

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18308

研究課題名(和文)電子線を用いたEUVリソグラフィの加工性能評価法の確立

研究課題名(英文)Research on evaluation method of EUV resist performance using electron beam

研究代表者

保坂 勇志(Hosaka, Yuji)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・次世代放射光施設整備開発センター・主任研究員(任常)

研究者番号：90645558

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：EUVレジスト性能を電子線(EB)によって評価する手法について研究を行った。EUV照射時の特徴的な初期電子分布を再現するため、100 eV程度の超低エネルギーEB照射装置の開発を行った。超低エネルギーEBを照射したサンプル表面ではナノメートルオーダーの形状変化が確認された。また、レジストへの短パルスEUV照射試験を行った。ピコ秒EUV照射ではレジストの高感度化が確認され、X線光電子分光により照射後の化学構造の違いも観測されている。他にEB描画時の後方散乱の影響について電子散乱シミュレーションによる検討を行った。線幅100 nm以上ではEB描画の結果からEUV描画感度予測が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

EUVレジスト開発においては研究用のEUV描画装置が数少ないため、研究者にとって基礎研究はもとより開発したレジストの性能評価すら難しいことが大きな問題であった。本研究は装置が普及したEBを用いてEUVレジスト性能を評価する手法の確立を目的としており、EB試験結果からEUVレジストの性能評価が可能となれば、量子ビーム最大の産業応用であるEUVLをより推進することができる。本研究では、EUVの初期電子分布を再現するEB照射装置の構築が完了し、線幅100 nm以上でのEUVレジストの感度予測法を確立した。本研究の手法を用いることでEUVレジスト研究の加速が期待できる。

研究成果の概要(英文)：A method for evaluating EUV resist performance by electron beam (EB) was studied.

In order to reproduce the characteristic initial electron distribution during EUV irradiation, an ultra-low energy (100 eV) EB irradiation device has been developed in this study. On the surface of the sample irradiated with ultra-low energy EB, a shape change on the order of nanometers was confirmed. A short pulse EUV irradiation test was performed on the resist. Higher sensitivity of the resist was confirmed when using picosecond EUV, and differences in the chemical structure after irradiation were also observed by X-ray photoelectron spectroscopy. The effect of backscatter during EB drawing was examined by electron scattering simulation. With a line width of 100 nm or more, EUV drawing sensitivity can be predicted from the EB drawing results.

研究分野：放射線化学

キーワード：EUVリソグラフィ レジスト 電子線 EUV 放射線化学 リソグラフィ

1. 研究開始当初の背景

今日のコンピュータ技術の発展を支えているのはリソグラフィと呼ばれる半導体微細加工技術である。研究開始当初、その光源には波長 193 nm の紫外光(UV)が用いられ、液浸露光やマルチパターンングに代表される各種技術を導入して波長以下の 10-20 nm の加工精度が達成されていた。しかし、UV リソグラフィの解像度向上は限界を迎えつつあり、次世代リソグラフィとして 20 年以上前から検討されている波長 13.5 nm の極端紫外光(EUV)を用いた EUV リソグラフィ(EUVL)が開始されようとする時分であった。ここまで EUVL の実用化が遅れた要因は、EUV 光源強度および微細加工用高分子材料(レジスト)の性能が不十分であったためである。特に EUV レジストの研究開発においては EUV 描画装置が世界的に数少なく、基礎研究はもとより開発したレジストの性能評価すら難しいことが大きな問題であった。

2. 研究の目的

これまでの UV リソグラフィでは分子の光励起を起点とする光化学反応を利用してきた。一方、波長が 13.5 nm の EUV は 92 eV のエネルギーを持つ軟 X 線であるため、EUVL では分子の電離を起点とする放射線化学反応を利用することになる。EUV は放射線としてはエネルギーが低いため放射線化学の研究者にとっても未知の部分が多く、EUV 照射装置が数少ないことから基礎研究が不足している。

本研究は、EUV と同じく電離放射線である電子線(EB)に着目し、露光装置が普及した EB リソグラフィ(EBL)を用いて EUV レジスト性能を評価する手法の確立を目的として開始した。装置の普及している EBL の試験結果から EUV レジストの性能評価が可能となれば、EUV レジストの開発を加速させ、量子ビーム最大の産業応用である EUVL をより推進することができる。

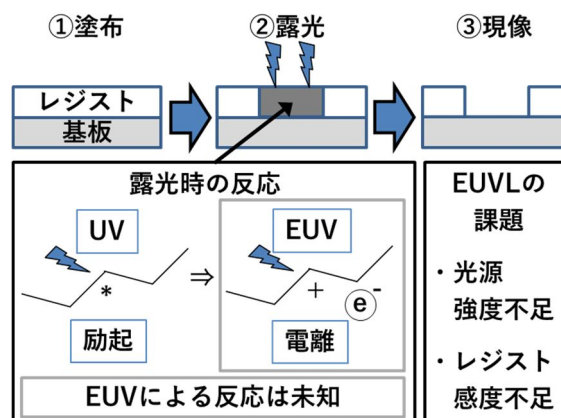


図1 レジストの反応と EUVL の課題

3. 研究の方法

EB を用いた EUV レジスト性能評価法確立のための主要な課題は、EUV の反応機構の解明及び EB と EUV の初期電子散乱の違いの解明である。これらの課題に対し、以下のアプローチにより研究を実施した。

(1) EUV の放射線反応を模擬する超低エネルギーEB 照射装置構築

92 eV の EUV による化学反応の起点は光電効果で生じた 80 eV 程度のエネルギーを持つ電子であり、通常の加速器からの EB のエネルギーよりもかなり低い。ゆえに EUV により生成された低エネルギー電子はただちに物質にエネルギーを付与し、EB の場合よりも高い密度の初期電子分布を形成する [T. Kozawa et al., Jpn. J. Appl. Phys. 48 056508]。初期電子分布の違いが反応機構へどう影響するかを把握するため、100-300 eV 程度の超低エネルギーEB 照射装置を構築した。

(2) 短パルス EUV 線源を用いた EUV 化学反応の解明

EUV による化学反応は基礎研究の不足により未知の部分が多いため、EUV レジストの化学反応の解明を目指し、ピコ秒からフェムト秒オーダーのパルス幅の短パルス EUV 照射試験を行った。短パルス EUV 照射に対するレジスト感度の測定や化学構造変化の解析を行った。

(3) 電子散乱シミュレーションを用いた EB 描画からの EUV 描画の性能予測

照射時にレジスト薄膜を透過した電子の一部は、基板等で散乱した後方散乱電子となってレジストにエネルギーを追加で付与する。この現象は EB 照射で顕著な問題であり、EB のエネルギーによっては照射点から 100 μm 先まで広範囲に影響を及ぼしてしまう。つまり、EB 描画装置を用いて EUV 描画を模擬する場合には散乱電子からのエネルギー付与の差し引き・広がり空間補正が必須となる。この点に関して電子散乱シミュレーションを用いて補正を検討した。

4. 研究成果

(1) EUV の放射線反応を模擬する超低エネルギーEB 照射装置構築

電子源・真空チェンバ・直線導入器・真空ポンプ・真空計からなる超低エネルギーEB 照射装

置を構築した。電子源はオメガトロン社製の低速パルス電子銃を用いた。構築した超低エネルギーEB照射装置を図2に示す。磁気レンズによりサンプル上でのスポットサイズが調節可能であり、2-10mm程度の任意のサイズの超低エネルギーEB照射が可能である。この装置を用いてEBレジストへの照射と現像を行った(図3)。200 eVの超低エネルギーEBを照射し現像したサンプルでは、原子間力顕微鏡によって10 nm程度の膜厚減少が観測された。この値は超低エネルギーEBの散乱シミュレーションから予想される電子の侵入長よりも小さい値であるため、レジスト中の電子の移動度が予想よりも低くなっている可能性や、サンプル表面のチャージアップによって侵入する電子のエネルギーが低下する可能性が示唆された。



図2 超低エネルギーEB照射装置外観

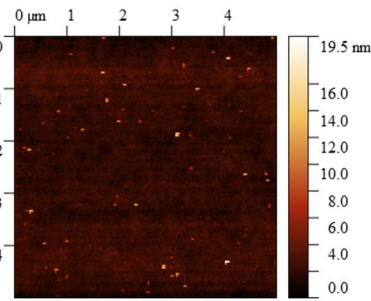


図3 照射・現像後のレジスト表面形状の例

は、原子間力顕微鏡によって10 nm程度の膜厚減少が観測された。この値は超低エネルギーEBの散乱シミュレーションから予想される電子の侵入長よりも小さい値であるため、レジスト中の電子の移動度が予想よりも低くなっている可能性や、サンプル表面のチャージアップによって侵入する電子のエネルギーが低下する可能性が示唆された。

(2) 短パルス EUV 線源を用いた EUV 化学反応の解明

短パルス EUV 線源として量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所の X 線レーザー(パルス幅ピコ秒の EUV)を用いてレジスト(PMMA)への照射と、現像および解析を行った。現像後の PMMA の膜厚は 2 mJ/cm² 程度の照射で 0 となった(図 4 [Y. Hosaka et al., Appl. Phys. Lett. 115, 073109])。この結果は予測感度(100 mJ/cm²)や我々の実測感度(50 mJ/cm²)と比較し明らかに高感度であり、この原因は X 線レーザーのピコ秒のパルス幅にあると考えられる。このパルス幅は他の EUV 露光装置がナノ秒のパルス幅であるのに比べ明らかに短い。反応機構の解明のためピコ秒 X 線レーザー照射後の PMMA の X 線光電子分光(XPS)による化学構造分析を行った。他の放射線源では十分なスペクトル変化を得るのに

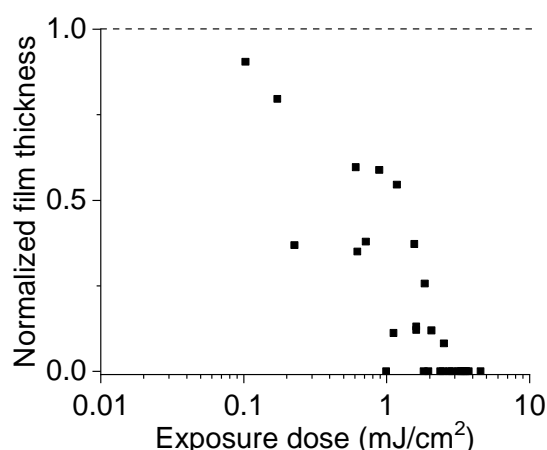


図4 ピコ秒 EUV 照射・現像後の PMMA 膜厚の変化

20 MGy 程度の線量が必要だったが、ピコ秒 X 線レーザーの場合わずか 0.5 MGy の照射で大きなスペクトル変化が確認された。得られたスペクトルの形状変化も異なっており、PMMA 分子鎖切断に関しては X 線レーザーの場合は主鎖・側鎖の両方が切断されている傾向がより顕著であった。EUV 照射に対するレジストの反応として、非常に興味深い結果が得られた。

(3) 電子散乱シミュレーションを用いた EB 描画からの EUV 描画の性能予測

後方散乱の影響を電子散乱シミュレーション(PHITS)によって算出し、EB 描画時に実際にレジスト内でどの程度エネルギーが付与されたかを計算した。感度(描画・現像後に膜厚が 0 になるのに必要な付与エネルギー)の描画線幅への依存性を図 5 に示す。100 nm 未満の描画パターンでは感度が悪化する傾向が見られた。この理由として電子散乱シミュレーションの精度不足の問題や、微細化による現像液の染み込み不足が考えられる。現像液の染み込みに関してはシミュレーションを行い、線幅 100 nm 程度で大きな影響を及ぼすことはない結論された。ゆえに、微小領域での低エネルギー電子のシミュレーション精度不足が 100 nm 未満の感度予測を難しくしていると予想され、今後継続的な検討が必要である。一方で、後方散乱の補正を加えることで、線幅 100 nm 以上の描画線幅では一定の感度となっている。EUV 描画時の付与エネルギーも別途計算することで、EB 描画結果からの線幅 100 nm 以上の EUV 描画感度予測が可能となっている。

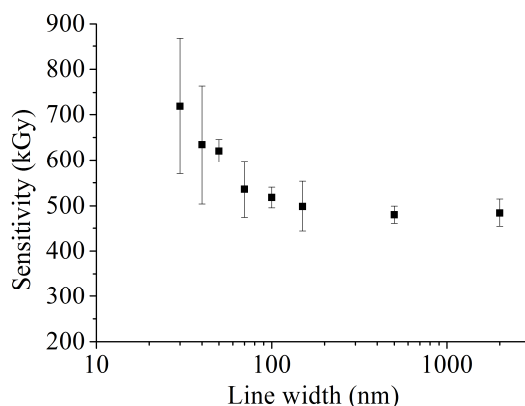


図5 感度の EB 描画線幅への依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hosaka Yuji, Oyama Tomoko Gowa, Yamamoto Hiroki, Ishino Masahiko, Dinh Thanh-Hung, Nishikino Masaharu, Maekawa Yasunari	4. 巻 115
2. 論文標題 Sensitivity enhancement of poly(methyl methacrylate) upon exposure to picosecond-pulsed extreme ultraviolet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 073109 ~ 073109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5116284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuji Hosaka, Hiroki Yamamoto, Masahiko Ishino, Thanh-Hung Dinh, Masaharu Nishikino, Akira Kon, Shigeki Owada, Yuichi Inubushi and Yasunari Maekawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on Irradiation Effects by Femtosecond-pulsed Extreme Ultraviolet in Resist Materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 保坂勇志, 大山智子, 山本洋揮, 石野雅彦, チンタンフン, 錦野将元, 前川康成
2. 発表標題 短パルス極端紫外線のレジストへの照射効果の検証
3. 学会等名 第62回放射線化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 保坂勇志, 大山智子
2. 発表標題 電子線を用いたEUVレジスト感度予測法の研究
3. 学会等名 第61回放射線化学討論会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 保坂勇志、清藤一、田口光正、前川康成
2. 発表標題 EUV誘起化学反応模擬のための超低エネルギー電子線源の開発
3. 学会等名 第17回放射線プロセスシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuji Hosaka, Hiroki Yamamoto, Masahiko Ishino, Thanh-Hung Dinh, Masaharu Nishikino and Yasunari Maekawa
2. 発表標題 Study on Irradiation Effects by Femtosecond-pulsed Extreme Ultraviolet in Main-chain Scission Resist
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------