

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03895

研究課題名（和文）量子ビーム科学とデータ科学の融合によるシングルナノ材料開発

研究課題名（英文）Development of single nano materials based on quantum beam and data science

研究代表者

古澤 孝弘（Kozawa, Takahiro）

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：20251374

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,600,000円

研究成果の概要（和文）：半導体デバイスの大量生産では、電離放射線領域にある波長13.5 nmの極端紫外光（EUV）が次期露光源として使われようとしている（研究開始時）。しかし、微細加工材料開発は解像度10 nmに大きな壁があり、開発のための学術基盤の早急な整備が必要である。本研究では、EUVレジストの反応機構を解明し、得られた知見に基づいた反応機構モデルにより、モンテカルロシミュレーションを行い、次世代EUVリソグラフィ開発で最大の問題となっている確率統計欠陥生成のメカニズムとリスク評価指標を考案した。さらに得られた実験データ、シミュレーション結果を機械学習で解析することにより、シングルナノ材料の設計指針を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電離放射線領域の量子ビームによって誘起される初期の主要な反応は数ps以内で起こる高速反応であり測定が困難である。また、電離放射線のエネルギーを材料中で有効利用しようと考えた場合、電離放射線領域では、分子のエネルギー吸収選択性が失われ、エネルギーは溶質ではなく大部分が媒質に付与されるため、媒質のイオン化という形で付与されたエネルギーをいかにターゲット分子に伝達するかということが重要となる。このような反応系を設計するうえで、中間活性種の空間分布は本質的問題であり、本研究では、中間活性種の空間分布を含む反応機構を解明し、EUVリソグラフィの実現に貢献すると共に、次世代EUVレジストの設計指針を得た。

研究成果の概要（英文）：Extreme ultraviolet (EUV) radiation will be used as a light source in the high volume production of semiconductor devices. The EUV radiation with the wavelength of 13.5 nm is an ionizing radiation and capable of resolving 8 nm optical image. However, there is a barrier against the development of resist materials responding to 8 nm optical resolution. The scientific foundation for material design should be established. In this study, we clarified the reaction mechanism of EUV resists. The reactions induced in resist films by EUV were modeled for the development of simulation code based on Monte Carlo method. Using the developed simulation code, the resist pattern formation was simulated for various parameter sets. Based on simulation results, the generation mechanism of stochastic defects was clarified. The defect risk indicator was also proposed. By applying the machine learning to the experimental and simulation data, the material design for single nano resists was obtained.

研究分野：応用ビーム工学

キーワード：放射線、X線、粒子線 半導体超微細化 シミュレーション工学 計算物理 データ科学

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの大量生産では、非電離放射線領域の光を露光源として加工が行われてきたが、解像度が限界に達したため、代わって電離放射線領域にある波長 13.5 nm の極端紫外光 (EUV) が次期露光源として使われようとしている。EUV は N7 もしくは 7nm ノードと呼ばれる解像度 16 nm から実用化され、N2 もしくは 2 nm ノードと呼ばれる解像度 10 nm 未満 (シングルナノ) 領域でも使い続けられることが期待されている。しかし、微細加工材料開発は解像度 10 nm に大きな壁があり、開発のための学術基盤の早急な整備が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、電子線加速器、EUV 露光機、EUVFEL 等の量子ビームを駆使しデータを収集するとともに、データ科学的手法を解析に活用することにより、シングルナノ領域で起こる放射線誘起反応を解明し、シングルナノ材料 (2 nm ノードに適用可能な 20 nm 未満の周期で 10 nm 未満のパターンを解像できる材料) の設計指針を得る。

3. 研究の方法

電離放射線領域にある量子ビームによって誘起される初期の主要な反応は数 ps 以内で起こる高速反応であり、測定が困難である。また、電離放射線のエネルギーを材料中で有効利用しようと考えた場合、例えば、可視光では分子の光吸収のエネルギー (波長) 選択性を利用して、ターゲット分子に直接エネルギーを与えることができるが、電離放射線領域では、エネルギー選択性が失われ、エネルギーは溶質ではなく大部分が媒質に付与されるため、媒質のイオン化という形で付与されたエネルギーをいかにターゲット分子に伝達するかということが重要となる。このような反応系を設計するうえで、中間活性種の空間分布は本質の問題である。放射線化学初期過程の解明のために、従来は高速の過渡吸収分光 (パルスラジオリシス) 装置を開発し、時間からのアプローチを行っていたが、近年、これらの初期過程において重要な距離が、最先端微細加工材料のサイズに近いことに着目し、化学反応後の材料の形状情報を活用し、空間からのアプローチの可能性を示した。本研究では、フェムト秒電子線パルスによる放射線誘起反応の時間分解計測で、レジスト材料中に誘起される複雑な反応を素反応に分解して計測することにより、反応経路をモデリングし、シミュレーションコードを作製すると共に、極微電子線、高解像 EUV による化学反応の空間分解計測を実施し、電子顕微鏡による表面形状計測により得られるデータを、作製したシミュレーションコードとデータ科学的手法を駆使し解析することにより放射線化学初期過程を解明し、シングルナノ材料の設計指針を得る。

4. 研究成果

レジスト材料は、解像度の向上につれて、線幅の粗さであるラインエッジラフネス (LER) とレジスト感度が悪化し、歩留まりとスループットが低下することが知られている。加えて、十数 nm という微細領域で無作為に起こる光誘起反応は、ピンチングやブリッジングのような確率的欠陥を生じる。以上の解像度、LER、感度のトレードオフと確率的欠陥は次世代材料開発の最大の課題となっている。現在主流の化学増幅型レジスト (CAR) は側鎖の極性官能基の一部が非極性官能基で保護された高分子と光酸発生剤 (PAG)、光分解性塩基 (PDQ) で構成される。CAR が塗布された Si 基板上に EUV が照射されることで酸が発生し、加熱することで酸触媒による側鎖の脱保護反応が進行し現像プロセスを経てレジストパターンが形成する。LER や確率的欠陥は、有機材料中でパターン形成のために誘起される化学反応の確率効果に由来する。確率効果は必要照射量に含まれる光子数や高分子の保護基数の分散や PAG や PDQ の濃度 (C_{PAG} 、 C_{PDQ})、脱保護反応の効率など多数のパラメータが関係している。また脱保護反応終了後の保護基数 (N) の分布 (図 1 上) から LER は次の式で近似される。

$$LER \approx \frac{a\sigma}{dm/dx} \quad \dots \text{(式 1)}$$

ここで m は規格化された保護基数で $m = N/N_0$ 、 N_0 は 1 高分子当たりの初期の保護基数である。また、 dm/dx は化学勾配と呼ばれる平均保護基数の傾き、 σ は保護基数の標準偏差、 a は溶解因子である。LER は化学勾配の大きさによって発生範囲が決まり、確率効果で揺らいだ保護基数が溶解閾値となる保護基数 (N_{DT}) を超えたとき、分子が現像プロセスを経て LER として顕在化する。

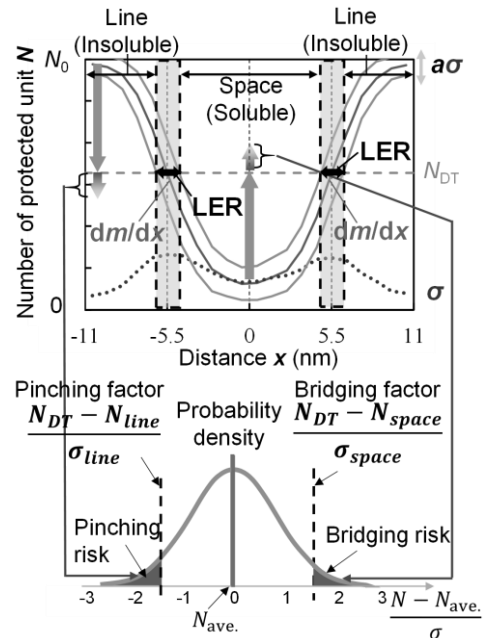


図 1. Schematic relationships between σ and stochastic defects.

確率的欠陥でもライン、スペース中心での σ および N を用いた指標($|N_{DT}-N_{line}|/\sigma_{line}$ 、 $|N_{DT}-N_{space}|/\sigma_{space}$)から欠陥リスクが推定できる(図1下)。本研究ではトレードオフ最適化および10 nm以下の微細加工時の欠陥予測のために dm/dx と各種欠陥指標のシミュレーションおよ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。

最適化された C_{PAG} 、 C_{PDQ} を用いて総感光剤濃度(C_s)を変数とした条件(I)、 C_{PAG} と C_{PDQ} も変数とした条件(II)、および確率効果を組み込んだ条件(III)の3通りの仮想実験を行った。またピンチング指標(PI)、ブリッジング指標(BI)として $|N_{DT}-N_{line}|/\sigma_{line}$ 、 $|N_{DT}-N_{space}|/\sigma_{space}$ の逆数 $\sigma_{line}/|N_{DT}-N_{line}|$ と $\sigma_{space}/|N_{DT}-N_{space}|$ を用いた。感光・反応プロセスをシミュレーションし、 dm/dx 、LER、BI、PIを得た。使用した変数はTable Iにまとめた。仮想実験で得られたデータセットについて必要であれば規格化および外れ値の処理をし、残ったデータの80%を訓練データとし、20%をテストデータとした。回帰モデルとしてI、IIでは多項式回帰を使用し、IIIでは指数部が多項式となるような指数関数を使用した。評価関数として平均二乗誤差(RMSE)を使用した。回帰手法として最小二乗法、lasso法、ridge法、elastic net法を用いた。シミュレーションによって得た dm/dx の3132データ(4変数、I)、感光剤濃度を分割した場合に得た dm/dx の58307データ(5変数、II)について回帰分析を行った。4変数のときはlasso

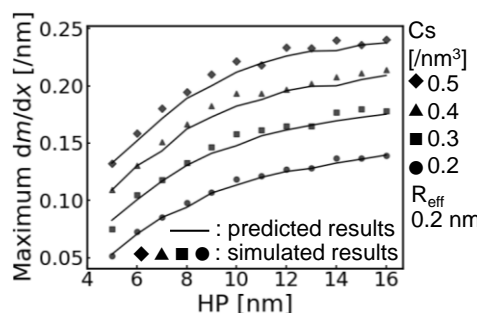


図2. HP dependence of maximum dm/dx using C_s : 0.2-0.5 /nm³ and R_{eff} : 0.2 nm

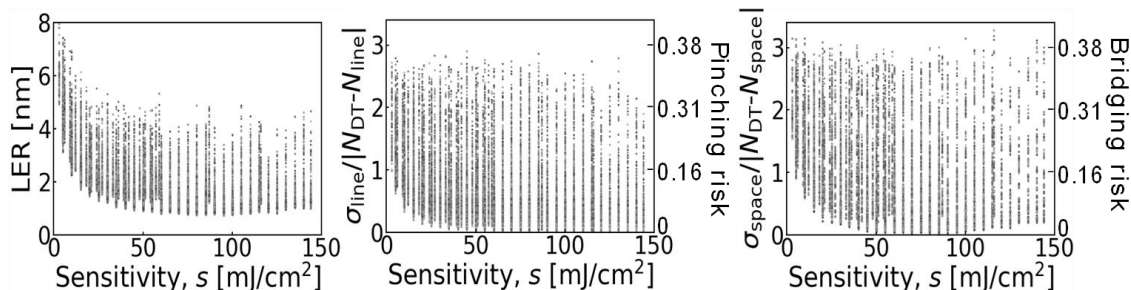


図3. Entire data sets of (a) LER and (b) pinching and (c) bridging factors by the simulation.

法を用いて、5変数のときには最小二乗法を用いてデータをよく再現する多項式を得た。4変数、5変数のそれぞれの関数から反応場のコントラストを決定する dm/dx を最大化させるプロセス条件(I)、濃度組成(II)を決定することが可能になった。最大 dm/dx のHP依存性を図2に示す。10 nm HP以下の領域において dm/dx が著しく低下した。これは二次電子の熱化距離の影響が大きくなっていることに由来していると考えられる。確率効果の影響についてIIIの仮想実験を行った。感光・反応機構中の確率効果は保護基数の揺らぎに集約されるためライン、スペース、中間領域のそれぞれについてLER、PI、BIを計算し、22932データを得た(図3)。Lasso法を用いて、指数関数回帰を行ったところ、良好な精度の関数を得た。回帰関数の係数ヒストグラムを図4に示した。横軸は関数の項、縦軸は係数の大きさである。また図中に係数の絶対値が大きな項を示した。いずれもHP、 s が支配的だが、次いで寄与の大きいパラメータはピンチング指標では σ であった反面、ブリッジング指標では C_s 、 R_{eff} であった。その関数をもとに10 nm HPでの欠陥予測を行ったところ、LER・ピンチングは現実的なパラメータで要求値を達成可能だが、ブリッジングでは達成困難であった。ブリッジングの発生を抑制するために式1に示す a の溶解挙動についての詳細な研究が期待される。

Table I Material and process variables used by simulation. s : sensitivity, R_{eff} : effective reaction radius for deprotection, σ_i : initial standard deviation of the number of protected units per polymer molecule.

	Target	Feature1	Feature2	Feature3	Feature4	Feature5
I	dm/dx	HP	s	C_s	R_{eff}	
II	dm/dx	HP	s	C_{PAG}	C_{PDQ}	R_{eff}
III	LER, PI, BI	HP	s	C_s	σ_i	R_{eff}

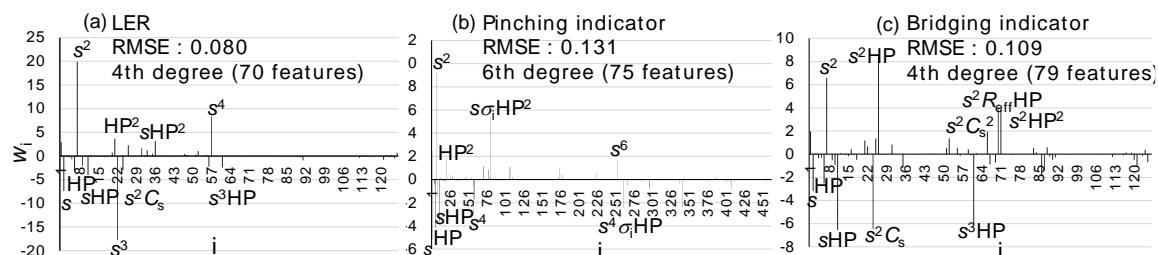


図4. The histogram of the coefficients of obtained function of (a) LER and (b) pinching and (c) bridging factors.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計36件（うち査読付論文 35件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ito Yuko Tsutsui, Kozawa Takahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Relationship between surface free energy and development process (swelling and dissolution kinetics) of poly(4-hydroxystyrene) film in water and 2.38 wt% tetramethylammonium hydroxide aqueous solution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 016502 ~ 016502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac3d42	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jin Yuqing, Kozawa Takahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Classification of lines, spaces, and edges of resist patterns in scanning electron microscopy images using unsupervised machine learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 056505 ~ 056505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac56b5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Otsuka Tomoe, Jin Yuqing, Tanaka Naoki, Kozawa Takahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Effect of surface free energy of organic underlayer on the dissolution kinetics of poly(4-hydroxystyrene) film in tetramethylammonium hydroxide aqueous developer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 056503 ~ 056503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5947	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Harumoto Masahiko, Santillan Julius Joseph, Itani Toshiro, Kozawa Takahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Dependence of photoresist dissolution dynamics in alkaline developers on alkyl chain length of tetraalkylammonium hydroxide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 056506 ~ 056506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac61f2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jin Yuqing, Kozawa Takahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Estimation of effective reaction radius for catalytic chain reaction of chemically amplified resist by Bayesian optimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 066504 ~ 066504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac6a36	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Murakami Yoshiyuki, Nishikubo Ryosuke, Ishiwari Fumitaka, Okamoto Kazumasa, Kozawa Takahiro, Saeki Akinori	4. 巻 3
2. 論文標題 Exploration of charge transport materials to improve the radiation tolerance of lead halide perovskite solar cells	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Advances	6. 最初と最後の頁 4861 ~ 4869
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2ma00385f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kozawa Takahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Theoretical study on defect risks of chemically amplified resists used for extreme ultraviolet lithography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 106502 ~ 106502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac8dd1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kozawa Takahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Interfacial effects on sensitization of chemically amplified extreme ultraviolet resists	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 116501 ~ 116501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac9500	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwashige Yutaro, Kudo Hiroto, Okamoto Kazumasa, Kozawa Takahiro	4. 巻 35
2. 論文標題 Synthesis and Resist Sensitive Property of Iodine-Containing Materials using Extreme Ultraviolet (EUV) Exposure Tool	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 41 ~ 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.35.41	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Harumoto Masahiko, dos Santos Andreia Figueiredo, Santillan Julius Joseph, Itani Toshiro, Kozawa Takahiro	4. 巻 62
2. 論文標題 Stochastic defect generation depending on tetraalkylhydroxide aqueous developers in extreme ultraviolet lithography	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 016503 ~ 016503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/aca9ae	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kozawa Takahiro	4. 巻 62
2. 論文標題 Protected unit distribution near interfaces of chemically amplified resists used for extreme ultraviolet lithography	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 016509 ~ 016509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acb0b2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Azumagawa Kazuki, Kozawa Takahiro	4. 巻 60
2. 論文標題 Application of machine learning to stochastic effect analysis of chemically amplified resists used for extreme ultraviolet lithography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCC02 ~ SCCC02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abe802	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 Okamoto Kazumasa, Kozawa Takahiro	4. 巻 60
2. 論文標題 Estimation of electron affinity of photoacid generators: density functional theory calculations using static and dynamic models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCC03 ~ SCCC03
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf469	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto Kazumasa, Kawai Shunpei, Ikari Yuta, Hori Shigeo, Konda Akihiro, Ueno Koki, Arai Yohei, Ishino Masahiko, Dinh Thanh-Hung, Nishikino Masaharu, Kon Akira, Owada Shigeki, Inubushi Yuichi, Kinoshita Hiroo, Kozawa Takahiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Dependence of dose rate on the sensitivity of the resist under ultra-high flux extreme ultraviolet (EUV) pulse irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 066502 ~ 066502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abfca3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikeuchi Kengo, Muroya Yusa, Ikeda Takuya, Komuro Yoshitaka, Kawana Daisuke, Kozawa Takahiro	4. 巻 60
2. 論文標題 Study on radical dianions of carboxylates used as ligands of metal oxide nanocluster resists	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 076503 ~ 076503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac06db	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jin Yuqing, Kozawa Takahiro, Tamura Takao	4. 巻 60
2. 論文標題 Analysis of mitigating factors for line edge roughness generated during electron beam lithography using machine learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 076509 ~ 076509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac0d13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kozawa Takahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Formulation of trade-off relationships between resolution, line edge roughness, and sensitivity in sub-10 nm half-pitch region for chemically amplified extreme ultraviolet resists	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 016501 ~ 016501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac3ea7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Azumagawa Kazuki, Kozawa Takahiro	4. 巻 59
2. 論文標題 Analysis of trade-off relationships between resolution, line edge roughness, and sensitivity in extreme ultraviolet lithography using lasso regression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 076501 ~ 076501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab984e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Hiroki, Dawson Guy, Kozawa Takahiro, Robinson Alex P. G.	4. 巻 4
2. 論文標題 Lamellar Orientation of a Block Copolymer via an Electron-Beam Induced Polarity Switch in a Nitrophenyl Self-Assembled Monolayer or Si Etching Treatments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quantum Beam Science	6. 最初と最後の頁 19 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/qubs4020019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Maeda Naoki, Konda Akihiro, Okamoto Kazumasa, Kozawa Takahiro, Tamura Takao	4. 巻 59
2. 論文標題 Resist thickness dependence of line width roughness of chemically amplified resists used for electron beam lithography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 086501 ~ 086501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9fde	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikari Yuta、Okamoto Kazumasa、Konda Akihiro、Kozawa Takahiro、Tamura Takao	4. 巻 59
2. 論文標題 Heating effect of the radiation chemistry of polyhydroxystyrene-type chemically amplified resists	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 086506 ~ 086506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/aba7d7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Azumagawa Kazuki、Kozawa Takahiro	4. 巻 59
2. 論文標題 Regression analysis of photodecomposable quencher concentration effects on chemical gradient in chemically amplified extreme ultraviolet resist processes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 116505 ~ 116505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abc29d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Azumagawa Kazuki、Kozawa Takahiro	4. 巻 60
2. 論文標題 Application of machine learning to stochastic effect analysis of chemically amplified resists used for extreme ultraviolet lithography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCC02 ~ SCCC02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abe802	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 Enomoto Satoshi、Yoshino Takumi、Machida Kohei、Kozawa Takahiro	4. 巻 58
2. 論文標題 Incorporation of chemical amplification in dual insolubilization resists	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 056504 ~ 056504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab0645	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kudo Hiroto, Fukunaga Mari, Yamada Teppei, Yamakawa Shinji, Watanabe Takeo, Yamamoto Hiroki, Okamoto Kazumasa, Kozawa Takahiro	4. 巻 32
2. 論文標題 Synthesis and Property of Tellurium-Containing Molecular Resist Materials for Extreme Ultraviolet Lithography System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 805 ~ 810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.32.805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Teppei, Muroya Yusa, Yamashita Shinichi, Komuro Yoshitaka, Kawana Daisuke, Yamazaki Akiyoshi, Kozawa Takahiro	4. 巻 58
2. 論文標題 Pulse radiolysis of carboxylic acids used as ligands of metal oxide nanocluster resists	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 096504 ~ 096504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab3911	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kozawa Takahiro	4. 巻 58
2. 論文標題 Theoretical study on trade-off relationships between resolution, line edge roughness, and sensitivity in resist processes for semiconductor manufacturing by extreme ultraviolet lithography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 096502 ~ 096502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab37ff	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kozawa Takahiro, Santillan Julius Joseph, Itani Toshiro	4. 巻 32
2. 論文標題 Relationship between Resolution Blur and Stochastic Defect of Chemically Amplified Resists Used for Extreme Ultraviolet Lithography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 161 ~ 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.32.161	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuneishi Asuka, Uchiyama Sachiyo, Kozawa Takahiro	4. 巻 57
2. 論文標題 Dissolution behavior of negative-type photoresists for display manufacture studied by quartz crystal microbalance method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 046501 ~ 046501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.046501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Enomoto Satoshi, Kozawa Takahiro	4. 巻 36
2. 論文標題 Study of electron-beam and extreme-ultraviolet resist utilizing polarity change and radical crosslinking	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena	6. 最初と最後の頁 031601 ~ 031601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/1.5023061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuneishi Asuka, Sakamaki Daisuke, Gao Qi, Shoda Takayuki, Kozawa Takahiro, Seki Shu	4. 巻 57
2. 論文標題 Comparison of radical generation efficiencies of the oxime-based initiator radicals using galvinoxyl radical as an indicator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 086504 ~ 086504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.086504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuneishi Asuka, Uchiyama Sachiyo, Hayashi Ryouta, Taki Kentaro, Kozawa Takahiro	4. 巻 57
2. 論文標題 Relationship between C=C double bond conversion and dissolution kinetics in cross-linking-type photoresists for display manufacture, studied by real-time Fourier transform infrared spectroscopy and quartz crystal microbalance methods	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 096501 ~ 096501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.096501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kudo Hiroto, Fukunaga Mari, Shiotsuki Kohei, Takeda Hiroya, Yamamoto Hiroki, Kozawa Takahiro, Watanabe Takeo	4. 巻 131
2. 論文標題 Synthesis of hyperbranched polyacetals containing C-(4-t-butylbenz)calix[4]resorcinarene: Resist properties for extreme ultraviolet (EUV) lithography	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Reactive and Functional Polymers	6. 最初と最後の頁 361 ~ 367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.reactfunctpolym.2018.08.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Vesters Yannick, Jiang Jing, Yamamoto Hiroki, De Simone Danilo, Kozawa Takahiro, De Gendt Stefan	4. 巻 17
2. 論文標題 Sensitizers in extreme ultraviolet chemically amplified resists: mechanism of sensitivity improvement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JMM.17.4.043506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kozawa Takahiro	4. 巻 57
2. 論文標題 Analysis of dissolution factor of line edge roughness formation in chemically amplified electron beam resist	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 126502 ~ 126502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.126502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Enomoto Satoshi, Yoshino Takumi, Machida Kohei, Kozawa Takahiro	4. 巻 58
2. 論文標題 Effects of an organotin compound on radiation-induced reactions of extreme-ultraviolet resists utilizing polarity change and radical crosslinking	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 016504 ~ 016504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/aae986	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計24件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 24件)

1. 発表者名 Takahiro Kozawa
2. 発表標題 Current status and prospect of extreme ultraviolet resists
3. 学会等名 7th EUV-FEL Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahiro Kozawa
2. 発表標題 Defect Risks in Chemically Amplified Resists Used for Extreme Ultraviolet Lithography
3. 学会等名 SPIE Photomask Technology + EUV Lithography (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuqing Jin, Tomoe Otsuka, Naoki Tanaka, Takahiro Kozawa
2. 発表標題 Effect of surface free energy of organic underlayer on dissolution kinetics of poly(4-hydroxystyrene) film in tetramethylammonium hydroxide aqueous developer
3. 学会等名 SPIE Photomask Technology + EUV Lithography (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuqing Jin, Takahiro Kozawa
2. 発表標題 Bayesian optimization-based estimation of effective reaction radius of chemically amplified resist in acid catalyzed deprotection reaction
3. 学会等名 SPIE Photomask Technology + EUV Lithography (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Enomoto, Kohei Machida, Michiya Naito, Takahiro Kozawa
2. 発表標題 Study of RLS trade-off mitigation utilizing an organotin-containing chemically amplified resist for high sensitivity patterning
3. 学会等名 SPIE Photomask Technology + EUV Lithography (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuqing Jin, Takahiro Kozawa, Kota Aoki, Tomoya Nakamura, Yasushi Makihara, and Yasushi Yagi
2. 発表標題 Chemical information extraction from scanning electron microscopy images on the basis of image recognition
3. 学会等名 IEUVI Resist TWG meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahiro Kozawa
2. 発表標題 Application of machine learning to development of chemically amplified resist materials and processes
3. 学会等名 The 39th International Conference of Photopolymer Science and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiko Harumoto, Andreia Figueiredo dos Santos, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani, and Takahiro Kozawa
2. 発表標題 Photoresist stochastic defect generation depending on alkalibased developer 's alkyl chain length and concentration
3. 学会等名 MNC2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuqing Jin, Takahiro Kozawa, Kota Aoki, Tomoya Nakamura, Yasushi Makihara, and Yasushi Yagi
2. 発表標題 Chemical information extraction from scanning electron microscopy images on the basis of image recognition
3. 学会等名 SPIE Advanced Lithography + Patterning (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kozawa
2. 発表標題 Stochastic Effects in Chemically Amplified Resists Used for Extreme Ultraviolet Lithography
3. 学会等名 SPIE Photomask Technology and the Extreme Ultraviolet Lithography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kozawa
2. 発表標題 Mechanism of electron beam resists
3. 学会等名 Photomask Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kozawa and T. Tamura
2. 発表標題 Resist thickness dependence of latent images in chemically amplified resists used for electron beam lithography
3. 学会等名 38th Int. Conf. Photopolymer Science and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kozawa
2. 発表標題 EUVL Stochastics Symposium
3. 学会等名 MNC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Kozawa, Kyoko Watanabe, Kyoko Matsuoka, Naoki Tanaka, Kazuki Azumagawa, Takuya Ikeda, Yoshitaka Komuro and Daisuke Kawana
2. 発表標題 Study on dependence of transient swelling layer formation on molecular weight and dispersion of backbone polymer of chemically amplified EUV resists
3. 学会等名 SPIE Photomask Technology + Extreme Ultraviolet Lithography (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Azumagawa and Takahiro Kozawa
2. 発表標題 Machine Learning of Stochastic Effects in Chemically Amplified Resists Used for Extreme Ultraviolet Lithography
3. 学会等名 MNC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kengo Ikeuchi, Tomoe Otsuka, Yusa Muroya, Takahiro Kozawa, Takuya Ikeda, Yoshitaka Komuro and Daisuke Kawana
2. 発表標題 Study on Primary Process of Beam-Induced Reaction of Metal Resist Ligands
3. 学会等名 MNC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazumasa Okamoto and Takahiro Kozawa
2. 発表標題 Estimation of Electron Affinity of Photoacid Generators: Density Functional Theory Calculations Using Static and Dynamic Models
3. 学会等名 MNC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Azumagawa and Takahiro Kozawa
2. 発表標題 Regression analysis of photodecomposable quencher concentration effects on chemical gradient in chemically amplified extreme ultraviolet resist processes
3. 学会等名 SPIE Advanced Lithography (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kozawa
2. 発表標題 Radiation chemistry in Chemically Amplified Resists Used for Extreme Ultraviolet Lithography
3. 学会等名 2nd ELENA Conf. (Leuven, Belgium, Sep. 4-6, 2019), (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani
2. 発表標題 Relationship between Resolution Blur and Stochastic Defect of Chemically Amplified Resists Used for Extreme Ultraviolet Lithography
3. 学会等名 The 36th International Conference of Photopolymer Science and Technology (Makuhari Messe, Chiba, Japan, June 24-27, 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Kozawa
2 . 発表標題 Theoretical study of line edge roughness and stochastic defect generation
3 . 学会等名 SPIE Photomask Technology + EUV Lithography (Monterey, California, Sep. 16-19, 2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Kozawa, T. Yamada, S. Ishihara, H. Yamamoto, Y. Muroya, J. J. Santillan, and T. Itani
2 . 発表標題 Pattern formation mechanism of zirconia nanoparticle resist used for extreme-ultraviolet lithography
3 . 学会等名 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani
2 . 発表標題 Stochasticity in EUV lithography
3 . 学会等名 16th Fraunhofer IISB Lithography Simulation Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Kozawa, T. Yamada, Y. Muroya, J. J. Santillan, and T. Itani
2 . 発表標題 Analysis of line-and-space patterns of ZrO ₂ nanoparticle resist on the basis of EUV sensitization mechanism
3 . 学会等名 SPIE Advanced Lithography (国際学会)
4 . 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪大学産業科学研究所古澤研究室
https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bms/

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
研究分担者	岡本 一将 (Okamoto Kazumasa) (10437353)	大阪大学・産業科学研究所・助教 (14401)	
研究分担者	室屋 裕佐 (Muroya Yusa) (40334320)	大阪大学・産業科学研究所・准教授 (14401)	
研究分担者	大沼 正人 (Ohnuma Masato) (90354208)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	

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
---------	---------