

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2020～2022

課題番号：20KK0114

研究課題名（和文）Application of vertically aligned one-dimensional van der Waals heterostructures in lithium sulfur battery

研究課題名（英文）Application of vertically aligned one-dimensional van der Waals heterostructures in lithium sulfur battery

研究代表者

項 栄 (XIANG, RONG)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・外国人客員研究員

研究者番号：20740096

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,300,000 円

研究成果の概要（和文）：化学気相成長法（CVD）により合成された1次元ヘテロナノチューブの構造詳細と形成機構を研究した。エッジ構造、核生成サイト、結晶エピタキシー関係が明らかになった。結晶エピタキシー関係を透過型電子顕微鏡で明瞭に明らかにした。（PNAS 2021）。原子レベルで精密な単一キラリティ SWCNT 上に 1D vdW ヘテロ構造を構築する可能性を実証した（Carbon 2023）。また、Liデンドライトを抑制する新しいタイプの添加剤を提案するが、実用電池の正極材料に1Dヘテロ構造を使用するための指針も示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Designing and fabricating new materials for novel types of, particularly high energy, density batteries will be crucial for the development of electric vehicles. 1D van der Waals heterostructures with proper structure is expected to be a cathode material for this purpose.

研究成果の概要（英文）：We reported the experimental synthesis of one-dimensional van der Waals (1D vdW) heterostructures, where single-crystal boron nitride nanotubes (BNNT) and/or molybdenum disulfide nanotubes seamlessly wrap around a single-walled carbon nanotube (SWCNT) and form a coaxial hetero-nanotube with a diameter of only several nm (Science 2020). Later, we performed a comprehensive study on the structural details and formation mechanism of chemical vapor deposition (CVD) synthesized 1D heterostructures. Edge structures, nucleation sites, and crystal epitaxial relationships are clearly revealed using transmission electron microscopy (PNAS 2021). Finally, we demonstrate the possibility of building 1D vdW heterostructures on atomically precise, single-chirality SWCNTs (Carbon 2023). We also propose a new type of additives to suppress Li dendrites but also provides guidance for using 1D heterostructures in cathode materials in practical batteries.

研究分野：ナノ材料

キーワード：一次元ファンデルワールスヘテロ構造 カーボンナノチューブ 透過型電子顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

Li-S battery, which uses metallic Li as anode, and S as cathode, has shown a potential specific energy density over 500 Wh/kg (2-3 times higher than state-of-the-art Li-ion batteries). At the same time, the use of S also makes battery fabrication less costly and more environment-friendly. However, one major obstacle for S as electrode is its poor electron conductivity, which is expected to be solved by incorporating conductive (mostly carbon) materials. Graphite, carbon nanotube (CNT), graphene, and their hybrid materials have been so far considered and proven effective, but the optimizations of materials and structure require more and continuous efforts.

Single-walled CNT (SWCNT), which has only one atomic graphene shell, is one of the best material for S loading in Li-S battery. Its high specific surface area (1300 m²/g if only considering the out wall) makes it possible to carrier more S in unit weight than e.g. MWCNTs. Our group at University of Tokyo invented alcohol catalytic chemical vapor deposition (ACCVD), by which we synthesized the first vertically aligned SWCNT array (Fig. 3c) in 2004. This unique aligned structure serves as an ideal conductor for electron and ion transport, and possesses noticeable advantages over previous candidate materials. In 2017, we applied this vertically aligned SWCNT into a Li-S, the battery worked with high stability and the cycling performance is clearly improved.

More recently, we achieved another progress in synthesizing hybrid nanotubes. Using SWCNT as a template, we obtained high quality boron nitride (BN) on the surface of SWCNT. TEM characterizations confirmed the outer BN is also a single crystal seamless nanotube, and EELS clearly illustrated the different elemental composition. In addition, we also obtained MoS₂ nanotubes around a SWCNT or SWCNT-BNNT structure. We name this coaxial nanotubes one dimensional van der Waals (1D vdW) heterostructures. In these heteronanotubes, electron can easily transfer from the surface to the SWCNT so the high conductivity is preserved. However, as the surface is modified by polar BN or MoS₂, electro-chemistry behaviors between Li and S are expected to be significantly affected, possibly resulting in a further enhancement of the battery performance.

2. 研究の目的

In this context, we proposed the following two objectives for this joint project:

- (1) Introduce vertically aligned 1D vdW heterostructure arrays as S support and conductive network in the cathode of Li-S battery, and optimize its structure for this application.
- (2) Study the heterostructure-S interface by a novel air-exposure-free TEM method to clarify the intermediate structure and interaction in Li-S-MoS₂-C system.

3. 研究の方法

SWCNT-BNNT heterostructures were synthesized by a low pressure thermal CVD using ammonia borane (H₃NBH₃) as the BN precursor. Briefly, the starting SWCNT prepared in the previous section was placed at the center of the furnace. 30 mg BN precursor was loaded at the upstream and heated to 70-90°C. Vapor of BN precursor was taken by a flow of 300 sccm Ar (with 3% H₂) to the hot zone to form BNNT on surface of SWCNTs. The reaction temperature was 1000-1100°C and the chamber pressure was maintained at 300 Pa. The coating time in this study varied from a few min to 1 hr.

Si TEM grid used in this study was prepared by dry etching. Briefly, a Si/SiO₂ wafer (thickness of Si 200 μm, thickness of SiO₂ 600 nm for both sides) was used as the starting substrate. Photoresist patterns were prepared on the topside of the substrate by photolithography to define window structures and outer shapes of TEM grids. SiO₂ and Si were etched from the topside by isotropic reactive ion etching to the depth of ~20 μm. Then, the backside of the substrate was photolithographically patterned with the similar structure as the topside but with a little larger windows, followed by being etched by deep reactive ion etching. Etching time and cycles were adjusted to completely etch through the Si and SiO₂, so that empty windows are formed for TEM observations.

Conventional HRTEM images were taken by a JEM-2800 at an acceleration voltage of 100 kV. EDS and selected area electron diffraction (SAED) patterns of the entire film were taken by the same TEMs with a typical selected area aperture diameter of a few μm and a camera length of 60 cm. Nano area electron diffraction (NAED) patterns of individual SWCNT-BNNT heterostructure were obtained by JEM-ARM200F STEM with a cold field-emission gun operating at 80 kV. In this case a near parallel beam is used together with a small convergence lens aperture (10 μm in diameter) to obtain a small-area electron beam size (~ 10 nm in diameter). Additionally, the samples were heated at 300 $^{\circ}\text{C}$ during the measurement to avoid carbon contamination using a heating holder (EM-31670SHTH) and a controller unit (EM-08170HCU). HAADF-, ABF-STEM images and corresponding EELS mapping of SWCNT-BNNT-MoS₂ heterostructures were obtained in the same TEM or GRAND-ARMTM STEM operating at 80 kV. Aberration corrected TEM images are taken at a different JEM-ARM200F TEM with a cold field-emission gun operating at 120 or 60 kV.

4. 研究成果

1. Growth mechanism of 1D vdW heterostructures

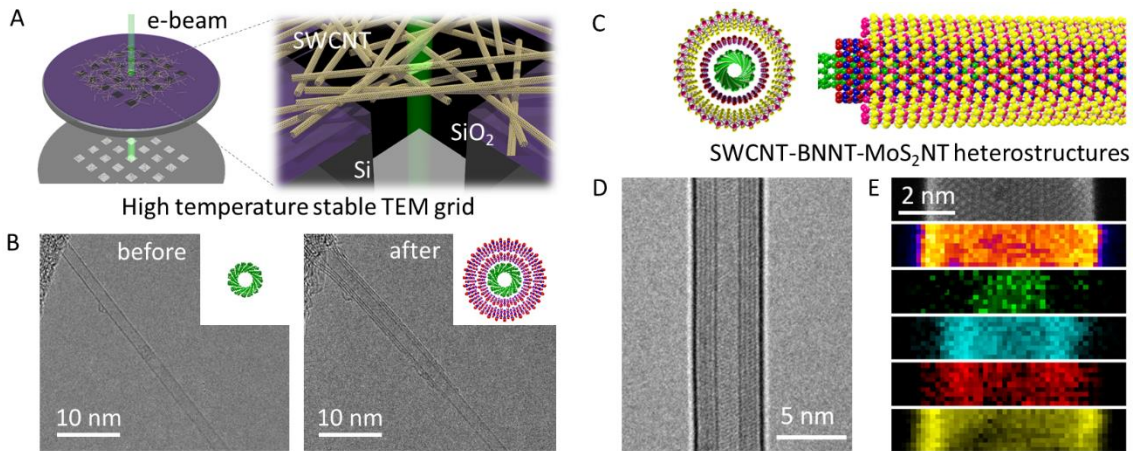


Fig. 1. The experimental strategy showing the growth of 1D vdW heterostructures directly on TEM grid. (A) Schematic of the high-temperature-stable TEM grid. (B) TEM images of the exact same SWCNT before and after the growth of outer BNNT. (C) Atomic model, (D) TEM image and (E) EELS mapping of a SWCNT-BNNT-MoS₂NT heterostructure (green, blue, red, yellow indicate the elemental distribution of carbon, boron, nitride, sulfur, respectively).

Fig. 1 shows an overview of the TEM strategy we used, as well as the structure of the 1D vdW heterostructures that we synthesized directly on our high-temperature-stable TEM grids. The TEM grid is made of Si and SiO₂, with a thin SiO₂ layer as support. In this study suspended SiO₂ is also etched so that there are empty windows that can support SWCNT networks (Fig. 1A). Because this grid is stable up to 1100 $^{\circ}\text{C}$, we can use it directly in a CVD growth furnace. The grid is compatible with use in most TEM holders. At a slightly reduced beam density, various structural and elemental characterization can be performed directly on this grid without any treatment. This strategy significantly improves the efficiency of TEM to reveal the original geometry and the structure details of our heteronanotubes. With the assistance of coordinates or markers on the grid, we are able to observe the same location (*SI Appendix*, Fig. S1), and even the exact same nanotube before and after a high temperature CVD. One example is shown in Fig. 1B. The original nanotube is single-walled, but after a BN CVD, two to three additional layers appeared on the surface of this SWCNT. By this strategy, the growth of additional BNNTs can be straightforwardly illustrated. When putting a SWCNT-BNNT structure into another CVD process, a ternary heterostructure of SWCNT-BNNT-MoS₂NT can also be fabricated. The example in Fig. 1C-E is a coaxial nanotube containing one layer of carbon, three layers of BN and one layer of MoS₂. Different materials can be clearly visualized by the image and electron energy loss spectroscopy (EELS) mapping.

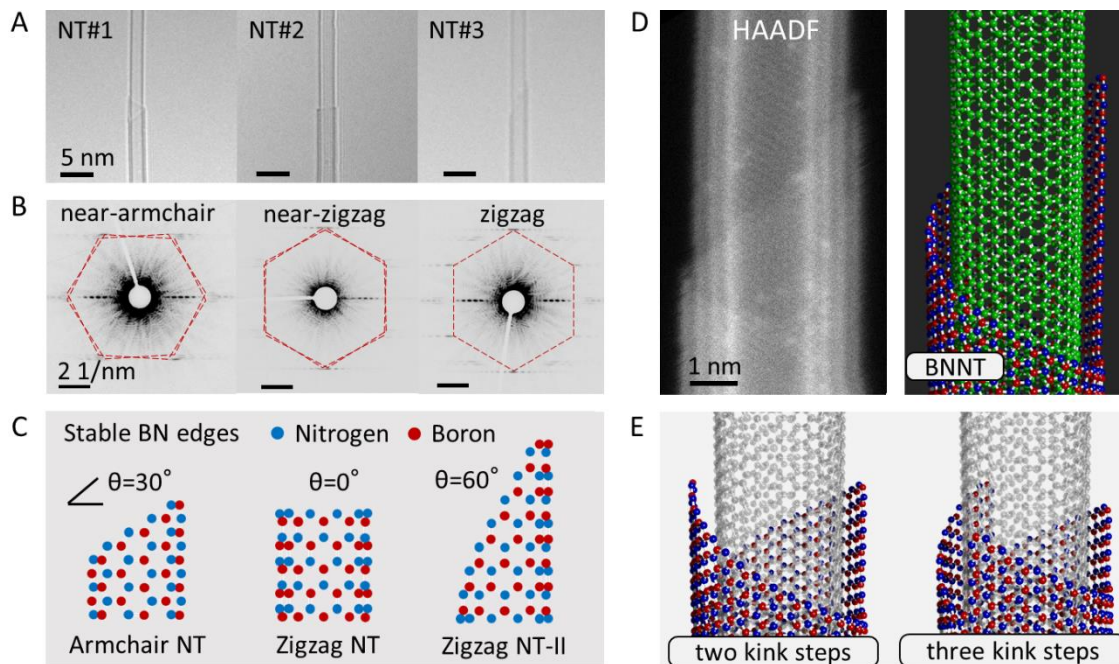


Fig. 2. Characterization of the open growing edge of the 1D vdW heterostructure. (A) TEM images of three different heteronanotubes showing each outer BNNT usually has a sharp-cut open edge, but the edge is aligned to the nanotube circumference with different angles. (B) NAED patterns of these corresponding three nanotubes, suggesting the chiral angle of outer BNNTs are 27° , 3° and 0° , respectively. (C) Expected atomic arrangements at the edge of these three BNNTs revealed by NAED patterns, indicating that the sharp-cut edges are N-terminated zigzag BN side. (D) Experimental HAADF-STEM image of a BN edge and its schematic (not exact) atomic structure. (E) Schematics showing open edges with two or three kink steps. In this case the inner nanotubes are made semi-transparent to show all kinks.

As heterostructures were directly synthesized on Si/SiO₂ TEM grid, this “heterostructure-on-grid” sample can be brought from our CVD chamber to the TEM column without further processing. Many intrinsic details of the heterostructure can be thereby preserved. The first thing we noticed is that the open ends of BNNTs can be visualized by TEM. Under-focused images, even by conventional high resolution TEM (HRTEM), can reveal the shape of a tube edge, and this shape is found to be different from tube to tube. Fig. 2A represents three typical types of open edges we observed. These edges of BNNTs usually have sharp-cut shapes but are cut diagonally with various inclination angles from the circumference of the nanotube. For example, NT#1 has a clear spiral end and the edge inclination angle (between the edge and tube circumference) is roughly 30° , while NT#2 has an edge nearly perpendicular to the SWCNT axis. To distinguish the difference between these two tubes, nano-area electron diffraction (NAED) was employed to determine the chiral angle (crystal orientation) of outer BNNTs.⁽¹⁸⁾ NAED patterns in Fig. 2B suggests that NT#1 is a near-armchair BNNT with the chiral angle of 28° , while NT#2 is a near-zigzag BNNT with chiral angle of 2° . Plotting the atomic arrangement of these nanotubes in Fig. 2C immediately reveals that, in both cases, the sharp cuttings we observe correspond to the zigzag edge of a BN honeycomb lattice. That is, an open-ended BNNT in this study prefers a zigzag edge over an armchair edge. This is consistent with previous theoretical and experimental studies in 2D BN where zigzag edge is found to be energetically more favorable.⁽¹⁹⁻²¹⁾ With this ability of observing the edge shape and identifying the chiral angle for the same nanotube, we learned that the open end of a BNNT is aligned to its axis with an angle depending on its own chiral index. An armchair BNNT tends to have a spiral edge (NT#1) while a zigzag BNNT has a perpendicular edge (NT#2), both of which are due to the preference of a zigzag edge. This correlation is straightforward and clearly demonstrated by the above characterizations.

2. Structure and property control of 1D vdW heterostructures

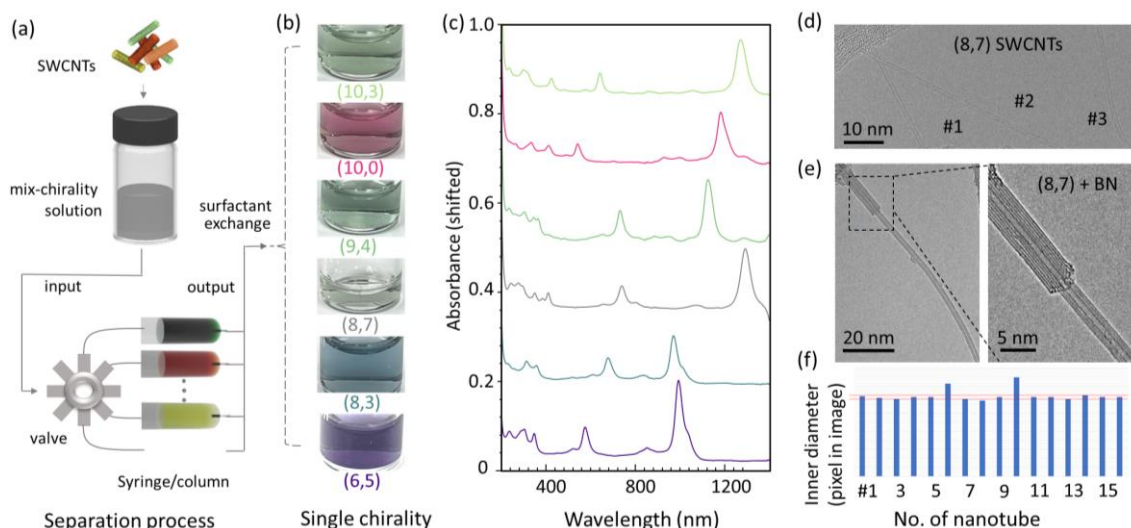


Figure 3. (a) Schematic images of separating SWCNT solution from a mixture of various chirality-species to single-chirality-enriched component. (b) Optical images of the chirality sorted SWCNT solutions after surfactant exchange, showing different colors for different chirality samples. (c) UV-vis-NIR optical absorption spectra of different chirality samples (spectra shifted about 0.2 each). (d) A representative TEM image of (8, 7) SWCNTs after the removal of surfactant, showing three SWCNTs with nearly identical diameters in the same region. (e) (8, 7) SWCNTs after the growth of additional BNNT shells, confirming high-quality 1D vdW heterostructures can be built on this solution processed and surfactant removed SWCNTs. (f) Inner diameters of 16 different SWCNT-BNNT heterostructures in the unit of TEM pixel (using the dark contrast of nanotube wall), showing a very small diameter variation among different nanotubes.

Chirality species (8, 7) SWCNT solution is employed as the first example to represent the surfactant removal and BNNT synthesis on single-chirality SWCNTs. Following a similar recipe developed in previous section, (8, 7) SWCNT networks are prepared on TEM grid. Fig. 3(d) reveals the geometry of SWCNTs after annealing. In this image, three SWCNTs of highly clean surface, and nearly identical diameters are observed. This not only illustrates the ability of efficient removal of surfactant SC, but also indicates the SWCNT in this sample is highly uniform. However, it should be noted that the diameter estimated from TEM contrast (usually from the dark contrast in conventional HR-TEM image) is only applied in certain defocus conditions, so it does not always precisely reflect the true diameter of the nanotube. Whereas such a uniform diameter distribution of SWCNTs under a very local TEM view sight has never been reported before for a mix-chirality SWCNTs. More accurate identification by electron diffraction will be presented later. Templating with these clean single-chirality SWCNTs, Fig. 3(e) presented (8, 7) SWCNTs after the growth of additional BNNT shells, confirming high-quality 1D vdW heterostructures can be built on this chirality specific (8, 7) SWCNT gone through a long “solution dispersion, sorting and redeposition” route. As a rough estimate, we analyzed the inner diameters of 16 different SWCNT-BNNT heterostructures in the unit of TEM pixel (using the dark contrast of nanotube walls). Although this statistic slightly underestimates the true diameter of SWCNT, the histogram in Fig. 3(f) shows a very small diameter variation among different nanotubes, which suggests that 14 out of 16 tubes are highly possible to be (8,7). The shell-shell spacing is typically between 0.32-0.36 nm, with an average value of 0.34 nm, which also confirms that the error comes from the TEM contrast identification rather than the scale calibration. (8, 7) is a semiconducting SWCNT with diameter of 1.0 nm and E₁₁ transition at 0.96 eV. Therefore, the above observation and analysis results not only verify the capability of producing 1D vdW heterostructure starting from solution processed SWCNTs, but also imply the possibility of building more sophisticated heterostructure devices from this property-specified hetero-nanotube.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計33件（うち査読付論文 33件／うち国際共著 32件／うちオープンアクセス 26件）

1. 著者名 Zheng, Y.; Dai, W.; Zhang, X.; Huang, J.-Q.; Maruyama, S.; Yuan, H. Xiang, R.	4. 巻 -
2. 論文標題 Nanotube-based heterostructures for electrochemistry: A mini-review on lithium storage, hydrogen evolution and beyond	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Energy Chemistry	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) 10.1016/j.jechem.2022.02.029	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 Zheng, Y.; Kumamoto, A.; Hisama, K.; Otsuka, K.; Wickerson, G.; Sato, Y.; Liu, M.; Inoue, T.; Chiashi, S.; Tang, D.-M.; Zhang, Q.; Anisimov, A.; Kauppinen, E.I.; Li, Y.; Suenaga, K.; Ikuhara, Y.; Maruyama, S. Xiang, R.	4. 巻 118
2. 論文標題 One-dimensional van der Waals heterostructures: Growth mechanism and handedness correlation revealed by nondestructive TEM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2107295118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2107295118	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 Zhang, Z.; Sun, X.; Yuan, P.; Yokokawa, S.; Zheng, Y.; Jiang, H.; Jin, L.; Anisimov, A.S.; Kauppinen, E.I.; Xiang, R.; Maruyama, S.; Yamashita, S. Set, S.Y.	4. 巻 39
2. 論文標題 SWCNT@BNNT With 1D Van Der Waals Heterostructure With a High Optical Damage Threshold for Laser Mode-Locking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 5875-5883
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2021.3092522	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 Ying, J.; Tan, X.; Lv, L.; Wang, X.; Gao, J.; Yan, Q.; Ma, H.; Nishimura, K.; Li, H.; Yu, J.; Liu, T.-H.; Xiang, R.; Sun, R.; Jiang, N.; Wong, C.; Maruyama, S.; Lin, C.-T. Dai, W.	4. 巻 15
2. 論文標題 Tailoring Highly Ordered Graphene Framework in Epoxy for High-Performance Polymer-Based Heat Dissipation Plates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 12922-12934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.1c01332	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 Yan, Q.; Dai, W.; Gao, J.; Tan, X.; Lv, L.; Ying, J.; Lu, J.; Yao, Y.; Wei, Q.; Sun, R.; Yu, J.; Jiang, N.; Chen, D.; Wong, C.; Xiang, R.; Maruyama, S. Lin, C.T.	4. 巻 15
2. 論文標題 Ultrahigh-Aspect-Ratio Boron Nitride Nanosheets Leading to Super High In-Plane Thermal Conductivity of Foldable Heat Spreader	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 6489
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 Yan, Q.; Alam, F.E.; Gao, J.; Dai, W.; Tan, X.; Lv, L.; Wang, J.; Zhang, H.; Chen, D.; Nishimura, K.; Wang, L.; Yu, J.; Lu, J.; Sun, R.; Xiang, R.; Maruyama, S.; Zhang, H.; Wu, S.; Jiang, N. Lin, C.-T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Soft and Self-Adhesive Thermal Interface Materials Based on Vertically Aligned, Covalently Bonded Graphene Nanowalls for Efficient Microelectronic Cooling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2104062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202104062	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 Xing, D.; Lin, C.-C.; Won, P.; Xiang, R.; Chen, T.-P.; Kamal, S.A.; Ho, Y.L.; Maruyama, S.; Ko, S.H.; Chen, C.-W. Delaunay, J.J.	4. 巻 -
2. 論文標題 Metallic Nanowire Coupled CsPbBr ₃ Quantum Dots Plasmonic Nanolaser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Adv. Funct. Mater.	6. 最初と最後の頁 2102375
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 Xiang, R.; Zhang, Q.; Inoue, T. Maruyama, S.	4. 巻 16
2. 論文標題 van der Waals Heterostructures down to One Dimensional Level: Synthesis, Characterization and Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Material Matters	6. 最初と最後の頁 18
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 Xiang, R. Maruyama, S.	4. 巻 1
2. 論文標題 Heteronanotubes: challenges and opportunities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Small Science	6. 最初と最後の頁 2000039
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 Wang, Z.; Lin, C.-C.; Ho, Y.-L.; Xiang, R.; Maruyama, S.; Chen, C.-W. Delaunay, J.-J.	4. 巻 9
2. 論文標題 Self-Patterned CsPbBr ₃ Nanocrystal Based Plasmonic Hot-Carrier Photodetector at Telecommunications Wavelengths	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2101474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202101474	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 Wang, P.Y.K.; Feng, Y.; Xiang, R.; Inoue, T.; Anisimov, A.; Kauppinen, E.I.; Chiashi, S. Maruyama, S.	4. 巻 32
2. 論文標題 Phenomenological modelling of thermal transport of hetero-nanotube network film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 205708
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 Tang, D.-M.; Erohin Sergey, V.; Kvashnin Dmitry, G.; Demin Victor, A.; Cretu, O.; Jiang, S.; Zhang, L.; Hou, P.-X.; Chen, G.; Futaba Don, N.; Zheng, Y.; Xiang, R.; Zhou, X.; Hsia, F.-C.; Kawamoto, N.; Mitome, M.; Nemoto, Y.; Uesugi, F.; Takeguchi, M.; Maruyama, S.; Cheng, H.-M.; Bando, Y.; et al.	4. 巻 374
2. 論文標題 Semiconductor nanochannels in metallic carbon nanotubes by thermomechanical chirality alteration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1616-1620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abi8884	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 Tan, X.; Ying, J.; Gao, J.; Yan, Q.; Lv, L.; Nishimura, K.; Wei, Q.; Li, H.; Du, S.; Wu, B.; Xiang, R.; Yu, J.; Jiang, N.; Lin, C.-T. Dai, W.	4. 巻 24
2. 論文標題 Rational design of high-performance thermal interface materials based on gold-nanocap-modified vertically aligned graphene architecture	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Communications	6. 最初と最後の頁 100621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coco.2020.100621	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 Shawky, A.; Nam, J.-S.; Kim, K.; Han, J.; Yoon, J.; Seo, S.; Lee, C.S.; Xiang, R.; Matsuo, Y.; Lee, H.M.; Maruyama, S. Jeon, I.	4. 巻 -
2. 論文標題 Controlled Removal of Surfactants from Double-Walled Carbon Nanotubes for Stronger p-Doping Effect and Its Demonstration in Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Small Methods	6. 最初と最後の頁 2100080
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smt.202100080	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 Meng, H.; Maruyama, S.; Xiang, R. Yang, N.	4. 巻 180
2. 論文標題 Thermal conductivity of one-dimensional carbon-boron nitride van der Waals heterostructure: A molecular dynamics study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 121773
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121773	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 Liu, M.; Hisama, K.; Zheng, Y.J.; Maruyama, M.; Seo, S.; Anisimov, A.; Inoue, T.; Kauppinen, E.I.; Okada, S.; Chiashi, S.; Xiang, R. Maruyama, S.	4. 巻 15
2. 論文標題 Photoluminescence from single-walled MoS ₂ nanotubes coaxially grown on boron nitride nanotubes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 8418
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 Lin, H.S.; Ma, Y.; Xiang, R.; Manzhos, S.; Jeon, I.; Maruyama, S. Matsuo, Y.	4. 巻 4
2. 論文標題 One-step direct oxidation of fullerene-fused alkoxy ethers to ketones for evaporable fullerene derivatives	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Chemistry	6. 最初と最後の頁 74
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 Gao, J.; Yan, Q.; Lv, L.; Tan, X.; Ying, J.; Yang, K.; Yu, J.; Du, S.; Wei, Q.; Xiang, R.; Yao, Y.; Zeng, X.; Sun, R.; Wong, C.-P.; Jiang, N.; Lin, C.-T. Dai, W.	4. 巻 419
2. 論文標題 Lightweight thermal interface materials based on hierarchically structured graphene paper with superior through-plane thermal conductivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 129609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2021.129609	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 Feng, Y.; Li, H.N.; Inoue, T.; Chiashi, S.; Rotkin, S.V.; Xiang, R. Maruyama, S.	4. 巻 15
2. 論文標題 One-dimensional van der Waals heterojunction diode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 5600
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 Feng, Y.; Li, H.N.; Hou, B.; Kataura, H.; Inoue, T.; Chiashi, S.; Xiang, R. Maruyama, S.	4. 巻 129
2. 論文標題 Zeolite-supported synthesis, solution dispersion, and optical characterizations of single-walled carbon nanotubes wrapped by boron nitride nanotubes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 15101
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 Fan, Y.C.; Zhao, Y.; Li, S.; Liu, Y.; Y., L.; Zhu, Y.; Xiang, R.; Maruyama, S.; Zhang, H. Zhang, Q.F.	4. 巻 59
2. 論文標題 Altering polythiophene derivative substrates to explore the mechanism of heterogeneous lithium nucleation for dendrite-free lithium metal anodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Energy Chemistry	6. 最初と最後の頁 63
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 Dai, W.; Lv, L.; Ma, T.; Ying, J.; Yan, J.; Xue, T.; Gao, J.; Yang, K.; Yu, J.; Yao, Y.; Sun, R.; Wang, Y.; Jiang, N.; Wong, C.P.; Xue, Q.; Xiang, R.; Maruyama, S. Lin, C.T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Multiscale Structural Modulation of Anisotropic Graphene Framework for Polymer Composites Achieving Highly Efficient Thermal Energy Management	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Science	6. 最初と最後の頁 2003734
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 Chang, Y.; Higashitarumizu, N.; Kawamoto, H.; Chu, F.; Lee, C.-J.; Nishimura, T.; Xiang, R.; Chang, W.; Maruyama, S. Nagashio, K.	4. 巻 33
2. 論文標題 Atomic-Step-Induced Screw-Dislocation-Driven Spiral Growth of SnS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 186
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 Cambrera, S.; Liu, M.; Levshov, D.; Otsuka, K.; Maruyama, S. Xiang, R.	4. 巻 17
2. 論文標題 Nanotube-Based 1D Heterostructures Coupled by van der Waals Forces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2102585
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202102585	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 Burdanova, M.G.; Liu, M.; Staniforth, M.; Zheng, Y.J.; Xiang, R.; Chiashi, S.; Anisimov, A.; Kauppinen, E.I.; Maruyama, S. Lloyd-Hughes, J.	4. 巻 -
2. 論文標題 Intertube excitonic coupling in nanotube van der Waals heterostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Adv. Funct. Mater.	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) 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 Y. Feng, H. Li, T. Inoue, S. Chiashi, S. V. Rotkin, R. Xiang, S. Maruyama	4. 巻 15
2. 論文標題 One-dimensional van der Waals heterojunction diode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 5600-5609.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.1c00657	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 Wang Pengyingkai, Feng Ya, Xiang Rong, Inoue Taiki, Anisimov Anton, Kauppinen Esko I, Chiashi Shohei, Maruyama Shigeo	4. 巻 32
2. 論文標題 Phenomenological model of thermal transport in carbon nanotube and hetero-nanotube films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 205708 ~ 205708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/abe151	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 Xiang Rong, Maruyama Shigeo	4. 巻 1
2. 論文標題 Heteronanotubes: Challenges and Opportunities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Small Science	6. 最初と最後の頁 2000039 ~ 2000039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smssc.202000039	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 Feng Ya, Li Henan, Hou Bo, Kataura Hiromichi, Inoue Taiki, Chiashi Shohei, Xiang Rong, Maruyama Shigeo	4. 巻 129
2. 論文標題 Zeolite-supported synthesis, solution dispersion, and optical characterizations of single-walled carbon nanotubes wrapped by boron nitride nanotubes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 015101 ~ 015101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0035674	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 Fan Yan Chen, Zhao Yi, Li Shuang, Liu Yue, Lv You, Zhu Yuan, Xiang Rong, Maruyama Shigeo, Zhang Hao, Zhang Qianfan	4. 巻 59
2. 論文標題 Altering polythiophene derivative substrates to explore the mechanism of heterogeneous lithium nucleation for dendrite-free lithium metal anodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Energy Chemistry	6. 最初と最後の頁 63 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jechem.2020.10.035	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 Fan Yan Chen, Liu Shitai, Han Xiao, Xiang Rong, Gong Yongji, Wang Tianshuai, Jing Yu, Maruyama Shigeo, Zhang Qianfan, Zhao Yan	4. 巻 3
2. 論文標題 Ni/Co-Based Nanowire Arrays with Hierarchical Core/Shell Structure Electrodes for High-Performance Supercapacitors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 7580 ~ 7587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c01004	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 Chen Jin-Xiu, Zhang Xue-Qiang, Li Bo-Quan, Wang Xin-Meng, Shi Peng, Zhu Wancheng, Chen Aibing, Jin Zhehui, Xiang Rong, Huang Jia-Qi, Zhang Qiang	4. 巻 47
2. 論文標題 The origin of sulfuryl-containing components in SEI from sulfate additives for stable cycling of ultrathin lithium metal anodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Energy Chemistry	6. 最初と最後の頁 128 ~ 131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jechem.2019.11.024	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 Zhan Ying-Xin, Shi Peng, Zhang Xue-Qiang, Ding Fei, Huang Jia-Qi, Jin Zhehui, Xiang Rong, Liu Xingjiang, Zhang Qiang	4. 巻 9
2. 論文標題 The Insights of Lithium Metal Plating/Stripping in Porous Hosts: Progress and Perspectives	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy Technology	6. 最初と最後の頁 2000700 ~ 2000700
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ente.202000700	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1件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Rong Xiang, Yongjia Zheng, Ming Liu, Taiki Inoue, Shohei Chiashi, Shigeo Maruyama
2. 発表標題 One-dimensional van der Waals heterostructures
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演) (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Web http://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/papers.html
Web http://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/

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	井ノ上 泰輝 (Inoue Taiki) (00748949)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	

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	熊本 明仁 (Kumamoto Akihito) (70724590)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・客員共同研究員 (12601)	

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