

NGL ワークショップ 2023 報告

2023/9/1 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6、7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。コロナ禍の影響により、4年ぶりの現地開催となりました。314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22件で、ポスター発表は25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件発表いただいた。1件目は東京大学平本先生より、“先端ロジック半導体の技術動向と将来展望”について講演いただいた。ムーアの法則とトランジスタのテクノロジーノード、実際の回路パターンサイズを比較しながら、トランジスタのこれまでと将来展望について紹介いただいた。今後のトランジスタの構造は Gate All Around (GAA)であり、Samsung では現在の 3 nm ノードから GAA を採用している。TSMC では次世代の 2 nm ノードから GAA を採用する。テクノロジーノードは、昔はトランジスタ密度と相関があったが、現在ではずれが大きい。将来利用が開始されるスピンや、量子コンピューターでも CMOS がなくなるわけではなく、3D chiplet 等は CMOS の Game Changer となりうる。

2件目は大阪大学/NTSC、菅沼先生より”3Dパッケージ技術”について講演いただいた。アメリカの CHIPS でも実は全体の 1/3 程度の 25 億ドルはパッケージ技術への予算がついている。2018 年に TSMC が Chiplet の実用化に成功してから大きな変化が起こっている技術である。日本でも先週「中工程」という紹介記事がでており注目が高い。3D パッケージ技術として、シリコンインターポーザー、ハイブリッドボンディング、マイクロビアについて紹介いただいた。規格は UCIe という共通化が始まっており、デザインコストを規格化により下げる。日本では菅沼先生もチップレットコンソーシアムを 2022 年より始めている。

3件目は imec の Pieter Vanelderen 氏より、“EUV lithography transition from 0.33 to 0.55 NA – Challenges and Opportunities”としてオンライン講演いただいた。NA 0.33 でのマルチパターンニングは NA 0.55 ではシングルパターンとなる。この High NA の実現には、明視野マスク、ハーフフィールド、ペリクル、薄膜レジストなどが課題となる。各課題について説明いただき、特に薄膜レジストは BMET での露光結果を中心にメタルレジスト hp 9 nm の結果を紹介いただいた。パターン倒れの問題にはメタルのドライ現像や、東京エレクトロンの ESPERT の結果を示していただいた。

Optical Lithography & Advanced Patterning Technology

本セッションでは、4件の口頭発表と2件のポスター発表があった。各発表はスケーリング以外でのパターンニング性能向上に関する内容であり、マスクレス光リソ、レーザー光源、重ね合わせ精度向上施策と多岐にわたり、興味深いものとなった。今回は久しぶりの対面での発表ということもあり、口頭、ポスター発表ともに活発な議論が繰り広げられた。

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をご報告いただいた。デジタルスキャナーの特徴を活かした実露光例として、今回は、200mm wafer 全面に 180nm node の logic パターンをチップ毎個別 ID とともに露光した結果、および、200nmL/S の線幅での配線により wafer 全体を一つのチップと見なせる wafer scale integration substrate が示された。

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。レーザースペックルコントラストの理論式を示すとともに、レーザーパルス長を伸ばすことで理論式通りにスペックルコントラストが低減し、パターンニングにおける LER(Line Edge Roughness)および EPE(Edge Placement Error)が改善することを示された。

続いて、キヤノン、ニコン双方から、スタンドアローンアライメント計測器を使った重ね精度向上施策をそれぞれ紹介していただいた。

キヤノンの木島氏からは、新開発のスタンドアローンの wafer 計測器 "MS-001" が紹介された。アライメントマークをオフラインで多点計測し、位置誤差の高次成分を露光機でのアライメントに feed forward する FFA (Feed-Forward Alignment)を適用することで露光機のスループットを犠牲にすることなく、重ね合わせ精度を向上することが示された。

ニコンの安藤氏からは、スタンドアローン型アライメント計測装置 "LithoBooster" を使った OPO (On Product Overlay)の改善に関して、その実例が示された。Feed-forward 補正に加えて、feed-back 補正時に、1st layer の絶対位置誤差と 2nd layer の絶対位置誤差を直接補正することで、従来の重ね合わせ計測からの feedback 補正で発生する誤差の蓄積を排除できることを示していただいた。また、この手法は、高 NA EUV リソで課題となる stitching 誤差補正に効果的であることが言及された。

ポスターセッションでは、いずれもギガフォトンからご発表があり、竹田氏からは、サステイナブル社会に貢献するレーザーの電力消費量削減施策、Strock 氏からは深層学習を用いた、部品交換タイミングの最適化による、稼働向上施策がそれぞれ示された。

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の、2つの最新技術の紹介があった。一つ目は富士

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ことを示した。二つ目は、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を抑制するため、酸発生剤とクエンチャーを化学的に結合させた材料の紹介があった。

2件目は日産化学株式会社の柴山亘氏からの発表で、新規プライマー型レジストアンダーレイヤー (FSTP) 技術が紹介された。線幅 10nm 以下の微細パターン形成時ではレジストパターン形成後、下地の SOC やハードマスクに転写することが難しくなっている。本技術は従来のハードマスク上にスピコートで形成された 1 nm 程度の FSTP を導入し、EUV化学増幅型レジスト (CAR) およびメタルレジスト (MOR) の性能向上例を報告した。FSTP は 1nm 程度の厚さのため、レジスト膜と一体化し、FSTP 自身への転写は不要となる。

3件目は東洋合成工業株式会社の榎本智至氏からの発表で、従来のMORはネガ型レジストであるのに対し、新規なポジ型有機金属化学増幅レジストの材料コンセプトおよびEBリソグラフィによる原理検証実験結果の紹介があった。 EUV 吸収の高いスズとスルホニウム塩を含み、酸を活用して架橋反応を利用したネガ型メタルレジストのコンセプトを基本として、あらかじめ結合したポリマー鎖を酸により分解することで有機溶媒への溶解性が向上する有機溶媒現像ポジ型メタルレジストを設計した。EB リソグラフィの結果、 $380\mu\text{C}/\text{cm}^2$ で 22 nm HP のポジ型パターンが形成できた。

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、DSA による微細ホールパターンの形成とスケラビリティの報告があった。誘導自己組織化 (DSA) で研究も多く、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、半導体プロセス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 2 件、産業界 3 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、DNP の渡邊氏から、ナノインプリントリソグラフィ用テンプレートの開発状況として、主にデュアルダマシン用テンプレートの発表が行われた。マスターテンプレートを Litho-Etch-Litho-Etch (LELE) で製作するため、アライメント方法とマルチビーム EB 描画装置を改善し、1nm 以下の重ね合わせ精度を実現した。また、レプリカテンプレート製造プロセスの改善によって、HP20nm までのデュアルダマシン形状を、ピラー寸法を維持したまま、石英のテンプレート基板へ転写することができた。

続いて、キオクシアの竹内氏から、ナノインプリントとドライエッチングを用いたデュアルダマシン構造形成について発表が行われた。ドライエッチング中のマスク材料の膜減りや

線幅の変化を課題として挙げ、エッチング時間の短縮、テンプレート寸法の見直し、エッチングガス種の変更によって課題を改善した。結果として、ウエハ全面に渡って、線幅 4Xnm のデュアルダマシ構造を下地の SiO₂ 層に形成できた。

キヤノンの浅田氏からは、同社の開発した NIL 装置 FPA-1200 NZ2C の開発状況が発表された。NIL 特有の補正機構を用いることにより、ArF 液浸との Cross Matched Machine Overlay (XMMO) は 2.2nm、NIL に対する Single Machine Overlay (SMO) は 1.7nm へ改善した。また、NIL 装置の使い勝手を向上させるためのソフトウェアとして、Lithography Plus や NIL プロセスシミュレータについても説明された。

元産総研の法元氏からは、ナノインプリントを用いたナノ人工物メトリクス要素の試作とその個体認証精度の評価について説明が行われた。人工物メトリクスは人工物にランダムに生成された物理的特徴を用いて、該当人工物の認証を行うセキュリティ技術であり、人工物固有の物理的特徴が複製困難であることを根拠としている。本著者らの先行研究では、電子ビーム描画で作製した高アスペクトパターンランダム倒れ性を応用した人工物メトリクスが報告された。本発表では、高スループット化に向けたナノインプリント技術等の応用結果が説明された。

東北大の中川氏からは光ナノインプリント法での原子スケール精密アライメントのシミュレーションと応用について発表が行われた。本著者らの先行研究において、周期の異なる対となる配列体を重ね合わさずに 4 つの棒状配列体を独立配置し、棒状配列体の位相差を検出することで、原子スケールの誤差で位置合わせが可能となることをモデル画像解析によるシミュレーションで明らかになった。本発表では、前述の先行研究結果の概要と、実機で行った蛍光アライメントと散乱光アライメントの現状が紹介された。

産総研の中村氏からは、インプリント技術を用いた光電子コパッケージ用マイクロミラー作製について述べられた。PDMS レプリカモールドによる 3D ミラー形状の高精度転写に成功しており、今後、高スループットな光電子コパッケージ実装の開発を計画されている。

エリオニクスの永井氏からは、ナノインプリントモールド作製用超高スループット電子線描画装置が紹介された。本装置によると、8 インチ基板上全面に対してのパターン形成が数時間で終わる。また、ポイントビーム型であり、可変成形ビーム型 EB 装置に比べ、コストパフォーマンスが非常に優れている。

東工大の島田氏からは、ナノインプリントプロセスを用いたポリマー基板の金属ナノ粒子パターン形成技術についての紹介があった。自己組織的化モールドおよび多段階のナノインプリントプロセスを用いることにより、微小周期と、立体的な形状をもつ金属ナノ粒子周期パターンの転写することができることが実証された。

東北大の高野氏からはシリコンメタオプティクスに向けた酸素反応性イオンエッチングによるインプリントレジストマスクの狭小化について報告が行われた。ビスフェノール A を骨格とする光硬化インプリントレジストマスクを O₂ RIE で狭小化し、レジスト直径の減

少過程の追跡と調節可能な直径の幅を調べた結果、Si ナノ構造の直径を 330 nm から 150 nm まで調整可能であることが実証された。

東京理科大の榎本氏からは、銀インクとナノインプリント技術を用いたナノパターン転写についての発表があった。本技術では、銀インクを滴下した後、スピコートで銀インクの膜厚を調整し、熱することで溶媒を飛ばし、ツートーンにする。本技術により、線幅 250nm、ピッチ 500nm の L&S モールドを用いたツートーンの作製が実証された。

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6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相原一生氏が 2022 年 7 月にリリースされた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り電流密度を 2.5A/cm² から 3.2A/cm² へ向上した他、Placement error や Local CDU について改善した結果を示された。また、現在は次世代機 MBM-3000 を開発中であり 2024 年にリリース予定であることも述べられた。2 番目は日立ハイテクの酢谷拓路氏より、現在の半導体業界に対する計測ソリューションとしてレジスト薄膜化対応、3D 形状計測、大容量データ取得、OVL 計測が必要であり、それぞれに対して日立ハイテクが取り組む内容を紹介された。具体的にはレジスト薄膜化に対しては電子線の低加速化、3D 形状計測に対してはグレイレベルを活用した深さ計測、OVL 計測に対しては高加速電子線の利用、大容量計測に対しては機械学習による低フレーム画像の高画質化について紹介された。3 番目はニコンの蛭川茂氏が光学式検査装置 AMI-5700 による高速 CD 計測についてご発表された。ウェハ全面に光を照射し、回折された光をミラーでイメージセンサ上に投影する構成をとり、回折光の強度を CD 値に変換した。これにより、ウェハ面内 10 万点の CD 値を数分で計測できることを示された。4 番目は産総研の木津良祐氏が傾斜 AFM によるレジストシュリンク計測についてご発表された。ArF 用の CAR レジストについて電子線照射前後での 3D 形状を AFM 測定によって比較され、電子線照射によってレジスト高さが低くなる他、側壁の凸凹も電子線照射後に無くなる様子が示された。

ポスターセッションでは日立製作所の奥山裕氏より断面 SEM 画像における CD 計測に人物姿勢推定モデルを適用した結果について、リガクの末永梨絵子氏および伊藤義泰氏より透過型 CD-SAXS による深穴形状計測について、フォトエレクトロンソウルの西谷智博氏より電子線照射の変調機能を備えたフォトカソードにより MOSFET の電位コントラスト像を取得した結果について、日立製作所の佐々木剛志氏より CD-SEM で発生する計測エラーの原因特定に AI を用いた結果について、大日本印刷の仲田宏氏よりフォトマスクの製造プロセスに AI を適用した結果について、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6件のポスター発表が行われた。

1件目はASMLのBhattacharyya氏より、High NA EUV 露光機に至るまでの露光機の進歩について講演いただいた。世代が進むことでマルチパターンングからシングルパターンングが実現でき、行程は簡単になり欠陥も少なくなる。EUV 露光機では光源、露光光学系、ウェハステージ、マスクステージはそれぞれ別の場所から送られてきて、アSEMBリしている。露光光学系ではミラー3が交換可能であることが紹介された。また、質問において6×12インチマスクについても話題となった。

2件目はレーザーテックの轟氏より、EUVパターン検査機のAPMIについて紹介があった。APMIの商品名はACTISであり、2019年に発売している。すでにマスク検査装置として利用されているが、今回はDie to Databaseの効果についてと、ペリクルの熱負荷を考えた光源スペックについて議論があった。また、High NA EUV 露光機とCurvilinearに対応する新型ACTIS開発についても紹介があった。

3件目はDNPの吉川氏より、マスク描画用の化学増幅レジストについて報告があった。マスクは電子線にて描画されるが、電子線用のUltra High Resolution CARをレジストメーカーと開発している。感度は1/5となるが、マスク上17 nmのライン&スペースパターンへの描画に成功している。EUVマスクでも解像度向上にはアシストパターンが必要であり、メインパターン32 nmに対して、アシストパターンは20 nm以下となる。そのため、この様に20 nm以下の解像度を有するレジスト開発が重要となる。

4件目は東京エレクトロン永原氏より、High-NA EUV 露光機における化学増幅系レジストの利用について報告いただいた。次世代レジストとしてメタルレジストの開発が進んでいるが化学増幅レジストを使いたいという要望もある。感度のターゲットは30 mJ/cm²以下である。EUVマルチパターンング20 nmピッチと14 nmピッチの紹介があった。マスク用のトラック開発についても報告いただいた。

5件目は九州大学溝口氏よりEUV光源と、九州大学での取り組みを紹介いただいた。LPP光源ではスズドロップレットの80%は使われないため、レーザーの当て方を変えるとCE8%が実現できる可能性について紹介いただいた。スズの量は変化しないため、デブリの量は同じである。九州大学ではEUV I&T (Irradiation & Technology) センターを2026年に開設予定と紹介いただいた。