

NGL ワークショップ 2021 報告

2021/11/09 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8、9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。250 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 27 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 NTTドコモ 中村武宏氏より、「5G Evolution and 6G」と題して、5G 技術の紹介と 6G での新たな取り組みについて紹介いただいた。高速通信のため周波数が 300GHz と高速となり、建物内への電波の導入にナノインプリントで加工したメタマテリアル構造の透明板などの技術開発をしている。また、災害時や海上等の基地局を設置できない場合の通信を想定した成層圏ドローンでの通信技術などを紹介いただいた。2件目は Sony 岩元勇人氏より、「積層型 CMOS イメージセンサを進化させるプロセス技術」と題して、イメージセンサ開発について紹介いただいた。表面入射から、裏面入射、積層型 TSV、積層型接合と進化を続けるプロセス技術について紹介いただいた。この技術を応用した RGB 各色の積層センサや、赤外線用に InGaAs を貼り合わせなど開発中のイメージセンサについても紹介いただいた。3件目に imec の Kurt Ronse 氏より、「EUV Lithography at IMEC」と題して、imec での EUV リソグラフィの取り組みについて紹介いただいた。EUV とピッチ分割技術を組み合わせた 18 nm ピッチのダマシ構造のリソグラフィ結果や、NA0.55 の High-NA EUV リソグラフィなどを紹介いただいた。また、評価技術としてフェムト秒レーザーを用いた超高速評価技術について、EUV ペリクルは 600W 光源に対して1万ウエハをターゲットしていることなど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。最先端リソプロセスは EUV 露光機が実展開されつつあるが、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の開発状況とアプリケーションの可能性について紹介していただいた。開発中の露光機は、SLM(Spatial Light Modulator) 上に形成されたパターンを DUV 固体レーザー光源とした光学系で照明し、ウエハ上に縮小投影スキャン露光するもの。従来の光リソグラフィに対しマスクコストの低減を実現するだけでなく、1枚のウエハに異なる設計のチップを露光することができるので、特にプロセス開発の時間短縮、コスト削減が期

待できることが言及された。また、ウエハ上のチップ毎に QR コード等による ID を記録することが提案された。それぞれに対する、実露光結果も示された。

キヤノン和田氏からは、i 線半導体露光装置のパネルレベルパッケージ(PLP)露光への適用についてご発表いただいた。近年 **More than Moore** の手法の一つとしてファンアウトパッケージが注目され、後工程においても、パターンの微細化要求が加速しつつある。微細化とコスト要求を同時に満足するために i 線露光機をベースに PLP ハンドリングを可能にした世界初のサブミクロン解像のパネル露光装置を実現したとの報告であった。PLP 露光に対する技術課題とその解決策について議論された。

ギガフォンの宮本氏からは、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。EUV 露光機との MMO (Mix and Match Overlay)の要求精度を満たすためには ArF 液浸露光機によるパターンニングにおいて、LER(Line Edge Roughness)の低減が必要であり、その大きな要因となっている、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。

キオクシアの樋口氏には、メモリーセル領域設計への ILT(Inverse Lithography Technology)の適用についてご発表いただいた。シノプシス社と共同で種々設計ツールを効果的に使用し、実レベルの ILT 適用例と従来の OPC(Optical Proximity Correction)ツールに対する優位性が示された。

ポスターセッションでは、キヤノンの宝田氏はデータ解析と機械学習を使用した露光装置の生産性/性能向上、ギガフォンの藤井氏からは、レーザーのスペクトル形状をプロセス改善のノブにする手法、凸版印刷の松井氏からは高透過率位相シフトマスクを使った転写性および欠陥制御について、それぞれ紹介していただいた。オンライン開催の特徴を活かし、参加者と活発な議論がなされた。

Resist Materials

1 件目は王子ホールホールディングスの森田和代氏から新規主鎖切断型レジストの研究開発が紹介された。王子の持つ高度なヘミセルロース技術を次世代レジストに活用した材料開発である。主鎖切断型レジストは化学増幅、メタルレジストと並んで HighNAEUV リソグラフィ用の高解像度レジストとして期待されている。

2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。インフィルトレーション時のレジスト体積の増大が課題であったが、Poly(tert-butyl methacrylate) を用いることで体積変化を制御可能であることが示された。

3件目は大阪大学の古澤孝弘先生から機械学習による化学増幅型 EUV レジストのストカスティック効果の研究という題で講演が行われた。化学増幅型レジストの解像度、LER、感度のトレードオフの最適化および 10 nm 以下の微細加工時のピンチングやブリッジングのような確率的欠陥予測のための化学勾配と各種欠陥指標のシミュレーション及び機械学習による回帰分析を行い、その実現可能性について検討した結果が報告された。

4 件目は 東京エレクトロン九州の村松誠氏から誘導自己組織化(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 30 nm ピッチのラインアンドスペースの DSA パターンの形成し、それをベースにした 15 nm ピッチパターンの SCAD(Self-Aligned Double Patterning)プロセスによる達成とその最適化作業中の特に重要な工程に関しても報告された。

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 6 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、東北大の中川氏から、フェムト秒レーザーの単パルスによるクロム堆積インプリント樹脂パターンのドライ現像技術が紹介された。架橋剤を含有した光ナノインプリント用樹脂は、光硬化により溶剤に不溶となるため、金属パターンの成形には犠牲層を用いた光硬化樹脂の lift-off 等が必要になる。また、溶媒に可溶な犠牲層の選定およびパターンの疎密による現像時間の精密制御が必要となる。本発表で紹介されたプロセスは、残膜を除去した光インプリント樹脂パターン上に金属膜を堆積し、フェムト秒レーザーからのシングルパルス照射により光硬化樹脂を極短時間でドライ現像する金属パターンの高速形成手法であり、別途の犠牲層を用いた Lift-off プロセス等、複雑なプロセスを必要としない。本技術により、線幅 100nm 以下の Cr パターンの作製が可能であることが報告された。

続いて、大阪府立大の平井氏からは、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紹介された。ディープラーニングは、リソグラフィ分野において近接効果正やホットスポット予測などに活用されているが、ナノインプリントへの適用例はまだ少ない。成形実験データや解析データを学習システムに学習させ、これらの学習結果を互いに補完することにより、多様なプロセス、材料、形状条件下での成型結果を予測するハイブリッドシステムが構築された。本研究で得られた結果の実験検証結果との誤差は 0.05 であることから、システムの信頼性が確認された。最終的にはこのシステムにより、必要最小限の学習実験により、プロセス条件やモールドの形状条件を変化させたとき結果の予測や、その逆問題にも対応できるようになる。

キオクシアの福原氏からは、NIL のインプリント領域を拡大することによって、スループットを向上する取り組みが発表された。2つの露光領域を1回のインプリントでパターンニングすることに加えて、複数のインプリント領域にレジストを一括して塗布する工程やガス透過性の高い Spin on carbon (SOC) 材料の採用によって、4 ヘッドで 160wph のスループットを実現できる。また、現状の重ね合わせ精度は 7nm であり、テンプレートの補正や押印動作の制御によって、近い将来に 3nm まで改善する見通しであることが示された。

DNP の市村氏からは、冒頭で NIL がカーボンニュートラルの観点で期待されるパターンニング方法であることが示された後、NIL テンプレートの開発状況が報告された。デュアルダマシン用の 3D テンプレート製造方法において、マルチ EB 描画装置と新しいアライメント方法によって、ビアとトレ

ンチの重ね合わせ精度を 1nm 未満に抑えることができた。この 3D テンプレートを用いることによって、1 回のインプリントでデュアルダマシン構造をウエハ上に形成することができる。また、20nm 未満の微細ホールパターンをターゲットとして、Litho-Etch-Litho-Etch (LELE) プロセスでテンプレートを作製するための検討を行い、テンプレート上のパターン位置を 1.5nm の精度で管理できることが示された。

キヤノンの須崎氏からは、同社の開発した NIL 装置の状況が発表された。FPA-1200 NZ2C において、ArF 液浸との Cross Matched Machine Overlay (XMMO) で 3.3nm の重ね合わせ精度を 1 ヶ月半の間安定して達成した。また、インプリント時の押印力、マスク対ウエハの相対チップ/チルト、ウエハ端部付近のウエハ吸着圧力を制御することにより、更なるディストーション補正が可能なことを示した。これにより、XMMO を 2.8nm にまで改善し、次のデバイスターゲットである DRAM に要求される 3nm 以下の重ね合わせ精度を達成できる見通しを得た。

九州大学の津守氏からは、ナノ粉末と樹脂の混合材を用いた多層インプリントプロセスが報告された。また、ナノパターンが表面に形成されているマイクロパターンをエラストマーモールドを用いた面内圧縮インプリントにより一回の成形で作製する手法が紹介された。関西大学の越智氏からは、Polydimethylsiloxane (PDMS) モールドを用いた光ナノインプリントによる接着力に優れたヤモリの足裏を模倣した微細パターン構造の作製例が報告された。また、PDMS モールドを使用する場合においても、凝縮性ガス (Pentafluoropropane, PFP) 雰囲気中で成形を行うことによりパターン先端部への充填性が改善され、空気中に比べてより微細なパターンが作製できることが示された。東京理科大の古田氏からは、ナノインプリントと金属蒸着や金属ペースト埋め込み手法等を併用した積層金属パターン基板や貫通電極パターン基板の作製が報告された (金属材料: 金、銀)。産総研の栗原氏からは、射出成型を応用した反射防止と防曇性のハイブリッド表面特性を有する樹脂プレートナノパターンの作成例が紹介された。東北大からは 2 件のポスター発表が行われ、先ず、千葉氏からは、X線反射率の測定によるアルミナドープ光硬化樹脂薄膜の内部構造解析結果が、続いて、宮島氏からはインプリント樹脂マスクを用いたアルミナの領域選択的な原子層堆積手法が発表された。

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松本裕史氏より、N3 世代に向けて開発されたマルチビーム方式の電子ビーム描画装置 MBM-2000 について概要説明と、ピクセルレベルで照射量を変調する PLDC 法等の補正機能の紹介、描画結果の一例が示された。2 番目は大阪工業大学の小寺正敏先生がレジストへの電子線照射によって生じる帯電現象について発表された。発表では特定の露光量においてレジストが無帯電状態となることや、帯電状態の空間分布および時間的な変動について議論された。3 番目はリガクの伊藤義泰氏より X 線小角散乱法を用いた深孔計測について発表があった。深さ 1.2 μm の深孔形状に対して X 線小角散乱を適応することで、ボーイングやネッキング形状を高精度に再構成できることを示された。4 番目は産業技術総合研究所の木津良祐

先生より、探針を傾斜させた AFM によりラインエッジラフネスを高精度に計測する研究内容が発表された。発表では SEM 起因のノイズ(バイアス)を除去した LER 計測結果と探針傾斜 AFM で計測した LER 計測結果が一致し、AFM の結果がリファレンスとして適応できることを示された。

ポスターセッションではエリオニクスの永井佐利氏より大面積偏向型超高速電子ビーム描画装置について、日立ハイテクの近藤豪氏より Stochastic 欠陥の高速多点検査計測について、TASMIT の岡本陽介氏より機械学習を用いた SEM 画像のエッジ抽出について、ニューフレアテクノロジーの杉森忠之氏より EUV のマスク検査向けに開発したマルチビーム SEM について、兵庫県立大学の川上直哉氏より EUV 斜入射コヒーレントスキヤトロメトリー顕微鏡について、それぞれご発表頂いた。

Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL)

本セッションでは 6 件のオーラル講演が行われた。

1 件目は、ASML ジャパン 森崎健史氏より EUV 露光機の量産状況とロードマップが紹介された。露光機の製作・導入は急激に増加をしており、今年中に累計で 100 台に達する状況。NXE3400C は、5nm ノードの要求を満たす性能で、コレクターミラーの寿命も<0.05%に改善している、光源の改善も進んでおり、Availability は、目標の 90%に達していないが、80%を超えた性能。次のモデルである NXE3600C は、投影光学系の収差改善で、Imaging と Overlay 性能の改善を実現している。またスループットも 18%以上改善する計画。High NA 露光機 (EXE5000 シリーズ) は、2022 年 2H よりイメージング開始で、2024 年に量産の計画。

2件目は、レーザーテックの宮井博基氏より、Actinic のマスク検査装置 (APMI: ACTIS) の状況について紹介された。スルーベリカル検査が可能な唯一の検査装置であり、マスク検査用とファブでの適用が可能となる。DDB (Die to Data Base)による高感度検査も実現している。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・最適化する光学系を開発している状況が紹介された。

3件目は、大日本印刷の吉川真吾氏より、EUV マスクの開発状況が紹介された。5nm ノード向けのマスク開発を進め、マルチビーム描画機を用い、HM (ハードマスク)と低感度レジストを採用し、L/S パターンで 30nm 以下、Hole パターンで 40nm 以下の目標する解像性性能を達成した。ホールパターンの Local CDU が課題であるが、対策のために Hole 形状を Circle にする検討を行い改善を実現できている。今後の課題となるのは、パターン計測、転写欠陥、High NA のプロセス、コストであるとし、関係機関と協力して進めていくと述べていました。

4件目は、東京エレクトロンの園田明弘氏よりプロセス技術について報告いただいた。Defect Free window のベースラインを下げる取り組みとして、レジスト膜厚を厚くしエッチング条件やリンス条件を最適化している。その結果、エッチング後の欠陥 (AED) を減らし、Defect Free window を広くできた。また、メタルレジストのコンタミ制御に関するプロセスの最適化についても紹介された。

5件目はギガフォンの溝口計氏より開発中の EUV 光源について報告いただいた。現在の出力は 365W でこの場合の変換効率は 5.4%である。270W の条件では1週間程度の安定動作も実現で

きている。また、High-NA 装置で必要となる 800W 光源に関する取り組みについても紹介いただいた。

6件目は高エネ研の中村典雄先生より EUV の自由電子レーザー (FEL) 開発について報告いただいた。エネルギーを再利用可能な ERL 型 FEL である。当初目標の出力は 10kW であったが、半導体の世代が進むと不足してくる。出力向上の取り組みとしてアンジュレーター磁場のテーパ化などについて紹介いただいた。