

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22113

研究課題名（和文）ウェハースケールの六方晶窒化ホウ素によるマテリアルサイエンスの革新

研究課題名（英文）Innovation of material science through wafer-scale synthesis of hexagonal boron nitride

研究代表者

吾郷 浩樹（Ago, Hiroki）

九州大学・グローバルイノベーションセンター・教授

研究者番号：10356355

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：六方晶窒化ホウ素（hBN）の多層膜は、二次元物質の科学と応用を支える極めて重要な絶縁性二次元物質である。しかし、この多層hBNを均一に大面積に合成する手法は未だなく、大きなブレイクスルーが求められている。本研究では、単結晶基板上に堆積した合金薄膜を触媒として用い、様々な検討を行うことで、均一性の高い多層hBNを大面積に合成することに成功した。同時に、合金触媒の結晶変化とシンクロナイズした極めてユニークなhBNの生成メカニズムを見出すことができた。さらに、この多層hBNを用いると単層グラフェンの特性が向上することを確認し、本研究で合成した多層hBNが二次元絶縁基板として有望であることも実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で合成を試みた六方晶窒化ホウ素（hBN）の多層膜は、現在では二次元物質の研究に欠かせない材料になっている。それは、多層hBNが周囲の環境の影響を効果的に遮へいして、グラフェンなどの二次元物質の優れた特性や特異的な物性を発現させる舞台を提供するからである。そのため、この多層hBNをウェハースケールで合成する技術を開発することは、二次元物質の学術と応用研究の推進のために極めて重要である。しかし、高品質の多層hBN合成は非常に難しく、現在でも剥離片が広く用いられている。本研究は多層hBNを大面積に合成する可能性を提示しており、科学的、産業的に大きな意義とインパクトを有している。

研究成果の概要（英文）：Multilayer hexagonal boron nitride (hBN) is one of the key materials in two-dimensional layered materials, because hBN can screen influences from environment, such as substrate roughness and charged impurities. This allows to observe unique and excellent physical properties of other two-dimensional materials, such as graphene. However, there is no established method to synthesize large-area, uniform hBN multilayers. In this research, by utilizing metal alloy films deposited on single-crystal substrates, we succeeded in synthesizing uniform multilayer hBN in large scale. In addition, we found interesting structural change of the metal alloy film that is synchronized with the segregation of multilayer hBN. We also demonstrated that our CVD-grown hBN is effective to improve the physical properties of monolayer graphene based on Raman spectroscopy.

研究分野：ナノテクノロジー

キーワード：六方晶窒化ホウ素 CVD法 グラフェン 触媒・化学プロセス 結晶成長

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2004年に報告されたグラフェンの剥離とキャリア輸送特性に関する研究を契機として、二次元物質に関する研究は著しい発展が見られている。しかし、二次元物質は、それを構成するほぼすべての原子が表面に露出していることから、基板表面やガス吸着などの影響を強く受け、理論通りの優れた物性を実際に得るのは困難である。六方晶窒化ホウ素(hBN)はこれらの影響を遮へいして、他の二次元物質がもつポテンシャルを引き出すことから大きな注目を集めている。例えば、グラフェンをチャンネルにした電界効果トランジスタ(FET)では、グラフェンとSiO₂の界面、あるいはトップゲート電極とグラフェンの間に多層hBNを挿入するだけで飛躍的にグラフェンのキャリア移動度が向上することが分かっている。最近では、マジックアングルで積層した二層グラフェンで観測される超伝導状態も多層hBNの併用により発現している。また、グラフェンに限らず、MoS₂などの遷移金属ダイカルコゲナイドにおいても、多層hBNによって蛍光ピークが強く、かつシャープになることが分かっている。

しかしながら、これらの研究のほとんどが、hBN結晶からの剥離片に依存しており、二次元物質の研究開発と応用推進の大きな妨げになっている。大面積に合成可能な化学蒸着法(CVD法)によって単層のhBNシートが合成できるものの、単層膜では基板表面からの影響を遮へいするには不十分であり、多層hBNのCVD合成が強く望まれている。しかし、多層hBNを均一に成長させるのは非常に困難で、十分な結晶性と厚さの均一性を備えた多層hBNの成長は世界的にも実現されておらず、ブレークスルーが求められている。

2. 研究の目的

上記のような状況を打破して二次元物質に大きな革新をもたらすため、高い結晶性と均一な厚みを有する多層hBNのCVD合成法を開発することを目的とした。また、本CVD法で得られるhBNの上にグラフェンを転写して、hBNの絶縁膜としての特性を詳細に検討し、CVD-多層hBNの有用性を確認することも目指した。

3. 研究の方法

多層hBNのCVD成長のため、本研究ではボラジン分子(B₃N₃H₆)を原料、Ni-Fe合金膜をスパッタしたサファイア(α -Al₂O₃)を基板として、高温下で合成した。サファイア基板にはc面、a面、r面の三種を用い、サファイアの結晶面がNi-Feの結晶構造、ならびにhBNの成長に与える影響を調べた。hBNの評価は、光学顕微鏡、ラマンスペクトル、XPS、断面TEM観察等により行った。また、金属触媒の結晶性は電子線後方散乱回折(EBSD)により解析した。

多層hBNの絶縁膜としての特性評価には、hBN上に単層グラフェンを転写して、グラフェンのラマンスペクトルを評価することで行った。

4. 研究成果

グラフェンやhBNなどの二次元材料は、金属薄膜を触媒として利用する熱CVD法が広く用いられている。hBN合成の金属触媒には、グラフェン合成で幅広く用いられているCuの金属箔や薄膜が使われることが多いが、CuへのN原子の固溶度が低いため、基本的に単層のhBNしか得ることができない。実際、我々のこれまでの研究でもサファイア上のCu(111)薄膜を使うと、単層hBNが優先的に成長することを見出している(Y. Uchida *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19**, 8230 (2017))。そこで、BとNの固溶度を高くするため、Ni-Feの合金触媒を用いることにした(Y. Uchida *et al.*, *ACS.Nano*, **12**, 6236 (2018))。また大きなウェハーで入手できるサファイア基板(α -Al₂O₃)を用い、c面、a面、r面の三つの結晶面の違いを調べた。

熱CVD合成の検討の結果、hBNと対称性がマッチしたc面ではなく、対称性の低いr面上で多層hBNが広い面積で均一に成長できることを見出した(図1)。

この結晶面の依存性の理由を明らかにするため、多層 hBN 合成時のサファイア上の Ni-Fe 合金の結晶構造変化を、EBSD により詳しく検討した。図 2 は r 面サファイア上の Ni-Fe 合金薄膜の EBSD 像の変化を示す。ボラジン導入前の Ni-Fe 合金は多結晶であるが、導入後に hBN が析出する際に面心立方の fcc(111)構造に変化していくことが分かった。この結果は、多結晶の Ni-Fe 薄膜にホウ素と窒素が溶解後、Ni-Fe 合金のダイナミックな構造変化を伴いながら、多層の hBN が析出することを示しており、非常に興味深い成長メカニズムである。本結果は論文にまとめて発表し、表紙としても採用された (*ACS Appl. Electron. Mater.*, **2**, 3270 (2020))。

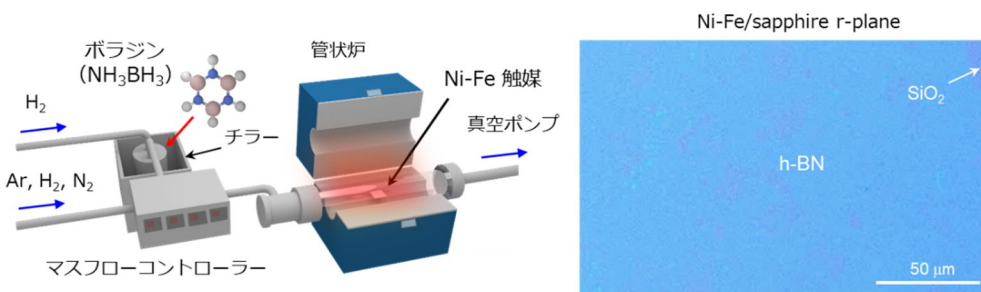


図 1 多層 hBN の CVD 合成のセットアップ、及び Ni-Fe/r 面サファイアの上に成長後、シリコン基板上に転写した多層 hBN の光学顕微鏡像

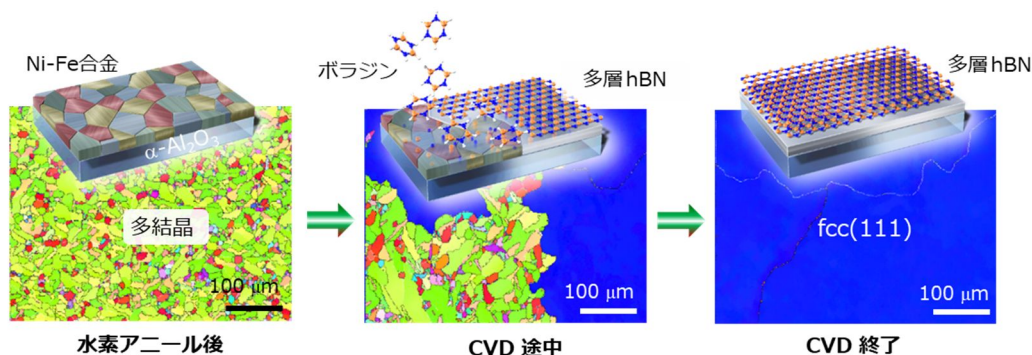


図 2 Ni-Fe 触媒の結晶構造 (EBSD 像) の変化と、その原子モデル。多結晶の Ni-Fe 金属が hBN の成長と同時に fcc(111)に変化していくことが明らかになった。

CVD 法で作られる多層 hBN が二次元物質の絶縁膜として有効かどうかを調べるため、単層グラフェンを hBN の上に転写し、グラフェンのラマンスペクトルを詳細に検討した。図 3 に SiO₂ 基板と hBN/SiO₂ 基板上に転写した単層グラフェンのラマンスペクトルと 2D バンドの半値幅の分布を示す。2D バンドの半値幅は、グラフェンへの歪み導入やドーピングの影響によってブロード化することが知られている。図 3 から明らかなように、本研究で開発した CVD 合成 hBN を SiO₂ とグラフェンの間に挿入すると、グラフェンの 2D バンドがシャープになるとともに、G バンドに対する 2D バンド強度が強くなった。図 3 のヒストグラムからも hBN による効果は明瞭に分かる。また、より詳細なラマンの解析では、SiO₂ 上ではグラフェンがドーピングの影響を受けているが、hBN によりその影響が軽減されたことも確認できた。

以上のように、本研究によって高品質の多層 hBN を合成できるようになり、またグラフェンなどの二次元物質の絶縁基板として極めて有望であることを示すことに成功した。同時に、金属触媒の極めてユニークな結晶構造変化が多層 hBN 成長に関与していることも見出すことができた。本研究は世界トップレベルの高品質 hBN の CVD 成長に貢献するものであり、二次元物質研究を次のステージに押し上げる可能性を有し、挑戦的研究として今後一層大きな発展が期待できる成果を得られた。

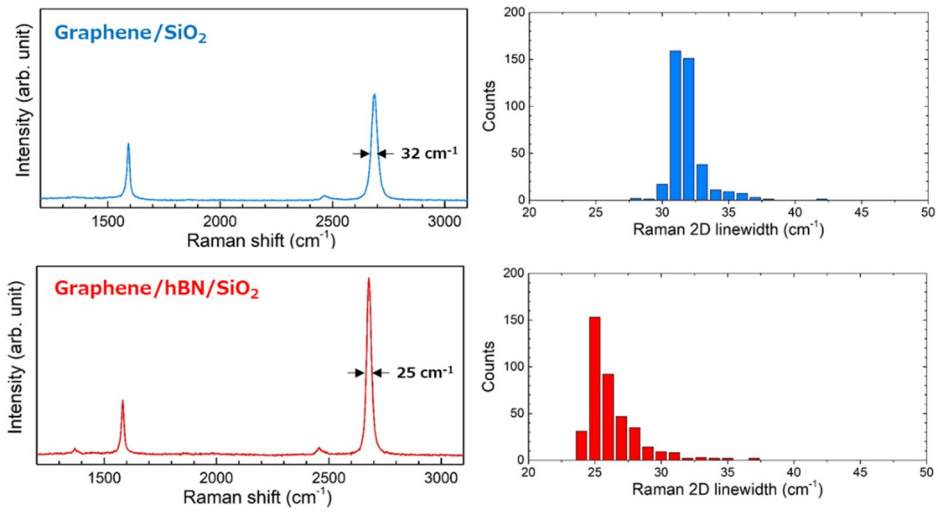


図3 SiO₂ 基板と hBN/SiO₂ 基板に転写した単層グラフェンのラマンスペクトルの比較と 2D バンドの半値幅の分布の比較。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Taslim Alexandre Budiman, Nakajima Hideaki, Lin Yung-Chang, Uchida Yuki, Kawahara Kenji, Okazaki Toshiya, Suenaga Kazu, Hibino Hiroki, Ago Hiroki	4. 巻 11
2. 論文標題 Synthesis of sub-millimeter single-crystal grains of aligned hexagonal boron nitride on an epitaxial Ni film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 14668 ~ 14675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9NR03525G	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 Ji Hyun Goo, Solis Fernandez Pablo, Yoshimura Daisuke, Maruyama Mina, Endo Takahiko, Miyata Yasumitsu, Okada Susumu, Ago Hiroki	4. 巻 31
2. 論文標題 Chemically tuned p and n type WSe2 monolayers with high carrier mobility for advanced electronics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 1903613 ~ 1903613
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201903613	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 Erkilic Ufuk, Solis-Fernandez Pablo, Ji Hyun Goo, Shinokita Keisuke, Lin Yung-Chang, Maruyama Mina, Suenaga Kazu, Okada Susumu, Matsuda Kazunari, Ago Hiroki	4. 巻 11
2. 論文標題 Vapor phase selective growth of two-dimensional perovskite/WSe2 heterostructures for optoelectronic applications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 40503 ~ 40511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b13904	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 Aji Adha Sukma, Nishi Ryohei, Ago Hiroki, Ohno Yutaka	4. 巻 68
2. 論文標題 High output voltage generation of over 5 V from liquid motion on single-layer MoS2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Energy	6. 最初と最後の頁 104370 ~ 104370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nanoen.2019.104370	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 Lin Yung-Chang, Ji Hyun Goo, Chang Li-Jen, Chang Yao-Pang, Liu Zheng, Lee Gun-Do, Chiu Po-Wen, Ago Hiroki, Suenaga Kazu	4. 巻 14
2. 論文標題 Scanning moire fringe method: A superior approach to perceive defects, interfaces, and distortion in 2D materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 6034 ~ 6042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.0c01729	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 Hirokawa Sota, Teshima Hideaki, Solis-Fernandez Pablo, Ago Hiroki, Tomo Yoko, Li Qin-Yi, Takahashi Koji	4. 巻 5
2. 論文標題 Nanoscale Bubble Dynamics Induced by Damage of Graphene Liquid Cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 11180 ~ 11185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.0c01207	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 Solis-Fernandez Pablo, Terao Yuri, Kawahara Kenji, Nishiyama Wataru, Uwanno Teerayut, Lin Yung-Chang, Yamamoto Keisuke, Nakashima Hiroshi, Nagashio Kosuke, Hibino Hiroki, Suenaga Kazu, Ago Hiroki	4. 巻 14
2. 論文標題 Isothermal growth and stacking evolution in highly uniform Bernal-stacked bilayer graphene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 6834 ~ 6844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.0c00645	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 Erkilic Ufuk, Ji Hyun Goo, Nishibori Eiji, Ago Hiroki	4. 巻 22
2. 論文標題 One-step vapour phase growth of two-dimensional formamidinium-based perovskite and its hot carrier dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 21512 ~ 21519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CP02652B	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 Uchida Yuki, Kawahara Kenji, Fukamachi Satoru, Ago Hiroki	4. 巻 2
2. 論文標題 Chemical vapor deposition growth of uniform multilayer hexagonal boron nitride driven by structural transformation of a metal thin film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 3270 ~ 3278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00601	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 Erkilic Ufuk, Ago Hiroki	4. 巻 7
2. 論文標題 Type-I heterostructure and improved phase stability of formamidinium lead iodide perovskite grown on WS ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Evergreen	6. 最初と最後の頁 323 ~ 328
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 Inukai Daiki, Koyama Takeshi, Kawahara Kenji, Ago Hiroki, Kishida Hideo	4. 巻 124
2. 論文標題 Electronic states of electrochemically doped single-layer graphene probed through Fano resonance effects in Raman scattering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 26428 ~ 26433
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c06566	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 Das Rasel, Solis-Fernandez Pablo, Breite Daniel, Prager Andrea, Lotnyk Andriy, Schulze Agnes, Ago Hiroki	4. 巻 426
2. 論文標題 High flux and adsorption based non-functionalized hexagonal boron nitride lamellar membrane for ultrafast water purification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 127721 ~ 127721
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2020.127721	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 Ji Hyun Goo, Solis-Fernandez Pablo, Erkilic Ufuk, Ago Hiroki	4. 巻 4
2. 論文標題 Stacking orientation-dependent photoluminescence pathways in artificially stacked bilayer WS2 nanosheets grown by chemical vapor deposition: Implications for spintronics and valleytronics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 3717 ~ 3724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.1c00192	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 15件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 H. Ago
2. 発表標題 Controlled synthesis of high-quality 2D materials for device applications
3. 学会等名 2019 Symposia on VLSI Technology and Circuits (Workshop on "2D Materials and Applications") (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吾郷浩樹
2. 発表標題 グラフェンをはじめとした二次元原子膜のCVD成長とその展開
3. 学会等名 第12回 酸化グラフェン研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田大樹, 田中大地, 内田勇気, 河原憲治, 吾郷浩樹
2. 発表標題 単層MoS ₂ のPL発光とラマン散乱に対するCVD h-BNの厚さ依存性
3. 学会等名 第57回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Ago
2. 発表標題 Controlled CVD Growth of High-Quality 2D Materials and Their Heterostructures for Device Applications
3. 学会等名 SSDM2019 (Solid State Devices and Materials 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Ago
2. 発表標題 Controlled CVD growth of high-quality 2D materials and their heterostructures for electronic applications
3. 学会等名 RPGR2019 (Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Ago
2. 発表標題 Controlled CVD growth of high-quality 2D materials and their heterostructures for electronic applications
3. 学会等名 10th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy and Environment (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Honda, D. Tanaka, Y. Uchida, K. Kawahara, H. Ago
2. 発表標題 CVD-Grown h-BN as a Substrate for Monolayer MoS ₂
3. 学会等名 10th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy and Environment (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吾郷浩樹
2. 発表標題 二次元原子膜の結晶成長とその展開
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Murase, K. Kawahara, D. Tanaka, H. Kim, H. Ago
2. 発表標題 Synthesis and growth mechanism of high quality multilayer hexagonal boron nitride films on metal foils
3. 学会等名 CSS-EEST21 (The 21st Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Ago
2. 発表標題 Controlled CVD growth of high-quality 2D layered materials for electronic and photonic applications
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Ago
2. 発表標題 Controlled synthesis of 2D materials and their heterostructures for device applications
3. 学会等名 The 3rd Workshop on Functional Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Ago
2. 発表標題 Controlled synthesis and processing of 2D materials for future applications
3. 学会等名 1 & 2DM Conference and Exhibition 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本田大樹, 田中大地, 内田勇氣, 深町悟, 河原憲治, 吾郷浩樹
2. 発表標題 CVD合成した多層h-BNによる単層MoS ₂ の特性向上
3. 学会等名 2020年 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Das, P. Solis-Fernandez, H. Ago
2. 発表標題 Hexagonal boron nitride nanosheets for ultrafast membrane filtration
3. 学会等名 第58回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Ago
2. 発表標題 Syntheses and growth mechanisms of 2D materials
3. 学会等名 A3 Foresight Program (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Ago
2. 発表標題 Synthesis of high-quality 2D materials for electronic applications
3. 学会等名 2020 VLSI-TSA (VLSI: Technology, Systems and Applications) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吾郷浩樹
2. 発表標題 グラフェンの合成・物性・応用、そして二次元物質への広がり
3. 学会等名 炭素材料学会基礎講習会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Ago
2. 発表標題 Highly Controlled CVD Synthesis of Monolayer and Multilayer h-BN for 2D Materials Applications
3. 学会等名 Graphene 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. G. Ji, P. Solis Fernandez, D. Yoshimura, M. Maruyama, T. Endo, Y. Miyata, S. Okada, H. Ago
2. 発表標題 Chemically tuned p- and n-type WSe ₂ monolayers with improved carrier mobility for electronic applications
3. 学会等名 第59回FNTG総合シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 P. Solis Fernandez, Y. Terao, K. Kawahara, W. Nishiyama, T. Uwanno, Y.-C. Lin, K. Yamamoto, H. Nakashima, K. Nagashio, H. Hibino, K. Suenaga, H. Ago
2. 発表標題 Isothermal growth and stacking evolution of highly uniform AB-stacked bilayer graphene
3. 学会等名 第59回FNTG総合シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三石郁之, 柏倉一斗, 丹羽由実, 小川ともよ, 田原謙, 北浦良, Pablo Solis-Fernandez, 河原憲治, 吾郷浩樹, 谷口卓郎, 野本憲太郎, 小高大樹
2. 発表標題 グラフェン超薄膜を用いた高機能汎用型光学素子の開発
3. 学会等名 第21回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吾郷浩樹
2. 発表標題 グラフェンとh-BNのCVD成長から広がる二次元物質研究
3. 学会等名 2021年 第68回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吾郷浩樹
2. 発表標題 究極の表面物質、2次元物質の科学とフロンティア
3. 学会等名 表面・界面構造セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊翔太, Ufuk Erkilic;, Pablo Solis Fernandez, 吾郷浩樹
2. 発表標題 h-BNナノ空間内での二次元ペロブスカイトの合成
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

〔図書〕 計3件

1. 著者名 内田勇気, 吾郷浩樹	4. 発行年 2020年
2. 出版社 NTS出版	5. 総ページ数 1570
3. 書名 2020版 薄膜作製応用ハンドブック(グラフェンをはじめとする2次元材料の合成法)	

1. 著者名 吾郷浩樹, 河原憲治	4. 発行年 2020年
2. 出版社 NTS出版	5. 総ページ数 558
3. 書名 グラフェンから広がる二次元物質の新技术と応用(大面積h-BNのCVD成長)	

1. 著者名 吾郷浩樹	4. 発行年 2020年
2. 出版社 NTS出版	5. 総ページ数 448
3. 書名 ポストグラフェン材料の創製と用途開発最前線(遷移金属ダイカルコゲナイドの転写と応用展開)	

〔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			
オーストラリア	University of Technology Sydney			
ドイツ	Leibniz Institute of Surface Engineering			
韓国	UNIST	POSTECH		
米国	Los Alamos National Laboratory			