

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04595

研究課題名（和文）ダイヤモンド半導体を用いたパッシブな宇宙用電子放出源の実現可能性評価

研究課題名（英文）Feasibility Study on Electron Emission Device using Diamond Semiconductors for Space Applications

研究代表者

大川 恭志（Ohkawa, Yasushi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号：20415920

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、宇宙ごみ（スペースデブリ）問題の解決に資することを将来のゴールとして、ダイヤモンド半導体を利用した電子放出源の実現可能性検討を行った。主な成果として、先行研究で示された低温でのダイヤモンド半導体からの熱電子放出現象が再現されるとともに、地球周辺の低軌道環境に多く存在する原子状酸素環境によって、この熱電子放出特性がどのように変化するかが明らかになった。これらの成果は、ダイヤモンド半導体の宇宙応用を進めるための重要な基盤となり、今後のスペースデブリ低減活動に貢献するものと期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の主な適用先は、宇宙ごみを除去するための推進装置である。エレクトロダイナミックテザーと呼ばれる地球磁場を利用したユニークな推進機や、近年多く利用されるようになってきた電気推進機では、何らかの電子放出装置が必要となる。ダイヤモンド半導体の適用によりこれらの電子放出源を簡素化できれば、より効率的な推進システムの構築が可能となり、人類共通の課題となりつつある宇宙ごみ問題解決への一助となる。

また、ダイヤモンド半導体の宇宙用電子放出源への応用は初の試みであり、地球低軌道環境がその電子放出特性に与える影響も初めて評価された。

研究成果の概要（英文）：Feasibility of electron emission devices using diamond semiconductors for space was investigated aiming at the future application to space debris mitigation technologies. The first major result is that the thermionic electron emission from the diamond semiconductor at low temperature, which was reported in previous studies, was reproduced using a simple heating system. It was also shown that how the low-work-function state degrades by atomic oxygen in the low Earth orbit environment. These results are an important bases for future space applications of diamond semiconductors.

研究分野：電気や電磁気等を利用した宇宙推進工学

キーワード：宇宙ごみ（スペースデブリ） 宇宙推進 エレクトロダイナミックテザー ダイヤモンド半導体 電子放出

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙ごみ(スペースデブリ)の増加が大きな問題になりつつある。この問題を解決するためには、デブリ(あるいはデブリになる前の宇宙機)を混雑軌道から効率良く取り除くための推進機の実現が重要なカギとなる。その候補の一つが、エレクトロダイナミックテザー(EDT)と呼ばれる、地球磁場を利用したユニークな推進機である。EDTには宇宙空間に電子を放出する装置が必要となるが、デブリ除去システム全体を簡素化するために、この電子放出源もなるべく簡素でパッシブなものにしたい、というのが、本研究の主要な動機である。デブリ除去システムの簡素化は、持続可能な低コストデブリ除去活動の実現に繋がる。

電子放出源の思い切った簡素化のためには、これまで宇宙用に使われていない新たな材料を使用する必要があると考え、本研究では、研究分担者らが長年研究してきたダイヤモンド半導体に着目した。ダイヤモンド半導体は、その成膜手法や終端処理方法によって、負の電子親和性(Negative Electron Affinity: NEA)を持ち、低仕事関数となることが知られている。NEA状態のダイヤモンド半導体では、熱電子放出、電界電子放出、光電子放出、ダイオード電子放出等の各種の電子放出に必要なエネルギーレベルが低くなる。

2. 研究の目的

スペースデブリ問題の解決に資することを将来のゴールとして、ユニークな宇宙推進系であるEDTに適用可能な電子放出源の簡素化を目指す。より具体的には、ダイヤモンド半導体を電子放出材料として利用することにより、既存のものと比較して大幅に簡素化された宇宙用電子放出源の実現可能性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の主な流れを以下に示す。各項目を往き来することにより、徐々に研究のステップを上げていった。

- (1) 宇宙用電子放出材料への適用を目指したダイヤモンド半導体の成膜手法等を検討・選択し、主に熱電子放出源として使用することを想定したサンプルの試作を行う。
- (2) 地球周回低軌道においてダイヤモンド半導体がどの程度の熱平衡温度に達するかを、熱光学特性の測定等により推定し、熱電子放出現象への寄与度を評価する。
- (3) 試作したダイヤモンド半導体サンプルの熱電子放出特性を取得する。
- (4) 地球低軌道に多く存在する原子状酸素(AO)がダイヤモンド半導体に与える影響を、AO照射試験等により評価する。
- (5) 上記の各項目を踏まえて、宇宙用電子放出源としてのダイヤモンド半導体利用の可能性を検討する。

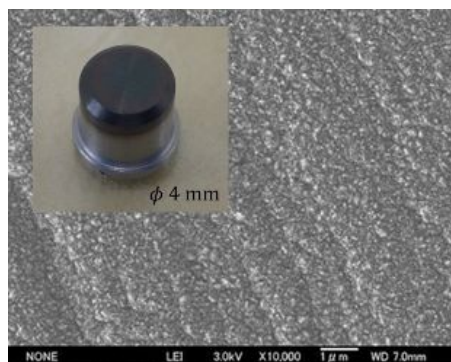
4. 研究成果

前項で示したそれぞれの研究項目について、得られた主な成果を以下に示す。

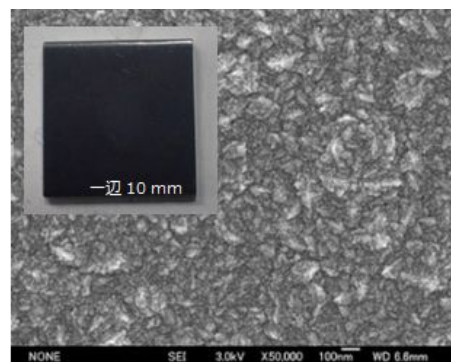
(1) ダイヤモンド半導体の選択とサンプル試作

ダイヤモンド半導体を宇宙用電子放出材料として用いる場合、冒頭に示した様々な電子放出現象を利用できる可能性があるが、本研究では、宇宙空間において軌道上物体が高温で熱平衡状態になる可能性を考慮して、特に熱電子放出に着目した。研究分担者らによる先行研究において、リンをドーピングしたN型半導体タイプのナノ結晶ダイヤモンドに水素終端化処理を施すことにより、仕事関数が2.3eV程度まで低下することが報告されており、本研究においても、同等の仕様を選択した。

電子放出試験用の治具に合わせて、主に2タイプのダイヤモンド半導体サンプルを試作した。一つは直径4mmのモリブデン円柱の端面にダイヤモンド半導体を成膜したものであり、もう一方は、一辺が約10mmのモリブデン基板の上面に同様の成膜をしたサンプルである(図1)。両



(a) 円柱形状基板



(b) 板形状基板

図1 試作したダイヤモンド半導体サンプル

者の SEM 観察等の結果から、本研究用の基板に対しても、先行研究と同等のナノ結晶ダイヤモンドの成膜が可能なが確認された。

(2) 地球周回低軌道での熱平衡温度の推定

宇宙空間に浮遊する物体の熱平衡温度は、自身からの発熱が無い場合、物体表面の太陽光吸収率と赤外放射率との比によってほぼ決まる。仮にこの温度が使用材料の熱電子放出開始温度よりも高ければ、その材料が軌道上にあるだけで熱電子放出することになる。

図 1(b)と同等のサンプル表面の太陽光吸収率と垂直赤外放射率を測定した結果、それぞれ約 0.9 と 0.5 であった。この測定結果をもとに、地球からの輻射等の影響は考慮しない単純化した入射エネルギーを用いて熱平衡温度を見積もると、およそ 110 となった。

上記より、今回試作したダイヤモンド半導体単体では、軌道上で期待される熱平衡温度はかなり低く、熱電子放出に寄与するためには、より高温になりやすい材料表面との組合せが必要であることが分かった。例えば、今回のサンプルで基板材料として使用したモリブデンは、その表面状態によっては、同条件での熱平衡温度が 350 程度になると推定されるため、基板上のダイヤモンド成膜領域を狭くするなどして、基板全体を高温化することは可能と考えられる。

(3) ダイヤモンド半導体の熱電子放出特性

図 1 に示したダイヤモンド半導体に対して、各種条件にて、その熱電子放出特性取得を繰り返し実施した。その代表例として、図 1(b)のサンプルの熱電子放出特性を図 2 に示す。同図には、先行研究を参考に有効 Richardson 定数を仮定した場合の Richardson-Dushman 式によるフィッティング結果も合わせて示した。同図より、マクロなレベルで見ても約 560 という低温域で熱電子放出が開始されていることが分かる。また、理論式フィッティングにより推定される仕事関数は約 2.4 eV であり、先行研究と同等の NEA 状態が再現されたことを確認できた。

また別の知見として、高温域までの加熱を繰り返すと熱電子放出特性が劣化すること、および、特性劣化したサンプルであっても、再水素終端化処理を行うことにより、特性が回復することも確認された。その一例を図 3 に示す。昇温回数が増えるほど電子放出電流が低下していることから、ダイヤモンド半導体が(このケースでは)730~750 程度になることで、末端水素が脱離し、NEA 状態が徐々に破壊されたと考えられる。一方、劣化後のサンプルを再水素終端化することで特性が初期状態程度に回復していることから、高温となってもナノ結晶ダイヤモンドの構造自体に影響は無く、水素末端状態 (NEA 状態) が回復されれば、電子放出特性も回復する事が示された。また、放出電流の小さい低温域 (600 以下) であれば、昇温を繰り返しても特性劣化は小さいことも別途確認された。

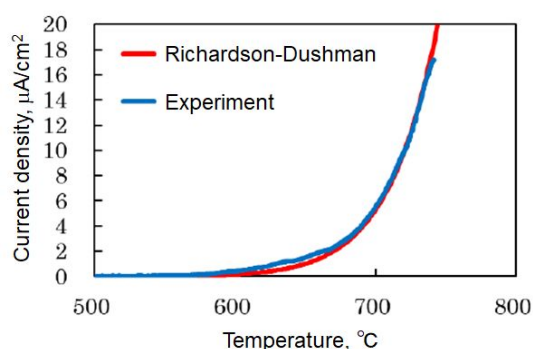


図 2 ダイヤモンド半導体の熱電子放出特性

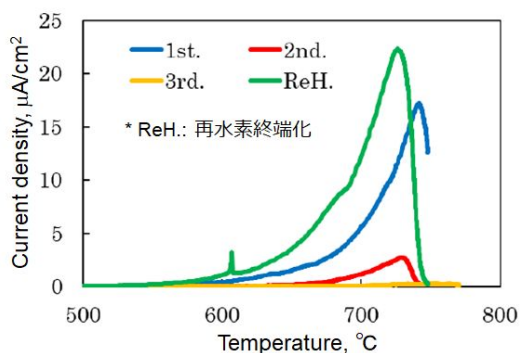


図 3 昇温の繰り返しおよび再水素終端化による熱電子放出特性の変化

(4) 地球低軌道上の原子状酸素の影響

EDT の利用が想定される地球低軌道には、活性な原子状酸素 (Atomic Oxygen: AO) が多く存在し、軌道速度に近い 8 km/s 程度の速さで軌道上物体に衝突する。AO は様々な材料に影響を与えることが知られており、ダイヤモンド半導体についても、その影響評価が必要である。

本研究では、研究分担者が所有する AO 照射試験装置を利用して、ダイヤモンド半導体サンプルに対して、約 1×10^{20} /cm² フルエンスの AO を軌道上と同等の速度で照射し、その熱電子放出特性への影響を評価した。この照射量は、高度 600km 程度の低軌道における数年間の曝露に相当する。この AO 照射試験の手法は、本研究と前後して宇宙実証実験が行われたカーボンナノチューブ電子源の事前評価および軌道上データ評価にも活用された。

図 4 に、AO 未照射サンプル、正面から AO 照射したサンプル、背面から AO 照射したサンプル、の 3 種のダイヤモンド半導体の熱電子放出特性を比較した結果を示す。実験装置の不具合により、(特に背面 AO 照射サンプルについては途中までしか昇温できず) 不完全な試験結果となったが、同図からは、正面から AO 照射を受けた場合には熱電子放出特性が大きく劣化するのに対し、AO 雰囲気中にはあっても正面から高エネルギーで衝突を受けない場合には、未照射サンプルと比較して特性の劣化がほぼ無かったことが確認できる。この結果は、宇宙機上での機器配置によ

っては、AO が多く存在する地球低軌道環境においてもダイヤモンド半導体表面の水素終端状態が維持される可能性を示しており、今後のダイヤモンド半導体の宇宙応用を考える上で、重要な知見である。

また、当初想定していなかった AO 照射の効果として、ダイヤモンド半導体の表面形状の変化がある。今回試作されたダイヤモンド半導体は SP3 ダイヤモンドのナノ結晶構造を持つが、その結晶間には SP2 炭素が存在する。走査型プローブ顕微鏡による観察の結果、AO 照射によって SP2 炭素がエッチングされ、ナノ結晶ダイヤモンドが浮き彫り状になる可能性が示された。この形状変化(先鋭化)による電界電子放出への影響等はまだ確認できていないが、今後、成膜条件や AO 照射条件を工夫することにより、その効果の発現が期待される。また今回の結果から、地球低軌道の AO 環境を材料表面加工に応用するという新しい可能性も示された。

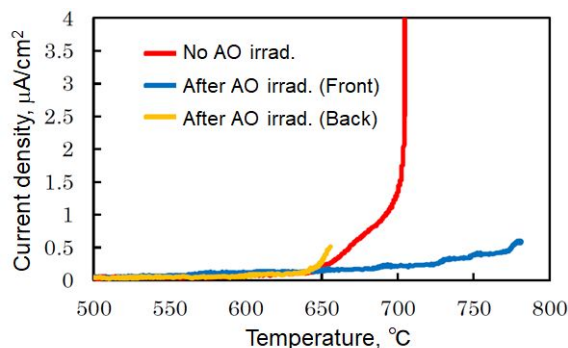


図 4 原子状酸素照射による熱電子放出特性への影響

(5) 宇宙用電子放出源としての実現可能性

軌道上での熱平衡温度の見積結果と熱電子放出特性の測定結果から、完全にパッシブな状態では、軌道上でのダイヤモンド半導体からの熱電子放出は困難なことが分かった。一方、基板の材料や面積配分の工夫等により、日照条件での熱平衡温度を 350 程度にできる可能性があるため、小さな投入電力での熱電子放出が期待できる。

地球低軌道に存在する AO の影響については、特に正面から軌道速度で AO が衝突した場合にはダイヤモンド半導体の熱電子放出特性が大きく劣化したが、高エネルギー衝突を伴わない場合には顕著な劣化が見られなかった。今後の検証が必要ではあるものの、この結果から、地球低軌道上でダイヤモンド半導体電子放出源を使用できる可能性が示されたと言える。

また、過度の昇温によるダイヤモンド半導体表面からの水素脱離という課題も示された一方、軌道上で再水素終端化するシステムを構築できれば、NEA 状態の再生を繰り返しながら、電子放出源としてダイヤモンド半導体を長期間利用できると可能性も示された。水素吸蔵金属の応用などが考えられるが、詳細化には今後の検討を要する。

以上より、ダイヤモンド半導体を宇宙用電子放出源として利用できる可能性とそれを実現するための指針が得られた。今後、熱電子以外の電子放出現象等も含めて検討を深めることにより、スペースデブリ低減に貢献する電子放出源技術の獲得が期待される。

<引用文献>

D. Takeuchi et al., Photoelectron emission from diamond, Phys. Status Solidi A203, pp. 3100-3106, 2006.

H. Kato, et al., Heavily phosphorus-doped nano-crystalline diamond electrode for thermionic emission application, Diam. Relat. Mater. 63, pp. 165-168, 2016.

恒川尚輝、他、ダイヤモンド半導体を用いた宇宙用電子放出源の実現可能性検討宇科連、第 61 回宇宙科学技術連合講演会、P60、2017.

恒川尚輝、他、ダイヤモンド半導体の宇宙用電子放出源への適用可能性評価、平成 30 年度宇宙輸送シンポジウム、STEP-2018-018、2019.

K. Yokota, et al., Laser-detonation beam facilities for sub-LEO material erosion studies, 13th Int'l Symp. on Materials in the Space Environment, Pau, France, 2015.

Y. Ohkawa, et al., Operation of a carbon nanotube field-emission cathode in low Earth orbit, J. Vacuum Sci. Tech. B, 022203, 2019.

深見侑希、他、低地球軌道上におけるカーボンナノチューブ電子放出源の性能変化について、第 16 回宇宙環境シンポジウム、2019.

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 0件）

1. 著者名 Yamamoto Naoji, Morita Taichi, Ohkawa Yasushi, Nakano Masakatsu, Funaki Ikkoh	4. 巻 35
2. 論文標題 Ion Thruster Operation with Carbon Nanotube Field Emission Cathode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 490 ~ 493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B37214	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 Ohkawa Yasushi, Okumura Teppei, Kawamoto Satomi, Kobayashi Yuki	4. 巻 47
2. 論文標題 Charging Behavior of the H-II Transfer Vehicle by Active Electron Emission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 3852 ~ 3857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2019.2915819	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 Ohkawa Yasushi, Okumura Teppei, Iki Kentaro, Okamoto Hiroyuki, Kawamoto Satomi	4. 巻 37
2. 論文標題 Operation of a carbon nanotube field-emission cathode in low Earth orbit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science & Technology B	6. 最初と最後の頁 022203 ~ 022203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/1.5067299	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 Yasushi OHKAWA, Teppei OKUMURA, Yuuta HORIKAWA, Yoshiyuki MIURA, Satomi KAWAMOTO, Koichi INOUE	4. 巻 16
2. 論文標題 Field Emission Cathodes for an Electrodynamics Tether Experiment on the H-II Transfer Vehicle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN	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) 10.2322/tastj.16.63	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Ohkawa Yasushi, Okumura Teppei, Horikawa Yuuta, Miura Yoshiyuki, Kawamoto Satomi, Inoue Koichi
2. 発表標題 Results of Field-Emission Cathode Operation on the H-II Transfer Vehicle
3. 学会等名 69th International Astronautical Congress (IAC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 恒川 尚輝、大川 恭志、加藤 宙光、山極 芳樹
2. 発表標題 ダイヤモンド半導体の宇宙用電子放出源への適用可能性評価
3. 学会等名 平成30年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamamoto Naoji, Adachi Misaki, Ikeda Ryo, Takesue Ippei, Morita Taichi, Nakano Masakatsu, Ohkawa Yasushi, Funaki Ikkoh
2. 発表標題 Research and Development Status of a Miniature Ion Engine
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深見 侑希、大川 恭志、河本 聡美、横田 久美子、田川 雅人
2. 発表標題 低地球軌道上におけるカーボンナノチューブ電子放出源の性能変化について
3. 学会等名 第16回宇宙環境シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Ohkawa, Kentaro Iki, Teppei Okumura, Satomi Kawamoto, Yuuta Horikawa, Koichi Inoue, Yuki Kobayashi, Takashi Uchiyama, Toru Kasai
2. 発表標題 A Quick Review of an Electrodynamic Tether Experiment on the H-II Transfer Vehicle
3. 学会等名 35th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大川恭志, 奥村哲平
2. 発表標題 カーボンナノチューブカソード研究開発の現状
3. 学会等名 第61回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 恒川尚輝, 大川恭志, 加藤宙光, 山極芳樹
2. 発表標題 ダイヤモンド半導体を用いた宇宙用電子放出源の実現可能性検討
3. 学会等名 第61回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiromitsu Kato, Takatoshi Yamada, Yasushi Ohkawa, Masahiko Ogura, Toshiharu Makino, Satoshi Yamasaki
2. 発表標題 Structural characterization and emission properties of phosphorus-doped NCD films
3. 学会等名 The 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasushi Ohkawa, Teppei Okumura, Kentaro Iki, Hiroyuki Okamoto, Satomi Kawamoto
2. 発表標題 Operation of a Carbon Nanotube Field-Emission Cathode in Low Earth Orbit
3. 学会等名 The 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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	加藤 宙光 (Kato Hiromitsu) (00415655)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	田川 雅人 (Tagawa Masahito) (10216806)	神戸大学・工学研究科・准教授 (14501)	
連携研究者	竹内 大輔 (Takeuchi Daisuke) (10357402)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・総括研究主幹 (82626)	
連携研究者	河本 聡美 (Kawamoto Satomi) (90358523)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究領域主幹 (82645)	