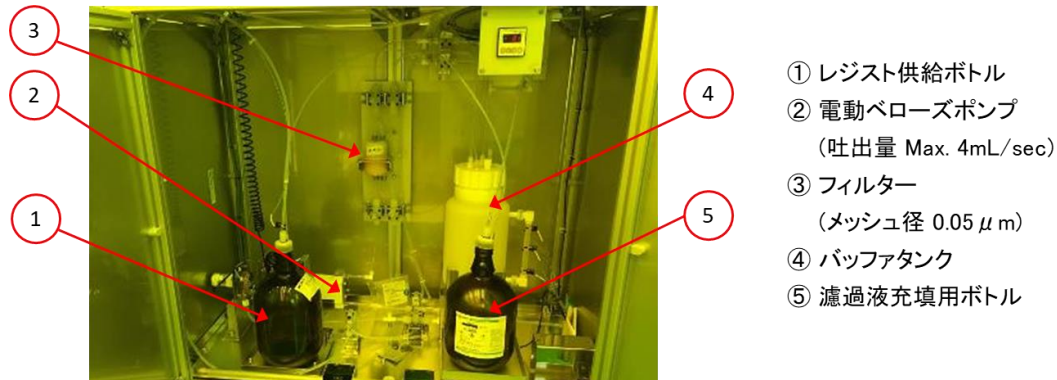


図 17 レジスト循環濾過システム

その結果、パーティクルカウンター検査において、10ml 中 0.5μm の異物 8.7 個（測定平均値）であった（目標；10 ml 中 0.5μm の異物 10 個以下）。

## 2-2-3 塗布エリア制御ソフトウェアの搭載

任意に設定した範囲に塗布制御が可能となる機構（印字アプリケーションソフト）を導入し、制御システムを構築する手法で、余剰レジストの端面・裏面回り込みを無くした。

本機能によって、スピコートで問題となる余剰レジスト（破棄するレジスト）の削減が可能となった。

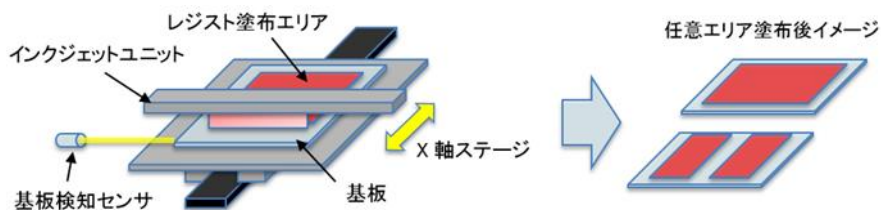


図 18 印字ソフト活用による塗布イメージ 出典：マイクロ技研(株)による作図

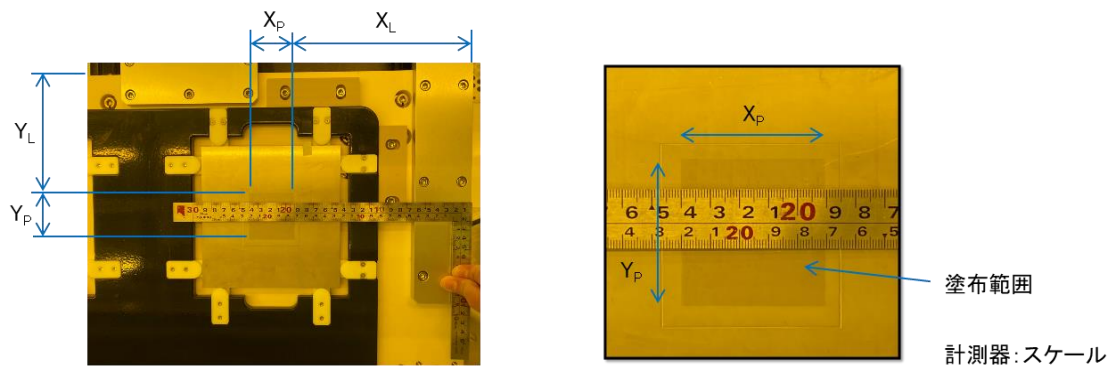


図 19 塗布エリアと寸法誤差の定義

表 3 設定値と塗布実測値の誤差測定結果

	$X_L$	$X_P$	$Y_L$	$Y_P$
塗布エリア設定値	190.8mm	50.0mm	129.8mm	50.0mm
塗布実測値	190.5mm	50.0mm	130.0mm	50.0mm
誤差 目標: ±1mm以内	-0.3mm	0mm	+0.2mm	0mm

塗布条件(粘度、塗布液量)により設定から1.5mm程度塗り広がる場合があり、実際の運用では塗り広がり代も考慮する必要がある

塗布したマスク基板の塗布エリア設定値と実測値を上表に示す。目標の±1.0mm以内は十分に達成しており、実用化には問題ないレベルであった。

## 最終章 全体総括

### 3-1 3年の研究開発成果

以上説明して来たように、インクジェット技術を利用した次世代フラットパネルディスプレイ（FPD）用フォトレジスト塗布装置、および専用フォトレジストを開発することができた。

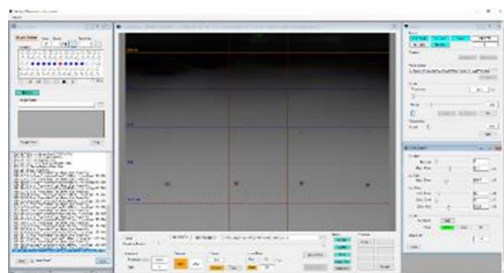
#### 【完成したG6サイズデモ機】



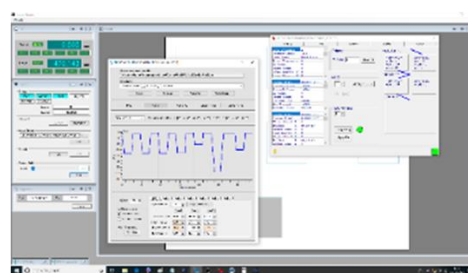
G6サイズデモ機全景



塗布制御PC



飛行観測ソフト



波形・塗布設定ソフト

図 20 製作したG6サイズ FPD 用フォトレジスト塗布装置

フォトレジスト塗布装置の全体像、および仕様は次の通りである。

#### 装置仕様

- 装置外形；L 3200mm × W 1700mm × H 2350mm（本体）
- 方式；インクジェット方式
- 対象基板；G6サイズ  
(800mm × 920mm × 8t, 10t; フォトマスクサイズ)
- 塗布可能範囲；最大 800mm × 920mm

- 塗布膜厚；300nm～1000nm
- レジスト；専用フォトレジスト
- 塗布速度；20mm/s～200mm/s

### レジスト仕様

- 粘度；3.0mPa・s～6.3mPa・s

### 3 - 2 薄膜塗布目標達成状況

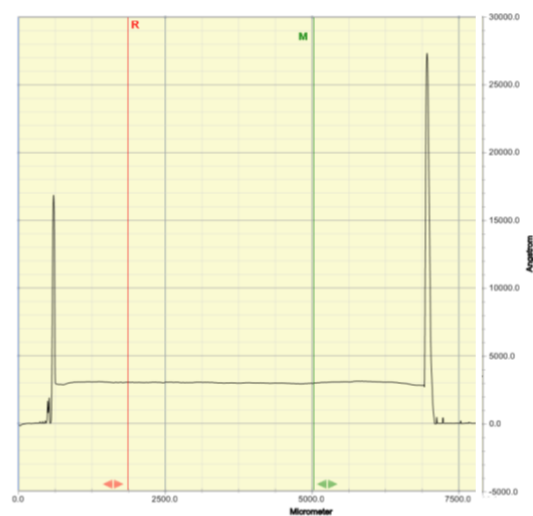
フォトマスクメーカーの要求値ならびに既存のレジスト塗布を上回る事を目指し、

- レジスト薄膜化；300nm
- 膜厚均一性；±2.0%

以上の数値を目標として掲げ、装置構成、レジスト組成、塗布条件の開発に取り組んできた。

図 21 のとおり、目標値を達成することができた。

レジスト膜厚 目標: 300nm	塗布均一性 目標: ±2%
299nm	±1.85%



計測器: Dektak 150

図 21 薄膜塗布目標達成状況

3 - 3 研究開発後の課題・事業化展開

顧客におけるサンプル評価が新型コロナ禍の影響でできなかったため、引き続き顧客とコンタクトを取りながら実施する予定である。その顧客評価で抽出された顧客要求課題を改善し、インクジェットレジスト塗布機、及び専用レジストの品質向上を図り、事業化を進める。

実施内容	2021年 5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	2022年 1月	2月	3月
<b>【インクジェット式レジスト塗布装置】</b> <b>【1】補完研究</b> <b>【1-1】サンプル出荷・顧客要求課題の抽出</b> <b>【1-2】課題改善</b> <b>【2】事業化</b> <b>【2-1】製品塗布装置の生産</b> <b>【2-2】販売開始</b>											
	→										
			→								
							→				
									→		
<b>【専用レジスト】</b> <b>【3】事業化</b> <b>【3-1】製品化のための性能微調整</b> <b>【3-2】製品レジストの生産</b> <b>【3-3】販売開始</b>											
	→										
							→				
									→		

図 22 事業化に向けたスケジュール

以上