

Детекторы физико-химических характеристик микрометеороидов на основе пленочных МДМ-структур

Н. Д. Семкин, А. М. Телегин

Рассмотрена технология изготовления конденсаторных детекторов микрометеороидов на основе органических пленок (полиметилметакрилата). Приведены физические характеристики разработанных детекторов и способы их реализации. Показана возможность использования детекторов в натурных условиях.

Ключевые слова: детектор микрометеороидов, технология органических пленок, спектр.

The technology of manufacturing capacitor micrometeoroids detectors based on organic films (PMMA). Physical characteristics of the developed detectors and their views of implementation, the possibility of their use in field conditions.

Keywords: detector micrometeoroids, the technology of organic films, spectrum.

Введение

По оценкам отечественных и зарубежных экспертов, более половины отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) обусловлено неблагоприятным воздействием факторов космического пространства (ФКП). Среди них важную роль играют микрометеороиды и частицы космического мусора [1], в связи с этим необходима надежная датчиковая аппаратура для регистрации параметров таких частиц.

При исследовании и разработке бортовых детекторов микрометеороидов необходимо создание аппаратуры, преобразующей ударные воздействия и связанные с ними параметры частиц в электрические сигналы.

В качестве детектора в такой аппаратуре используется структура металл – диэлектрик – металл (МДМ), состоящая из верхней металлической обкладки, диэлектрика, нижней металлической обкладки и регистратора.

При толщине верхней обкладки, большей размера частицы, кратер при ударе механически не разрушает материал диэлектрика, но ударная волна, за счет сжатия и последующего нагрева, приводит к

кратковременному увеличению его проводимости. При этом предварительно заряженный конденсатор частично разряжается через канал проводимости. Измеряя остаточное напряжение на конденсаторе, можно оценить интенсивность ударной волны и, следовательно, параметры частицы.

Технология изготовления пленок

Проведенные нами исследования в области технологии получения тонких пленок на больших площадях (300 – 500 см² и более) из неорганических материалов (GeO, SiO₂, оксидов редкоземельных элементов) не дали положительных результатов в связи с наличием самопроизвольных разрядов даже при малых напряжениях (20 В), подаваемых на МДМ-структуру. Это связано с наличием многочисленных дефектов, пористой структуры диэлектрика.

Применение таких пленок в качестве детектора микрометеороидов практически невозможно. Кроме того, при больших температурах наблюдаются многочисленные пробой.

В данной работе исследуется возможность получения качественных пленок из органических диэлектриков (например, полиметилметакрилата,

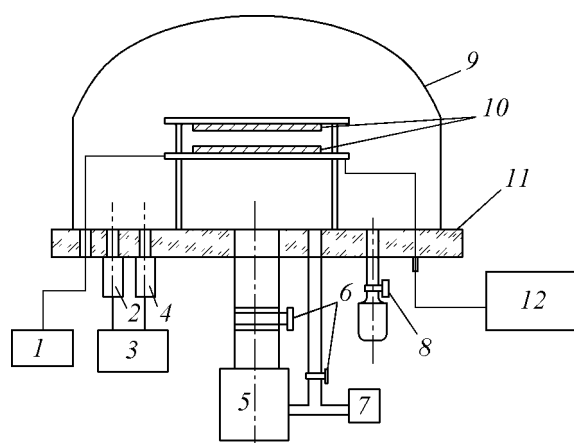


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для получения органических пленок: 1 — измеритель тока плазмы; 2 — датчик термопарный; 3 — измеритель вакуума; 4 — датчик ионизационный; 5 — диффузионный насос; 6 — вакуумные вентили; 7 — форвакуумный насос; 8 — пробирка с мономером; 9 — стеклянный колпак; 10 — металлические мишени; 11 — основание из оргстекла; 12 — ультразвуковой генератор.

полиорганосилоксана). Для этого разработана экспериментальная установка, в которой реализуется метод полимеризации мономеров в высокочастотном разряде.

На рис. 1 показана блок-схема экспериментальной установки для получения органических пленок.

Процесс полимеризации проводится следующим образом.

1. Устанавливаются две полированные медные пластины 10 в вакуумную камеру (рис. 1), на которые предполагается нанесение диэлектрической пленки.

2. Производится откачка воздуха из вакуумной камеры с помощью форвакуумного насоса 7, затем диффузионного насоса 5. Переключение осуществляется вакуумными вентилями 6. Степень вакуума контролируется с помощью термопарного и ионизационного датчиков 2, 4, соединенных с вакуумметром 3. При достижении вакуума $\sim 6,7 \cdot 10^{-3}$ Па вентилем 6 отключают диффузионный насос, а дальнейшая откачка осуществляется форвакуумным насосом 7. При достижении в камере степени разряжения порядка $1,3 - 6,7$ Па подается напряжение $\sim 1,5$ кВ от генератора 12, затем из пробирки 8 производят напуск мономера (в частности полиметилметакрилата) в вакуумную камеру. Регулированием степени вакуума и скорости напуска мономера между пластинами возникает плазма, при этом ток через плазменный промежуток контролируется измерителем 8 на уровне $\sim 15 - 20$ мА. В результате процесса полиме-

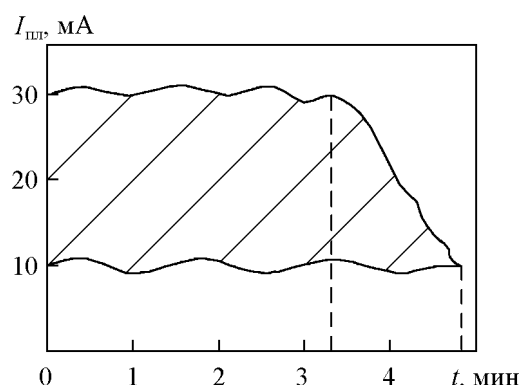


Рис. 2. Зависимость сквозного тока между двумя электродами ($I_{пл}$) при $U_{Г} = 1,5 - 2$ кВ, $f = 10 - 30$ кГц. Заштрихованная часть показывает зону полимеризации.

ризации полиметилметакрилата на пластинах 10 образуется пленка, толщину которой определяли с помощью измерителя толщины типа МИИ-4.

Качество пленки зависит от совокупного действия следующих параметров: напряжения генератора и его частоты, степени вакуума, скорости напуска мономера. В процессе проведения полимеризации управление осуществляется двумя параметрами — степенью вакуума и напуском мономера. Необходимое поддержание постоянной концентрации частиц в плазме контролируется с помощью измерителя тока 1. При величине тока более 30 мА (рис. 2) происходит разогрев поверхностей пластин 10 и увеличение процессов деструкции, в результате чего пленка не обладает эластичностью, шелушится и отслаивается от подложки, то есть становится “неживой” и теряет чувствительность к ударному воздействию. При $I < 5 - 10$ мА концентрация заряженных частиц в плазме мала, и процесс полимеризации нестабилен, в результате чего полученные пленки имеют большое количество самопроизвольных пробоев. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости толщины h диэлектрической пленки от времени процесса полимеризации при различных значениях тока плазмы. При $h < 0,3 - 0,5$ мкм на число самопроизвольных пробоев влияет шероховатость поверхности мишени (нижняя обкладка конденсатора).

После нанесения на диэлектрические пленки верхней обкладки (например, алюминия) производят испытание полученного конденсатора путем подачи на него различных напряжений (постоянное и импульсное) для улучшения качества диэлектрической пленки. Имеющиеся различные дефекты “выгорают” под воздействием напряжений. Многократно повторяя воздействия постоянных и импульсных напря-

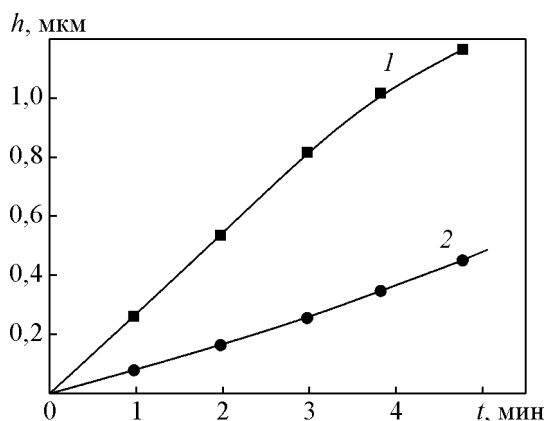


Рис. 3. Зависимость толщины диэлектрика пленки от времени процесса полимеризации при токе $I_{пл}$: 1 — 30 мА, 2 — при токе 10 мА.

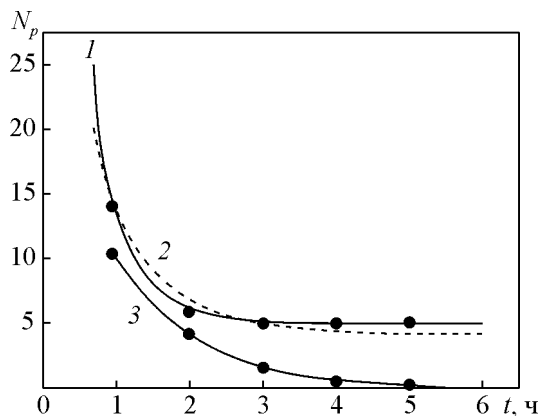


Рис. 4. Зависимость числа пробоев от времени на воздухе (1) при давлении $p = 760$ мм рт. ст. и в вакууме (2) при $p = 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, $T = 100$ °C и при напряжении на конденсаторе $U_c = 100 - 120$ В; 3 — при $T = 60$ °C, $U_c = 30$ В, $p = 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па.

жений, конденсаторы таким образом “тренируют”. Так, при $U \geq 120$ В после тренировки конденсатора самопроизвольные разряды прекращаются и конденсаторы испытывают на отсутствие (или присутствие) разрядов во времени на воздухе и в вакууме при различных температурах. На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости числа пробоев от времени на воздухе (1) и в вакууме (2) при различных температурах и напряжении на конденсаторе (2, 3). В парах азота устанавливали необходимую температуру (рис. 4, кривая 3).

Важным для использования конденсаторов в качестве детектора микрометеороидов является наличие минимума их тока утечки (сквозного тока), большая величина которого ограничивает чувствительность его к ударному воздействию частиц.

На рис. 5, 6 представлены зависимости сквозного тока I_c от напряжения на конденсаторе (рис. 5) и

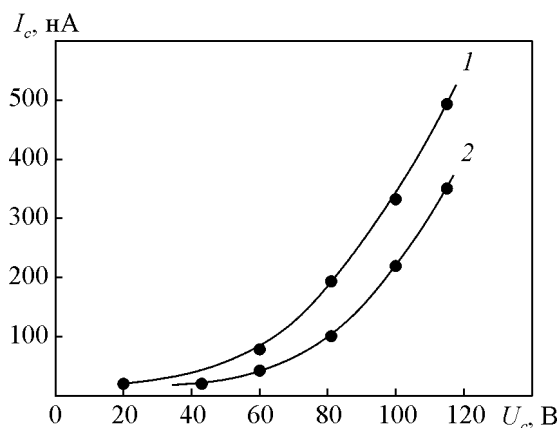


Рис. 5. Экспериментальные зависимости сквозного тока I_c от напряжения на конденсаторе при $T = 20$ °C при разных толщинах диэлектрика: 1 — $h_d = 0,3 - 0,4$ мкм, 2 — $h_d = 0,8 - 1,0$ мкм, $S_c = 120$ см².

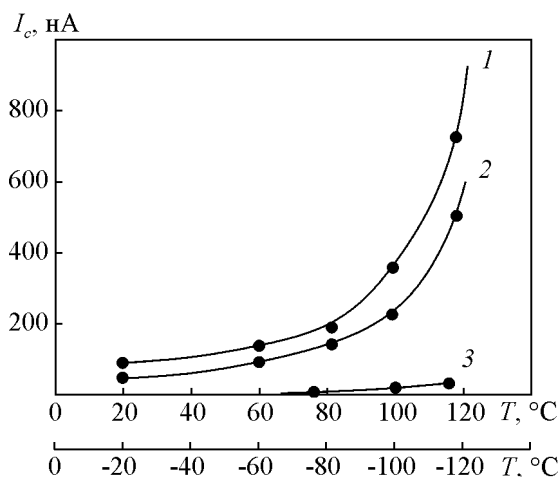


Рис. 6. Экспериментальные зависимости сквозного тока конденсатора (при $U_c = 50$ В, $S_c = 30$ см²) от температуры: 1 — $h_d = 0,5$ мкм при $T \in (0 - 120)$ °C, 2 — $h_d = 1$ мкм при $T \in (0 - 120)$ °C, 3 — $h_d = 0,5$ мкм при $T \in (0 - -120)$ °C).

температуры (рис. 6) в том числе и в диапазоне $0 \div -120$ В. Измерения проводили при различных толщинах диэлектрика h_d .

Испытания полученных конденсаторов на наличие самопроизвольных закорачиваний (пробоев) при высоких температурах указывают на целесообразность их совмещения с другими датчиками (например, с люминесцентными) с целью повышения достоверности информации о параметрах и распределении микрометеороидов в космическом пространстве.

Испытание детектора высокоскоростных частиц

Для тарировки детекторов датчиков на основе конденсаторных структур используют мощные лазеры и ускорители частиц [1 – 4].

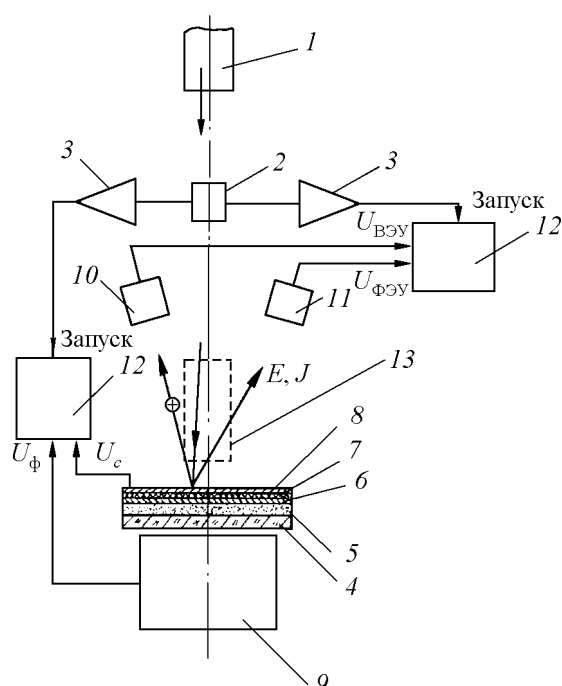


Рис. 7. Блок-схема экспериментальной установки для исследования характеристик детектора высокоскоростных частиц: 1 — ускоритель электростатического типа, 2 — цилиндр Фарадея, 3 — усилители, 4 — стекло, 5 — люминофор, 6, 7 — диэлектрики, 8 — верхняя металлическая обкладка, 9, 11 — ФЭУ, 10 — ВЭУ, 12 — осциллограф, 13 — масс-спектрометр.

Блок-схема экспериментальной установки для исследования характеристик детектора высокоскоростных частиц приведена на рис. 7 [2] и содержит ускоритель электростатического типа 1, цилиндр Фарадея 2, усилители 3, люминесцентно-конденсаторный датчик (4 — 8), фотоэлектронные умножители (ФЭУ) 9, 11, осциллографы 12, вторично-электронный умножитель (ВЭУ) 10.

Люминесцентно-конденсаторный датчик состоит из конденсатора (металл — верхняя обкладка $h_{\text{ВО}} = 0,1$ мкм — 8, диэлектрик — 7, $h_{\text{д}} = 1$ мкм, нижняя обкладка $h = 50$ мкм — 6, люминофор — 5, стеклянная подложка — 4).

Сам факт взаимодействия (момент удара) регистрируется с помощью ФЭУ 11, вторичные заряженные частицы (электроны, ионы с частицы и с мишени) — с помощью ВЭУ 10. Возбуждение ударом люминофора 5 можно регистрировать с помощью ФЭУ 9 и осциллографа 12. Таким образом возможно изучение процессов взаимодействия частицы с различными многослойными структурами. Экспериментально установлено, что при полном пробое конденсатора количество ионов, регистрируемое ВЭУ 10 в 10 — 100 раз больше, чем в случае высоко-

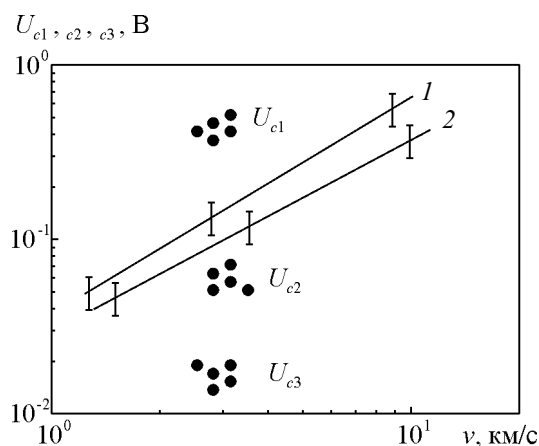


Рис. 8. Экспериментальные зависимости напряжений с трех конденсаторов от скорости частицы для разных масс (U_{c1} — напряжение с 1-го конденсатора (1 — $(1 - 2) \cdot 10^{-14}$ г), U_{c2} — напряжение со 2-го конденсатора (2 — $(4 - 5) \cdot 10^{-14}$ г), U_{c3} — напряжение с 3-го конденсатора).

скоростного взаимодействия частицы с преградой (в отсутствие пробоя при постоянной скорости и размере частицы). Вспышка света, регистрируемая ФЭУ 11, при пробое конденсатора, в 10 — 100 раз превосходит вспышку, возникающую в отсутствие пробоя при высокоскоростном соударении.

Эксперименты на данной установке проводили с частицами из алюминия и хрома в диапазоне масс и скоростей соответственно $10^{-9} - 10^{-14}$ г и $0,1 - 10$ км·с⁻¹ с помощью электростатического ускорителя. Экспериментально изучено влияние электрического поля, приложенного к исследуемой МДМ-структуре, на процессы возникновения вспышки, вторичных заряженных частиц, а также изменения электропроводности диэлектриков при высокоскоростном соударении. Рассмотрен случай взаимодействия частиц с тремя нанесенными друг на друга конденсаторами (МДМ-структурами). На рис. 8 (кривые 1 и 2) приведены экспериментальные зависимости напряжения не закороченного, но ударносжатого конденсатора от скорости частиц для двух масс $\sim (4 - 5) \cdot 10^{-14}$ и $\sim (1 - 2) \cdot 10^{-14}$ г.

Проведенные эксперименты с многослойными МДМ-структурами (в частности были нанесены друг на друга три МДМ-структуры, каждая из которых подключалась к осциллографу) доказывают, что можно путем измерения напряжений с каждого конденсатора определить характер затухания ударных волн по координате, что увеличивает информативные возможности, например, люминесцентно-конденсаторных детекторов для измерения характеристик высокоскоростных пылевых частиц.

Анализ физических параметров микрометеороидов

На рис. 9 изображена схематически МДМ-структура.

Для оценки изменения проводимости МДМ-структуры необходимо знать характер распространения ударных волн в конденсаторной структуре после удара. Для этого используют приближенные аналитические зависимости [5], либо численными методами решается система гидродинамических уравнений [6].

Закон изменения электропроводности ударно-сжатой МДМ-структуры представляем в виде [5]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2} \cdot kT(t)\right),$$

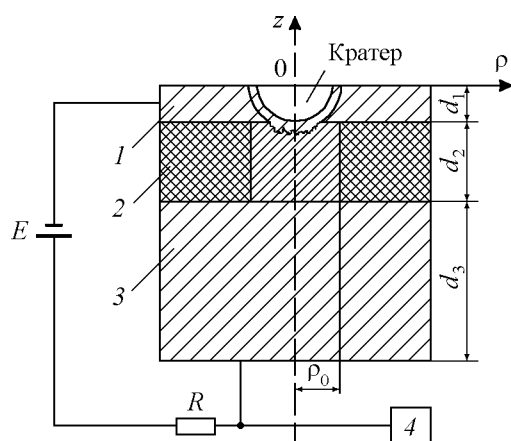


Рис. 9. Схематическое изображение МДМ-структуры. 1 — верхняя металлическая обкладка конденсатора, 2 — диэлектрик, 3 — нижняя металлическая обкладка конденсатора, 4 — измеритель проводимости диэлектрика. ρ_0 — радиус кратера.

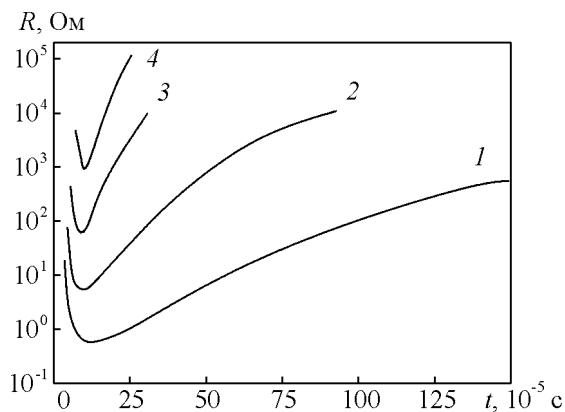


Рис. 10. Зависимость сопротивления ударно-сжатого диэлектрика от времени при различных энергиях удара: 1 — $E = 1,25 \cdot 10^{-3}$ Дж; 2 — $E = 10^{-4}$ Дж; 3 — $E = 10^{-5}$ Дж; 4 — $E = 10^{-6}$ Дж.

где σ_0 — удельная проводимость диэлектрика при нормальных условиях (температура 20°C, и давления 10⁵ Па), а ΔE — текущая ширина запрещенной зоны для полиметилметакрилата.

Как отмечено в работах [6 – 8], ширина запрещенной зоны при сжатии под давлением Δp изменяется согласно выражению:

$$\Delta E = \Delta E_0 + b \Delta p,$$

где ΔE_0 — ширина запрещенной зоны при нормальных условия, где b — постоянный коэффициент, который имеет отрицательное значение и пропорционален сжимаемости вещества, то есть, используем линейный закон аппроксимации.

На основе решения системы гидродинамики и электродинамики с учетом уравнений состояния вещества верхней обкладки и диэлектрика МДМ-структуры приведем зависимости сопротивления ударно-сжатого диэлектрика от времени при различных энергиях частицы (рис. 10).

В условиях ФКП проводимость МДМ-структуры может отличаться от зависимостей, полученных теоретически или экспериментально лабораторных условиях. Для повышения информативности МДМ-датчиков их совмещают с другими типами датчиков: ионизационными, люминесцентными и т.д.

На практике получила распространения следующая формула для сигнала, снятого с конденсаторной пленочной структуры:

$$U = cm^\alpha W^\beta,$$

где $\alpha = 0,28 \pm 0,1$, $\beta = 1,8 \pm 0,1$ (для $h = 2$ мкм), $\alpha = 0,65 \pm 0,1$, $\beta = 1,56 \pm 0,1$ (для $h = 4$ мкм) — случай когда нет пробоя, m — масса микрометеороида, W — скорость микрометеороида. α, β, c — константы характерные для конкретного датчика.

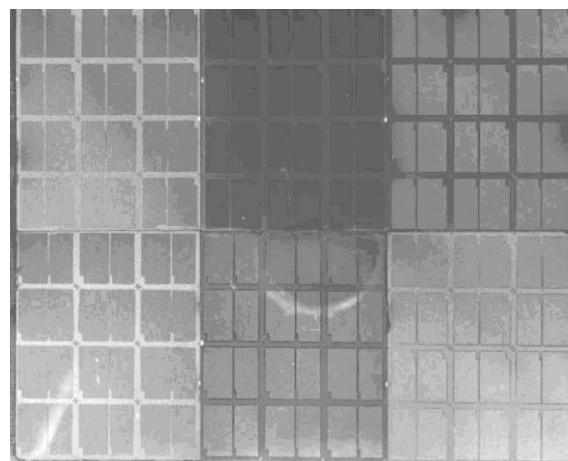


Рис. 11. Матрица тонкопленочных конденсаторов. Размеры матрицы 150 × 120 мм, масса датчика 50 г, масса вместе с защитным кожухом 200 г.

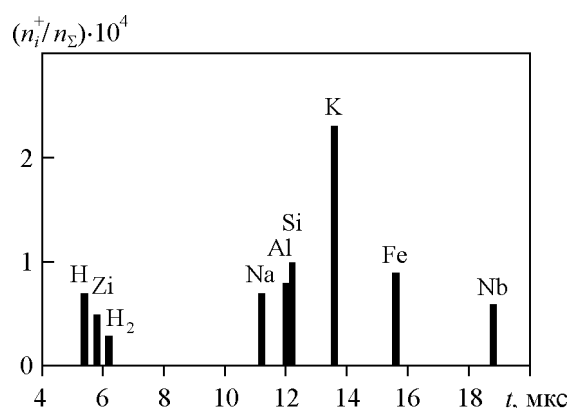


Рис. 12. Масс-спектрометрические спектры продуктов соударения ускоренных частиц SO_2 о МДМ-структуру, с верхней обкладкой из Nb, полученные с помощью электростатического ускорителя в диапазоне скоростей частиц 15 – 20 км/с и радиуса частицы $\rho = 0,05 - 0,1$ мкм, где n_i^+ — количество положительных ионов i -элемента, n_Σ — общее число ионов.

На основе проведенных нами исследований были разработаны датчики люминесцентно-конденсаторного типа, а также матрицы тонкопленочных конденсаторов (рис. 11). Указанные датчики использовали в космических экспериментах [9, 10].

Анализ химического состава микрометеороидов

Метод экспонирования в космических условиях различных поверхностей (специально обработанных полупроводников, металлов) с последующим анализом кратеров, возвращаемых на Землю образцов, получил свое развитие в СССР, США с конца 70-х годов и к настоящему времени дополняет прямые методы измерений потоков частиц. Преимущества таких отсроченных измерений в простоте и отсутствии сложной аппаратуры, устанавливаемой на космических аппаратах. Нами был разработан метод анализа материала частиц в кратерах на экспонированных поверхностях в лабораторных условиях в виде матрицы пленочных конденсаторов (рис. 11) с целью получения информации о химическом составе микрометеороидов. На ситалловую подложку нанесли структуру металл (Ag) — диэлектрик (полиметилметакрилат) толщиной 0,3 – 0,6 мкм и верхнюю обкладку из серебра толщиной 0,1 мкм. После экспонирования на ускорителе находили кратеры в закороченных конденсаторах, затем образцы помещали в вакуумную камеру времяпролетного пылеударного масс-спектрометра, на закороченные конденсаторы подавали короткий импульс амплитудой 200 – 300 В, превращая закороченный участок

в плазму, при этом записывали спектры ионов, по которым находили элементы оставшегося в кратерах материала частицы.

Полученные с помощью масс-спектрометра спектры показаны на рис. 12. Они получены при исследовании продуктов соударения ускоренных частиц SO_2 о МДМ-структуру, с верхней обкладкой из Nb [11].

Заключение

1. Разработанная технология получения органических пленок на больших площадях позволяет изготавливать детекторы микрометеороидов в различных конструктивных исполнениях, в том числе и в сочетании с другими детекторами (люминесцентными, ионизационными и др.).

2. Приведенные испытания МДМ-структур выявили высокое качество конденсаторов, пригодных для использования в качестве детектора микрометеороидов.

3. Разработаны различные конструкции детекторов на основе данной технологии, некоторые из которых прошли испытания в космических условиях.

Работа выполнена в ходе НИР в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 – 2013 годы (ГК №П889 от 26 мая 2010 года).

Литература

1. Гришин В.К., Нусинов А.А., Семкин Н.Д. Инженерная модель космической среды для диапазона орбит 300 – 1000 км и солнечной активности $F_{10.7} = 70 - 370$. Ракетно-космическая техника. Труды, Серия XII. Вып.1. Расчет проектирование, конструирование и испытания космических систем. РКТ, “Энергия”, 2001, 146 с.
2. Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Богоявленский Н.Л. Проводимость ударносжатого канала пленочной МДМ-структуры в режиме стационарного свечения. ЖТФ, 2007, т. 77, № 1, с. 85 – 89.
3. Семкин Н.Д. Исследование характеристик конденсаторного датчика для регистрации твердых частиц с помощью импульсного лазера. Известия высших учебных заведений, Приборостроение. Издание Ленинградского института точной механики и оптики, 1986, т. XXIX, № 8, с. 60 – 64.
4. Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Кондрашов В.Н. Исследование характеристик ионизационно-конденсаторного преобразователя пылевых частиц, полученных с помощью импульсного лазера. Препринт ТРИНИТИ-0040-А ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1998, 12 с.

5. Семкин Н.Д., Воронов К.Е. Проводимость ударно-сжатых МДМ-структур на основе полиметилметакрилата. ЖТФ, 1998, т. 68, № 8, с. 63 – 66.
6. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966, 686 с.
7. Бриджмен Пол В., Варшауэр Д. [ред.]. Твердые тела под высоким давлением, пер. с англ., М.: Мир, 1966, 524 с.
8. Вершинин Ю.Н., Ильичев Д.С., Морозов П.А.. Влияние ударного сжатия диэлектриков на процесс инъекции валентных электронов в сильных электрических полях. ЖТФ, 2000, т. 70, вып. 1, с. 85 – 87.
9. Novikov J.S., Voronov K.E., Semkin N.D. et al. Attempt of measurment of space debris microparticles flux in Geosynchronous Orbit. Proc. Second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany 17–19 March 1997, p. 135 – 138.
10. Апати И., Васюкова З.В., Кащеев Б.Л. и др. Результат исследования метеорного вещества на ИСЗ “Интеркосмос-14” и сопутствующих наземных наблюдений метеоритов. Космические исследования, 1981, т. 19, вып. 5, с. 700 – 794.
11. Семкин Н.Д., Пияков И.В., Воронов К.Е., Помельников Р.А. Перспективы развития времяпролетных масс-спектрометров для анализа газовых и пылевых частиц. Прикладная физика, 2002, № 2, с. 124 – 141.

Семкин Николай Данилович — Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (Национально исследовательский университет) (г.Самара), доктор технических наук, директор Института космического приборостроения СГАУ. Специалист в области космического приборостроения и моделирования факторов космической среды. E-mail: talex85@mail.ru.

Телегин Алексей Михайлович — Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (Национально исследовательский университет) (г.Самара), аспирант, инженер Института космического приборостроения СГАУ. Специалист в области космического приборостроения и моделирования факторов космической среды. E-mail: talex85@mail.ru.