

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01505

研究課題名(和文)原子層物質積層構造を用いた超高効率平面型電子放出デバイスの創出

研究課題名(英文) Development of ultrahigh efficiency planer-type electron emission devices using a stacked structure of atomic layer materials

研究代表者

村上 勝久 (Murakami, Katsuhisa)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：20403123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：平面型電子放出デバイスで実用化に向けて課題となっていた、電子放出効率、放出電流密度、放出電子のエネルギー広がりの変因である、デバイス内部での電子の非弾性散乱による電子のエネルギー低下を抑制するために、電子の非弾性散乱の少ない原子層物質であるグラフェンと六方晶窒化ホウ素を用いた平面型電子放出デバイスを開発した。その結果、グラフェン電極を用いることで、電子放出効率48.5%と放出電流密度100mA/cm²以上と、従来素子と比較して1万倍の特性向上を達成した。更に、絶縁層に六方晶窒化ホウ素を用いることで、放出電子のエネルギー幅0.18Vの単色化に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、原子層物質であるグラフェンや六方晶窒化ホウ素の電子透過性を活用した平面型電子放出デバイスを提案し、その特性を従来素子と比較して飛躍的に向上させることに成功した。特に、放出電子のエネルギー幅0.18eVは、従来最も単色性の高い電子源であるタングステン冷陰極のエネルギー幅0.3eVを凌駕するものであり、電子顕微鏡や電子線分析装置、半導体製造分野へ与えるインパクトは大きい。また、デバイス内部での電子散乱を放出電子のエネルギー分布から分析することで、従来計測が困難であった10eV帯低エネルギー電子の原子層物質内での電子散乱機構を明らかにでき、学術的にも興味深い知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：The planar type electron emission devices using atomic layered materials of graphene and hexagonal boron nitride (h-BN) were developed to suppress inelastic electron scattering within the device structure. High emission efficiency of 48.5 % and high emission current density of more than 100 mA/cm were achieved by the suppression of the inelastic electron scattering within the topmost gate electrode using graphene. In addition, highly monochromatic electron emission with an energy spread of 0.18 eV in the full width at half maximum were realized by the suppression of the inelastic electron scattering within the topmost gate electrode and insulating layer using the graphene/h-BN heterostructure.

研究分野：電子放出デバイス

キーワード：グラフェン 六方晶窒化ホウ素 化学気相成長 電子放出

1. 研究開始当初の背景

平面型電子放出デバイスは、固体電子デバイスと真空電子デバイスの長所を融合したデバイスであり、真空電子デバイスの「高速動作」「高絶縁耐圧」「耐温度特性」「耐放射線特性」と固体電子デバイスの「低電圧駆動」「半導体プロセスで作製でき CMOS デバイスとの融合が可能」といった両者の特徴を兼ね備えている。更に、従来のナノサイズの針状陰極構造の真空電子デバイスでは実現不可能であった「大気中・液体中での動作」「平面からの電子放射」といったユニークな特徴を有している。上記の優れた特徴から、「宇宙環境・高温下で使用可能な苛酷環境耐性デバイス」「高絶縁耐圧を活かした高効率パワーエレクトロニクスデバイス」「パルス駆動低消費電力平面型 X 線源」「ガス中・液体中動作によるガス・液体材料の改質」など従来にはない応用展開が期待できる。しかしながら、電子の放出効率と放出電流密度の低さが平面型電子放出デバイスの応用の妨げとなっている。平面型電子放出デバイスの素子構造はナノメートル膜厚の金属/絶縁体/金属または半導体積層体である(図1参照)。上部電極への電圧印加により絶縁膜の電位障壁が薄くなり、下部導電性基板の電子がトンネル効果で電位障壁を透過する。電位障壁をトンネルした電子は電界により絶縁膜中を走行し、最上層の金属電極を貫通した電子が真空中に放出されるが、その割合は通常 0.002 ~ 0.1 %程度であり、99.9 %の電子は上部金属電極で回収されダイオード電流となる。低電子放出効率の原因は、電子が絶縁膜と上部電極を走行する際に非弾性散乱によりエネルギーを失い、上部電極の仕事関数を乗り越えることができないためである。電子の非弾性散乱を劇的に抑制する絶縁層材料と、低仕事関数かつ非弾性散乱を抑制する上部電極材料の積層構造体の創出は、電子放出効率の飛躍的に向上に繋がり、前述のデバイス群の実用化に向けて展望が開ける。物質内での電子の非弾性散乱断面積は一般的に物質の原子番号と密度に比例し、電子のエネルギーに反比例する。平面型電子放出デバイスの駆動電圧は 10 V 程度の低電圧であるため、物質内での非弾性散乱断面積は非常に大きくなる。そのため、非弾性散乱の抑制には原子番号が小さく密度の低い物質の探索が重要となる。グラフェンは炭素原子からなる原子 1 層の導電体であり金属と比べて軽元素であるため、非弾性散乱を抑制することが可能であるため、平面型電子放出デバイスにとって理想的な上部電極であると考えられる。また、グラフェンと同様の結晶構造を有する絶縁性の原子層物質である六方晶窒化ホウ素(h-BN)も、従来使用されてきた絶縁材料である SiO₂ や Al₂O₃ と比べて構成元素が軽元素であり密度も低いため、電子の非弾性散乱断面積が小さいと期待できる。しかしながら、グラフェン、h-BN の面内垂直方向(c 軸方向)に対する 10 eV 帯の低エネルギー電子の散乱断面積はこれまで学術的に調べられていない。

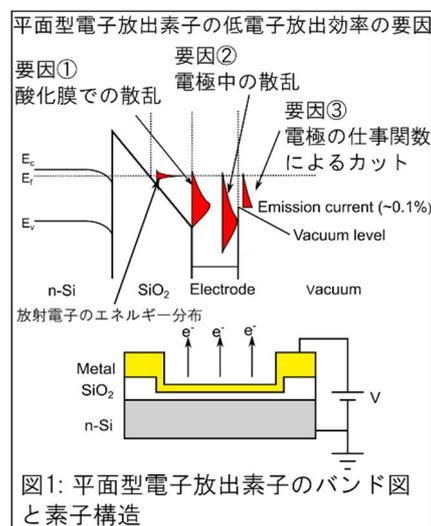


図1: 平面型電子放出素子のバンド図と素子構造

2. 研究の目的

グラフェン/h-BN 積層構造を利用した平面型電子放出デバイスを実現し、絶縁層および上部電極での電子の非弾性散乱の抑制により、電子の放出効率と放出電流密度を飛躍的に向上させた超高効率平面型電子放出デバイスを創出する(図2)。また、その特性評価においてグラフェン/h-BN 積層構造に流れる電子の伝導機構の分析、電子放出効率の膜厚依存性、放出電子のエネルギー分析を実施することにより、グラフェン、h-BN の c 軸方向に対する 10 eV 帯の低エネルギー電子の散乱確率や平均自由行程などを調査することも目的とする。

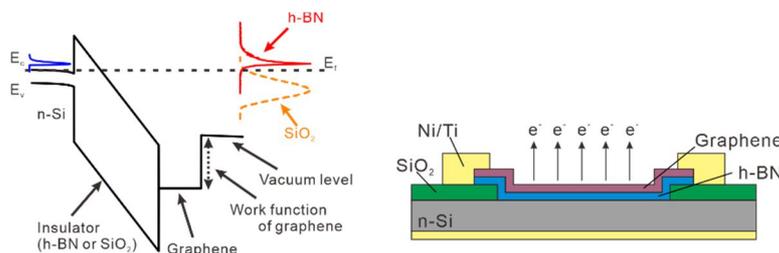


図2: 本研究で開発するGraphene/h-BN積層構造平面電子源

3. 研究の方法

3.1 グラフェン/SiO₂/n-Si 積層構造を用いた高効率平面電子源の開発

グラフェン/SiO₂/n-Si 積層構造を用いた高効率平面電子源の作製プロセスは以下の通りである。ベースとなる基板には熱酸化膜付 n-Si 基板(酸化膜厚 300 nm)を用いた。電子放出部のサイズは 10 μm ~ 200 μm 角で、フォトリソグラフィと緩衝弗酸によるウェットエッチングによ

りパターニングした。その後、RCA 洗浄を行った後に、電子放出部に膜厚 8~10 nm の熱酸化膜層を酸素流量 2 L/min、加熱温度 900 度、成膜時間 10 min で成膜した。上部の多層グラフェン電極 (~1 nm) は、メタンガスを原料としたリモートプラズマ化学気相成長 (CVD) 法により、700~800 度で基板全面に成膜した。グラフェン電極は、フォトリソグラフィと酸素プラズマ処理によりパターニングし素子分離した。最後に、成膜したグラフェン上にコンタクト電極として Ni/Ti 電極をフォトリソグラフィ、電子ビーム蒸着、リフトオフプロセスにより作製した。

3.2 グラフェン/h-BN/n-Si 積層構造を用いた平面電子源の開発

グラフェン/h-BN/n-Si 積層構造を用いた平面電子源の作製プロセスは以下の通りである (図 3)。ベースとなる基板には熱酸化膜付 n-Si 基板 (酸化膜厚 300 nm) を用いた。電子放出部のサイズは 10 μm 角で、フォトリソグラフィと緩衝弗酸によるウェットエッチングによりパターニングした。市販品である銅箔上に化学気相成長により成膜した多層 h-BN (公称膜厚 13nm) を、独自に開発した乾式転写技術を用いてパターニングした Si 基板上に転写し、多層 h-BN 絶縁層を形成した。その後、グラフェン/SiO₂/n-Si 積層構造を用いた高効率平面電子源の作製プロセスと同様手法でグラフェン電極を作成した。素子分離のために、フォトリソグラフィによりパターニングし、酸素プラズマ処理によりグラフェン電極をエッチング、六フッ化硫黄ガスプラズマにより多層 h-BN 絶縁層をエッチングした。最後に、成膜したグラフェン上にコンタクト電極として Ni/Ti 電極をフォトリソグラフィ、電子ビーム蒸着、リフトオフプロセスにより作製した。

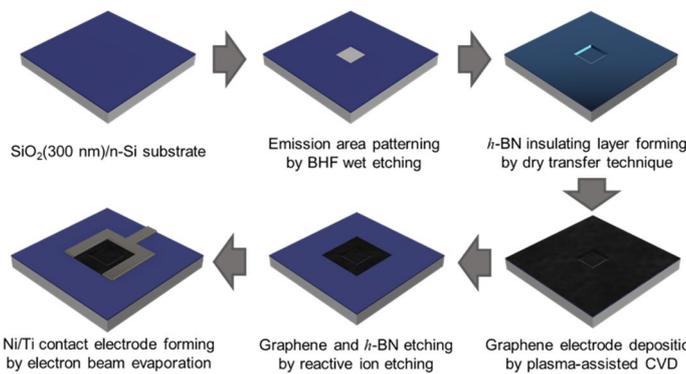


図 3: グラフェン/h-BN/n-Si 積層構造平面電子源の試作プロセス

3.3 平面電子源の電子放出特性評価

電子放出特性の評価は真空度 10⁻⁶Pa の真空チャンバーを用いて実施した (図 4)。放出電子を検出するアノード電極はデバイス表面から約 5mm の位置に対向させて配置し 1kV の高電圧を印可した。その状態でデバイスのゲート電極に 0~60V の電圧を印可し、電圧印可電流測定を実施した。デバイスに流れ込むカソード電流 I_C 及び放出されてアノード電極に到達した電子によって流れるアノード電流 I_A を測定した。これら二つの電流を用いて式(1)に示すように放出効率 η を定義した。

$$\eta = I_A / I_C \times 100 (\%) \quad (1)$$

また、放出電子のエネルギーを静電半球型エネルギー分析器により分析した。測定の際、二次電子などの低エネルギー帯の電子が観測されることを防ぐため、デバイスのカソード端子に -50 V の電圧を印加し、バックグラウンド電子と放出電子のエネルギー帯を分離した。放出された電子をアナライザーに導くため、プローブホール付きアノードプレートがデバイスから約 2 mm 離れた位置に配置されており、このプローブホールを通して電子がアナライザーに入射する。

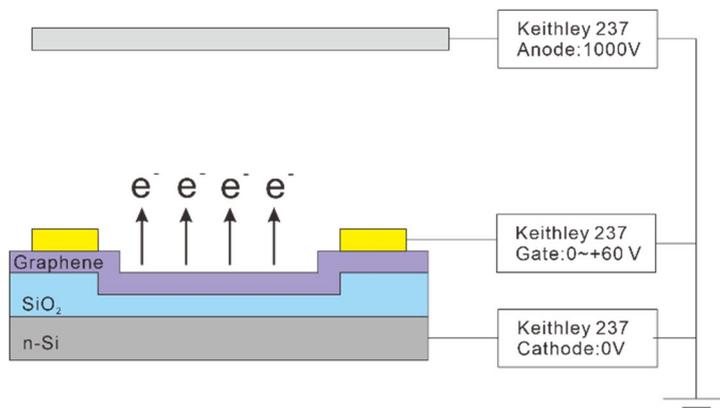


図 4: 電子放出特性の計測系

4. 研究成果

4.1 グラフェン/SiO₂/n-Si 積層構造を用いた高効率平面電子源の高効率電子放出機構の解明

電子放出効率最大 48.5%と放出電流密度 100 mA/cm²以上を達成した。これは上部電極に金属を用いた従来素子と比較して最大 1 万倍の特性向上である (図 5 (a))。また、放出電子のエネルギー分析より、放出電子のエネルギー分布はグラフェンの仕事関数より約 2.5 eV 程度高い所に低エネルギー端が位置していることが分かった (図 5 (b))。これは、絶縁層をトンネリングしたすべての電子は、グラフェンの仕事関数より高いエネルギーを保持したまま電極まで到達していることを示唆している。すなわち、従来型平面電子放出デバイスの低電子放出効率の要因は、絶縁層での電子散乱ではなく上部電極での電子散乱によるエネルギー低下であることが分かった。また、デバイス内部での電子の伝導機構の解析から、高効率電子放出のためには、絶縁層の電子の伝導が Fowler-Nordheim (FN) トンネリングであることが重要であることが分かった。この結果から、デバイス内部での電子の伝導機構が FN トンネリングのみであった場合、単層グラフェンの電子透過率から、グラフェン/SiO₂/n-Si 積層構造平面型電子放出デバイスの最大電子放出効率は約 70%となることが分かった。これは、グラフェン電極に僅か 10V 程度の電圧を印可するだけで、Si 基板中に流れる電子の約 7 割を表面から取り出すことができるという驚異的な現象である。

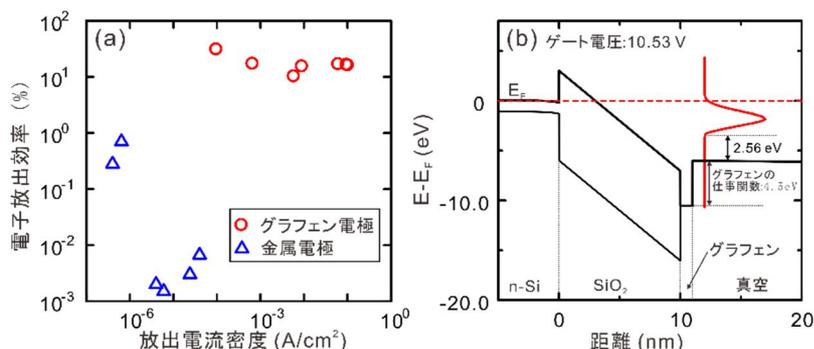


図 5 (a) グラフェン/SiO₂/n-Si 積層構造平面型電子放出デバイスの電子放出効率と放出電流密度 (b) デバイスの動作時のバンド構造と放出電子のエネルギー分布

4.2 グラフェン/h-BN/n-Si 積層構造を用いた平面電子源の電子放出特性

図 6 に作製したグラフェン/h-BN 平面型電子源の電子放出特性を示す。リーク電流が大きく、放出効率は最大で 0.2% と低い値となったが、10 V 程度のゲート電圧からアノード電流は立ち上がり、電子放出を確認した。また、アノード電流の最大値は 2 μA を超える値であり、これはエミッションエリアの面積 (10 μm × 10 μm) から算出した電流密度としては 2 A/cm² で、グラフェン/SiO₂/n-Si 積層構造平面型電子源と比べて更に 10 倍以上の放出電流密度を達成した。

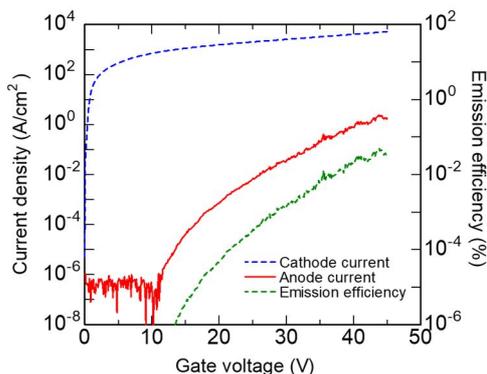


図 6 : グラフェン/h-BN/n-Si 積層構造平面電子源の電子放出特性

4.3 グラフェン/h-BN/n-Si 積層構造を用いた平面電子源の放出電子のエネルギー分析

図 7 にグラフェン/h-BN 積層型平面電子放出デバイスから放出した電子のエネルギースペクトルを示す。半値幅で最小約 0.18 eV のエネルギー単色化を達成した。これは、高分解能電子顕微鏡で実用化されているタングステン冷陰極の 0.3 eV を凌駕するエネルギー単色性であり、産業的にもインパクトのある値である。また、エネルギースペクトルの形状も、高エネルギー側にテールを引いており、絶縁層に SiO₂ を用いた場合のエネルギースペクトルと形状が大きく異なる。これは、h-BN 絶縁層での電子散乱の抑制により、n-Si の伝導帯の電子分布を反映していることを示唆している。更に、放出電子のエネルギースペクトルのシミュレーションにより、h-BN での電子散乱のエネルギーは 0.04 eV 程度であり、h-BN の ZA フォノンと比較的良好一致

を示すことが分かった。

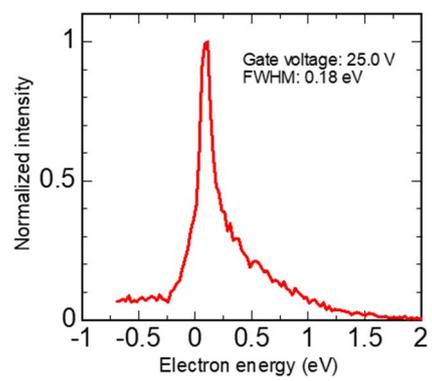


図 7: グラフェン/h-BN/n-Si 積層構造平面電子源から放出した電子のエネルギースペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Murakami Katsuhisa, Adachi Manabu, Miyaji Joji, Furuya Ryo, Nagao Masayoshi, Yamada Yoichi, Neo Yoichiro, Takao Yoshinori, Sasaki Masahiro, Mimura Hidenori	4. 巻 2
2. 論文標題 Mechanism of Highly Efficient Electron Emission from a Graphene/Oxide/Semiconductor Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2265 ~ 2273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00449	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 Furuya Ryo, Takao Yoshinori, Nagao Masayoshi, Murakami Katsuhisa	4. 巻 174
2. 論文標題 Low-power-consumption, high-current-density, and propellantless cathode using graphene-oxide-semiconductor structure array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 48 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2020.04.014	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 Igari Tomoya, Nagao Masayoshi, Mitsuishi Kazutaka, Sasaki Masahiro, Yamada Yoichi, Murakami Katsuhisa	4. 巻 15
2. 論文標題 Origin of Monochromatic Electron Emission From Planar-Type Graphene/h-BN/n-Si Devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014044-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.15.014044	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 Shimawaki H., Murakami K., Nagao M., Mimura H.	4. 巻 33
2. 論文標題 Electron emission properties of planar-type electron emission sources based on nanocrystalline silicon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Technical Digest of 33rd International Vacuum Nanoelectronics Conference	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IVNC49440.2020.9203289	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 Murakami Katsuhisa, Miyaji Joji, Furuya Ryo, Adachi Manabu, Nagao Masayoshi, Neo Yoichiro, Takao Yoshinori, Yamada Yoichi, Sasaki Masahiro, Mimura Hidenori	4. 巻 114
2. 論文標題 High-performance planar-type electron source based on a graphene-oxide-semiconductor structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 213501 ~ 213501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5091585	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 Murakami Katsuhisa, Igari Tomoya, Mitsuishi Kazutaka, Nagao Masayoshi, Sasaki Masahiro, Yamada Yoichi	4. 巻 12
2. 論文標題 Highly Monochromatic Electron Emission from Graphene/Hexagonal Boron Nitride/Si Heterostructure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 4061 ~ 4067
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b17468	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 NAGAO Masayoshi, MURAKAMI Katsuhisa	4. 巻 63
2. 論文標題 Development of High-performance Electron Sources and Its Application	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 7 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.63.7	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 古家 遼、長尾 昌善、村上 勝久、鷹尾 祥典	4. 巻 119
2. 論文標題 小型イオンエンジン用Graphene/SiO ₂ /Si積層型mA級平面電子源の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 21-24
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 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 Graphene/h-BNの積層構造を用いた平面型電子源	4. 巻 119
2. 論文標題 Graphene/h-BNの積層構造を用いた平面型電子源	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 63-66
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 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 R. Furuya, K. Murakami, M. Nagao, Y. Takao	4. 巻 HS6-A153
2. 論文標題 Development of Low-Voltage-Driven Propellantless Cathodes with High-Current Density Based on Graphene-Oxide-Semiconductor Structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 36th International Electric Propulsion Conference	6. 最初と最後の頁 1-5
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 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 Murakami Katsuhisa, Miyaji Joji, Furuya Ryo, Adachi Manabu, Nagao Masayoshi, Yoshihiro Nemoto, Takeguchi Masaki, Neo Yoichiro, Takao Yoshinori, Yamada Yoichi, Sasaki Masahiro, Mimura Hidenori	4. 巻 31
2. 論文標題 Graphene-oxide-semiconductor planar-type electron emission device and its applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Technical digest 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference	6. 最初と最後の頁 36-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IVNC.2018.8520076	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 Furuya Ryo, Murakami Katsuhisa, Nagao Masayoshi, Takao Yoshinori	4. 巻 31
2. 論文標題 Improvement of Electron Emission Efficiency of Graphene-Oxide-Semiconductor Planar-Type Electron Sources for Nanosatellite Neutralizers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Technical digest 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference	6. 最初と最後の頁 188-189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IVNC.2018.8519982	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 Miyaji Joji, Murakami Katsuhisa, Nagao Masayoshi, Neo Yoichiro, Mimura Hidenori	4. 巻 31
2. 論文標題 Evaluation of electron emission properties of graphene-oxide-silicon planar type cold cathode for an electron microscope	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Technical digest 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference	6. 最初と最後の頁 204-205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IVNC.2018.8520285	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 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 松本直之、村上勝久、長尾昌善、鷹尾祥典
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素による平面型グラフェン電子源の酸素耐性向上と特性評価
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoyuki Matsumoto, Katsuhisa Murakami, Masayoshi Nagao, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Resistance Investigation of Graphene-Oxide-Semiconductor Planar-Type Electron Sources against Atomic Oxygen
3. 学会等名 The 10th Asian Joint Conference on Propulsion and Power (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hidetaka Shimawaki, Katsuhisa Murakami, Masayoshi Nagao, and Hidenori Mimura
2. 発表標題 Electron emission properties of planar-type electron emission sources based on nanocrystalline silicon
3. 学会等名 33rd International Vacuum Nanoelectronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Igari, M. Nagao, Y. Yamada, M. Sasaki, and K. Murakami,
2. 発表標題 Development of Planar-type Electron Emission Device Based on a Graphene/h-BN Heterostructure
3. 学会等名 Joint meeting of International Vacuum Nanoelectronics Conference and International Vacuum Electron Sources, Cincinnati, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Furuya, K. Murakami, M. Nagao, and Y. Takao
2. 発表標題 Development of Low-Voltage-Driven Propellantless Cathodes with High-Current Density Based on Graphene-Oxide-Semiconductor Structure
3. 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference, Austria (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 猪狩 朋也、長尾 昌善、三石 和貴、佐々木 正洋、山田 洋一、村上勝久
2. 発表標題 Graphene/h-BN を用いた原子層物質積層平面型電子源
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋期学術講演会, 札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古家 遼、村上 勝久、長尾 昌善、鷹尾 祥典
2. 発表標題 超小型イオンエンジン用Graphene/SiO ₂ /Si積層平面型電子源の大電流化
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会, つくば市
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古家 遼、村上 勝久、長尾 昌善、鷹尾 祥典
2. 発表標題 低電圧駆動可能な小型中和器実現に向けたグラフェン/SiO ₂ /Si積層型平面電子源の大電流化
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会，徳島
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古家 遼、長尾 昌善、村上 勝久、鷹尾 祥典
2. 発表標題 小型イオンエンジン用Graphene/SiO ₂ /Si積層型mA級平面電子源の開発
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会，東京
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 猪狩 朋也、長尾 昌善、三石 和貴、佐々木 正洋、山田 洋一、村上 勝久
2. 発表標題 Graphene/h-BNの積層構造を用いた平面型電子源
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会，東京
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 猪狩 朋也、長尾 昌善、三石 和貴、佐々木 正洋、山田 洋一、村上 勝久
2. 発表標題 Graphene/h-BN平面型電子源からの単色電子放出
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会，東京（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Murakami
2. 発表標題 Graphene-oxide-semiconductor planar-type electron emission device and its applications
3. 学会等名 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上 勝久、長尾 昌善
2. 発表標題 絶縁基板上へのグラフェンの直接合成技術と新規電子デバイスへの応用
3. 学会等名 産業技術連携推進会議 情報通信・エレクトロニクス部会 第14回電子技術分科会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古家 遼、村上 勝久、長尾 昌善、鷹尾 祥典
2. 発表標題 小型イオンエンジン用平面型グラフェン電子源の電子電流特性評価
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古家 遼、村上 勝久、長尾 昌善、鷹尾 祥典
2. 発表標題 宇宙利用を目指した平面型グラフェン電子源の放出電子電流向上
3. 学会等名 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古家 遼、村上 勝久、長尾 昌善、鷹尾 祥典
2. 発表標題 平面型グラフェン電子源の放出効率向上と 大電流化に向けた取り組み
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鷹尾 祥典、土屋 智由、長尾 昌善、村上 勝久
2. 発表標題 超小型人工衛星に搭載可能なマイクロ電気推進機
3. 学会等名 安全工学シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 電子放出素子及び電子顕微鏡	発明者 村上勝久、長尾昌善	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-088138	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 平面型電子放出素子	発明者 村上勝久、長尾昌善	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-051288	出願年 2020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	山田 洋一 (Yamada Yoichi) (20435598)	筑波大学・数理物質系・准教授 (12102)	

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