

令和 6 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：2021～2023

課題番号：21H01401

研究課題名(和文) h-BN直接成膜と原子層物質積層構造を用いた超単色電子放出デバイスの創出

研究課題名(英文) Development of direct synthesis of h-BN and highly monochromatic electron emission devices using stacking structure of atomic layered 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) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：誘導結合型リモートプラズマ化学気相成長法により六方晶窒化ホウ素(h-BN)の触媒フリー直接合成技術を開発し、合成温度500度の低温で窒化ホウ素膜を成膜可能とした。また、サファイア基板に成膜した単結晶Ni(111)上への高結晶多層h-BNエピタキシャル成長技術も開発した。これらの手法により成膜したh-BNを用いたGraphene/h-BN積層構造を用いた平面型電子放出デバイスを試作し、放出電流密度15mA/cm²以上の大電流密度動作と、放出電子のエネルギー単色性0.6～0.8eVを実現し平面型電子放出デバイスのエネルギー単色性を向上することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

h-BNは様々な原子層物質を成膜するための絶縁性基板として重要な材料であるが、大面積化が課題であった。本研究で開発したh-BN成膜技術によりh-BN基板の大面積化への展望が開け、原子層物質分野での学術的意義は高い。また、大面積に直接成膜したh-BNを用いた平面型電子放出デバイスの動作と放出電子のエネルギー単色性向上を実証した。これらの成果は、平面型電子放出デバイスの電子ビーム分析装置応用の実用化にとって重要であり社会的意義が高い。

研究成果の概要(英文)：We developed a catalyst-free direct synthesis technique of hexagonal boron nitride (h-BN) by inductively coupled remote plasma chemical vapor deposition, enabling the deposition of boron nitride films at a low synthesis temperature of 500 degrees. We also developed a technique for epitaxial growth of highly crystalline multi-layered h-BN on single-crystal Ni(111) deposited on a sapphire substrate. We fabricated a planar electron emission device using a graphene/h-BN heterostructure deposited by these techniques, and succeeded in achieving high electron emission current density of over 15mA/cm² and monochromatic electron emission of 0.6-0.8 eV, resulting in the improvement of the electron emission energy monochromaticity of the planar electron emission device.

研究分野：電子放出デバイス

キーワード：六方晶窒化ホウ素 グラフェン 化学気相成長 電子放出

1. 研究開始当初の背景

金属/絶縁体/金属または金属/絶縁体/半導体積層構造の平面型電子放出デバイスは、電子のトンネリングと加速をデバイス内部の絶縁体層で行うため、通常の電子放出デバイスでは不可能な低真空、大気中・液体中での動作が可能である。また、平面から直進性の高い電子を放出することが可能である。このようなユニークな特徴から、既存の電子放出デバイスでは実現できなかった、低真空で使用可能な安価でコンパクトな電子顕微鏡、ガス・液体材料の改質など従来にはない様々な応用展開が期待できる。しかし、平面型電子放出デバイスはその動作原理により、絶縁層と上部金属電極での電子散乱により電子のエネルギーが低下するため、放出電子のエネルギー分布が広がり、更に上部電極の仕事関数以下までエネルギーが低下した電子は上部電極で回収されるため、電子放出効率、放出電流密度の低さと放出電子のエネルギー広がりを実用化への課題である。これまで、電子放出効率の改善のために、上部金属電極にアルカリ金属を修飾することで上部金属電極を低仕事関数化する試みがなされてきた。電子放出効率は向上するが、それでも電子放出効率は僅か1%程度であり、増加した放出電子は電子散乱によりエネルギーが低下した電子であるため放出電子のエネルギー幅はより広がってしまう。また、アルカリ金属を修飾するため動作には超高真空が必要であり、平面型電子放出デバイスの特徴である低真空動作という利点が失われる。そのため、平面型電子放出デバイスの課題を解決するためには絶縁層と上部金属電極での電子散乱を抑制することが重要である。

物質内部での電子散乱には主にエネルギー損失を伴わない弾性散乱とエネルギー損失を伴う非弾性散乱があり、非弾性散乱を抑制することで平面型電子放出デバイスの課題を解決することができる。物質中での電子の非弾性散乱における平均自由行程はおおよそ1 nm程度である。また、電子の非弾性散乱確率は一般的に物質の密度と原子の重さに比例して大きくなる。そのため、軽元素で構成された厚さ1 nm以下の導電体を上部電極にすることで、上部電極での電子の非弾性散乱を抑制可能である。グラフェンは炭素で構成された原子一層(0.355 nm)の導電体であるため、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言える。実際に上部電極にグラフェンを用いた Graphene/SiO₂/Si 積層構造の平面型電子放出デバイスを試作し特性を評価したところ、電子放出効率48.5%を達成した。また、放出電子のエネルギー分析から、放出した電子はすべてグラフェンの仕事関数より高い準位に位置することが分かり、上部電極の仕事関数による電子のカットは無いことが明らかとなった。これは従来の平面型電子放出デバイスの低電子放出効率の要因は、上部金属電極での非弾性散乱による電子のエネルギー損失であることを意味しており、上部電極にグラフェンを使用し電子の非弾性散乱を抑制することで電子放出効率を飛躍的に向上させることが可能となった。一方で、放出電子のエネルギー広がり1~1.6 eVと広く、このエネルギー広がりSiO₂中での電子散乱の影響であることが分かった。そのため、絶縁層での電子の非弾性散乱を抑制することで放出電子のエネルギー単色化が可能であると考え、グラフェンと類似した結晶構造の軽元素で構成された絶縁層である、六方晶窒化ホウ素(h-BN)を用いた Graphene/h-BN/Si 積層構造の平面型電子放出デバイスを試作し、放出電子のエネルギースペクトルを計測した。その結果、最小エネルギー幅0.18 eVの単色電子放出を達成した。これは現在最もエネルギー単色性の高い商用電子源であるタングステン冷陰極のエネルギー単色性0.3 eVを凌駕するものであり実用上のインパクトも高い。しかしながら、試作デバイスのh-BNは銅箔に成膜したh-BNをSi基板上に転写することで実現しており、転写工程で発生するh-BNのシワやクラックが将来の産業応用の障壁であり、産業応用に向けてh-BNをSi基板や導電性基板に直接成膜する技術の開発が求められている。

2. 研究の目的

独自開発したリモートプラズマ化学気相成長法により任意基板上へのh-BNの触媒フリー直接合成技術を確認し、ウェハースケールでの Graphene/h-BN 積層構造作製を実現する。更に、Graphene/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子のエネルギー単色性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ことを目的とする。(図1)

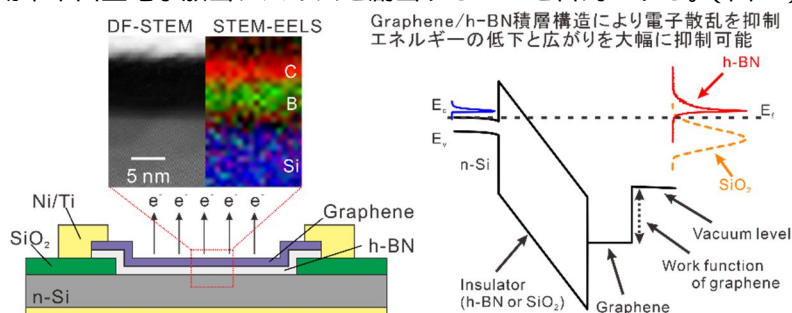


図1: Graphene/h-BN積層構造からの単色電子放出

3. 研究の方法

(1)h-BN 成膜技術の開発

多層 h-BN は独自開発した誘導結合型リモートプラズマ化学気相成長装置を用いて成膜を行った。h-BN 成膜用の基板として、Si 基板、300 nm 熱酸化膜付 Si 基板、両面研磨した石英基板を用いた。成膜基板を装置に導入し、ベース真空 5×10^{-4} Pa まで真空排気した後に基板を 500 度に加熱した。水素 10 sccm、窒素 15 sccm をキャリアガスとして流し、h-BN の原料として -10 度に冷却しボラジンをバブリングした窒素を 0.2 sccm 導入した。h-BN 合成時の圧力は 10 Pa、13.65 MHz の高周波電力 100 W で誘導結合型リモートプラズマを用いて 5 分間成膜を行った。

成膜した h-BN の膜厚は Si 基板の上に成膜した h-BN を用いて 4 波長エリプソメトリにより計測した。h-BN の光学バンドギャップは石英基板上に成膜した h-BN を用い、紫外可視の光透過スペクトルから求めた。また、h-BN の結晶性は熱酸化膜付 Si 基板に成膜した h-BN を用い、顕微ラマン分光により評価した。成膜した h-BN の元素分析は Si 基板の上に成膜した h-BN を用いて、X 線光電子分光(X-ray photoemission spectroscopy: XPS)により分析した。成膜した h-BN の断面構造は透過型電子顕微鏡像(Transmission electron microscope: TEM)により評価した。

(2)Graphene/h-BN/Si ヘテロ構造平面型電子放出デバイスの開発

基板には、300 nm 熱酸化膜付 n-Si 基板を用いた。フォトリソグラフィーと熱酸化膜のウェットエッチングにより直径 10 μm の電子放出エリアを形成した。その後、厚さ約 10 nm の h-BN を誘導結合型リモートプラズマ化学気相成長により合成温度 500 度で Si 基板全体に直接成膜した。次に、約 3 層の Graphene ゲート電極を誘導結合型リモートプラズマ化学気相成長により h-BN 上に合成温度 800 度で直接成膜した。電子放出エリア以外の Graphene/h-BN 積層体はフォトリソグラフィーと SF_6 を用いた反応性イオンエッチングで除去した。最後に Graphene へのコンタクト用に Ni(100 nm)/Ti(10 nm) コンタクト電極を、電子ビーム蒸着とリフトオフプロセスで作製した。

試作した電子放出デバイスの電子放出特性は、ベース真空 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ Pa で測定した。アノード電極用のステンレスプレートデバイスの直上 5 mm に設置し、1 kV の電圧を印可した。また、試作したデバイスから放出した電子のエネルギースペクトルを、静電半球型エネルギー分析器を搭載した独自開発した電子線エネルギー分析装置を用いて評価した。

4. 研究成果

(1)h-BN 成膜技術の開発

図 2 (a)に Si 基板の上に成膜した h-BN の断面 TEM 像を示す。断面 TEM 像から Si 基板の上に層状の物質が成膜できていることが分かる。また、XPS スペクトルからホウ素と窒素が検出され、組成を分析すると B:N=1:1 であり h-BN の化学量論的組成と一致した(図 2 (b), (c))。

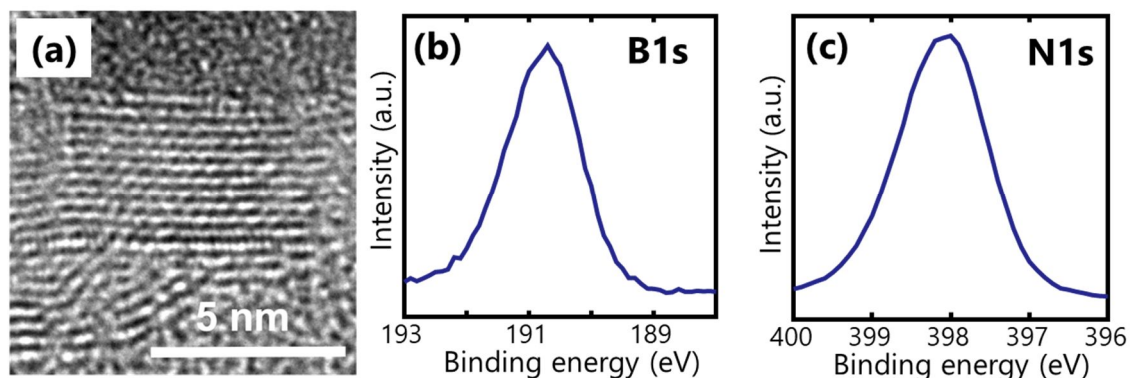


図 2:(a)Si 基板の上に成膜した h-BN の断面 TEM 像。(b)、(c)Si 基板の上に成膜した h-BN の XPS スペクトル

図 3 に成膜した h-BN のラマン分光スペクトルと紫外可視光透過スペクトルを示す。過去に試作した Graphene/h-BN/Si 積層型電子放出デバイスで用いた銅箔に成膜した多層 h-BN を転写した試料のラマン分光スペクトルと紫外可視光透過スペクトルも参考に掲載した。ラマン分光スペクトルにおいて 1372 cm^{-1} に h-BN の結晶構造に起因するスペクトルが観察された。また、h-BN ピークの半値幅は 33 cm^{-1} であり、半値幅から推定される h-BN のグレインサイズは約 33 nm であった。また、紫外可視分光スペクトルから求めた光学バンドギャップは 5.82 eV であり、理論値である 5.9 eV とよい一致を示した。触媒金属である銅箔に成膜した h-BN を転写した試料と比較しても、同等レベルの光学特性であることが分かり、合成温度 500 度の低温において触媒金属フリーで半導体基板上へ h-BN を成膜可能な技術を開発することができた。

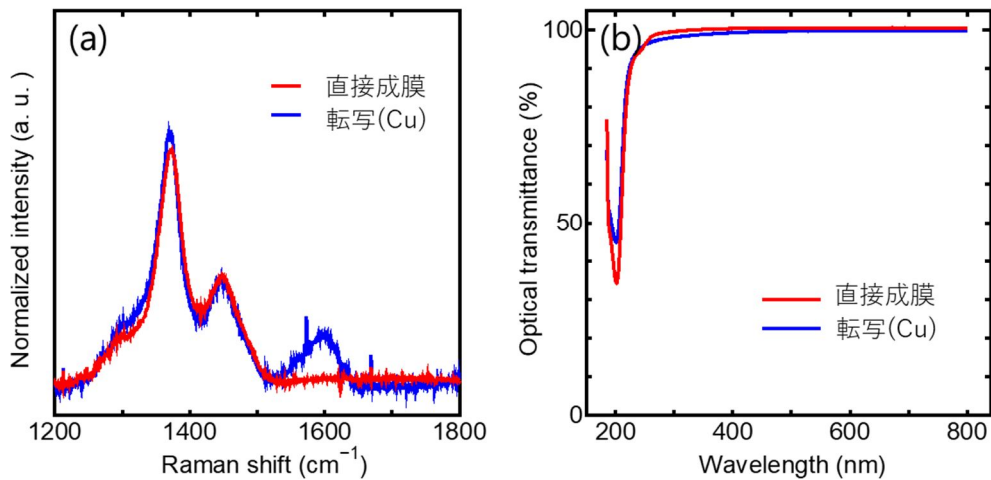


図 3: 直接成膜 h-BN および銅箔から転写した h-BN の(a)ラマンスペクトルと(b)紫外可視光透過スペクトル。

(2) Graphene/h-BN/Si ヘテロ構造平面型電子放出デバイスの開発

図 4 に試作した Graphene/h-BN/Si ヘテロ構造平面型電子放出デバイスの走査型電子顕微鏡像 (Scanning electron microscope: SEM) を示す。銅箔から転写した h-BN を用いたデバイスでは h-BN にシワやクラックが発生していることが分かる。一方、直接成膜 h-BN を用いたデバイスでは、シワやクラックの無い一様なコントラストであった。

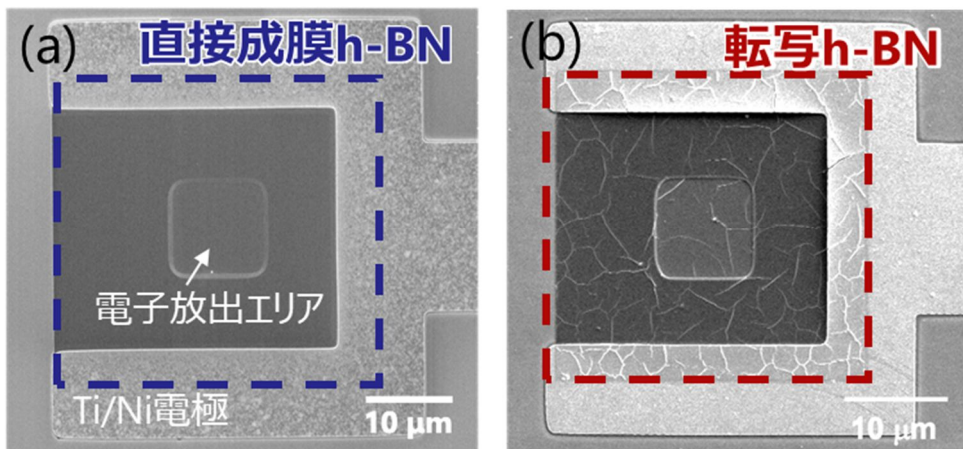


図 4: (a) 直接成膜 h-BN を用いた平面型電子放出デバイスの SEM 像。(b) 転写 h-BN を用いた平面型電子放出デバイスの SEM 像

図 5 に直接成膜 h-BN を用いて試作した Graphene/h-BN/Si ヘテロ構造平面型電子放出デバイスの電子放出特性および放出電子のエネルギースペクトルを示す。カソード電圧 -6 V 付近からアノード電流が検出され、-20 V で最大 11.5 nA の放出電流が得られた。電流密度に換算すると約 15 mA/cm² であり高電流密度放出を実現した。エネルギースペクトルの形状は過去に転写プロセスを用いて試作した Graphene/h-BN/Si ヘテロ接合デバイスと同様、高エネルギー側にテールを引く形状であり、絶縁層に SiO₂ を用いた Graphene/Oxide/Semiconductor (GOS) 型平面電子放出デバイスの対照的なガウス分布形状をした放出電子のエネルギースペクトルと異なることが分かった。また放出電子のエネルギー半値幅は 0.6 ~ 0.8 eV であり GOS デバイスと比較して約半分となり、放出電子の単色性が向上することが分かった。しかしながら、過去に転写プロセスを用いて試作した Graphene/h-BN/Si ヘテロ接合デバイスの最小エネルギー半値幅 0.18 eV を達成することができなかった。これは、Si 基板上に誘導結合型リモートプラズマ化学気相成長により h-BN を直接成膜してデバイスを作製したため、h-BN/Si 界面にプラズマダメージが入り欠陥準位ができたためだと考えられる。そのため、h-BN 直接成膜技術を用いた Graphene/h-BN/Si ヘテロ接合デバイスでは、h-BN/Si 界面の欠陥密度の低減が必要であることが分かった。

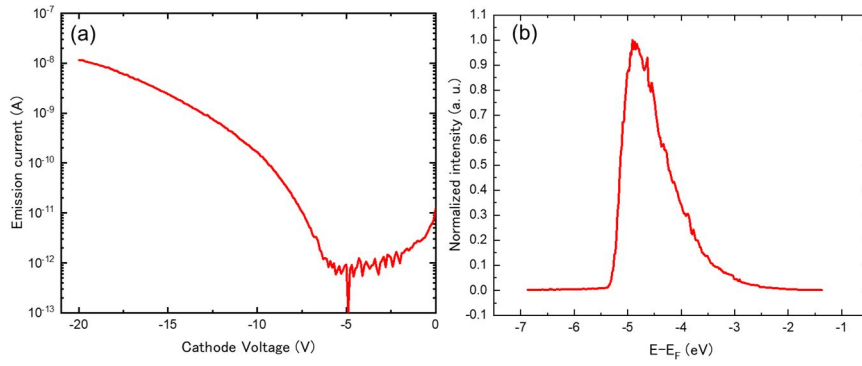


図 5: 試作した Graphene/h-BN/Si ヘテロ構造平面型電子放出デバイスの(a)電子放出特性および (b)放出電子のエネルギースペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Koichi Takao, Kawashima Shogo, Abo Satoshi, Wakaya Fujio, Nagao Masayoshi, Murakami Katsuhisa	4. 巻 22
2. 論文標題 Simulation of Electron Transmission through Graphene with Inelastic Scattering	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 157 ~ 161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2024-009	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 Takashima Hiroshi, Inaguma Yoshiyuki, Nagao Masayoshi, Murakami Katsuhisa	4. 巻 8
2. 論文標題 Hexagonal Boron Nitride Seed Layer-Assisted van der Waals Growth of BaSnO ₃ Perovskite Films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 28778 ~ 28782
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.3c03666	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 Murakami Katsuhisa, Yamamoto Masaya, Murata Hiromasa, Mimura Hidenori, Neo Yoichiro, Nagao Masayoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of planar type electron emission devices using a heterostructure of two-dimensional materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 30th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)	6. 最初と最後の頁 567-568
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ISDEIV55268.2023.10199428	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 Mutsukawa Ren, Matsumoto Naoyuki, Takao Yoshinori, Murata Hiromasa, Nagao Masayoshi, Murakami Katsuhisa	4. 巻 -
2. 論文標題 Protective Layer Process of Graphene-Oxide-Semiconductor Electron Emission Devices for Low Earth Orbit Applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 30th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)	6. 最初と最後の頁 560-562
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ISDEIV55268.2023.10200560	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 村上勝久、村田博雅、長尾昌善、佐々木正洋、山田洋一	4. 巻 123
2. 論文標題 Graphene/h-BN/Si積層構造を用いた平面型電子放出デバイスの開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 5-7
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 小市崇央、河嶋祥吾、阿保智、若家富士男、長尾昌善、村上勝久	4. 巻 123
2. 論文標題 Graphene-Insulator-Semiconductor構造電子源における多重反射の効果	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 8-10
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 六川蓮、鷹尾祥典、長尾昌善、村田博雅、村上勝久	4. 巻 123
2. 論文標題 酸化環境に対する平面型グラフェン電子源の保護手法と電子放出特性に及ぼす影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 39-42
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 嶋脇秀隆、長尾昌善、村上勝久	4. 巻 123
2. 論文標題 GOS構造電子源の光支援電子放出特性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 43-44
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 Matsumoto Naoyuki, Takao Yoshinori, Nagao Masayoshi, Murakami Katsuhisa	4. 巻 7
2. 論文標題 Oxidation Resistance Improvement of Graphene-Oxide-Semiconductor Planar-Type Electron Sources Using h-BN as an Oxygen-Resistant, Electron-Transmissive Coating	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 33004 ~ 33009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.2c02709	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 Yamamoto Masaya, Murata Hiromasa, Miyata Noriyuki, Takashima Hiroshi, Nagao Masayoshi, Mimura Hidenori, Neo Yoichiro, Murakami Katsuhisa	4. 巻 8
2. 論文標題 Low-Temperature Direct Synthesis of Multilayered h-BN without Catalysts by Inductively Coupled Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 5497 ~ 5505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.2c06757	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 山本将也, 村田博雅, 長尾昌善, 三村秀典, 根尾陽一郎, 村上勝久	4. 巻 122
2. 論文標題 h-BNのSi基板上低温成膜技術の開発とgraphene/h-BN/Si積層型平面電子放出デバイスへの応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 37-38
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 村上勝久, 村田博雅, 長尾昌善	4. 巻 122
2. 論文標題 液中動作用グラフェン平面電子源の開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 35-36
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 若家富士男、寺門大地、河嶋祥吾、阿保智、長尾昌善、村上勝久	4. 巻 122
2. 論文標題 GIS構造電子源におけるグラフェンの電子透過のシミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 29-30
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 嶋脇秀隆、村田博雅、長尾昌善、村上勝久	4. 巻 122
2. 論文標題 ナノ結晶シリコンを用いた平面型電子源からの電子放出特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 59-61
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	4. 巻 65
2. 論文標題 Direct Synthesis of Graphene on an Insulating Substrate and Its Device Application	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science	6. 最初と最後の頁 184 ~ 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.65.184	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 Kameda Yukino, Murakami Katsuhisa, Nagao Masayoshi, Mimura Hidenori, Neo Yoichiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Microscope equipped with graphene-oxide-semiconductor electron source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Conference Proceedings of 2021 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)	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) 10.1109/IVNC52431.2021.9600718	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, Matsumoto Naoyuki, Kameda Yukino, Takao Yoshinori, Neo Yoichiro, Yamada Yoichi, Mitsuishi Kazutaka, Sasaki Masahiro, Mimura Hidenori, Nagao Masayoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Planar type electron emission device using atomic layered materials and it applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Conference Proceedings of 2021 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)	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) 10.1109/IVNC52431.2021.9600789	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 Matsumoto Naoyuki, Takao Yoshinori, Nagao Masayoshi, Murakami Katsuhisa	4. 巻 -
2. 論文標題 Oxygen Resistance Investigation of Graphene-Oxide-Semiconductor Planar-Type Electron Sources for Low Earth Orbit Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Conference Proceedings of 2021 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)	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) 10.1109/IVNC52431.2021.9600694	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 村上勝久	4. 巻 121
2. 論文標題 原子層物質を用いた平面型電子源の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 11-13
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 松本直之、鷹尾祥典、長尾昌善、村上勝久	4. 巻 121
2. 論文標題 地球低軌道応用に向けた平面型グラフェン電子源の耐酸素コーティング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 38-42
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 亀田ゆきの、村上勝久、長尾昌善、三村秀典、根尾陽一郎	4. 巻 121
2. 論文標題 グラフェン平面陰極搭載の走査型電子顕微鏡用電子銃の最適設計	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 47-50
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 -

〔学会発表〕 計44件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 六川蓮、鷹尾祥典、長尾昌善、村田博雅、村上勝久
2. 発表標題 平面型グラフェン電子源の地球低軌道利用に向けた保護膜作製とその評価
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高島浩、稲熊宜之、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素 (h-BN) をシード層としたBaSnO ₃ 薄膜の作製
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小市崇央、河嶋祥吾、阿保智、若家富士男、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 Graphene-Insulator-Semiconductor構造電子源におけるエネルギーフィルタ効果
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koichi Takao、Kawashima Shogo、Abo Satoshi、Wakaya Fujio、Nagao Masayoshi、Murakami Katsuhisa
2. 発表標題 Simulation of electron transmission through graphene with inelastic scattering
3. 学会等名 The 14th International Vacuum Electron Sources Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 嶋脇秀隆、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 GOS構造平面型電子源の光支援電子放出特性
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村上勝久、村田博雅、村上勝久
2. 発表標題 グラフェン/p-Siショットキー接合からの電子放出
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 六川蓮、鷹尾祥典、長尾昌善、村田博雅、村上勝久
2. 発表標題 平面型グラフェン電子源への耐酸素保護膜の作製と電子放出特性評価
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuhisa Murakami
2. 発表標題 Development of high-performance planar-type electron source using two-dimensional materials and its applications
3. 学会等名 The 14th International Vacuum Electron Sources Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mutsukawa Ren、Takao Yoshinori、Murata Hiromasa、Nagao Masayoshi、Murakami Katsuhisa
2. 発表標題 FABRICATION OF PROTECTIVE COATING ON GRAPHENE-OXIDE-SEMICONDUCTOR ELECTRON SOURCES FOR IMPROVING OXYGEN RESISTANCE AND EVALUATION OF EMISSION CHARACTERISTICS
3. 学会等名 The 14th International Vacuum Electron Sources Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Murakami Katsuhisa、Yamamoto Masaya、Murata Hiromasa、Mimura Hidenori、Neo Yoichiro、Nagao Masayoshi
2. 発表標題 Development of planar type electron emission devices using a heterostructure of two-dimensional materials
3. 学会等名 30th International symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mutsukawa Ren、Matsumoto Naoyuki、Takao Yoshinori、Murata Hiromasa、Nagao Masayoshi、Murakami Katsuhisa
2. 発表標題 Protective layer process of graphene-oxide-semiconductor electron emission devices for low earth orbit applications
3. 学会等名 30th International symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 六川蓮、鷹尾祥典、長尾昌善、村田博雅、村上勝久
2. 発表標題 酸化環境に対する平面型グラフェン電子源の保護手法と電子放出特性に及ぼす影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子デバイス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村上勝久、村田博雅、長尾昌善、佐々木正洋、山田洋一
2. 発表標題 Graphene/h-BN/Si積層構造を用いた平面型電子放出デバイスの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子デバイス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 嶋脇秀隆、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 GOS構造電子源の光支援電子放出特性
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子デバイス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村上勝久、村田博雅、宮田典幸、長尾昌善
2. 発表標題 グラフェン/p-Siショットキー接合型電子放出デバイスの寿命評価
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 六川蓮、鷹尾祥典、長尾昌善、村田博雅、村上勝久
2. 発表標題 Graphene-oxide-semiconductor構造を有する平面型電子源における耐酸素薄膜の効果
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Katsuhisa Murakami
2. 発表標題 Recent progress of planar type electron sources using 2D materials
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本将也、村田博雅、長尾昌善、三村秀典、根尾陽一郎、村上勝久
2. 発表標題 Si基板上h-BN直接成膜技術とgraphene/h-BN/Si積層型平面電子源の開発
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 村上勝久、村田博雅、長尾昌善
2. 発表標題 グラフェン平面電子源のエタノール中動作による水素発生
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 Masaya Yamamoto, Hiromasa Murata, Masayoshi Nagao, Hidenori Mimura, Yoichiro Neo, Katsuhisa Murakami
2. 発表標題 Development of direct synthesis of h-BN on Si substrate and planar type electron emission device using graphene/h-BN/Si heterostructure
3. 学会等名 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋脇秀隆、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 ナノ結晶シリコンを用いた平面型電子放出素子の低真空下での動作
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 若家富士男、寺門大地、河嶋祥吾、阿保智、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 GIS構造電子源におけるグラフェンの電子透過のシミュレーション
3. 学会等名 電子デバイス研究会 電子・イオンビーム応用
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上勝久、村田博雅、長尾昌善
2. 発表標題 液中動作用グラフェン平面電子源の開発
3. 学会等名 電子デバイス研究会 電子・イオンビーム応用
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本将也、村田博雅、長尾昌善、三村秀典、根尾陽一郎、村上勝久
2. 発表標題 h-BNのSi基板上低温成膜技術の開発とgraphene/h-BN/Si積層型平面電子放出デバイスへの応用
3. 学会等名 電子デバイス研究会 電子・イオンビーム応用
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上勝久
2. 発表標題 原子層物質積層構造を用いた平面型電子放出デバイスの開発
3. 学会等名 応用物理学会ナノ荷電粒子ビーム産学連携委員会 2022年(令和4年)第2回研究会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋脇秀隆、村田博雅、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 ナノ結晶シリコンを用いた平面型電子源からの電子放出特性
3. 学会等名 電子デバイス研究会 電子・イオンビーム応用
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本将也、村田博雅、長尾昌善、三村秀典、根尾陽一郎、村上勝久
2. 発表標題 Si基板上h-BN直接成膜技術とGraphene/h-BN構造を利用した平面型電子源の開発
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本将也、村田博雅、長尾昌善、三村秀典、根尾陽一郎、村上勝久
2. 発表標題 Graphene/h-BN構造を用いた転写フリー平面型電子源の開発
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村上勝久、山田洋一、根尾陽一郎、鷹尾祥典、佐々木正洋、三村秀典、長尾昌善
2. 発表標題 Graphene/SiO ₂ /n-Si積層構造からの高効率電子放出機構
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 松本直之、鷹尾祥典、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 平面型グラフェン電子源の地球低軌道応用に向けた原子状酸素耐性向上
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 亀田ゆきの、村上勝久、長尾昌善、三村秀典、根尾陽一郎
2. 発表標題 Graphene-Oxide-Semiconductor型平面電子源の走査型電子顕微鏡応用
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 Naoyuki Matsumoto, Yoshinori Takao, Masayoshi Nagao, Katsuhisa Murakami
2. 発表標題 Oxygen Resistance Enhancement of Graphene-Oxide-Semiconductor Planar-Type Electron Sources Using Hexagonal Boron Nitride
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 島脇秀隆、村上勝久、長尾昌善、三村秀典
2. 発表標題 ナノ結晶シリコンを用いた平面型電子放出素子からの電子放出 ()
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 村上勝久
2. 発表標題 IVNC2021のトピックスとグラフェン平面電子源の最近の進展
3. 学会等名 次世代真空エレクトロニクス研究会 第2回定例研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀田ゆきの、村上勝久、長尾昌善、三村秀典、根尾陽一郎
2. 発表標題 グラフェン平面陰極搭載の走査型電子顕微鏡用電子銃の最適設計
3. 学会等名 電子デバイス研究会 電子管と真空ナノエレクトロニクスおよびその関連評価技術
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本直之、鷹尾祥典、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 地球低軌道応用に向けた平面型グラフェン電子源の耐酸素コーティング
3. 学会等名 電子デバイス研究会 電子管と真空ナノエレクトロニクスおよびその関連評価技術
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上勝久
2. 発表標題 原子層物質を用いた平面型電子源の開発
3. 学会等名 電子デバイス研究会 電子管と真空ナノエレクトロニクスおよびその関連評価技術
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀田ゆきの、村上勝久、長尾昌善、三村秀典、根尾陽一郎
2. 発表標題 Graphene-Oxide-Semiconductor型平面電子源を搭載したSEMの開発
3. 学会等名 2021年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本直之、鷹尾祥典、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 平面型グラフェン電子源の原子状酸素に対する耐性調査
3. 学会等名 令和3年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 若家富士男、寺門大知、阿保智、長尾昌善、村上勝久
2. 発表標題 Graphene-Insulator-Semiconductor電子源の電子放出特性のシミュレーション
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 村上勝久、猪狩朋也、長尾昌善、佐々木正洋、山田洋一
2. 発表標題 Graphene/h-BN/n-Si積層構造からの単色電子放出機構
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 Kameda Yukino、Murakami Katsuhisa、Nagao Masayoshi、Mimura Hidenori、Neo Yoichiro
2. 発表標題 Microscope equipped with graphene-oxide-semiconductor electron source
3. 学会等名 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Murakami Katsuhisa、Matsumoto Naoyuki、Kameda Yukino、Takao Yoshinori、Neo Yoichiro、Yamada Yoichi、Mitsuishi Kazutaka、Sasaki Masahiro、Mimura Hidenori、Nagao Masayoshi
2. 発表標題 Planar type electron emission device using atomic layered materials and its applications
3. 学会等名 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Matsumoto Naoyuki、Takao Yoshinori、Nagao Masayoshi、Murakami Katsuhisa
2. 発表標題 Oxygen resistance investigation of graphene-oxide-semiconductor planar-type electron sources for low earth orbit applications
3. 学会等名 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>デバイス技術研究部門カスタムデバイスグループ https://unit.aist.go.jp/d-tech/ja/teams/06_cdg/ja/index.html</p>
--

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