

NGL ワークショップ 2024 報告

2024/9/2 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4、5日の二日間、応用物理学会シリコンテクノロジー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。398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27件で、ポスター発表は28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4件発表いただいた。1件目はASML Anthony Yen氏より”EUV lithography - Overview and Outlook”についてオンラインで講演いただいた。最新のEUV露光機の状態について、High-NA露光機ではメタルレジストで10nmラインパターンや、化学増幅レジストでの16nmラインパターンなどの最新の露光結果を紹介いただいた。また2030年以降のHyper-NA4露光機についても紹介いただいた。光源パワーは1000Wを目指したロードマップを紹介いただき、現在Open loopで700Wを達成している。ムーアの法則維持に必要な技術など、リソグラフィ全般についても講演いただいた。

2件目は経済産業省・斉藤尚史氏より「我が国の半導体政策について」と題して講演いただいた。半導体に関する経済産業省としての取り組みについて紹介いただき、先端デバイス、パワーIC、ポスト5Gなどの項目、JASM、キオクシア、マイクロンなど具体的な補助先についても紹介いただいた。また、RapidusとLSTCでの取り組みについて、具体的な連携先も含めて紹介いただいた。

3件目の基調講演では、熊本大学・青柳昌宏先生より「熊本大学における半導体分野の人材育成・研究開発への取り組み」について講演いただいた。熊本大学では半導体教育センターを拡充して、半導体研究教育機構を設立し、2028年から毎年140名の半導体人材を輩出することを目標としている。ソニー、TEL、TSMC、熊本高専、東大、東北大、産総研等と連携し、実践的な教育を進めていく計画である。成長著しい3次元積層についての研究も進めている。デバイス設計者の養成など、まだまだ悩みながら教育カリキュラムを進めていることを報告いただいた。人材不足が深刻な半導体業界にとって人材育成は喫緊の課題であり、本講演だけでなく様々な講演においても人材育成に関する質疑応答が活発に行われた。

4件目は、マイクロン・岩城友博氏より「次世代DRAM向けパターンニング戦略」について講演いただいた。マイクロンではEUVリソグラフィを導入予定で2025年夏より1 γ 世代より量産適用予定である。ロジックと違いDRAMではコストが優先される現状や、「6F2」というDRAMデザインが続いている現状などを紹介いただいた。そのため、EUVに期待する項目としては、NA0.33でも分解能向上が可能なLow k1へ期待しているとのことであった。

レジストやNIL, DSA, Healing などあらゆる手段を使ってコストを抑えて高性能な DRAM を作るという意気込みを感じることができた。

Optical Lithography & Advanced Patterning Technology

本セッションでは、4 件の口頭発表と 4 件のポスター発表があった。レーザー光源、パッケージング向け露光、ウエハー計測器と多岐にわたり、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 エキシマレーザー光源をご紹介いただいた。従来光源と比べてパルス周波数を 6kHz から 6.75kHz に向上させスキャナー生産性向上に寄与できることや、レーザースペクトル E95 を従来の 0.2pm から 0.45pm に広げることでスペckルを低減し、EPE (Edge Placement Error)を抑える結果が示された。

ギガフォトンの川筋氏からは、KrF エキシマレーザー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。生産性を高めるため、ビームの M2 を抑える光学系を採用した(M2 は 5~7 程度)。生産性の一例として、500 μm 深さを 600 パルスで加工する例が示された。

キヤノンの須田氏からは大面積パッケージング基板のための i 線露光機の紹介がされた。解像度 0.8 μm で画角は 52mm \times 68mm を有する。4 回露光のスティッチングで 100mm \times 100mm の基板の露光が可能になる。スティッチング精度確保などのために、非球面レンズでディストーションを補正する投影光学系を採用している（ディストーションは 5nm 以下に抑えられる）。

ニコンの庭田氏からはスタンドアローンのアライメント計測器に追加されるウエハートポグラフィ計測機能(S-meter-Z)の紹介があった。一般的な光学式センサーと異なり分光を用いた計測によって、各種下地膜への対応が可能となっている。一例として SiO₂ 膜の段差計測例が示され、AFM との比較で良好な計測精度が得られていることが示された。また、元々のアライメント計測機能との組み合わせによる応用例も示された。

ポスターセッションでは、ArF エキシマレーザーのスペckルによる LER(LWR)への寄与の解析、スタンドアローンのアライメント計測器によるプロセス変動検知、ウエハーマクロ CD 計測機による EUV パターンの計測例、光マスクレス露光機の SLM (Spatial Light Modulator)の方式比較検討(Tilt 式 対 Piston 式)について発表があった。

Resist Materials

本セッションでは、レジスト材料関係 2 件、シミュレーション 1 件、レジストプロセス 1 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、富士フイ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の、2 つの最新技術の紹介があっ

た。富士フィルム社オリジナルの **Negative-tone Imaging**(有機溶媒現像)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が、今回、良溶媒と貧溶媒の比率を最適化した新現像液の溶解メカニズムに言及した。また、**High NA** 向け用下層膜との組み合わせ最適化材料の紹介があった。

2件目は王子ホールディングス株式会社の森田和代氏からの発表で、**non-PFAS** バイオマスポジ型 **EUV** レジストの紹介があった。本レジストは酸触媒による化学増幅系レジストではなく、木材パルプを原料とした主鎖切断型レジストであり、酸発生剤を使用しないため、**non-PFAS** となる。また、ある主鎖が切断されると連鎖反動的に他の部分が切断されるため、比較的 **G** 値が高い。**EB** リソグラフィでは **8.4 nm HP**、**0.50NA** の **EUV** リソグラフィでは、**10 nm HP** ポジ型パターンが形成できた。

3件目は大阪公立大の安田雅昭先生からの発表で、2種類のネガ型レジストを対象とした電子線リソグラフィの分子シミュレーション解析の紹介があった。まず、非化学増幅系レジストとしてポリメタクリル酸グリシジル (**PGMA**) を適用した紹介があり、**10nm** 幅の孤立ラインパターンに対して加速電圧や露光量の増加に伴う **LER** の減少が再現できた。また、化学増幅系レジストとしてベース樹脂ポリビニルフェノール (**PVP**) と架橋剤 **TMGU** 系において、**6nm** 幅の孤立ラインパターンのスナップショットと **LER** および **LWR** の酸発生剤濃度依存性の紹介があった。

4件目は日産化学株式会社の柴山亘氏からの発表で、金属酸化物系 **EUV** レジスト (**MOR**) 用の有機ドライ現像リンス材料 (**O-DDR**) の紹介があった。線幅 **10nm** 以下の微細パターン形成時ではリンス後の乾燥過程でのキャピラリーフォースによるレジストパターン倒れによる欠陥が特に顕著になる。本技術は現像後、通常のリンス液ではなく **O-DDR** を現像液から置換、固体化し、その後、ドライエッチングで **O-DDR** を除去する。したがってキャピラリーフォースは発生しないため、パターン倒れの発生を抑制できる。

5件目は東京エレクトロン九州の村松誠氏からの発表で、**DSA** による微細ホールパターンのプロセスパフォーマンスとスケーラビリティの報告があった。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。しかし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ミッシング欠陥やキッシング欠陥といった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、ライン形成で蓄積したノウハウを活かした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形成と、そのマルチアプリケーションプロセス、パターン性能、マージンの拡大や欠陥軽減、**DRAM** のキャパシタ層への適用に向けた精度向上の取り組みが報告された。

Nanoimprint Lithography(NIL)

オーラル 5 件 (アカデミック 1 件、産業界 4 件)、ポスター 5 件の発表を通じて、活発な質疑応答が交わされた。

初めに、東工大の雨宮氏から、通常半導体の製造技術を用いてウェハ上に大規模な光回路を構築する集積フォトニクスに関する説明や、シリコン導波路作製へのナノインプリントリソグラフィ (Nanoimprint lithography: NIL) の適用例が紹介された。企業と共同で、ドライエッチング耐性を持ちながら、酸素アッシングが可能な NIL レジストが開発されている。続いて、キヤノン社の西邑氏からは、半導体デバイス製造用 NIL 装置の性能向上に向けての取り組みに関する紹介があった。キヤノン社の FPA-1200NZ2C NIL 装置は、倍率補正のためのアクチュエータシステムや高次歪補正 (HODC) 機能等を搭載しており、ArFi 基板に対する NIL のクロスマッチマシンオーバーレイ (XMMO) において、メモリや CMOS センサ等各種先端デバイス製造に適した性能が示された (平均 $m + 3\sigma$: $X=2.42$, $Y=2.24\text{nm}$)。また、試験条件内でのランダム欠陥率は 0.03 (defect density/cm²) 未満であり、メモリ生産レベルの安定性が確認された。現在、雰囲気ガスの制御によるスループットの向上が検討されている。

DNP 社の長井氏からは、多重電子ビーム描画による NIL モールドの作製に関する報告があった。密なパターンの EB 描画において、後方散乱等が壁になっている。その壁を乗り越えられる手法として、Litho-Etch-Litho-Etch (LELE) や Self-aligned double patterning (SADP) 工程の開発が進められている。本報告では LELE の成果として、サブ 20nm レベルの線、ホール、多段構造作製の実証例が紹介された。

キオクシア社の光安氏からは、デュアルダマシシ配線向け 3D NIL プロセスの評価についての報告が行われた。キオクシア社からは、2023 年から本格的に、従来の光リソグラフィに比べてプロセス工程数が少なく、製造コスト削減が期待できる 3D デュアルダマシシ構造の NIL 一括形成プロセスの開発が進められている。本発表では、NIL とドライエッチングプロセスを用いて線幅 $4X \text{ nm}$ ノードのデュアルダマシシ構造を形成し、電気特性を評価した結果が報告された。

マイクロンメモリジャパンの岩城氏は、DRAM の微細化に伴うエッジカット工程への NIL の適用等、NIL の DRAM 適用の可能性についてレビューを行った。NIL の今後の課題として、モールドの長寿命化、欠陥の低減、等に加え、NIL 活用企業の増加が必要であることを述べた。

産総研の鈴木氏は産総研で行われている NIL を適用した 20nm 幅以下のダマシシ配線プロセス開発に関する報告を行った。線幅 20nm 以下の Wダマシシプロセスが構築されており、電特評価に向けて進められている様子であった。

東北大の高野氏からは UV-NIL によりエッジ粗さを調整したシリコンナノディスク配列体の光機能についての報告があった。近年、円盤状に形成した光カチオン重合型レジストを酸素反応性イオンエッチング (O₂ RIE) でトリミングし、1つのモールドから異なるシリコンナノディスク (Si ND) 配列体を作製する試みが行われている。本研究では、光ラジカル重合型レジストのトリミング方法として O₂ RIE と UV オゾンと比較し、レジストマスクの表面粗さ増大の抑制の試みや、周囲皺状構造のシリコン薄膜への転写結果等が報告され

た。

東北大の稲川氏からは、一桁ナノレベル UV-NIL に関する研究の一環として、ナノすきまにおけるメタクリレートモノマーからなる光硬化性液体のアクリレート系密着性単分子層による延展促進についての報告があった。

大阪公立大の国藤氏からは NIL による AR/VR グラス用傾斜型回折格子の作製時の離型プロセスにおいて、ソフトモールドを両端から引き上げるピール離型、リジッドなモールドを試料と水平方向に位置する回転軸を中心に回転させて離型する回転離型、試料の垂直方向に位置する回転軸を中心に回転させて離型するロール to プレート離型について、離型中に発生する歪のシミュレーション解析が行われ、適切条件が提案された。

最後に、東京理科大の檀上氏の研究では、酸素イオンビームエッチングを用い、これまで実現されてなかった感光性ポリイミド表面へのモスアイ構造の作製が行われた。紫外可視近赤外分光光度計を用いた透過率と反射率の測定を通して、モスアイ構造としての有効性が検証された。

E-Beam, Metrology & Mask Technology

今年のワークショップではオーラル4件、ポスター7件の発表が行われた。オーラルセッションでは、1番目にニューフレアテクノロジーの大城萌香氏が最新のマルチビームマスク描画装置である MBM-3000 について発表された。前機種と比較して電流密度およびビーム本数を向上し (3.6 A/m² および 500 k 本)、パターン描画に成功した結果を示された。2番目はリガクの表和彦氏より、高分解能の X 線顕微鏡により 3D NAND を観察した結果を報告頂いた。Wolter I 型と III 型を組み合わせたミラー光学系を構築し、ラボソースにて約 50 nm の分解能を達成し、3D NAND のチャンネルホールを観察できる結果を示された。3番目は日本サムスンの鈴木健治氏よりテラヘルツ波を活用した PN 接合深さの非接触計測について発表頂いた。フェムト秒レーザーを PN 接合部に照射し、生成されたフォトカレントによって生じるテラヘルツ波を検出する光学系を構築。PN 接合の形成深さが 15 nm だけ異なる試料についてテラヘルツ波の検出信号に有意な差が生じる結果を示された。4番目は日立ハイテクの Xinheng Jiang 氏より SEM 画像のノイズ除去について報告頂いた。多フレーム積算後の画像に対してノイズを付加した 1 フレームの疑似画像を生成し、1 フレーム画像から多フレーム積算画像を生成する深層学習モデルを構成した。その結果、シュリンクの影響を排除したノイズ除去に成功したことを示された。

ポスターセッションでは日本電子の細谷和輝氏より 200 kV の EB 描画装置について、産総研の木津良祐氏より傾斜 AFM を用いた EUV レジストの形状計測について、日立ハイテクの笠井啓晃氏より SEM の 4 方向検出器を活用したハイブリッド接合における Cu パッドの高さ計測について、日立製作所の京極真也氏より高加速 SEM を用いたオーバーレイ計測技術について、日立ハイテクの寺尾奈浦氏より大電流 SEM で生じる帯電の制御技術について、フォトエレクトロニクスソウルの荒川裕太氏および佐藤大樹氏よりフォトカソードを用い

た高アスペクト形状の観察および MOSFET の電位コントラスト観察について、それぞれご発表頂いた。

オーラル、ポスター共に非常に活発な質疑が交わされ、参加者にとって非常に有意義なワークショップになったと思われる。

Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL)

EUVL セッションでは 5 件の口頭発表と 7 件のポスター発表が行われた。

1 件目は、大日本印刷の吉川氏より、2nm 以降の EUV マスクの開発状況が紹介された。2nm 以降 (A14) では、 $\leq 32\text{nmL/S}$ で、20nm 以下の Asist パターンが要求されている。DNP では、マルチビームの EB 描画 (MBW) と高解像化学増幅レジストにて、マスク開発を進めてきた。現在、2nm の Logics マスクは提供可能である。High NA 向けのマスクでは、装置 (特に計測装置)、プロセス (EB レジスト) や吸収体材料の開発が重要となる。次世代の PCAR レジストにて、 17nmL/S は作製可能 (17nm C/H は不可)、Non-CAR では、 18nmL/S 解像するがホールは 40nm が解像しない。描画機からのアプローチとしてビーム径を小さくすることで、EPE が小さくなり、最新 MBW (Gen 3) を年内に導入する予定。吸収体は High k 材が有望であるが、反応性エッチングが可能である必要があり。Low n 材は形状制御が課題で、品質 (位相角など) の保証が困難という提示があった。

2 件目は、レーザーテックの上田氏より、Actinic のマスク検査装置 (APMI : ACTIS、ABI : ABICS) の開発状況について紹介された。ABI は、High NA 露光用目的で、検査感度と座標精度の向上のための装置コンセプト (x40 の光学対物レンズ、x1500 の検出系など) が提示された。シミュレーションにて、欠陥 S/N の向上と座標精度が 10nm 以下となる検証データが示された。APMI は、High NA に向けた高解像度実現のために高 NA の対物レンズを採用し、独自の EUV 光源などにて、現行モデルよりスループットの改善が可能になる。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、15~30%向上していることが提示された。

3 件目は、リンテックの植田氏より、EUV ペリクルの開発状況が紹介された。大口径の自立された CNT のペリクル (110x144 mm) を製作して、特性評価を行った。真空引き・ベント工程にて、十分な機械的な特性を確認した。未コート品で、96%の透過率、0.06%の低散乱特性が得られた。コーティング後で反射率は 90%となる。EUV 照射 (H2 下) において、20000 枚に相当する照射 (600W 条件) に耐性を有することが実証でき、未コート品の方が長寿命で、コート品は、照射痕 (しわ) が見られる。さらに未コート品での検証テストにて、照射にてデポ物が発生し透過率低下を引き起こす現象が確認された。リンテックでは、2025 年までにパイロットラインを準備する計画である。

4 件目は東京エレクトロン九州・志村悟氏より、「High NA EUV に向けた TEL の挑戦」について講演いただいた。High-NA 露光機においては、浅い DoF によりレジスト膜厚は薄くなる。このような薄膜レジストにおいて $\text{CD} \pm 10\%$ 以内を達成するための挑戦について講

演いただいた。CAR や MOR において現像後処理や、PEB 後の処理を適用することにより、LWR が改善されたと報告があった。

5 件目は ASML の Aysegul Cumurcu Gysen 氏より”EUV technology for HVM and next generation lithography systems”について講演いただいた。現行の EUV 露光機では平均して 3000 Wafer/Day(WPD)のスループットがあることを紹介いただいた。また、High-NA の imec High-NA LAB での現状についても紹介いただいた。Pitch 24 nm の L/S パターンは解像できており、High-NA のポテンシャルの高さがうかがえた。また、Pitch 20 nm ではギリギリ像が見える程度であり、今後の改善が期待される。