

NGL ワークショップ 2025 報告

2025/10/3 文責:NGL 研究会幹事会

会議全体

次世代リソグラフィ技術研究会では、7月3、4日の二日間、応用物理学会シリコンテクノロジ一分科会の協賛のもと、恒例の次世代リソグラフィワークショップを東京工業大学蔵前会館にて開催しました。416名の参加者に登録いただき、大変盛況なワークショップとなりました。口頭発表は26件で、ポスター発表は39件の発表を頂きました。

各セッションを担当した企画委員が報告書を作成しましたので以下にご紹介いたします。

Plenary Presentations

基調講演は3件発表いただきました。1件目はASML Michael Lercel 氏より”Scaling EUV and holistic lithography to support Moore's Law”についてオンラインで講演いただきました。EUV露光機の開発状況や、ロードマップについても講演いただきました。開発段階ではあるが EUV光源の出力が open loop で 1125 W 出力で 30 分間の出力を達成している。リソグラフィの指標として、コストあたりのトランジスタ数が大切であり、システムコストはライフトайムが長くなると低くなる。また、ArFi、EUV NA 0.33、NA 0.55, NA0.75 と世代が進むごとに、コストあたりのトランジスタ数は増えていくことが紹介された。

2件目は産総研の益一哉先生より「アジャイル・ダイナミック時代の知の越境と価値創造：半導体・量子・AI の未来を拓く」と題してご講演いただきました。日本の半導体産業の衰退については、ChatGPT にまとめさせた内容と照合し、ほぼ納得のいく分析であることを確認した上で、Rapidus や LSTC 等の最新動向や半導体復活の基本戦略をご紹介いただきました。さらに、今後の「勝ち筋」についてもご提言いただきました。現代は基礎研究と応用、実用化、社会実装が同時並行で進展する「アジャイル・ダイナミクス社会」であり、戦略分野への重点投資の重要性が強調された。量子コンピューターは世界的な開発競争が進むわくわくする技術であり、共創と競争が並行して進展している分野である。日本の強みである経済の複雑性を活かすことができれば、「失われた 30 年」から脱却するチャンスになる。そのためには、未来への最大の投資である人材育成に本気で取り組む必要があるとの示唆をいただいた。

3件目は大日本印刷の吉川氏より「先端リソグラフィにおけるマスク技術の現状」と題してご講演いただきました。マスク技術を語るにあたり、グーテンベルクの活版印刷にまで遡り、その組版技術がマスク技術の基盤となっていることを紹介いただきました。軽快な語り口で、マスクメーカーとしての立ち位置、EUV リソグラフィ技術の現状、そして EUV マスクにおける新吸収体開発の困難さについてお話し下さいました。とりわけ、ウェハプロセスと異なりマスクプロセスではアンダーレイヤーの使用すら許されないなど、補助的なプロセスが適用できない点が難易度を高めているとの説明が印象的であった。

Optical Lithography & Advanced Patterning Technology

本セッションでは、4件の口頭発表と3件のポスター発表があった。レーザ光源、パッケージング向け露光、マスクレス露光機と多岐にわたり、興味深いものとなった。

ギガフォトンの古巻氏からは、最新の ArF エキシマレーザ光源をご紹介いただいた。ArF 液浸での 37nm hp パターニングでの E95 最適化や、スキャナースループットのため、パルス周波数を最大 8kHz まで向上させる開発状況を報告いただいた。ギガフォトンの諏訪氏からは、KrF エキシマレーザのアブレーション加工（パッケージングのガラス基板へのビア加工）への応用が示された。大面積の一括加工のため回折光学素子を用いた加工例を紹介いただいた。

ウシオ電機の曾原氏からは、パッケージ向け露光機特有の課題（基板変形に対応する広い DOF 確保など）および、フィールドサイズ 250mm x 250mm の大面積ステッパーの紹介があった。

ニコンの渡邊氏からはデジタルスキャナー（マスクレス露光機）を用いた、パッケージのダイシフトの補正露光の提案とコンセプト実証露光が紹介された。

ポスターセッションでは、ギガフォトン小林氏からレジストとレーザの E95 の最適化による LER/LWR の改善の実験結果が示された。ギガフォトン志賀氏からは、6kHz KrF 光源 G65K によるスループット向上と省電力化が紹介され、ギガフォトン山之内氏からは、スキャナーライフサイクル向上のための 7kHz 越えエキシマ光源高繰り返しについてのレーザチャンバ内部の風速、音響波のデータが示された。

Resist Materials

本セッションでは、レジスト材料・プロセス関係 4 件、DSA 関係 1 件、合計 5 件のオーラル発表があった。

1 件目は昨年に引き続き富士フィルム株式会社の王惠瑜氏からの発表で、EUV レジストの最大の課題であるストカスティック欠陥を緩和するためここ数年進めている 2 つの技術の紹介があった。富士フィルム社オリジナルのネガ型現像プロセス(ケトン系溶媒現像)は現像時における露光部の膨潤が著しく抑制されるため現像工程での溶解分布抑制に効果的である。今回、良溶媒と貧溶媒の比率を最適化した新現像液 DP819A のパフォーマンス、現像メカニズムと酸発生剤とクエンチャーを一体化させた最適化新材料の紹介があった。

2 件目は大阪大学産業科学研究所の金羽晴氏からの発表で、統合的計算手法を用いた現像液の設計の紹介があった。本手法ではまず QCM にてレジストの現像特性（露光量と周波数、インピーダンスの関係）を取得する。測長 SEM 画像から露光量と線幅の関係を取得しハフ変換（Hough Transform）によりパターンエッジを特徴抽出する。標準パターンとの比較により、欠陥パターンを特徴づける指標 σ_{vote} を定義する。次にポリマー膜を複数の層 (strata) に分けたモデルで、それぞれの層が順次溶解する様子をシミュレーションし、計

算で求めた σ_{vote} と実験値とを lasso 回帰法で解析する。

3 件目はセントラル硝子社の兼子譲氏の発表で、ArF 液浸リソグラフィ用 PFAS フリーレジスト材料の紹介があった。昨今世間を騒がしている水道水の PFAS 健康影響問題等に代表されるように各方面で代替え材料の開発が急務となっており、半導体レジスト材料でも近々の課題となっている。本報告では新規な PFAS フリーの酸拡散長の短い PAG-C と撥水ポリマーの組み合わせで ArF 液浸スキャナーに露光試験を実施した。120nm ピッチのパターン転写に成功したが、LWR は 8.7nm と大きく改善の余地のある結果であった。転写パターンの SEM 画像から LWR は長周期成分が大きく撥水ポリマーが大きく影響していると思われる。

4 件目は日産化学株式会社の香西純氏の発表で、新規ポストトリートメントにより改質された新世代スピン・オン・カーボン (SOC) の紹介があった。現在よく使用されている CVD 型カーボンはダイヤモンドライクのため膜密度、硬度、ヤング率が高く良質であるが、平坦性や段差での充填性に問題がある。一方塗布型 SOC は平坦性や段差での充填性は良好であるが、膜質に難がある。今回塗布型 SOC を形成後、プラズマ改質プロセスにより、膜質をダイヤモンドライクに改質した結果、CVD 型カーボンに近い膜硬度、ヤング率、密度に改善され、良好な微細パターン転写結果が得られた。ただしプラズマ改質プロセスのタクトタイムが数時間のオーダーであり、短時間化が必要である。

5 件目はここ数年毎年発表いただいている東京エレクトロン九州の村松誠氏から、DSA multiplication によるホールパターン再現性/忠実性改善進捗の報告があった。近年、クリチカル層のパターン形成は EUV リソグラフィ実用化により 1 回の EUV 露光に変わりつつあるが、微細ホールパターンにおいては少ない光子数での露光により確率的な欠陥が発生しやすい。本発表ではポリスチレンとポリメタクリル酸メチルブロック共重合体を用いて、ケモエピタキシープロセスによる高密度微細ホールパターンの multiplication プロセスの精度向上の取り組みが報告された。元々のガイドパターンの精度がその後の DSA パターンの精度に大きく影響することが分かったため、液浸 ArF 露光よりもパターンの精度が良い EUV 露光で形成されたガイドパターンを用いることによりさらなる高精度 DSA パターンの形成が期待される。

Nanoimprint Lithography (NIL)

オーラル 5 件、ポスター 7 件の発表を通じて、活発な質疑応答が交わされた。

オーラル発表では、初めに、産総研の鈴木氏から、NIL をパターニングに用いた電気特性の評価結果が示された。NIL はマスクパターンを忠実に転写するため OPC が不要となり、マスクパターンを簡単に最適化できる。一方、NIL のレジストパターンの残膜厚にはらつきがあったとしても、下地にパターンを転写できるエッチング方法を考案した。結果としてハーフピッチ 24nm までのパターンにおいて、良好な電気特性を取得できた。

続いて、キヤノンの西田氏より、NIL の装置開発状況が報告された。雰囲気をヘリウムから

二酸化炭素することにより、押印時に発生する気泡の消失時間を短縮し、生産性を向上した。また、DMD 照明系を用いて、ショット内に露光量の分布を形成することにより、マスク起因の CD 分布を改善できることも示された。産総研やキオクシア等、NIL の検討が進められている状況も共有された。

DNP の長氏からは、NIL 用テンプレートの開発状況として、EB ネガレジストや SADP を用いたテンプレート製造プロセスについて説明があった。テンプレート用の ALD 装置はパーティクル付着もなく、ハーフピッチ 10nm 程度のテンプレート製造に適用することができた。また、線幅 19nm のテンプレートのリペア方法も紹介された。EB 描画機の位置合わせ精度を高め、欠陥部に合わせて EB 描画することによって欠陥を除去できた。

富士フィルムの袴田氏からは、NIL 用レジスト材料について報告があった。テンプレートとの離型性を高める成分として、フッ素系材料ではなく、炭化水素系材料を用いることによって、優れた離型性と成形性を両立できることを示した。また、インクジェット塗布型のレジスト材料だけでなく、スピンドルコート型のレジスト材料についても、良好なパターニング性能が得られることが示された。

続いて、キオクシアの幡野氏から、NIL を用いた電気特性の評価結果が示された。ハーフピッチ 25nm のショットおよびオープンの電気特性評価において、ウエハ全面でほぼ 100% の良品率を検証できた。また、インクジェット塗布型レジストを用いたプロセスで生じるショット間ギャップを解決するために、テンプレートの端部に段構造を設け、ショットの四隅まで、ショット間にすき間なくレジストを充填できることを実証した。

ポスター発表では、初めに、東洋合成工業の小野寺氏から、マスターモールドの複製から製品成型までの寸法安定性を向上した NIL 用ワーキングスタンプ樹脂の開発について説明された。一般的に、マスターモールドと最終製品である Working Stamp (WS) の寸法の加工変換差は 5 %未満であることが望ましい。本報告では、WS 樹脂の改良を通して、マスターモールドから成型品作製までのプロセスにおいて 1st、3rd Working stamp どちらを用いても寸法の加工変換差が 3 %未満に収まる優れた寸法安定性が得られたことが報告された。

東京科学大の渡邊氏からは、UV- NIL 用いた光電コパッケージ用マイクロ曲面ミラーの作製と評価に関する報告が行われた。NIL 技術の特性を生かし、3 次元局面ミラーの試作に成功されている。残膜分布の基板面内均一性確保が今後の課題として残されている。

東京科学大の前川氏はグレースケール露光を用いたレジストマスターモールドによる NIL プロセスの開発を行い、ガラス起案上に高屈折率レジストを用いた 3 次元ナノ構造の転写を実証した。

東京科学大の永松氏からは、UV-NIL を用いたシリコン光回路の作製結果についての発表が行われた。本報告では、UV-NIL を用いたシリコンフォトニクスに適した光硬化性樹脂の検討を行うとともに、Smart NIL 技術に基づいたオールオンプロセスの条件検討を実施することで、従来の電子線描画を用いて作られた光路と同程度の性能を得ることが示された。

東京理科大の谷口氏からは、パターンを有する UV-NIL 金型を用いた繰り返し NIL 実験や接触角変化の測定による寿命予測方法が提案された。

東京大の光田氏からは大面積透明材料表面へのレーザアシスト NIL が紹介された。本報告では、レーザーを利用した新プロセス、Laser-Assisted Direct Roller Imprinting (LADRI) が提案され、この技術によるポリマーフィルムへの微細構造の転写性や光学特性を評価が行われた。流動解析によつ転写メカニズムの考察や、プロセス適用性の高い微細構造条件が説明された。

東北大の東島氏からは、比較的低コストでの導入と短時間での描画を両立させる紫外線レーザー描画装置によるサブマイクロホールアレイを有するシリコンモールドの作製が行われた。モールド作製とサイズ均一性の光学検出について考察を行い、ハイパースペクトルカメラ (HSC) はシリコンサブマイクロホール配列体の構造均一性を広範囲で光学的に検出できる調べる手法として有効であることを示した。

E-Beam, Metrology & Mask Technology

本年のワークショップではオーラル 4 件、ポスター 10 件の発表が行われた。オーラルセッションでは、1 番目に産業技術総合研究所の尹成圓氏が EB リバーストーンプロセスによる微細ダメージートパターン形成についてご発表された。EB 描画→下層 TEOS に転写→TEOS トレンチに SiN を成膜→TEOS 除去→SiN をハードマスクにして Si をエッチング、というプロセスにより幅 18 nm の Si パターンを形成することに成功した。2 番目はニューフレアテクノロジーの西村理恵子氏がマルチビームマスク描画装置 MBM-4000 の開発についてご発表された。前機種と比較して電流密度の向上、帶電効果補正、クーロン効果低減などの改善が実施されていることがご報告された。3 番目は産業技術総合研究所の木津良祐氏より SEM 画像の LER 計測についてご発表された。LER 計測では PSD を用いることが一般的だが、木津氏は Height-height correlation function (HHCF) を用いた LER 計測についてご提案され、HHCF 法の特徴やメリットについてご報告された。4 番目は日立ハイテクの山根航氏が SEM 画像シミュレーションの高精度化についてご発表された。SEM 画像シミュレーションに用いられるモデルとして Browning モデルを採用し、エネルギーの基準を Conduction band にとった場合が最も断面形状を再現できる結果となることをご報告された。

ポスターセッションでは Bush Clover の新関 嵩氏より EB 描画システムの解像性能評価について、TASMIT の大家 政洋氏より高加速 SEM 画像に対する輪郭線抽出について、リガクの末永 梨絵子氏より透過型 CD-SAXS による深穴計測について、フォトエレクトロンソウルの西谷智博氏よりフォトカソードを用いた間欠ビーム照射機能とその応用について、日立製作所の原田実氏より教師無し学習による画像セグメンテーション手法について、日立ハイテクの三次 将太氏より Selective Probe SEM を用いた半導体デバイスのオンライン電気検査技術について、日立ハイテクの陳 軍氏よりパターン認識に基づくコントラスト強

調手法について、キヤノンの藤井宏文氏より露光装置のデータを用いた OVL の予測と OVL 精度の向上について、テクセンドフォトマスクの番祐介氏より Multigon カーブマスクの製造性と優位について、テクセンドフォトマスクの松本 真由子氏よりマスク描画装置の Pixel Level Dose Correction によるネガレジスト描画のマスク特性改善評価について、それぞれご発表いただいた。

Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL)

EUVL セッションでは 5 件の口頭発表と 12 件のポスター発表が行われた。

口頭発表の 1 件目は、レーザーテックの権平氏より、Actinic のマスク検査装置 (APMI : ACTIS) の開発状況について紹介された。APMI は、High NA に向けたモデル (A300) を導入、高 NA の対物レンズを採用し、自社開発した EUV 光源などにて、現行モデル (A100) より高感度を実現。具体的にイメージコントラストは 30% 改善を達成。欠陥の検出サイズも各パターンに対して、20~50% 向上していることが報告された。また転写シミュレーション解析では、hp44nmL/S の High NA マスクにて、CDE10% を満たす欠陥検出性を有することを確認した。

2 件目は、東京エレクトロン九州の塩澤氏より、High NA 量産に向けた塗布現像装置技術について紹介された。MOR (Metal Oxide Resist) は、従来の Wet 現像法では、16nm のピラーパターンで倒れが発生したが、新規開発した現像法では、11nm まで抑制され、ラインパターンでは、10nm から 8nm まで抑制できた。さらに、CAR 及び MOR の現像後のパターンに対して、プラズマ処理を実施することで、エッチング工程時にラフネスを悪化させることなく SOG 膜に転写することができたことを報告した。

3 件目は HOYA の池邊氏より Holistic Approach による 1X nm 世代のブランク EUV マスク開発について講演いただいた。1X nm 世代では low-n, mid-k と呼ばれる吸収体が有望で 3 種類の紹介をいただいた。リペアプロセスに対して高耐久なキャッピングレイヤーの開発、3 次元効果を低減するための新しい多層膜の開発など、まさに Holistic な開発状況を紹介いただけた。

4 件目は三井化学の小野氏より CNT ペリクルの開発について紹介いただいた。三井化学では 2011 年から EUV ペリクル開発を開始しており、2022 年から ASML のパートナーとなり、2024 からは imec とも研究を開始した。ペリクルの 4 つの性能 Imaging, Defectivity, Life time, Strength について、開発状況を紹介いただいた。

5 件目は imec の宮口氏より imec での High-NA EUV 露光機の状況を講演いただいた。現在はオランダ ASML 社の High-NA ラボにて研究しているが、2027 年には imec にも High-NA 露光機が導入され、研究開発が加速される予定である。また、DoF 等の露光特性を改善可能な Bright Field マスクの開発状況について、EB プロセスでの NCAR の利用などを含めて紹介いただいた。