

РАЗРАБОТКА ПЫЛЕУДАРНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА МИКРОМЕТЕОРИТОВ И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

И.В. Пяков, Д.В. Родин

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Для исследования элементного состава космической пыли, микрометеороидов и техногенных частиц широко применяются времяпролётные масс-спектрометры [1]. Примером 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) вещество 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 пылегазударный масс-спектрометр [2] показан на рис.1,б. Устройство работает следующим образом. При ударе частицы о мишень вещество частицы и части мишени превращается 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 источником изменяемого во времени импульсного напряжения. Ускоренные ионы вылетают в верхнее бесполовое 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.

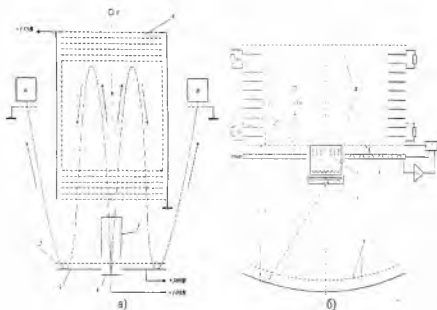


Рис. 1. Пылеузные масс-спектрометры

Некоторые характеристики масс-спектрометров сведены в табл. 1.

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



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

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.

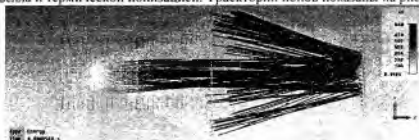


Рис 3. Траектории частиц массой 5000 а.е.м.

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 приемника ионов (на рис.3 это отверстия в центральном большом кольце) за 358,3 мкс. Проведем 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 приемнику, 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 элементного состава. Недостатком данной конструкции является малая площадь мишени, а при её увеличении длина пролёта ионов зависит от места удара микрометеорита.

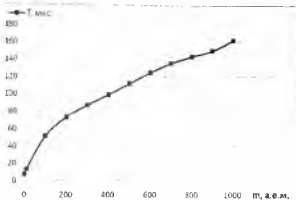


Рис. 4. Зависимость времени пролета от массы ионов

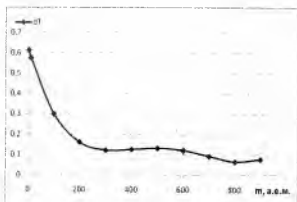


Рис. 5. Разница между временами пролета масс, отличающихся на 1 а.е.м.

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

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

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.

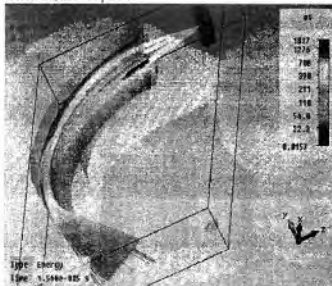


Рис. 7. Траектории ионов в тороидальном дефлекторе

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

$$\varphi = \arctg \frac{R_{\text{эфф}} + L}{R_{\text{отр}} L + 1},$$

где $R_{\text{отр}}$ – 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.

Список использованных источников

1. Сёмкин, Н.Д. Проектирование масс-спектрометров для космических исследований [Текст]/ Н.Д. Сёмкин. – Самара: СГАУ, 2000.
2. Сёмкин, Н.Д. [Текст]/ Н.Д. Сёмкин, К.Е. Воронов, С.В. Мясников, Р.А. Помельников // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – №5.
3. Пат. 2122257. Российская Федерация, МПК H01J49/40. Пылеударный масс-спектрометр [Текст]/ Сёмкин Н.Д., Воронов К.Е.; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет. – №96103268/09; заявл. 20.02.1996; опубл. 11.20.1998, Бюл. № 9.
4. Пат. 2326465. Российская Федерация, МПК H01J49/40. Пылеударный масс-спектрометр [Текст]/ Сёмкин Н.Д., Пияков И.В., Пияков А.В., Воронов К.Е., Помельников Р.А.; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет. – №2006125302/28; заявл. 13.07.2006, опубл. 10.06.2008; Бюл. №16.
5. Козлов, И.Г. Современные проблемы электронной спектроскопии [Текст]/ И.Г. Козлов. – М.: Атомиздат. 1978.

ОСОБЕННОСТИ ГАЗОВОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОГО ИОННОГО ЗЕРКАЛА

Д.В. Родин, И.В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Возможности использования времяпролетных масс-спектрометров для решения ряда исследовательских задач, таких как изучение космического пространства, химического состава космической пыли, собственной атмосферы космических аппаратов и т.д., ограничены свойствами ионно-оптических систем пространственного и временного фокусирования ионных пакетов. Традиционные методы временной фокусировки с применением линейных ионных зеркал обеспечивают разрешающую способность приборов ($R > 500$) при дисперсии энергии ионов до 15% [1-2]. И хотя