

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月21日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06324

研究課題名(和文)電子ビームリソグラフィにおける帯電の影響低減のための帯電現象のマルチスケール解析

研究課題名(英文) Multiscale analysis of charging phenomena to reduce the effects of charging 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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：走査電子顕微鏡を用い(1)試料台上に配置された電極に捕集される電流分布の測定、(2)照射を受けた絶縁物表面の電位分布の静電気力顕微鏡を用いた測定、(3)同条件で物質内外の電子散乱のシミュレーションと電荷分布のポアソン方程式の連立によって試料内外の電位分布をマルチスケールで解析するという3種類のアプローチで研究を進めた。

本研究では、電子ビームリソグラフィにおいて加速電圧30kV、ビーム電流1.2nAの大電流電子ビームを60秒間試料に露光しても試料がミクロからマクロに至るスケールで帯電しない条件を見出した。その時に試料内部で起こっている現象について定量的・論理的に説明できる結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後の最先端の半導体集積回路製造における超微細加工を実現するためには電子ビームリソグラフィは不可欠の技術である。ところがリソグラフィーで用いられる最先端レジストの導電率は低く、電子ビーム照射によって帯電する。帯電過程を調査する中で、電子ビームが照射領域の試料を帯電させるだけでなく、試料と試料に対向する対物レンズ電極との間で多重散乱して広がった電子(フォギング電子)による帯電の影響があることが分かった。本研究では実験とシミュレーションによる理論解析の両面から、電子ビームリソグラフィにおけるレジスト膜の無帯電露光条件を探索することを目的とし、上記の解析に基づき当該条件を見出すことができた。

研究成果の概要(英文)：Using scanning electron microscope, (1) Measurement of current distribution collected on electrodes placed on the specimen, (2) Measurement of potential distribution on the surface of irradiated insulator using electrostatic force microscope were done. Under the same conditions of the experiment (3) multi-scale analysis of potential distribution in and out of the specimen was done by combining electron scattering simulation and the Poisson's equation based on the charge distribution.

In this study, we found the condition that the specimen did not charge on the scale from local to global in electron beam lithography, under the condition that the beam current was as high as 1.2 nA and the exposure time is as long as 60 seconds, when the electron beam accelerating voltage is 30 kV.

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 静電気力顕微鏡 フォギング電子 電子散乱のシミュレーション レジスト 無帯電露光条件 マルチスケール解析

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-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。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（フォギング電子）の影響はあると予想はされていたがそれほど大きなものとは認識されていなかった。その状況の中で、我々は試料を中心とする数 cm 直径の円環電極を置いたところ、それに流入する電子電流が測定にかかり、そのような遠方にまで広がるフォギング電子は実際に存在することが分かってきた状況にあった。

### 2. 研究の目的

(1) 試料表面のビーム照射領域から数 mm の範囲の表面電位分布を知るために走査電子顕微鏡の真空試料室内に独自の静電気力顕微鏡 (EFM) システムを導入し、フォギング電子の空間分布を明らかにし、フォギング電子が存在する中での電子ビームリソグラフィの無帯電条件を探索する。

(2) ビーム直下を中心とする同心円状の円環電極を SEM 試料室に設置して、各電極からの吸収電流を測定することによりフォギング電子の空間分布・エネルギー分布を定量的に求める。

(3) 導電試料内の電子散乱だけでなく絶縁物内で起こる電子ビーム誘起導電を考慮した、数 nm オーダーで起こる現象のシミュレーションを開発するとともに、試料内の蓄積電荷分布や試料が置かれた真空試料室内の電位分布の影響を考慮した、cm オーダーで見られる三次元電子軌道を追跡するシミュレーションを開発し、ナノからセンチにいたるマルチスケールで帯電現象を解析できるシミュレーションを開発する。

### 3. 研究の方法

(1) フォギング電子のエネルギー分布を知るために以下の 2 つの方法を実施した。①試料表面と対物レンズ間の電圧(バイアス)を変化させて同一電界を設定し、試料表面に降り注ぐフォギング電子に対してローパスフィルタを形成し、フォギング電子のエネルギー分布を求める。②試料への印加バイアスを変化させることで得られる表面電位分布の変化からフォギング電子のエネルギー分布を求める。

(2) 同上的ように、試料と円環電極にバイアス電圧を印加して、ビーム直下を中心とする同心円状の円環電極における吸収電流の変化からその空間分布とエネルギー分布を明らかにする。

(3) 試料に入射した一次電子の散乱現象(角度散乱・エネルギー損失)をモンテカルロシミュレーションにより求め、一次電子のエネルギー損失量に相当する二次電子数のカスケード増殖する軌道を計算する。二次電子電離が起これば局所的に正帯電、電子の停止が起これば局所的に負帯電するとして絶縁物内の電荷蓄積分布を求める。この電荷分布と共に電子ビーム誘起導電分布による正・負電荷の試料中の移動を考慮したシミュレーションを開発する。一方、試料表面から放出され真空の試料室内の電位分布の影響を考慮して三次元の電子軌道を追跡しマルチスケールで帯電現象を解析できるシミュレーションを開発する。

### 4. 研究成果

(1) ①バイアス電圧と試料-対物レンズ間距離の様々な組み合わせで形成した 1V/mm の同一電界下で、5~25eV 以下のエネルギーを持つ電子をレジストに吸着させるローパスフィルタを実現すると、図 1 のようにほぼ同一の分布が得られ、フォギング電子のエネルギーはほぼ 5eV 以下であることが分かった。②電子ビーム露光中の印加バイアスを -5V に設定するとフォギング電子の影響が無くなった。ビーム電流 1.1nA で 45 秒間照射の結果と、10nA で 6 秒間照射の結果すなわち総露光量として約 350  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  の時のレジスト表面電位分布は図 2 に示すように、これほど大きな露光量で電子ビーム照射を行っているにもかかわらず、試料表面は EFM の限界分解能である 0.1V 以下の電位に収まる、いわゆる無帯電状態が実現されることが分かった。

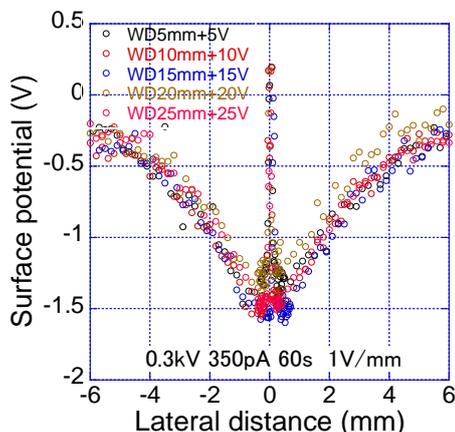


図 1. 同一電界での表面電位分布

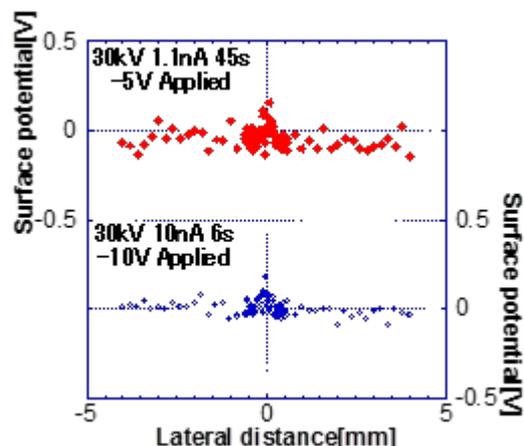


図 2. 無帯電露光条件

(2) フォギング電子電流測定実験では、図3に示すように電子ビームの照射点周辺に置かれた複数の環状電極に流れる電流量をそれぞれの電極面積で除して、図4に示すようなフォギング電子の電流密度の半径分布を得ることが出来た。この結果は次に述べるシミュレーションによる結果に非常に近いものであり、またバイアス印加による分布の差からエネルギー分布も求めた。

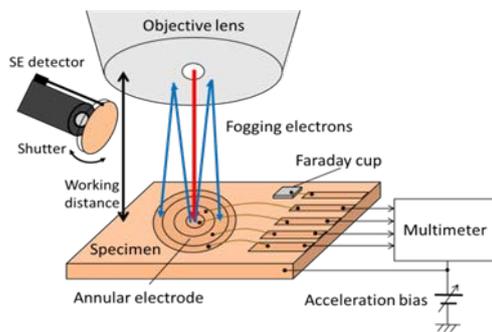


図3. フォギング電子の半径方向分布測定

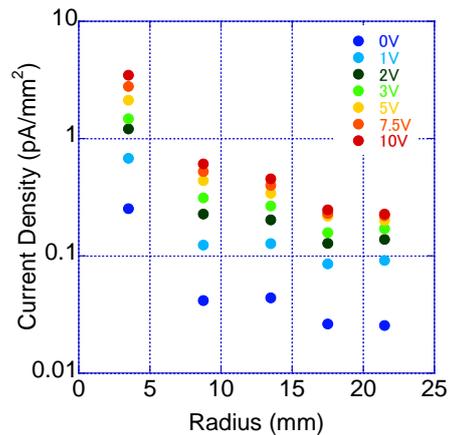


図4. 単位面積当たりの電子電流分布

(3) 試料内ならびに対物レンズ電極内の電子の角度散乱とエネルギー損失と二次電子軌道を考慮し、試料または対物レンズ電極内から真空中に放出されてから、真空中に置かれた電極に印加された電位が作る電界によって電子軌道が湾曲する現象を考慮したシミュレーションを開発し、そこで得られた電子軌道の例を図5に示す。二次電子検出器の電子捕集電位は+10kVである。捕集された電子の内訳は図6に示すように、ビームエネルギーが1keV以下では一次電子の作る二次電子 (SE1) が最も多く、それ以上になると反射電子が試料表面で作る二次電子 (SE2) の割合が増加する。フォギング電子の寄与については本研究によって初めて定量化することができた。

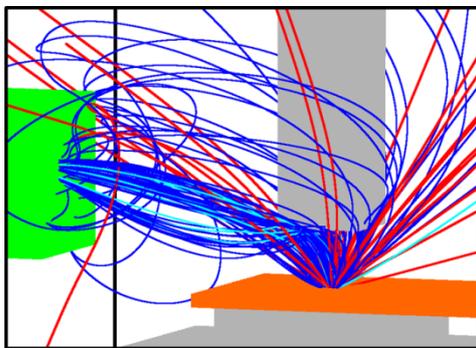


図5. 試料内電子散乱を含む試料室内電子軌道

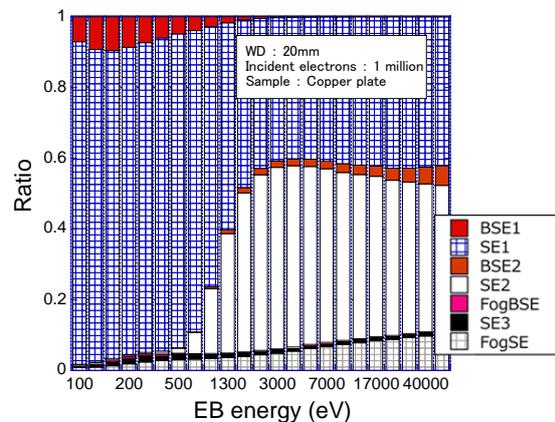


図6. 検出器に捕集される電子の種類

(4) まとめ：

電子ビーム照射を受けた試料内で電子は散乱を受け、試料内の一次電子や二次電子の一部が反射電子として表面から放出され、試料に対向する対物レンズ電極内に入り、同様に散乱を受けながら二次電子をつくり、再び真空試料室内に出るなど真空中を電子は往復する。このようにして生成されるフォギング電子について3種類の解析を行い、それらで得られた結果間の関係も踏まえてフォギング電子の空間分布・エネルギー分布をマルチスケールで知ることができた。上記情報に基づき、本研究の目的であった、フォトマスク試料への電子ビームリソグラフィにおける無帯電露光の条件の存在を確認し、その理由についても定量的な説明が可能となった。

## 5. 主な発表論文等 (研究代表者に下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Yuka Ito, Takatoshi Donga, Kentaro Morimoto and Masatoshi Kotera:Simulation of fogging electron trajectories in a scanning electron microscope, Proc. SPIE 10810, Photomask Technology 2018, 108100B (3 October 2018);査読有 doi: 10.1117/12.2504822.

〔学会発表〕（計49件）

1. 小寺正敏 : SEM 試料室内散乱電子の解析、2018 年度 日本顕微鏡学会 SEM の物理学分科会研究会、(2018.12.13) (東京)
2. Yuka Ito, Takatoshi Donga, Kentaro Morimoto, Masatoshi Kotera, Three-Dimensional Trajectory Simulation of Fogging Electrons in Scanning Electron Microscope, 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2018.11.15 (Sapporo).
3. Hideya Mizuno, Shota Nishimura, Kento Kubo, Masatoshi Kotera, Energy Analysis of Fogging Electrons by The Same Electric Field , 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2018.11.15 (Sapporo).
4. Kentaro Morimoto, Takatoshi Donga, Yuka Ito, Masatoshi Kotera, Energy Analysis of Fogging Electrons in Scanning Electron Microscope, 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference, (MNC2018), 2018.11.15 (Sapporo).
5. Shota Nishimura, Hideya Mizuno, Masatoshi Kotera, Investigation of Non-Charging Condition of Resist in Electron Beam Lithography , 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference, (MNC2018), 2018.11.15 (Sapporo).
6. 水野秀哉, 西村将太, 久保建統, 小寺正敏, 同一電界によるフォギング電子のエネルギー分析、第79回応用物理学会秋季学術講演会、(2018.9.21) (名古屋).
7. 西村将太, 水野秀哉, 久保建統, 小寺正敏, 電子ビーム照射された絶縁体試料表面電位分布の負バイアス依存性、第79回応用物理学会秋季学術講演会 (2018.9.20) (名古屋).
8. Yuka Ito, Takatoshi Donga, Kentaro Morimoto, Masatoshi Kotera, Simulation of fogging electron trajectories in a scanning electron microscope (招待講演), SPIE Photomask Technology + EUV Lithography 2018, 2018.9.17. (California, USA).
9. Shota Nishimura, Hideya Mizuno, Masatoshi Kotera, Flare electrons that cause positive charging by scattering in scanning electron microscope, 19th International Microscopy Congress, 2018.9.11. (Sydney, Australia).
10. Yuka Ito, Takatoshi Donga, Kentaro Morimoto, Masatoshi Kotera, Three-dimensional trajectory simulation of scattered electrons in scanning electron microscope specimen chamber, 19th International Microscopy Congress, 2018.9.11. (Sydney, Australia).
11. Kentaro Morimoto, Yuka Ito, Masatoshi Kotera, Measurement of scattered electron current distribution in scanning electron microscope, 19th International Microscopy Congress, 2018.9.11. (Sydney, Australia).
12. Takatoshi Donga, Yuka Ito, Masatoshi Kotera, Time evolution simulation of scattered electrons in scanning electron microscope specimen chamber, 19th International Microscopy Congress, 2018.9.11. (Sydney, Australia).
13. Hideya Mizuno, Shota Nishimura, Masatoshi Kotera, Positive and negative charge accumulation mechanism generated by electron beam irradiation to insulating specimen, 19th International Microscopy Congress, 2018.9.11. (Sydney, Australia).
14. Yuka Ito, Takatoshi Donga, Kentaro Morimoto, Masatoshi Kotera, Simulation of fogging electron trajectories in a scanning electron microscope, Photomask Japan 2018, (PMJ2018), 2018.4.19. (Yokohama).
15. Kentaro Morimoto, Yoshifumi Hagiwara, Masatoshi Kotera, Measurement of the Flare Electron Current in Scanning Electron Microscope, Photomask Japan 2018, (PMJ2018), 2018.4.19. (Yokohama).
16. Hideya Mizuno, Shota Nishimura, Masatoshi Kotera, Contribution of flare electrons to produce potential distribution on an insulator film by electron beam irradiation, Photomask Japan 2018, 2018.4.19. (Yokohama).
17. Takatoshi Donga, Masatoshi Kotera, Simulation of fogging electron trajectories in Faraday cup, Atomic Level Characterization (ALC'17), 2017.12.5. (Hawaii, USA).
18. Yoshifumi Hagiwara, Kentaro Morimoto, Yuka Ito, Masatoshi Kotera, Measurement of the flare electron current distribution with various accelerating voltage in scanning electron microscope, Atomic Level Characterization, 2017.12.5. (Hawaii, USA).
19. Shota Nishimura, Takuya Kawamoto, Hideaki Mizuno, Masaki Moriyama, Masatoshi Kotera, Contribution of flare electrons on enormous large areal positive charging, Atomic Level Characterization, 2017.12.5. (Hawaii, USA).
20. Kazumasa Terada, Yoshifumi Hagiwara, Masatoshi Kotera, Three-dimensional trajectory simulation of scattered electrons in scanning electron microscope specimen chamber, Atomic Level Characterization, 2017.12.5. (Hawaii, USA).
21. 萩原佳史, 森本健太郎, 伊藤優花, 小寺正敏, 走査電子顕微鏡内におけるフレア電子の電流分布測定、第78回応用物理学会秋季学術講演会 (2017.9.5) (福岡).
22. 寺田一真, 萩原佳史, 小寺正敏 : 走査電子顕微鏡試料室における散乱電子の三次元軌道のシミュレーション、第78回応用物理学会秋季学術講演会 (2017.9.5) (福岡).

23. 西村将太, 河本拓也, 小寺正敏, 電子ビーム照射付近から遠方で正帯電を引き起こすフレア電子について、第78回応用物理学会秋季学術講演会 (2017.9.5) (福岡)。
24. 頓花貴俊, 伊藤優花, 小寺正敏, ファラデーカップ設計のための電子散乱シミュレーション、第78回応用物理学会秋季学術講演会 (2017.9.6) (福岡)。
25. 寺田一真, 萩原佳史, 小寺正敏, 走査電子顕微鏡試料室内における散乱電子の三次元軌道のシミュレーション、日本顕微鏡学会 第60回記念シンポジウム (2017.12.1) (宮崎)。
26. 西村将太, 河本拓也, 水野秀哉, 森山将希, 小寺正敏, 遠方で正帯電を起こすフレア電子について、日本顕微鏡学会 第60回記念シンポジウム (2017.12.1) (宮崎)。
27. 頓花貴俊, 小寺正敏, 走査型電子顕微鏡におけるフォギング電子散乱の時間依存性のシミュレーション、日本顕微鏡学会 第60回記念シンポジウム (2017.12.1) (宮崎)。
28. 萩原佳史, 森本健太郎, 伊藤優花, 小寺正敏, 走査電子顕微鏡内におけるフレア電子の加速電圧依存性、第60回記念シンポジウム (2017.12.1) (宮崎)。
29. Shota Nishimura, Takuya Kawamoto, Masatoshi Kotera, Enormous lateral distribution of electrons generated by electron beam in a scanning electron microscope, Photomask Japan 2017, (PMJ2017), 2017. 4. 8. (Pacifico Yokohama, Yokohama).
30. Shota Nishimura, Takuya Kawamoto, Hideya Mizuno, Masaki Moriyama, Masatoshi Kotera, Measurement of enormous spatial distribution of scattered electrons in scanning electron microscope, Microscopy Conference 2017, (MC2017), 2017.8.22. (Lausanne, Swiss).
31. 西野大輝, 小寺正敏, 走査電子顕微鏡内におけるフォギング電子軌道シミュレーション、平成28年度日本材料学会第5回半導体エレクトロニクス部門委員会 第1回講演会・見学会 (2017. 1.28) (鳥取)。
32. 32.T. Nishino and M. Kotera, Simulation of Fogging Electron Trajectories in a Scanning Electron Microscope, Symposium on Surface Science & Nanotechnology -25th Anniversary of SSSJ Kanasi-, 2017. 1.25. (Kyoto).
33. 33.Y. Hagiwara, T. Noda, M. Kotera and R. Gauvin, Measurement of Fogging Electron Current at the Objective Lens and the Specimen Surface in SEM, Symposium on Surface Science & Nanotechnology -25th Anniversary of SSSJ Kanasi-, 2017.1.24. (Kyoto).
34. 34. 西野大輝, 小寺正敏, 走査電子顕微鏡内のフォギング電子軌道のシミュレーション、日本顕微鏡学会第59回シンポジウム (2016.11.18) (東京)。
35. 35. 野田 拓, 小寺正敏, 走査電子顕微鏡内のフォギング電流測定、日本顕微鏡学会 「SEMの物理学」分科会討論会 (2016.11.12) (広島)。
36. 36. 西野大輝, 小寺正敏, 走査電子顕微鏡内のフォギング電子軌道のシミュレーション、日本顕微鏡学会 「SEMの物理学」分科会討論会 (2016.11.12) (広島)。
37. 37. 東海昌司, 小寺正敏, 電子ビーム照射された絶縁体試料表面電位分布のワーキングディスタンスと印加バイアス依存性、日本顕微鏡学会 「SEMの物理学」分科会討論会 (2016.11.12) (広島)。
38. 38. 福澤諒大, 小寺正敏, 電子ビーム照射による試料表面電位と電荷蓄積のシミュレーション、日本顕微鏡学会 「SEMの物理学」分科会討論会 (2016.11.12) (広島)。
39. 39. Yoshifumi Hagiwara, Taku Noda, Masatoshi Kotera, Measurement of Fogging Electron Current for Various Beam Energies at Acceleration Bias in Scanning Electron Microscope, 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2016. 11. 10. (Kyoto).
40. 40. Akihiro Fukuzawa, Masatoshi Kotera, Simulation of Charging Process of PMMA Film on Si Substrate under Electron Beam Irradiation, 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2016. 11. 10. (Kyoto).
41. 41. Masashi Toukai, Takuya Kawamoto, Masatoshi Kotera, Surface Potential Distribution of a Resist Film Irradiated by Electron Beam under Acceleration Bias, 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2016. 11. 10. (Kyoto).
42. 42. Taku Noda, Yoshifumi Hagiwara, Masatoshi Kotera, Measurement of Fogging Electron Current at a Specimen Surface in Scanning Electron Microscope, 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2016. 11. 10. (Kyoto).
43. 43. Taiki Nishino, Kazumasa Terada, Masatoshi Kotera, Development of a Simulation of Fogging Electron Trajectories in a Scanning Electron Microscope, 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2016. 11. 10. (Kyoto).
44. 44. Yoshifumi Hagiwara, Taku Noda, Masatoshi Kotera, Raynald Gauvin, Dependence of fogging electron current on the collection field, 42nd International Conference on Micro and Nano Engineering, 2016. 9. 20. (Vienna, Austria).
45. 45. Takuya Kawamoto, Masashi Tokai, Shota Nishimura, Tatsuya Toyama, Masatoshi Kotera, Dependence of the working distance and the applied bias on the surface potential distribution of insulating specimen irradiated by electron beam, 42nd International Conference on Micro and Nano Engineering, 2016. 9. 20. (Vienna, Austria).
46. 46. Kazumasa Teradal, Taiki Nishino, Taku Noda, Masatoshi Kotera, Development of

trajectory simulation of fogging electrons in a vacuum specimen chamber, 42nd International Conference on Micro and Nano Engineering, 2016. 9. 20. (Vienna, Austria).

47. 東海昌司, 河本拓也, 小寺正敏, 電子ビーム照射された絶縁体試料表面電位分布のワーキングディスタンスと印加バイアス依存性、第 77 回応用物理学会学術講演会 (2016. 9. 14) (新潟).
48. 福澤諒大, 小寺正敏, 電子ビーム照射による試料表面電位と電荷蓄積のシミュレーション、第 77 回応用物理学会学術講演会 (2016. 9. 14) (新潟).
49. 萩原佳史, 野田 拓, 小寺正敏, Raynald Gauvin, 走査電子顕微鏡内におけるフォギング電子の加速電圧変化、第 77 回応用物理学会学術講演会 (2016. 9. 15) (新潟).

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)