

NGL ワークショップ 2022 報告

2022/9/1 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7、8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 Zoom によるオンライン形式にて開催しました。200 名を超える参加者に登録いただき、オンラインではありましたが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 24 件発表頂きました。

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件発表いただいた。1件目は Intel Ted Liang 氏より、”Mask Technologies for EUVL”について講演いただいた。マスク開発の重要な要素として、マルチビームライター (MBMW)、ペリクル、APMI (パタン付きマスク EUV 検査装置)、AIMS, 検査、修正、裏面検査と主な技術の紹介をいただいた。特にデバイスメーカーでの検査に欠かせない APMI はインテルとレーザーテックの共同開発である。High NA 向けには APMI, AIMS, MBMW のアップグレードを計画しており、対象は 22 nm のラインパタンサイズとなる。レジスト厚さは 30 nm まで薄くなる。将来的な検討として、マスクの ϕ 300 mm 大型化についても紹介いただいた。

2件目は ASML, Jos Benschop 氏より”The present and the future of EUVL”について講演いただいた。ムーアの法則は 2040 年を超えても続くとの見通しで、そのための EUV リソグラフィーの ASML における開発について紹介いただいた。現在の光学系の重さは 10 トンで、20 年前の 20 kg からするとかなりの大型化した。ASML が EUV を採用した理由として、マスクベースの縮小露光で高いスループットを達成できることが重要であった。

3件目は TIA・東京エレクトロンの東氏より、”Semiconductor Industries: Creating the opportunities for the bright future in Japan”として講演いただいた。半導体は技術と産業に不可欠で、安全保障戦略に直結している。1990 年からの日本は国内思考に陥り、欧米は水平分業で成功を収めてきた。しかし、欧米の戦略は安全保障上では問題となった。日本は多様性のある技術を持っているので、今後の方向性として研究のコアグループなどを通じた相互作用や”Super integration”について提案いただいた。日本の安全保障、経済 (SDGs) の観点から、超ハイスピード+超低消費電力な半導体や、エッジコンピュータでの AI 等が必要とされている。

特別講演:受賞記念講演

東京工芸大学の渋谷先生より、”Rudolf and Hilda Kingslake Award in Optical Design”賞の受賞記念講演として、「半導体露光装置開発が育んだ光学結像理論の発展・吟味」について講演いただいた。はじめに、受賞理由の位相シフトマスクの発明に至った経緯を紹介いただいた。コヒーレント照明とインコヒーレント照明を比較すると、微細パタンではインコヒーレント照明が優位と考えら

れていた。しかし、回折光を基本として考えるとコヒーレント照明の像特性が優位となるはずであり、位相シフトマスクの開発につながった。また、瞳座標や、Abbe の正弦条件についても理論的な検討を進め、多くの基本的な理論を実証した。このような半導体露光装置開発の中で行われた、光学系の設計議論の発展・吟味について紹介いただいた。

Optical Lithography & Advanced Patterning Technology

本セッションでは、4件のオーラル発表と3件のポスター発表があった。光リソグラフィに関してもその重要性が薄れているわけではなく、新たな領域への適用と更なるパターンニング性能の向上が継続している。各発表ではそれらの実例を紹介していただいた。

ニコンの渡邊氏からは DUV 光を用いたマスクレス露光機であるデジタルスキャナーの開発状況のアップデートを報告いただいた。今回は 45mm x 105mm のサイズ、線幅 200nm/L/S のインターポーザー向けパターンの良好な露光結果および、248nm 用、193nm 用、193nm 液浸用それぞれの製品化計画を示していただいた。

ギガフォトンの大賀氏からは、最新の ArF 液浸露光装置向けのエキシマレーザー光源をご紹介いただいた。LER(Line Edge Roughness)の低減のため、スペckルをレーザーのコヒーレンシーの制御で低減することが示された。時間コヒーレンスと空間コヒーレンスのスペckルコントラストに与える影響を考察し、スペckル低減の解として時間コヒーレンスを従来の 4 倍に伸ばすことを示していただいた。さらに、新設計の line narrowing module (LNM)により、E95%バンド幅の 300fm から 200fm への低減を実現し、露光時の Focus blur が改善することを言及された。

キヤノン吉田氏からは、機械学習による OVL 予測を利用した露光処理の最適化についてご発表いただいた。発表の中で、VMOM(Virtual Machine Overlay Metrology)と言われるオーバーレイの誤差を引き起こす露光装置の特徴量とオーバーレイの誤差の関係性を、大量データに対する機械学習により導出する手法の開発状況、およびその評価結果についてご説明いただいた。

ギガフォトンの古巻氏には、SMO(Source Mask Optimization)時に laser 光源のスペckル形状も最適化パラメータにすることで、より cDOF(common Depth Of Focus)を拡大できることを示していただいた。

ポスターセッションでは、ニコンの大橋氏は TIAS(Two beam Interference Alignment Sensor)を用いた TIS (tool induced shift)に対するレンズの収差の影響を大幅に低減したアライメントシステム、ギガフォトンの寺尾氏からは、レーザーのパルス幅伸長、E95 可変、およびスペckル形状をプロセス改善のノブにする手法、ニコンの林氏からは高精細 FPD 向けの高透過率位相シフトマスクについて、それぞれ紹介していただいた。

口頭発表、ポスターセッション双方とも、参加者と活発な議論がなされた。

Resist Materials

本セッションでは、3件のレジスト関係、1件の DSA 関係、合計4件のオーラル発表があった。1 件目はキオクシアの笹尾典克からの発表で、高解像度化に伴うレジスト薄膜化に対応するためのメタルインフィルトレーション技術が紹介された。側鎖熱脱離での膜収縮が期待される Poly(*tert*-butyl methacrylate:PtBuMA) を採用し、Al 酸化物を膜中に含浸させた際の体積変化を極力抑え、かつドライエッチング耐性を評価したところ、PtBuMA-Al の方が PMMA-Al よりも耐性が高いことが示された。また、IR 分析の結果からそれぞれのポリマーと Al の間の会合状態が異なることが判明した。

2件目は富士フィルム株式会社の藤森亨氏からの発表で、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最新技術の紹介があった。ストカスティック課題を、従来から指摘されていた露光時フォトンショットノイズ起因のフォトンストカスティックと、レジスト塗布工程、露光後加熱工程、および現像工程でそれぞれ発生するレジスト材料膜内分布、膜内拡散と反応不均一性による分布、および現像工程での溶解分布からなるケミカルストカスティックに分析した。フォトンストカスティックに対しては EUV 光を効率良く吸収する原子導入した新規な材料により、LWR の 20%低減効果を確認した。ケミカルストカスティックに対してはレジスト膜中分布均一化のため「The novel functional materials」を導入し均一分散化に成功し、現像工程での溶解分布抑制のため Negative-tone Imaging(有機溶媒現像)が効果的であることを示した。

3件目は日本ゼオン株式会社の Yeh Sin Fu 氏(松本裕一氏代理)からの発表で、化学増幅系レジストよりもストカスティック欠陥起因となる潜在的なレジスト不均一性が排除される非化学増幅系の主査切断型レジスト開発の紹介があった。ZEPレジストの分子量、分子量分布、および有機現像液を変更し、感度および LWR への影響を調べた。

4件目は東京エレクトロン九州の村松誠氏からの発表で、誘導自己組織化(DSA)でも研究も多く、技術も確立されている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、そのプロセスマージンの拡大や欠陥軽減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 件のオンライン発表を通じて、活発な質疑応答が交わされた。

初めに、大阪大の齋藤氏から、モルフォ蝶ナノ構造に基づく新たな透過型光材料に関する発表が行われた。モルフォ蝶は、規則性で青色を作り、不規則性で他色(の干渉条件)を消す、巧妙な構造を有しており、光干渉なのに虹色でなくどこから見ても青いという異常な性質を有する。モルフォ蝶の特異な反射特性を透過に転用することで、明るく広角で、色が偏らずコンパクトの条件を満たす構造が発案され、天井側まで明るくなる採光窓や、各種照明に役立つ光拡散板などへの応用が行われている。また、透過型光材料(採光窓、ディフューザ)への応用も検討されており、採光窓だけでなく、照明への応用が期待されている。

続いて、NTT 先端集積デバイス研究所の宮田氏からは、ハイブリッド・ニューラルネットワークを利

用したナノインプリントプロセス及び材料のスマート設計についての発表が行われた。イメージセンサ、コンピューショナルカメラ、光通信デバイス、等、NTT 研究所のこれまでの研究を中心に、近年行われている光メタサーフェス技術の現状とそのイメージング応用、さらにナノインプリントリソグラフィ(Nanoimprint lithography: NIL)と産業用高屈折率樹脂を用いた大規模作製技術に向けた取り組みについて紹介された。

キオクシアの小林氏からは、NIL 設計制約の抽出と合わせ精度評価に関する検討結果が発表された。実験結果をシミュレーションで補間することにより、アライメントマークや段差基板上のレイアウトについての設計制約を抽出した。これらの制約を考慮した設計フローにより、歩留まりや生産性の向上を期待できる。また、アライメント信号を高める工夫により、SMO (Single Machine Overlay) で 2nm 以下の合わせ精度を実現できた。

DNP の市村氏からは、NIL が低消費電力のリソ技術であることが紹介された後、20nm 以下の微細ホールテンプレートの開発状況が報告された。解像性に優れる低感度の非化学増幅型 EB レジスト、マルチビーム EB 描画装置、石英加工用ハードマスクプロセスを適用し、18nm までの密ピッチホールアレイを形成した。Litho-Etch-Litho-Etch (LELE) で、テンプレート上のホール位置を 1nm 以下の精度で管理できることも示された。

キヤノンの保坂氏からは、同社の開発した NIL 装置 FPA-1200 NZ2C の状況が発表された。ウエハ外周ショットの補正ノブ追加等により、ArF 液浸との Cross Matched Machine Overlay (XMMO) を 2.3nm へ大きく改善した。また、インプリント雰囲気として CO₂ を用いることにより、充填時間を短縮し、スループットを向上できることも示された。

大阪公立大学の遠藤氏からは、ナノインプリント製フォトニック結晶と局在表面プラズモン共鳴ハイブリッド型 DNA センサの開発についての紹介が行われた。結晶構造パターン溝内に金ナノロッドを分散配置させた AuNR/PCS ハイブリッドセンサーを実現することによって一塩基多型 (single nucleotide polymorphism: SNP) の高感度センシングが実現されている。

東京理科大の谷口氏からは、酸素イオンビームの照射により荒れたグラッシーカーボン (Glassy Carbon: GC) 表面をモールドとして用いた紫外線ナノインプリントによるモスアイ構造フィルムの作製方法に関する報告があった。本研究では、これまで困難であった、GC 基板の大面積化手法として、ガラス板に GC 薄膜をスパッタで成膜し、その後、酸素イオンビームを照射しモスアイ構造を作製する方法が紹介された。

東北大学の中川氏からは、①レーザー加工孔版印刷や光ナノインプリントを併用した「Print and Imprint」法によるマイクロ/ナノパターン形成技術、②一桁ナノメートルオーダーの位置合わせを目指した、蛍光モアレアライメント法を用いたアライメント技術、③ ハイブリッド化レジストの開発、残膜制御 (約 20nm) 等、様々な研究課題についての研究成果が紹介された。

産総研の野村氏からは、複雑な形状を有する電子機器の筐体上でも配線が形成できるコンフォーマルパターンニング技術が報告された。シリコーンゴム転写体にスクリーン印刷されたインクを基材に転写する手法であるスクリーンオフセット印刷技術では、ゴムの柔軟性を利用することで、数 100 μ m 程度の段差に追従するコンフォーマルパターンニングが実正された。また、シリコーンゴム転写体上

のスクリーン印刷インクをゴムパッドに写し取り、さらにそこから最終基材に転写する手法であるスクリーンパッド印刷技術ではサブ cm の段差に追従する変形度の大きなコンフォーマル印刷が可能である。

産総研の鈴木氏からは、微小液滴を利用する光ナノインプリントにおける混合凝縮性ガス導入の影響に関して発表された。インクジェット塗布した微小液滴においても、凝縮性ガス雰囲気下では、ヘリウムガス下よりも高速の充填であることが検証された。

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5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野村春之氏が次世代のマルチビーム電子線描画装置 MBM-2000PLUS について発表された。新開発した高輝度電子銃による電流密度向上、ピクセルレベルで照射量を変調する PLDC 法やマスクの帯電制御法について示された。2番目はリガクの末永梨絵子氏が X 線小角散乱法を用いた深孔計測について発表された。深さ $4.2\ \mu\text{m}$ の深孔形状に対して X 線小角散乱を適応することで、深さに応じてホール径やホール形状が変化する様子を再構成できることを示された。3番目はフォトエレクトロンソウルの西谷智博氏が、高輝度かつ単色の新電子源である半導体フォトカソードについて発表された。ショットキー電子源と同等の輝度や 1300 時間以上の連続運転を示す結果や、ピクセル毎の電子線ドーズ制御により MOS トランジスタの電位コントラスト像を取得できる結果を示された。4番目は TASMIT の森泰平氏が、機械学習による SEM 画像のノイズ除去について発表された。SEM の電子線走査に起因するノイズ異方性を考慮したノイズ除去法を提案し、提案手法によりエッジ位置の相関係数が向上する結果を示された。

ポスターセッションでは日立製作所の寺尾奈浦氏より電子線検査装置を想定した大電流広視野条件でのウェハ帯電現象について、エリオニクスの永井佐利氏より高速電子線描画装置 ELS-BODEN について、サムスン日本研究所の日高康弘氏より新しい OCD 計測手法として自己干渉エリプソメトリを実験検証した結果について、ニューフレアテクノロジーの中山田憲昭氏よりマルチビーム描画装置におけるインラインマスクプロセス補正機能について、兵庫県立大の川上直哉氏より EUV 斜入射回折顕微鏡によるレジストパタンの欠陥検出について、それぞれご発表頂いた。

Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL)

本セッションでは 5 件のオーラル講演が行われた。

1 件目は、高エネ研 (KEK) 中村典雄氏より cERL を用いた EUV-FEL 概念実証の実現について報告された。背景として、EUV リソグラフィーで課題となるストカスティック効果 (stochastic effects) を改善し、高いスループットを実現するために kW 級の高出力 EUV 光源が必要であり、エネルギー回収リニアック (ERL) を用いた自由電子レーザー (FEL) を設計・研究し、1kW の EUV 光を同時に供給できる EUV-FEL 光源を提案しています。ERL 試験器 (cERL) を利用して概念実証 (proof of

concept) 実験を行い、世界で初めて FEL の発振に成功した。また高出力 IR-FEL 運転の実現に向けたダンブラインの改造や大電流運転の研究が紹介された。

2件目は、レーザーテックの幸山常仁氏より、Actinic のマスク検査装置 (APMI: ACTIS) の状況について紹介された。スルーペリクル検査が可能な唯一の検査装置であり、高解像性と高感度なマスク検査性能が実証されている。実際にペリクルを通して高い検査性能を実現している。DDB (Die to Data Base) において、ノイズの改善や S/N を向上し解析限界近い性能を実現している。また High NA 用としてマスク検査機として、露光倍率に応じた X-Y 方向の感度を調整・最適化する光学系の採用と高速化の目標性能が紹介された。

3件目は、東京エレクトロンの永原氏より、メタルレジスト、SiC アンダーレーヤー、新しい現像技術の ESPERT、ドライレジスト、原子層エッチングなど、EUV プロセスに関係した幅広い技術について紹介いただいた。メタルレジストは High-NA 世代でラインか Hole Pillar パタンを中心に導入される予定である。SiC のアンダーレーヤーは密着性が良く、エッチング耐性がよく、欠陥低減効果があることなどの報告であった。

4件目は、ギガフォトンの溝口氏より、KrF, ArF レーザーによる Direct Processing と、EUV 光源の開発状況の紹介があった。EUV 光源のランニングコストにおいては集光ミラーが 70% を占めており、さらなる長寿命化が求められている。現在は EUV 検査機用にも光源を開発しているとの紹介もあった。Direct Processing では固体レーザーと組み合わせ、直径 15 μm で深さ 500 μm の穴開けの加工も紹介された。

最後の5件目は、ESOL の B.G. Kim 氏より、高調波 EUV 光源を用いた EUV 検査装置について紹介いただいた。顕微鏡、位相測定、干渉露光によるパタン転写、ペリクル透過率の測定が可能である。ペリクルの透過率測定は、高次高調波だけでなく Xe ガスによる EUV 光源も利用可能である。干渉露光は 20 μm の領域すべてにパタンが作成可能であるが、何分も露光するため振動対策が重要であった。