

УДК 621.3

PACS: 07.05.Dz, 07.55. Jg, 94.80.+g

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-84-90

EDN: WBQIYZ



Исследование работы устройства с микроканальной пластиной в качестве приемника ионов для регистрации пылевых частиц

К. Е. Воронов, И. В. Пияков, Д. М. Рязанов, А. М. Телегин

Рассматривается конструкция устройства, основанного на ионизационном принципе действия, для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора с относительно низкими скоростями (до 4 км/с). Повышение чувствительности устройства достигается путём применения ионного зеркала и микроканальной пластины в качестве приемника ионов. Включение схемы усилителя с дифференциальным выходом используется для уменьшения электромагнитных помех.

Ключевые слова: микрометеороиды, усилитель, пылевые частицы, зеркало, микроканальная пластина.

Введение

Факторы космического пространства околоземных орбитах оказывают негативное влияние на электронику и элементы конструкции космических аппаратов. Одним из таких факторов является воздействие пылевых частиц (микрометеороидов и частиц космического мусора). Исследование распределения данных частиц в околоземном пространстве аппаратурой с поверхности Земли затруднительно, поэтому такие частицы контролируются с помощью бортовых приборов [1–6]. При этом одним из самых чувствительных ме-

тодов регистрации пылевых частиц является ионизационный метод, основанный на измерении ионов, образовавшихся при ударе пылевых микрочастиц с контролируемой поверхностью (мишенью) [5].

При взаимодействии пылевой частицы с поверхностью детектора возможно несколько различных механизмов ионообразования. Для частиц с малыми скоростями (до 1 км/с) [7] наиболее вероятным является механизм ионизации при искровом вакуумном пробое промежутка «частица-мишень». Однако, при этом считается, что пылевая частица должна обладать зарядом. При увеличении скорости пылевой частицы добавляется кинетический механизм ионизации. Таким образом, при построении устройства для регистрации пылевых частиц будем считать, что микрометеороид или частица космического мусора при взаимодействии с мишенью прибора непременно образует облако слабо-ионизированного газа. При этом ионизации подвергаются материал частицы и примеси легко-ионизируемых щелочных элементов в составе мишени. Так как количество ионов при низкоскоростном взаимодействии мало, то следует предусмотреть их фокусировку в пространстве. Для регистрации ионов целесообразнее использовать детектор ионов на основе микроканальных пластин, так как он обладает большой пло-

Воронов Константин Евгеньевич^{1,2}, директор, доцент, к.т.н.

Пияков Игорь Владимирович^{1,2}, с.н.с., доцент, к.ф.-м.н.

Рязанов Дмитрий Михайлович¹, н.с.

Телегин Алексей Михайлович^{1,2}, с.н.с., доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: talex85@mail.ru

¹ Самарский университет, институт космического приборостроения (ИКП-214).

Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34а.

² Самарский университет.

Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

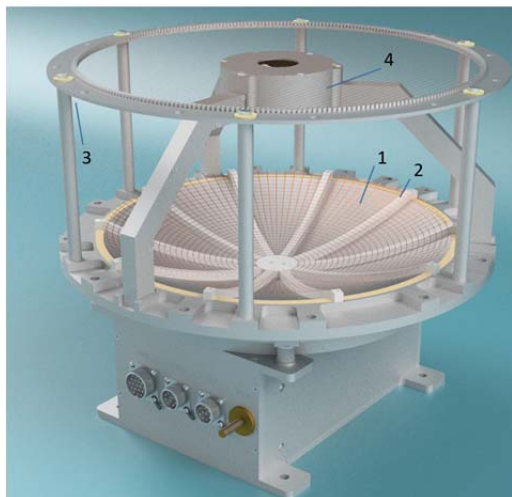
Статья поступила в редакцию 7.09.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 15.11.2023

© Воронов К. Е., Пияков И. В., Рязанов Д. М., Телегин А. М., 2023

щадью входного окна и высоким коэффициентом усиления, что позволяет регистрировать малые концентрации ионов, расфокусированные в пространстве. На основе вышеизложенного разработана следующая конструкция устройства (рис. 1) для регистрации низкоскоростных частиц для лабораторных исследований.



а)



б)

Рис. 1. Устройство для регистрации низкоскоростных частиц: а) – трехмерная модель (1 – мишень, 2 – заземлённая сетка параболической формы, 3 – плоская заземлённая сетка, 4 – приёмник ионов); б) – физический макет

В данной работе рассматривается разработанное и изготовленное авторами устройство для регистрации ионов, образующихся при ударе микрочастиц относительно небольших скоростей (до 4 км/с), в случае когда число образовавшихся ионов невелико относительно числа ударов выше 7–8 км/с.

Описание принципа действия устройства

Принцип действия устройства показан на рисунке 2 и заключается в следующем: пылевая частица 5 при подлёте к мишени 1 за счёт электростатического разряда превращается в облако слабоионизированного газа 6, которое ускоряется электрическим полем ионной линзы из мишени 1 и заземлённой сетки параболической формы 2. Для обеспечения наилучшей пространственной фокусировки мишень выполнена в виде параболоида вращения с фокусным расстоянием F . В результате ионы регистрируются приёмником 4, расположенным в фокусе ионной линзы 1–2.

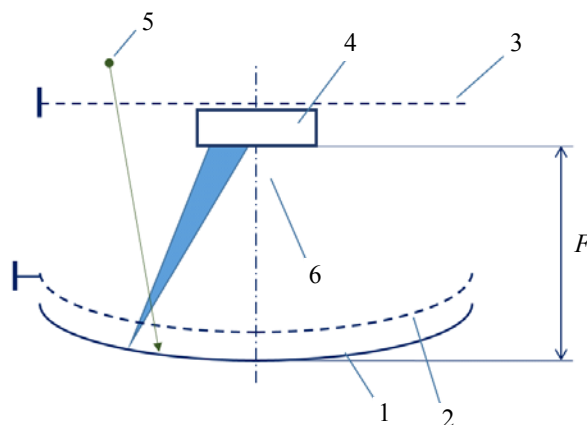


Рис. 2. Схема построения устройства для регистрации пылевых частиц: 1 – мишень, 2 – заземлённая сетка параболической формы, 3 – плоская заземлённая сетка, 4 – приёмник ионов, 5 – пылевая частица, 6 – ионное облако

Для экспериментального исследования был изготовлен макет устройства, внешний вид которого представлен на рис. 1б. Особое внимание следует уделить приёмнику ионов. Входная сетка микроканальных пластин ВЭУ-7 находится под высоким потенциалом в минус 2800 В, поэтому приёмник ионов необходимо разместить в заземлённом экране, а входное окно защитить сеткой. На рисунке 3 показана электрическая схема усилителя, используемого для снятия сигнала с микроканальной пластины. Усилитель имеет 2 каскада: первый каскад обеспечивает основное усиление и инвертирует сигнал, а второй каскад представляет собой преобразователь сигнала на дифференциальную линию. Такое включение обеспечивает хорошую защиту от электромагнитных помех. Выходы усилителя подключаются к осциллографу.

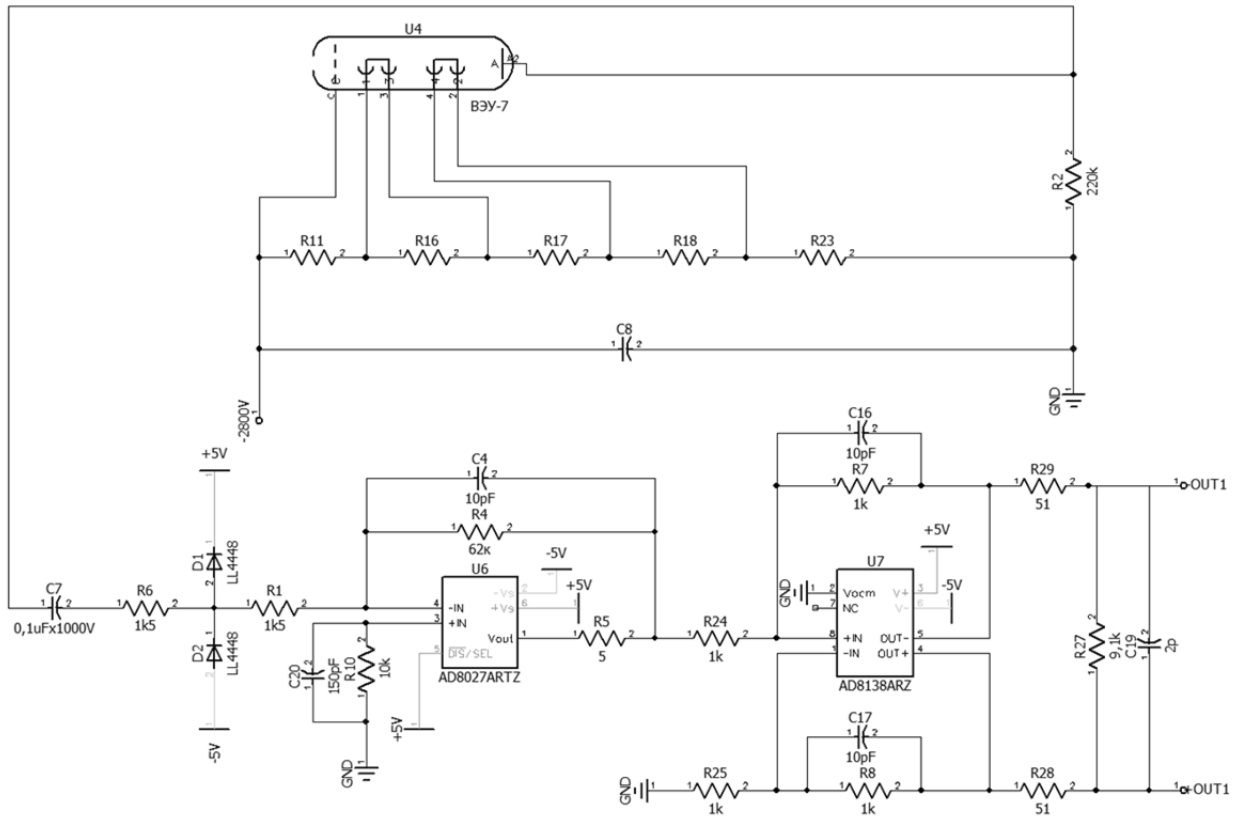


Рис. 3. Схема приёмника ионов

Описание проведения эксперимента

Эксперимент с устройством был проведен на электростатическом ускорителе микро-частиц [8, 9], который позволяет имитировать пылевые частицы микронных размеров со скоростями от 100 м/с до 10 км/с (рис. 4). При этом следует отметить, что условия эксплуатации прибора в космосе совершенно иные: микро-частицы в космическом пространстве могут иметь существенно меньший

заряд, чем в лабораторном эксперименте. Для синхронизации с ускорителем частиц на осциллограф транслируются сигналы не только с дифференциального усилителя (рис. 3), подключённого к микроканальной пластине, но также сигналы с индукционного детектора пролёта частицы в тракте ускорителя, который выполнен в виде двух полых металлических цилиндров длиной 60 мм, разнесённых на расстояние в 43 мм [8].

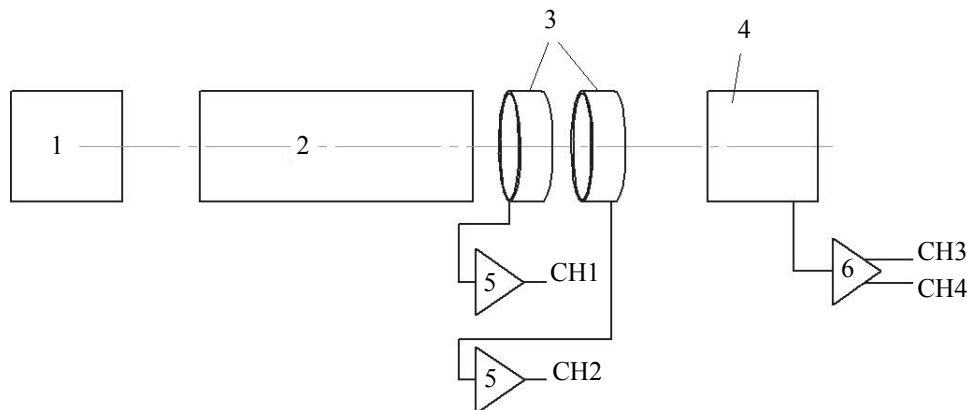


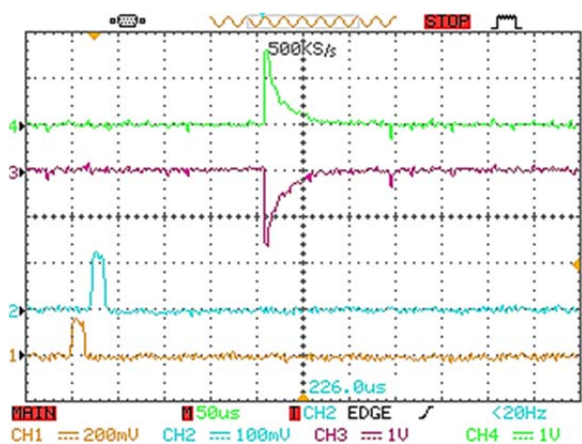
Рис. 4. Схема проведения эксперимента: 1 – инжектор пылевых частиц; 2 – ускоритель микро-частиц, 3 – детекторы пролёта микро-частиц; 4 – макет устройства для регистрации пылевых микро-частиц; 5 – зарядочувствительные усилители; 6 – усилитель с дифференциальными выходами; CH1, CH2, CH3, CH4 – номера каналов усилителей

Полученные осциллограммы представлены на рис. 5. На рис. 5а виден ионный импульс от относительно быстрой частицы со скоростью около 4 км/с. При этом ионный импульс имеет ярко выраженный фронт и экспоненциальный спад. При уменьшении скорости пылевой частицы до примерно 2,5 км/с (рис. 5б) амплитуда импульса немного увеличивается, и становится видно, что она ограничивается напряжением питания. Это можно объяснить тем, что частица на рис. 5б имеет больший размер по сравнению с рис. 5а, а соответственно и большее количество ионов, получаемых при ионизации. При рассмотрении пылевых частиц с более меньшими скоростями (рис. 5в – скорость около 1,7 км/с, рис. 5г – около 1 км/с) ионные импульсы так же поддаются регистрации, при этом и амплитуда, и длительность импульса в основном зависят от размера пылевой частицы, а не от её скорости. На рис. 5д показан ионный импульс от относительно небольшой частицы: число ионов при этом незначительно и хорошо видны фронт и спад импульса. Амплитуда вы-

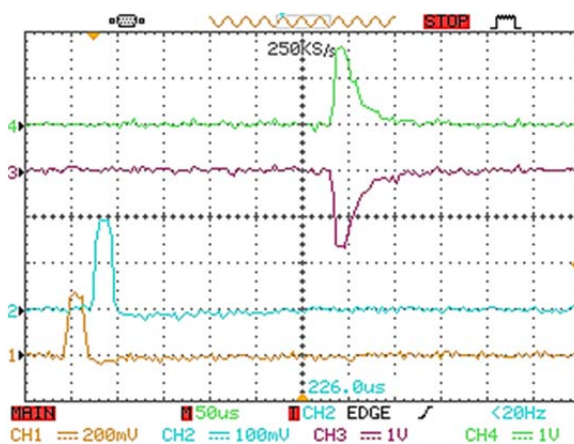
ходного сигнала не доходит до ограничения, а длительность по уровню 0,5 составляет чуть более 20 мкс. На рис. 5е показан ионный импульс от гораздо большей частицы, однако его длительность примерно сопоставима с предыдущим графиком, что говорит о схожих энергиях ионизации в обоих случаях.

Таким образом, из приведённых графиков можно сделать следующие выводы:

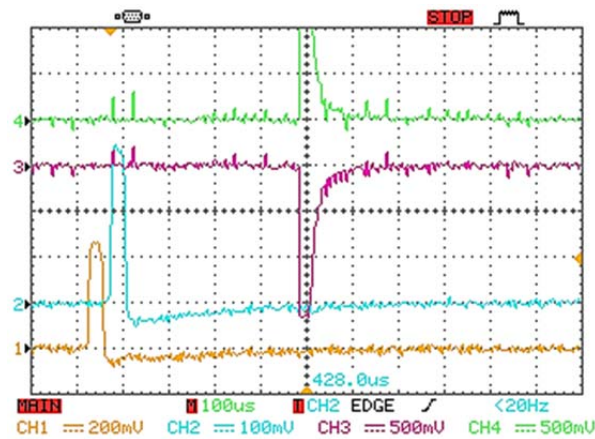
- 1) Даже при небольших скоростях пылевых частиц (от 1 до 4 км/с) наблюдается их ионизация при ударе в неподвижную мишень, что объясняется искровым вакуумным пробоем промежутка «заряженная пылевая частица-мишень» [7].
- 2) Длительность ионного импульса слабо зависит или не зависит от размера пылевой частицы и её скорости.
- 3) По амплитуде ионного импульса можно судить о размере пылевой частицы.
- 4) Микроканальные пластины в качестве приёмника ионов обеспечивают высокую чувствительность устройства.



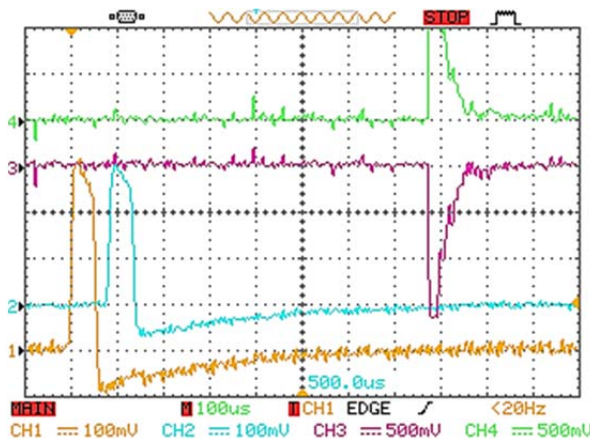
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Ионные импульсы (каналы 1, 2 подключены к системе регистрации ускорителя, каналы 3, 4 – положительный и отрицательный выходы приёмника ионов)

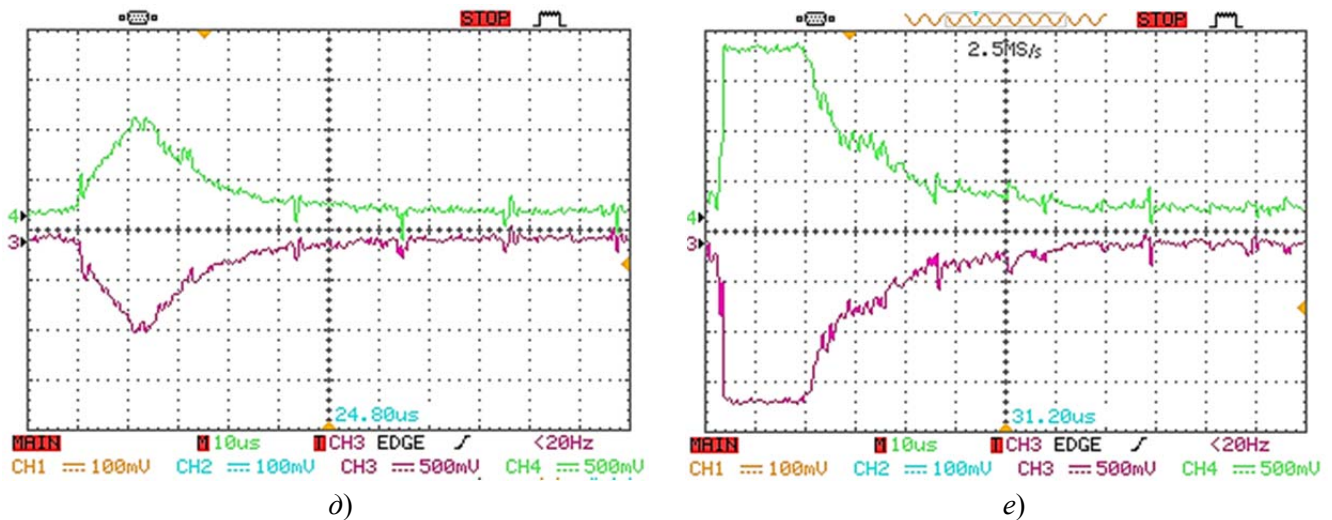


Рис. 5. Окончание

Высокая чувствительность приёмника ионов и схема его включения позволила авторам модернизировать постановку эксперимента с целью отказа от мишени специфической формы. Схема модернизированного экспериментального макета показана на рис. 6.

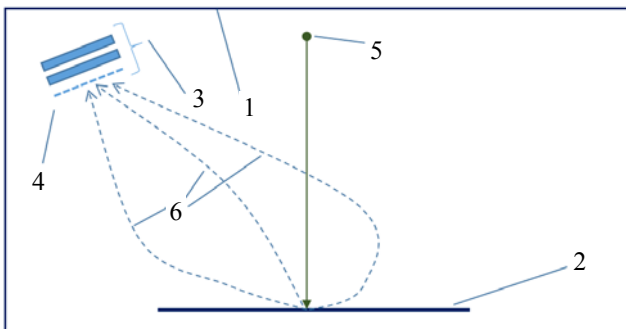


Рис. 6. Схема модернизированного экспериментального макета (1 – заземлённая сетка экспериментальной вакуумной камеры, 2 – заземлённая пластина, 3 – приёмник ионов ВЭУ-7 из двух микроканальных пластин и входной сетки 4, 5 – пылевая частица, 6 – возможные траектории ионов)

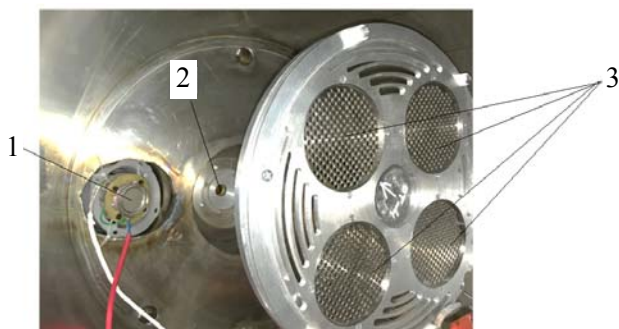


Рис. 7. Расположение приёмника ионов и мишени в вакуумной камере: 1 – микроканальная пластина; 2 – тракт ускорителя; 3 – титановые мишени с отверстиями

На рис. 7 показано расположение мишени и приёмника ионов в вакуумной камере. Мишень представляет собой титановые образцы с отверстиями, закрепленные в алюминиевой раме. Приёмник ионов не закрыт заземлённой сеткой и его входное окно находится под потенциалом минус 2800 В, что обеспечивает притягивание положительно заряженных ионов в заземлённой камере. Результаты проведённых экспериментов показали, что амплитуда ионных импульсов существенно уменьшилась, что доказывает фокусировку в случае использования параболической мишени. Тем не менее данный метод так же позволяет регистрировать взаимодействия заряженной пылевой частицы с заземлённой металлической пластиной и может быть использован при проектировании научной аппаратуры для регистрации низкоскоростных пылевых частиц.

Заключение

В данной работе рассмотрена конструкция устройства для регистрации пылевых частиц на основе ионизационного метода измерения. Показано, что использование параболического зеркала позволяет увеличить количество собранных ионов. Экспериментальные исследования показали, что использование микроканальных пластин в качестве приёмника ионов позволяет разрабатывать устройства для регистрации момента удара пылевой частицы о поверхность, что подтвер-

ждает теоретическое предложение о возможности применения такого устройства, рассмотренного в работах [4, 10]. Однако, использование микроканальных пластин сопряжено с некоторыми недостатками во время настройки работы устройства из-за с невозможности функционирования микроканальных пластин в воздушной среде (вне вакуумной среды).

На основе предложенных конструкций в дальнейшем планируется проектировать систему контроля поверхности космических аппаратов, а также пылеударные времяпролетные масс-спектрометры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков Л. С., Семкин Н. Д., Куликаускас В. С., Семенчук С. М., Кирюхин В. П. / ЖТФ. 1988. Т. 58. № 6. С. 1160–1163.
2. Herbert A. Zook / Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History. – Springer US, 2001. P. 75–92.
3. Auer S., Grün E., Kempf S., Srama R., Srowig A., Sternovsky Z., Tschernjawski V. / Review of scientific instruments. 2008. № 79.
4. Воронов К. Е., Григорьев Д. П., Телегин А. М. / Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 3. С. 245–265.
5. Телегин А. М., Воронов К. Е., Авдеев В. А. / Прикладная физика. 2016. № 6. С. 116–119.
6. Nadiradze A. B., Kalaev M. P., Semkin N. D. / Cosmic Research. 2016. Vol. 54. Iss. 5. P. 366–374.
7. Сысоев А. А., Бандурин Д. Р., Иванов В. П. / Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 15. С. 35–38.
8. Телегин А. М., Пияков А. В. / Приборы и техника эксперимента. 2017. № 6. С. 101–106.
9. Semkin N. D., Voronov K. E., Piyakov A. V., Piyakov I. V. / Instruments and Experimental Techniques 2009. Vol. 52. Iss. 4. P. 595–601.
10. Семкин Н. Д., Изюмов М. В., Телегин А. М. / Прикладная физика. 2010. № 4. С. 131–136.

PACS: 07.05.Dz, 07.55. Jg, 94.80.+g

The investigation of the operation of the device with a microchannel plate as an ion receiver for the dust particles' registration

K. E. Voronov^{1,2}, I. V. Piyakov^{1,2}, D. M. Ryazanov¹ and A. M. Telegin^{1,2}

¹ Samara University, Institute of Space Instrumentation (IKP-214)
34a Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia
E-mail: talex85@mail.ru

² Samara University
34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

Received 7.09.2023; revised 16.10.2023; accepted 15.11.2023

The article discusses the design of a device for the registration of micrometeoroids and space debris particles with relatively low velocities (up to 4 km/s), based on the ionization principle of operation. The increase in the device's sensitivity is attributed to the use of an ion mirror and a microchannel plate, which serves as an ion receiver. A circuit based on an amplifier with a differential output was employed to reduce electromagnetic interference.

Keywords: micrometeoroids, amplifier, dust particles, mirror, microchannel plate.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-84-90

REFERENCES

1. Novikov L. S., Semkin N. D., Kulikauskas V. S., Semenchuk S. and Kiryukhin V. P., *Tech. Phys.* **58** (6), 1160–1163 (1988).
2. Herbert A. Zook, *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*, Springer US, 2001, pp. 75–92.
3. Auer S., Grün E., Kempf S., Srama R., Srowig A., Sternovsky Z. and Tschernjawski V., *Review of scientific instruments*, № 79 (2008).
4. Voronov K. E., Grigoriev D. P. and Telegin A. M., *Usp. Prikl. Phys. (Advances in Applied Physics)* **9** (3), 245–265 (2021) [in Russian].
5. Telegin A. M., Voronov K. E. and Avdeev V. A., *Applied Physics*, № 6, 116–119 (2016) [in Russian].
6. Nadiradze A. B., Kalaev M. P. and Semkin N. D., *Cosmic Research* **54** (5), 366–374 (2016).
7. Sysoev A. A., Bandurin D. R. and Ivanov V. P., *Letters to ZhTF* **18** (15), 35–38 (1992).
8. Telegin A. M. and Piyakov A. V., *Instruments and experimental technique*, № 6, 101–106 (2017).
9. Semkin N. D., Voronov K. E., Piyakov A. V. and Piyakov I. V., *Instruments and Experimental Techniques* **52** (4), 595–601 (2009).
10. Semkin N. D., Izyumov M. V. and Telegin A. M., *Applied Physics*, № 4, 131–136 (2010) [in Russian].