

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.384.62

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА ПРОЛЕТА
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ
ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА**

© 2023 г. К. Е. Воронов^а, И. В. Пияков^а, М. П. Калаев^а, А. М. Телегин^{а,*}

^аСамарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
(Самарский университет)

Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34

*e-mail: talex85@mail.ru

Поступила в редакцию 28.12.2022 г.

После доработки 28.12.2022 г.

Принята к публикации 09.03.2023 г.

В работе рассмотрены различные конструкции детекторов пролета заряженных микрочастиц, которые могут быть установлены на масс-спектрометры с целью регистрации момента пролета микрочастицы и инициации процесса измерения. Наибольший диапазон регистрируемых масс и скоростей показала конструкция детектора, изготовленная на основе диэлектрического основания (PLA-пластик) с использованием 3D-принтера и нихромовой нити.

DOI: 10.31857/S0032816223040183, EDN: RBNSPE

1. ВВЕДЕНИЕ

Для исследования элементного состава высокоскоростных микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) используются времяпролетные масс-спектрометры. Общий принцип работы времяпролетного масс-спектрометра показан на оптической схеме (рис. 1). В начальный момент пылевая частица ударяется о мишень, в результате чего образуется облако слабо ионизированного газа, состоящее из ионов материалов частицы и мишени. Во время пролета через сетку-детектор (измерительный электрод) формируется электрический сигнал, по которому начинается запись кадра данных, содержащих информацию с приемника ионов. Под действием электрического поля, образованного разностью потенциалов мишени и экранирующей сетки, ионное облако ускоряется в направлении ионного зеркала. Ионное зеркало выполнено в виде четырех сеток в форме параболоидов, фокус которых совпадает с приемником ионов, и пяти выравнивающих электродов. После отражения от ионного зеркала ионы попадают в приемник на основе вторичного электронного умножителя ВЭУ-7, где формируется ионный импульс, который затем поступает на микроконтроллерный модуль через зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ).

Для того чтобы контролировать скорость удаляющихся частиц, а также фиксировать сам момент начала процесса измерения и формирования нужных напряжений для работы ионного зеркала,

используется измерительный электрод — детектор пролета заряженных микрочастиц (рис. 1).

В работах [1–4] рассмотрены различные конструктивные решения детекторов пролета микрочастиц. Эти устройства представляют собой либо отдельную конструкцию, либо соединены с масс-спектрометром, образуя с ним единое целое.

В работах [1, 2] для детекторов пролета используются проволочные ортогонально направленные измерительные электроды. Эти детекторы обладают высокой прозрачностью, механической прочностью и большой чувствительной областью.

В работе [5] описан прибор для измерения двух составляющих вектора скорости микрочастиц, при этом измерительные электроды представляют собой сетку. В работе [6] рассмотрена конструкция детектора, состоящего из двух полукруглых электродов-сеток, а также описан подход к измерению траектории заряженной частицы пыли на основе анализа формы наведенного сигнала, которая используется для вычисления скорости, массы и траектории частиц.

2. ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА ИЗМЕРЕНИЯ

В данной работе представлено экспериментальное исследование конструкций измерительных электродов (сеток-детекторов) для регистрации пролетных импульсов, вызванных заряженными микрочастицами. При этом рассматриваемые конструкции должны иметь возможность соеди-

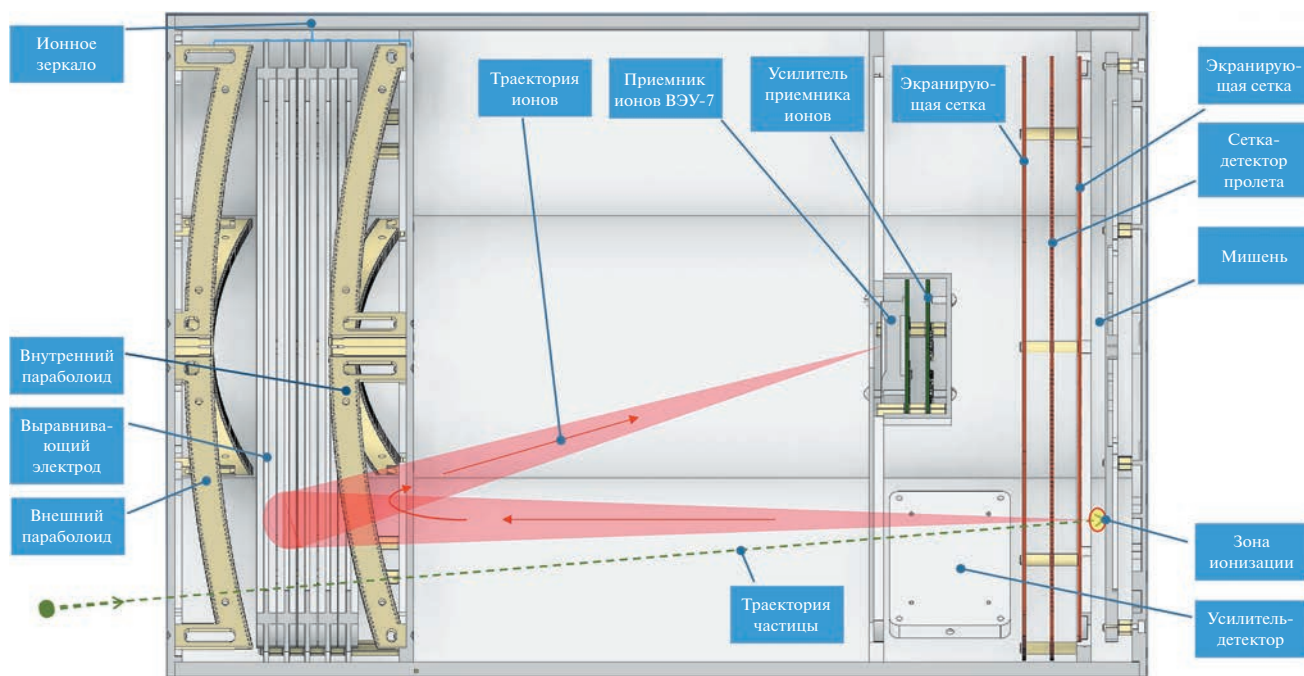


Рис. 1. Оптическая схема масс-спектрометра.



Рис. 2. Фронтальный вид времяпролетного масс-спектрометра.

нения с пылеударным времяпролетным масс-спектрометром (рис. 2) [7].

Микрочастицы (космический мусор и микрометеороиды), находясь в околоземном пространстве, заряжаются до некоторого потенциала под действием факторов космического пространства

[5]. При пролете заряженной частицы через измерительный электрод на ней наводится импульс тока, форму которого можно описать согласно теореме Рамо–Шокли:

$$i_k(t) = Q(\vec{V} \cdot \vec{E}_k), \quad (1)$$

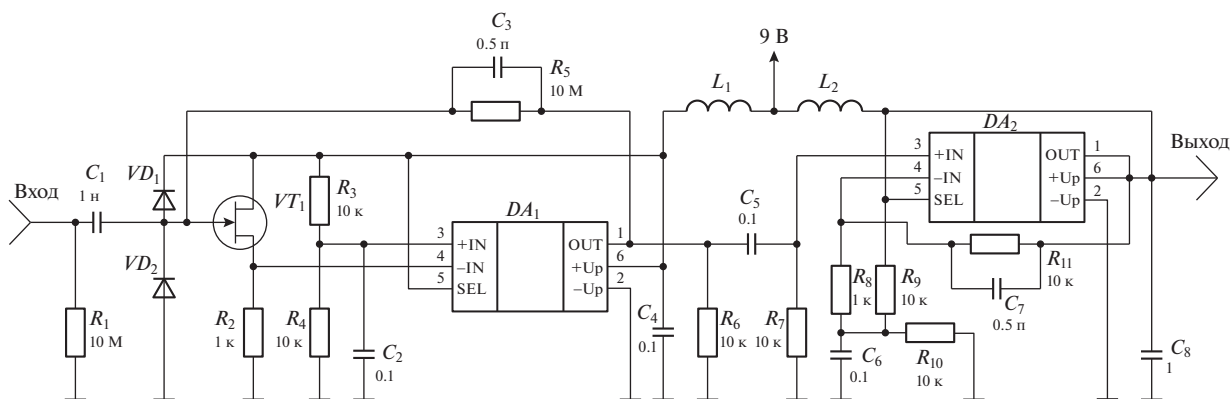


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема зарядочувствительного усилителя.

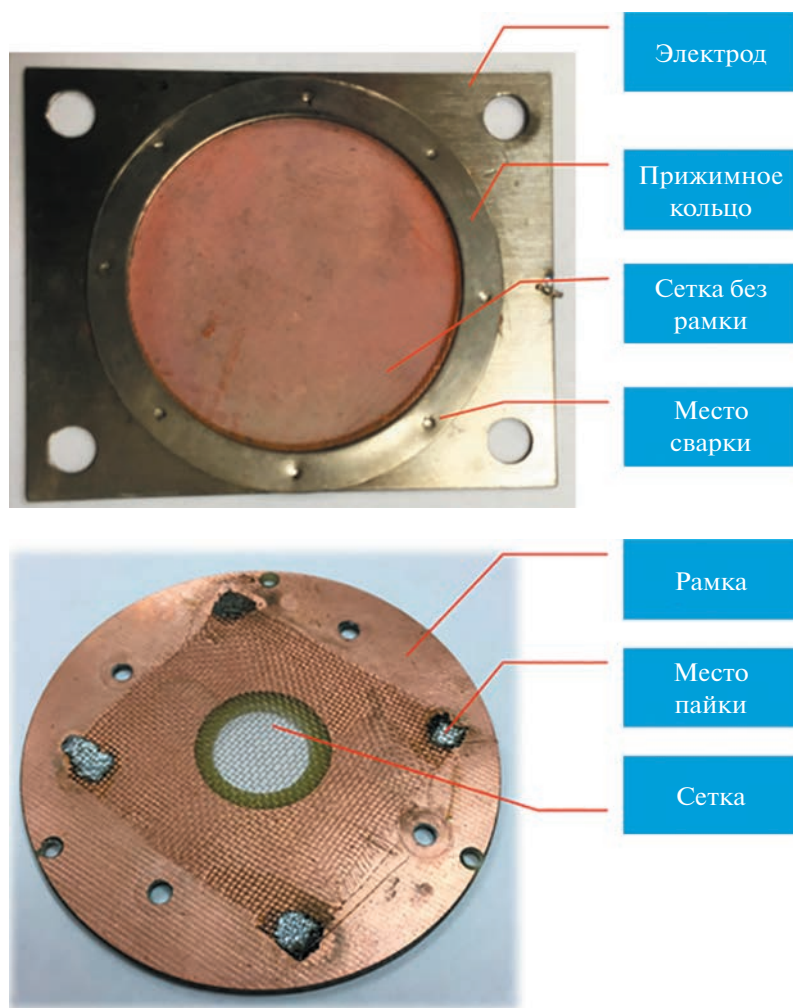


Рис. 4. Конструкции измерительных электродов для регистрации пролетных импульсов, выполненные: а — точечной сваркой сетки и металлического каркаса; б — пайкой сетки к металлическому каркасу.

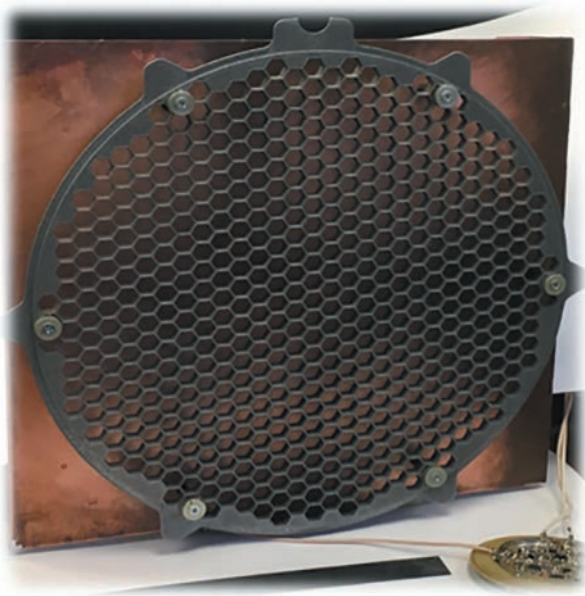


Рис. 5. Алюминиевый электрод на фоне медной мишени, изготовленный с использованием аддитивных технологий.

где $\vec{V}$ — вектор скорости микрочастицы, $\vec{E}_k$ — вектор эффективной (взвешенной) напряженности поля в точке, где находится заряд Q в момент времени t [8–11].

Выходное напряжение измерительной схемы можно рассчитать по формуле [12, 13]:

$$\frac{d}{dt} U_n(t) + \frac{1}{R_H C} U_n(t) = i_{ind}(t) \frac{1}{C}, \quad (2)$$

где $U_n(t)$ — напряжение на входе усилителя, подключенного к измерительному электроду, R_H — входное сопротивление усилителя, C — паразитная емкость электрода и входных цепей ЗЧУ.

Дифференциальное уравнение, описывающее сигнал на выходе измерительной сетки, представляет собой неоднородное уравнение первого порядка, решение которого можно найти методом Бернулли:

$$U_n(t) = \exp\left(-\frac{t}{R_H C}\right) \left(\int \frac{i_{ind}(t)}{C} \exp\left(\frac{t}{R_H C}\right) dt + C_1 \right), \quad (3)$$

где C_1 — постоянная. Допустим, R_H имеет очень большой номинал, в этом случае дифференциальное уравнение упростится:

$$\frac{d}{dt} U_n(t) = i_{ind}(t) \frac{1}{C}, \quad (4)$$

тогда

$$U_n(t) = \int \frac{i_{ind}(t) dt}{C} = \frac{Q_{ind}(t)}{C} + C_2, \quad (5)$$

где C_2 — постоянная интегрирования, учитывающая, что в начальный момент времени напряжение на конденсаторе равняется 0.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования разработанных конструкций детекторов пролетных импульсов проводились на ускорителе заряженных микрочастиц, принцип работы которого подробно описан в работе [14].

В качестве материалов измерительных электродов, из которых изготавливают пролетные датчики, используются металлы и сплавы, к которым предъявляются следующие требования: температурная стабильность геометрических размеров, низкое газовыделение в вакууме, механическая прочность, стабильное электрическое сопротивление, паяемость (возможность выполнения пайки). Сигнал с измерительных электродов поступает на вход ЗЧУ, принципиальная схема которого показана на рис. 3. Выход ЗЧУ подключен к третьему входу осциллографа GDS-2204, на первый и второй входы которого подаются сигналы с двух индукционных датчиков, представляющих собой два металлических цилиндра, установленных на оси ускорителя, для контроля скорости микрочастиц [3, 14].

ЗЧУ состоит из двух ступеней (рис. 3). Первая состоит из операционного усилителя DA_1 (LT6200-10), к входу которого подключен каскад на полевом транзисторе VT_1 (BF862), включенный по схеме истокового повторителя. VT_1 и DA_1 охвачены отрицательной обратной связью по току (резистор R_5) и образуют трансимпедансный усилитель с полосой пропускания около 5 МГц. Диоды VD_1 и VD_2 на входе усилителя предназначены для защиты входа усилителя от перенапряжения. Вторая ступень, реализованная на операционном усилителе DA_2 , предназначена для усиления сигнала по напряжению (при указанных на схеме номиналах коэффициент усиления $K_u = 11$), а также для согласования схемы с низким выходным сопротивлением последующих каскадов и с емкостной нагрузкой.

На рис. 4а и 4б показаны конструкции измерительных электродов для регистрации пролетных импульсов, выполненные в виде сеток и отличающиеся только методом крепления сеток.

Достоинствами конструкции, показанной на рис. 4а, являются ее простота, а также небольшая стоимость изготовления. Недостатком является то, что точечную сварку нельзя использовать для соединения более толстых слоев металлов. Кроме того, при сварке возможно разрушение сетки.

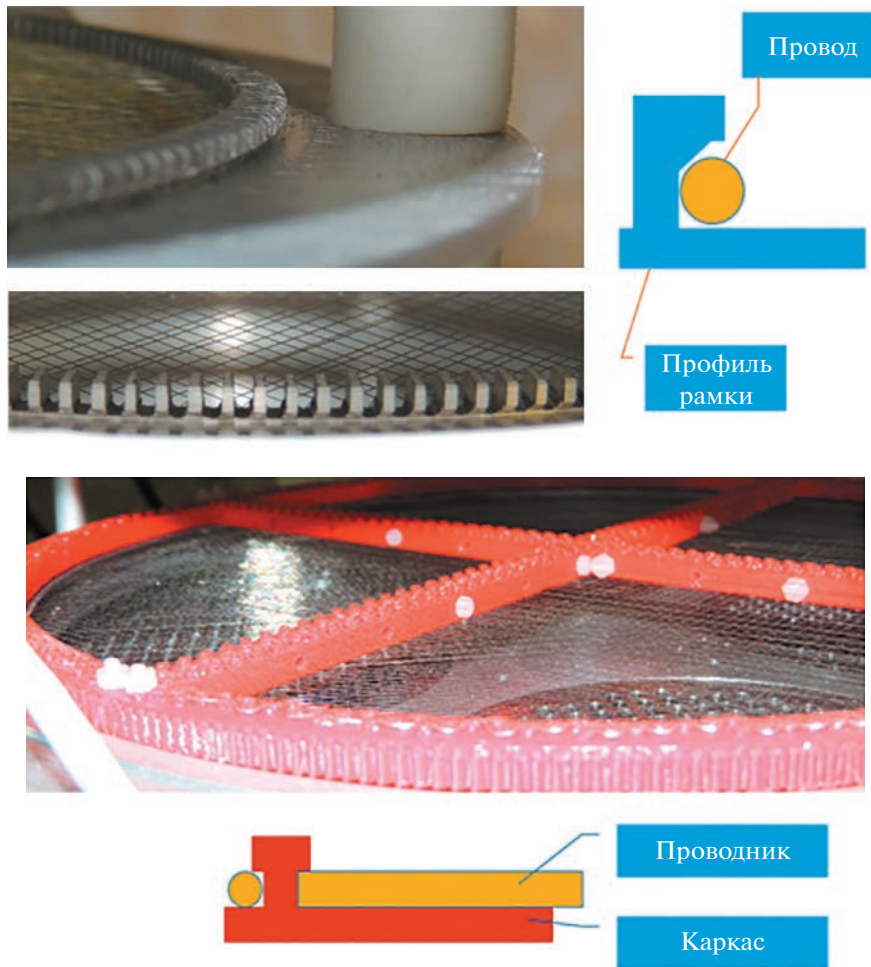


Рис. 6. Сетки, намотанные на каркас: **а** — сетка на алюминиевом каркасе; **б** — нихромовая нить намотана на каркас из PLA-пластика.

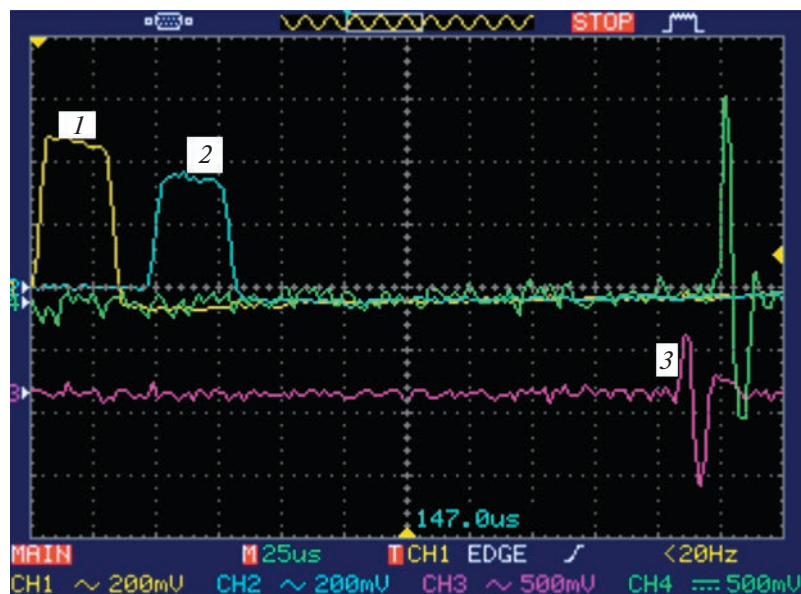


Рис. 7. Осциллограммы сигналов: *1* и *2* — с выходов цилиндрических индукционных датчиков ускорителя микрочастиц, *3* — с выхода ЗЧУ.

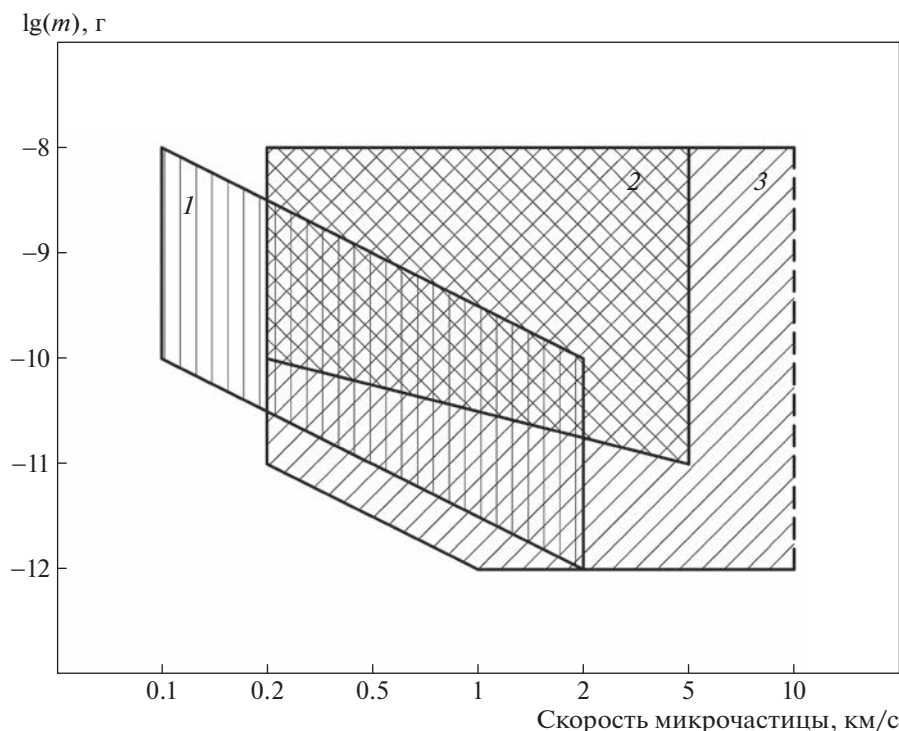


Рис. 8. Диаграмма области применения различных конструкций: 1 — алюминиевый электрод (соты), 2 — сетка на алюминиевом каркасе, 3 — сетка на диэлектрическом каркасе.

Достоинствами конструкции, показанной на рис. 4б, являются ее простота и хороший электрический контакт между сеткой и рамкой сетки. К недостаткам можно отнести влияние на процесс пайки размеров электрода за счет теплоотвода, а также необходимость подбора материала припоя и флюса в зависимости от материалов электрода и сетки.

Общими недостатками конструкций, показанных на рис. 4а и 4б, являются низкая прозрачность сетки и ее большая емкость, что приводит к уменьшению напряжения на входе ЗЧУ, согласно формулам (2), (5).

Следующая конструкция (рис. 5) измерительного электрода была изготовлена методом 3D-печати на принтере SLM 280HL в виде сплошного слоя из алюминия.

Достоинством данной конструкции являются высокая точность воспроизводства, возможность реализации сложной конфигурации электродов, а также получение более высокой длительности протекного импульса. Недостатками являются высокая стоимость изготовления, низкая прозрачность сеток, большая масса и собственная емкость конструкции (порядка 140 пФ).

Для повышения прозрачности измерительных электродов и уменьшения массы можно использовать электроды в виде сеток, при этом каркас для сеток может быть как диэлектрическим, так и

из металла. На рис. 6а показана сетка из нихромовой нити на алюминиевом круглом каркасе большого диаметра.

Исследования конструкции, приведенной на рис. 6а, показали наличие большой паразитной емкости (113 пФ), приводящей к уменьшению выходного сигнала с усилителя. Замена металлического каркаса на диэлектрический позволила снизить паразитную емкость до 70 пФ (рис. 6б). На рис. 7 представлен пример осциллограммы, полученной для конструкции, показанной на рис. 6б.

На рис. 8 показана диаграмма области применения рассмотренных конструкций в зависимости от скорости и массы микрочастиц.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что модуль для измерения вектора скорости высокоскоростных микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) целесообразно выполнять в виде устройства, которое имеет конструктивную возможность отсоединения от масс-спектрометра с целью проведения отдельной его настройки и изменения конфигурации электродов. Исследование различных конструкций измерительных электродов показало, что в зависимости от конструкции изменяется диапа-

зон регистрируемых масс и скоростей микрометеоритов. Электрод в виде сотовой структуры из алюминия имеет хорошую чувствительность в области низких масс и скоростей частиц. Наибольший диапазон регистрируемых масс и скоростей имеет конструкция с диэлектрическим основанием (PLA-пластик) и нихромовой нитью. Такая конструкция отличается относительно небольшой собственной емкостью и возможностью конфигурации каркаса на 3D-принтере для любого профиля поперечного сечения масс-спектрометра (круглый, квадратный и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Auer S., Grün E., Kempf S., Srama R., Srowig A., Sternovsky Z., Tschernjawski V. // Review of scientific instruments 2008. V. 79. Art. № 084501. <https://doi.org/10.1063/1.2960566>
2. Xie J., Sternovsky Z., Auerd S., Drake K., Grün E., Horanyi M., Le H., Srama R. // Planetary and Space Science. 2013. V. 89. P. 63. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.01.004>
3. Пияков А.В., Телегин А.М. // ПТЭ. 2022. № 4. С. 106. <https://doi.org/10.31857/S0032816222040243>
4. Auer S. // Rev. Sci. Instrum. 1975. V. 46. № 2. P. 127. <https://doi.org/10.1063/1.1134155>
5. Auer S., Grün E., Srama R., Kemp S., Auera R. // Planetary and Space Science. 2022. V. 50. P. 773. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(02\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(02)00019-3)
6. Li Y., Kempf S., Simolka J., Strack H., Grün E., Srama R. // Advances in Space Research. 2017. V. 59. P. 1636. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.037>
7. Пияков И.В., Калаев М.П., Сухачев К.И., Воронов К.Е., Телегин А.М. // ПТЭ. 2020. № 6. С. 83. <https://doi.org/10.31857/S0032816220060154>
8. Воронов К.Е., Телегин А.М., Рязанов Д.М. // Прикладная физика. 2021. № 4. С. 73. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-4-73-80>
9. Фельд Я.Н. // Докл. АН СССР. 1953. Т. 93. № 3. С. 447.
10. Герштейн Г.М. Моделирование полей методом электростатической индукции. М.: Наука, 1970.
11. Телегин А.М. // Инженерная физика. 2021. № 9. С. 27.
12. Ионовенков А.Н., Константинов О.В., Пирогов В.И. // ЖТФ. 1993. Т. 63. № 9. С. 1.
13. Поклонский Н.А., Вырко С.А., Кочерженко А.А. // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 11. С. 75.
14. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Богоявленский Н.Л., Горюнов Д.В. // ПТЭ. 2007. № 2. С. 140.