

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：13302

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05520・20K20442

研究課題名（和文）サブナノイオンビームで機能化した原子層NEMSによる波動性フォノン工学の創生

研究課題名（英文）Wave phonon engineering based on monolayer NEMS functionalized using sub-nanometer ion beam

研究代表者

水田 博（MIZUTA, Hiroshi）

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：90372458

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：電子線直接描画と集束He⁺ビームを用いた超微細加工技術で、宙吊りグラフェン上に様々なナノフォニック構造を作製した。チャンネルの両端に電気・熱測定用4端子電極を形成し、独自の Differential Thermal Leakage (DTL) 法によりナノスケールの熱フォノン輸送特性を計測した。直径5～6 nmの2次元ナノ孔アレイをチャンネル半面に形成した非対称ナノメッシュ構造において熱整流現象を初めて観測し、環境温度150 Kで約80%の熱整流率を得た。また幅30 nmの極細ナノリボン6本の並列チャンネルをチャンネル半面に形成した非対称構造では、室温で40%を超える熱整流率を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子層材料グラフェンのNEMS技術と電子線直接描画/集束ヘリウムイオンビーム超微細加工技術を初めて融合させ、宙吊りグラフェン上にシングルナノメートルスケールのフォニック結晶構造を形成し、熱フォノン輸送を制御して熱整流素子の原理検証に成功した独創性の高い研究成果である。現在のナノ集積回路やパワーデバイスで深刻な問題となっている局所発熱に対する新たなサーマルマネジメント技術を拓くだけでなく、従来の熱電変換技術のようにレアメタルや毒性の強い重金属を含む材料を使用せず、安全で環境に優しい炭素材料で低価格のシステムを実現できるため、新学術領域開拓・新産業展開両面で波及効果が大きい。

研究成果の概要（英文）：Various nanophononic structures were fabricated on suspended graphene by using electron beam lithography combined with focused He⁺ ion beam milling technology. Nanoscale heat phonon transport properties were measured by using unique Differential Thermal Leakage (DTL) method. Thermal rectification phenomena were observed for the first time for an asymmetric nanophononic channel structure on which only a half area was carved into two-dimensional array of circular nanopores of 5 to 6 nm in diameter. The thermal rectification ratio of approximately 80% was obtained at the environmental temperature of 150 K. Furthermore, over 40% rectification ratio was successfully achieved at room temperature for an asymmetric channel structure with six parallel graphene nanoribbons of 30 nm in width in parallel.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：グラフェン NEMS フォノン ヘリウムイオンビーム 熱整流素子

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体ナノワイヤやカーボンナノチューブなどのナノ材料に、表面ラフネス・界面散乱などフォノン散乱を増大する要因を導入することで、熱フォノン伝導を低下させる研究が盛んになってきた。さらに、フォノンの波動的伝播をトップダウン的技術で制御しようとするフォノンニック結晶(GPnC)の試みも行われている。しかし、制御すべきフォノンの周波数帯域はサブ THz ~ 10 THz に及ぶため、このフォノン伝播をナノ構造で精密に制御することは容易ではない。現在の Si ベース PnC で用いられているナノ孔周期構造は ≤ 100 nm であり、結晶 Si の機械的特性(ヤング率 $\sim 100 - 200$ GPa、デバイ温度 ~ 640 K)と合わせて、フォノン帯域は GHz 帯域に留まる。もし Si PnC を用いて熱フォノン帯域をカバーしようとする、必要な加工寸法は ≤ 1 nm となり、現在の半導体技術では極めて困難である。これに対して、炭素原子が 2 次元平面内で SP^2 結合したグラフェンのヤング率は $1 \sim 4$ TPa と Si に比べて一桁大きく、またデバイ温度は約 2800 K と非常に高い。この機械的性質は、熱フォノンの制御に必要な構造寸法を緩和するという大きな利点をもたらす。さらにグラフェンのフォノン平均自由行程は、室温でも 775 nm と長い値が報告されており、フォノン波動性を利用した素子を探索する上で優位性が高いと考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題は、室温でのフォノンの平均自由行程(MFP)が 775 nm と極めて長いグラフェンを用いた NEMS (ナノ電子機械システム) 上に、シングルナノメータ (< 10 nm) の超微細フォノンニック構造を形成することで、【波動性ナノフォノン工学】の新学術領域を新たに切り拓くものである。電子線直接描画技術とビーム径 ~ 0.3 nm の集束ヘリウムイオン (He^+) ビームを用いた超微細ミリング加工技術で、グラフェンナノ電子機械システム(GNEMS)上にシングルナノメータスケールのグラフェンフォノンニック結晶(GPnC) や極細ナノリボンの並列チャンネル構造など、様々なナノフォノンニック構造を形成する。テラヘルツ帯域の波動性フォノン伝導をトップダウン的に制御することで、熱フォノン整流素子などの革新的ナノサーマルエンジニアリング技術を開拓する。

3. 研究の方法

ナノフォノンニック機能構造の作製においては、グラフェン NEMS 技術を用いて長さ 200 nm ~ 1500 nm とした宙吊りグラフェンチャンネル構造を形成し、電子線直接描画と集束 He^+ ビーム超微細ミリング加工を駆使して、チャンネル上に様々なナノフォノンニックチャンネル構造を形成する。集束 He^+ ビーム加工においては、孔直径 $3 \sim 6$ nm、孔間隔 < 10 nm の 2 次元ナノ孔アレイ(グラフェンフォノンニック結晶: GPnC) を高速かつ安定的に形成する技術を確認する。また、電子線直接描画で宙吊りグラフェンチャンネルを台形状に加工した構造と、幅 $30 - 150$ nm のナノリボンチャンネルを並列に加工するプロセス技術も構築する。

作製したナノフォノンニック素子の評価においては、グラフェンチャンネルの両端に電気・熱測定用 4 端子電極を形成し、宙吊りグラフェンチャンネル有りと無しの構造でのヒートフローの差を計測する独自の Differential Thermal Leakage (DTL) 法を導入する。電氣的バイアスと熱バイアスの極性を入れ替えることで、環境温度を変えながら、同一素子で電気整流性と熱整流性を評価する。また、熱フォノン伝導の物理的メカニズムを解明するため、分子動力学による非平衡フォノンシミュレーションを実施する。

4. 研究成果

フォノンニック素子の設計と作製においては、集束ヘリウムイオンビームミリング(HIBM)技術を用いて、長さ 200 nm ~ 10 μ m、幅 50 nm ~ 6 μ m の宙吊りグラフェンチャンネル上で GPnC を精度良く形成するプロセス技術を構築した[1-6](図 1)。この技術により、ナノ孔直径 $3 \sim 6$ nm、ナノ孔ピッチ $10 \sim 25$ nm の様々な対称・非対称 GPnC 構造を作製することに成功した[1,3]。

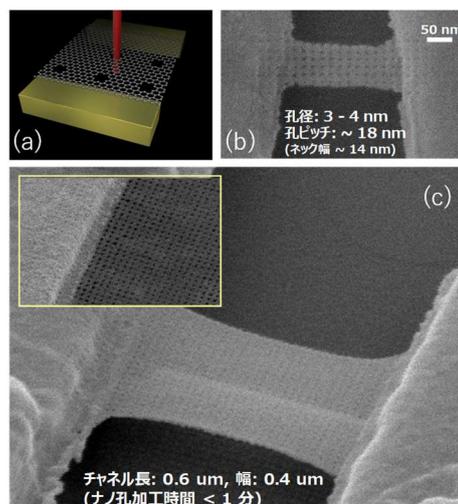


図 1 (a) 集束 He^+ ビームによるナノ孔配列形成の模式図、(b) 小規模 2 次元 GPnC、(c) 大面積 GPnC 形成の例 (挿入図は GPnC と電極境界の拡大写真)。

新奇フォノン機能素子の開拓においては、ナノスケールでの熱輸送特性計測の独自手法として DTL 法を構築し、GPnC チャンネルの電気伝導特性と熱伝導特性を同一デバイスで評価した (図 2) [11]。長さ 500 nm、幅 1200 nm の宙吊りグラフェンチャンネルを形成した後、HIBM 技術で直径 5~6 nm、ピッチ 30 nm をグラフェン全面に形成したフルメッシュ GPnC 構造、およびチャンネル方向に半面だけ加工したハーフメッシュ GPnC 構造の 2 種類のチャンネルを形成した [12]。

その後、グラフェンチャンネルの両端に電気・熱測定用 4 端子電極を備えたナノフォノンデバイスを作製した。まず両端のバイアス電圧の極性を変えてフルメッシュ、ハーフメッシュ GPnC 素子のコンダクタンスを温度 4K ~ 室温で測定し、どちらの素子においてもバイアス極性に依らず全温度領域でコンダクタンスが一致すること (電気伝導特性の対称性) を確認した。次に、DTL 法を用いて、熱バイアスの極性を変えて熱伝導特性を測定した結果、フルメッシュ GPnC の特性は対称であるのに対し、ハーフメッシュ GPnC では、GPnC 側に熱源を置いた場合に熱伝導率が上がる非対称性を観測した (図 3)。熱整流率は環境温度 150 K で 80% 超、250 K で 60% 超であった [13]-[15]。さらに、シリコン基板からバックゲート電圧を印加したところ、電気伝導特性には明瞭なアンビポーラ特性を観測した一方、熱伝導特性の変調は見られなかった。このことから、観測された熱整流作用がフォノン伝導に支配されていることを確認した。観測された熱整流現象の物理的メカニズムを解明するため、分子動力学による非平衡フォノン分布解析を行った結果、GPnC 領域内で高エネルギーフォノンの局在状態が形成され、熱バイアスの極性を入れ替えた際、チャンネル全体の温度分布に非対称性が生じることを見出した (図 4) [16][17]。

また、熱伝導方向にチャンネル幅を変化させた台形の宙吊りグラフェンチャンネルからなるナノフォノン素子を作製した。台形チャンネルの下底長 W_B を 1.2 μm に固定し、上底長 W_U を 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 μm と変化させた (図 5(a))。これによりフォノン進行方向に対して斜辺の角度が $72^\circ \sim 22^\circ$ と変化するため、チャンネルの幾何学的非対称性の度合いと、エッジによるフォノン散乱の影響が変化すると考えた。リファレンスとして幅 $W_B=W_U=1.2 \mu\text{m}$ の長方形チャンネル構造の素子も作製した。真性グラフェン中のフォノン平均自由行程 $\sim 775 \text{ nm}$ に対して、チャンネル長 L (台形高さ) を 500 nm に固定することで、台形チャンネル内のフォノン輸送が準バリスティック輸送となるように設計した。これらの非対称グラフェンチャンネルの両端にオーミック接続する 4 端子電極を作製し、DTL 法で同一素子を用いた電気伝導特性と熱伝導特性評価を実施した。前述と同様に、まず全ての台形チャンネル構造に対して、電圧の極性を入れ替えても電気伝導特性に非対称性はみられないことを確認した。その上で、熱伝導特性を環境温度 150 K で評価したところ (図 5(b))、 W_U が短くなるに従って熱整流度が徐々に大きくなる傾向にあることを見出した (図 5(c)) [18]。 $W_U=0.4 \mu\text{m}$ (斜辺角度 72°) のチャンネルで得られた熱整流効率は最大で $\sim 95\%$ であった。一方、非対称ナノメッシュチャンネル構造においても、環境温度 150 K で熱整流効率 $\sim 80\%$ を観測した。前述の非対称ナノメッシュ素子と同様に、環境温

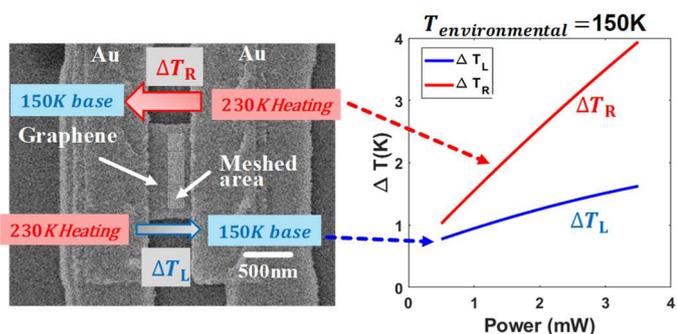


図 3 熱バイアス順・逆方向で観測された熱整流作用 (環境温度 150 K)。

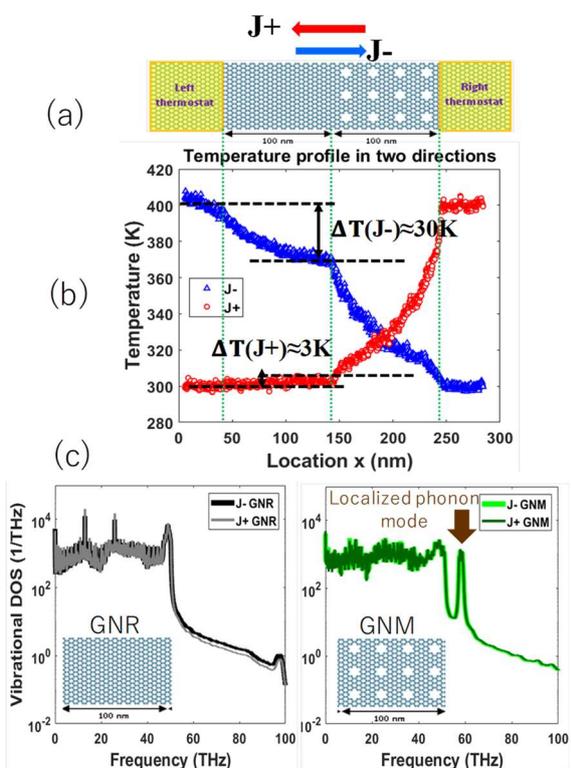


図 4 分子動力学・非平衡フォノンシミュレーションに用いたハーフメッシュ GPnC チャンネル構造 (a)、熱バイアスの極性を替えた時の温度分布 (b) と GNR 領域と GPnC 領域でのフォノン状態密度スペクトルの比較 (c)。

度の上昇とともに熱整流作用は小さくなり、300 K では消失した。

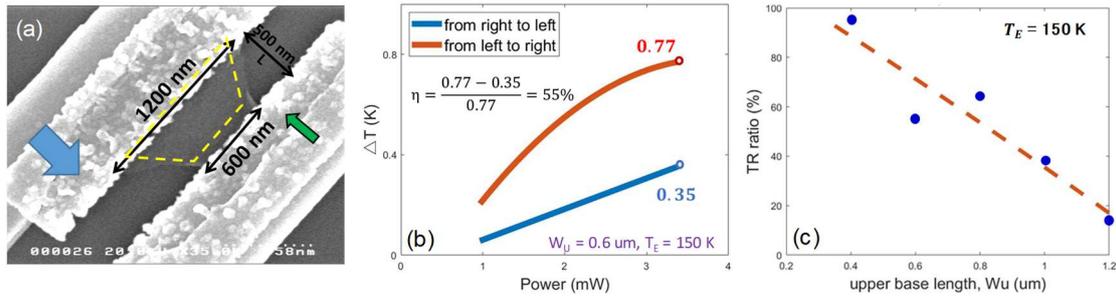


図5 台形型非対称ナノフォニック構造(a), 環境温度 150K における熱輸送の非対称性(b), 熱整流率のチャンネル構造依存性：横軸は台形の短辺長 W_U (c)。

さらに、宙吊りグラフェンのチャンネル半面に並列状のナノリボンを形成した非対称構造を作製し[19]、その詳細な特性評価を行った。チャンネル全体の長さ L を 500 nm、幅 W を 1200 nm に固定した上で、並列ナノリボンの幅 W_{NR} : 30~150 nm、間隔 D_{NR} を 112~204 nm と変化させて素子を作製した(図 6(b), (c))。同時に並列ナノリボンを形成しない対称チャンネルも作製し(図 6(a))、その熱伝導特性の対称性を確認している(図 7(a))。試作した素子を系統的に評価した結果、リボン幅 W_{NR} が 90 nm より狭い極細ナノリボン並列チャンネル構造(ナノリボン本数は6本)に対して、室温で熱整流現象を観測することに成功した(図 7(b), (c))。熱整流率はナノリボン幅を細くするほど増大し、 $W_{NR} = 30$ nm の素子では室温で40%を超える熱整流率が得られた。また、熱整流率の温度依存性については、これまでに得られた結果と同様に低温で増大する傾向が観測された[20]。今回の並列ナノリボン非対称構造で室温動作が実現された要因としては、極細ナノリボンチャンネル幅方向での熱フォノン閉じ込め効果に加えて、ドライエッチングで形成したナノリボン内部に炭素原子の点欠陥がランダムに形成され、熱フォノン局在化を増幅する方向に働いたことが考えられる。

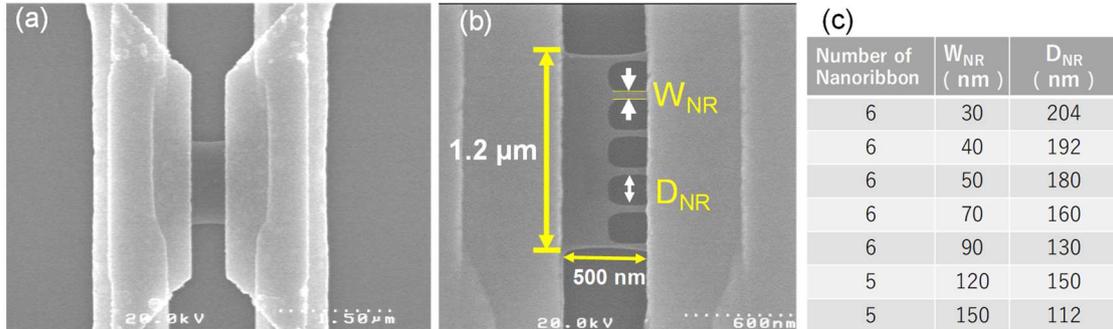


図6 対称チャンネル構造(リファレンス構造)(a), 非対称並列ナノリボンチャンネル構造(b), および試作した並列ナノリボンチャンネル構造の設計パラメータ(c)。

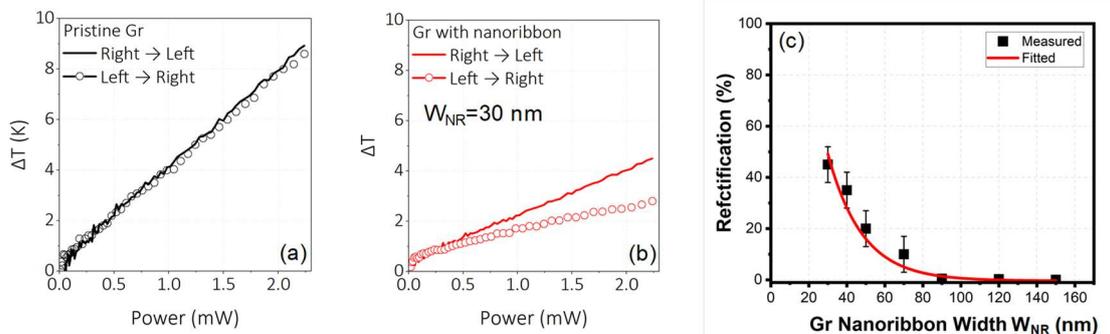


図7 試作した素子の熱整流特性：対称チャンネル(長方形)素子の場合(a), 非対称並列ナノリボンチャンネル素子 ($W_{NR} = 30$ nm) の場合(b), および得られた熱整流率のナノリボン幅 W_{NR} 依存性(c)。

引用文献

- [1] M. E. Schmidt, T. Iwasaki, M. Muruganathan, M. Haque, N. H. Van, S. Ogawa and H. Mizuta, 'Structurally Controlled Large-Area 10 nm Pitch Graphene Nanomesh by Focused Helium Ion Beam Milling', *ACS Applied Materials & Interfaces* **10**(12), 10362-10368 (2018)
- [2] M. E. Schmidt, M. Muruganathan, T. Kanzaki, T. Iwasaki, A. M. M. Hammam, S. Suzuki, S. Ogawa, H. Mizuta, 'Dielectric-Screening Reduction Induced Large Transport Gap in Suspended Sub-10-nm Graphene Nanoribbon Functional Devices', *Small* **15**, 1903025 (2019)
- [3] F. Liu, Z. Wang, S. Nakanao, S. Ogawa, Y. Morita, M. Schmidt, M. Haque, M. Muruganathan and H. Mizuta, 'Conductance Tunable Suspended Graphene Nanomesh by Helium Ion Beam Milling', *Micromachines* **11**(4), 387 (2020)
- [4] F. Liu, M. Muruganathan, S. Ogawa, Y. Morita, Z. Wang, J. Guo, M. Haque, M. Schmidt and H. Mizuta, 'Quantum dot formation on suspended graphene nanomesh by helium ion beam milling technology', 2021 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM2021); DOI: 10.1109/EDTM50988.2021.9421016
- [5] F. Liu, J. Guo, S. Ogawa, Y. Morita, M. Schmidt, M. Muruganathan and H. Mizuta, 'Graphene nanomesh for electron and phonon engineering', The 4th EuFN and FIT4NANO Joint Workshop / Meeting, p. 34 (2021)
- [6] M. Haque, A. Kareekunnam, F. Liu, S. Ganesh, G. Ellrott, A. Hammam, M. Muruganathan and H. Mizuta, 'Design of Graphene Phononic Crystals for Heat Phonon Engineering', *Micromachines* **11**(7), 655 (2020)
- [7] M. Haque, Marek E. Schmidt, M. Muruganathan, I. Katayama, J. Takeda, S. Ogawa, H. Mizuta, 'Phononic Bandgap Engineering in Single Nanometer Graphene Nanomesh', The 16th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter and the 4th International Conference on Phononics and Thermal Energy Science, (2018)
- [8] S. Kubo, M. E. Schmidt, M. Muruganathan, H. Mizuta, 'Finite element method simulation of graphene phononic crystals with cross-shaped nanopores', The 20th EuroSimE, Hannover, 24-27 March (2019)
- [9] J. Takeda, K. Yoshioka, Y. Minami, Y. Arashida, and I. Katayama, "THz-Field-Driven Electron Tunneling On the Nanoscale," 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), pp. 1-3 (2018) ; DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510042
- [10] K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Arashida, A. Ban, Y. Kawada, H. Takahashi, and J. Takeda, "Sub-cycle Manipulation of Electrons in a Tunnel Junction with Phase-controlled Single-cycle THz Near-fields", *EPJ Web of Conferences* **205**, 08007 (2019) ; doi.org/10.1051/epjconf/201920508007
- [11] F. Liu, M. Muruganathan, S. Ogawa, Y. Morita, Z. Wang, J. Guo, M. Haque, M. Schmidt and H. Mizuta, 'Thermal rectification phenomenon on suspended half-meshed graphene devices', 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2020), pp. 509-510 (2020)
- [12] F. Liu, M. Muruganathan, S. Ogawa, Y. Morita, M. Schmidt and H. Mizuta, 'Half-meshed and fully-meshed suspended graphene for transport gap engineering', 2020 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, pp. 69-70 (2020); DOI: 10.1109/SNW50361.2020.9131629
- [13] F. Liu, M. Muruganathan, Y. Feng, S. Ogawa, Y. Morita, C. Liu, J. Guo, M. Schmidt and H. Mizuta, 'Thermal rectification on asymmetric suspended graphene nanomesh devices', *Nano Futures* **5**(4), 045002 (2021)
- [14] H. Mizuta and M. Muruganathan, 'Graphene-based Nanoelectronic Devices and NEMS for extreme sensing and nanoscale thermal engineering (**Plenary**)', The 25th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, Hamamatsu, Nov. 28-29 (2023)
- [15] H. Mizuta, 'Graphene Nano-Electro-Mechanical Device Technology for Extreme Sensing and Nanoscale Thermal Engineering (**Keynote**)', 2023 International Conference on Nano Research and Development (ICNRD-2023), Singapore, Dec. 6-8 (2023)
- [16] H. Mizuta, A. Kareekunnam, M. Muruganathan, 'Downscaled Graphene Devices for Advanced Sensing and Thermal Engineering (**Invited Talk**)', International symposium on Nano-Materials for Novel Devices, Kanazawa, January 11-12 (2024)
- [17] F. Liu, J. Guo, M. Muruganathan, S. Ogawa, Y. Morita and H. Mizuta, 'Molecular dynamics study on Asymmetric graphene nanomesh thermal rectifier', 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 2021 年 9 月
- [18] J. Guo, F. Liu, 小川 真一, 森田 行則, M. Muruganathan, 水田 博, 'Asymmetric Thermal Transport on Suspended Trapezoidal Graphene Channels', 第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学, 2022 年 3 月
- [19] M. Razzakul, A. kareekunnam, H. Mizuta, 'Development of thermal rectification on asymmetric defect-engineered graphene device', 49th International Conference on Micro and Nano Engineering Conference (MNE2023), Berlin, September 25-28 (2023)
- [20] M. Razzakul, A. kareekunnam, H. Mizuta, 'Room Temperature Thermal Rectification in Suspended Asymmetric Graphene nanostructure', under review for Nanotechnology (2024)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Osazuwa G. Agbonlahor, Manoharan Muruganathan, Amit Banerjee, Hiroshi Mizuta	4. 巻 380
2. 論文標題 Machine learning identification of atmospheric gases by mapping the graphene-molecule van der Waals complex bonding evolution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 133383-133383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2023.133383	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 Manoharan Muruganathan, Ngoc Huynh Van, Marek E. Schmidt, and Hiroshi Mizuta	4. 巻 32
2. 論文標題 Sub 0.5 Volt Graphene-hBN van der Waals Nanoelectromechanical Switches	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2209151-2209151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202209151	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 Sankar Ganesh Ramaraj, Manoharan Muruganathan, Osazuwa G. Agbonlahor, Hisashi Maki, Yosuke Onda, Masashi Hattori, Hiroshi Mizuta	4. 巻 190
2. 論文標題 Carbon molecular sieve-functionalized graphene sensors for highly sensitive detection of ethanol	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 359-365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2022.01.023	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 Fayong Liu, Manoharan Muruganathan, Yu Feng, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Chunmeng Liu, Jiayu Guo, Marek Schmidt and Hiroshi Mizuta,	4. 巻 5
2. 論文標題 Thermal rectification on asymmetric suspended graphene nanomesh devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Futures	6. 最初と最後の頁 045002-045002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2399-1984/ac36b5	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 Afsal Kareekunnan, Tatsufumi Agari, Ahmed M. M. Hamman, Takeshi Kudo, Takeshi Maruyama, Hiroshi Mizuta, and Manoharan Muruganathan	4. 巻 6
2. 論文標題 Revisiting the Mechanism of Electric Field Sensing in Graphene Devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 34086-34091
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.1c05530	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 Chunmeng Liu, Jiaqi Zhang, Sankar Ganesh Ramaraj, XiaobinZhang, Muruganathan Manoharan, Hiroshi Mizuta, Yoshifumi Oshima	4. 巻 573
2. 論文標題 Current effect on suspended graphene nanoribbon studied using in-situ transmission electron microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 151563-151563
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2021.151563	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 Gunter Ellrott, Shinichi Ogawa, Munenori Uno, Yukinori Morita, Manoharan Muruganathan, Maria Kolesnik-Gray, Vojislav Krstic, Hiroshi Mizuta	4. 巻 249
2. 論文標題 Dose-dependent Milling Efficiencies of Helium and Nitrogen Beams in PMMA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microelectronic Engineering	6. 最初と最後の頁 111621-111621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mee.2021.111621	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 Takuya Iwasaki, Shu Nakamura, Osazuwa G. Agbonlahor, Manoharan Muruganathan, Masashi Akabori, Yoshifumi Morita, Satoshi Moriyama, Shinichi Ogawa, Yutaka Wakayama, Hiroshi Mizuta, Shu Nakaharai	4. 巻 175
2. 論文標題 Room-temperature negative magnetoresistance of helium-ion-irradiated defective graphene in the strong Anderson localization regime	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 87-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2020.12.076	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 Takuya Iwasaki, Shu Nakamura, Osazuwa G. Agbonlahor, Manoharan Muruganathan, Masashi Akabori, Yoshifumi Morita, Satoshi Moriyama, Shinichi Ogawa, Yutaka Wakayama, Hiroshi Mizuta, Shu Nakaharai	4. 巻 175
2. 論文標題 Room-temperature negative magnetoresistance of helium-ion-irradiated defective graphene in the strong Anderson localization regime	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 87-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2020.12.076	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 Osazuwa G. Agbonlahor, Manoharan Muruganathan, Tomonori Imamura and Hiroshi Mizuta	4. 巻 5
2. 論文標題 Adsorbed Molecules as Interchangeable Dopants and Scatterers with a van der Waals Bonding Memory in Graphene Sensors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Sensors	6. 最初と最後の頁 2003-2009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssensors.0c00403	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 Haque Mayeeshha Masrura, Afsal Kareekunnnan, Fayong Liu, Sankar Ganesh Ramaraj, Gunter Ellrott, Ahmed M. M. Hammam, Manoharan Muruganathan and Hiroshi Mizuta	4. 巻 11
2. 論文標題 Design of Graphene Phononic Crystals for Heat Phonon Engineering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Micromachines	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) 10.3390/mi11070655	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 Fayong Liu, Zhongwang Wang, Soya Nakano, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Marek Schmidt, Mayeeshha Haque, Manoharan Muruganathan and Hiroshi Mizuta	4. 巻 11
2. 論文標題 Conductance Tunable Suspended Graphene Nanomesh by Helium Ion Beam Milling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Micromachines	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) 10.3390/mi11040387	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 Jothiramalingam Kulothungan, Manoharan Muruganathan, Hiroshi Mizuta	4. 巻 153
2. 論文標題 Modulation of twisted bilayer CVD graphene interlayer resistivity by order of magnitude based on in-situ annealing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 355-363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2019.07.036	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 Zhongwang Wang, Yahua Yuan, Xiaochi Liu, Jian Sun, Manoharan Muruganathan and Hiroshi Mizuta	4. 巻 13
2. 論文標題 Quantum Dot Formation in Controllably Doped Graphene Nanoribbon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 7502-7507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.9b02935	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 Fayong Liu, Zhongwang Wang, Soya Nakanao, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Marek Schmidt, Mayeesha Haque, Manoharan Muruganathan, Hiroshi Mizuta	4. 巻 11
2. 論文標題 Conductance Tunable Suspended Graphene Nanomesh by Helium Ion Beam Milling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 387-387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi11040387	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

〔学会発表〕 計40件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 Teppeï Shintaku, Kareekunnan Afsal, Masashi Akabori, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Observation of Valley Hall effect in non-encapsulated bilayer graphene
3. 学会等名 The 64th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Alexandro de Moraes Nogueira, Manoharan Muruganathan, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Low-frequency noise of suspended CVD graphene in oxygen environment
3. 学会等名 International Symposium on Empathy and Symbiosis with Nature (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大園 祥輝, ファヨン リウ, 小川 真一, 森田行則, マノハラン・ムルガナタン, 水田 博
2. 発表標題 非対称グラフェンナノメッシュデバイスの熱伝導特性に関する研究
3. 学会等名 自然との共感・共生国際シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水田 博
2. 発表標題 原子層材料によるサイレントボイスセンシング
3. 学会等名 自然との共感・共生国際シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Afsal Kareekunnan
2. 発表標題 Beyond Graphene: TMDC 2D materials for advanced sensing and information processing
3. 学会等名 International Symposium on Empathy and Symbiosis with Nature (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi MIZUTA
2. 発表標題 Research funding trends in Japan and development of Silent Voice Sensing Technology
3. 学会等名 NanoFutures 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Mizuta, G. Jiayu, Y. Ozono, S. Ogawa, Y. Morita, A. Kareekunnan, M. Muruganathan and F. Liu
2. 発表標題 Sub-10-nm nanomesh patterned on suspended graphene for nanoscale thermal engineering
3. 学会等名 IEEE 16th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Mizuta, G. Jiayu, Y. Ozono, S. Ogawa, Y. Morita, A. Kareekunnan, M. Muruganathan and F. Liu
2. 発表標題 Sub-10-nm patterning on suspended graphene by using focused He ion beam for heat phonon engineering
3. 学会等名 2nd International Meet and Expo on Nanotechnology (NANOMEET2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川村 亮太, 金 唐逸, Fayong Liu, 玉置 亮, 草場 哲, 水田 博, 片山 郁文, 武田 淳
2. 発表標題 光照射STMによるグラフェンナノデバイスの熱励起電子観測
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 劉 銳安, カリクンナン アフサル, 宮田 全展, 水田 博, 小矢野 幹夫
2. 発表標題 多層グラフェンのラマンスペクトルの温度依存性と光学フォノン温度
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新宅 哲平, カリクンナン アフサル, 赤堀 誠志, 渡邊 賢治, 谷口 尚, 水田 博
2. 発表標題 hBN-二層グラフェンヘテロ構造を用いたパレーホール効果の観測
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Alexandro Nogueira, Shohei Enomoto, Manoharan Muruganathan, Afsal Kareekunnnan, Masashi Akabori, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Temperature dependence of CVD graphene nanomechanical resonator
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 Chunmeng Liu, Xiaobin Zhang, Jiaqi Zhang, Muruganathan Manoharan, Hiroshi Mizuta, Yoshifumi Oshima
2. 発表標題 Fabrication of MoS2 nanoribbon by direct transfer for in-situ TEM observation
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	Lini Chen, Chunmeng Liu, Fayong Liu, Kareekunnan Afsal, Manoharan Muruganathan, Hiroshi Mizuta, Yoshifumi Oshima
2. 発表標題	Structure Dependent Current-Voltage Curves of Suspended Graphene Nanoribbon
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	H. Mizuta
2. 発表標題	Graphene Nano-electro-mechanical device technology for extreme sensing and nanoscale thermal engineering
3. 学会等名	NIMS WEEK 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Fayong Liu, Jiayu Guo, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Marek Schmidt, Manoharan Muruganathan, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題	Graphene nanomesh for electron and phonon engineering
3. 学会等名	The 4th EuFN and FIT4NANO Joint Workshop / Meeting (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	H. Mizuta, G. Jiayu, S. Ogawa, Y. Morita, M. Muruganathan and F. Liu
2. 発表標題	Graphene NEMS Technology with He Ion beam Single-Nanometer Patterning for Advanced Sensing and Thermal Engineering
3. 学会等名	International Meet & Expo on Nanotechnology (NANOMEET2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 Kareekunnan Afsal, Tatsufumi Agari, Takeshi Kudo, Takeshi Maruyama, Hiroshi Mizuta, and Manoharan Muruganathan
2. 発表標題 Enhancement of Electric Field Sensitivity in Graphene for Early Lightning Prediction
3. 学会等名 Silicon Nanoelectronics Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Manoharan Muruganathan, Afsal Kareekunnan, Tatsufumi Agari, Huynh Van Ngoc, Takeshi Kudo, Takeshi Maruyama, and Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 All-2D Graphene Nano-Electro-Mechanical (NEM) Switch and the Progress of High-Sensitive Electric Field Sensing for Thunder Clouds Movements
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fayong Liu, Manoharan Muruganathan, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Zhongwang Wang, Marek Schmidt, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Quantum dot formation on suspended graphene nanomesh by helium ion beam milling technology
3. 学会等名 2021 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiayu Guo, Fayong Liu, 小川 真一, 森田 行則, Manoharan Muruganathan, 水田 博
2. 発表標題 Asymmetric Thermal Transport on Suspended Trapezoidal Graphene Channels
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	Afsal Kareekunnan, Tatsufumi Agari, Takeshi Kudo, Takeshi Maruyama, Hiroshi Mizuta, Manoharan Muruganathan
2. 発表標題	Enhancing Electric Field Sensitivity in Graphene Devices by hBN Encapsulation
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	Fayong Liu, Jiayu Guo, Manoharan Muruganathan, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題	Molecular dynamics study on Asymmetric graphene nanomesh thermal rectifier
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	Manoharan Muruganathan, Afsal Kareekunnan, Tatsufumi Agari, Huynh Van Ngoc, Takeshi Kudo, Takeshi Maruyama, and Hiroshi Mizuta
2. 発表標題	High-Performance Graphene Devices and the Detection of Silent Voices from Thunder Clouds
3. 学会等名	6th International Conference on Advances in Functional Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Fayong Liu, Manoharan Muruganathan, 小川 真一, 森田 行則, 郭 嘉裕, Marek Schmidt, 水田 博
2. 発表標題	Thermal rectification based on asymmetric nanomesh formed on suspended graphene
3. 学会等名	第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 Takuya Iwasaki, Shu Nakamura, Osazuwa Gabriel Agbonlahor, Manoharan Muruganathan, Masashi Akabori, Yoshifumi Morita, Satoshi Moriyama, Shinichi Ogawa, Yutaka Wakayama, Hiroshi Mizuta, Shu Nakaharai
2. 発表標題 Observation of charge carrier localization-induced negative magnetoresistance at room temperature in helium-ion-irradiated defective graphene
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Amit Banerjee, Manoharan Muruganathan, Hisashi Maki, Masashi Hattori, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Capacitively coupled suspended CVD graphene ribbons for electromechanical device applications
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fayong Liu, Manoharan Muruganathan, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Zhongwang Wang, Jiayu Guo, Mayeesha Haque, Marek Schmidt, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Thermal rectification phenomenon on suspended half-meshed graphene devices
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fayong Liu, Manoharan Muruganathan, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Marek Schmidt, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Half-meshed and fully-meshed suspended graphene for transport gap engineering
3. 学会等名 2020 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Mizuta, Guo Jiayu, Mayeesha Haque, Marek E. Schmidt, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Zhongwang Wang, Manoharan Muruganathan and Fayong Liu
2. 発表標題 集束ヘリウムイオンビームによるグラフェンのシングルナノメータ加工と機能デバイス応用
3. 学会等名 第21回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Iwasaki, Manoharan Muruganathan, Masashi Akabori, Yoshifumi Morita, Satoshi Moriyama, Shinichi Ogawa, Yutaka Wakayama, Hiroshi Mizuta, Shu Nakaharai
2. 発表標題 Negative magnetoresistance of helium-ion-irradiated graphene in the strong Anderson localization regime
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 F. Liu , M. Manoharan , S. Ogawa , Y. Morita , Z. Wang , M. Schmidt , H. Mizuta
2. 発表標題 Graphene nanomesh patterned by helium ion beam milling towards the application of quantum devices
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 Ahmed Hammam, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, AMIT BANERJEE, Manoharan Muruganathan, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Helium Ion Beam Induced Stress on Graphene Cantilever
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 Kareekunnan Afsal, Manoharan Muruganathan, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Valley Hall Effect in Ungated Bilayer Graphene
3. 学会等名 Recent Progress in Graphene & 2D Materials Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kareekunnan Afsal, Manoharan Muruganathan, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Valley Hall Effect in Unbiased Bilayer Graphene
3. 学会等名 The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guenter Ellrott, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Manoharan Muruganathan, Vojislav Krstic, Hiroshi Mizuta
2. 発表標題 Helium Ion Beam Milling for Chiral Nanostructures
3. 学会等名 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 F. Liu, S. Nakano, M. Haque, Z. Wang, M. Schmidt, S. Ogawa, Y. Morita, M. Manoharan, H. Mizuta
2. 発表標題 Transport properties of large-area fully & half meshed suspended graphene
3. 学会等名 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 S. Nakano, F. Liu, H. Mayeesha, M. Muruganathan, H. Mizuta
2. 発表標題 Fabrication and characterization of asymmetric suspended trapezoid graphene
3. 学会等名 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 水田 博, G. Agbonlahor, 宮下 寛也, 古川 篤, F. Liu, M. Haque, 中野 颯也, M. Muruganathan, 槇 恒, 恩田 陽介, 服部 将志, 下舞 賢一, 関根 嘉香
2. 発表標題 グラフェンナノデバイスによる超高感度環境・生体ガスセンシング技術と熱制御技術の現状と展望
3. 学会等名 北陸産業活性化フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水田 博
2. 発表標題 グラフェンNEMSとナノイオンビーム加工技術：サブサーマルスイッチング・極限センシング・熱フォノン制御への応用
3. 学会等名 2019年2回極限ナノ造形・構造物性研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 M. Muruganathan, and H. Mizuta	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Jenny Stanford Publishing	5. 総ページ数 41
3. 書名 Graphene Nanoelectromechanical Switch: Ultimate Downscaled NEM Actuators to Single-Molecule and Zeptogram Mass Sensors, Convergence of More Moore, More than Moore and Beyond Moore: Materials, Devices, and Nanosystems, Deleonibus, Simon, ed.	

〔産業財産権〕

〔その他〕

グラフェンナノメッシュデバイスを用いたナノスケール熱制御の研究
<http://www.jaist.ac.jp/ms/labs/mizuta-lab/post-4.html>

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