

ПЫЛЕУДАРНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА МИКРОМЕТЕОРИТОВ И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

© 2011 И. В. Пияков, Д. В. Родин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В работе рассматривается подход к проектированию пылеударного масс-спектрометра для анализа состава микрометеоритов и частиц космического мусора искусственного и естественного происхождения. Рассмотрены две модели приборов для работы в лабораторных условиях и в космосе. Приведены результаты моделирования и выработаны рекомендации для увеличения разрешающей способности и расширения динамического диапазона исследуемых масс.

Масс-спектрометр, микрометеорит, космический мусор, тороидальный дефлектор, ионное зеркало, ускоритель пылевых частиц.

В настоящее время космические аппараты (КА) проектируются на сроки более 5 лет, в связи с чем вопрос прогнозирования деградации материалов и элементов конструкции КА имеет важное значение. Например, длительное воздействие высокоскоростных частиц космического мусора и микрометеороидов способствует уменьшению механической прочности обшивки КА, уменьшению выходной мощности солнечных батарей, загрязнению оптических элементов аппаратуры и т.д.

Времяпролётные масс-спектрометры находят широкое применение не только в земных, но и в космических условиях. К последнему относится изучение космического пространства, химического состава космической пыли, собственной атмосферы космических аппаратов и т.д. Достоинствами времяпролётных масс-спектрометров по сравнению с приборами других принципов действия являются: малые габариты, высокая чувствительность и способность определять состав космических пылевых частиц, имеющих случайный характер взаимодействия с прибором. Последнее свойство особенно важно в области космических исследований.

Для исследования элементного состава космической пыли, микрометеороидов и техногенных частиц широко применяются времяпролётные масс-спектрометры [1]. Приме-

ром такого прибора является масс-спектрометрический преобразователь для исследования космической пыли (рис.1,а). Устройство работает следующим образом. Пылевая частица соударяется с мишенью. За счёт высокой скорости соударения (>10 км/с) вещества частицы и части мишени превращаются в слабоионизованный газ. Ионы ускоряются сеткой 2 и через экранирующий цилиндр 3 попадают в дрейфовый промежуток, где отражаются электростатическим зеркалом 4, а затем зеркалом, образованным сеткой 2 и электродом 5, после чего попадают в приёмники 6. Такая схема предпочтительна при исследовании космических частиц, имеющих малую скорость относительно космического аппарата. Разрешающая способность близка к 100 при общей длине прибора 370 мм [1]. Другой пылегазоударный масс-спектрометр [2] показан на рис.1,б. Устройство работает следующим образом. При ударе частицы о мишень вещества частицы и части мишени превращаются в слабоионизованный газ и на выходе приёмника (ВЭУ-7) образуется ионный спектр. Создание такого прибора с большой площадью чувствительной поверхности является сложной задачей. Импульсы ионов усиливаются усилителем, и при помощи ключа по истечении некоторого времени, необходимого для ионизации, с мишени снимается напряжение, создаваемое

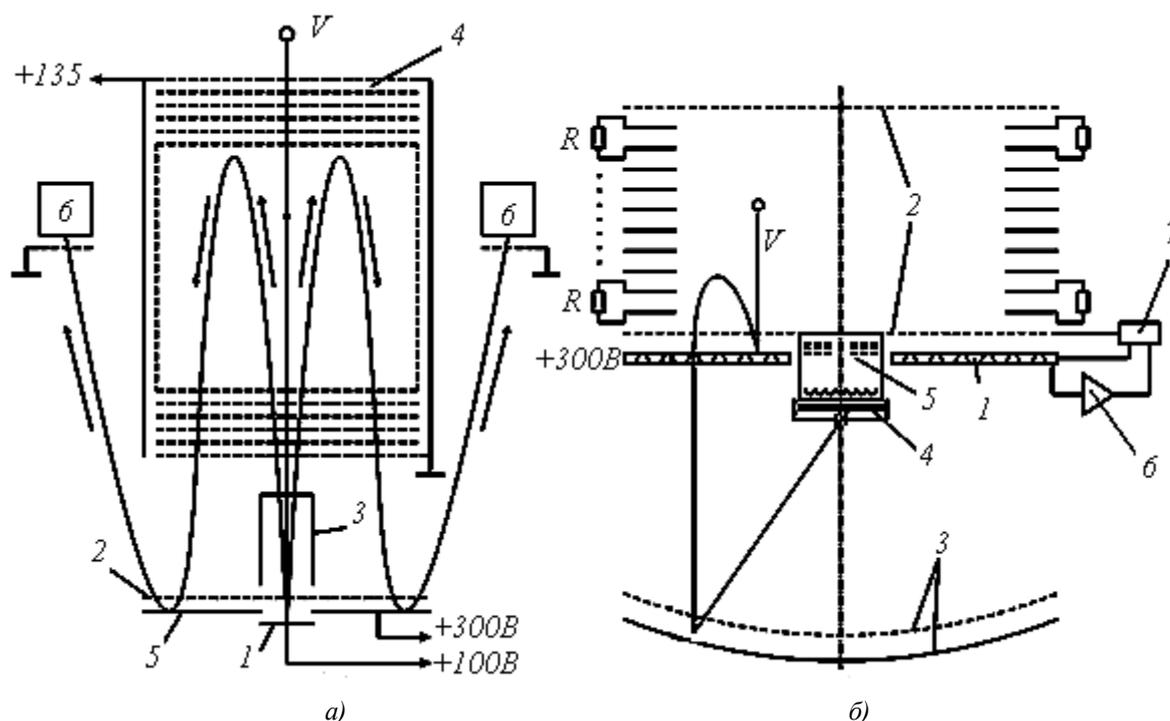


Рис. 1. Пылеударные масс-спектрометры

источником изменяемого во времени импульсного напряжения. Ускоренные ионы вылетают в верхнее бесполое пространство, отражаются иммерсионной линзой таким образом, что фокусируются в центр отражающей сетки, которая направляет их в приёмник ионов. Ионы разделяются по массам во времени, проходя нелинейный отражатель. Сигнал с приёмников ионов поступает в блок обработки ионных спектров. Источник напряжения формирует заданные потенциалы на нелинейном отражателе, отражающей сетке и иммерсионном отражателе.

Особенностью отражающей сетки является то, что она вогнута в сторону мишени с радиусом $R \approx 2...3$ м. Это способствует дополнительной пространственной фокусировке ионных пучков в приёмники ионов.

Таким образом уменьшаются потери ионов, что способствует увеличению чувствительности устройства. Фокусировка ионов по энергиям производится с помощью иммерсионной линзы и дополнительно в нелинейном отражателе. Использование нелинейного отражателя повышает разрешающую способность устройства.

Некоторые характеристики масс-спектрометров сведены в табл.1.

Как видно из табл. 1, наиболее эффективными способами повышения разрешающей способности являются применение искривлённого электростатического отражателя и ионных зеркал. Сведем эти пути в одном приборе и получим масс-спектрометр, оптическая модель которого показана на рис.2.

Таблица 1. Параметры масс-спектрометров

Особенность прибора	Разрешающая способность	Схема	Литература
Двойная фокусировка	50 – 200	Рис.1	[1]
Ионное зеркало	520 – 530	-	[3]
Вогнутый электростатический отражатель	1000-5000	Рис.2	[2]

Как видно из рис.2, ионное зеркало, находящееся слева, достаточно однородно в пространстве, особенно в центральной части (ближе к оси симметрии прибора). Для электростатического отражателя наблюдается некоторое увеличение в центральной области (в зоне мишени), что вызвано его искривлением. Ускоряющий потенциал в электростатическом отражателе 750 В, максимальный потенциал зеркала 900 В.

Установим в центре мишени источник ионов с распределением Максвелла и термической ионизацией. Траектории ионов показаны на рис.3.

Как видно из рис.3, минимальная энергия ионов наблюдается в момент удара (в центре мишени) и в конце зеркала при их развороте. Частицы преодолевают расстояние от мишени до приёмника ионов (на рис.3 это отверстия в центральном большом кольце) за 358,3 мкс. Проведём подобное моделирование для остальных масс ионов и полученный

результат представим в виде графиков (рис.4). Аналогично построим разницу между временами пролёта масс, отличающихся на 1 а.е.м. (рис.5). Как видно из рис.5, хотя ионы массой 5000 а.е.м. (согласно модели рис.3) и пролетают траекторию от источника к приёмнику, но уже для ионов массой более 700 а.е.м. разница во времени пролёта менее 0,1 мкс.

Таким образом, в данной области спектра элементный анализ затруднен. Однако применение такой модели масс-спектрометра удобно для анализа элементного состава. Недостатком данной конструкции является малая площадь мишени, а при её увеличении длина пролёта ионов зависит от места удара микрометеорита.

Для устранения данных недостатков предложен новый масс-спектрометр [4]. Устройство (рис.6) работает следующим образом.

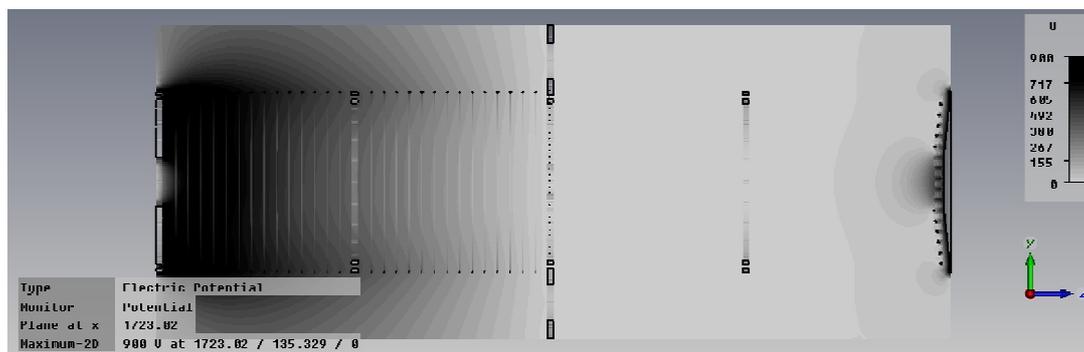


Рис. 2. Оптическая схема масс-спектрометра и распределение электрического потенциала

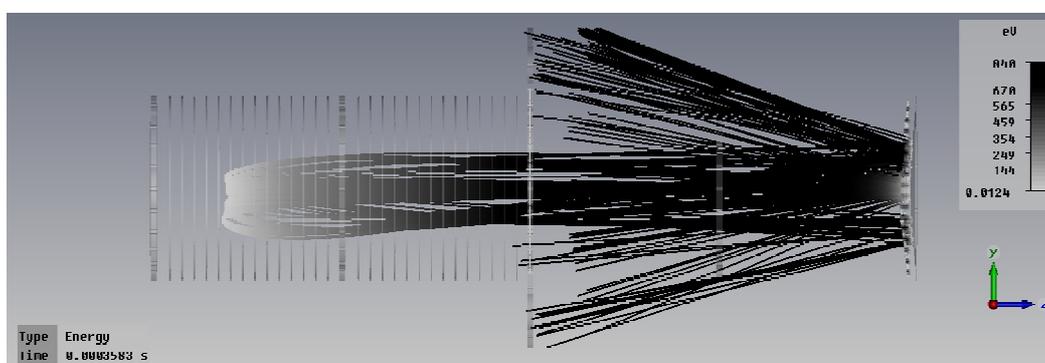


Рис. 3. Траектории частиц массой 5000 а.е.м.

Микрометеорит или пылевая частица соударяется с внутренней стороной полусферической мишени 1 и в результате ударной ионизации превращается в слабоионизированный газ. Под действием электрического поля между полусферической мишенью 1 и полусферической сеткой 2 ионы газа ускоряются в направлении к центру полусферической мишени. В пространстве, ограниченном полусферической сеткой 2 и заземленной сеткой 3, ионы движутся равномерно.

Поскольку фокус параболического отражателя 8 совпадает с центрами полусфери-

ческой мишени 1 и полусферической сетки 2, то расстояние от любой точки поверхности мишени до фокуса параболического отражателя 8 одинаково и все ионы пройдут через фокус параболического отражателя 8, образовав при отражении коллинеарный поток, направленный в отверстие полусферической мишени 1. Далее ионы попадают в один из четырех тороидальных дефлекторов, образованных внутренними отклоняющими электродами 6 и внешними отклоняющими электродами 7 и, пройдя через них, фиксируются приёмниками ионов.

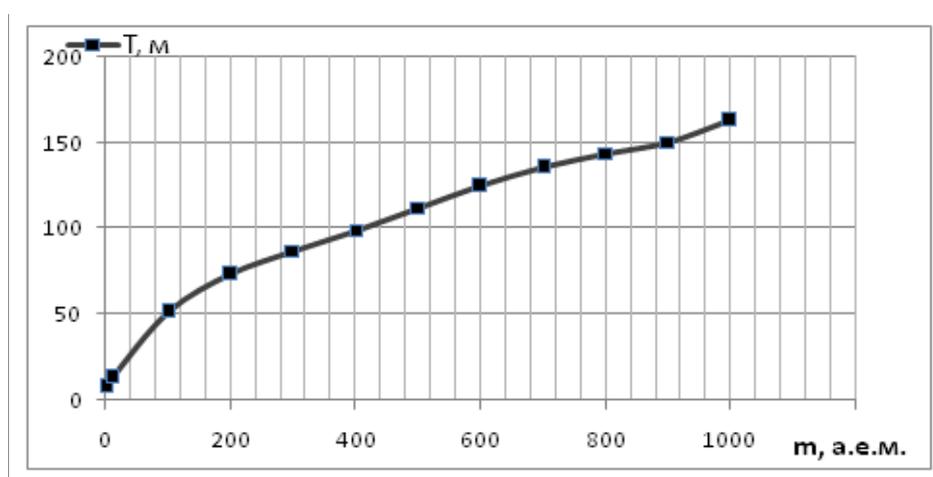


Рис. 4. Зависимость времени пролета от массы ионов

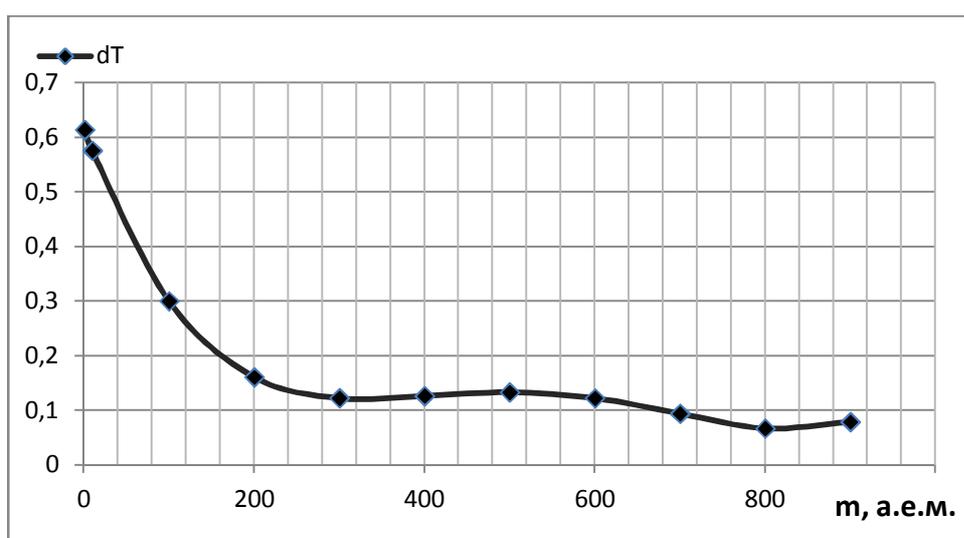


Рис. 5. Разница между временами пролёта масс, отличающихся на 1 а.е.м.

Поскольку ионы проходят сквозь полусферическую мишень 1 одним сфокусированным потоком, большая площадь полусферической мишени 1 является рабочей, что обеспечивает большой коэффициент сбора ионов, а следовательно, увеличивает чувствительность пылеударного масс-спектрометра.

Путь, пройденный ионами от любой точки соударения микрометеорита с полусферической мишенью 1 до одного из приёмников ионов 5, постоянен, что устраняет зависимость результатов измерений от места соударения и обеспечивает увеличение достоверности результатов работы пылеударного масс-спектрометра.

Так как в данной модели ионное зеркало отсутствует, то вместо него использованы тороидальные дефлекторы. Электронно-оптические свойства такой системы схожи с цилиндрическим конденсатором и впервые были рассмотрены Юзом и Рожанским. Анализатор получил название «конденсатор Юза-Рожанского» [5]. Принцип действия зак-

лючается в том, что ионы с большей энергией отклоняются в электрическом поле слабее и движутся по более длинным траекториям. В результате время движения у них больше, чем у ионов с меньшими энергиями.

Ещё одним достоинством этой конструкции является то, что в точке

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{\sqrt{2}}$$

пучок фокусируется в фокальную линию. При повороте на угол 2φ происходит фокусировка второго порядка, но при этом частицы фокусируются и по энергии. Для тороидальных дефлекторов данные свойства дополняются дополнительной фокусировкой ионов в пространстве. Точки сборки ионов видны на рис.7.

Из рис.7 видно, что ионы собираются в точку в центре дефлектора и перед выходом. Энергии ионов внутри дефлектора практически не меняются.

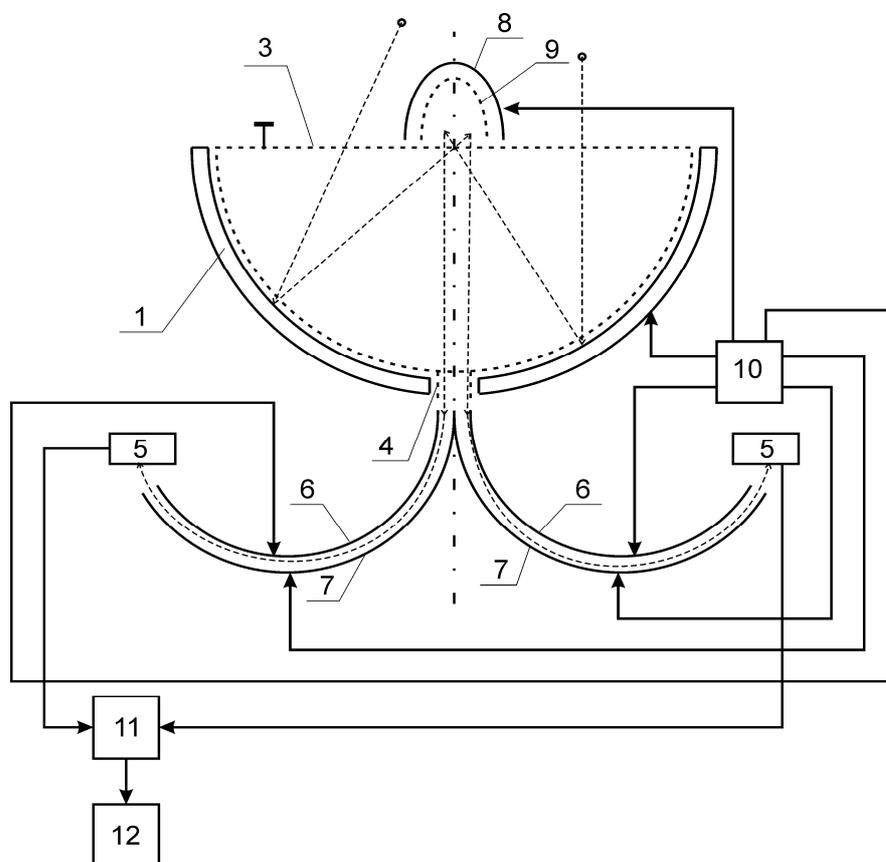


Рис. 6. Структурная схема масс-спектрометра

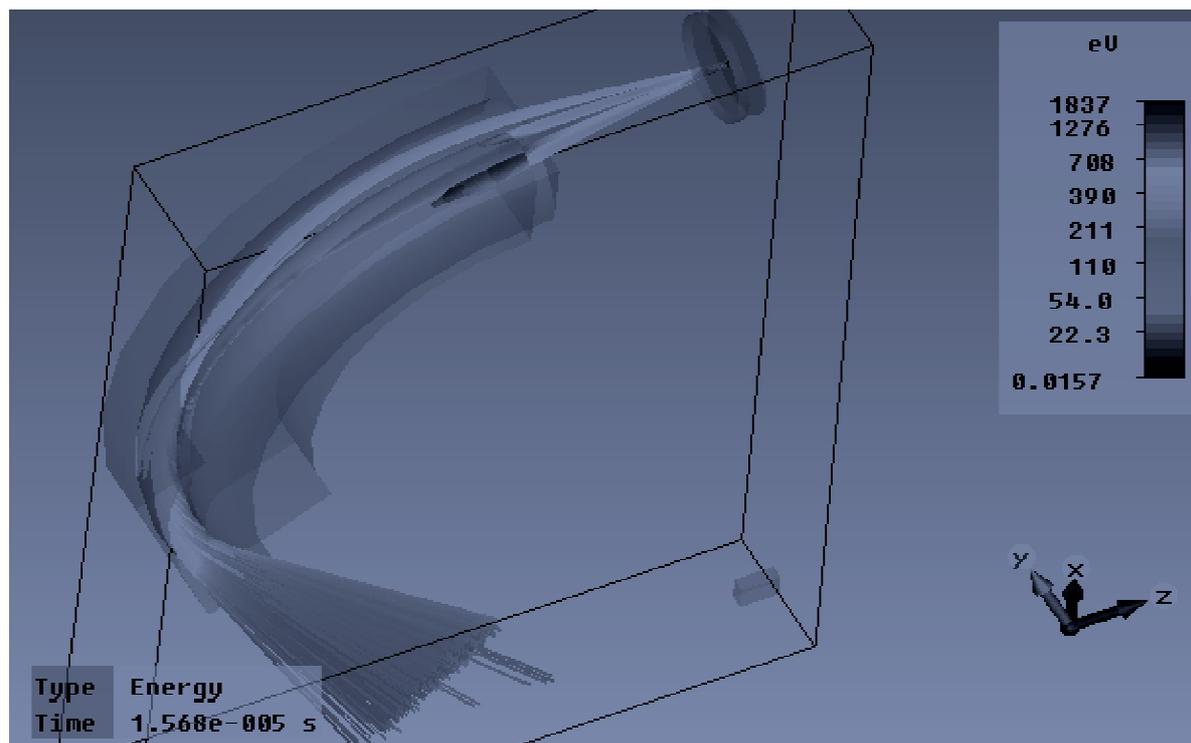


Рис. 7. Траектории ионов в тороидальном дефлекторе

Тороидальные дефлекторы дополнительно фокусируют ионные пакеты, увеличивая разрешающую способность (разрешающая способность достигает 500). К тому же каждый из тороидальных дефлекторов настроен на свой диапазон масс, внутри которого разрешающая способность максимальна. Таким образом удаётся избежать уменьшения разрешающей способности на больших массах. Такое деление диапазона положительно сказывается на увеличении общей разрешающей способности масс-спектрометра.

Настройка тороидальных дефлекторов осуществляется посредством изменения радиусов внешнего и внутреннего электродов и расстояния между ними, а также изменением напряжений на электродах.

Угол φ , исходя из условий фокусировки, вычисляется:

$$\varphi = \arctg \frac{R_{i\delta\delta} + L}{R_{i\delta\delta} L + 1},$$

где R_{omp} – эффективный радиус линзы, L – расстояние от выхода тороидального дефлектора до соответствующего приёмника ионов.

На пути усовершенствования масс-спектрометров было предложено множество различных конструкций. Как видно из представленных материалов, в пылеударных масс-спектрометрах применение различных форм отражающих электродов и тороидальных дефлекторов улучшает показатели. Расширение и усовершенствование элементной базы позволяет усложнить электронные модули управления масс-спектрометром, что даёт возможность развивать алгоритмы разделения ионных пакетов во времени.

Библиографический список

1. Сёмкин, Н. Д. Проектирование масс-спектрометров для космических исследований [Текст] / Н. Д. Сёмкин. – Самара: СГАУ, 2000. – 164 с.
2. Сёмкин, Н. Д. Приборы и техника эксперимента [Текст] / Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов, С. В. Мясников, Р. А. Помельников. – 2001. – №5. – С. 24 – 32.
3. Пат. 2122257. Российская Федерация, МПК H01J49/40. Пылеударный масс-спектрометр [Текст] / Сёмкин Н. Д., Воронов К. Е.; заявитель и патентообладатель Самар-

ский государственный аэрокосмический университет. –№96103268/09; заявл. 20.02.1996; опубл. 11.20.1998, Бюл. № 9. –9с.

4. Пат. 2326465. Российская Федерация, МПК H01J49/40. Пылеударный масс-спектрометр [Текст] / Сёмкин Н. Д., Пияков И. В., Пияков А. В., Воронов К. Е., Помель-

ников Р. А.; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет. – №2006125302/28; заявл. 13.07.2006, опубл. 10.06.2008; Бюл. №16. –5с.

5. Козлов, И. Г. Современные проблемы электронной спектроскопии [Текст] / И. Г. Козлов. –М.: Атомиздат, 1978. –215 с.

DUST-IMPACT MASS-SPECTROMETER FOR DETERMINATION OF ELEMENTAL COMPOSITION OF MICROMETEORITES AND SPACE DEBRIS PARTICLES

© 2011 I. V. Piyakov, D. V. Rodin

Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolev
(National Research University)

The paper discusses an approach to designing dust-impact mass spectrometer for analyzing the composition of micrometeorites and space debris both natural and artificial origin. Two models of devices for the laboratory and space use are considered. Obtained simulation results and recommendations for resolution increase and dynamic range expansion of the studied masses.

Mass spectrometer, micrometeors, space debris, the toroidal deflector, ion mirror, the accelerator of the dust particles.

Информация об авторах

Пияков Игорь Владимирович, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, к.т.н., докторант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: pijakov@mail.ru. Область научных интересов: масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Родин Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, инженер института космического приборостроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: rodin.ssau@mail.ru. Область научных интересов: масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Piyakov Igor Vladimirovich, assistant professor of design and production of radio-electronic means, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: pijakov@mail.ru. Area of research: mass spectrometry, space devices development.

Rodin Dmitry Vladimirovich, post-graduate students faculty of radio engineering and medical diagnostic systems, the engineer of the Institute of space device engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: rodin.ssau@mail.ru. Area of research: mass spectrometry, space devices development.