

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) 2022 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を取り止め、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 2022 年 4 月 26 日から 4 月 28 日の 3 日間で、昨年の 2 日間より 1 日延長した。オーラルセッションでは、昨年は発表を事前収録して Q&A パートをライブ配信するスタイルだったが、今年はリアルタイムをより重視し、ほぼすべてライブで実施した。また、ポスターセッションも Zoom のブレイクアウトルーム機能を利用し、より踏み込んだ交流ができるように工夫した。更に、例年の技術展示の代わりに、会議の中でスポンサーに情報発信の場を提供する仕組みとしてスポンサーセッションとブレイク中のスポンサー動画配信を実施した。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

PMJ2022 の発表件数は 61 件 (キーノート 3 件、招待講演 15 件、オーラル 31 件、ポスター 12 件) であり、PMJ2021 より 10 件の増加となった(ポスター発表のうち 1 件が No show となったため件数に含めず)。また、参加者は PMJ2021 の 289 名から 317 名へと増加し、海外参加者比率も 25% から 30% に増加した。表 1 にカテゴリ別発表数を示す。

表 1 カテゴリ別発表件数

TOPIC	Keynote	Invited	Oral	Poster	Total
1.Materials for photomasks		3	4		7
2.Fabrication process steps and equipment for photomasks(developing, etching, cleaning etc.)			2		2
3.Photomask writing tools and technologies including multi-beam EB writer		1	4	1	6
4.Tools and technologies for metrology/ inspection/ repair		1	5	1	7
5.Technologies and Infrastructures for EUVL masks	1	3	3	1	8
6.Technologies and Infrastructures for NIL masks		3	4		7
7.Technologies and Infrastructures for FPD masks			1		1
8.EDA, MDP, curvilinear ILT and DTCO	1		4	1	6
9.Photomasks with RET: PSM, OPC, SMO and multiple patterning			2	1	3
10.Photomask-related lithography technologies		1	1		2
11.NGL mask technologies and their applications: DSA and others					
12.Strategy and business challenges: cost, cycle time and total mask solutions		1	1		2
13.Patterning technologies for semiconductor and electronic devices					
14.Semiconductor manufacturing technologies		2			2
15.eBeam direct writing and eBeam lithography technologies					
16. Utilizing AI technologies for the efficiency of R&D and HVM					
17.Legacy tools for middle and low-end masks	1			2	3
18.Photomask and lithography related technologies in academia				5	5
Total	3	15	31	12	61

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]

当セッションではキーノートスピーチ 1 件、招待講演 1 件の計 2 件の発表があった。

1 件目の発表は Keynote Speech として、GlobalFoundries 社の Jed H. Rankin 氏から

「Innovations of Innovations in Photomasks」と題して、フォトマスクのこれまでのイノベーションと今後のチャレンジ項目についてご講演頂いた。フォトマスクの'Visible'なテクノロジーとしては、ブランクスを始めとする材料開発と描画機を始めとする装置開発が挙げられるが、一方でコスト削減、サイクルタイム削減、生産能力向上という'Invisible'なテクノロジーもフォトマスクのライフサイクル延命のためのイノベーションとして不可欠であることが述べられた。今後のチャレンジ項目として、先端世代とレガシー世代の両立、EUV の商業化、NIL やシリコンフォトリソグラフィの開発、ビジネスモデルの構築の 4 つを挙げた。

2 件目は招待講演として、Applied Materials 社の Shiva Rai 氏より「ICAPS Market Trends and Key Inflections Driving Growth in the Semiconductor Equipment Segment」と題して、半導体需要のトレンドと ICAPS(IoT Comms Auto Power Sensor)についてご講演いただいた。半導体市場は 2018 年の\$466B から 2030 年には\$1T に達すると予想されており、この成長を牽引するのは産業用 IOT であり、人による消費は無視できるほど小さくなる。ICAPS 機器とクラウドデータセンサーを 5G で繋ぐことにより、各機器に搭載される半導体は急激に増加する。低消費電力化に向けては、パッケージ技術も重要であるとのことであった。

[Session2 : EUV from US]

本セッションでは 2 件の一般講演があった。

1 件目は、ASML US の Dong-Seok Nam 氏から、EUV マスクにおける Low-k1 や High-k を対象とした、Tachyon と Hyperlith に基づくシミュレーション結果が報告された。特に SMO を考慮した厳密な定量的検討が行われ、DOF と NILS などの結像性能に対する膜厚の最適化が説明された。質問は 2 件あり、1 件目では Low-k HR 吸収体の反射率が質問され、40%以上と回答された。2 件目の質問は座長からで、実際の露光における照明光の熱的影響が尋ねられ、それに対しては、 n や k の温度依存性は考慮しておらず、ブランクスサプライヤーと議論し、もし n, k の温度変化があれば、シミュレーションで考慮できるとのことであった。

2 件目は、Micron、EUV Tech、及び CXRO の共同研究に基づく EUV マスクのレビュー装置に関する発表で、Micron の Gisung Yoon 氏が報告した。本レビュー装置は、CXRO が以前から報告してきた AIRE (Actinic Image Review System) と呼ばれる Zoneplate を用いたアクティビックレビューシステムを、DPP 光源に替えてスタンドアロン化したものである。報告では、Zoneplate に必要な単色化の構成や性能などが説明された。質問は 2 件あり、1 件目では、1 ポイントでのレビュー時間が尋ねられた。それに対しては、照明条件等に依存するが、顧客の現状の要求値は満たしていると回答された。また、次世代機では量産に必要なスループットが得られるとのことであった。

[Session 3 : Special Session]

本セッションでは、EUV マスク基板開発への貢献による BACUS Prize 2021 受賞を記念して、2 件の招待講演が行われた。

1 件目は、AGC の Ikuta 氏から「EUV mask blanks review」と題して、EUV マスク基板開発の経緯と今後の展望について講演された。2003 年から着手、2012 年まで SEMATECH と、その後 2015 年まで EIDEC と共同で開発された経緯が紹介された。特に、ML 層での欠陥低減を重要課題として、検査技術と共に開発が行われ、EUV 量産適用レベルを達成した。7nm 向けに High-k 基板を開発、今後も EUV リソグラフィが求める新たな材料について評価が進められている。

2 件目は、HOYA の Onoue 氏から「Development of EUV blanks -- History and future challenge--」と題して、EUV マスク基板開発でのこれまでの経緯、現在の状況、および今後の見込みについて講演された。2000 年から開発をスタート、位相欠陥の低減を中心に開発が進められ、EUV 量産適用レベルを達成した。さらに Low-n の位相シフト型基板について新たな表面材料の開発をポイントに行い、EUV 光の高い反射特性が得られている。他、周辺技術として 2D バーコード、裏面コーティング、修正等が紹介された。最後に、今後はさらに業界で協力して課題の解決を目指したいとのメッセージが示された。

[Session 4 : NIL1]

本セッションでは招待講演 1 件、一般投稿 3 件の計 4 件の発表があった。

1 件目の発表は招待講演で、キオクシアの Nakasugi 博士から「The current status of nano-imprint lithography and its future outlook toward carbon neutrality by 2050」と題して、NIL の現状と 2050 年のカーボンニュートラル実現に向けた NIL の貢献に関して講演があった。NIL の現状に関しては、課題であったスループットに対して、マルチフィールドディスペンス、ガス透過 SOC、スピン塗布 NIL、マルチフィールド NIL など多くの技術が適用され、改善が進んでいる様子が紹介された。カーボンニュートラルへの貢献では、NIL が他のリソ技術と比較して低消費電力であることが紹介され、NIL を適用することでデバイス製造時のエネルギー消費を大幅に低減できることが示されていた。

2 件目はキヤノンの Kobayashi 氏から「Nanoimprint Performance Improvements for High Volume Semiconductor Device Manufacturing」と題した発表であった。NIL のロードマップと適用アプリケーションが紹介されたが、メタ光学素子への応用は興味深い。また NIL のウエハ外周部オーバーレイ改善で ArF 液浸との合わせ精度 XMMO で 1.79nm を達成していた。CO₂ の適用で NIL 充填時間の短縮を達成した件は、スループット改善だけでなく、希少資源であるヘリウムの消費削減という観点からも有益と思われた。

3 件目はキヤノンの Nawata 氏から「Nanoimprint Edge Placement Error Elements and Control」と題した発表であった。特に DRAM への適用を目的に、NIL の EPE 評価を行った。EPE はオーバーレイだけでなく、CD 制御も重要であるが、今回 NIL の露光量変調で CD 分布制御が可能であることを示したことは、NIL 技術の大きな進展だと思われる。

4 件目はキオクシアの Kobayashi 氏から「Study of pattern quality improvement in replica template process」と題した発表であった。NIL によるレプリカ作製の過程で、マスターでの微細な欠陥がレプリカ上で大きな欠陥に成長するメカニズムに関する検討が報告された。RLT 分布が欠陥発生に寄与していることが述べられて、樹脂塗布時のドロップ補正による RLT 分布改善の手法が報告されて

いた。

[Session 5: NIL2]

本セッションは招待講演 2 件、一般公演 1 件であった。

招待講演の 1 件目は、NTT の Miyata 氏より、光メタサーフェスのイメージング応用という観点で報告していただいた。光メタサーフェスの光技術産業への展開は、世界的にも期待されているとのことである。講演では、先ず光メタサーフェスをイメージセンサへの応用した例が報告された。原理的にセンサ受光量が入射光量の 1/3 になってしまう現在のイメージセンサに対して、光メタサーフェスを用いてイメージセンサを構成することで光損失をなくし受光量を最大化することに成功したとの報告があった。別のトピックとして光メタサーフェスをスペクトルカメラへ応用した例が報告された。既存のレンズ、スリット、分光素子で構成される光学系を、1 枚のメタレンズと AI による信号処理システムで、小型、高速なスペクトルカメラを実現したという報告であった。最後のトピックとして、NIL を用いて反射型の偏光ビームスプリッターを作成し、各入射偏光における回折効率が所望通りとなっていることを確認することができ、大面積、低価格の光メタサーフェス製造技術として NIL が適用可能であるとの報告であった。

招待講演の 2 件目は、東北大学の Niinomi 氏より、NIL を利用したナノ構造プラズモニックメタサーフェスが物質のキラリティ制御に有効な手法になるという観点で報告していただいた。講演では、キラル物質のモデル物質として塩素酸ナトリウム (NaClO_3) を使用した例が紹介され、円偏光レーザーによって金属ナノパーティクル表面に誘起された局在プラズモニック共鳴を用いたキラル結晶化過程において、数 10% に達する大きな鏡像体異性過剰率が得られるという現象を確認したという報告があった。また、大きな光学キラリティ (Optical Chirality) の増強は、金属ナノ構造に発生する表面プラズモン近接場で観測されること、また、ここで生ずる大きなキラリティの偏りは、キラルな結晶化クラスタに作用した鏡像体選択性キラル光学捕捉の結果であろうとのことである。従来、プラズモニックメタサーフェスの製造技術として EBL を利用していたが、今後は NIL を利用することで大面積、低価格でプラズモニックメタサーフェスの製造が可能になり、この分野の研究を大きく前進させることになるであろうとの報告であった。

一般講演は、DNP の Ichimura 氏より、次世代半導体デバイス用のホールレイヤに対応した NIL テンプレートの開発という観点で報告していただいた。NIL の利点である解像度に関して 1Xnm サイズの LS, ホール, 2D layout 等のテンプレートの製造実証の紹介と、同様に NIL の利点である 3D 構造に関して dual damascene 等の 3D テンプレートの製造実証の紹介があった。次世代の半導体デバイス用のホールテンプレートについては、ホールピッチを変えて 18~22nmHP のターンを製造し、CD 均一性と IP(Image Placement) の計測を、従来の計測方法とは異なる SEM 画像処理方法で評価した。その結果、ホールサイズが小さくなるほど CD 均一性、IP とともに悪化するが、同じホールサイズでもホールピッチが大きくなるとこれらの数値が良くなることが確認されたとのことである。また、今後の微細なホールテンプレートの製造には製造プロセスと描画装置の安定性を確保した上で、LELE プロセスを提案するとの報告であった。

[Session 6 : EUV for High NA]

本セッションは次世代 EUVL である High-NA(NA:0.55)のセッションであり、先端露光機である EXE5000 の進捗状況とその光学系である Starlith の 2 件の招待講演があった。1 件目は ASML の Jan van Schoot 氏から High-NA EUVL Exposure Tool: Program Progress and Mask Interaction というテーマで High-NA 露光機のアップデートがあった。装置のロードマップが示され、NA:0.55 の装置としては、2023 年に Early Access @ ASML Lab 開始、その後、顧客サイトに最初の EXE5000 が出荷され、2024 年頃から R&D 開始、2025 年には NA:0.55 の量産機である NXE5200B のリリースを計画しているとの事であった。NA が 0.33 から 0.55 に大きくなる事による効果についてシミュレーション及び MET5(CXRO)での実験結果を使って示し、ドーズ量低減、スループット改善、コントラスト改善、解像性向上等のメリットがあることを示した。最後に光源や装置、ASML/imec ラボについての最新状況を説明し、順調に開発・立上げが進んでいると説明された。

2 件目は、Carl Zeiss の Christian Karlewski 氏から EUV Optics in high volume manufacturing というテーマで、EUV 露光機向けの最新光学系である Starlith3600 の報告があった。Starlith3600 は NXE3600 向けの光学系であり、既に 40 台以上のシステムを出荷済みとの事であった。また、EUV 露光機向けの光学系である Starlith3xyz としては、既に 180 台以上を集荷済みとの事であった。EUV ミラーには非常に厳しい精度・管理が求められ、それには何度も研磨と測定を繰り返す必要があるとの説明があった。High-NA(NA:0.55)においては、NA:0.33 の装置よりも更にサイズが大きくなり、ピコメートルオーダーの精度が求められるため、新しい測定手法の開発も必要となるが、順調に開発が進んでいるとの事。また、NA:0.55 以降の次世代技術としては NA:0.70 を検討中である。NA:0.70 においては、さらにサイズが大きく、高精度のミラーが必要になると考えられるが、不可能ではないと考えており、今後のアップデートを期待して欲しいとの事であった。

[Session 7: EUV technologies (Day 1)]

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 1 件目は IMEC の Vicky Philipsen 博士から EUV の新 absorber 素材についての発表。EUV 位相シフトマスクの導入実現に向かって着実に進歩を続けている印象を受けた。一般講演の 1 件は、RWTH Aachen 大学の Sascha Brose 氏から EUV レジスト評価用の簡易転写装置の紹介。EUV 露光では珍しい透過型 Talbot 法を使って干渉縞の転写を行う。AIMS や欠陥検査ツールへの応用はまだ検討していないとのこと。一般講演のもう 1 件は、Siemens Digital Industries Software の Chih-I Wei 氏から、stochastic effect を考慮した確率的パターンニングモデルの紹介。Stochastic effect には一次光子、二次電子、化学増幅の各段階において統計的ばらつきが存在するが、すべてを一括して正規分布仮定で取り扱う。もしこの手法が有用と証明されれば、個別のばらつき要素分解と各要素の低減はレジスト設計にとって重要であっても、パターンニングモデルにとってはさほど重要ではないことになる。今後の展開を見守りたい。

[Session 8 : Opening Session: Day2-EDA-]

二日目のスタートは Opening Session: Day2-EDA-というタイトルで、Synopsys の Srinivas Raghvendra 氏のキーノートで始まった。ここでは Curvilinear データの必要性について、その背景が語られ、そして Software 業界としてどのようにサポートしていくかが説明された。Curvilinear データ

処理は PMJ2022 でのホットな話題の一つであり、データボリュームの増大に対してトータルなエコシステムを考える必要がある。MDP というフローの中でも、MEC(Mask Error Correction)、MRC(Mask Rule Check)、PM(Pattern Matching)、Fracture などのすべての工程で考慮されるべきである。Raghvendra 氏は Synopsys 社として Solution を提供していくことを強調し、またそのためにはマスク業界全体の協調が必要だとした。2 つ目の発表は Siemens(Mentor)によるデータ処理 Checkpointing 手法に関するものであった。これは、長時間のジョブについて途中で何かしらの Failure があつた際に直前の Checkpoint まで戻る手法である。これによりジョブを全て最初からやり直す必要がないとされ、製造上の大きなメリットがあるとされた。実用的ないい発表だと感じた。

[Session 9 : Curvilinear Data Handling]

本セッションでは招待講演 1 件、一般投稿 3 件の計 4 件の発表があつた。

1 件目の発表は招待講演で、Samsung Electronics の Jin Choi 博士と、Siemens Digital Industries Software の Peter Buck 氏から「Status of 'Curvilinear data format' working group」と題して講演があつた。Jin Choi 博士からは EUV マスク及びマルチビームマスクライターの普及により、マスクのデータ量の増加が著しく、マスク形状を多角形ではなく Curvilinear Format で表す技術の必要性、および working group での作業の進捗と今後の見通しについて紹介された。Peter Buck 氏からは、Bezier 曲線を用い表現方法など技術的内容が紹介された。

2 件目の一般講演では Synopsys(Austin, USA)の John Valadez 氏から「An Optimized Data Prep Flow for Curvilinear Masks」と題した発表であつた。Mask Data Preparation におけるデータフローの 4 つのステップ MEC (Mask Error Correction), MRC, Pattern Matching, Fracture について Curvilinear データの場合の処理内容やパフォーマンスについて現状と今後の課題が紹介された。

3 件目の一般公演では Synopsys(Mountain View, USA)の Alex Zepka 氏から「Mask Modeling in the Curvilinear Mask Era」と題した発表であつた。ILT 技術の普及によりマスクパターン形状で Curve Linear 形状が重要となると同時に許容誤差が減少しており、形状の補正は一層重要となっている。OPC での経験に基づき、マスクのモデルキャリブレーションに於いて、従来の座標値と CD 測長値を用いる方式から、レイアウト領域とコンターを用いる方式への転換、および機械学習を用いた精度向上について現状と課題が報告された。

4 件目の一般公演では Synopsys(Japan)の加藤心しから「Verification Methods for Curvilinear and Real-Curve Geometries」と題した発表があつた。Curve Linear レイアウトのマスクでは、マスクルールチェック処理では従来のマスクとは異なるチェックが必要であり、楕円形状や曲線形状の SRAF の識別や、寸法の評価について処理方法と課題が紹介された。また多角形近似による Curvilinear とスプラインによる Real-Curve の違いと後者のメリットについても説明があつた。

[Session 10 : Defect Control & Resolution]

当セッションでは、4 件の一般投稿があつた。

1 件目は、芝浦メカトロニクス株式会社の Demura 氏より、「Freeze point monitoring system for freeze cleaning method」と題して、パーティクルを除去する目的で、零度以下で水が凍る際の体積膨張を利用する技術が紹介された。これはパターン倒壊を起こさずに不要なパーティクルを除去する技術であるが、

冷却しすぎると氷が砕けパターン倒壊を起こすため、温度コントロールを精密に行うことが必要で、それを達成。異物除去率を向上させるために冷凍～解凍を繰り返し実施し、本技術を使用しないときよりもスループットも向上することができる。様々なプロセスへの応用事例を期待したい。質疑応答：①フィルム状異物が苦手であること②パターンのアスペクト比は除去率に影響しないこと③膜のフラットネスは影響しないこと④材料等のコンディションに依らず氷が砕ける温度は一定。

2件目は、Gudeng Precision Industrial Co., Ltd.のPeter Cheng氏より、「Advanced Reticle Carrier Solution」と題して、RSP200のデザイン/パフォーマンスと次世代レチクルストレージソリューションが紹介された。RSP200では低発塵性、易メンテナンス性を目指したデザインについて説明。低発塵性はレチクルとの接触ポイント減少だけでなく、Pod外部のパーティクル環境に依存しないように気密性を高める構造が採用され、データでも示された。EUV用AMP200では、さらに低発塵を目指した部品が採用されており、ペリクル有無双方に対応可。またAMP200はペリクルの輸送ケースでも使用できる。顧客に合わせたオートメーション化、パージシステムの提供も可能。質疑応答：①ESDコントロールは上下のリテーナーとサポーターから導通を取ることで達成。

3件目は、Photronics DNP Mask Corporation XiamenのJoyce Wang氏より、「Massive Tiny MoSi Defect Reduction in NCAR Photoresist Blank」と題して、特定の材料/プロセスにおける欠陥低減活動が紹介された。材料、レジスト剥膜、洗浄、MoSiエッチングの切り分けを行い、材料由来の欠陥を剥膜、洗浄の最適化で98%改善し、製品実績でも示された。MoSiエッチング条件変更による更なる改善も見込まれる。

質疑応答：レジスト剥膜工程においてアッシングを省略して改善したことから、アッシング中のレジスト拡散の存在を指摘したが、特定のレジストでしか発生しないことから、その影響度は小さいと回答。

4件目は、Toppan Photomask Co., Ltd.のYonemaru氏より、「Resist Pattern Resolution on Hard Mask Layer for Photomask」と題して、材料設計及びプロセス最適化により、高感度レジストで従来Siベースよりも高い解像力、低いLERを持つハードマスクが紹介された。解像力を高めるためにレジスト膜厚を薄くした従来ハードマスクではパターン潰れやLERの悪化が課題であった。それらを改善するためレジストの密着力に着目し、これがハードマスクとリンスとの界面エネルギーに強相関があることを突き止めた。ハードマスク層として、従来のSiをリファレンスとしてCrベース、Taベースで比較。解像力、塩素エッチングダメージ、フッ素エッチング時間、LER、エッチングバイアスの分布の観点から、Taベースのハードマスク材料を最適化。さらにプロセスを追い込みスペースパターンでのパターンブリッジも改善。従来のArFフォトマスクで高い解像力を理論と組み合わせて達成したことは、ArFマスク技術延命に有益である。質疑応答：①密着力がハードマスクとリンスの界面エネルギーに影響があるので、リンスの最適化でも密着力の改善ができる可能性がある②ハードマスクはプロセス中に消失するので修正プロセスに影響はない。

[Session 11 : Poster session]

Zoomのブレイクアウトルームにより、計12件の発表があった(Now showとなった11-7を除く)。

(11-1) Beijing Institute of TechnologyのWei氏から「Full Field Wavefront error aware source and mask optimization for extreme ultraviolet lithography」と題して発表があった。EUVL向けのSMOの評価で、光学系とマスクからのWavefront errorをSingle fieldではなくFull fieldのSMO(FFSMO)

を適用することにより改善。

(11-2) Utsunomiya University の Nakayama 氏から「Spectral evaluation of ionic debris in a laser-produced Sn plasma」と題して発表があった。EUV 光源に用いられる Sn プラズマから発生する超熱的イオンのデブリはコレクトミラーの表面にダメージを与える。LPP の超熱的イオンの charge-sparatd enerty spectra を評価した。

(11-3) National Sun Yat-sen University の Kuo 氏から「EUV Pellicle Mechanical Stress Induced by Air Flow through The Pellicle Frame」と題して発表があった。フレームから EUV ペリクルへの Air フローによるストレスをシミュレーションした。Air の透過性が良い方がストレス少なく、実験結果とも良く一致した。

(11-4) Tokyo Polytechnic University の Waki 氏から「High irradiance illuminator for transmission extreme ultraviolet microscopy」と題して発表があった。LPP 光源の透過顕微鏡を開発。Mo/Si マルチレイヤーミラーにより intensity が 4 倍となり、収差も改善した。

(11-5) Synopsys, Inc. の Hariprasad 氏から「An Approach to Building Photomask CD SEM Recipe for HOLON ZX Using CATS」と題して発表があった。Holon 社の Mask CD-SEM (ZX シリーズ) の測定レシピをオフラインで CAD データから作成するソフト (CATS) の機能について説明された。本ソフトは、パターンデータを含めた Jobdeck (パターン配置座標) と測定点の座標(X,Y)を入力することで、ROI の設定と画像認識のテンプレートを作成してレシピを自動作成することが可能であり、レシピ作成に係るユーザの負荷を低減する有益なソフトである。

(11-6) TMC Inc. の Yang 氏から「Enhancement of the Proximity and Aerial Imaging Performance of a Software-based Data Path for Raster-scanned Multi-beam Laser Writer」と題して発表があった。DUV レーザー描画機 ALTA4700DP で性能評価を実施。ALTA4700 に比べて、コーナーラウンディングや CD 特性が良好。

(11-8) University of Hyogo の Harada 先生から「Hydrogen Cleaning Evaluation of Mo/Si Multilayer using an EUV Irradiation Tool at NewSUBARU」と題して発表があった。New SUBARU にて EUV マルチレイヤー(ML)のカーボンコンタミの水素クリーニング評価を実施。ML ダメージ評価用の装置をアップグレードし 30W/cm² の EUV パワーと 70Pa の水素ガス圧を実現。960kJ/cm² 照射でカーボンコンタミ及び酸化膜は除去されたが、ML ダメージ(Blister)は無かった。

(11-9) University of Hyogo の Kawakami 氏から「Development of Grazing-Incidence Coherent EUV Scatterometry Microscope for Resist Pattern Observation (2)」と題して発表があった。レジストパターン観測のための EUV スキャトロメトリを開発。NIL テンプレートのリピートパターン(L&S)で SEM でのようなダメージ無くレジストパターンを測れる。

(11-10) Taiwan Mask Corporation の Liu 氏から「The Application Of Mask Data Preparation On KLA DB Inspection」と題して発表があった。KLA の DB 検査に必要な Pre-Swath Calibration を実施するのに最適なポイントを Smart MRC により決定。これによりセットアップ時間を最小化した。

(11-11) Dai Nippon Printing Co., Ltd. の Yoshikawa 氏から「High-precision EUV mask process development」と題して発表があった。MBMW を用いて高精度な EUV マスクプロセスを構築。従来プロセスよりも解像性と LWR が改善。位置精度と CDU も良好。Low-n 材のシミュレーションを実施し、良好な転写性能を確認。Low-n 材でも高精度マスクプロセスを構築。

(11-12) NuFlare Technology, Inc.の Nakayamada 氏から「Inline Model-base Mask Process Correction Embedded on Multi-beam Mask Writer MBM-2000」と題して発表があった。MBM-2000にて inline モデルベース MPC(PLDC)を適用。Pixel 数は一定で描画中に計算させるため PLDC により TAT は悪化しない。PLDC により Pattern fidelity、Dose latitude、CD Linearity、EPE 等が改善する。

(11-13) Samsung Electronics Co., Ltd.の Lee 氏から「Ecosystem Required for EUV Mask Curvilinear Pattern」と題して発表があった。Curvilinear パターンの正確な作製には様々な難しさがあり、MPC のための最適な Contour モデリング、パターンの分類方法、SEM からの Contour 抽出方法の確立が必要である。

[Session 12: EUV Tools]

本セッションでは EUV 用装置による講演が 4 件あり、1 件は招待講演である。

1 件目は ASML の Klaus Edinger 氏から電子線によるフォトマスクの修正に関する招待講演であった。電子線によるリペア機である MeRIT 装置において、加速電圧を 200 V まで下げた場合のスポットサイズが 1.2 nm であることが紹介された。また、マニピュレーターを用いたパーティクル除去可能な新しい装置の紹介があった。

2 件目は韓国 ESOL 社の Byung Gook Kim 氏による EUV による評価装置の紹介があった。光源に高次高調波 EUV 光源を利用し、顕微鏡、吸収体位相量評価、干渉露光によるパタン転写やペリクル評価の例を示した。質疑応答において、すでに装置は完成しており、デモを受け付けているとの回答があった。

3 件目は Carl Zeiss の Renzo Capelli 氏による AIMS EUV 装置の紹介があった。従来の用途である Defect Review や Shot Noise 評価だけでなく、ペリクル対応や High NA 対応、Flex Illumination、位相シフトマスク評価について紹介された。位相シフト量は回折光の評価と組み合わせて計算しており、1～2度の位相精度で評価できるとのことであった。

4 件目は KLA の Pavlo Portnichenko 氏より LMS IPRO と FlashScan 装置の紹介があった。FlashScan は EUV の欠陥検出装置であり、検出した欠陥を IPRO 装置で詳細に観察をする。欠陥の mitigation には欠陥の正確な位置と、その影響の評価が重要である。位置を評価する IPRO 装置での暗視野照明での感度向上結果についても紹介された。

[Session13 : EUV and Industry trend]

本セッションでは 1 件のキーノート、1 件の招待講演と 1 件の一般講演があった。

1 件目は、Intel の Tezuka 氏から EUV 光を用いた欠陥検査機におけるコンソーシアムでの開発活動とその成果に関連するキーノート講演を頂いた。2002 年に発足された MIRAI プロジェクトにて、多層膜の位相欠陥検出のために、EUV 光とシュバルツシュルト光学系を利用した暗視野方式の Actinic ブランク欠陥検査機 (ABI) を提案。光学系は、ASET 時代の EUV 露光機のミラーを利用し、日本独自の技術として、Proof of Concept 装置を立上げ、その優れた検出性能を実証した。その後、Selete、EIDEC プログラムに引き継がれ、フルエリアの検査実証した後、レーザーテックにて商業装置の実現を果たした。さらにこの技術を使い Actinic のマスク検査機が開発され、EUV マスクの品質向上に寄与していることが紹介された。最後に当時のリーダーの明確なビジョンと柔軟性、ニーズとシー

ズの統合、また色々なアイデアの融合によって、日本独自の Actinic 検査技術確立に繋がったと報告した。

2 件目は、Veeco の Rook 氏から EUV マスクのキャップ材料に関する発表があった。Ru キャップ層を有する多層膜は、Ru 成膜により EUV 反射率が 1.8% 低下する課題がある。その理由は、拡散層の形成と表面酸化の成長による。本発表では、ダイヤモンドライクなカーボン (DLC) を pulsed filtered cathodic arc (PFCA) を用いた成膜にて作製することにより、結合状態を制御でき sp³/sp² 比率を高め、高密度な膜を実現し、EUV 反射率は、Ru 成膜と比べ 1.2% 向上した。さらに DLC/Ru 積層膜にて、EUV 反射率の低下を抑えることが可能になるということを報告した。

3 件目は招待講演で、D2S の Fujimura 氏から eBeam Initiative の恒例のマスクマーケット全般に関するアンケート結果の報告があった。マスク売上高は、2021 年は 72% が増加するとし、2020 年のアンケート時の 33% から増えていたのは、明らかな半導体産業の拡大による。EUV ペリクルは、75% が 2023 年までに量産に適用されると回答。マスク検査に関しては、Actinic 検査機の代替として、EB マルチビーム検査の期待が高まっている。マルチビーム描画機を購入する目的は、EUV マスク用の精度向上と生産性向上が主な理由。また描画機の購買意欲は、レーザーと VSB も増加していることを報告した。そのほか、ILT については、95% が使うと、2020 年より大きく増加し、その内 41% が一部のレイヤーに使うと回答した結果を紹介した。

[Session 14 : Inspection & Metrology]

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。視聴者数は約 170 名であった。

1 件目の招待講演では、レーザーテックの Kohyama 氏より、「Actinic patterned mask defect inspection for EUV lithography」の発表があった。同社が世界で初めて製品化した APMI (Actinic Patterned Mask Inspection) の検査装置に関する内容で、開発経緯の説明、検査性能の紹介、さらに将来の高 NA 化への対応が報告された。具体的には、APMI の特徴である位相欠陥の検出やペリクルを透過した検査などの結果の紹介や、Die-to-die 検査だけでなく、マスクショップ用として、Die-to-database 検査も可能であることの説明がなされた。N3 世代以降の高 NA 用アナモルフィックマスクへの対応では NA の拡大を進めている。また、ナモルフィックマスクの新しい課題として XY 方向で求められる欠陥検出感度に差が生じることが報告された。

2 件目では、ウシオ電機の Aoki 氏から、「High-brightness LDP source for EUVL mask inspection」と題して、EUV mask 検査用光源の発表があった。EUV 光の発生原理、装置構造や長時間動作での安定性などの報告があった。光源のパルスを最適化することで、EUV plasma のサイズを変えることなく大電流化に成功している。

3 件目では、Center for Deep Learning in Electronic Manufacturing (CDLe), NuFlare Technology (NFT) と D2S との共著で、CDLe の Baranwal 氏から「SEM-based VSB Writer Defects DL Classification System」の発表があった。内容としては、VBS Writer によるパターン欠陥を、SEM 画像を用いた Deep Learning により欠陥を種類別に分類、判定するものである。Simulation を活用して多数の学習データ (~850k) を作成することで Deep Learning を可能としている。各種分類での正解率は 90% 以上の結果を示していた。

4 件目では、TASMIT の Nakazawa 氏より、「Photomask pattern evaluation by massive

measurement using Die-to-Database」 と題して SEM 画像によるフォトマスクパターンの評価システムに関する発表があった。単純なパターン幅のみでなく、パターン面積の設計値との比率や評価値のパターン密度依存性など、色々な角度からのマスクパターンの評価を可能とした。並列処理により 10,486 枚の画像を 1 時間で処理することが出来る。活用例として、140mm マスク上での 8,144 点の SEM 画像を解析して、マスク面内でのパターン位置分布を 47 分で得ることなどの紹介があった。

[Session 15 : FPD]

本セッションでは、2 件の一般講演があった。

1 件目の講演は、ニコンの Hayashi 氏からの発表 High-Transmission Phase Shift Mask Blank for High-Definition Plat Panel Display で、高精細 FPD 向けの高透過率 PSM 用ブランクスの開発・製品化について報告された。新開発されたマスクブランクス・フィルムにおいて MoSi 素材を採用することで、次世代 FPD パネルに要求される解像度を満たし、かつ、最大 35%の透過率を達成した。また、エッチング時間の短縮、高屈折率である特性を生かしフィルム厚を 10%薄くでき、また、フィルムのストレスを 70%縮小する事も達成し、次世代の高精細 FPD パネルに要求されるマスクブランクス・PS フィルムとしての性能が確認できたことの発表を頂いた。Q&A では、ブランクスの平坦度要求度について質問があったが Nikon が提供するブランクス上では問題なく性能を発揮できるとの回答を得た。

2 件目の講演は、Mycronic の Park 氏による発表 Flat Panel Display Technological Outlook and Required Techniques for Photomask Manufacturing で、1 件目の講演と同様に高精細の FPD パネル製造のリソ工程に要求される技術トレンドについて触れ、近年におけるハイエンド・高精細 FPD の要求解像度が半導体のレガシーノードに要求される解像度が近づいている状況を報告いただいた。その上で高精細 FPD パネル用マスク描画機の技術をベースにした、半導体レガシーノード向けレーザー描画機 SLX2 の CDU・リニアリティの性能の報告、並びに、機械学習の技術を取り入れたマスク描画欠陥を捕捉する技術の開発状況についても報告頂いた。Q&A では、FPD マスク製造において目視ムラへの対処には描画装置だけでなく生産プロセス全体での最適化が必要である事や、発表内で紹介された SEM 画像での CD 差の指摘があったが、生産現場向けに完全最適化されていないデータであった為、生産現場では問題無いとの回答であった。

[Session 16 : Metrology & MPC]

本セッションでは招待講演 1 件、一般投稿 3 件の計 4 件の発表があった。

1 件目の発表は招待講演で、Shanghai Huali Integrated Circuit Corporation の Zhou 氏から「Characterization of mask CD mean-to-target for hotspot patterns by using SEM image contours」と題した発表であった。本発表は BACUS2021 の Best Paper Award 受賞講演である。マスク CD-SEM で取得した SEM 画像から輪郭を抽出し、デザインデータと比較することで MTT を評価した。二枚のフォトマスクの Hotspot 位置での MTT 結果がウェーハ露光後の Hotspot 欠陥数を傾向と一致することから、本手法が OPC の検証に有効なことが示された。

2 件目は ASML の Delorme 氏から「Curvilinear EUV Mask: Development of Innovative Mask Metrology and OPC Model Calibration」と題した発表であった。Manhattan パターンでは Linearity と Proximity が評価項目だが、Curvilinear パターンではさらに Curvature の評価が必要である。発表

者は輪郭を表現する球の半径を **Curvature** と定義し、**MPC** を実施することでデザインデータとの誤差が低減されることを定量的に示した。

3 件目は **Nearfield Instruments B.V.** の **Mucientes** 氏から「**High-NA EUV Photoresist Metrology using High-Throughput Scanning Probe Microscopy**」と題した発表であった。SPM を用いて、薄膜 EUV レジストパターンの形状（高さ、幅、ラフネス）と欠陥（**Bridge**、**Break**）を評価した結果が報告された。本 SPM は同時取得可能な 4 本の MiniSPM を備えて高スループット化され、さらに、EUV レジストパターンの **Metrology**(形状計測)/**Inspection**(50um²/min の高速性)/**Review**(3D 観察)の総合評価を可能とした。

4 件目は **GenISys GmbH** の **Unal** 氏から「**Simulation-based Verification for MPC corrected Mask Layouts**」と題した発表であった。レーザーマスク描画における MPC 精度を向上するために、リソ工程をモデル化したシミュレーションを用いた検証方法を開発し、**Line-End** や **Serif**、狭部分の **Hotspot** において実結果とシミュレーション結果が一致することで性能を確認した。本手法により MPC 精度が向上して検証コストが削減可能であるため、ユーザにとって非常に有益と思われる。

[Session 17 : Writing Tools]

本セッションは招待講演 1 件、一般投稿 3 件であった。

1 件目の招待講演の発表では、**IMS Nanofabrication** の **Tomandl** 氏より、**MBMW** マルチビームマスク描画装置の開発状況が示された。最初に 2016 年から 2022 年までに約 50 台の装置が出荷予定であり、今後年 24 台以上の要求に対応できるよう製造・サービス拡充していることが述べられた。次に **MBMW-201**, **201+**, **261** での追加機能が紹介された。2021 年にリリースした 5nm node 対応 **MBMW-201+** で新ポリゴンフォーマット（**OASIS MBW2.1**）に対応し、2022 年リリースの 3nm node 対応 **MBMW-261** で **Online Sizing correction** と **Charging Effect Correction** が追加されたことが紹介された。さらに 2023 年リリース予定の 2nm 対応 **MBMW-301** では、電子源、**APS**、偏向器、データ転送兼に大きな更新が実施され、ピクセルサイズが **MBMW-101** に比べ 40%小さくなり、**Dose assignment resolution** が 3 倍以上になる計画とのことである。それによって、描画性能は 30%以上改善し、生産性が向上すると示された。最後に今後 5 年間の **MBMW** シリーズのロードマップが示され、2 年毎に新機種をリリースする計画が紹介された。

2 件目は **NuFlare Technology** の **Nomura** 氏から、次世代マルチビームマスク描画装置：**MBM-2000PLUS** の開発進捗が報告された。新電子源による高電流密度化により、**MBM-2000** と比較して約 20%の描画時間短縮を達成した。（レジスト感度 200uC/cm² (50%パターン密度)）また、**Pixel-level dose correction**（**PLDC**）機能によるパターンフィデリティ向上が示され、そのデータ処理がインラインデータ高速データ転送により描画中に実施できることが報告された。さらに新電子光学系 **CER2.0** によって、既存の **Charge effect correction(CEC)** がよりロバストになり、位置精度が向上することも示された。**MBM-2000PLUS** は 2022 年 6 月より販売される予定と述べられた。

3 件目は **Institut fur Mikroelektronik Stuttgart** の **Greul** 氏から、**Heidelberg instruments** 社製 **ULTRA i-line** レーザー描画装置を使用したフォトリソデバイス向けフォトマスク描画の最適化に関して発表があった。フォトリソデバイス用マスク上パターンの **LER** やフィデリティが、最終的なデバイスのパフォーマンスに大きな影響を与える。それらの評価には、**GenISys** 社製測定ソフトウェア

「ProSEM」を使用した SEM 計測が使用され、最適なレーザー描画装置の描画モードが導き出された。さらに描画データは、GenISys 社製 MDP ソフトウェア「MASKER」で MPC 補正が実施された。最適化されたレーザー描画と電子線描画でフォトマスクを製作し、それらからつくられたフォトニックデバイスを比較評価した結果、レーザー描画でより導波路損失が少なく良いパフォーマンスが得られたことが示された。

4 件目は Mycronic の Glimtoft 氏からレーザーマスク描画装置 SLX シリーズに関する発表であった。既に 22 台の描画装置が販売され、依然引き合いが良いと示された。本装置は FPD 描画装置と共通のプラットフォームであるため、充実したサービス体制をワールドワイドに構築できると紹介された。後半では、本装置の環境への影響と寄与が分析された。装置の製造から EoL までの環境への影響度を分析した結果、装置使用時の影響が大きいこと示された。既存のガスレーザー描画装置に比べて固体レーザーを使用している SLX シリーズの環境影響度が 73% 小さくなることが述べられ、短い描画時間がエネルギー消費を低く抑えることができると紹介された。最後に描画結果から 90nm ノードへの SLX シリーズ適用が期待できることが述べられた。

[Panel discussion (Day 3)]

“SDGs and Carbon Neutral in Semiconductor Manufacturing – What can PMJ do for the Earth?”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 4 名。計算機分野を代表して、Prodrive Technologies の Bartosz Straszak 氏。EDA・ソフトウェア分野を代表して、ANSYS の Larry Williams 氏。Mask 描画分野を代表して、Mycronic の Robert Eklund 氏。Wafer プリント分野を代表して、大日本印刷の市村公二氏に参加いただいた。まず本パネルの発端となった、Apple 社の 2030 年カーボンニュートラル宣言について紹介し、業界としてどのように対応できるかについて討論した。Straszak 氏からは、計算機の性能を上げていっても消費電力は横ばいで減らないが、代わりに冷却負担を減らすべく直接冷却の方向で検討が進んでいる旨の報告があった。Williams 氏からはシミュレーション技術を駆使してデジタルツイン化を推し進めることにより、試作失敗の無駄コストを減らしたりエネルギー効率を高めることができる旨の報告があった。Eklund 氏からは、Mycronic のレーザー描画機の環境インパクト係数を ISO14044 に従って、ゆりかごから墓場まで (cradle to grave) のライフサイクル全体で試算した結果の報告があった。それによると 85% が製品使用時の消費となり、その 4 割 (全体では 31%) が圧縮空気を得る工程で消費されているとのことだった。このような試算は昨年からはじめたとのこと。かなりの機密データの開示と思ったが、今後は投資家の信頼を得るためにこのレベルの機密情報を積極的に開示する必要があるかもしれない。市村氏からはマスク製造では描画装置とドライエッチャーと検査装置の消費エネルギーが大きい、マスク製造全体としてはデバイス製造全体の 1ppm にも満たないことと、Wafer あたりのエネルギー消費では EUV と比べて NIL のほうが約 6 分の 1 で優れているとの報告があった。大日本印刷は最終的に 2050 年にカーボンニュートラルを目指している。ディスカッションの後半で、カーボンニュートラル達成は継続的改善努力で到達できるのか、それとも技術的ブレイクスルーが必要かという質問に対して、市村氏は継続的改善で可能、他の 3 名はブレイクスルーが必要という回答であった。最後に“Yokohama Proposal”として、100%カーボンニュートラル達成は現時点で確約できないが、ムーアの法則を継続することそのものが持続的成長の維持、つまり SDGs そのものであるという提言をまとめて締めた。

4. ベストペーパーの選出

以下の3つの発表についてベストペーパーとして選出した。

9-4 “Verification Methods for Curvilinear and Real-Curve Geometries”

Kokoro Kato, Synopsys Japan R&D Center, Japan

12-3 “AIMS EUV Phase Metrology: ZEISS solution for the characterization of EUV phase shift masks”

Renzo Capeli, Carl Zeiss SMT GmbH, Germany

10-4 “Resist Pattern Resolution on Hard Mask Layer for Photomask”

Naoto Yonemaru, Toppan Photomask Co., Ltd., Japan

5. ベストポスター

以下の発表についてベストポスターとして選出した。

11-11 “High-precision EUV mask process development”

Shingo Yoshikawa, Dai Nippon Printing Co., Ltd., Japan

6. 最後に

PMJ2022はCOVID-19の影響によりPMJ2021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。PMJ2021年からの変更点としては、会期を2日間から3日間に延長し、ライブ発表、Zoomブレイクアウトルームによるポスターセッション、スポンサーセッション、スポンサー動画等を新たな試みとして実施した。論文数、参加者数は共に前年より増加し、新たな試みを含めて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。

PMJ2023も引き続き完全オンラインのデジタルカンファレンスとなることが決定している。参加者アンケートや関係各位からのご助言を元に、よりライブ感、利便性、情報の質を重視した学会を目指すべく、運営方法の改善、機能の拡充を図っていく。また、オンラインにはオンラインならではの良さがあるものの、参加者同士の交流の場として現地開催やオンラインとのハイブリット開催の要求も依然として高い。情報交換の場としての質と安全性や採算性との両立は世界的にも大きな課題であり、中長期的な当学会のあり方についても検討していきたい。