

令和 6 年 10 月 1 日現在

機関番号：32665
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間：2018～2023
課題番号：17KK0125
研究課題名（和文）酸化膜で囲まれたシリセン - 電気特性評価による高品質化とトランジスタへの応用
研究課題名（英文）Silicene surrounded by oxide -quality improvement and its application to transistors
研究代表者
小川 修一（OGAWA, Shuichi）
日本大学・生産工学部・准教授
研究者番号：00579203
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,700,000円
渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：ケイ素ウェハ酸化反応の自己停止現象を用いて、酸化膜で囲まれたシリセン（ケイ素の原子1層分の薄膜）を作製することを目的に、熱酸化反応機構の詳細なメカニズムを調べた。またシリセンと同様の単原子層状物質であるグラフェン被覆による材料の電子物性変化も調べた。その結果、酸化反応にはケイ素ウェハ中の少数キャリアの役割が重要であることがわかった。光照射や加熱等によるキャリア密度増加が自己停止反応の阻害要因になることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によりケイ素ウェハ酸化過程の自己停止条件をより詳しく明らかにすることができた。また渡航先で知り合った研究者との共同研究により、デバイス作製に必要な電子物性解明の研究を進めることができ、電気電子工学だけでなく応用化学や原子力工学への展開も見えてきた。本研究の成果により安全なエネルギーの生成方法の開発や、触媒・材料の長寿命化を見据えた応用研究につながっていくことが期待される。

研究成果の概要（英文）：The detailed mechanism of thermal oxidation reaction was investigated using the self-stopping phenomenon of silicon wafer oxidation reaction to fabricate silicene (a thin film of one layer of silicon atoms) surrounded by an oxide film. The electronic properties of the material were also investigated by coating graphene, a monatomic layered material similar to silicene. As a result, it was found that the role of minority carriers in silicon wafers is important for the oxidation reaction. It was clarified that the increase in carrier density due to light irradiation or heating is an inhibitory factor for the self-stopping reaction.

研究分野：薄膜・表面物性

キーワード：熱酸化 リアルタイム光電子分光 グラフェン 二次元層状物質

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

ケイ素 (Si) 原子 1 層の層状物質であるシリセンはトポロジカル絶縁体であることが予想されており、次世代の高速・省エネデバイスへの活用が期待される。研究開始当初では、シリセンは金属表面にしか合成できなかったため、シリセンの電気的評価は絶縁物上へ転写して行う必要があった。しかし、シリセンは大気中で容易に酸化されてしまうという問題点があり、そのため炭素原子 1 層の層状物質であるグラフェンのように絶縁物上へ転写し大量のトランジスタを作製しての電気特性評価は困難であった。

研究代表者はこれまで、Si 基板の熱酸化プロセスの研究を進めてきた。その中で、酸素が十分に供給されている状態にも関わらず酸化反応が停止する「Si 酸化反応自己停止」のメカニズムを解明し、酸化誘起歪みがしきい値以下になると酸化反応が停止することを明らかにした。この知見を応用し、Si 基板酸化中に 1 原子層だけ残して酸化を停止できれば図 1 のような、酸化膜で囲まれたシリセン (シリセン・イン・オキサイド: SIO) をインチサイズのウェハスケールで合成できると考えた。SiO₂ 膜は良好な保護膜としての性質をもつため、SIO 構造は酸化からシリセンを保護する。本研究開始前の予備的検討として、シリセンの周囲が絶縁物である SiO₂ で囲まれたシリセン・イン・オキサイド (SIO) 構造作製プロセスを開発しシリセンをインチサイズのウェハスケールで大量生産可能な合成法を確立すること、および高品質な SIO 構造作製のための指針を与えること、を目的として研究を進めてきた。本研究課題の基課題で提案した SIO 作成プロセスの模式図を図 1 に示すが、先行研究では着目されていなかった Si 酸化反応自己停止による単原子 Si 層の形成と酸化誘起歪みによる結合状態変調効果を利用することが基課題の特色である。



シリセン・イン・オキサイド構造

図 1. 基研究で提案した熱酸化自己停止現象を用いたシリセン作製プロセスの模式図。保護膜である SiO₂ に囲まれ、酸化や汚染から保護される。

2. 研究の目的

上記の基課題をさらに発展させるため、本研究の目的を次の通り定めた。

課題 I). 大面積シリセン・イン・オキサイド構造作製技術の開発

デバイス作製を目的とした場合、20×20 mm² 以上の大面積 SIO 構造基板が必要であるが、基課題では大面積基板の作製を目的にしていない。そのため、大面積基板作製にむけて、均一な加熱方法の検討や効率的なウェハ運送方法などを検討し、デバイスの量産に向けた作製技術を開発する。また、これに合わせて Si ウェハの熱酸化プロセスに関する研究をさらに進め、熱酸化自己停止現象の統合的理解を目指す。

課題 II). シリセン・イン・オキサイド基板の電気特性評価

課題 I) で得られた大面積 SIO 構造を用いて、シリセンキャパシタおよびトランジスタ作製のためのプロセスを検討する。プロセスの検討にあたり、単原子層状物質を活用したデバイスの評価を実施し、単原子層状物質の特性評価も実施する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、以下の研究を実施した。

- (1) 赤外線ランプを活用した大面積ウェハ加熱システムを開発する。またそのシステムを SPring-8 の BL23SU に持ち込み、加熱しながら光電子分光測定が実施できることを確認する。
- (2) 高輝度放射光を用いた Si 基板酸化過程の「その場」観察を行い、酸化反応自己停止における励起キャリアの影響を調べる。
- (3) 単原子層状物質を用いたデバイス作製を行うため、hBN やグラフェンなどの単原子層状物質を用いたデバイスを作成し、単原子物質の仕事関数や電子放出係数などの特性評価を実施する。

4. 研究成果

(1) 大面積 SIO 基板の作製プロセスを解明するためには、大面積加熱システムが必要とされる。デバイス作製の Si ウェハの酸化プロセスに対応するため、急昇温・降温が可能な赤外線加熱システムを開発した。作製した加熱システムによる Si ウェハ加熱中の様子を図 2 に示す。専用の試料ホルダおよび熱電対を用いた温度測定システムを光電子分光装置に導入し、(1) 20×20mm² の Si ウェハを 1170°C まで均一に加熱できること、(2) 加熱中でも磁場や電場を発生せず、光電子のエネルギーや強度を変調

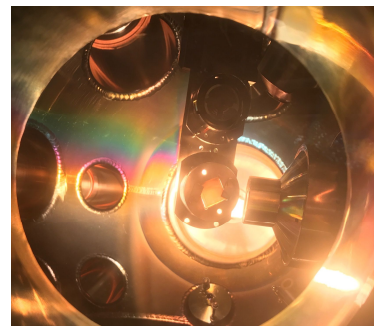


図 2. 開発した赤外線加熱システムで加熱中の Si ウェハ。

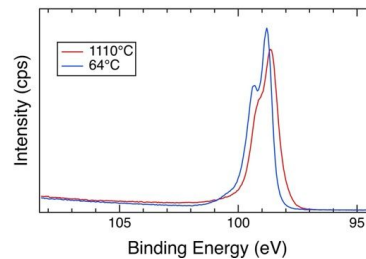
することなく光電子分光測定が可能であることを確認した。本加熱システムを用いて SPring-8 の BL23SU に設置されている表面化学実験ステーションで測定した Si 2p 光電子スペクトルを図 3(a)に示す。比較対象として、従来用いられていたヒーターによる傍熱加熱中の黒鉛基板における C 1s 光電子スペクトルを図 3(b)に示す。ヒーターを用いた傍熱加熱では 950°C を超える加熱ではヒーターから発生される磁場の影響により光電子強度が著しく弱くなっている。それに対し赤外線加熱を用いた本システムでは 1100°C を超える高温加熱でもスペクトルの強度減少はみられない。また加熱中の Si 2p スペクトルが低結合エネルギー側にシフトしているが、これは加熱によるキャリア励起によりバンドベンディングが解消されたためと考えられる。以上のように、本加熱システムの有用性が確認できた。

(2) Si ドライ酸化の反応律速では、酸化誘起歪による点欠陥発生が支配的な役割を担っており、これによって酸化自己停止が発現することが示唆されている。自己停止する原因をさらに追求するため、本研究では、放射光光電子分光を用いて Si 表面酸化過程をリアルタイム観察し、SiO₂/Si(001)界面酸化における過剰少数キャリア再結合および界面での O₂ trapping mediated adsorption の役割を検証した。

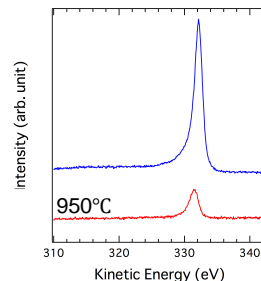
SiO₂/n-Si(001)界面欠陥での多数キャリア捕獲(V⁰ + e⁻ V)と少数キャリア捕獲(V⁻ + h⁺ V⁰)により、界面においてバンドベンディングの変化 BB がもたらされる。そこで、リアルタイム測定中に時間間隔を変えて放射光を OFF にして、Si 2p スペクトルの変化を追跡した。その結果、バンドベンディングは放射光 OFF の時間が長いほど増加した。このような変化は、光電子の非弾性散乱に伴うバンド間遷移により生じた電子 / 正孔対が界面欠陥準位での過剰少数キャリア再結合に影響を与えるためである。

これに加えて SiO₂/Si(001)界面での O₂ 解離吸着が trapping mediated adsorption で進行することを考慮し、Loop A/B が分岐するモデルを提案した。このモデルでは欠陥での分子状吸着 O₂ (paul)の寿命と少数キャリアの捕獲時間により A/B 分岐が支配される。400 酸化と室温酸化ではキャリアトラップダイナミクスが異なることを明らかにした。BB は V-paul だけでなく、2(P_{b0}+P_{b1})-paul でも影響を受ける。図 4 の界面 O₂(P_{b1}-paul)量と酸化速度の線形相関は、室温酸化反応は P_{b1}-paul 量で律速されることを示している。

(3) 高温高压 (HTHP) 合成された h-BN は高品質な結晶性を有するため、高速グラフェン FET の基板への応用が検討されている。グラフェン/h-BN 基板のさらなる応用のため、この積層構造のバンドアライメントを明らかにすることが重要である。光電子分光法は、材料界面のバンドオフセットを測定するための強力なツールである。通常的光電子分光装置で金属 / 絶縁膜界面のバンドオフセットを評価するためには、数 mm サイズの試料を準備する必要がある。しかし、HTHP h-BN 単結晶は数十 μm と小さいため、通常的光電子分光装置でグラフェン/h-BN 積層試料のバンドオフセットを測定することは困難であった。本研究では、光電子顕微鏡 (PEEM) を用いて、h-BN とグラフェンの積層構造体のバンドオフセットを測定した。電子エネルギー分析器を搭載した PEEM を用い、微小紫外光電子分光法 (UPS) により価電子帯光電子スペクトルを測定し、h-BN およびグラフェン/h-BN 積層構造のバンドアライメントを決定した。本研究で求められた h-BN とグラフェン/h-BN 積層構造のバンドダイヤグラムを図 5 に示す。グラフェン被覆により hBN 表面の仕事関数が 4.6 eV から 4.3 eV に減少することがわかった。このような二次元層状物質のコーティングによる基板材料の仕事関数変調も明らかにすることができた。



(a)



(b)

図 3. (a) 赤外線による加熱中の光電子スペクトルと、(b) 従前の傍熱加熱中の光電子スペクトルの比較

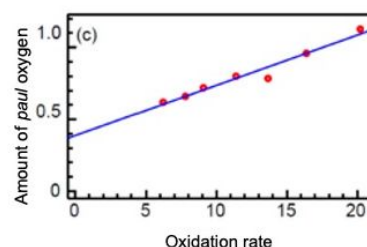


図 4. 酸化速度と paul 量の相関

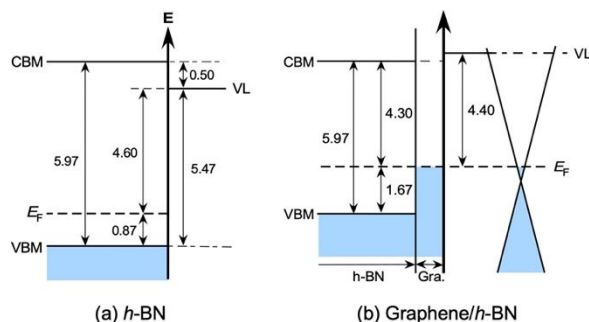


図 5. (a) h-BN と (b) グラフェン/h-BN 積層構造のバンドダイヤグラム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Yamada Takatoshi, Ogawa Shuichi	4. 巻 47
2. 論文標題 Oxygen Gas Barrier Property of Monolayer CVD Graphene	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MEMBRANE	6. 最初と最後の頁 92 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5360/membrane.47.92	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 Ogawa Shuichi, Tsuda Yasutaka, Sakamoto Tetsuya, Okigawa Yuki, Masuzawa Tomoaki, Yoshigoe Akitaka, Abukawa Tadashi, Yamada Takatoshi	4. 巻 605
2. 論文標題 Evaluation of doped potassium concentrations in stacked Two-Layer graphene using Real-time XPS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 154748 ~ 154748
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2022.154748	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 Tsuda Yasutaka, Yoshigoe Akitaka, Ogawa Shuichi, Sakamoto Tetsuya, Takakuwa Yuji	4. 巻 21
2. 論文標題 Observation of Chemisorbed O ₂ Molecule at Si/Si(001) Interface During Si Dry Oxidation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 30 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2023-005	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 Tsuda Yasutaka, Yoshigoe Akitaka, Ogawa Shuichi, Sakamoto Tetsuya, Yamamoto Yoshiki, Yamamoto Yukio, Takakuwa Yuji	4. 巻 157
2. 論文標題 Roles of excess minority carrier recombination and chemisorbed O ₂ species at Si ₂ /Si interfaces in Si dry oxidation: Comparison between p-Si(001) and n-Si(001) surfaces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 234705 ~ 234705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0109558	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 Hisato Yamaguchi , Ryunosuke Yusa , Gaoxue Wang , Michael T. Pettes , Fangze Liu , Yasutaka Tsuda , Akitaka Yoshigoe , Tadashi Abukawa , Nathan A. Moody , Shuichi Ogawa	4. 巻 122
2. 論文標題 Work function lowering of LaB6 by monolayer hexagonal boron nitride coating for improved photo- and thermionic-cathodes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 141901 ~ 141901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0142591	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 該当する

1. 著者名 OGAWA Shuichi, ZHANG Bingruo, YOSHIGOE Akitaka, TAKAKUWA Yuji	4. 巻 64
2. 論文標題 Oxidation Reaction Kinetics on Transition Metal Surfaces Observed by Real-time Photoelectron Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 218 ~ 223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.64.218	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 Oya Kei, Aoshika Kei, Ageishi Masaki, Magara Hideyuki, Ogawa Shuichi, Takakuwa Yuji, Takami Tomohide	4. 巻 50
2. 論文標題 Synthesis of Chloroauric Acid from Gold Electrodes in Alkali Halide Salt Solution by AC Electrolysis and the Sequential Formation of Gold Nanoparticles by Turkevich Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 191 ~ 194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200554	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 Ogawa Shuichi, Taga Ryo, Yoshigoe Akitaka, Takakuwa Yuji	4. 巻 39
2. 論文標題 Two-step model for reduction reaction of ultrathin nickel oxide by hydrogen	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science & Technology A	6. 最初と最後の頁 043207 ~ 043207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/6.0001056	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 Masuzawa Tomoaki, Okigawa Yuki, Ogawa Shuichi, Takakuwa Yuji, Hatakeyama Kazuto, Yamada Takatoshi	4. 巻 2
2. 論文標題 Synthesis and characterization of potassium-doped multilayer graphene prepared by wet process using potassium hydroxide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Express	6. 最初と最後の頁 030004 ~ 030004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2632-959x/ac1454	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 小川修一, Hisato Yamaguchi, Edward F. Holby, 山田貴壽, 吉越章隆, 高桑雄二	4. 巻 26
2. 論文標題 高運動エネルギー02分子に対するグラフェンのガスバリア性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SPRING-8/SACLA利用者情報	6. 最初と最後の頁 251 ~ 255
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 該当する

1. 著者名 Ogawa Shuichi, Yamaguchi Hisato, Holby Edward F., Yamada Takatoshi, Yoshigoe Akitaka, Takakuwa Yuji	4. 巻 11
2. 論文標題 Gas Barrier Properties of Chemical Vapor-Deposited Graphene to Oxygen Imparted with Sub-electronvolt Kinetic Energy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 9159 ~ 9164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c02112	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 Ogawa Shuichi, Yoshigoe Akitaka, Tang Jaiyi, Sekihata Yuki, Takakuwa Yuji	4. 巻 59
2. 論文標題 Roles of strain and carrier in silicon oxidation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SM0801 ~ SM0801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab82a9	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 Oya Kei, Aoshika Kei, Ageishi Masaki, Magara Hideyuki, Ogawa Shuichi, Takakuwa Yuji, Takami Tomohide	4. 巻 50
2. 論文標題 Synthesis of Chloroauric Acid from Gold Electrodes in Alkali Halide Salt Solution by AC Electrolysis and the Sequential Formation of Gold Nanoparticles by Turkevich Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 191 ~ 194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200554	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 Ogawa Shuichi, YOSHIGOE Akitaka, Tang Jiayi, Sekihata Yuki, Takakuwa Yuji	4. 巻 -
2. 論文標題 Roles of strain and carrier in silicon oxidation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	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) 10.35848/1347-4065/ab82a9	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 Aija Saijian, Ogawa Shuichi, Kamata Nobuhisa, Takakuwa Yuji	4. 巻 58
2. 論文標題 Flattening of copper surfaces with a low energy xenon-ion source generated by photoemission-assisted plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 090911 ~ 090911
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab3878	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 Ogawa Shuichi, Yamada Takatoshi, Kadowaki Ryo, Taniguchi Takashi, Abukawa Tadashi, Takakuwa Yuji	4. 巻 125
2. 論文標題 Band alignment determination of bulk h-BN and graphene/h-BN laminates using photoelectron emission microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 144303 ~ 144303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5093430	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 OGAWA Shuichi、YOSHIGOE Akitaka、TAKAKUWA Yuji	4. 巻 62
2. 論文標題 Simultaneous Observation of Si Oxidation Rate and Oxidation-induced Strain Using XPS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 350 ~ 355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.62.350	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 Shuichi Ogawa, Takatoshi Yamada, Ryo Kadowaki, Takashi Taniguchi, Tadashi Abukawa, and Yuji Takakuwa	4. 巻 125
2. 論文標題 Band alignment determination of bulk h-BN and graphene/h-BN laminates using photoelectron emission microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 144303/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5093430	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 Ogawa Shuichi、Takakuwa Yuji	4. 巻 8
2. 論文標題 Interfacial oxidation kinetics at SiO ₂ /Si(001) mediated by the generation of point defects: Effect of raising O ₂ pressure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 075119/1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5034395	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39件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 津田 泰孝, 吉越 章隆, 小川 修一, 坂本 徹哉, 高桑 雄二
2. 発表標題 分子状吸着O ₂ によるSiO ₂ /Si(001)界面酸化反応過程の分岐
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuichi Ogawa, Yasutaka Tsuda, Yuki Okigawa, Tomoaki Masuzawa, Akitaka Yoshigoe, Tadashi Abukawa, Takatoshi Yamada
2. 発表標題 Potassium desorption from K-doped stacked graphene
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasutaka Tsuda, Akitaka Yoshigoe, Shuichi Ogawa, Tetsuya Sakamoto, Yuji Takakuwa
2. 発表標題 Role of molecularly-adsorbed O ₂ on oxidation at SiO ₂ /Si(001) interface
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川修一
2. 発表標題 光電子分光法によるナノ炭素材料の電子状態 / 化学状態評価
3. 学会等名 表面分析研究会第58回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuichi Ogawa, Takatoshi Yamada, Yuki Okigawa, Tomoaki Masuzawa, Yasutaka Tsuda, Tetsuya Sakamoto, Akitaka Yoshigoe, Tadashi Abukawa
2. 発表標題 Quantitative Evaluation of Dopant Concentration in n-type Potassium-doped graphene using SR-XPS
3. 学会等名 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuichi Ogawa, Hisato Yamaguchi, Edward Holby, Takatoshi Yamada, Akitaka Yoshigoe, Yuji Takakuwa
2. 発表標題 Gas Barrier Properties of Chemical Vapor-Deposited Graphene to Oxygen Imparted with Sub-eV Kinetic Energy
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibi (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Yamada, Y. Okigawa, K. Hatakeyama, S. Ogawa, Y. Takakuwa, T. Masuzawa
2. 発表標題 Characterization of K-doped multilayer graphene by wet process
3. 学会等名 International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2020/2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Ogawa
2. 発表標題 Introduction of real-time XPS for material processing
3. 学会等名 MIRAI 2.0 R&I Week 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉越 章隆, 津田 泰孝, 富永 亜希, 坂本 哲哉, 小川 修一, 高桑 雄二
2. 発表標題 Si(001)2×1表面室温酸化に観られる01s光電子スペクトルのサテライトピークと酸素分子の並進運動エネルギーの関係
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津田 泰孝 , 小川 修一 , 吉越 章隆 , 坂本 徹哉 , 高桑 雄二
2. 発表標題 SiO ₂ /Si(001)界面のバンドベンディングへの酸素と放射光のON-OFF効果
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川 修一 , 山田 貴壽 , 沖川 侑揮 , 増澤 智昭 , 津田 泰孝 , 吉越 章隆 , 虻川 匡司
2. 発表標題 動的 Shirley 法を用いた二層グラフェン中微量ドーパントのXPS測定
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田 貴壽 , 増澤 智昭 , 小川 修一 , 高桑 雄二 , 沖川 侑揮
2. 発表標題 カリウム添加多層グラフェンの電気特性評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内走一郎 , 古賀峻丞 , 田中晶貴 , 孫澤旭 , 津田泰孝 , 小川修一 , 高桑雄二 , 橋本由介 , 室隆桂之 , 吉越章隆 , 松下智裕
2. 発表標題 光電子ホログラフィーを用いたSi(111)-7×7表面の初期酸化構造解析
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeuchi Soichiro , Akitaka Yoshigoe , Yasutaka Tsuda , Yusuke Hashimoto , Shuichi Ogawa , Yuji Takakuwa , Syunjo Koga , Masaki Tanaka , Sun Zexu , Tomohiro Matsushita
2. 発表標題 Initial oxidation structure analysis of Si(111)-7×7 surface
3. 学会等名 13th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasutaka Tsuda , Shuichi Ogawa , Akitaka Yoshigoe , Tetsuya Sakamoto , Yuji Takakuwa
2. 発表標題 Comparison of the oxidation reaction kinetics between SiO ₂ /n- and p-Si(001) interfaces
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akitaka Yoshigoe , Yas utaka Tsuda , Aki Tominaga , Tetsuya Sakamoto , Shuichi Ogawa , Yuji Takakuwa
2. 発表標題 Molecular beams study on satellite peak observed in O1s photoelectron spectra for Si(001)2×1 surface oxidation at room temperature
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuichi Ogawa , Ryo Taga , Ryunosuke Yusa , Yasutaka Tsuda , Tetsuya Sakamoto , Akitaka Yoshigoe , Yuji Takakuwa , Tadashi Abukawa
2. 発表標題 Changes of rate-limiting reactions with progress of the reduction process on oxidized Ni(111)
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川修一
2. 発表標題 リアルタイム光電子分光法による表面反応キネティクスの複合解析
3. 学会等名 令和 3 年度日本表面真空学会東北・北海道支部学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津田 泰孝, 小川 修一, 吉越 章隆, 坂本 徹哉, 富永 亜希, 山本 善貴, 山本 幸男, 高桑 雄二
2. 発表標題 SiO ₂ /Si(001)界面酸化反応におけるn型とp型の比較
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川 修一, H. Yamaguchi, E. F. Holby, 山田 貴壽, 吉越 章隆, 高桑 雄二
2. 発表標題 高エネルギーO ₂ 分子ビームに対するCu上グラフェンのバリア性能評価
3. 学会等名 第81回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内藤 完, 中塚 聡平, 小川 修一, 虻川 匡司, 江口 豊明, 服部 賢, 服部 梓, 黒田 理人
2. 発表標題 Si(551)表面の表面構造解析I
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内藤 完, 中塚 聡平, 小川 修一, 虻川 匡司, 江口 豊明, 服部 賢, 服部 梓, 黒田 理人
2. 発表標題 Si (551)表面のW-RHEEDとSTMによる構造解析
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川修一, 山田貴壽, 津田泰孝, 吉越章隆, 虻川匡司
2. 発表標題 ガスバリア特性評価のためのグラフェン用触媒金属膜の検討
3. 学会等名 令和2年度日本表面真空学会東北・北海道支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遊佐龍之介, 志水哲也, 小川修一, 虻川匡司
2. 発表標題 Ni箔上におけるグラフェンおよびh-BNの光電子顕微鏡による成長観察
3. 学会等名 令和2年度日本表面真空学会東北・北海道支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青山大晃, 内藤完, 中塚聡平, 小川修一, 虻川匡司, 江口豊明, 服部賢, 服部梓, 黒田理人
2. 発表標題 Si (551)および(15 17 3)表面の構造解析
3. 学会等名 令和2年度日本表面真空学会東北・北海道支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 張氷若, 小川修一, 吉越章隆, 高桑雄二
2. 発表標題 Ni(111)表面に形成したNiO膜の還元過程のリアルタイム光電子分光観察
3. 学会等名 令和2年度日本表面真空学会東北・北海道支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川修一, 山田貴壽, H. Yamaguchi, E. F. Holby, 吉越章隆, 高桑雄二
2. 発表標題 欠陥酸化を介した高エネルギーO ₂ 分子のグラフェン膜透過
3. 学会等名 令和元年度日本表面真空学会東北・北海道支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Bingruo Zhang, Shuichi Ogawa, Akitaka Yoshigoe, Yuji Takakuwa
2. 発表標題 O ₂ pressure dependence of changes of band bending of p-NiO layer grown on Ni (111) surface studied by photoelectron spectroscopy
3. 学会等名 8th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jaiyi Tang, Yuki Sekihata, Shuichi Ogawa, Akitaka Yoshigoe, Yuji Takakuwa
2. 発表標題 Role of stress and carrier in oxidation on Si surfaces
3. 学会等名 2019 International Workshop on DIELECTRIC THIN FILMS FOR FUTURE ELECTRON DEVICES - SCIENCE AND TECHNOLOGY- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuichi Ogawa, Akitaka Yoshigoe, Yuji Takakuwa
2. 発表標題 Oxidation-induced Generation Kinetics of Point Defect on Si(001) Surfaces Observed in situ by UPS, XPS, and RHEED Combined with AES
3. 学会等名 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川修一
2. 発表標題 東北次世代放射光施設の紹介
3. 学会等名 第2回日本表面真空学会若手部会研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川修一
2. 発表標題 リアルタイムXPSによるSi表面酸化プロセスの反応速度・酸化誘起歪みの同時観察
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuichi Ogawa, Takatoshi Yamada, Ryo Kadowaki, Takashi Taniguchi, Tadashi Abukawa, Yuji Takakuwa
2. 発表標題 Band Alignment of Bulk h-BN/Graphene Measured by PEEM
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川 修一, 遊佐 龍之介, G. Wang, M. T. Pettes, F. Liu, 津田 泰孝, 吉越 章隆, 虻川 匡司, N. A. Moody, H. Yamaguchi
2. 発表標題 2次元材料被覆によるLaB6仕事関数変化のPEEM観察
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Ogawa, R. Yusa, G. Wang, M. Pettes, F. Liu, Y. Tsuda, A. Yoshigoe, T. Abukawa, N. Moody, H. Yamaguchi
2. 発表標題 Work Function Changes by 2D Material coatings on LaB6
3. 学会等名 2023 International Thin Film Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古西浩志, 津田泰孝, 吉越章隆, 高桑雄二, 小川修一
2. 発表標題 Si表面酸化における酸化誘起点欠陥発生の役割の研究
3. 学会等名 第56回(令和5年度)日本大学生産工学部学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小川修一
2. 発表標題 原子層物質コーティングによるカソード表面の長寿命化と電子放出量増加の両立
3. 学会等名 文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ 第2回 革新的なエネルギー変換を可能とするマテリアル領域シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 古西浩志, 津田泰孝, 吉越章隆, 高桑雄二, 小川修一
2. 発表標題 DOSモデルに代わる新たなSi(001)表面酸化モデルの提案
3. 学会等名 令和5年度表面真空学会東北・北海道支部学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小川 修一
2. 発表標題 機能性材料の保護と高度化を両立させる二次元物質コーティング
3. 学会等名 Controlled growth and characterization研究会(招待講演)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>速い分子だと炭素の網を通り抜ける!? 酸素がグラフェンをすり抜ける現象を発見 https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/10/press20201026-01-graphene.html</p> <p>六ホウ化ランタンの電子放出量を約7倍に増大させるコーティング技術を東北大などが開発 https://news.mynavi.jp/techplus/article/20230405-2645477/</p>
--

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	チュア ダニエル (Chua Daniel)	シンガポール国立大学・College of Design & Engineering・Associate Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	山口 尚人 (Yamaguchi Hisato)	ロスアラモス国立研究所・AOT-AE・Scientist	

	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
その他の研究協力者	山田 貴壽 (Yamada Takatoshi)	産業技術総合研究所・ナノカーボンデバイス研究センター・グループ長	
その他の研究協力者	吉越 章隆 (Yoshigoe Akitaka)	日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・研究主幹	

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

シンガポール	National University of Singapore			
米国	Los Alamos National Laboratory			