

УДК 533.9.07

Т.А. МАКСИМЕНКО, А.В. ЛОЯН, О.П. РЫБАЛОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГО СПД С РАЗРЯДНОЙ КАМЕРОЙ ИЗ БОРОНИТРИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Приведены результаты исследования интегральных характеристик малого стационарного плазменного двигателя в зависимости от применяемого для изготовления разрядной камеры типа керамики. Исследовано семь образцов керамики на основе нитрида бора с различным содержанием оксида кремния. Исследования показали, что с изменением соотношения составляющих керамики изменяются эффективность ионизации рабочего тела и доля ионного тока в разрядном, вследствие чего анодный к.п.д. двигателя может отличаться до 9%. Исследования эрозионных характеристик показали, что скорость объемной эрозии в зависимости от типа керамики может отличаться в 2 и более раза.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, разрядная камера, керамика

Введение

В рамках решения задачи создания эффективной электрореактивной двигательной установки (ЭРДУ) на базе стационарного плазменного двигателя малой мощности (МСПД) актуальным остается вопрос повышения тягового к.п.д. и ресурсных характеристик.

В значительной мере на характеристики двигателя оказывает материал разрядной камеры (РК) двигателя. Основными влияющими факторами являются вторичная электронная эмиссия (влияет на разрядные и тяговые характеристики соответственно) [1, 2], а также коэффициент ионного распыления (непосредственно определяет ресурс работы двигателя).

Ранее проведенные исследования показали, что керамика на основе нитрида бора с добавкой оксида кремния обладает достаточно низким коэффициентом вторичной электронной эмиссии [1, 2] и низким коэффициентом ионного распыления [3]. При использовании РК из такой керамики удастся получить хорошие интегральные характеристики как для СПД среднего класса [1], так и для МСПД [4]. Также было отмечено влияние содержания оксида кремния на параметры двигателя. Ввиду вышесказанного было принято решение более подробно исследовать параметры двигателя с РК из боронитридных композиций с различным содержанием оксида кремния.

Цель исследований

Целью исследований является определение влияния состава керамики изолятора РК на основе

нитрида бора на интегральные характеристики МСПД для обеспечения ресурса и к.п.д. двигателя.

Результаты исследований

Для проведения исследований использовался МСПД, разработанный в «ХАИ» СПД-20М с газоразрядным полым катодом БНК М03 (рис. 1).

Испытания проводились на испытательном стенде в «ХАИ». Объем вакуумной камеры составляет 2 м^3 , при суммарной производительности откачной системы 7000 л/с предельный безмасляный вакуум составляет $7 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ (при тарировке по воздуху), при суммарном массовом расходе ксенона до $0,4 \text{ мг/с}$, динамический вакуум снижается до $5 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ Тяга измерялась при помощи тягоизмерительного устройства маятникового типа, оценочная погрешность которого при измеряемых тягах порядка 4 мН составляет не более 3%.

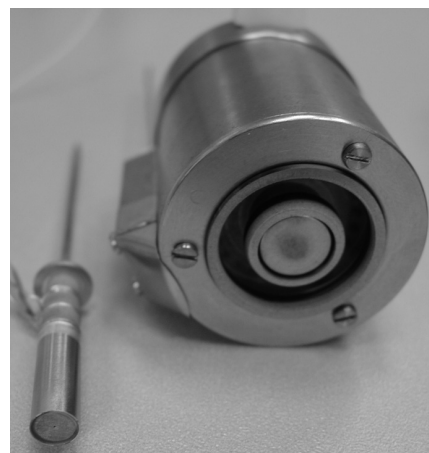


Рис. 1. СПД-20М с катодом БНК М03

Для исследования параметров ионной компоненты плазмы применялся многосеточный потенциал-анализатор (четырёх-электродный).

Стенки РК МСПД изготавливались из керамики на основе BN с содержанием SiO_2 от 0 до 50% (табл. 1). В таблице также приводятся плотность и пористость используемых образцов керамики.

Таблица 1
Плотность и пористость образцов керамики

№	Состав, %	Плотность г/см^3	Пористость
1	BN – 100;	1,55	0,326
2	BN – 95; SiO_2 – 5	1,7	0,266
3	BN – 90; SiO_2 – 10	1,72	0,263
4	BN – 80; SiO_2 – 20	1,87	0,211
5	BN – 65; SiO_2 – 35	1,86	0,232
6	BN – 60; SiO_2 – 40	2,02	0,172
7	BN – 50; SiO_2 – 50	2,08	0,188

Для сравнения характеристик двигателя были проведены испытания в основной рабочей точке:

- массовый расход анодный - 0,35 мг/с;
- максимальная индукция магнитного поля по центру РК – 25 мТл;
- разрядное напряжение - 300 В.

Ток в катушке намагничивания был фиксирован на значении, которое обеспечивало величину магнитной индукции в РК, которая позволяла снизить разрядный ток без значительных потерь на намагничивание.

В ходе эксперимента для каждого типа керамики были измерены разрядные характеристики (рис. 2), тяговые характеристики (рис. 3).

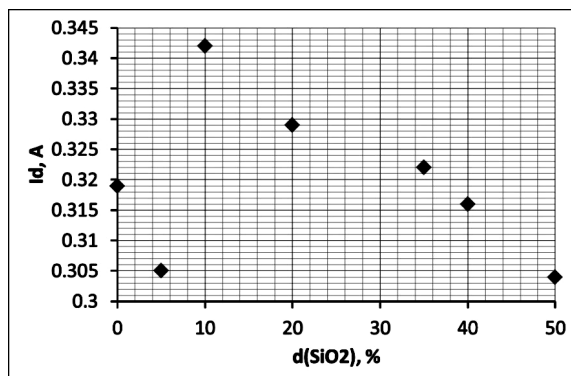


Рис. 2. Разрядный ток

Хорошо видно, что в зависимости от применяемого типа керамики изменение разрядного тока при одинаковых входных условиях может составлять более 10%.

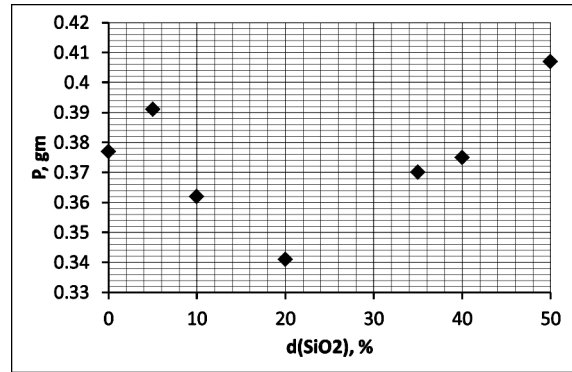


Рис. 3. Тяговые характеристики

Тяга двигателя в зависимости от применяемого типа керамики при одинаковых входных условиях может отличаться до 20%.

Также при помощи многосеточного зонда измерялись ионный ток (рис. 4) и тормозные вольтамперные характеристики (ВАХ) в зависимости от положения зонда относительно оси двигателя (рис. 5).

Расстояние от среза двигателя до зонда составляло 140 мм. Максимальное перемещение зонда от оси по радиусу – 256 мм. Также изменялось угловое положение зонда для получения максимального токового сигнала в каждой точке.

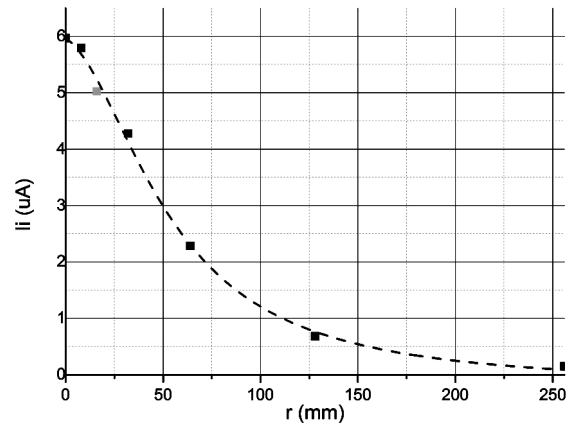


Рис. 4. Радиальное распределение ионного тока

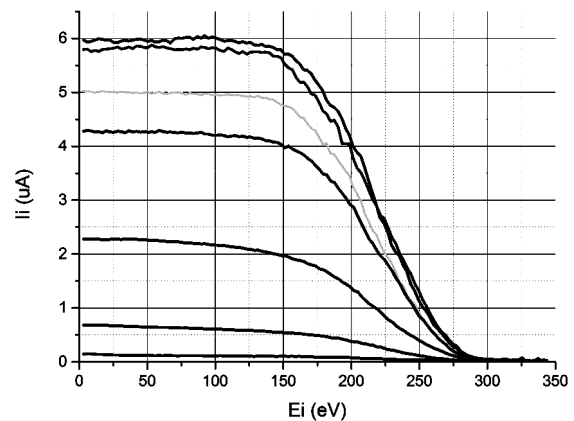


Рис. 5. Тормозные зондовые ВАХ

В результате дифференцирования полученных тормозных характеристик были определены функции распределения ионов по энергиям (рис. 6).

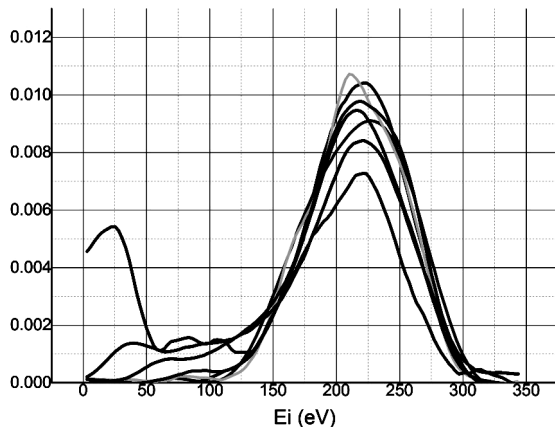


Рис. 6. Локальные функции распределения ионов по энергиям

По полученным данным были рассчитаны отношения суммарного ионного тока к разрядному и эквивалентному массовому токам, характеризующие долю ионного тока в разрядном и эффективность ионизации, соответственно. Также было рассчитано отношение средней энергии ионов (в эВ) к разрядному напряжению, характеризующее эффективность использования разрядного напряжения на ускорение ионов. Определен средний косинус угла отклонения ионов от оси. Результаты измерений приведены на рис. 7, также на рисунке показан анодный тяговый к.п.д. двигателя в зависимости от применяемой керамики.

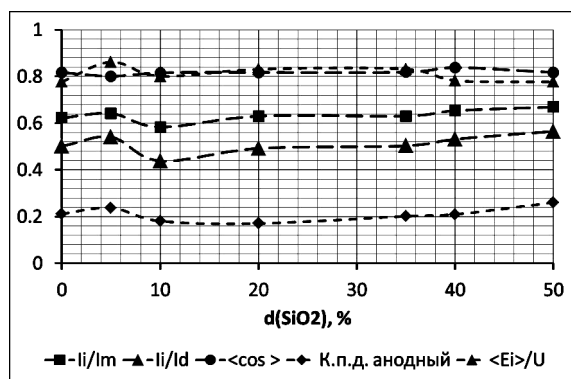


Рис. 7. Удельные параметры, характеризующие эффективность работы двигателя

Анализируя полученные данные можно сказать, что тип используемой керамики оказывает заметное влияние на эффективность ионизации рабочего тела и на долю ионного тока в разрядном. За счет указанных эффектов при применении керамики на основе нитрида бора с содержанием оксида кремния от 0 до 50% анодный к.п.д. двигателя может отличаться до 9%. При применении керамики с

содержанием SiO_2 5% и 50% удалось получить наибольшие значения к.п.д. двигателя на указанном режиме: 23,8% и 26% соответственно.

Исследования эрозионных характеристик проводились на этапе приработки в течение 8 ч работы двигателя, когда скорость распыления изоляторов наиболее значительна. На рис. 8 показана зависимость суммарной скорости объемной эрозии стенок РК для каждого типа керамики.

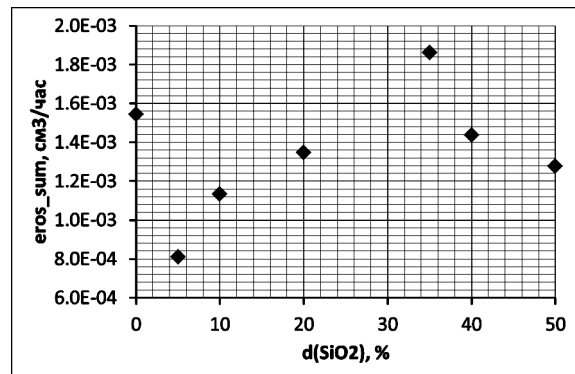


Рис. 8. Скорость объемной эрозии РК

Видно, что скорость объемной эрозии в зависимости от типа керамики может отличаться в 2 и более раза. С точки зрения ресурсных характеристик наиболее привлекательно выглядит керамика с содержанием SiO_2 5%. Учитывая то, что данная керамика обладает невысокой плотностью, просматривается возможность повышения ее эрозионных характеристик за счет усовершенствования техпроцесса для получения более плотных составов.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Исследования влияния содержания оксида кремния в изоляторах РК МСПД на основе нитрида бора показали, что с изменением соотношения составляющих керамики изменяются эффективность ионизации рабочего тела и доля ионного тока в разрядном. При применении керамики на основе нитрида бора с содержанием оксида кремния от 0 до 50% различие по анодному к.п.д. двигателя может составлять до 9%. В ходе эксперимента на указанном режиме для керамик с содержанием SiO_2 5% и 50% удалось получить наибольшие значения к.п.д. двигателя: 23,8% и 26%, соответственно.

Исследования эрозионных характеристик показали, что скорость объемной эрозии в зависимости от типа керамики может отличаться в 2 и более раза. Наименьшая скорость объемной эрозии получена для керамики с содержанием SiO_2 - 5%.

В перспективе видится возможность снижения скорости объемной эрозии изоляторов РК за счет

усовершенствования техпроцесса для получения более плотных составов. Однако это в свою очередь потребует проведения дополнительных исследований влияния нового типа керамики на параметры двигателя.

Литература

1. Gascon, N. Wall material effects in stationary plasma thrusters. I. Parametric studies of an SPT-100 [Text] / N. Gascon, M. Dudeck, S. Barral // *Physics of Plasmas*. – 2003. – Vol. 10, Is. 10. – P. 4123-4136.
2. Wall material effects in stationary plasma thrusters. II. Parametric studies of an SPT-100 [Text] / S. Barral, K. Makowski, Z. Peradzynski, N. Gascon,

M. Dudeck // *Physics of Plasmas*. – 2003. – Vol. 10, Is. 10. – P. 4137-4152.

3. Семенов, А.А. Распыление потоками ионов поверхностей элементов конструкций ионно-плазменных источников [Текст] / А.А. Семенов, И.И. Шкарбан // *Ракетно-космическая техника*. – 1991. – № 3 (131). – С. 42-53.

4. Максименко, Т.А. Исследование влияния материала разрядной камеры МСПД на его характеристики, [Текст] / А.В. Лоян, Т.А. Максименко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 7(94). – С. 153-156.

5. Стационарные плазменные двигатели [Текст]: учеб. пособие / Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский, В.Б. Тихонов. – Х.: ХАИ, 1989. – 316 с.

Поступила в редакцию 1.06.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГО СПД З РОЗРЯДНОЮ КАМЕРОЮ З БОРОНІТРИДНИХ КОМПОЗИЦІЙ

Т.О. Максименко, А.В. Лоян, О.П. Рыбалов

Наведено результати дослідження інтегральних характеристик малого стаціонарного плазмового двигуна залежно від типу кераміки, який використовується для виготовлення розрядної камери. Досліджено сім зразків кераміки на основі нітриду бору з різним вмістом оксиду кремнію. Дослідження показали, що зі зміною співвідношення складових кераміки змінюються ефективність іонізації робочого тіла та частка іонного струму в розрядному, внаслідок чого анодний к.к.д. двигуна може відрізнятись до 9% . Дослідження ерозійних характеристик показали, що швидкість об'ємної ерозії в залежності від типу кераміки може відрізнятись в 2 рази і більше.

Ключові слова: стаціонарний плазмовий двигун, розрядна камера, кераміка.

INVESTIGATIONS OF INTEGRAL CHARACTERISTICS OF SMALL SPT WITH DISCHARGE CHAMBER MADE OF BN COMPOSITIONS

T.A. Maksymenko, A.V. Loyan, O.P. Ribalov

Investigation results of the integral characteristics of small stationary plasma thruster depending on the ceramic type used for the manufacture of the discharge chamber are shown. There are seven samples of ceramics based on boron nitride with different content of silica were investigated. Studies have shown that changes in the ratio of ceramics components affect on the ionization efficiency and on the part of the ion current in the discharge. Therefore anode efficiency of thruster may differ by 9% . Studies of erosion characteristics showed that the rate of bulk erosion, depending on the type of ceramics can vary more than in two times.

Key words: stationary plasma thruster, discharge chamber, ceramic.

Максименко Тарас Александрович – науч. сотр. каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: m.taras.a@gmail.com.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Рыбалов Олег Петрович – мл. науч. сотр. каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.