

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18910

研究課題名(和文)電子放出面の電位構造が従来と逆になる電子源を用いた新規超小型イオン推進機の実現

研究課題名(英文) Realization of a new ultra-compact ion propulsion system using an electron source with the inverted potential structure at the electron emission surface compared with the conventional one

研究代表者

鷹尾 祥典 (Takao, Yoshinori)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80552661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：超小型衛星にも搭載可能な高効率イオン推進機の実現へ向けて、制約となっている中和器(電子源)に焦点を当て、従来にないグラフェンを用いた推進剤不要な電子源の利用を図った。一つの電子放出面が $100\mu\text{m}$ 角となる素子を $3\text{mm}$ 角ウェハ内に380個配置した電子源において、 $11\text{V}$ の印加電圧で最大放出電子電流として $6.0\text{mA}$ に到達した。その結果、従来の小型プラズマ中和器と同程度の電流密度となる一方、電子生成コストとしては1桁以上小さい非常に高性能な中和器を実現できた。一方、イオン源においては、磁場配置およびグリッド電極の最適化を図り、最終的に放電電力 $9.2\text{W}$ において最大ビーム電流は $9.2\text{mA}$ が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超小型衛星に軌道遷移の自由度を与え、かつ、運用終了後のデブリ化を防止するためにも、高性能な超小型宇宙推進機が求められている。様々な推進機の候補があるが、既に宇宙での利用実績が豊富なイオン推進機はその候補の一つである。従来の超小型イオン推進機は既存の技術を小型化することでしか対応できていない中、これまでに無い新しい電子源として、低電圧駆動可能で高電流密度が得られるグラフェンを利用した推進剤不要な電子源の利用は、電子放出面の電位がプラズマ電位に近いという従来と異なる領域でのプラズマ生成の探索となり学術的意義のある研究である。

研究成果の概要(英文)：Focusing on neutralizers or electron sources, which are the bottleneck in realizing a highly efficient ion propulsion system that can be installed in nanosatellites, we have attempted to use a propellant-free electron source using graphene, which has never been used in the past. The maximum emitted electron current of  $6.0\text{ mA}$  was achieved at an applied voltage of  $11\text{ V}$  in an electron source consisting of 380 elements with a single electron emission surface of  $100\mu\text{m}$  squared in a  $3\text{ mm}$  square wafer. As a result, the current density was equivalent to that of a conventional small plasma neutralizer, while the electron generation cost was more than one order of magnitude lower than that of a conventional plasma neutralizer. On the other hand, in the ion source, the magnetic field arrangement and grid electrodes were optimized, and finally, a maximum beam current of  $9.2\text{ mA}$  was obtained at a discharge power of  $9.2\text{ W}$ .

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：電気推進 電子源 グラフェン イオン源 超小型衛星

1. 研究開始当初の背景

近年、超小型衛星 (< 50 kg) の打ち上げ基数が爆発的に増えており、それに伴い超小型推進機の需要も高まっている。しかし、従来型推進機を単純に小型化すると表面積割合の増加から性能の劣化が避けられない。

例えば、イオンスラスタは推進剤ガス (Xe 等) を放電室でプラズマ化し、グリッド電極の電位差でイオンをビーム状に静電加速させる。同時に、宇宙機の帯電を防いで推力を得るために電子源 (中和器) による電子放出が行われるが、元来小さい中和器をさらに小さくするのは至難の業である。現状、イオン源と同程度の中和器を用いるしかなく、そのために電力・推進剤流量双方の増加による中和器起因の性能劣化が著しい。

このような中、従来の放電を用いる中和器と異なり、推進剤を必要としない電界放出電子源 (FEC: Field Emission Cathode) についての研究も進められている。最も研究されているのが、カーボンナノチューブ (CNT: Carbon Nano Tube) を用いた FEC であり、さらに、立方晶窒化ホウ素 (cBN: cubic Boron Nitride) を用いたものも近年登場している。

しかし、これら FEC で電子を引き出すには数 100 V から 1 kV 程度以上の高い電位差が必要であり、かつ、従来の中和器で達成する数 10 mA/cm<sup>2</sup> の電流密度と比較して著しく低い 1 mA/cm<sup>2</sup> 程度しか得られない。電位差が高い分電力を消費し、また、その電位差により高エネルギーイオンの衝撃を受けて耐久性が悪化する。さらに、イオン源のプラズマ放電には中和器から電子を引き込んで行う方式もよく用いられるが、電位差が高過ぎると電子が引き込めずイオン源の点火に使えない問題もある。このように、超小型衛星にも搭載可能な推進機の小型化においては、特に電子源がボトルネックとなっており、当該分野の変革が求められている。

2. 研究の目的

本研究が対象とする電子源は従来の電子源とは全く異なるタイプであり、グラフェンを用いた低電圧 (10-20 V) で作動可能な平面型高電流密度電子源である。本電子源は MOS (Metal/Oxide/Semiconductor) 型電子放出デバイスと似た構造をしているが、上部電極にグラフェンを利用し Graphene/Oxide/Semiconductor (GOS) 構造にすることで、電極での電子散乱を抑制することが可能である。MOS 型では電子放出効率が最大でも 1% に達せず、電流を上げると 0.001% 程度まで下がるが、GOS 型になると 2-3 桁高い数% - 10% 程度以上の放出効率が得られる事が分かっている。しかも、数 10 mA/cm<sup>2</sup> 程度の高電流密度も得られている。

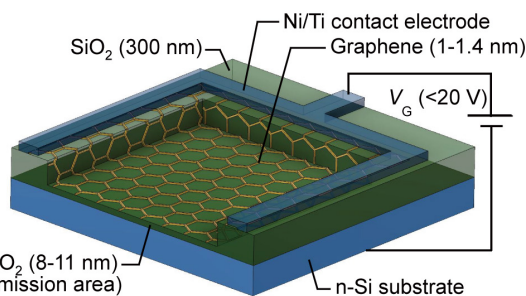


図1 Graphene/SiO<sub>2</sub>/Si 積層平面型電子源の概略図  
Copyright (2020) Elsevier

低電圧で作動可能な事に加え、図1が示すように、電子放出は正にバイアスされたグラフェンの層から行われる特徴がある。従来の中和器では電子引き出し電極に対して負にバイアスした面から電子が引き出されるため、その電位差に応じたエネルギーを持つイオン衝撃が避けられない。つまり、GOS 型電子源では電子放出面の電位構造が従来の中和器と電位構造が反転した構造となっており、イオン衝撃に対する耐久性の向上も期待できる。

本研究では GOS 型電子源の中和器への利用に加えて、イオン源のプラズマ生成への利用も提案する (図2)。GOS 型電子源の場合は、既に正にバイアスされたグラフェン層から電子が放出されることを利用し、プラズマ電位に近い電位から電子放出を行うことでイオン衝撃による電子源の劣化を防ぐ。また、引き出された電子は上流の陽極に向かうが、この損失を抑えるために中心と周囲に永久磁石を配置することで径方向の磁場を生成して電子の損失を抑制する。さらに、従来と反対にイオン引き出しを行うグリッド電極側に電子源を置くことが可能となるため、密度の高いプラズマを得られたそばからグリッド電極によるイオン引き出しが期待でき、小型でも推進剤利用効率の向上が期待できる。これらの特徴を活かし、本研究では、GOS 型電子源をイオン源のプラズマ生成に利用することで、新しい電位構造を持つ超小型イオン推進機の実現を目的とする。

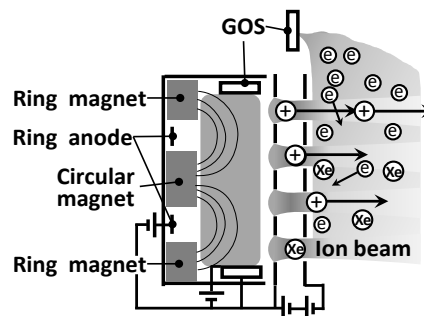


図2 本研究で提案する超小型イオン推進機概念図

### 3. 研究の方法

#### (1) GOS 型電子源の作製

図3にグラフェンを用いた GOS 型電子源の作製プロセスを示す。まず、(a)酸化膜付 Si ウェハをエッチングし、(b)電子放出面となる部分を作製する。その後、(c)熱酸化膜を成膜し、(d)グラフェン層をCVDで成膜する。(e)不要な部分のグラフェンをアッシングし、(f)グラフェンに電圧印加するための電極を作製する。なお、1つの放出面は数 10-100  $\mu\text{m}$  角程度となる。

#### (2) イオン源の作製

所望の GOS 型電子源実現を目指して作製を進めることと並行して、イオン源側の作製も進める。この段階では、従来のフィラメント熱電子源を利用して進め、イオン源の最適化後に GOS 型電子源の利用へと変更を行う。

また、小さい放電室に対して、実験だけで内部現象の解析を行うのは難しいため、既に小型マイクロ波放電式イオンスラスタにて解析実績のあるプラズマ粒子計算 (PIC: Particle-in-Cell) による数値解析も行い放電特性を把握する。

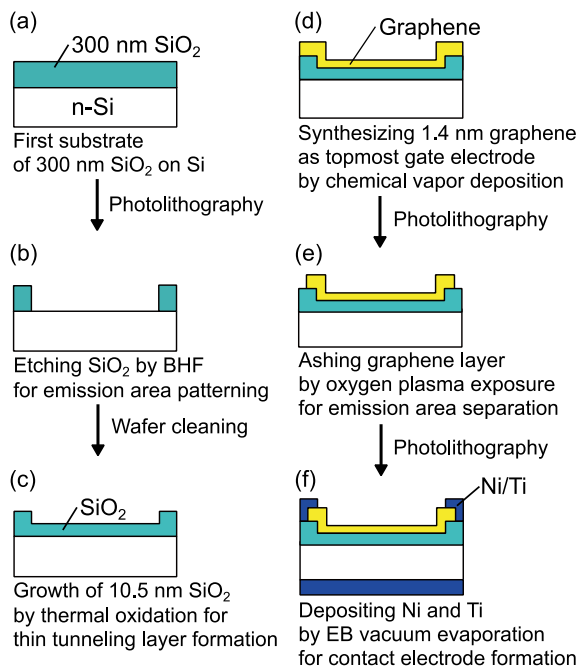


図3 GOS 型電子源の作製プロセス Copyright (2020) Elsevier

### 4. 研究成果

#### (1) GOS 型電子源の性能評価

図4に作製した GOS 型電子源の性能評価を行う実験セットアップ図を示す。GOS 型電子源から放出された電子をコレクタ電極で捕集し、放出電流や全電流に対するその割合から電子放出効率を求める。

面積の小さい1つの放出面からの電流量は小さいため、アレイ化することで、高電流密度という特性を生かしたまま電流量増大を目指した。放出面のサイズおよび配線のレイアウトを最適化した結果、一つの放出面が 100  $\mu\text{m}$  角となる素子を 3

mm 角ウェハ内に 380 個配置した電子源において、11 V の印加電圧で最大放出電子電流として 6.0 mA (67 mA/cm<sup>2</sup>) に到達した。これは、CNT 電子源より 2 桁電流密度は高く、かつ、小型のプラズマ中和器と同程度の電流密度となる一方、電子生成コストとしては 1 桁以上小さい非常に高性能な中和器を実現できた。

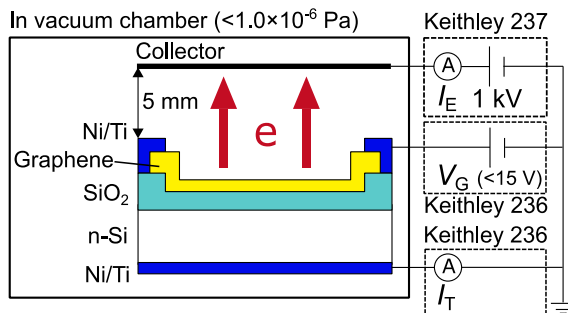


図4 GOS 型電子源の性能評価用実験セットアップ Copyright (2020) Elsevier

#### (2) イオン源の性能評価

一方、イオン源の作製に当たっては、前述の通りフィラメント熱電子源をイオン引き出しグリッド電極の近い側に配置した(図5)。磁場設計を踏まえた永久磁石配置による放電室とイオン引き出しのためのグリッド電極を作製し、静電プローブ診断およびイオンビーム引き出し実験を行い、PIC 計算結果との比較を行った。これらの結果を比較しながら、磁場配置の改良およびグリッド電極の最適化等を進めた結果、最終的に、放電電力 9.2 W において、最大ビーム電流は 9.2 mA が得られた。

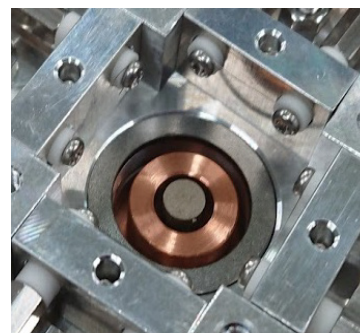


図5 小型イオン推進機の放電室

#### (3) 今後の課題

GOS 型電子源を放電室へ導入するにはプラズマへの耐性を高めるため電子透過性を損なわない保護膜が必要となることが明らかになった。現状、グラフェンの保護は実現できており、これを GOS 型電子源としても実現させることで、イオン推進機への GOS 型電子源の適用を目指す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 鷹尾 祥典	4. 巻 90
2. 論文標題 次世代宇宙産業を担う超小型衛星に不可欠なマイクロスラスタ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 298 ~ 302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.90.5_298	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 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 213501-1 ~ 5
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	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 -

[学会発表] 計22件(うち招待講演 2件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Naoyuki Matsumoto, Yoshinori Takao, Masayoshi Nagao, and Katsuhisa Murakami
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 The 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuhisa Murakami, Naoyuki Matsumoto, Yukino Kameda, Yoshinori Takao, Yoichiro Neo, Yoichi Yamada, Kazutaka Mitsuishi, Masahiro Sasaki, Hidenori Mimura, and Masayoshi Nagao
2. 発表標題 Planar type electron emission device using atomic layered materials and it applications
3. 学会等名 The 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (招待講演) (国際学会)
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 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 <sub>2</sub> /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 Naoyuki Matsumoto, Yoshinori Takao, Masayoshi Nagao, and 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 (国際学会)
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 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及びその評価技術」
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 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 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 森悠太郎, 鷹尾祥典
2. 発表標題 電位構造を反転した小型直流放電式イオンスラストの作動特性
3. 学会等名 令和2年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

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 Ryo Furuya, Katsuhisa Murakami, Masayoshi Nagao, and Yoshinori 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 (国際学会)
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 小型イオンエンジン用Graphene/SiO <sub>2</sub> /Si積層型mA級平面電子源の開発
3. 学会等名 電子デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 悠太郎, 鷹尾 祥典
2. 発表標題 超小型直流放電式イオンスラストの放電特性に対する放電室構造の影響
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
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 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 <sub>2</sub> /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
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 <sub>2</sub> /Si積層平面型電子源の大電流化
3. 学会等名 2019年 日本表面真空学会 学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Furuya, Katsuhisa Murakami, Masayoshi Nagao, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Improvement of Electron Emission Efficiency of Graphene-Oxide-Semiconductor Planar-Type Electron Sources for Nanosatellite Neutralizers
3. 学会等名 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Katsuhisa Murakami, Joji Miyaji, Ryo Furuya, Manabu Adachi, Masayoshi Nagao, Yoshihiro Nemoto, Masaki Takeguchi, Yoichiro Neo, Yoshinori Takao, Yoichi Yamada, Masahiro Sasaki, and Hidenori Mimura
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 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 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電子電流向上
3. 学会等名 平成30年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上勝久
2. 発表標題 低真空・液体中でも動作する超高効率グラフェン平面電子源
3. 学会等名 2019年Cupalシンポジウム、第16回 真空ナノエレクトロニクスシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鷹尾祥典
2. 発表標題 超小型宇宙推進機が求めるイオン源と電子源
3. 学会等名 2019年Cupalシンポジウム、第16回 真空ナノエレクトロニクスシンポジウム
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 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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://www.takao-lab.ynu.ac.jp/">http://www.takao-lab.ynu.ac.jp/</a>
---

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	村上 勝久  (Murakami Katsuhisa)  (20403123)	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    (82626)	

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