

1. はじめに

フォトマスクに関する国内唯一の国際学会であるフォトマスクジャパン（Photomask Japan : PMJ）2023 について概要を報告する。昨年に引き続き、COVID-19 感染防止対策として会場での開催ではなく、Zoom を用いた完全オンラインのデジタルカンファレンスとして開催した。会期は 2023 年 4 月 25 日から 4 月 27 日とし、昨年同様に 3 日間である。オーラルセッションは、Q&A を含めてほぼ全てをライブで実施した。ポスターセッションは、全発表の事前録画ショートプレゼンを全体に放映してから Zoom のブレイクアウトルームで各発表に分かれる形とし、より聴衆の理解とルーム内での踏み込んだ交流ができるように工夫した。パネルディスカッションは、「Curvilinear Masks - What Should We Do for High Volume Manufacturing?」と題して実施した。スポンサーセッション、ブレイク中のスポンサー動画配信も昨年同様に実施した。プログラムは、発表者が日本のみならず、US やヨーロッパと世界各地に在住されているため、各地の時差を考慮した編成とした。

2. 投稿論文数と傾向

PMJ2023 の発表件数は 48 件（キーノート 2 件、招待講演 13 件、オーラル 26 件、ポスター 7 件）であり、PMJ2022 より 13 件の減少となった(4 件の Withdraw は件数に含めず)。特に、US、ヨーロッパからの投稿が減少した。また、参加者は PMJ2022 の 317 名から 253 名へと 64 名減少した。

表 1 カテゴリー別発表件数

Topic	Keynote	Invited	Oral	Poster	Withdraw	Total
1.Materials for photomasks		1	3			4
2.Fabrication process steps and equipment for photomasks(developing, etching, cleaning etc.)			1			1
3.Photomask writing tools and technologies including multi-beam EB writer		1	2			3
4.Tools and technologies for metrology/ inspection/ repair		4	2		1	7
5.Technologies and Infrastructures for EUVL masks		2	2			4
6.Technologies and Infrastructures for NIL masks		2	5			7
7.Technologies and Infrastructures for FPD masks			1			1
8.EDA, MDP, curvilinear ILT and DTCO		1	1	1	1	4
9.Photomasks with RET: PSM, OPC, SMO and multiple patterning			1			1
10.Photomask-related lithography technologies	1		2			3
11.NGL mask technologies and their applications: DSA and others			1			1
12.Strategy and business challenges: cost, cycle time and total mask solutions			1			1
13.Patterning technologies for semiconductor and electronic devices	1	1	1			3
14.Semiconductor manufacturing technologies				1		1
15.eBeam direct writing and eBeam lithography technologies		1	1			2
16.Utilizing AI technologies for the efficiency of R&D and HVM			2	1		3
17.Legacy tools for middle and low-end masks					1	1
18.Photomask and lithography related technologies in academia				4	1	5
Total	2	13	26	7	4	52

3. 各セッションの概要

以下に、セッションごとの発表内容の概要を記す。

[Session 1 : Opening Session: Day1]

当セッションでは、1件のキーノート、1件の招待講演、1件の一般投稿があった。

1件目の発表は Keynote Speech として、 imec 社の Kurt Ronse 氏から「Status and challenges of high NA EUV ECO-system」と題して、high NA EUV 世代のチャレンジ項目についてご講演頂いた。AI や ML のためのコンピューテーションパワーやデータ容量の需要により今後も微細化は止まらない。High-NA EUV 露光実現に向けてのチャレンジ項目として、Mask and imaging、Materials and processes、Metrology and inspection の3つを挙げた。これらを解決するために、High-NA 露光機 EXE:5000 を有する Imec-ASML の Lab を 2024 年初頭に始動するとのことであった。

2件目の発表は招待講演として、 EUV Tech 社の Matt Hettermann 氏から「Applications of EUV Metrology Tools」と題して、EUV 光を用いた測定装置についてご講演頂いた。EUV 光での反射率の測定、ペリクル透過率の測定、欠陥転写性のレビュー、膜の屈折率&消衰係数の計算、位相差の測定等の装置が紹介された。

3件目の発表は、Veeco Instruments 社の Ashish Kulkarni 氏から「Using X-ray fluorescence as an independent metrology of layer thickness and intermixing in reflective EUV multilayers」と題して、X-ray fluorescence を用いた EUV マルチレイヤーの厚さ測定についてご講演頂いた。Sapphire 基板上で Mo, Si, Ru の膜厚を XRR 値と Fitting し、Intermixing レイヤー厚の補正をする必要があるが、測定速度は XRR の 10 倍。また Mo レイヤー内の不純物の検出も可能とのこと。

[Session2 : EUV Inspection & Repair]

本セッションでは4件の講演があり、2件は招待講演、2件が一般講演である。

1件目はレーザーテックの轟氏より EUV のマスクパターン検査装置 (APMI) についての招待講演であった。半導体製造において APMI が活用される場面と、スルーペリクルの必要性などを最初に紹介いただいた。検査では実際のパターンの比較(Die to Die)ではなく、計算データとの比較 (Die to Database) がノイズの影響が減少し、検出確度が高くなったとのことであった。また、High-NA 対応の APMI についての紹介もあった。

2件目は intel の Sayan 氏により、APMI の実際の利用における誤検出などのデータの紹介をいただいた。光源輝度が明るくなることで S/N が良くなり、逆にペリクルでは光量が減るため、ペリクル透過率は S/N に効くと紹介があった。Wafer 検査との比較では、Wafer 検査で検出できなかった欠陥まで検出できている。また、Availability に関しても、一定の高い水準を維持できているデータが示されていた。

3件目は Park Systems の Cho 氏により AFM によるマスク欠陥検査と欠陥修正に関しての招待講演であった。AFM の開発の歴史から、Park 社での開発について紹介があった。小さな欠陥まで検出できており、欠陥除去のデータも示していた。Force Curve を利用した欠陥の密着性の検査や、IR を組み合わせた材質評価など非常に多様な技術を採用している。

4件目は Bruker BNSM RMR の Robinson 氏による AFM による clean や修正技術について紹介いた

だいた。アスペクト比 1.8 など高い構造に対しても適用可能で、深さ 70nm の TaBN 吸収体の修正をデモしていた。パターン上のパーティクル (Soft Material) の除去、吸収体などの Hard defect が実際に修正されていた。

[Session 3 : NIL 1]

本セッションでは、1 件の招待講演と 3 件の一般講演の計 4 件の講演があった。

1 件目は招待講演で、"TELEs Patterning Technologies for Next Generation Lithography Using Nanoimprint Lithography"と題して、東京エレクトロンの Yamaji 氏から講演があった。ナノのパターニング技術として、EUV、DSA、NIL における加工技術が議論された。NIL の加工では、成膜技術との組み合わせで RLT 除去を改善、ALE で選択比を改善する技術が紹介され、NIL のデバイス適用に向けた環境が整ってきていることを印象付けた。

2 件目から 4 件目は一般講演で、2 件目は"Development of Nanoimprint Templates for Dual Damascene Processing"と題して、大日本印刷の Watanabe 氏からの講演であった。デュアルダマシニング用テンプレートの形成に関する報告で、線幅 20nm のテンプレートが実現していた。3 件目は"Nanoimprint Performance Improvements for High Volume Semiconductor Device Manufacturing"と題して、キヤノンの Hara 氏から NIL 装置での重ね合わせ精度と欠陥の改善に関して報告があった。重ね合わせ精度では SMO で 1.9nm 以下を達成していることが示された。4 件目は"Nanoimprint Post Processing Techniques to Address Edge Placement Error"と題して、キヤノンの Tsuchiya 氏から、NIL における EPE 解析結果が報告された。NIL の EPE は影響を受ける要素が従来のリソより少ないため、改善の余地が多いが、重ね合わせ精度、CDU、ローカル CDU の改善が効果的であることが示された。また反転プロセスの適用も提案されていた。

[Session 4 : NIL 2]

本セッションは、NIL 技術が半導体デバイス製造応用のみならず、他のデバイス製造応用にも適用できることに焦点を当て、招待講演 1 件、一般公演 3 件の構成となった。

招待講演は、EV Group の Thanner 氏より、ウエハレベルでナノインプリントを行う“SmartNIL”技術を、AR/MR/VR や Optical Sensing のデバイス製造に応用するという観点での報告があった。例えば、スマートフォンのカメラレンズにメタレンズを適用する、あるいは AR グラスの光学部品にメタサーフェスを適用する研究が産業界でなされているが、市場規模は 2024 年以降、毎年倍増していくことが予想されている。EV Group としてはこれに呼応して、“SmartNIL”技術を推進している。この“SmartNIL”技術は、先ず NIL プロセスにてシングルダイからウエハサイズのワーキングスタンプを作成し、その後、このワーキングスタンプをレプリカモールドとして NIL プロセスにてデバイス用のウエハにパターニングするという、という技術である。この一連の NIL プロセスは同一の装置で可能ということである。ワーキングスタンプのパターン精度、欠陥等の品質が重要になるが、一例としてメタオプティクスが挙げられており、パターン高さは所望の 190nm で安定しており、また観察されるピラーミッシングは無いとのことであった。

講演の 2 件目は、東北大学の Niinomi 氏より、基板とモールドのアライメント方法において、新しいアイデアである“蛍光アライメント”を用いる事により、原子スケールのアライメント精度を実現可能

なシミュレーション結果について報告があった。通常の NIL のアライメント方法は、UV 硬化樹脂を介して、基板のマークと、ピッチが若干異なるモールドのマークとを重ね合わせた際に発生する、モアレのビート信号を使ってアライメントする。これに対して、“蛍光アライメント”方法は、この UV 硬化樹脂に蛍光液体を含有させることで、ビート信号のコントラストを向上させ、確実に信号検知するという技術である。ビート信号処理の工夫として、bit depth の解像度を上げる、ビート信号に周期関数をフィッティングするなどの処理を加えることにより、シミュレーション上でアライメントエラーを 1nm 以下にすることが可能とのことである。また、基板のマークとモールドのマークの配置が楔状になるような条件においても、バックグラウンドのコントラスト変化を補正することで、同様なアライメント精度を達成することが可能とのことであった。

講演の 3 件目は、エリオニクスの Ito 氏より、ウエハサイズのナノインプリント用モールドを製作することを主な目的とした高スループット EB 描画装置の報告であった。NIL 技術を半導体デバイス以外の用途に広げるためには、短時間での大面積のモールド製作技術が要求されている。この要求を満たすために、最小線幅 100nm、最大フィールドサイズ 10mm x 10mm、最大スキャンレート 400MHz を主要仕様とした ELF-10000 を 2020 年に開発したとのことである。この装置により、8 インチウエハのモールドの描画が 4 時間 14 分で可能となった。さらに、フィールド毎のステッチング精度を向上させた ELS-HAYATE を 2023 年に開発し、この装置によりステッチング精度が ±300nm (10mm x 10mm) から、±90nm (5mm x 5mm) に向上したとのことである。これらの装置はウエハサイズで様々な線幅のパターンが描画可能であり、一例として 4 インチウエハで、5mm x 5mm サイズ、148 チップの量子デバイスの描画を、ELS-HAYATE と ELS-BODEN を組み合わせたオーバーレイ描画により、7 時間 2 分で描画することができたとのことであった。

講演の 4 件目は、旭化成の Okada 氏より、シームレスローラーモールド (SRM) を用いたナノインプリント技術とそのプリントプロセス技術についての報告であった。本報告では、“Roll to Roll” のナノインプリントで用いるモールド (一例、サイズ：直径 100mm、長さ 250mm) を、ステンシルマスクを用いた EB 描画装置でパターンニングしたとのことである。SRM では線幅 100nm の L/S パターンを実現している。この SRM を用いた NIL プロセスの一例として、基材シートを PET(t=100μm)、UV 硬化樹脂を PAK-01、インプリント時のラインスピードを 0.9m/min とし、400nm ピラー、20 μm グリッド、1 μm ラインのパターンニングを実証した。また、この” Roll to Roll” の NIL プロセスをさらに低コストで実現するためには、マスターモールドである SRM から、レプリカフィルムモールドを製作することが必要になるとして、これの開発も実施したとのことである。今後とも各種フレキシブルデバイスの開発にこの SRM の技術を応用していくとの報告であった。

[Session 5: EUV Lithography&Source]

本セッションでは 1 件の招待講演と 3 件の一般講演があった。

1 件目は、ASML の Jan Van Shoot 氏から High NA 露光機のアップデートとして、その進展とマスクへの影響に関連する招待講演を頂いた。High NA 露光機である EXE5000 は、すべてのモジュールを導入して立上げを開始した。2024 年の初めに、アクセスできる計画。マスクのロードマップでは、Low n 材がレイヤーにより最適化された膜厚で適用され、将来は吸収の高い材料 (Low & mid k) へ展開する。多層膜のキャップ層は、多層膜の界面拡散の低減や光学特性の安定化改善が必要。多層膜も M3D 効果改

善のために、Zeff (EUV 光侵入抑制) 低減の代替多層膜が必要となる。Stitching による解像性が検証され、さらなる改善が必要となる。さらなる微細化に伴いイメージコントラストを維持するために、照明光学系の改善や Hyper NA (>0.75) が検討されていることが報告された。

2 件目は、IMEC の Joern-Holger Franke 氏から Dense Hole pattern のシステムティックな LCDU を低減する検討が発表された。CD のばらつきがあるマスクの回折スペクトルを見ることで、マスク LCDU が、低空間周波数に集中するバックグラウンドの回折強度を導くこと確認した。このため、瞳孔の選択により、このバックグラウンド光の透過を大幅に減らすことができ、その結果、ウェハ上のシステムティック LCDU とマスク LCDU の比率を低くすることができる。ウェハ上のシステムティック LCDU を最小化する方法については、高密度コンタクトホールアレイでは、できるだけ大きなシグマ値を持つ瞳を使用する必要があることが示された。

3 件目は、Ushio の Morimoto 氏から EUV 光源の進展について発表があった。Ushio は、LDP 方式の光源を、マスク検査や他の応用目的で提供している。最近の成果として、輝度の不安定性は、ヘッドモジュールのデザイン変更やレーザー照射条件の最適化で、改善した。また、デブリ Mitigation は、レーザー条件やガスフローの最適化で、高速イオンを低減でき、光源の Availability を向上することができた。Availability は、2023 年の 95% 目標から 2025 年に 97% まで改善する計画で、メンテナンスのインターバルも改善する計画であると報告した。

4 件目は、関西光量子科学研究所の Sasaki 氏から EUV 光源のモデリングについて発表があった。レーザー励起された Sn から希土類までのプラズマにおける原子過程と放射伝達を研究し、HULLAC 原子コードを用いて計算したエネルギー準位や放射壊変率などの原子データに基づいて、Sn イオンの衝突放射モデルを開発した。プラズマからの発光スペクトルとスペクトル純度をモデルで計算した結果、プラズマの密度が低くなるとスペクトル幅が小さくなる事実が明らかになった。また、励起光源として CO₂ レーザーを用いることで、高い出力と効率が得られることが示され、このようなシミュレーションモデルは、LPP 方式の Sn を用いた EUV 光源に研究に寄与していることが報告された。

[Session 6 : Opening Session: Day2]

当セッションでは、1 件のキーノートと 2 件の一般投稿があった。

1 件目のキーノートは、Tokyo Electron Ltd 社の Dr. Seiji Nagahara 氏より、「Holistic Approaches Toward High NA EUV Lithography」と題して、high NA EUV lithography について、総合的な課題に対する、各要素技術の優位性について最新の状況を説明いただいた。まずマスク製造では、現像工程では新しいノズルや機能の導入により欠陥品質を改善。次に、MOR を使ったウエハプロセスでは PEB 温度を上げることで感度が改善できるが、LWR 悪化や残渣の課題があった。しかし ESPERT の導入により界面付近の極性や分子サイズを制御し、上記課題を解決するとともに解像力、CDU も改善。最後にエッチングについては、ハードマスクのエッチングで LER が悪化する課題があったが、Plasma Curing によって、直前のエッチング後よりも改善。また Quasi-Atomic Layer Etch (QALE) によって選択比と断面プロファイルが改善。多くの協働会社に関わる本件はキーノートに相応しい内容であったと考える。

2 件目の一般投稿は、Applied Materials 社の Dr. Rebecca Stern 氏より、「Exploring Photomask Etching Capabilities For New EUV Absorber Materials」と題して、EUV の absorber の chemical

etching 機構について、理論計算をベースに、実際のプロセス条件に照らし合わせて考察された。実際のプロセスはより複雑ではあるが、例として理論的にエッチング可能であった PtW が、実際にエッチングできたことが引用された。様々なエッチングガスによる試行は多くのコストを生むが、この手法はそれを改善し、さらにスピードアップも見込める。エッチング装置メーカーが材料特性に着目した発表は目新しく、本業界が様々な分野がクロスすることを示す象徴的な発表であった。

3 件目の一般投稿は、FUJIFILM Corporation 社の Kei Yamamoto 氏より、「Study of EB resist dissolution contrast and chemical blur impact on the ultimate resolution」と題して、chemical stochastic に起因する LWR と解像力について、レジスト設計の見地から各種データを説明頂いた。具体的には PAG サイズ、PAG 濃度、Rmax を調整し、評価された。最後に最適化されたレジストで複雑なパターン形成に成功し、最小線幅として 10.5nm を達成。EUVmask に向けたレジスト開発は解像力を始めとしたさまざまな観点がある重要な要素であり、今後も材料メーカーの積極的な発表を期待したい。

[Session 7: Mask Data Handling]

Mask Data Handling セッションでは一つの Withdraw があり 3 つの発表がなされた。

一つ目の発表は NCS の濱路氏による招待講演であり、リアルカーブデータが MDP 界限にもたらずインパクトについて詳細な解説がなされた。Boolean と Sizing における Bezier 曲線の取り扱いに関して現行の Piecewise Linear データハンドリングとの対比が明確にされ、また Sizing についてベンダー間での共通の定義が必要であると結論付けた。

次に D2S 社の Shendre 氏からピクセルベースの MDP データ処理についての発表があった。これは BACUS2022 からの Best Presentation 推薦 Paper である。"You don't need 1nm contours for curvilinear shapes: Pixel-based computing is the answer" という刺激的なタイトルから分かるように現行の OASIS フォーマットによるフローから Pixel ベースへの移行を唱えるもので、非常に興味深いものである。GPU との親和性などを考えるとこれからのブレイクスルー技術となりえる。

最後は Samsung の Shin 氏が OASIS.MBW について新旧のバージョンでのファイル圧縮性、およびマルチファイル出力による TAT 向上について発表した。MDP 処理においてファイル入出力の時間が支配的であることが再確認された。

[Session 8 : Poster session]

Zoom のブレイクアウトルームにより、計 7 件の発表があった(Withdraw となった 8-5 を除く)。

(8-1) The University of Tokyo の Farghali 氏から「Super Smoothing of Nanoscale Quartz Surface Using Amorphous Carbon Films」と題して発表があった。Plasma-based ion implantation and deposition (PBII&D)を使って Qz 基板の上にアモルファスカarbonをデポし、表面ラフネスのスムージングを試みた。低角度のデポの方がラフネスが小さく、シャドーイング効果でのラフネスの悪化量も小さい。MD(Molecular dynamics)シミュレーションでラフネスを計算。

(8-2) Utsunomiya University の Niinuma 氏から「Evaluation of suprathreshold ions in a laser-produced plasma beyond-EUV source」と題して発表があった。波長 6.xnm 向けの Gd プラズマの LPP ソースから、ミラー寿命に関わる Gd イオンの Debris を検出。6ps よりも 150ps パルスの方が Gd

イオンエネルギーが大きいことを確認。

(8-3) Utsunomiya University の Hirao 氏から「Property of Amplifier Using Yb:YAG Thin Rod」と題して発表があった。YAG thin-Rod による ArF レーザーの紹介。Amplifier システムを改良した。

(8-4) University of Hyogo の Fujimoto 氏から「Carbon/Boron Multilayer for Beyond EUV Lithography」と題して発表があった。高反射率で安定性も高い Carbon/Boron を波長 6.7nm の Multilayer として選択。実際に成膜して New SUBARU にて反射率測定したが、成膜装置の劣化により反射率は 6%。

(8-6) Taiwan Mask Corporation の Liu 氏から「Application of Pattern Matching on Single Die Photomask for AIMS Reference Image Searching」と題して発表があった。Single die では AIMS のレファレンス箇所を探すのが難しいため、Smart MRC を用いてレファレンス箇所を特定する。

(8-7) Taiwan Mask Corporation の Lee 氏から「Sidewall angle calculation on CDSEM metrology」と題して発表があった。CD-SEM 画像からの側壁角の計算値と TEM 断面の結果を比較した。絶対値は違うものの傾向は一致する。

(8-8) DNP の Nakata 氏から「A Study of Photomask Manufacture Process based on AI Technology」と題して発表があった。フォトマスク作製に AI を活用。様々なマスク作製上のデータを DataMart に集約し、品質に影響あるパラメータの発見、SPC による管理、装置ログ活用によるエラー感知を実施した。

[Session 9 : EUV Technologies]

本セッションは EUV 技術に関するセッションであり、3 件(招待講演 2 件、一般発表 : 1 件)の発表があった。

1 件目は EMLC2022 のベストペーパー(招待講演)であり、imec の Tatiana Kovalevich 氏より Spatial frequency breakdown of CD variation というタイトルで報告があった。EPE (Edge placement error)の主要因となっているローカル CD エラーを解析するために、CD-SEM を用いてウエハ寸法の測定を実施し、PSD 解析を行う事で SEM の FOV に起因するピークが検出された事を報告した。

2 件目の発表も招待講演であり、Carl Zeiss の Klaus Gwosch 氏より、ZEISS AIMS EUV High NA for Actinic Mask Review with EXE:5000 Scanner Emulation というタイトルで報告があった。EUV_AIMS に関する内容であり、High-NA (0.55)装置へのアップグレードを中心とした説明があった。NA0.33 と 0.55 の照明条件の自動切り替えが可能で、所要時間は 10 分以下との事であった。スループットは 51 個/h 以上、測定再現性は LS で 0.25nm 以下、ホールで 0.36nm 以下。High-NA 向けの装置開発は完了、High-NA 装置へのフィールドアップグレード改造は顧客サイトで 2023 年中旬までに完了予定との事であった。

3 件目の発表は Fraunhofer Institute の Andreas Erdmann 氏より Imaging performance of low-n absorbers at the optical resolution limits of high NA EUV systems というタイトルで報告があった。ウエハ転写シミュレーションを用いて NA0.55 条件でラインパターン(ウエハ寸法 8nm)の転写特性の評価を実施した。nilsE (NILS * $\sqrt{\text{Threshold}}$)と DoF (Depth of Focus)のパラメータを用いて様々な条件で TaBO 吸収膜と Low-n 吸収膜の比較を実施し、Low-n は NA0.55 でのウエハ転写特性が優れていると報告した。

[Session 10 : Opening Session: Day3]

本セッションでは招待講演 1 件、一般講演 3 件の計 4 件の発表であった。

1 件目は招待講演で「11th eBeam Initiative Survey Reports EUV Fueling Photomask Industry Growth」と題し、D2S の Fujimura 氏によるマスクマーケット全般に関するアンケート結果の発表であった。調査回答者の 78%が、EUV 露光が売り上げ増加に寄与するであろうと考え、EUV 露光の普及がマルチビーム EB 露光機を購入する第一の理由としているとのこと。また、93%がマルチビーム EB 露光機の導入について今後 3 年間は当初予想を上回るであろうとのことであった。マルチビーム EB 露光機導入によりカーブリニアパターンへの障壁が小さくなっており、76%の回答者は、最先端マスクショップは数量が限られたとしてもある程度の枚数は生産出来ると見ているとのことであった。

2 件目は一般講演で、CyberOptics の Hayashi 氏より「New Reticle-like Sensors Deliver Fast, Easy Measurements Inside the Process Chamber」というタイトルでプロセス装置内の計測の発表であった。無線通信機能があるオートフォーカシングセンサーを用いることでロボットフォーカシングやレチクルポジションチェックを効率的に行うことができ、メンテナンス時間が 1/4 から 1/6 にすることができたとのことであった。

3 件目は Toppan Photomask の Yoshida 氏より「Investigation of Mask Impact on Wafer LCDU in ArF Lithography」と題して高透過率ハーフトーンマスクのリソ光学特性に関する発表であった。マスク LCDU と NILS,MEEF とウェハ-LCDU の関係性を示し、30%PSM は NILS、MEEF とともに 6%PSM よりも改善、Wafer LCDU が 6%→30%PSM で改善することを示した。

4 件目は Photronics DNP Mask Corp の Zhuo 氏から「MoSi Stain Defect Reduction in Photo Resist strip Process」と題し MoSi ステイン欠陥の発生メカニズムを示すとともに、MoSi エッチング前の PR strip、Final rinse、spin dry 工程などレジスト剥離プロセスの条件最適化によって欠陥低減をすることができたというものであった。

[Session 11 : Patterning Technologies]

本セッションは招待講演 1 件、一般投稿 2 件であった。

1 件目の招待講演の発表では、NIKON CORPORATION の Kanaya 氏より、Digital Scanner(DUV maskless scanner)の開発状況が報告された。Scanner の基本的な構成が示された上で、チップ毎のユニークパターンの搭載/パターン配置の変更、大面積露光、光学デバイス向け露光など従来の scanner では実現が難しい露光が可能と説明された。さらに、Sub-pixel パターンの制御性や、OPC を適用したコンバーターでの実際の露光結果など、より実働性の高い内容が報告され、maskless scanner の実用性の高さが示された。

2 件目の一般投稿では、Avant-Gray LLC の Bennett 氏より、低加速電圧 EB 描画(ULV EBL)によるウエハへのダイレクト描画に関する報告がなされた。50~400V 帯の加速電圧と Micron-scale ビームを用いた場合の各種性能見込みが示されており、特にスループットに関しては 300mm ウエハで 10WPH 程度の能力と、既存の高加速電圧描画機より 500 倍早い見込みが示された。レジストヒーティングなど課題はあるものの、ULV EBL は現実的なスループットでウエハへのダイレクト描画が実現し得ると結論付けられた。

3 件目の一般投稿では、Tokyo Denki University の Horiuchi 氏より、曲面へのパターン転写を目的としたパラボリックミラーを用いた露光方法の開発状況が報告された。曲面 reticle の作製が困難なことから、flat reticle を用いて Concave、Convex 両面への転写を試行しており、いずれの曲面へも転写が可能なが示された。mm オーダーの Defocus 状態(曲面形状差考慮)であっても転写は可能だが、パターンサイズの拡大や露光量の低下、露光領域のシフトといった課題も示された。

これらの課題が解決されれば、flat reticle を用いた曲面へのパターン転写は可能と結論付けられた。

[Session 12 : AI Utilization]

本セッションでは昨今急速に発展・普及しつつある AI・ディープラーニング技術を用いたプロセス評価、欠陥の分類、装置起因のエラーを補足する機能の開発をテーマにした 3 件の発表が行われた。

1 件目は Hitachi Ltd より Mr.Yutaka Okuyama により Automated Measurement Method with Human-pose Estimation Model for Cross-sectional SEM Images of Semiconductor Devices が発表された。本発表では、半導体デバイス上でエッチング後・断面 SEM 画像によるプロセス評価を人物姿勢推定手法をモデル化しディープラーニングに適用。その判定の正確性および、既存の判別手法と比較して実用性において優位であることが示された。

2 件目は HTL Co.,Japan より Mr.Hideaki Hamada により Approach to AI Defect Classification for Photomask Inspection Equipment Using EOI-AI Software Package Developed by HTL が発表された。発表ではフォトマスク上の欠陥を EOI-AI ソフトウェア・パッケージ上で、ピクセルレベルにて欠陥の特徴を学習させ、ディープラーニング手法によって欠陥の特徴と分類対象欠陥を分類する手法とその結果を示した。将来・フォトマスク上の欠陥を正確、かつ、高速に自動分類するアプリケーションにおいてディープラーニングの有効性が示された。

3 件目は Mycronic 社より Mr.Stefan Fu により Applying Deep Learning methods in Flat Panel Display Maskshop operation が発表された。本発表は FPD 用フォトマスク描画装置上で大型フォトマスク描画中に発生したフォーカス不具合起因のマスク欠陥を装置内のビッグデータ解析、特に正常な状態を学習させるディープラーニング・アプローチが描画不具合を捕捉するアプリケーションに有効である事が述べられた。さらに本システムにおいて学習モデル作成用のデータを装置からクラウド上にアップロードするのではなく各装置上で作成されたモデルをアップロードするアプローチを採用した事も述べた。各装置内のデータ・セキュリティを保全する配慮が可能である事も示された。

[Session 13 : Writing Tools]

招待講演 1 件と一般講演 2 件の計 3 件の発表があった。

招待講演は IMS Nanofabrication 社の Annette Schnettelker 博士から、同社の 2nm ノード向け最先端描画機 MBMW-301 と、10nm ノード超向けの中級機 MBMW-100 Flex についての発表があった。MBMW-301 では低感度レジスト向けに電流密度を 2A/cm² に増やし、ビーム本数を従来の 26 万本から 59 万本へと 2 倍以上に増やした。また、Anti-Fogging 機構の導入により、かぶり電子を 50%低減している。MBMW-100 Flex では電流密度を 0.4A/cm² と抑えているものの、3 種の高速度描画モードを用意し、最も速いモードではマスク 1 枚あたり 3 時間程度の描画時間を実現している。これはレーザー描画機と匹敵するほどの速さで驚異的である。なお MBMW-100 Flex は MBMW-201 へアップグレード可能

とのこと。

つづいて一般講演の1件は、NuFlare Technology社の安田氏から、同社のMBM-2000PLUSの描画性能についての報告があった。ビーム本数26万本とビームサイズ16nmはMBM-2000と同じだが、電流密度は3.2A/cm²と上回っている。次世代機MBM-3000は電流密度3.6A/cm²、ビーム本数50万本で約2倍、ビームサイズは12nm、ローカルCDUの速報値は0.5nm台前半。マルチビーム機の開発を着実に進めている印象を受けた。

一般講演の最後の1件は、Mycronic社のRobert Eklund氏から、90nmノード超向けのレーザー描画機SLXシリーズの発表があった。Robert氏はSDGsをテーマにした昨年のパネルにもパネリストとしてリモート参加していただいたが、Mycronic社のサステナビリティに対する積極的な取り組みは今年も業界随一であると感じた。残念ながらRobert氏は当日の体調不良により登壇できず、事前に提出していただいたビデオ放映になったが、3年続いたデジタルカンファレンスの最終講演がビデオ録画により救われたのはある意味で感慨深いものがあった。

[Panel discussion (Day 3)]

「Curvilinear Masks - What Should We Do for High Volume Manufacturing?」と題して、パネルディスカッションを行った。

パネリストは5名。MDPを代表してNihon Control System社のMasakazu Hamaji氏。Semi Task Forceメンバーでデバイスメーカーを代表し、Samsung社のJin Choi氏。マスクショップを代表し、Dai Nippon Printing社のShingo Yoshikawa氏。描画機および検査機メーカーを代表し、NuFlare Technology社のNoriaki Nakayamada氏。計測器、とりわけMaskCDSEMツールメーカーを代表し、Advantest社のToshimichi Iwai氏に登壇いただいた。モデレータはSynopsys社のKokoro Kato氏、Dai Nippon Printing社のHiroshi Nakata氏が務めた。

まず、昨今の学会におけるCurvilinearの発表数に言及し、eBeam Initiative Surveyからも、業界全体として大きな関心が集められていることを共有した。Hamaji氏からは、piecewise linear approximationとBezier curveの対比がなされ、Bezierのsegment数の少なさからruntimeは短くなるが、両者の形状差は認識する必要があることに触れられた。また新しいcl formatに対応するソフトとは別な仕組みがマスクメーカーにある場合に負荷になる懸念を示された。Choi氏からは、MDP時間が描画時間を超えている場合もあることから、new data format検討の経緯と種類の紹介、そして今後はOPCからマスク製造において共通のcurvilinearデータでハンドリングすることを進めていると報告があった。Yoshikawa氏からは計測、外観、コストについて懸念が示された。Resolutionを向上する手法はあるが最適化にまだ改善の余地がある。そしてwafer printからのフィードバックも必要と説明。Nakayamada氏からは描画機内MPC計算(PLDC)に触れられ、正しいwafer printの定義のためにもOPC～マスク製造～ウエハープリント全体のフィードバックループの必要性について言及された。それについて特にcuLithoという枠組みについて各パネリストと意見交換がなされた(後述)。Iwai氏からはpattern fidelityに懸念が示され、DBMを使ったEPE検証について説明があった。

各パネリストの懸念を要約すると、TATと精度に集約される。TATの問題に対して新しいcl formatやPLDCのようなツールで対応する。しかしながら新しいカーブデータの取り扱い保証とも関わるため、精度はOPC、ウエハープリントとも連携した活動が必要と意見が一致した。

Cu-litho については、wafer print からのフィードバックが必要だが、以前よりも得意先とのコミュニケーションに時間が掛かっており、スピードも大きな要素となる。

また 90 度パターンの難しさはメモリーのような straight と curve の mixture パターンで大きな問題となり、各社ルールがあるものの standard MRC の必要性について議論された。

Curvilinear でどう価値が創造されるかという観点では、新しいデバイスやソフトの開発によるメリットが出された一方で、そのコストをどこが負担していくのかと言う課題も考えていく必要がある。

最後に curvilinear を取り巻く eco システムはデバイスメーカー(OPC、ウエハープリント)、ツールメーカー、マスクメーカーの連携がキーであることを認識し、学会を通して連携を強化していくことで纏めた。

4. ベストペーパー、ベストポスターの選出

PMJ2023 では以下の通り、3 件の Best Oral Presentation と 1 件の Best Poster Presentation を選出した。また、新規に Best Academic Poster Presentation を設けて Academia の発表の中から 1 件を選出した。

Photomask Japan 2023

Best Paper Award Winners



Best Oral Presentation:

Program No.	Presentation Title	Name	Affiliation
13-2 [BACUS]	Current Performance of Electron Multi-beam Mask Writers and Future Plans toward High-NA EUV Era	Jumpei Yasuda, Hiroshi Matsumoto, Haruyuki Nomura, Hayato Kimura, Keisuke Yamaguchi, Yoshinori Kojima, Masato Saito, Takao Tamura, Noriaki Nakayamada	NuFlare Technology, Inc., Japan
5-2	Reducing systematic LCDU of dense contact hole arrays on wafer via source optimization	Joern-Holger Franke ¹ , Alberto Colina ² , Lieve Van Look ¹ , Andreas Frommhold ¹ , Gijbert Rispen ² , Eelco van Setten ² , Mark Maslow ²	imec, Belgium ¹ ASML Netherlands B.V., The Netherlands ²
6-2	Exploring Photomask Etching Capabilities For New EUV Absorber Materials	Rebecca Stern, Jeff Chen, Rao Yalamanchili	Applied Materials, USA

Best Poster Presentation:

Program No.	Presentation Title	Name	Affiliation
8-8 [EMLC]	A Study of Photomask Manufacture Process based on AI Technology	Hiroshi Nakata, Ikuo Kikuchi, Noriko Baba, Maiko Hikichi, Shingo Yoshikawa	Dai Nippon Printing Co., Ltd., Japan

Best Academic Poster Presentation:

Program No.	Presentation Title	Name	Affiliation
8-2	Evaluation of suprathreshold ions in a laser-produced plasma beyond-EUV source	Takeru Niinuma ¹ , Tsukasa Sugiura ¹ , Masaki Kume ¹ , Yuto Nakayama ¹ , Hiroki Morita ¹ , Atsushi Sunahara ² , Shinichi Namba ³ , Takeshi Higashiguchi ¹	Utsunomiya University, Japan ¹ Purdue University, USA ² Hiroshima University, Japan ³

5. 最後に

PMJ2023はCOVID-19の影響によりPMJ2022と同様、完全オンラインのデジタルカンファレンスとした。PMJ2022からの主な変更点としては、ポスターセッションにてブレイクアウトルーム前の事前録画ショートプレゼン放映が挙げられる。また、PMJ2022の経験から洗い出した機能上、運営上のアップデートを実施し、より完成度を高めることができたため、今後なんらかの理由で再びオンライン開催が必要になった時のモデルケースとなると考える。

投稿数はオンライン疲れのためか13件減少した。特にUS、ヨーロッパからの投稿が減少したが、昨年同様3日間の開催に必要な件数を集めることができたこと、また大きなトラブルなく会期を終えることができたことは、ひとえに関係各位のご支援ご尽力の賜物であり、心より感謝申し上げます。

PMJ2024は横浜での現地開催が決定している。参加者アンケートでも8割以上が現地開催を希望しており、投稿数および参加者数の増加が期待できる。ただ、現地開催はCOVID-19以前の2019年以来であるため、参加者同士の交流の場としての質、安全性と採算性との両立を今一度見直すと共に、より参加者及び投稿テーマの裾野を広げた学会を目指したいと考える。