

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00354

研究課題名(和文)窒化ホウ素の科学のための高品位単結晶創製

研究課題名(英文) Synthesis of high quality single crystals for science of Boron Nitride

研究代表者

谷口 尚 (TANIGUCHI, Takashi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・拠点長

研究者番号：80354413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：高圧下での結晶成長溶媒の最適化を進め、残留炭素不純物濃度が数10ppbレベルの高品位六方晶窒化ホウ素(hBN)単結晶を得た(EPR評価)。高純度結晶の遠紫外線発光効率と残留炭素不純物量には強い相関があり良質結晶の外部量子効率の目安として3%程度を得た。発光ダイナミクスの評価よりhBNは間接遷移型半導体でありながら、発光に必要な運動量の変化に合致するフォノンが多く存在し、かつエネルギーバンドが平坦な領域が存在するために発光しやすい事を見いだした。更に、電気化学的手法による水酸化カリウム水溶液を用いて、K添加hBNを得た。また、2次元原子層素子向け絶縁基板としての国内外機関との連携も進められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

窒化ホウ素(BN)は炭素と類似の結晶構造を有し、黒鉛型の六方晶(hBN)は耐熱材料、絶縁材料等として産業応用されている。本研究では高純度化のレベルをppb領域にまで引き上げたhBN結晶の高品位化とその遠紫外線発光素子の高効率化を見いだした。hBNへのドーピングによる半導体化は最大の課題であるが、電気化学的手法による水酸化カリウム水溶液を用いて、K添加hBNの合成に成功した。半導体特性評価のため、電界効果トランジスタ構造による評価手法の確立が課題である。本課題により、2次元原子層デバイス基盤としての活用も含め、hBNの新たな半導体材料として基礎の確立に向けた成果を得ることが出来た。

研究成果の概要(英文)：We optimized the crystal growth solvent and obtained high-quality hexagonal boron nitride (hBN) single crystals with a residual carbon impurity concentration of several 10 ppb level (EPR evaluation) under high pressure. There is a strong correlation between the far-ultraviolet luminescence efficiency of the high-purity crystal and the amount of residual carbon impurities, and we obtained a rough estimate of the external quantum efficiency of the high-quality crystal of about 3%. It was found that although hBN is an indirect transition semiconductor, it is easy to emit light due to the presence of many phonons that match the momentum change required for luminescence and the existence of a flat energy band region. Furthermore, K-doped hBN was obtained using an aqueous potassium hydroxide solution by an electrochemical method. In addition, collaboration with domestic and foreign institutions as an insulating substrate for two-dimensional atomic layer devices was also promoted.

研究分野：高圧力材料科学

キーワード：六方晶窒化ホウ素 高圧合成 遠紫外線発光 反応性溶媒

1. 研究開始当初の背景

窒化ホウ素 (BN) は炭素と類似の結晶構造を有し、黒鉛型の六方晶 (hBN) は耐熱材料、絶縁材料等として産業応用されている。この hBN の応用は炭素材料の多様性と比較して未だ限定的と云えるが、近年新たな半導体材料としての展開が進みつつある。不純物制御の観点では、hBN の主たる不純物である炭素と酸素は高純度結晶といえども数 ppm オーダーにとどまっている。高純度化のレベルを ppb 領域にまで引き上げた高品位化を実現し、hBN の遠紫外線発光素子の高効率化を始めとした BN の科学の基礎の確立が重要である。更に、hBN への半導体化は最大の課題であるが、高純度単結晶を獲得した上で、適切なドーピングと半導体特性の評価、制御への挑戦が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、BN 単結晶の高品位化の極限の追求 (ppb レベルの不純物制御) 高輝度遠紫外線発光の高効率化、インターカーレーションによる半導体化を行い、BN の科学への深い洞察を基礎とした、BN の新たな機能の開拓を目的とする。更に国内外の 2 次系原子層デバイス研究者に hBN 結晶を提供し、得られた知見を、hBN 結晶の高品位化、新たな機能発現・制御に帰還する。

高純度六方晶窒化ホウ素 (hBN) 単結晶の特徴であるバンド端の高輝度の遠紫外線発光特性 (波長 215nm) は残留不純物と強い相関があり、炭素濃度の増加に応じてバンド端発光が減衰し、波長 330nm 近傍の発光が支配的となる。この 330nm 発光を呈する炭素不純物濃度の閾値が 10ppm レベルであるが、これは SIMS 分析のほぼ検出限界に相当する。そこで、直近の課題は残留炭素不純物の除去はもとより、更なる高品位化 (高純度化) に伴う SIMS 分析の検出限界である不純物濃度 10ppm 以下の分析手法の確立である。これまでの予備的な実験により炭素残留不純物領域の低減のため、Ba 系溶媒の改良 (Ba-N 化合物と Ba アジ化物の混合等) の効果があること、hBN 中の炭素不純物濃度を EPR 法により ppb レベルで評価できることが示されている。

本課題では現行の不純物濃度が ppm にとどまっている高純度化のレベルを ppb 領域にまで引き上げた高品位化を実現し、hBN の遠紫外線発光素子の高効率化を始めとした BN の科学の基礎を先導する。更に、hBN への半導体化は最大の課題であるが、高純度単結晶を獲得した上で、適切なドーピングと半導体特性の評価、制御に取り組む。

3. 研究の方法

これまでの予備的な実験により hBN 中の炭素残留不純物領域の低減のため、Ba 系溶媒の改良 (Ba-N 化合物と Ba アジ化物の混合等) の効果があること、hBN 中の炭素不純物濃度を EPR 法により ppb レベルで評価できることが示されている。本研究では結晶育成溶媒の改良と EPR 法による評価とあわせ、炭素不純物濃度 10ppb 以下の結晶合成手法を確立し、当該結晶の遠紫外線発光効率の評価に供する。EPR 分析はバルク結晶全体の欠陥に由来するスピン数の総和を与えるため、不純物分布は評価できないが、欠陥濃度の定量化ができる。遠紫外線発光特性は、積分級を用いた全方位フォトルミネセンス (ODPL) 法により光励起による遠紫外線発光 (PL) の外部量子効率 (EQE) の評価を行う。また、hBN は

近年グラフェンを始めとする 2 次元光・電子系デバイス用の絶縁性基板として活用されている。グラフェン/hBN デバイスのキャリア輸送特性などは hBN 中の残留不純物評価のためのプローブとして活用できる可能性があり、上述した hBN 単結晶中の残留不純物の影響を 2 次元光・電子デバイス特性としての評価から帰還できる。一方、hBN のワイドギャップ半導体としての未来では、半導体化が最大の課題であるが、理論予測により、アルカリ金属、あるいはハロゲン化物の挿入(I.C.)による hBN 中のキャリア制御が予測されている。本研究ではこれまでにグラフェン用に開発した技術を h-BN へ改良し、湿式 I.C. 法によりカリウム(K)やナトリウム(Na)のドーピングに挑む。

4 . 研究成果

残留炭素不純物濃度が 1ppm 以下の高品位 hBN 結晶を得た。高純度化の鍵は結晶成長溶媒の最適化であるが、これまでの窒化バリウム系にアジ化バリウムを少量添加し、結晶中の残留炭素不純物濃度が 10ppm レベルから数十 ppb レベル 改善した。hBN 中の 1ppm 以下の炭素不純物の定量が長年の課題であったが、EPR 法の適用で解決した。溶媒の改質を行って合成した一連の結晶の EPR 評価を行ったところ、高品位化(不純物起原の発光量の低減)と炭素残留不純物量の間に関係が得られた。炭素由来のスピン数が $10^{18}/\text{cm}^3$ レベルから $10^{15}/\text{cm}^3$ レベルまでの減少を示しており、発光特性評価の結果と整合している。

得られた高純度結晶により、遠紫外線発光素子の高効率化の基礎となる光物性研究を進めた。分担者の阪大の小島は多数の hBN 結晶を積分球を用いた外部量子効率 (EQE) 測定によって評価し、高純度化された(管理番号の大きい世代の)試料における EQE がおよそ 3%(平均値。最大値としては 6%程度が得られることもある)で一定になっていることを確認した。上述の溶媒の改質による結晶の高品位化に連動して、EQE の明かな向上が観測されたことになる。時間分解発光計測において BN 試料の共鳴ラマン散乱等の影響を避けるため、チタンサファイヤレーザの第 4 高調波を用いた時間分解フォトルミネッセンス (TRPL)ではなく、フェムト秒レーザ励起によるフェムト秒光電子銃を用いた時間分解カソードルミネッセンス (TRCL)測定を用いてバンド端発光の発光寿命評価を行うことを検討し、TRCL 装置の立ち上げ作業を行った。同じく分担者の東北大、秩父と嶋は hBN のバンド端付近に観測される発光線の起源を明らかにするため、発光スペクトル及び発光ダイナミクスの評価を行い、hBN は間接遷移型半導体でありながら、発光に必要な運動量の変化に合致するフォノンが多く存在し、かつエネルギーバンドが平坦な領域が k 空間に存在するため状態密度も高く、そのため発光しやすい事を見いだした。

hBN への適切なドーピングによる半導体化は最大の課題である。分担者の産総研の山田は電気化学的手法による水酸化カリウム水溶液を用いて、K 添加 hBN を得た。SEM/EDS 分析、数層にまで剥離した試料の TEM・EELS 観察等で K の層間の局在が示唆された。ラマン分光法による評価では、結晶性を損なわずにドーピングされている。放射光光電子分光法により、カリウム添加により B1s 及び N1s ピークの高束縛エネルギー側へのシフトを観測した。ドーピングによる抵抗低下は観測されず、電界効果トランジスタ構造によるゲート変調による評価手法の確立が課題である。更に、国内外の連携機関において、2 次元原子層基板、絶縁膜としての hBN の特性評価、有用性が明らかにされた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kim Hyunjin, Choi Youngjoon, Lewandowski Cyprian, Thomson Alex, Zhang Yiran, Polski Robert, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Alicea Jason, Nadj-Perge Stevan	4. 巻 606
2. 論文標題 Evidence for unconventional superconductivity in twisted trilayer graphene	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 494 ~ 500
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-022-04715-z	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 Shin Wongil, Myeong Gyuho, Sung Kyunghwan, Kim Seunggho, Lim Hongsik, Kim Boram, Jin Taehyeok, Park Jihoon, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Liu Fei, Cho Sungjae	4. 巻 120
2. 論文標題 Steep-slope Schottky diode with cold metal source	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 243506 ~ 243506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0097408	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 Su Cong, Zhang Fang, Kahn Salman, Shevitski Brian, Jiang Jingwei, Dai Chunhui, Ungar Alex, Park Ji-Hoon, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Kong Jing, Tang Zikang, Zhang Wenqing, Wang Feng, Crommie Michael, Louie Steven G., Aloni Shaul, Zettl Alex	4. 巻 21
2. 論文標題 Tuning colour centres at a twisted hexagonal boron nitride interface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 896 ~ 902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-022-01303-4	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 Ngamprapawat Supawan, Nishimura Tomonori, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Nagashio Kosuke	4. 巻 14
2. 論文標題 Current Injection into Single-Crystalline Carbon-Doped h-BN toward Electronic and Optoelectronic Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials and Interfaces	6. 最初と最後の頁 25731 ~ 25740
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.2c04544	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 Thureja Deepankur, Imamoglu Atac, Smoleski Tomasz, Amelio Ivan, Popert Alexander, Chervy Thibault, Lu Xiaobo, Liu Song, Barmak Katayun, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Norris David J., Kroner Martin, Murthy Puneet A.	4. 巻 606
2. 論文標題 Electrically tunable quantum confinement of neutral excitons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 298 ~ 304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-022-04634-z	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 Sasaki Taro, Ueno Keiji, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Nishimura Tomonori, Nagashio Kosuke	4. 巻 14
2. 論文標題 Ultrafast Operation of 2D Heterostructured Nonvolatile Memory Devices Provided by the Strong Short-Time Dielectric Breakdown Strength of h-BN	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials and Interfaces	6. 最初と最後の頁 25659 ~ 25669
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsam.2c03198	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 Sakano Masato, Tanaka Yuma, Masubuchi Satoru, Okazaki Shota, Nomoto Takuya, Oshima Atsushi, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Arita Ryotaro, Sasagawa Takao, Machida Tomoki, Ishizaka Kyoko	4. 巻 4
2. 論文標題 Odd-even layer-number effect of valence-band spin splitting in WTe ₂	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23247-23251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.023247	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 Yuta Seo, Satoru Masubuchi, Momoko Onodera, Yijin Zhang, Rai Moriya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida.	4. 巻 120
2. 論文標題 Subband-resolved momentum-conserved resonant tunneling in monolayer graphene/h-BN/ABA-trilayer graphene small-twist-angle tunneling device.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 083102-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0080215	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 Tingxin Li, Shengwei Jiang, Bowen Shen, Yang Zhang, Lizhong Li, Zui Tao, Trithep Devakul, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Liang Fu, Jie Shan, Kin Fai Mak.	4. 巻 600
2. 論文標題 Quantum anomalous Hall effect from intertwined moire bands	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 641-646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-021-04171-1	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 Myungchul Oh, Kevin P. Nuckolls, Dillon Wong, Ryan L. Lee, Xiaomeng Liu, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Ali Yazdani.	4. 巻 600
2. 論文標題 Evidence for unconventional superconductivity in twisted bilayer graphene.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 240-245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-021-04121-x	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 Tiancheng Song, Qi-Chao Sun, Eric Anderson, Chong Wang, Jimin Qian, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Michael A. McGuire, Rainer Stehr, Di Xiao, Ting Cao, Jorg Wrachtrup, Xiaodong Xu	4. 巻 374
2. 論文標題 Direct visualization of magnetic domains and moire magnetism in twisted 2D magnets.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1140-1144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abj7478	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 Augusto Ghiotto, En-Min Shih, Giancarlo S. S. G. Pereira, Daniel A. Rhodes, Bumho Kim, Jiawei Zang, Andrew J. Millis, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, James C. Hone, Lei Wang, Cory R. Dean, Abhay N. Pasupathy.	4. 巻 597
2. 論文標題 Quantum criticality in twisted transition metal dichalcogenides.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 345-349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-021-03815-6	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 Yuki Okigawa, Tomoaki Masuzawa, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Takatoshi Yamada	4. 巻 562
2. 論文標題 Temperature dependence of carrier mobility in chemical vapor deposited graphene on high-pressure, high-temperature hexagonal boron nitride	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 150146-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2021.150146	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 H. Agarwal, B. Terres, L. Orsini, A. Montanaro, V. Sorianello, M. Pantouvaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. V. Thourhout, M. Romagnoli, and F. H. L. Koppens	4. 巻 12
2. 論文標題 2D-3D integration of hexagonal boron nitride and a high-dielectric for ultrafast graphene-based electro-absorption modulators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nat. Commun.	6. 最初と最後の頁 1070-1704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-20926-w	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 Z. Zheng, Q. Ma, Z. Bi, S. de la Barrera, M.-H. Liu, N. Mao, Y. Zhang, N. Kiper, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Kong, W. A. Tisdale, R. Ashoori, N. Gedik, L. Fu, S.-Y. Xu, and P. Jarillo-Herrero	4. 巻 588
2. 論文標題 Unconventional ferroelectricity in moire heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 71-76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-2970-9	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 R. Kumar, D. W. Session, R. Tsuchikawa, M. Homer, H. Paas, K. Watanabe, T. Taniguchi, and V. V. Deshpande	4. 巻 117
2. 論文標題 Circular electromechanical resonators based on hexagonal-boron nitride-graphene heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 183103 -4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0024583	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 T. Yamada, Y. Okigawa, M. Hasegawa, K. Watanabe, and T. Taniguchi	4. 巻 10
2. 論文標題 Relationship between mobility and strain in CVD graphene on h-BN	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Adv.	6. 最初と最後の頁 085309-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0019621	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 A. Segura, R. Cusce, T. Taniguchi, K. Watanabe, and L. Arts	4. 巻 101
2. 論文標題 Long lifetime of the E1u in-plane infrared-active modes of h-BN	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 235203-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.235203	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 N. Fang, K. Otsuka, A. Ishii, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, and Y. K. Kato	4. 巻 7
2. 論文標題 Hexagonal Boron Nitride As an Ideal Substrate for Carbon Nanotube Photonics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Photo	6. 最初と最後の頁 1773-1779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.0c00406	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 M. Koperski, D. Vaclavkova, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. S. Novoselov, and M. Potemski	4. 巻 117
2. 論文標題 Midgap radiative centers in carbon-enriched hexagonal boron nitride	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc Natl Acad Sci USA	6. 最初と最後の頁 13214-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2003895117	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 G. Ramer, M. Tuteja, J. R. Matson, M. Davanco, T. G. Folland, A. Kretinin, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. S. Novoselov, J. D. Caldwell, and A. Centrone	4. 巻 9
2. 論文標題 High-Q dark hyperbolic phonon-polaritons in hexagonal boron nitride nanostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 1457-1467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2020-0048	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

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 T.Taniguchi
2. 発表標題 Impurity and isotope control of Boron Nitride crystals and their properties
3. 学会等名 21th International Symposium on Boron, Borides, and Related Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T.Taniguchi
2. 発表標題 Synthesis of boron nitride single crystals under high pressure and impurity/isotope control for their functionalization
3. 学会等名 APS March meeting 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷口 尚
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素のバルク結晶成長
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T.Taniguchi
2. 発表標題 Impurity control for diamond and boron nitride single crystals growth under high pressure
3. 学会等名 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbon 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T.Taniguchi
2. 発表標題 High pressure synthesis of hBN and other 2D single crystals
3. 学会等名 KPS-JSAP ジョイントシンポジウム The future of van der Waals structures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takatoshi Yamada, Yuki Okigawa, Takashi Taniguchi
2. 発表標題 Thickness dependence of h-BN on electrical properties of CVD graphene
3. 学会等名 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbon 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田 貴壽、沖川 侑揮、増澤 智昭、小川修一、谷口尚
2. 発表標題 CVDグラフェンの電気特性のh-BN膜厚依存性
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Taniguchi
2. 発表標題 Solution growth of boron nitride single crystals under high pressure and their defect characterizations
3. 学会等名 the 12th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Taniguchi
2. 発表標題 "High Pressure Synthesis of Boron Nitride Crystals by Using a Reactive Solvent
3. 学会等名 the 10th Asian Conference on High Pressure Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T.Taniguchi
2. 発表標題 Impurity control of Hexagonal Boron Nitride Crystals by flux growth process
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2021) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T.Taniguchi
2. 発表標題 Single Crystalline Hexagonal Boron Nitride for 2D Opto-Electric Devices
3. 学会等名 49th International Conference on the Physics of Semiconductors , Jaszowiec2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T.Taniguchi
2. 発表標題 Synthesis of BN crystals by using solvent growth and their defect characterization
3. 学会等名 ACCGE-22/OMVPE-20: (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T.Taniguchi
2. 発表標題 Boron Nitride single crystals as wide band gap materials
3. 学会等名 NDNC2020/2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 金属イオンでドーピングされた六方晶窒化ホウ素膜とその作製方法	発明者 山田貴壽、谷口尚	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、出願番号2023-017551	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	町田 友樹 (MACHIDA Tomoki) (00376633)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	
研究分担者	山田 貴壽 (YAMADA Takatoshi) (30306500)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・研究グループ長 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	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	小島 一信 (KOJIMA Sjinichi) (30534250)	大阪大学・工学研究科・教授 (14401)	
研究分担者	宮川 仁 (MIYAKAWA Masashi) (40552667)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主任研究員 (82108)	
研究分担者	秩父 重英 (CHICHIBU Shigefusa) (80266907)	東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301)	

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			
米国	MIT	Columbia Univ	Harvard Univ.	他20機関
ドイツ	Univ.Suttutgard	ドルトムント工科大	ミュンヘン工科大	他4機関
シンガポール	SNU	NTU		
フランス	CNRS	ニール大	パリ南大	他3機関
スペイン	ICFO			
中国	フダン大	南京大	北京大	他2機関