

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04519

研究課題名(和文)電子ビームリソグラフィにおける無帯電露光条件の体系化

研究課題名(英文)Systematization of Non-Charging Exposure Conditions in Electron Beam Lithography

研究代表者

小寺 正敏 (KOTERA, MASATOSHI)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：40170279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：現有の走査電子顕微鏡内に独自に開発した静電気力顕微鏡を導入し、電子ビーム露光を受けた直後のレジスト表面電位を測定した。電子ビーム加速電圧が30kVのときレジスト表面電位が無帯電になる露光量条件が2つあることを発見し、正帯電・負帯電の機構を提唱し妥当性を確認した。無帯電露光条件の体系化に向けて、加速電圧を0.5kV～30kVまで変化して表面電位露光量依存性を調べたところ、0.6kVでは大露光量で無帯電が続くことを発見しその機構を説明した。一方一つの加速電圧に対する一連の露光量の表面電位測定には長時間を要するため、深層学習によって任意の加速電圧に対する表面電位を予測するプログラムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最先端LSIを製造するにはSi基板表面の超微細加工技術が重要であり、その加工パターン原版となるフォトマスクを高精細にパターンニングすることが必須である。このための電子ビームリソグラフィ技術では、電気絶縁性の高いレジストが帯電して描画パターンが歪む現象を避けなければならない。我々はフォトマスクの電子ビームリソグラフィで帯電しない条件を発見した。本研究ではこの無帯電となる条件を体系化して広範囲露光条件で帯電の影響を受けないリソグラフィを実現しようとしている。

研究成果の概要(英文)：We introduced an electrostatic force microscope that we originally developed into the existing scanning electron microscope and measured the resist surface potential immediately after electron beam exposure. We found that there are two exposure conditions under which the resist surface potential becomes charge-free when the electron beam acceleration voltage is 30 kV, and proposed the mechanism of positive charge and negative charge, and confirmed its validity. In order to systematize the charge-free exposure conditions, we varied the acceleration voltage from 0.5 kV to 30 kV and investigated the dependence of the surface potential on the exposure dose. On the other hand, since it takes a long time to measure the surface potential for a series of exposures for a single acceleration voltage, we developed a program to predict the surface potential for arbitrary acceleration voltages by deep learning.

研究分野：電子ビームリソグラフィ

キーワード：電子ビームリソグラフィ レジスト帯電現象の解析 静電気力顕微鏡 電子ビーム誘起導電現象 無帯電条件 フォギング電子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来から電子ビームリソグラフィの空間分解能は、入射電子ビームの試料内部の散乱現象によって決まるとされていた。また絶縁性のレジスト膜内の電荷蓄積による帯電の可能性は知られていたが、定量的な電位分布はよく知られていない状態であった。特に電子ビーム試料表面から反射した電子が真空試料室内の対物レンズ電極との間で多重散乱して試料表面の広範囲に降り注ぐ電子(フォッキング電子)の影響について、シミュレーションでは定量的に算出できるが現実的な影響は知られておらず、ましてやそれらを除去する方法があるとの認識はなかった。その状況の中で、我々の研究によって電子ビーム照射範囲だけでなくそこから数 mm に至る広大な領域すべてで帯電電位が 0V になる条件があることが分かってきた状況にあった。

2. 研究の目的

(1) 電子ビームリソグラフィ技術における無帯電露光条件の体系化に向けて無帯電となる加速電圧について様々な露光量条件を調査して試料内で起こる帯電現象について系統的に考察する。
(2) 大露光量で電子ビームを照射しても表面が無帯電になる加速電圧 0.6kV の条件で見られる電位分布の変化を詳細に調査し考察する。
(3) 実験結果を得るには長時間を要するので深層学習による解析で実験結果の間を埋めて実験していない表面電位を予測する AI プログラムを開発する。

3. 研究の方法

(1) 走査電子顕微鏡の真空試料室内に独自開発の静電気力顕微鏡(EFM)を導入し、レジスト薄膜が塗布されたフォトマスクへ電子ビーム(EB)露光を行い、EB リソグラフィ技術における無帯電露光条件の体系化のために、EB の加速電圧を大きく変化させて試料表面のビーム照射領域の表面電位の露光量依存性を求めた。
(2) 特に加速電圧が 0.6kV のときに見られた大露光量での表面電位無帯電の条件について、EB 照射において試料が数 mm 範囲のマクロ領域においても数 10 μm 範囲のミクロ領域においても無帯電となるのかについて詳細に調べた。
(3) 本研究での実験では、1 つの加速電圧に関する露光量依存性の 1 連の結果を得るのに数日の時間を要する。そこで実験結果間を合理的に内挿すれば実験をしていない加速電圧での表面電位の露光量依存性は人工知能的解析により求める AI プログラムが実現できないか検討した。

4. 研究成果

(1) 試料はガラス基板上 70nm 厚 Cr 膜上に塗布された 160nm 厚のレジスト(PRL009)で、EB の加速電圧を 30kV から 0.5kV まで変化させて露光を行い、その後に EFM により表面電位を測定することでその露光量依存性を求めた。露光中の試料への印加バイアスは -5V、WD25mm の条件で EB 照射中心から $\pm 0.5\text{mm}$ の範囲を 0.02mm 間隔で表面電位を測定した。EB 照射範囲は $100\mu\text{m} \times 160\mu\text{m}$ で、照射中心を測定したのは EB 照射から 10 分 30 秒後である。照射中心の表面電位の露光量依存性を図 1 に示す。加速電圧が 30kV ~ 2.5kV の範囲では表面電位が 0V を示す無帯電条件が 2 回見られ、加速電圧の低下に伴いより低露光側でゼロクロスすることが分かった。加速電圧が 2.3kV ~ 1kV の範囲では表面電位の露光量依存性では複雑な変化を示すが、これは試料に入射した電子がレジスト内部に蓄積して内部電位を形成することと Cr 層が 0 電位に固定されるために電界が生じて電荷が移動することのバランスによって生じるものであると結論付けられた。加速電圧が 0.9kV ~ 0.5kV の場合には入射した EB は表面からの二次電子放出可能な深さと同程度にしか到達せず、特に 0.6kV のときには表面に近い部分で局所的に起こる電子ビーム誘起導電現象(EBIC)で表面に向けて移動し表面から流出する電荷量と入射してくる電子電荷量が平衡状態になり、大露光量でも表面電位 0V が保持されることが分かった。これはいわゆる低加速 SEM として知られる絶縁物表面の長時間観察で、表面の帯電の影響なしに安定した観察ができる条件で起こっている現象を定量的に説明したことに相当する。

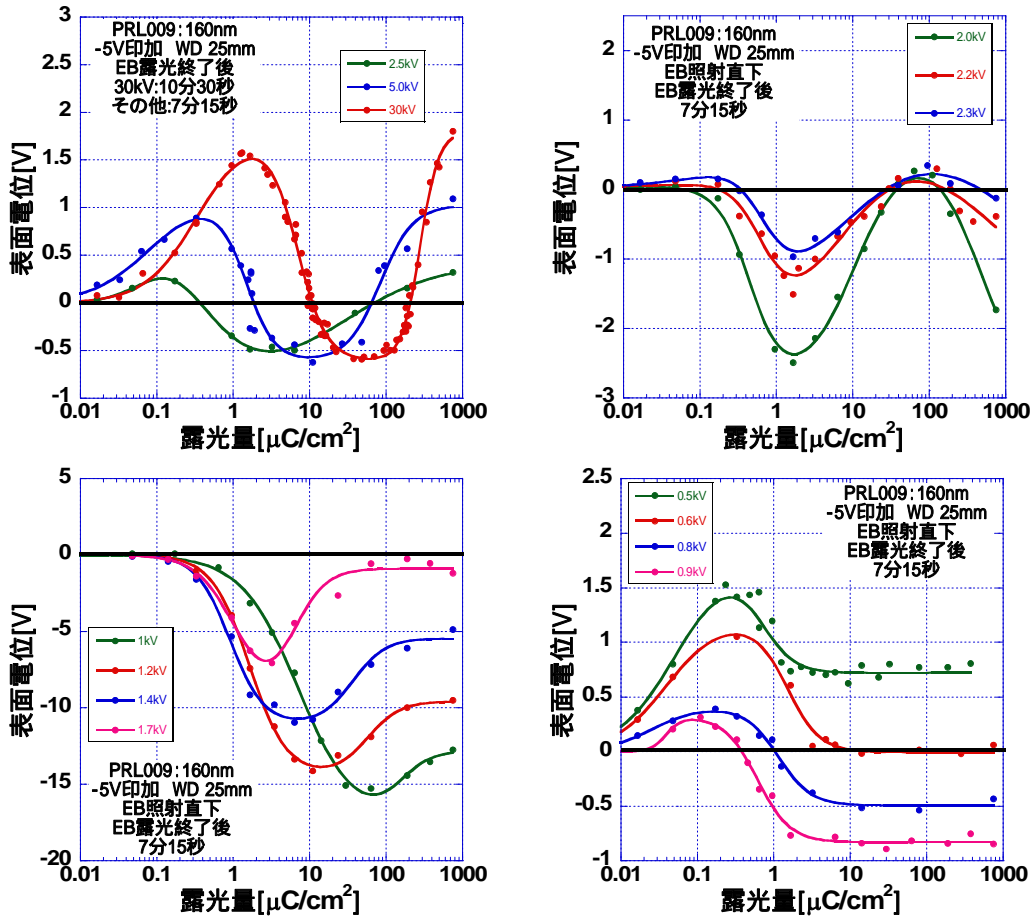


図 1 . 異なる加速電圧での試料表面電位の EB 露光量依存性

(2) 特に加速電圧が 0.6kV のときに見られた大露光量での表面電位無帯電の条件について、図 2 に各露光量での表面電位分布を示す。照射範囲 $\pm 50 \mu\text{m}$ に対して $\pm 0.5\text{mm}$ の範囲を測定した。図に示すように露光量 $1.66 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ まではシングルピークの表面電位分布が見られるが、露光量 $4.78 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ では、ビーム直下の表面電位だけ周囲より先んじて下がる M 型の分布が見られた。さらに露光量を上げるとビーム直下がほぼ 0V である一方、ビーム照射領域近傍 0.04mm では約 $0.3 \sim 0.5\text{V}$ の M 型の表面電位分布のまま、ほとんど変化しなくなることが分かった。これはビーム中心ほど電子密度が高く、また中心だけが電子が蓄積できる深さに到達できたからだと考えられる。ここでの最大露光量は通常の SEM 観察における 1000 倍で約 3 時間連続して電子ビームを当て続けて観察する条件に当たり、完全な試料無帯電露光条件であるといえる。

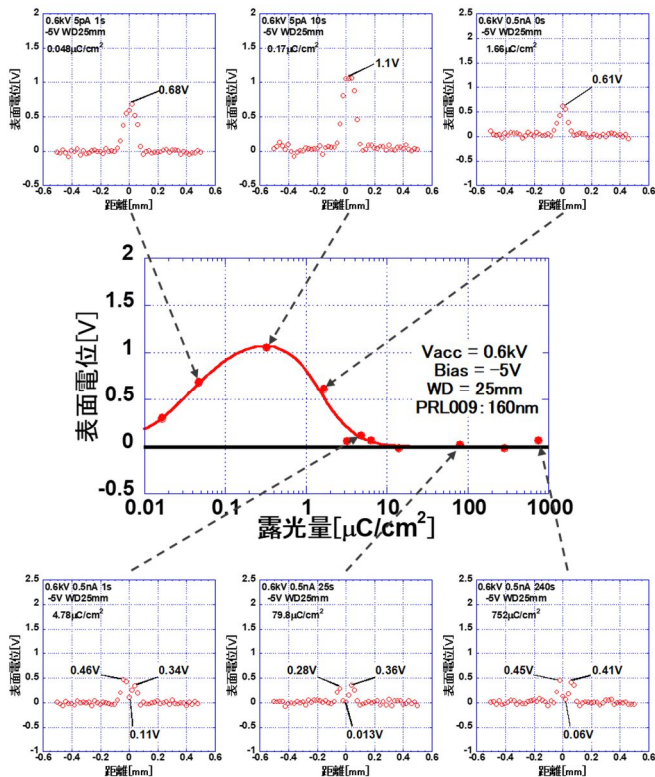


図 2 . 加速電圧 0.6kV での表面電位分布の露光量依存性

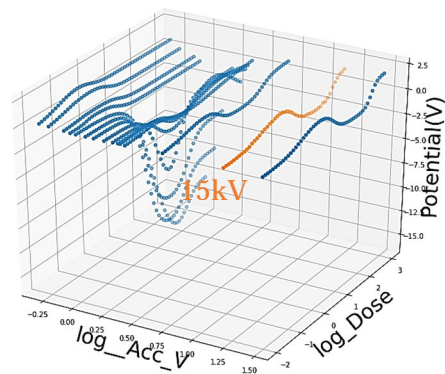


図 3 深層学習で予測した表面電位

(3) 本研究の実験では、1つの加速電圧における表面電位分布の露光量依存性について1連の結果を得るのには数日の時間を要する。そこで実験結果間を合理的に内挿することができれば、実験をしていない加速電圧での表面電位の露光量依存性を求めることができないかを検討した。図3は深層学習によって、実験値の存在しない加速電圧15kVにおける表面電位の露光量依存性を予測したものである。上述の図に示されたすべての加速電圧における表面電位の露光量依存性を元データとして読み込み、加速電圧・露光量・表面電位について多重回帰を行うことで実験値の存在しない加速電圧で表面電位の露光量依存性を求めることができた。実験値のない加速電圧に対する表面電位分布は従前なら定性的な分布を想像するしかなかったが、この度の深層学習によって任意の加速電圧の表面電位の露光量依存性を導出できる。得られた結果は人工知能によって得られた繰り返し再現可能な定量的な分布であるため今後の同様の解析に大きな価値がある。

(4) まとめ：

電子ビームリソグラフィ技術における無帯電露光条件の体系化に向けて無帯電となる加速電圧について様々な露光量条件を調査して試料内で起こる帯電現象について系統的に考察することができた。大露光量で電子ビームを照射しても表面が無帯電になる加速電圧0.6kVの条件で見られる電位分布の変化を詳細に調査し考察することができた。実験結果のない加速電圧での表面電位の露光量依存性を深層学習による解析で得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 1件）

1. 著者名 Kubo Kento, Kojima Kentaro, Kono Yoshinobu, Kotera Masatoshi	4. 巻 60
2. 論文標題 Investigation of non-charging exposure conditions for insulating resist films in electron beam lithography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCB02 ~ SCCB02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf46a	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 小寺正敏	4. 巻 2A-1478
2. 論文標題 電子ビーム照射を受けた導体上レジスト薄膜の帯電現象の解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 荷電粒子ビームの工業への応用第132委員会第242回研究会資料	6. 最初と最後の頁 15-22
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 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 Hideya Mizuno, Kento Kubo, Kentaro Kojima, Masatoshi Kotera	4. 巻 18
2. 論文標題 Non-charging Conditions of Insulating Film under Electron Beam Irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 106-109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2020.106	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28件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 17件）

1. 発表者名 河野 由伸, 小島 健太郎, 小寺 正敏
2. 発表標題 電子ビームリソグラフィにおけるレジスト帯電の分析
3. 学会等名 第82回応用物理学会周期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinobu Kono, Kentaro Kojima and Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Analysis of resist charging in electron beam lithography
3. 学会等名 Micro and Nano Engineering Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Kojima, Kento Kubo, Yoshinobu Kono and Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Investigation of Non-Charging Exposure Conditions for Insulating ResistFilms in Electron Beam Lithography
3. 学会等名 The 64th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小寺正敏
2. 発表標題 電子ビーム照射を受けた導体上レジスト薄膜の帯電現象の解析
3. 学会等名 応用物理学会次世代リソグラフィ (NGL) 技術研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinobu Kono, Kentaro Kojima, Kento Kubo and Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Effect of Time Variation on Charging Phenomenon and Exposure Dose Dependency of Surface potential
3. 学会等名 Photomask Japan 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kento Kubo, Kentaro Kojima Yoshinobu Kono and Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Investigation of non-charging exposure conditions for insulating resist films in electron beam lithography
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Kojima, Kento Kubo, Yoshinobu Kono and Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Potential distribution on the resist surface after electron beam irradiation with respect to resist thickness and elapsed time
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小寺正敏、水野秀哉、久保建統、小島健太郎
2. 発表標題 電子ビームリソグラフィにおけるレジストの無帯電露光条件
3. 学会等名 2020年度実用表面分析講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小寺 正敏
2. 発表標題 電子ビーム照射を受けた導体上レジスト薄膜の帯電現象の解析
3. 学会等名 荷電粒子ビームの工業への応用第132委員会第242回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小島 健太郎、久保 建統、河野 由伸、小寺 正敏
2. 発表標題 電子ビームリソグラフィにおけるレジスト無帯電の露光条件探索
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小寺正敏
2. 発表標題 電子ビームリソグラフィにおける無帯電条件について
3. 学会等名 2020 年度日本顕微鏡学会SEM の物理学分科会討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kento Kubo, Hideya Mizuno and Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Investigation of Non-Charging Exposure Condition in Electron Beam Lithography
3. 学会等名 Photomask Japan 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Morimoto, Yuka Ito, Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Measurement Of Scattered Electron Current Distribution In Scanning Electron Microscope
3. 学会等名 Microscience Microscopy Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuka Ito, Kentaro Morimoto, Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Simulation Of Electron Trajectories In Scanning Electron Microscope Specimen Chamber
3. 学会等名 Microscience Microscopy Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kento Kubo, Hideya Mizuno and Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Investigation Of Non-Charging Exposure Condition In Electron Beam Lithography
3. 学会等名 Microscience Microscopy Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Kotera, Kento Kubo and Hideya Mizuno
2. 発表標題 Non-Charging Exposure Condition of Insulating Resist in Electron Beam Lithography
3. 学会等名 International Materials Research Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Morimoto, Yuka Ito, Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Measurement of absorbed current for quantitative evaluation of scattered electrons in a scanning electron microscope
3. 学会等名 Microscopy Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuka Ito, Kentaro Morimoto, Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Simulation of multiply scattered electron trajectories in scanning electron microscope specimen chamber
3. 学会等名 Microscopy Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideya Mizuno, Kento Kubo, Kentaro Kojima and Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Non-charging conditions of insulating film under electron beam irradiation
3. 学会等名 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kento Kubo, Hideya Mizuno, Kentaro Kojima and Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Observation of charging image of insulating film under electron beam irradiation
3. 学会等名 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Kotera, Kento Kubo, Kentaro Kojima, Hideya Mizuno
2. 発表標題 Non-Charging Exposure Conditions of Insulating Resist in Electron Beam Lithography
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideya Mizuno, Kento Kubo, Kentaro Kojima, Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Investigation of Non-Charging Exposure Condition in Electron Beam Lithography
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Morimoto, Yuka Ito, Masatoshi Kotera
2. 発表標題 Measurement of absorbed current for quantitative evaluation of scattered electrons in a scanning electron microscope
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保建統, 水野秀哉, 小寺正敏
2. 発表標題 電子ビームリソグラフィにおけるレジスト無帯電の露光条件探索
3. 学会等名 NGL(次世代リソグラフィ)研究会ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野秀哉, 久保建統, 小島健太郎, 小寺正敏
2. 発表標題 電子ビームリソグラフィにおけるレジスト無帯電の露光条件探索
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森本 健太郎, 伊藤 優花, 小寺 正敏
2. 発表標題 走査電子顕微鏡における散乱電子の定量的評価のための吸収電流の測定
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 優花, 森本 健太郎, 小寺正敏
2. 発表標題 走査電子顕微鏡試料室における多重散乱電子軌道のシミュレーション
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小寺正敏
2. 発表標題 低エネルギー電子の試料室内部での散乱
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 SEMの物理学分科会討論会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 松井 真二、高岡 義寛、臼井 博明、谷口 淳、八坂 行人、高橋 由夫、桑原 真、糟谷 圭吾、豊田 紀章、千葉敦也、百田 佐多生、岡山重夫、近藤行人、森下茂幸、村田 英一、安田雅昭、小寺 正敏、古澤 孝弘、園山 百代、揚村 寿英 他	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日刊工業新聞社	5. 総ページ数 593
3. 書名 電子・イオンビーム ハンドブック第4版	

〔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
---------	---------