

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630444

研究課題名(和文)立方晶窒化ホウ素を材料に用いた電界放出型電子源の性能評価

研究課題名(英文) Investigation of cubic boron nitride field emission cathode

研究代表者

山本 直嗣 (Yamamoto, Naoji)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：40380711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：テザー推進やイオンエンジンの中和器として、立方晶窒化ホウ素(cBN)をエミッタ材料とした電界放出型カソードを開発した。電極形状やcBN薄膜の特性を変化させて性能向上を目指したところ、最大引き出し電流として107マイクロアンペアの電流の引き出しに成功し、当初の目標値を達成できた。さらに耐原子状酸素性の検証を九州工業大学宇宙環境技術ラボトリーの原子状酸素環境・耐宇宙環境性能評価装置において行ったところ、 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ のフルーエンスでは原子状酸素による引き出し性能の低下は見られず、また電子顕微鏡による観察およびエネルギー分散型X線分光法においても特段の変化も見られなかった。

研究成果の概要(英文)：As an electron source of an Electro dynamic tether system and ion engine system, a field emission cathode with cubic boron nitride (cBN) thin layer have been developed. The maximum extracted current is 107 micro A; the current density is 0.55 mA/cm. The influence of atomic oxygen on extracted performance was investigated at atomic oxygen injection test was conducted Atomic oxygen durability test facility in Kyushu institute of technology. The result showed that Field emission cathode with cBN has atomic oxygen tolerance.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：推進・エンジン 電子源 電界放出型カソード 立方晶窒化ホウ素

1. 研究開始当初の背景

衛星がひしめき合う軌道から寿命を終えた人工衛星やデブリを降下させるには、莫大なエネルギーと燃料が必要であるため、従来型の推進系では実現困難であった。この問題を解決するブレークスルーとして注目されているのが、「導電性テザー」である[参考文献 1]。テザーとは“ひも”のことで、宇宙機から伸展された導電性のテザーに電流が流れると、地磁場との干渉でテザーにローレンツ力が発生し(図1),そのローレンツ力によって、宇宙機を加減速させる。特徴として、燃料や大きな電力を使うことなく軌道変換が可能であり、また、従来型の推進系に比べるとデブリに取り付けるのも比較的容易であることから、様々な研究機関で研究開発が進められている。この推進システムの鍵を握るのが、電子を放出するエミッタと呼ばれる電子源である。この電子源は小惑星探査機「はやぶさ」で主推進機として活躍したイオンエンジンにおいてもカソード(中和器)として必要不可欠な部品である[参考文献 2]。宇宙航空研究開発機構の研究開発本部においても、小型軽量の電子エミッタとして、電界放出型カソードに関する研究が進められている。特にカーボンナノチューブ(CNT)を用いたエミッタの開発をしており(図2参照),優れた耐久性と引き出し能力を示している[参考文献 3]。

しかしながら、低軌道のミッションを考えた場合、軌道上には原子状酸素が存在する。原子状酸素はCNTカソードの寿命を短くするため、このような軌道での実用化のためには、より酸素耐性の高いエミッタ材料の開発に期待が寄せられている。またイオンエンジンと共に作動する際には、イオンエンジンから漏れ出す中性粒子の影響で寿命が短くなることが懸念されており、中性粒子の影響も受けにくいエミッタ材料の開発も求められている。

一方、ワイドギャップ半導体は低仕事関数を示すことから、電子放出が比較的容易であり、電界放出デバイスの冷陰極材料としても期待されている。ワイドギャップ半導体のなかで最も大きいバンドギャップを有し、高温での耐酸化性に優れているのが、立方晶窒化ホウ素(cBN)である。従来cBNは結晶性が悪いうえ剥離しやすく、cBN膜を用いたエミッタの電子放出能力は低かった。しかしながら、九州大学の堤井准教授らは、他に類似がない独自の成膜手法を用いることにより、結晶性が向上し、剥離しにくいcBN膜の作製に成功し、電子引き出し実験を行なった結果、 $0.1 \text{ mA/cm}^2$ という大電流密度の引き出しに成功した[参考文献 4]。このcBN膜は図3に示すように連続体であり、CNTのように細すぎるためジュール熱によって構造が破壊され引き出し性能が劣化するという可能性は低く、CNTよりも長寿命が期待できる。



図1 テザー推進概略図

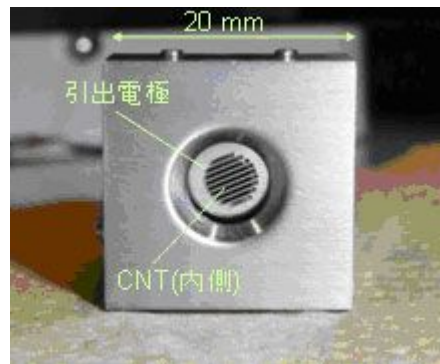


図2 電界放出型カソードの外観

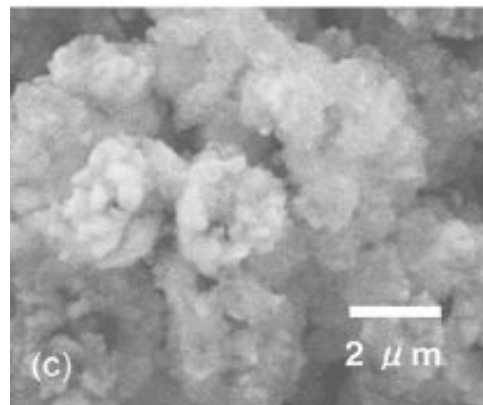


図3 自己組織化したcBN薄膜SEM画像

出展:Kungen Teii, et al.: J. Appl. Phys. 106, 113706 (2009)

2. 研究の目的

作動ガスが不要で、高効率かつ長寿命であり、また、低軌道の原子状酸素が存在する環境でも劣化が少ないと期待される立方晶窒化ホウ素(cBN)をエミッタ材料とした電界放出型カソードを開発する。目標として  $0.5 \text{ mA/cm}^2$  の引き出しが可能なものを開発し、実用化に向けて必要不可欠な耐原子状酸素性や耐久性の検証を行う。電子源として実用

化するためには、0.5 mA/cm<sup>2</sup> と現在の 5 倍の電流密度の引き出し能力が要求される。そこで従来の平坦シリコン基板だけでなく、基板形状も変更し、これに高品質の cBN 薄膜を成長させて、引き出し電流密度の増加を目指す。

これと並行して、CNT とは異なり連続体であるという cBN 薄膜の特徴を生かした引き出し電極形状を模索する。最適な電極形状を持つカソードを試作し、その電子放出能力や耐酸素性を測定し、さらに宇宙環境を模擬した環境下において cBN チップアレイカソードの耐久性を評価し、実用化に十分な 1500 時間以上の寿命を確認する。その成果をもとに cBN カソードを用いたシステム全体のフィジビリティスタディを行う。

十分な成果が得られた後に、大学が開発する小型人工衛星にテザーシステム/小型エンジンシステムを搭載し、宇宙空間でのデモを行い、宇宙実績を積むことが本課題のゴールである。

### 3. 研究の方法

図 4 に作成した FEC の外観を示す。この FEC は cBN が製膜されたエミッタ、マスク電極、ゲート電極、シールドから成り、ゲート電極は円筒形のアルミナによりエミッタと絶縁されている。シールドは外形 44[mm]の円柱型で中心に直径 7[mm]の電子放出穴がある。ゲート電極とマスク電極は図 5 のような直径が 0.4[mm]の孔が 91 個ある形状であり、

放出面積は  $1.14 \times 10^{-5} [m^2]$  となる。それぞれの諸パラメータは表 1 に示す。ゲート-マスクグリッド間距離は可変であるが今回は 100[μm]に設定した。よって薄膜とゲート電極の距離は 150[μm]となっている。

作成した FEC の電界放出性能を評価する為に図 6 の回路図で実験を行った。cBN エミッタが接続されているベース、マスク電極およびシールドを接地し、ゲートに 5[kV]まで印加可能な高圧電源を接続する。アノードは放出電子を収集する為に 30[V]を印加し、FEC とアノードの間隔は 50[mm]に設定した。実験ではゲート電圧の制御により印加電界の調節を行った。アノードで収集された電子により流れる電流は I-V 変換回路により、電圧に変換して計測している。

原子状酸素 (Atomic oxygen, AO) 耐性を調査するために、九州工業大学の宇宙環境技術ラボラトリーが所有する AO 照射チャンバーで行った。AO はレーザーデトネーション法により、生成される。チャンバー内のノズルから酸素ガスをパルスレーザーと同期して導入し、そこにおよそ 3[Hz]の CO<sub>2</sub> ガスパルスレーザーを照射することで、O<sub>2</sub> エネルギーを与えて原子状に解離させる方法である。AO 照射量の計測は QCM(Quartz Crystal

Microbalance)センサーで行う。この QCM の水晶板には予めポリイミドがコーティングされており、照射に伴うポリイミドの減少量から算出している。AO 速度の計測にはフォトダイオードと QMASS を用いて計測している。ノズル部で O<sub>2</sub> にレーザーを照射すると酸素プラズマが発生し、同時に紫外線が発生する。この光が発生する時間と、下流に設置している QMASS での AO 検出時間との差  $t$  と、ノズルから QMASS までの距離  $l$  から算出した。

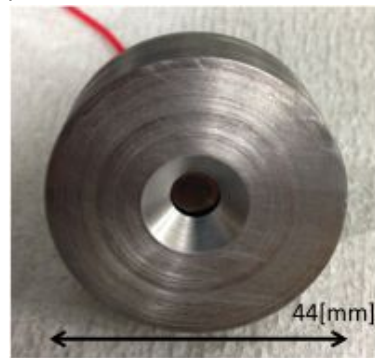


図 4 FEC の外観

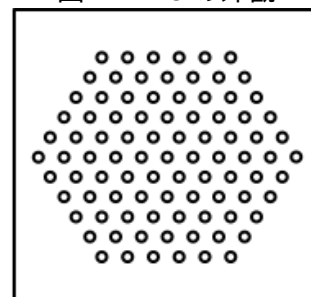


図 5 マスク、ゲート電極の構造

表 1 電極パラメータ

	マスク電極	ゲート電極
厚さ[μm]	50	50
孔径[mm]	0.4	0.4
孔数	91	91

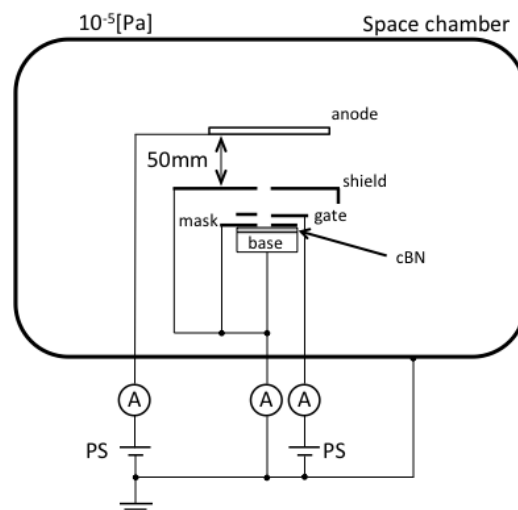


図 6 実験回路図

さらに、改良版の電子源の構造の概略図を図 7 に示す。cBN 薄膜が製膜されたシリコン基板の上に、マスク電極、ポリイミドで作成した電気的な絶縁をするためのインシュレータ、ゲート電極、電極固定用の厚さ 1mm のセラミックの板を重ね、ネジで固定する構造となっている。図 8 に図 4 での電極(電極 A)と図 8 の電極(電極 B)を示す。電極はどちらもモリブデン製である。図 4 の電極の端で電極を支えていたのに対して、図 8 の電子源では電極をインシュレータの中央部にある 4 つの穴の縁で電極を支えることができるようにした。それにより支持部の距離が短くなり、撓みにくい構造となった。また、マスク電極の厚さを 20  $\mu\text{m}$  から 50  $\mu\text{m}$  に変更して撓みにくくした。Computer Aided Engineering (Autodesk Inventor, Autodesk, Inc) によって計算したたわみを図 3 に示す。改良前の最大変位量は 0.13 mm であったのが、改良後は 0.043 mm と約 1/3 になっていることが分かる。

ゲート電極とマスク電極の間に挟むインシュレータに関しては、以前は電極間にリング状のマイカを挟むだけであったが、インシュレータも電極と共にネジで固定できるようにした。これらの変更により、電極の穴部分の面積が小さくなったため引き出せる電流値は下がると予想されるが、電極が撓みにくくなり、異常放電を抑えることができると考えられる。

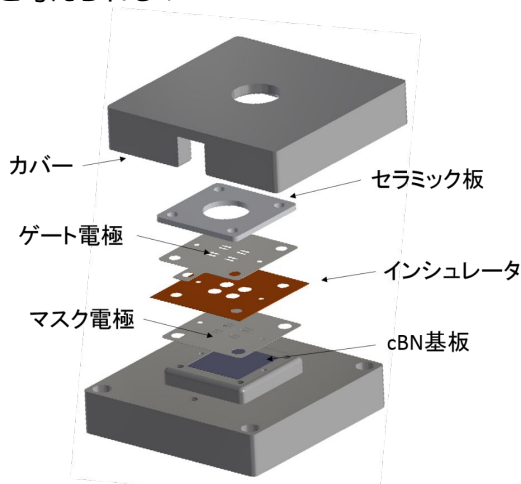


図 7 改良版 FEC の構造の概略図

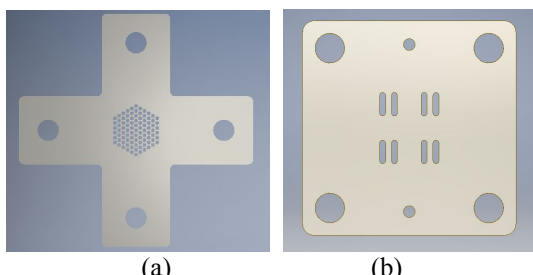


図 8 電極形状, (a)電極 A(b)電極 B

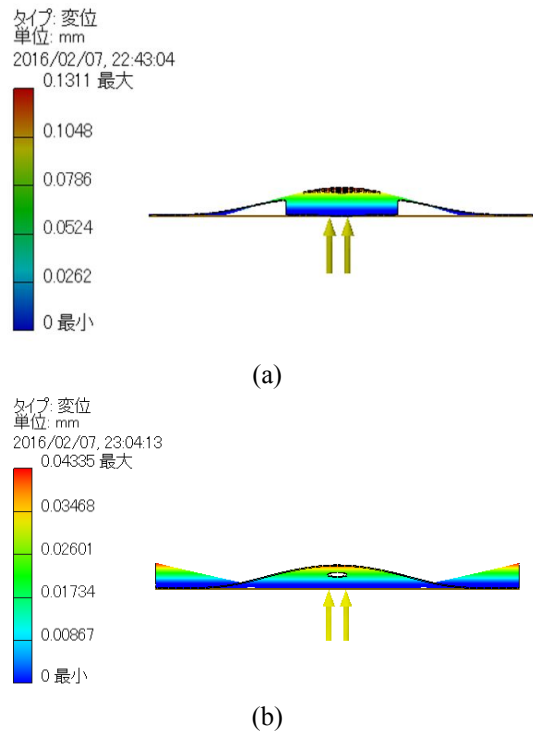


図 9 電極の撓み,(a)電極 A(b)電極 B

実験は国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所内のスペースサイエンスチャンバにおいて行った。真空環境としては  $1 \times 10^{-5} \text{Pa}$  以下の真空度で実験を行った。

#### 4. 研究成果

研究協力者の堤井准教授に作製していただいた高品質立方晶窒化ホウ素薄膜を用いた電界放出型電子源で、性能を評価した。

図 10 に今回用いた中で最も性能がよかった薄膜の引き出し実験後の SEM 画像を示す。cBN 存在比が高く、また島構造が見られる。

図 11 に存在比がちがう薄膜からの引き出し電流値を示すが、cBN 存在比が 0 の薄膜からの引き出しはなく、また存在比が最も高い薄膜からの引き出しが大きく、最大でゲート電圧 3.4 kV において、107  $\mu\text{A}$  の引き出しに成功した。これは電流密度に換算すると 0.55  $\text{mA}/\text{cm}^2$  を達成した。これは、最終目標を超えるものであり、十二分な成果である。

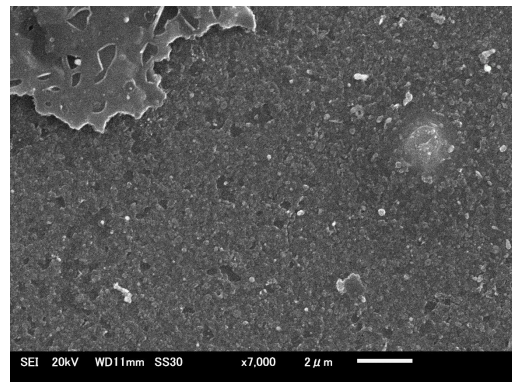


図 10 cBN 薄膜

これと並行して、九州工業大学宇宙環境技術ラボラトリーの原子状酸素環境・耐宇宙環境性能評価装置で電子源の原子状酸素(AO)耐性計測を行った。図 12 に示すが原子状酸素を一定量照射し、照射後に I-V 特性を計測していき、最終的には AO を  $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$  照射後でも閾値はほとんど差がなく、AO による劣化はほとんど見られなかった。

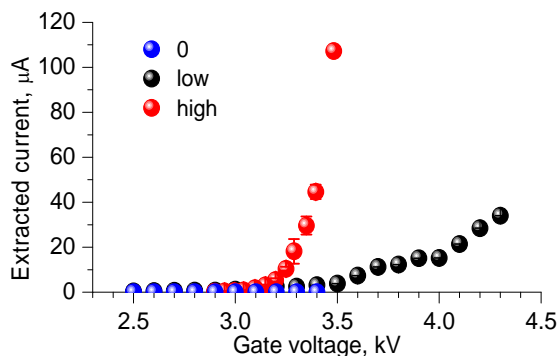


図 11 cBN 存在比の違いによる I-V 特性

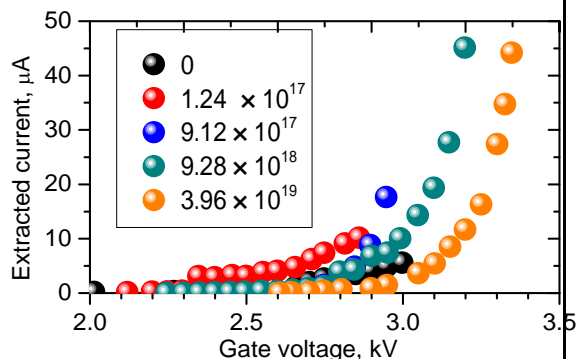


図 12 AO 照射時における I-V 特性

図 13 に引き出し電流の時間履歴を示す。200 秒間(印加電圧 2.4 kV から 3.4 kV まで上昇)に起こる異常放電の回数をカウントしたところ、改良前の電子源では異常放電は 84 回あったのに対して、改良後の電子源では、8 回と約 10 分の 1 に抑えることができた。

図 14 に改良前後での引き出し電流を示す。改良前の電子源では 2.8 kV から引き出されていたが、改良後の電子源では 1.9 kV から引き出されていることが分かる。これは改良前の電極では電極を固定する際に外側に膨らんでしまい、電極間隔が距離が離れる側に撓んでしまっていたと考えられている。電極 B の引き出し電流の最大値は 2.18 kV において  $22.3 \mu\text{A}$  となり、電流密度は  $2.3 \text{ A/m}^2$  となった。電界放出型電子源のため電極に電界を増加させればさらに大電流の引き出しが可能であるが、今回の実験において 2.18 kV において異常放電により電極が短絡してしまい、これ以上の電流引き出しができなかったが、絶縁体をポリイミドからマイカに変更するなどの対策が有効であると考えられる。

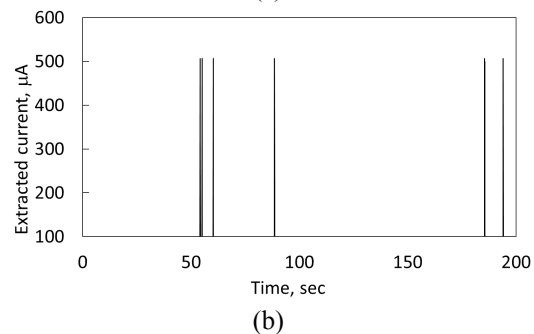
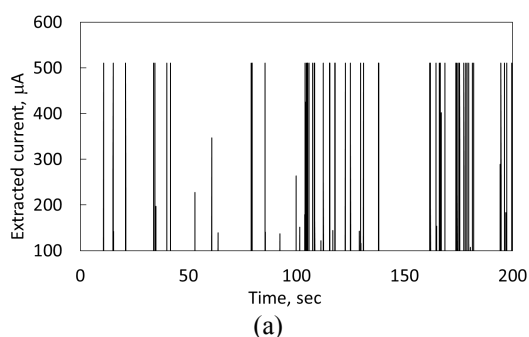


図 13 引き出し電流の時間履歴，(a)電極 A 電子源(b)電極 B 電子源

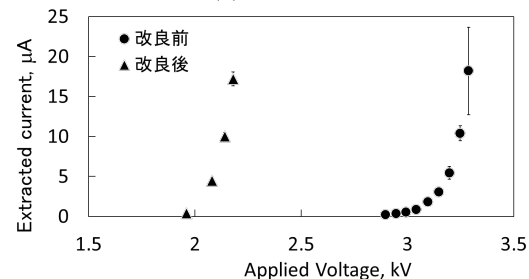


図 14 引き出し電流と印加電圧の関係

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 坂井寿光、山本直嗣、大川恭志、堤井君元、船木一幸、立方晶窒化ホウ素を用いた電界放出カソードの開発、第 58 回宇宙科学技術連合講演会、2014 年 11 月 12 日「長崎ブリックホール(長崎県、長崎市)」
2. 山本直嗣、川原友太郎、大川恭志、船木一幸、立方晶窒化ホウ素を材料に用いた電界放出型カソードの開発、平成 27 年度宇宙科学に関する室内シンポジウム、2015 年 2 月 23 日、「宇宙科学研究所(神奈川県、相模原市)」

〔その他〕

ホームページ等

[http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/Pla\\_appli.html](http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/Pla_appli.html)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 直嗣 (YAMAMOTO NAOJI)  
九州大学・総合理工学研究院・准教授  
研究者番号：40380711

(2) 研究分担者

大川恭志 ( OHKAWA YASUSHI )

宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・研  
究院

研究者番号： 20415920