

4. [ONSA 賞受賞講演]

放射光を利用したレジストの開発に関する研究

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所

渡邊 健夫

2020年には10nm幅半導体配線パターン形成が要求されている。半導体用リソグラフィ技術では、形成する線幅と同等程度の露光波長が必要であり、13.5nmの極端紫外光を用いた極端紫外線リソグラフィ(EUVL)技術が最も期待されている。このため、我々はニュースバル放射光施設を用いてEUVL技術開発を進めており、この開発の状況と課題について報告する。

放射光を利用したレジストの開発に関する研究

公立大学法人 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所
極端紫外線リソグラフィ研究開発センター
渡邊健夫

1. はじめに

Internet of Things (IoT) や Information Technology (IT) 産業の発展を支えているのは、メモリ、MPU、センサ等の半導体デバイスである。これは、半導体微細加工の技術向上のお蔭である。半導体微細加工技術は、リソグラフィ技術およびエッチング技術を総称して表現されることが多い。次世代の半導体デバイスの開発に不可欠なのが半導体微細加工技術であり、特にリソグラフィ技術の進展が重要である。

リソグラフィ技術は、半導体回路の原版を、露光光学系を通して、シリコンウェハ上の感光性材料であるレジストに転写する技術である。過去の経験から、リソグラフィが量産技術として用いられるためには、1) バルク基板を有するマスク、2) 縮小光学系、並びに 3) 数世代に亘って使用できるものでなければならない。

一般的に 解像限界は露光波長により決まり、露光波長の半分である。縮小露光の場合には、レジストの解像度 R は、露光光学系のウェハへの開口数を NA 、露光波長を λ とすると、 $R = k_1 \times \lambda / NA$ で表記できる。したがって、解像度を向上するには、露光波長 λ を短くし、開口数を大きくすることが求められる。また、変形照明や位相シフトマスクの導入等の超解像技術によりプロセス定数 k_1 値を小さくすることで微細加工を実現してきた。

半導体国際ロードマップによると、2020 年には 10 nm の微細加工が、さらに 2025 年には 7 nm の微細加工が要求されている。この中で、極端紫外線リソグラフィ (EUVL) 技術[1]が要求されている。

現在、EUVL の技術課題は、1) EUV 光源開発、2) EUV レジスト開発、並びに 3) 無欠陥 EUV マスクの開発である。EUV レジストの課題は、高解像、高感度、低 line edge roughness (LER)、低アウトガスを有する EUV レジストの開発である。

講演では、放射光を用いて進めてきた EUV レジスト開発について紹介するとともに、今後の展望についても解説する。

現在、図 1 に示すように、兵庫県立大学のニュースバル放射光施設では合計 9 本ビームラインが稼働している。兵庫県立大学は、放射光を用いた EUVL 実証研究を 1995 年から行っている。現在は図 1 に示すとおり EUVL 実証研究を目的に 3 本のビームラインを用いて研究を進めている。

これまで、兵庫県立大学では 1996 年から日立製作所中央研究所、ニコンとの共同研究で大面積露光が可能な EUVL 用露光装置の開発を進めた[2-7]。1998 年から EUVL 研究の国家プロジェクトである ASET との共同研究がスタートし、開発した露光装置を用いてレジスト評価を進め、2001 年には世界で初めて静止露光で 40 nm のパターンを形成し、さらにマスクとウェハを同期走査することで 10 mm×10 mm の大面積で 60 nm のパターン形成に成功した[8-11]。この成果は、現在の ASML 社 量産機 NXE-3300B の開発に至っている。兵庫県立大学では、現在、

1) EUV 集光ミラー用大型ミラーの反射率計の開発、2) 低LER を目的とした酸発生剤内包型 EUV レジスト開発、3) sub-10 nm の EUV レジスト評価用 EUV 干渉露光系の開発、4) in-situ エリプメトリによる高パワーEUV レジストコンタミ評価装置の開発、5) 軟 X 線吸収分光法を用いた EUV レジストの反応解析法の開発、並びに 6) EUV 顕微鏡・コヒーレントスキャトロメトリ顕微鏡によるマスク欠陥検査技術開発を進めてきた。

Center for EUV Lithography

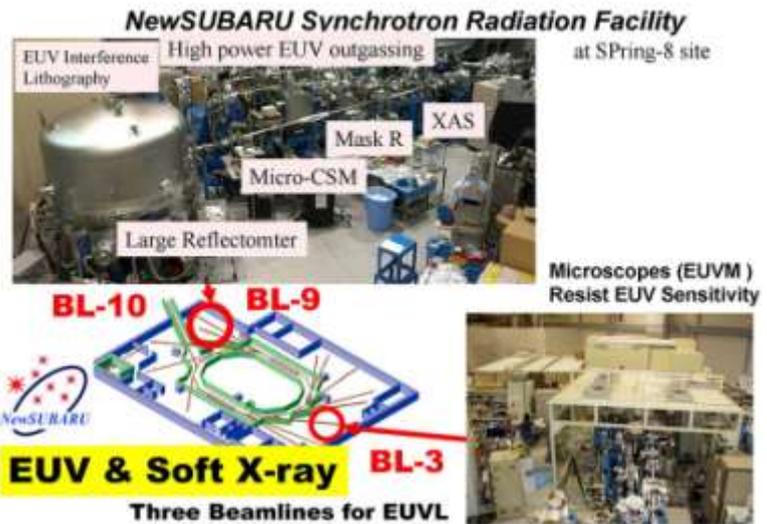


図1 ニュースバル放射光施設の EUVL 用ビームライン。

今回は、これらの技術の中でレジストに関する技術開発について紹介する。

2. 酸発生材内包型レジスト

レジストに要求される露光波長に対する透過率は、60%~70%以上が要求される。この観点から、図2に示すように、365 nm、248 nm、193 nm の露光波長では、それぞれ novolak 系、poly(p-hydroxystyrene) 系、poly(meth)acrylate 系というように、露光波長に依存して特定の材料が用いられてきた。EUV 露光は 13.5 nm の露光波長を用いる。このため、従来のレジスト材料を用いることが可能であり、従来の光リソグラフィのように材料が限定されない。この意味では、EUV リソグラフィは、前述した EUV レジストの課題を解決するための材料選択の幅が、従来のリソグラフィ技術に比べて最も広い特徴を有する。

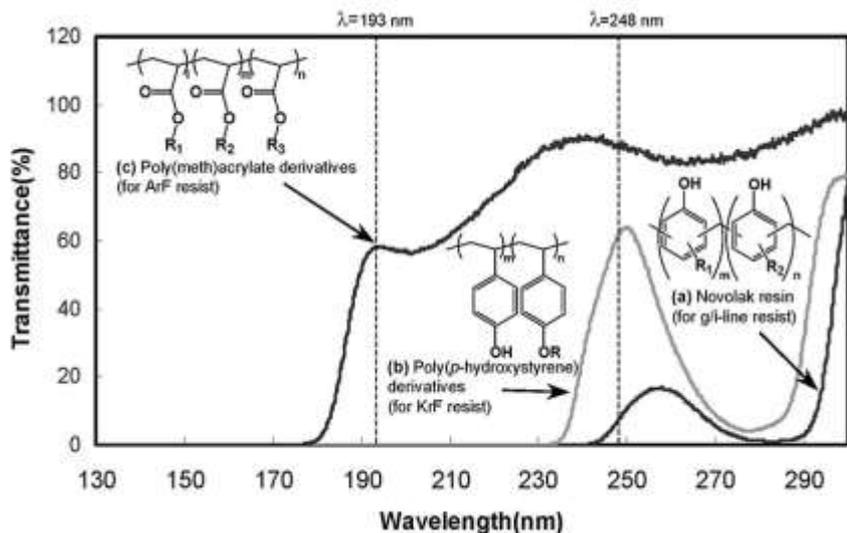


図2 レジスト材料の変遷。

一般的に、レジストの組成物は、レジスト基材であるベースレジン、これに付加された極性変換基、並びに感光剤で構成される。レジストの種類は、大きく2つに分けると、光を照射することで光照射領域が現像液に溶解するポジ型レジストと、光照射領域が架橋して現像液に溶解しないで残るネガ型レジストがある。さらに、レジストの反応で分類すると、一光子一反応の非化学増幅系と、酸を触媒とする化学増幅系レジストがある。

非化学増幅系レジストで代表的なものは、PMMA、ZEP520 のような主鎖切断型レジスト、並

びにノボラック樹脂ナフトキノンジアジド系のレジストである。一方、化学増幅系レジストは、感光剤として照射により酸が発生する光酸発生剤を用いている。

化学増幅系レジストは、一般的に非化学増幅系レジストと比べて、高解像、高解像を有する。一方で、酸の熱拡散による逐次反応を利用して、現像液に対する極性変換を起こすことで、レジストパターン形成が可能になるので、一般的に非化学増幅系に比べて、LER が大きい。このため、化学増幅系レジストでは、LER の低減が課題であった。

レジスト溶液は、一般的に酸発生剤、ベースポリマー、アミン添加剤を溶媒に溶解させて作成する。このレジスト溶液をウェハ上にスポイトで垂らして、スピコート、prebake を施すことで、シリコンウェハ上にレジスト膜を形成する。この場合、酸発生剤の濃度は、ウェハの厚み方向で基板に近い方が表面に比べて高く、ウェハの径方向では外側は内側に比べて高い傾向を示している。

そこで、我々は、酸発生剤をベースポリマーの側鎖に直接合成する酸発生剤内包型レジストを提案した。後にこれらのレジストは、酸発生剤内包型レジスト (PAG Bounded Polymer) と

名付けられた。これに対して、従来のレジストは PAG Blended Resist と名付けられた。図 3 にこれらのレジストの概念図を示す。酸発生剤内包型レジストでは、従来レジストに比べて酸発生剤の濃度分布を均一できる。

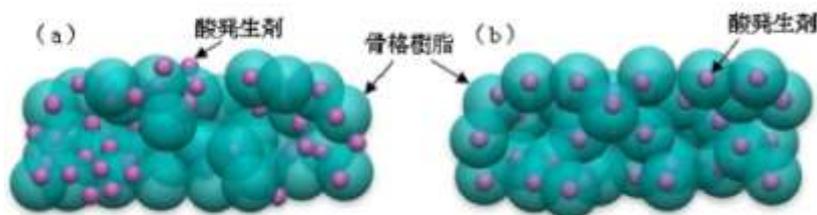


図 3 (a)従来の化学増幅系レジスト、(b)酸発生剤内包型レジスト。

PAG Bounded Resist は EB や EUV 用に最初の米国の大学から提唱されたが、LER の有効性が確認できなかった。これ

に対して、我々は独自に PAG Bounded Polymer の開発を進め、電子線露光により評価した結果、LER の低減に加え、感度も向上することができた[12-15]。従来の化学増幅系レジストの露光結果および酸発生剤内包型レジストの露光結果をそれぞれ図 4(a)と図 4(b)に示す。この結果から、従来レジストに比べて、LER の改善が可能となった。

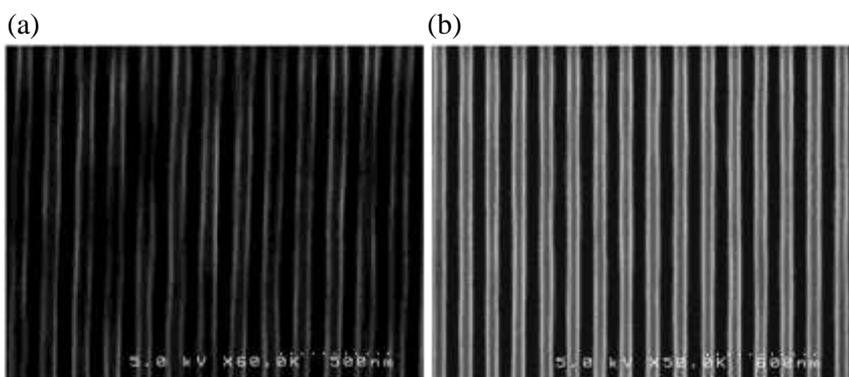


図 4 (a)従来の化学増幅系レジスト、(b)酸発生剤内包型レジストの露光結果。

3. アウトガス評価

EUV 光は物質への吸収が大きく、一般的にレジストに EUV 光を照射するとハイドロ系カーボンが生成され、これに起因して反射型マスクや露光光学系ミラー表面にカーボン系のコンタミネーション (コンタミ) が付着する。この結果、反射率が低下してスループット低下を招くことがある。そこで、レジストからのアウトガスの低減を実現することを目的に、2001

年から EUV レジストからのアウトガスを感度よく高精度で測定できるレジスト評価装置を構築し、種々のレジストからのアウトガス評価を開始した[16, 17]。この評価装置は、ASML の実機での波長と分散が同等となるように Mo/Si 多層膜ミラー7 回反射系としたことを特徴とする[18]。この装置は国内外の数多くのレジストメカおよび材料メカが活用した結果、EUV レジスト開発に貢献してきた。さらに、2006 年からは ASET 後継の国家プロジェクト Selete[19, 20]、ならびに 2011 年からは同じく EIDEC の要請により、実機に近い EUV 光パワーでのレジストアウトガス評価およびカーボンコンタミの膜厚評価を依頼され、新たにアンジュレータビームライン BL-9C に評価装置を構築した[21-26]。この装置を図 5 に示す。この装置は、実露光機と同等の EUV 光照射により、各種 EUV レジストのアウトガスを四重極質量分析器 (QMS) を用いて測定ができると同時に、この発生したガス付着する witness の Mo/Si 多層膜に付着するコンタミ膜厚が in-situ の可視領域の分光エリプソメータで評価できる機能を有する。これまで兵庫県立大学と EIDEC は国内レジスト 4 社と本装置を用いたレジスト開発を進めてきた。このニュースバルに設置した EUV 光によるレジストのアウトガス評価装置は世界標準の装置として位置付けられている。この装置を用いて各種 EUV レジストのアウトガスとコンタミの関係を調べた。

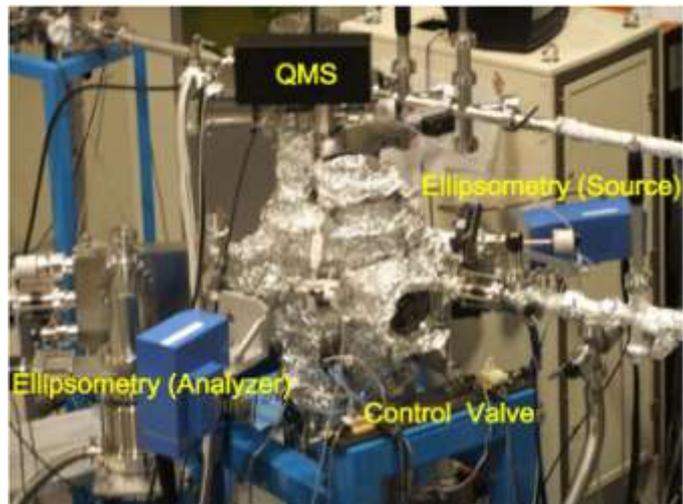


図 5 EUV 光による世界で最初のレジストのアウトガスおよびコンタミ評価装置。

4. EUV 光による二光束および四光束干渉露光

レジストの解像性や LER は、マスクや露光光学系の収差やフレアの影響を受ける。そこで、マスクや露光光学系を用いない EUV 干渉露光系を構築した。EUV 干渉露光は、マスクや光学系を用いないため、収差やフレアの影響を受けない。このためレジスト材料そのものの解像性や LER の評価が可能になる[27-33]。兵庫県立大学では、EUV 光による二光束および四光束の干渉露光系の開発を進めてきた。図 6 に二光束干渉露光の原理を示す。1つの回折格子の-1 次回折光ともう一つの回折格子の+1 次回折光が干渉し合う位置で、回折格子のピッチの半分のピッチの明暗の干渉縞が形成される。この関係は露光波長に依存しない。干渉する位置でレジストを感光させると、干渉縞に従ってレジストが

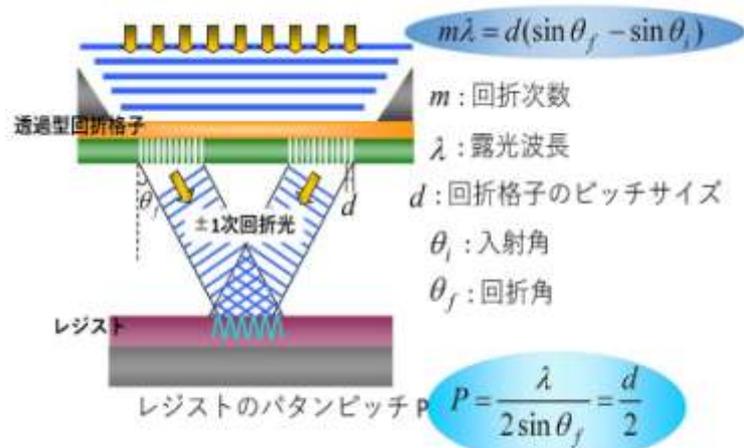


図 6 EUV 光による二光束干渉露光系の原理。

感光し、透過型回折格子のピッチの半分の大きさを有するレジストのライン・アンド・スペース (L/S) パターンが形成できる。例えば、二光束干渉露光を用いた 10 nm L/S のレジストパターン形成では、20 nm の L/S を有する二つの窓を有する透過型回折格子を用いる。さらに、四光束干渉露光では、4 つの窓を有する透過型回折格子を用いる。この場合にはレジストのホールパターン寸法は、透過型回折格子のピッチの $\sqrt{2}/2$ 倍である。

特筆すべきは、レジスト面上の光コントラストは、吸収体の材料と膜厚で回折効率が決まるため、これらのパラメータを透過型回折格子の製作に反映させることで、理想的な光コントラストから実際の露光機に近い光コントラストまで自在に設定可能である。

干渉露光系の設置は、ニュースバル放射光施設の 10.8 m 長のアンジュレータを光源とするビームライン BL9C で進めた。

透過型回折格子は、厚み 100 nm の SiN のメンブレン上に、TaN の回折格子の L/S パターンを形成している。透過型回折格子の製作プロセスを図 7 に示す。このプロセス [28, 31] は、1) 透過型回折格子の基板としてシリコン基板上に低応力の SiN 基板を用いる。2) この基板の上に TaN および SiO₂ を製膜する。3) この上にレジストを塗布する。4) 電子線露光を施し、L/S パターンを形成する。5)

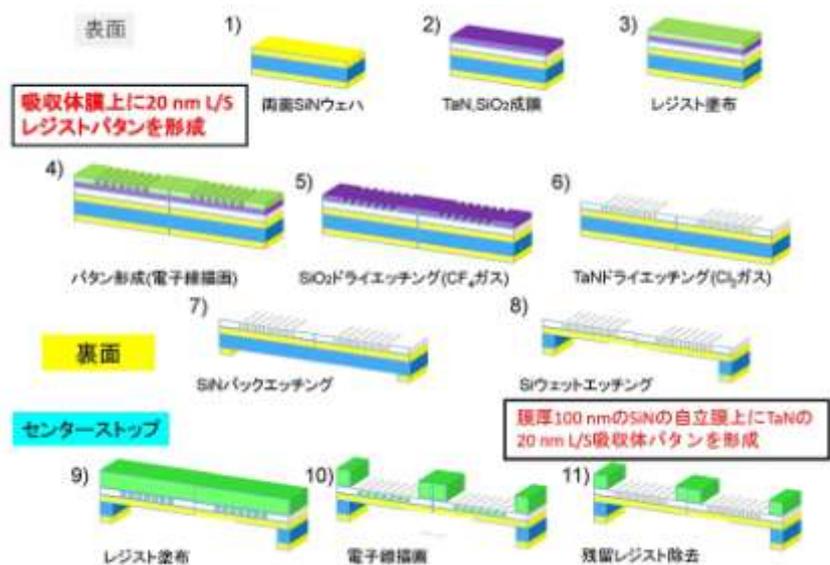


図 7 透過型回折格子の製作プロセス。

このレジストをマスクに CF₄ ガスを用いて、SiO₂ のドライエッチングを施す。6) この SiO₂ をハードマスクにして Cl₂ ガスにより TaN のドライエッチングを施し、回折格子の TaN の L/S パターンを形成する。7) 裏面の SiN のドライエッチングを施す。8) これをマスクに KOH の水溶液を用いてシリコン基板の裏面のエッチングを施し、TaN の回折格子パターンを有する SiN のメンブレンを形成する。9) 0 次回折光を完全に遮光することを目的に、2 μm 程度の膜厚でレジストを塗布する。10) レジストパターンを電子線露光で形

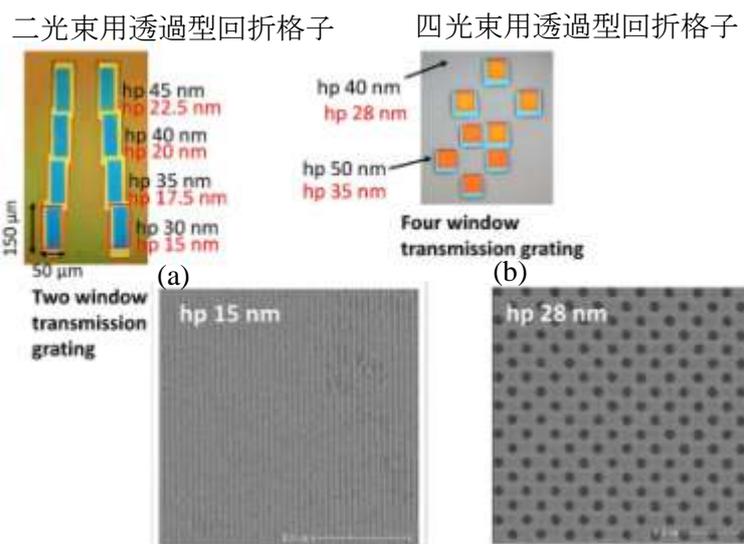


図 8 干渉露光に用いた透過型回折格子と、これにより形成した(a) 15 nm L/S レジストパターンと(b) 28 nm ホールのレジストパターン。

成し、11)透過型回折格子の製作が完了する。

これまでに、透過型回折格子のパターン設計の最適化および透過型回折格子とレジストサンプル間の振動の低減を進めた結果、図 8(a)と図 8(b)に示すように、それぞれ 30 nm L/S パターンを有する透過型回折格子により 15 nm L/S のレジストパターン形成を、また、40 nm L/S パターンを有する透過型回折格子により 28 nm 径のホールパターン形成した[32]。また、既に 25 nm L/S パターンを有する透過型回折格子を完成しており[33]、現在は 10 nm のレジスト評価が可能な 20 nm L/S パターンを有する透過型回折格子の開発を進めている。干渉露光法では、原理的に 13.5 nm の EUV 光を用いると、4 nm の線幅を有するレジストパターン形成まで可能である。

5. 軟 X 線吸収分光法による EUV レジストの反応解析手法

EUV リソグラフィを用いた製造コストを低減するには、リソグラフィのスループットの向上を実現する必要がある。このため、EUV 光源強度の向上と共に高感度レジストの開発が必要となる[34]。

そこで、化学増幅系レジストの EUV 光による光化学反応を軟 X 線吸収分光法の一つである全電子収量法を用いて調べた。図 9 に示すように、試料にある原子の 1s 核の占有軌道の電子エネルギーに相当する X 線を照射すると、この占有軌道の電子は非占有軌道に叩き出され光電子となり原子から離れ、イオン化される。このとき試料をアースに落としておくと電子が占有軌道へと流れるので、このドレイン電流を測定することができる。吸収の強さはこのドレイン電流に比例する。露光等の何らかの要因で結合状態

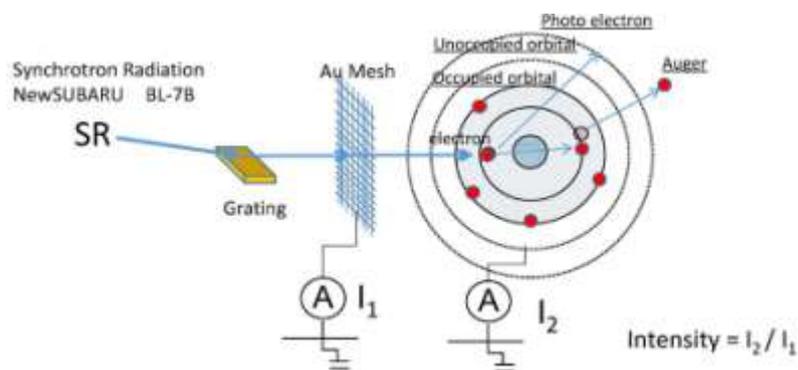


図 9 干渉露光に用いた透過型回折格子と、これにより形成した(a) 15 nm L/S レジストパターンと(b) 28 nm ホールのレジストパターン。

が変化すると、占有軌道の電子エネルギーが変化するので、吸収される X 線のエネルギーが変化する。このため、吸収エネルギーのシフト量を測ることで結合状態の変化を読み取ることができる。

我々はこれまで全電子収量法により、種々の化学増幅系レジストの酸発生剤について反応解析を進めてきた。ここではモデルレジストを例に反応解析の結果を紹介する。モデルレジストのベースポリマーに polyhydroxy styrene と tertial butylacrylate との共重合体ポリマーを、レジスト A と B では酸発生剤にそれぞれ triphenyl imidate と triphenyl sulfonium nonaflate とを用いた。ポジ型レジストの場合、露光後の現像によりレジストの膜厚が無くなるときの最小の露光量（即ち E_0 は感度）は、KrF 露光と電子線露光では殆ど一致した。これに対して、EUV 光露光では、レジスト A の方がレジスト B に比べて感度は 4 倍程度高い結果であった[34]。

これまでに高感度レジスト開発を目的に種々の方法で EUV 光によるレジストの反応解析を進めてきたが、軟 X 線による吸収分光法による反応解析が最も有効であることを見出した。光電子収量法を用いることで、50 nm 程度のレジストの膜厚で十分なドレイン電流が検出で

きている。これまで化学増幅系レジストの酸発生剤の分解反応はフーリエ変換赤外分光法 (FT-IR) では検出が困難であったが、全電子収量法を用いることで、ベースポリマーに対して 10 wt%程度の量の酸発生剤の分解反応を検出可能であることを見出した[35, 36]。この全電子収量法により、酸発生剤のアニオン部のフッ素の 1s 軌道の吸収スペクトルを調べた結果、図 10 に示すとおりイオン化反応に加えて、アニオン部のフッ素の分解のし易さが感度の違いに起因した励起反応により酸発生剤から複数の酸が生成していることが分かった[35-38]。

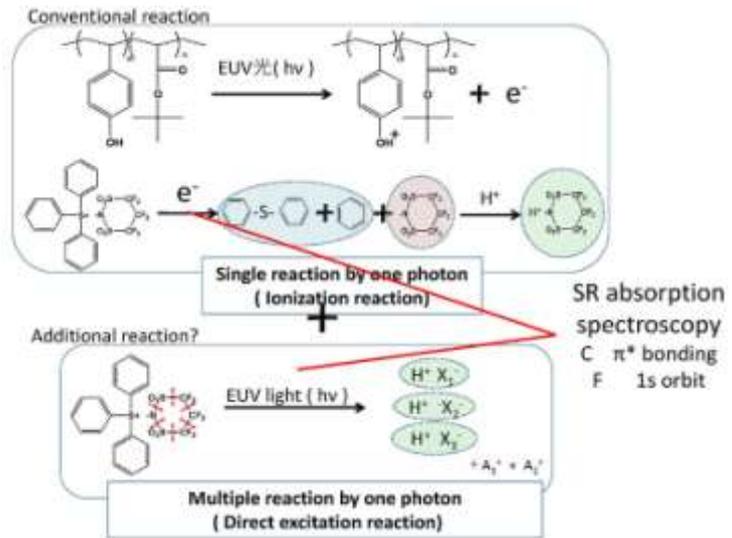


図 10 干渉露光に用いた透過型回折格子と、これにより形成した(a) 15 nm L/S レジストパターンと(b) 28 nm ホールのレジストパターン。

さらに、文科省の放射光プラットフォーム形成事業により、ニュースバルの BL7B よりも高精度に EUV レジストの反応解析ができるように BL10 ビームラインを整備した。この結果、従来より高い S/N 比でフッ素の吸収スペクトルの測定が可能となった[39]。

現在、高感度レジストの一つの候補として、金属を含有したナノ粒子レジストが提案されている。しかしながら、反応のメカニズムが未だ解明されていない。この全電子収量法を用いることで、これらのレジストの反応解析も可能であると期待されており、兵庫県立大学でこれらのレジストについても反応解析を進め、高感度 EUV レジストの開発を促進する。

6. EUV レジストの透過率測定

高感度レジストを実現するには、レジスト材料の EUV 光による透過率を小さくすることで EUV 光の吸収を増やし高感度を実現する必要がある。そこで、ニュースバル放射光施設の BL10 ビームラインに既設の多層膜の反射率計を用いて、EUV レジストの透過率を高精度に測定できる新たな透過率測定手法を開発した。

図 11 に示すように、従来の EUV レジストの透過率測定では、100 nm の膜厚を有する SiN メンブレン上にレジストを塗布し、レジストの透過率を測定してい

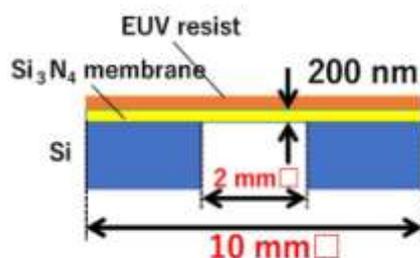


図 11 SiN メンブレンの Si 基板の断面構造図。

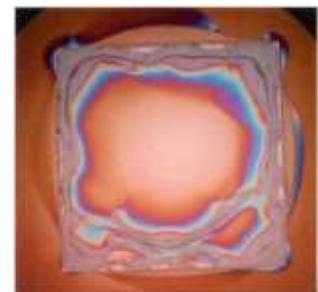


図 12 SiN メンブレン基板上のレジスト。

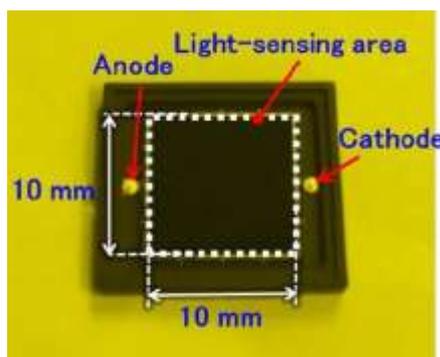


図 18 EUV 用 PD (SXUV-100)。

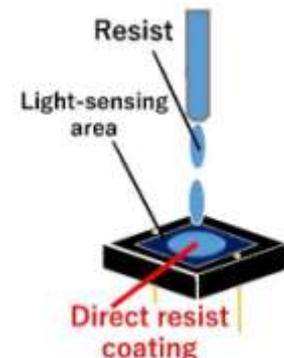


図 14 PD 上のレジスト塗布方法。

た。この方法では、図 12 に示すようにレジストの種類によっては SiN のメンブレン上に塗布斑ができて、塗布が困難であったりしたため、透過率測定の測定誤差が大きかった。そこで、図 13 のフォトダイオード (PD) 上に図 14 に示すように直接レジストをスピコートにて塗布する方法を考案し、このレジストの透過率を EUV 光の反射により測定した[40]。この方法を用いて、PD 上の非化学増幅系レジスト膜厚および透過率の測定分布結果をそれぞれ図 15(a)と図 15(b)に示す。このとき、平均膜厚は 120.1 nm で不均一性は 0.5%であった。また、透過率の平均値は 62.2%で不均一性は 0.7%であった。これをもとに、吸収係数を計算すると、 $3.96 \mu\text{m}^{-1}$ で不均一性は 1%以下を実現できた。

今後は、EUV 光吸収が大きい金属レジストレジストについても評価をし、要求仕様を満足

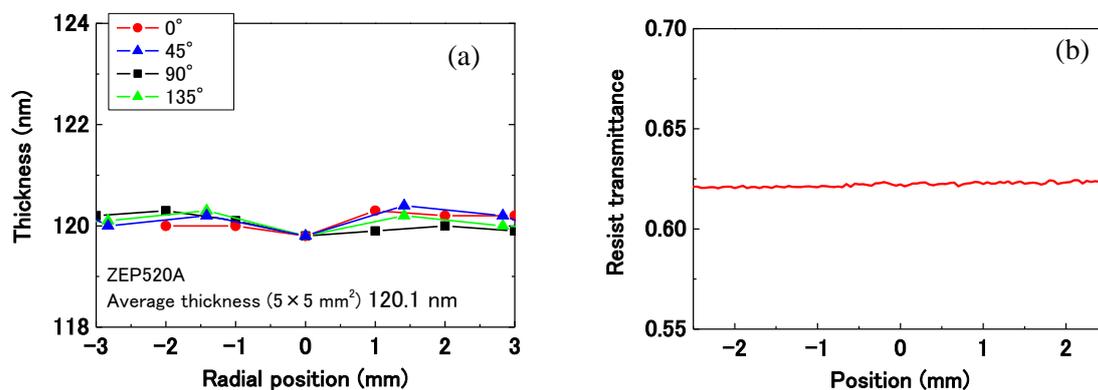


図 15 非化学増幅系レジストの(a)PD 上のレジスト膜厚測定、並びに(b)透過率測定例。

する EUV レジストの開発を進める。

1. まとめ

兵庫県立大学では 1995 年の姫路工業大学の時代からニュースバル放射光施設で極端紫外線リソグラフィ技術の開発を進めてきた。2008 年 10 月に極端紫外線リソグラフィ研究開発センターが兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所に設置された。同センターは EUVL 技術開発を促進させるために設置され、EUVL 技術開発を加速するために同センターが保有する装置等を一般ユーザに開放してきた。同センターでは、EUV レジスト材料開発および評価系の開発、並びにマスク欠陥検査技術の開発を進めている。

今回の発表では、酸発生剤内包型 EUV レジスト開発、EUV レジストのアウトガス特性評価、sub-10 nm の EUV レジスト評価用 EUV 干渉露光系の開発、高感度 EUV レジストに向けた軟 X 線吸収分光法を用いた反応解析、並びに PD を用いた EUV レジストの透過率測定について報告した。これらの技術を用いて、EUV リソグラフィ技術進展を図って行きたい。

また、今回述べた技術以外に、マスク欠陥検査技術の開発を進めている。

2. 今後の展望

放射光を用いた EUV レジスト研究シーズを基に EUV レジストの開発に貢献し、要求仕様を満足するレジスト開発を加速し、EUV リソグラフィの実用化を進める。

これにより、EUV リソグラフィ要素技術での日本の材料、装置の技術開発に貢献し、技術立国日本の発展を寄与したい。

謝辞

酸発生材内包型 EUV レジストの開発、軟 X 線吸収分光法を用いた EUV 反応解析の研究、並びに EUV 光による干渉露光の研究は科研費基盤研究Bの支援のもとで実施した。この反応解析に用いたレジスト基材は東京応化工業株式会社より提供を頂いた。また、EUV レジストのアウトガスの研究は、EIDEC を通じて NEDO から再委託を受けて実施した。

参考文献

- [1] H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii, Y. Torii, J. Vac. Sci. & Technol., B7 (1989) 1648.
- [2] T. Watanabe, K. Mashima, M. Niibe, H. Kinoshita, Jpn. J. Appl. Phys., 36 (12B) (1997) 7597.
- [3] H. Kinoshita, Y. Kimpara, T. Watanabe, Y. Platonov, J. L. Wood, Jpn. J. Appl. Phys., 37 (1998) 2758.
- [4] K. Murakami, T. Oshino, H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi, H. Yamanashi, J. Photopolym. Sci. Technol., 11 (1998) 565.
- [5] H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi, H. Yamanashi, K. Murakami, T. Oshino, Y. Platonov, N. Grupido, Proc. SPIE, 3331 (1998) 20.
- [6] T. Watanabe, T. Haga, M. Niibe, H. Kinoshita, J. Synchrotron Rad., 5 (1998) 1149.
- [7] H. Kinoshita T. Watanabe, D. Bajuk, J. Daniel, Y. Kimpara, M. Kriese, Y. Platonov, Proc. SPIE, 3767 (1999) 164.
- [8] T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, Y. Li, K. Hamamoto, T. Oshinio, K. Sugisaki, K. Murakami, S. Irie, S. Shirayone, Y. Gomei, S. Okazaki, J. Vac. Sci. Technol., B18 (2000) 2905.
- [9] K. Sugisaki, T. Oshino, K. Murakami, T. Watanabe, H. Kinoshita, A. Miyafuji, S. Irie, S. Shirayone, Proc. SPIE, 3997 (2000) 751.
- [10] S. Irie, T. Watanabe, H. Kinoshita, A. Miyafuji, K. Sugisaki, T. Oshino, K. Murakami, Proc. SPIE, 3997 (2000) 807.
- [11] H. Kinoshita, T. Watanabe, Jpn. J. Appl. Phys., 39 (2000) 6771.
- [12] T. Watanabe, Y. Fukushima, H. Shiotani, M. Hayakawa, S. Ogi, Y. Endo, T. Yamanaka, S. Yusa, H. Kinoshita, J. Photopolym. Sci. Technol., 19 (2006) 521.
- [13] Y. Fukushima, T. Watanabe, R. Ohnishi, H. Kinoshita, H. Shiotani, S. Suzuki, M. Hayakawa, Y. Endo, T. Yamanaka, S. Yusa, J. Photopolym. Sci. Technol., 20 (2007) 419.
- [14] Y. Fukushima, T. Watanabe, R. Ohnishi, H. Shiotani, S. Suzuki, M. Hayakawa, S. Ogi, Y. Endo, T. Yamanaka, S. Yusa, H. Kinoshita, Jpn. J. Appl. Phys., 46 (2007) 6198.
- [15] T. Nakahara, T. Watanabe, H. Kinoshita, T. Mochizuki, Y. Takahara, Y. Uozumi, K. Nakagawa, Jpn. J. Appl. Phys., 48 (2009) 06FC10.
- [16] T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, K. Hamamoto, H. Tsunakino, H. Hada, H. Komano, S. Irie, J. Vac. Sci. Technol., B19 (2001) 736.
- [17] T. Watanabe, K. Hamamoto, H. Kinoshita, H. Hada, H. Komano, J. Appl. Phys., 43 (2004) 3713.

- [18] T. Watanabe, H. Kinoshita, N. Sakaya, T. Shoki, S. Y. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44 (2005) 5556.
- [19] K. R. Dean, I. Nishiyama, H. Oizumi, A. Keen, H. Cao, W. Yueh, T. Watanabe, P. Lacovig, L. Rumiz, G. Denbeaux, J. Simon, *Proc. SPIE*, 6519 (2007) 65191P.
- [20] H. Oizumi, K. Matsumaro, S. Nomura, J. J. Santillan, T. Itani, T. Watanabe, Naohiro Matsuda, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita, *Proc. SPIE*, 7969 (2011) 796921.
- [21] T. Watanabe, Y. Kikuchi, T. Takahashi, K. Katayama, I. Takagi, N. Sugie, H. Tanaka, E. Shiobara, S. Inoue, T. Harada, H. Kinoshita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52 (2013) 056701.
- [22] N. Matsuda, T. Watanabe, T. Harada, H. Kinoshita, H. Oizumi, T. Itani, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50 (2011) 06GB02.
- [23] N. Sugie, T. Takahashi, K. Katayama, I. Takagi, Y. Kikuchi, E. Shiobara, H. Tanaka, S. Inoue, T. Watanabe, T. Harada, H. Kinoshita, *J. Photopolymer Sci. Technol.*, 25 (2012) 617.
- [24] I. Takagi, T. Takahashi, N. Sugie, K. Katayama, Y. Kikuchi, E. Shiobara, H. Tanaka, S. Inoue, T. Watanabe, T. Harada, H. Kinoshita, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 26 (2013) 673.
- [25] E. Shiobara, T. Takahashi, N. Sugie, Y. Kikuchi, I. Takagi, K. Katayama, H. Tanaka, S. Inoue, T. Watanabe, T. Harada, H. Kinoshita, *Proc SPIE*, 9048 (2014) 904819.
- [26] Y. Kikuchi, K. Katayama, I. Takagi, N. Sugie, T. Takahashi, E. Shiobara, H. Tanaka, S. Inoue, T. Watanabe, T. Harada, H. Kinoshita, *Proc. SPIE*, 9048, (2014) 90482W.
- [27] Y. Fukushima, Y. Yamaguchi, T. Kimura, T. Iguchi, T. Harada, T. Watanabe, H. Kinoshita, *J. Photopolymer Sci. Technol.*, 23 (2010) 673.
- [28] Y. Yamaguchi, Y. Fukushima, T. Iguchi, H. Kinoshita, T. Harada, T. Watanabe, *J. Photopolymer Sci. Technol.*, 23 (2010) 681.
- [29] Y. Fukushima, N. Sakagami, T. Kimura, Y. Kamaji, T. Iguchi, Y. Yamaguchi, M. Tada, T. Harada, T. Watanabe, H. Kinoshita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 49 (2010) 06GD06.
- [30] Y. Yamaguchi, Y. Fukushima, T. Harada, T. Watanabe, H. Kinoshita, *Jpn. J. Appl. Phys.* 50 (2011) 06GB10.
- [31] Y. Fukushima, Y. Yamaguchi, T. Iguchi, T. Urayama, T. Harada, T. Watanabe, H. Kinoshita, *Microelectric Engineering*, 88 (2011) 1944.
- [32] T. Urayama, T. Watanabe, Y. Yamaguchi, N. Matsuda, Y. Fukushima, T. Iguchi, T. Harada, H. Kinoshita, *J. Photopolymer Sci. Technol.*, 24 (2011) 155.
- [33] T. Fukui, H. Tanino, Y. Fukuda, M. Kuki, T. Watanabe, H. Kinoshita, T. Harada, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 28 (2015) 525.
- [34] T. Watanabe, H. Hada, S. Y. Lee, H. Kinoshita, K. Hamamoto, H. Komano, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44 (2005) 5866.
- [35] T. Watanabe, Y. Haruyama, D. Shiono, K. Emura, T. Urayama, T. Harada, H. Kinoshita, *J. Photopolymer Sci. Technol.*, 25 (2012) 569.
- [36] T. Watanabe, K. Emura, Y. Haruyama, T. Harada, Y. Muramatsu, H. Kinoshita, D. Shiono, K. Ohmori, K. Sato, *Micro/Nano Lithography*, SPIE Newsroom, April (2013) 2.
- [37] T. Watanabe, K. Emura, D. Shiono, Y. Haruyama, Y. Muramatsu, K. Ohmori, K. Sato,

- T. Harada, H. Kinoshita, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 26 (2013) 635.
- [38] K. Emura, T. Watanabe, M. Yamaguchi, H. Tanino, T. Fukui, D. Shiono, Y. Haruyama, Y. Muramatsu, K. Ohmori, K. Sato, T. Harada, H. Kinoshita, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 27 (2014) 631.
- [39] M. Kuki, T. Uemura, M. Yamaguchi, T. Harada, T. Watanabe, Y. Muramatsu, H. Kinoshita, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 28 (2015) 531.
- [40] D. Mamezaki, M. Watanabe, T. Harada, T. Watanabe, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 29 (2016) 749.