

УДК 621.3

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-540-552

EDN: JNNABP

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



Исследование конструкций датчиков для регистрации параметров высокоскоростных микрочастиц в тракте ускорителя (обзор)

А. М. Телегин

Приведен обзор различных конструкций датчиков для регистрации параметров микрочастиц в тракте ускорителей, с помощью которых моделируют воздействие микрометеороидов и частиц космического мусора на элементы конструкции космического аппарата. Более подробно рассмотрена модель цилиндрического датчика индукционного типа (цилиндр Фарадея), а также возможная модификация конструкции данного датчика для измерения распределения микрочастиц в тракте ускорителя.

Ключевые слова: микрометеороиды, ускоритель, датчик, микрочастицы, фотодатчик.

Введение

Обследование космических аппаратов, вернувшихся на Землю, показывает, что микрометеориты и частицы космического мусора разрушают поверхность космических аппаратов, что вызывает необходимость в лучшем понимании данного воздействия и в создании систем, способных отслеживать это влияние. Для моделирования воздействия факторов космического пространства (микрометеороидов и частиц космического мусора) на элементы конструкции космического аппарата применяют различные ускорители микрочастиц [1–16]. Для эффективной работы таких ускорителей необходимо в процессе его рабо-

ты контролировать параметры этих микрочастиц: скорость, массу, заряд и т. д.

Целью данной работой является исследование конструкций датчиков высокоскоростных микрочастиц, используемых в тракте ускорителя.

Обзор датчиков

В работе [17] приведена конструкция датчика, в котором контролируется сигнал с фотодатчиков, регистрирующих сигнал лазерного излучения (рис. 1). При пересечении лазерного луча микрочастицей происходит регистрация уменьшения сигнала с фотодатчика. Система позволяет в воздушной среде измерять скорость частицы в диапазоне от дозвуковой до сверхзвуковой. В основе реализованной оптической системы лежат три оптических барьера, которые частицы преодолевают перед ударом об элементы конструкции. Точность измерения скорости в условиях испытаний составляет не менее 1%. Недостатком данного типа датчика является ограничение области регистрации шириной лазерного луча, при этом быстродействие зависит от скорости срабатывания фотодатчика.

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

E-mail: talex85@mail.ru

¹ 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 26.10.2023

Принята к публикации 10.11.2023

© Телегин А. М., 2023

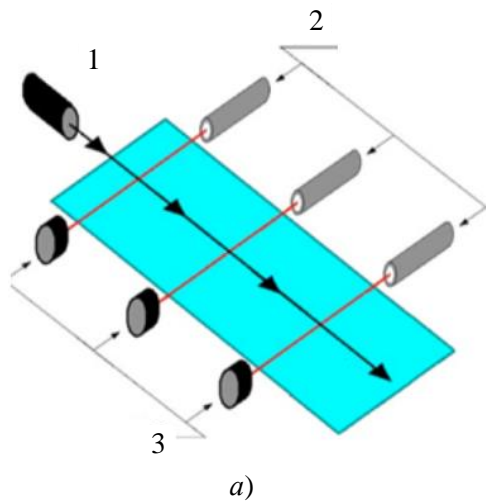


Рис. 1. Оптическая система контроля: а) – схема эксперимента: 1 – инжектор микрочастиц, 2 – лазеры, 3 – фотодиоды; б) – фотография установки [17]

В работах [18–20] описываются конструкции системы для контроля скорости микрочастиц с помощью светового барьера, создаваемого путем многократного переотражения лазерного луча от зеркальных стенок. Недостатком таких конструкций является потеря световой мощности при каждом переотражении лазерного луча (рис. 2). Также нужно отметить, что в некоторых конструкциях возможна паразитная засветка от других источ-

ников излучения света. Конструкция датчик, как указано в работе [20] позволяет регистрировать скорость от 0,1 м/с до 40 м/с.

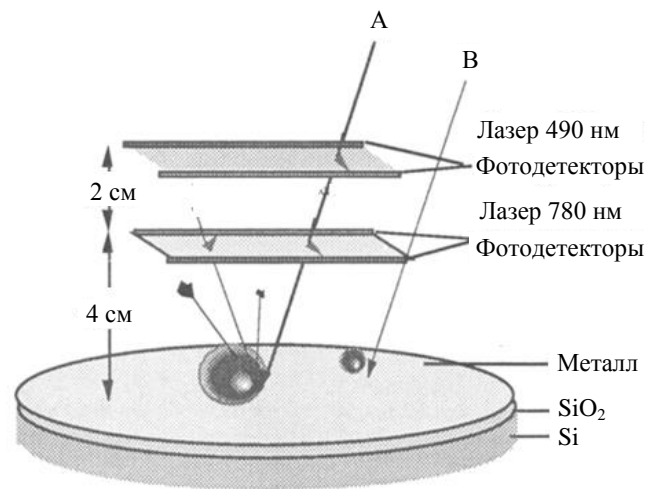


Рис. 2. Конструкция UPDE датчика [20]

В работе [21] предложена конструкция для измерения скорости микрочастицы с помощью SCMOS-камеры (рис. 3). В этом методе используется камера при слабом освещении в сочетании с высокочастотными светодиодными вспышками для генерации короткого интервала освещения. Такая технология, согласно авторам статьи [21], позволяет отслеживать частицы размером до 10 микрон со скоростью до 12 км/с. Возможности предложенного метода были подтверждены серией экспериментов по мониторингу движения микрочастиц с различными размерами частиц и материалами при различных конфигурациях камер. Нужно отметить, что подобная же схема использовалась для измерения скорости микрочастиц в работе [22], но в указанной работе скорости частиц были на порядок ниже и использовалось три CMOS-матрицы.

В работе [23] был предложен метод определения размеров сферических частиц диаметром порядка 1 мм путем измерений рассеяния света на этих частицах. В статье описана только теоретическая возможность использования данного метода без экспериментального подтверждения (рис. 4).

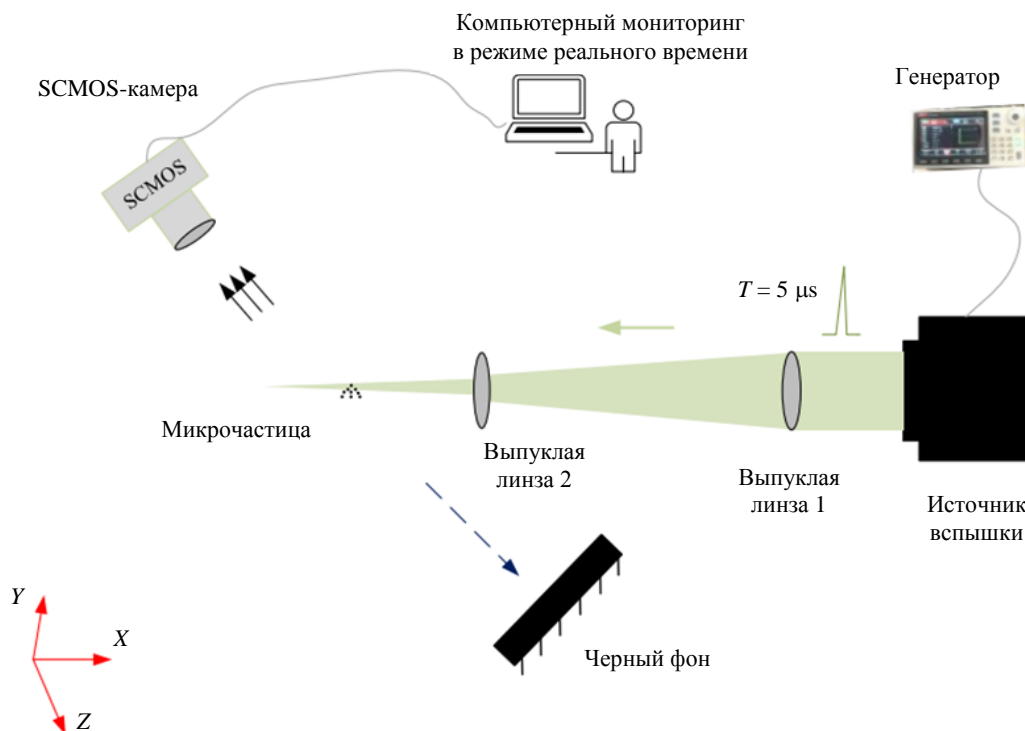


Рис. 3. Схема эксперимента с SCMOS-камерой

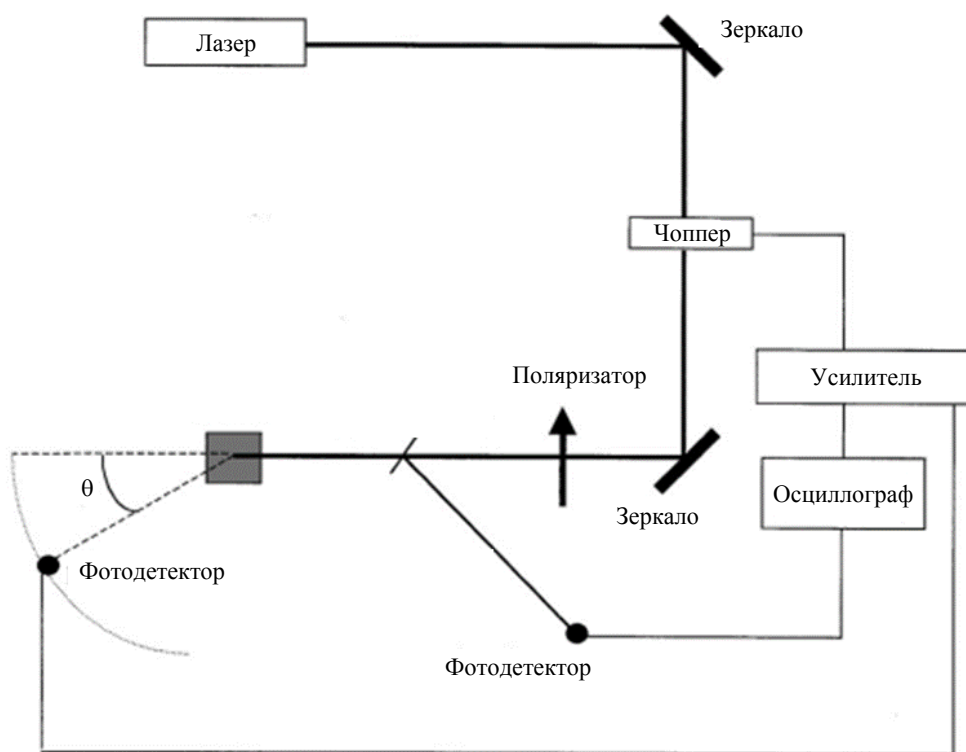


Рис. 4. Схема эксперимента

В работе [24] приведено описание прототипа датчика высокоскоростных микрочастиц, основанного на регистрации отраженного и рассеянного лазерного излучения при прохождении частицы через оптический барьер (рис. 5). Разработанный прототип оптического датчика для регистрации высокоскоростных

пылевых частиц позволяет регистрировать микрочастицы с размерами 1–50 мкм. Преимуществами датчика является высокая информативность и возможность работы с низкоскоростными частицами. Использование оптического метода измерения позволило устранить влияние паразитных электромаг-

нитных помех, возникающих в ускорителе высокоскоростных микрочастиц в процессе его работы. В конструкции используется один лазер и четыре фотодиода.

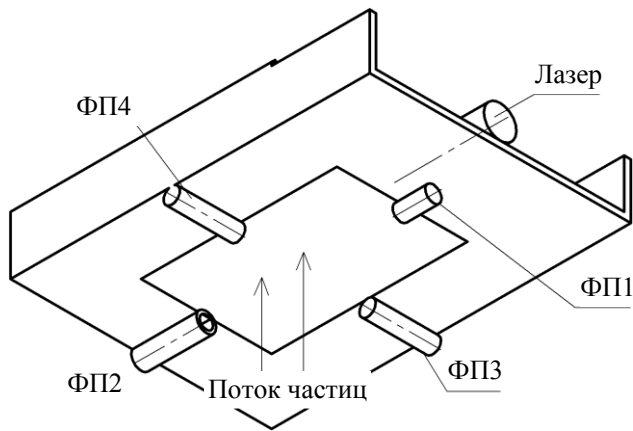


Рис. 5. Описание конструкции датчика: ФП1–ФП4 – фотоприемники

В работе [25] рассматривается конструкция датчика для анализа скорости низкосортных микрочастиц размерами порядка 100 мкм в жидких средах (маслах, топливе и т. д.) с использованием катушек индуктивности (рис. 6). Конструкция датчика состоит из двух катушек

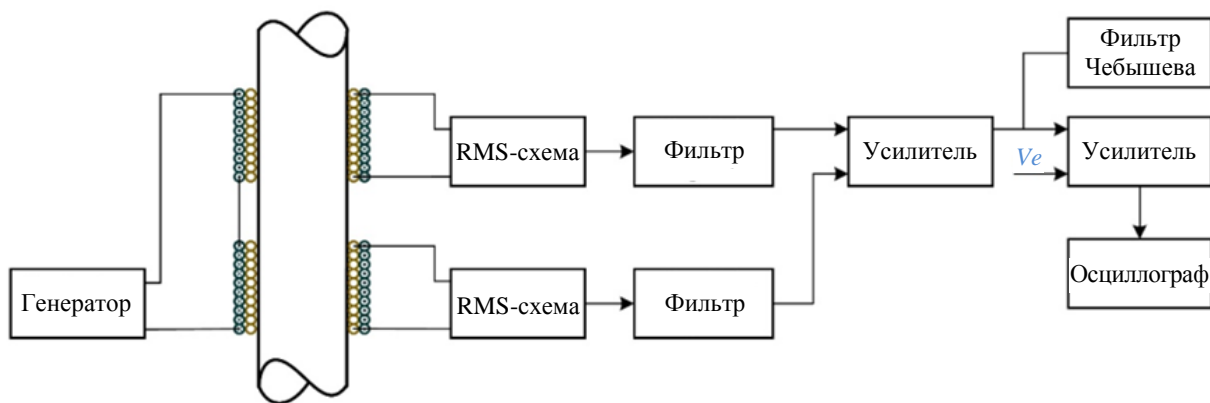


Рис. 6. Структурная схема датчика [25]

Поэтому в ускорителях широкое распространение получили датчики на основе индукции заряда микрочастиц на измерительных электродах. Форму импульса тока, возбуждаемого в измерительном электроде можно рассчитать с использованием, например, теоремы Рамо-Шокли [27–30]. Согласно этой теореме, если в пространстве, в котором располагаются электроды со скоростью \vec{V} движется заряд Q , то на k -электрод наводится ток:

возбуждения и двух чувствительных катушек. Две чувствительные катушки расположены рядом, причем две стороны симметричны, а две катушки возбуждения расположены сразу за двумя чувствительными катушками. На катушки возбуждения подается переменное напряжение, которое генерирует магнитное поле. Когда микрочастицы из магнитных материалов попадают в датчик, то они искажают силовые линии магнитного поля внутри катушек, что контролируется с помощью схем измерения. Недостатком подобной конструкции является регистрации только частиц из магнитных материалов с небольшой скоростью.

В электростатических ускорителях микрочастицы прежде чем разогнать до нужных скоростей, сначала заряжают до некоторого потенциала. В работе [26] отмечено, что заряд микрочастицы может быть рассчитан согласно выражению:

$$Q = 4\pi\epsilon_0 \cdot (1,64) \cdot E_0 \cdot r^2,$$

где E_0 – значение однородного электрического поля, r – радиус микрочастицы, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

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

где \vec{E}_k – эффективная (взвешенная) напряжённость поля в точке, где находится заряд Q в момент времени t , рассчитанная по схеме: заряд удалён, потенциал проводника, с которого снимается ток, равен 1, потенциал оставшихся проводников равен 0. $(\vec{V} \cdot \vec{E}_k)$ – скалярное произведение вектора скорости и эффективной напряжённости.

В работе [31] описана конструкция на основе нескольких проволочных электродов (рис. 7, 8). Данная конструкция датчика позволяет определить место пролета микрочастиц в поперечном сечении тракта ускорителя.

В работе [32] приведена теоретическая модель конструкции, состоящая из двух сеток, расположенных как показано на рис. 9. Датчик использует два полукруглых сеточных электрода, к которым подключены дифференциальные входы усилителя (рис.9). Конструкция представленного датчика была промоделирована авторами работы [32] с помощью программного пакета Coulomb 9. Недостатками данной конструкции является сложность обработки полученной информации и, пред-

положительно, большая электрическая емкость сеток.

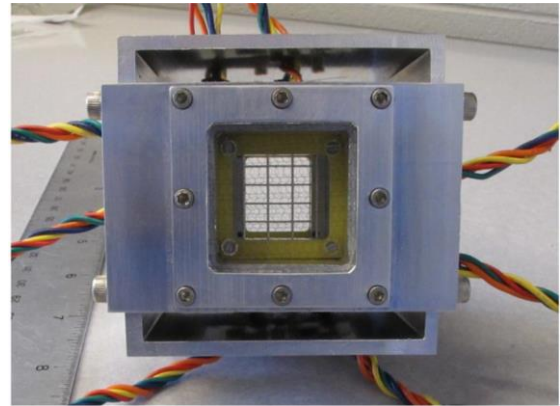


Рис. 7. Фотография датчика на основе проволочных электродов

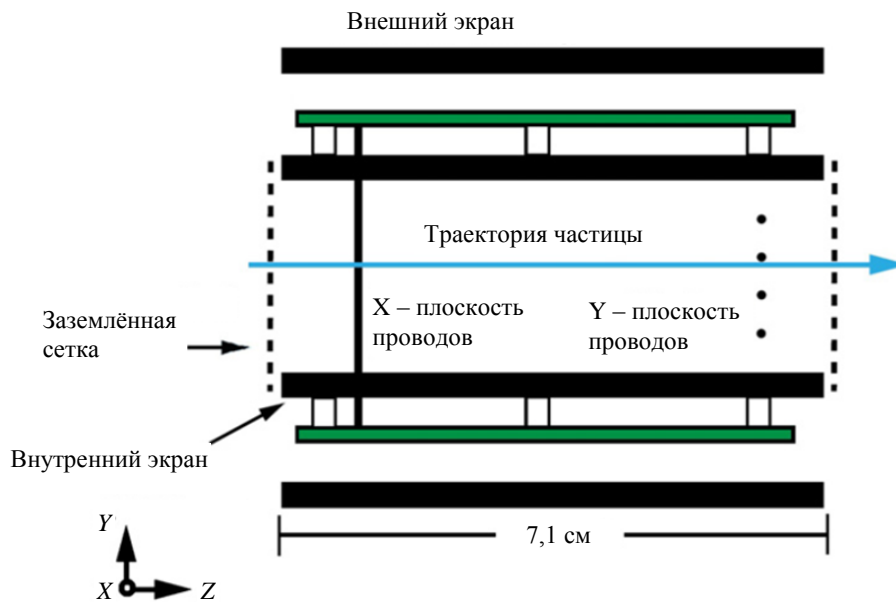


Рис. 8. Схематическое изображение сечения датчика на основе проволочных электродов

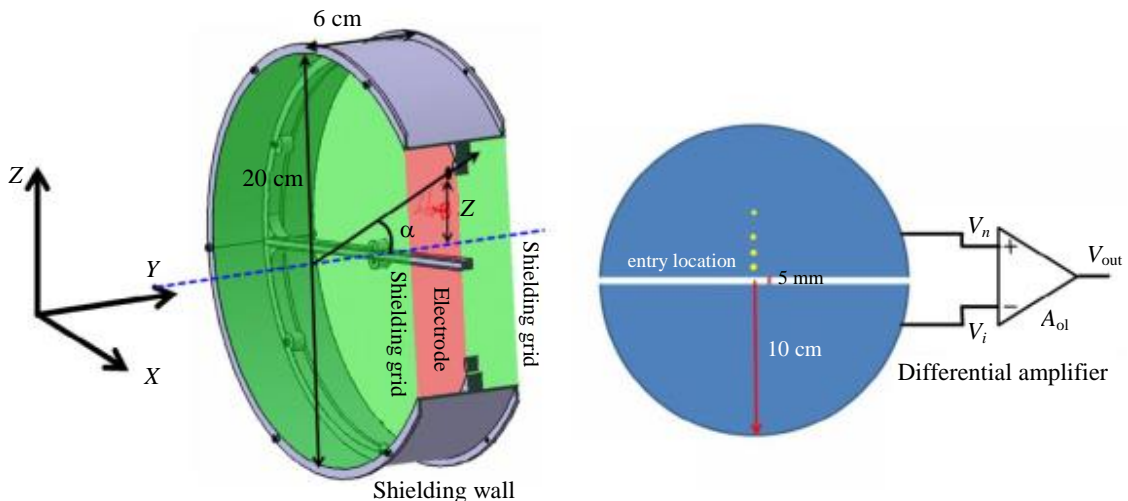
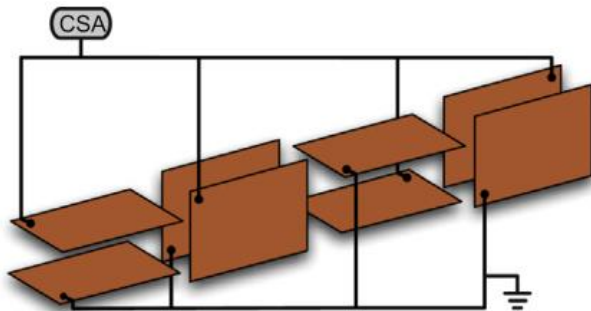


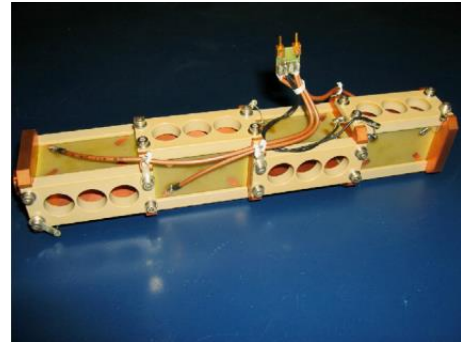
Рис. 9. Измеритель вектора скорости на сеточных электродах

В работе [33] рассмотрена конструкция на основе плоскопараллельных конденсаторов, позволяющая измерять отклонения микрочастицы по сечению тракта ускорителя (рис. 10). Проведенные исследования показали, что точность датчика составляет от 0,09 мм до 0,14 мм в зависимости от положения частиц пыли в детектора при соотношении С/Ш = 700. Максимальная ошибка получалась для микрочастиц, проходящих через центр датчика.

Развитием идей из работы [33] стала конструкция датчика, представленная в работе [34] (рис. 11, 12). В данной конструкции использовались три измерительных и заземлённых электрода. Путем анализа сигналов с каждого из трех измерительных электродов оценивается положение микрочастицы в поперечном сечении тракта ускорителя.



а)



б)

Рис. 10. Конструкция датчика на основе плоскопараллельных конденсаторов: а) – схемы подключения электродов; б) – фотография датчика

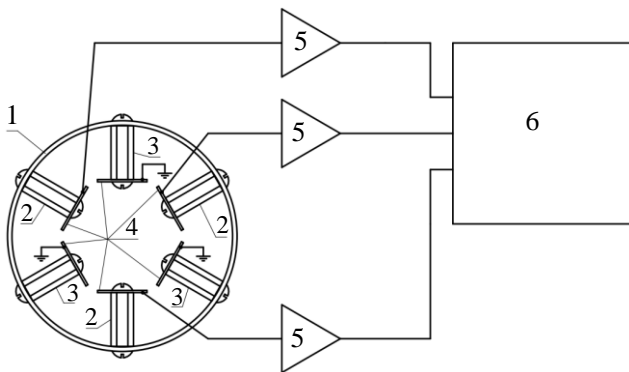


Рис. 11. Структурная схема датчика шести электродного датчика: 1 – экран (сталь); 2 – диэлектрическая втулка (полиэстер); 3 – металлическая втулка (латунь); 4 – пластина (медь); 5 – зарядочувствительный усилитель; 6 – осциллограф

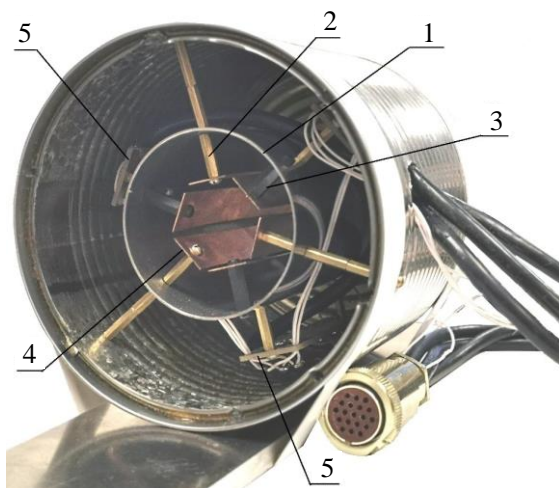


Рис. 12. Фотография прототипа трехэлектродного датчика: 1 – экранирующая трубка; 2 – диэлектрическая стойка; 3 – латунная стойка; 4 – медная пластина; 5 – зарядочувствительный усилитель; 6 – заглушка (на фотографии передняя заглушка для наглядности изображения снята); 7 – корпус

Одними из самых распространенных датчиков, которые используются в ускорителях различных типов являются индукционные датчики, форма которых представляет собой полый цилиндр (цилиндр Фарадея), выполненный из проводящего материала (рис. 13–15) [2–4]. Как правило, такие датчики используются парами, как показано на рис. 13. На рис. 13 приняты следующие обозначения: 1 – цилиндр Фарадея (латунь), 2 – экран цилиндра Фарадея (нержавеющая сталь), 3 – крепежное

кольцо (оргстекло), 4 – внешний корпус индукционного датчика (нержавеющая сталь), 5 – крепежная заглушка экрана (дюраль), 6 – заглушка экрана (дюраль), 7 – фланец стыковки с инжектором (нержавеющая сталь), 8 – втулка (оргстекло), 9 – фланец для стыковки с линейным электростатическим ускорителем (нержавеющая сталь), 10 – стыковочное кольцо (оргстекло), 11 – герметизированный разъем 2РМГ14Б4Ш1Е12Б. Типовые осциллограммы с цилиндров Фарадея показаны на рис. 15.

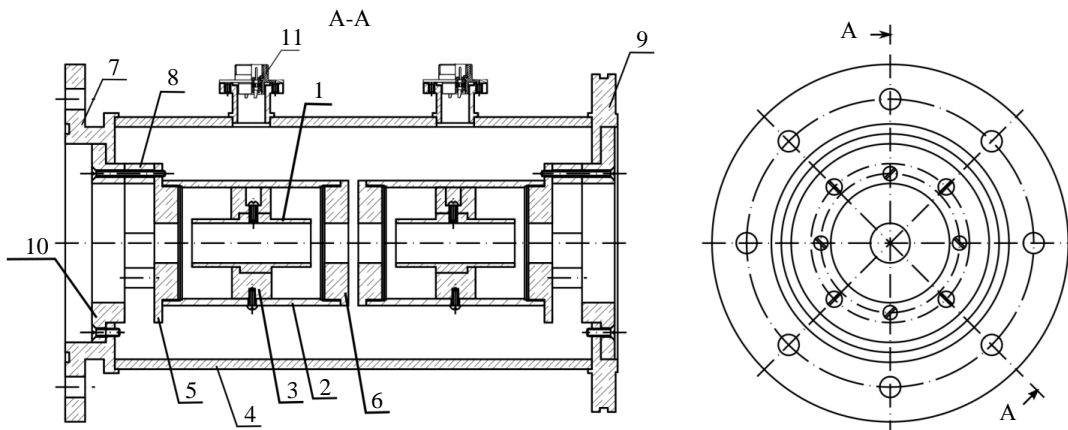
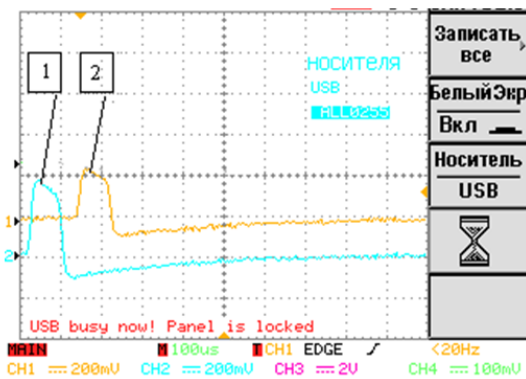


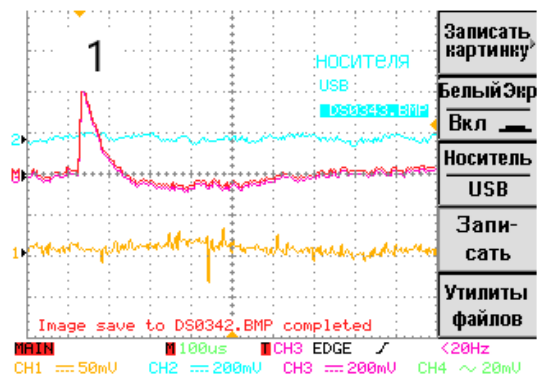
Рис. 13. Конструкция измерительной линейки из цилиндрических электродов



Рис. 14. Фотография цилиндра Фарадея в экране



а)



б)

Рис. 15. Примеры осциллограмм сигнала: а) – с двух (1 и 2) цилиндров Фарадея, расположенных на одной измерительной оси при условии пролета микрочастицы; б) – при ударе микрочастицы в 1 цилиндр Фарадея

В первом приближении можно положить, что скорость микрочастицы по оси тракта ускорителя существенно преобладает над её радиальной скоростью. Тогда скорость микрочастицы можно определить согласно формуле:

$$V = \frac{L}{t_L},$$

где L – расстояние между цилиндрами Фарадея, t_L – время пролета микрочастицей расстояния L .

Дифференциальное уравнение, описывающее сигнал на выходе цилиндра определяется выражением:

$$\frac{d}{dt}U_H(t) + \frac{1}{R_H C}U_H(t) = i_H(t) \frac{1}{C},$$

где $U_H(t)$ – напряжение на сопротивлении нагрузки R_H , которая подключена к цилиндру Фарадея, C – емкость цилиндра.

Согласно исследованиям, проведенным в работах [2, 35] выделяют два важных предельных случая, которые получаются при решении дифференциального уравнения представленного выше:

1) при $t_{ц} = L_{ц} / V \ll \tau = R_H \cdot C$ заряд микрочастицы определяется выражением $Q = C \cdot U_H$, где $t_{ц}$ – время пролета микрочастицей цилиндра Фарадея, $L_{ц}$ – длина цилиндра Фарадея.

2) при $t_{ц} \gg \tau$ получаем $Q = \int_0^t U_H(t) dt$.

В этом случае сигнал $U_H(t)$ пропорционален изменению во времени заряда на датчике dQ / dt .

Согласно расчётам, проведенным в работе [36], электрический потенциал на измерительном цилиндре, при условии движения частицы по оси цилиндра можно определить согласно выражению:

$$\varphi(z) = \frac{R \cdot \sigma}{2 \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{z + \sqrt{z^2 + R^2}}{z - L + \sqrt{(z - L)^2 + R^2}} \right),$$

где R – радиус цилиндра, z – текущая координата, $\sigma = \frac{Q_1}{2\pi \cdot R \cdot L} = \frac{C \cdot U_1}{2\pi \cdot R \cdot L}$ – поверхност-

ный заряд на цилиндре, C – емкость цилиндра, $U_1 = 1$ – приведенный потенциал на цилиндре, $C = 4\pi^2 \cdot R \cdot \epsilon_0 \cdot C_1$, где $C_1 \approx \frac{\pi \cdot L}{4R} \times$

$\times \frac{1}{\ln^2(8L/R) + \pi^2/12}$ для $10 < L/R < 20$ [37].

Сигнал при пролете микрочастицы цилиндра Фарадея имеет колоколообразную форму с искаженными фронтами, определяемыми параметрами входной цепи (рис. 15а). В большинстве случаев временные интервалы измеряют по максимальному значению наведенного импульса. При ударе же микрочастицы в цилиндр, можно наблюдать процесс разряда заряда, переданного микрочастицей измерительному электроду (рис. 15б). Согласно полученной осциллограмме (рис. 15б) можно оценить заряд микрочастицы, а также постоянную времени входной RC-цепи.

С точки зрения, измерения заряда микрочастицы необходимо сделать цилиндр Фарадея как можно длиннее, но при этом увеличивается емкость измерительного электрода, что приводит к уменьшению входного сигнала. Также слишком длинные измерительные цилиндры приводят к увеличению длины ускорителя в целом, так как в тракте обычно устанавливается от несколько штук до несколько десятков штук подобного типа датчиков. Проведенный анализ показал, что оптимальное соотношение для длины цилиндра находится в диапазоне от 10 до 20 радиусов цилиндра Фарадея.

В работах [38–40] приводится выражение, которое может быть использовано для расчета массы микрочастицы на основе её измеренного заряда:

$$m = \frac{Q^3 \cdot \rho}{48\pi^2 \epsilon_0^3 \Phi^3},$$

где ρ – плотность микрочастицы, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, Φ – поверхностный потенциал, который зависит от максимальной пробивной напряжённости электрического поля на поверхности микрочастицы.

В работе [41] описана конструкция с дифференциальным подключением схемы измерения (рис. 16), где для обработки сигналов с усилителей использовалась программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС).

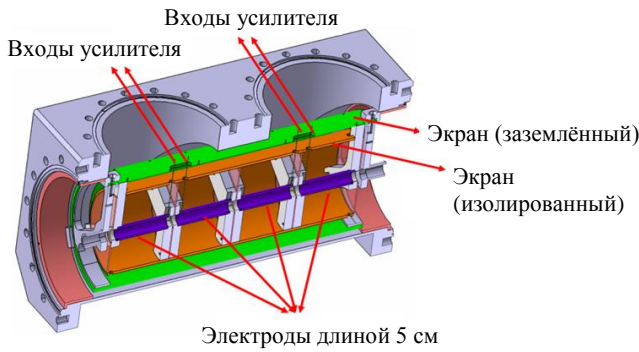


Рис. 16. Поперечное сечение дифференциального детектора [41]

Датчик заряда, представленный в работе [41], разработан с несколькими электрическими экранами. Внутренний цилиндр действует только как детектор заряда. Усилитель расположен между первым и вторым экранами. Он имеет полосу пропускания от 2 кГц до 10 МГц. Емкость детектора составляет примерно 9 пФ.

Предложение по структурной схеме измерения

Проведенный анализ конструкций датчиков показал, что обобщенная структурная схема блока измерения с индукционного дат-

чика выглядит как показано на рис. 17. Блок измерения может состоять из одного или нескольких измерительных модулей, сигнал с которых через зарядочувствительный усилитель [42, 43] поступает на АЦП, где происходит процесс перевода сигнала в цифровой вид. В дальнейшем цифровой сигнал поступает на ПЛИС, где происходит обработка (фильтрация) сигнала [44–49]. К ПЛИС часто подключается микроконтроллер, на котором достаточно просто реализовать стандартные интерфейсы обмена, но в случаях большой емкость ПЛИС, можно реализовать модуль микроконтроллера внутри ПЛИС [50]. Так как испытания производятся на ускорителях микрочастиц, к которым подключаются высокие электрические напряжения (десятки-сотни кВ), то необходимым с точки зрения помехозащищенности и защиты от электроразрядов является использование оптической развязки. Сигнал с оптической развязки поступает на модуль сбора и обработки информации, к которому подключены различные управляющие и измерительные модули ускорителя.

На основе рассмотренных конструкций предлагается конструкция датчика для измерения распределения микрочастиц в поперечном сечении тракта ускорителя (рис. 18).

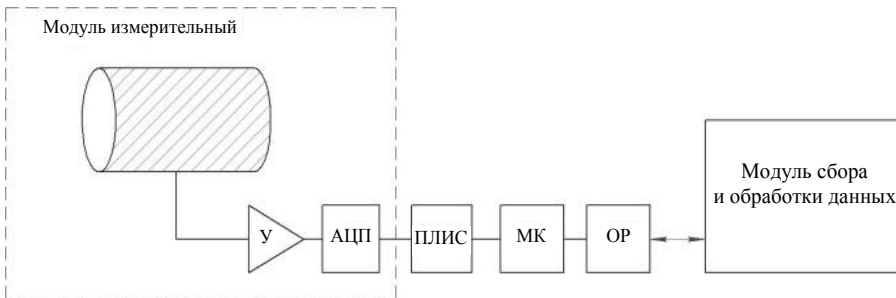


Рис. 17. Структурная схема измерения: У – усилитель; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема; МК – микроконтроллер; ОР – оптическая развязка

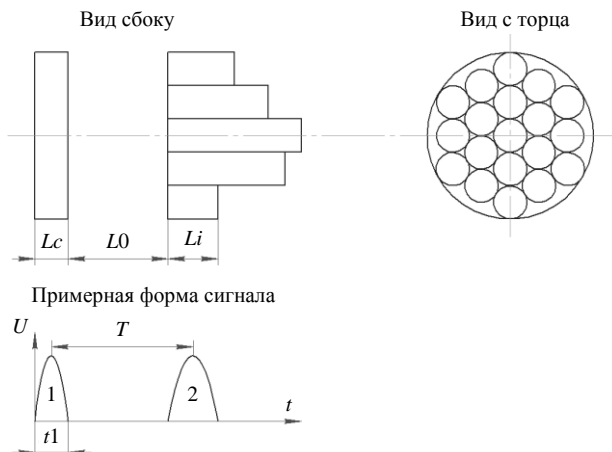


Рис. 18. Конструкция для измерения распределения микрочастиц в поперечном сечении тракта ускорителя

Принцип действия такой конструкции следующий, усилитель подключается к двум электродам, один из которых выполнен в виде цилиндра Фарадея, а второй в виде набора трубочек переменной длины. Микрочастица, пролетая эти два электрода, наводит на них сигнал, форма которого показана на рис. 18 (сигнал 1 и 2), при этом длительность сигнала 2 зависит не только от скорости микрочастицы, но также от размеров трубки, которую пролетает микрочастица. Зная длину трубки, через которую пролетает частица, можно определить распределения частиц по тракту ускорителя с точностью определяемой поперечным сечением этих трубок. Длину же трубок можно рассчитать при измерении временных интервалов T, t_1 (рис. 18) согласно выражению:

$$Li = Lc \cdot (2T / t_1 - 1) - 2 \cdot L_0.$$

Конечно, использование цилиндрических электродов в представленной конструкции (рис. 18) приводит к потерям частиц, которые попадают между трубок. Решением данной проблемы может являться использование прямоугольного профиля трубок.

Заключение

Проведенный анализ различных конструкций для измерения параметров микрочастиц в тракте ускорителя показал, что конструкции, использующие оптические схемы регистрации обладают помехозащищенностью от паразитных наводок, однако необходимо использовать лазерное излучение мощностью достаточной для срабатывания фотодатчика. Подобного типа датчики работают в режиме прерывания лазерного излучения или на рассеянном от микрочастицы излучении. Однако оптические способы не позволяют определить заряд микрочастиц и как правило используются для регистрации низкоскоростным микрочастиц.

Наибольшее распространения в ускорителях микрочастиц получили датчики индукционного типа, как правило выполненные в виде полого цилиндра из проводящего материала. Рассмотренные датчики позволяют решать задачи по определению скоростей, зарядов и оценки масс микрочастиц. Рассмотренные мо-

дификации датчиков, как правило, используются для определения распределения микрочастиц в поперечном сечении тракта ускорителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смалюк В. В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. – Новосибирск: Параллель, 2009.
2. Пилюгин Н. Н. /ТВТ. 1994. Т. 32. Вып. 1. С. 114.
3. Крабеков И. П., Мартисян М. А. / Атомная энергия. 1962. Т. 13. Вып. 3. С. 337.
4. Телегин А. М., Пияков А. В. / Приборы и техника эксперимента. 2017. № 6. С. 101.
5. Воронов К. Е., Григорьев Д. П., Телегин А. М. / Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 3. С. 245.
6. Попов А. М. Техногенный космический мусор: Монография. – М.: ООО «Русайнс», 2023.
7. Вениаминов С. С., Червонов А. М. Космический мусор – угроза человечеству. – М.: ИКИ РАН, 2012.
8. Новиков Л. С., Панасюк М. И. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: ЭНЦИТЕХ, 2000.
9. Ушеренко Ю. С., Алексеенцева С. Е., Ушеренко С. М. / Технология металлов. 2022. № 5. С. 52.
10. Пияков А. В., Телегин А. М., Родион Д. В. Компьютерное и лабораторное моделирование микрометеоритов и техногенных пылевых частиц: Монография. – Самара: Самарский университет, 2021.
11. Vedde James F. / Rev. Sci. Instrum. 1963. Vol. 34. P. 1175.
12. Ostrowski D., Bryson K. / Planetary and Space Science. 2019. Vol. 165. P. 148.
13. Campbell-Brown M. D. / Planetary and Space Science. 2019. Vol. 169. P. 1.
14. Миронов В. В., Толкач М. А. / Космическая техника и технологии. 2017. № 2 (17). P. 49.
15. Назаренко А. И. Моделирование космического мусора: Монография. – М.: ИКИ РАН. Серия «Механика, управление и информатика», 2013.
16. Овчинников В. И., Ильющенко А. Ф., Судник Л. В. Перспективные материалы и технологии. Монография. В 2-х томах. – Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2017. С. 129–149.
17. José Manuel Sánchez-Pena, Carlos Marcos, Carlos Marcos, María Y. Fernández, Ramon Zaera, Ramon Zaera / Optical Engineering. 2007. Vol. 46. № 5. P. 051014.
18. Гладышев А. И., Телегин А. М., Щелоков Е. А. / Цифровая обработка сигналов. 2023. № 1. С. 39.
19. Гладышев А. И., Щелоков Е. А., Телегин А. М. / Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30. № 3. С. 6.
20. Russell Paul Cain, Jeffery Lesho, O. Manuel Dy / Acta Astronautica. 1995. Vol. 35. P. 145.
21. Wang W., Xue W., Wu S., Mu Z., Yi J., Tang A. J. / Materials. 2022. Vol. 15. P. 3871.
22. Семкин Н. Д., Барышев Е. Ю., Телегин А. М. / Прикладная физика. 2010. № 1. С. 94.
23. Weiner M. Rust, Donnelly T. D. / Am. J. Phys. 2001. Vol. 69. P. 129.

24. Калаев М. П., Родина А. В., Телегин А. М., Исмагилова Е. В. / Приборы и техника эксперимента. 2023. № 6. С. 1.
25. Wu X., Zhang Y., Li N., Qian Z., Liu D., Qian Z., Zhang C. / Sensors. 2021. Vol. 21. P. 7556.
26. Zoltan Sternovsky, Miha'ly Horanyi, Scott Robertson / J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. Vol. 19 (5). P. 2533.
27. Герштейн Г. М. Моделирование полей методом электростатической индукции. – М.: Наука, 1970.
28. Shockley W. / J. Appl. Phys. 1938. Vol. 9. P. 635.
29. Фельд Я. Н. / Докл. АН СССР. 1953. Т. 93. № 3. С. 447–450.
30. Поклонский Н. А., Мутянок В. В., Вырко С. А. / Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 15. С. 33.
31. Paige Northway, Siegfried Auer, Keith Drake, Mihaly Horanyi, Anna Mocker, Tobin Munsat, Anthony Shu, Zoltán Sternovsky, Evan Thomas, Jianfeng Xie / Measurement Science and Technology. 2012. Vol. 23. № 10. P. 105902.
32. Yanwei Li, Sascha Kempf, Jonas Simolka, Heiko Strack, Eberhard Grün, Ralf Srama / Advances in Space Research. 2017. Vol. 59. № 6. P. 1636.
33. Katharina A. Otto, Ralf Srama, Siegfried Auer, Sebastian Bugiel, Eberhard Grün, Sascha Kempf, Jianfeng Xie / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2013. Vol. 729. P. 841.
34. Пияков А. В., Телегин А. М. // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 4. С. 106.
35. Пилюгин Н. Н., Тихомиров С. Г. / ЖТФ. 1993. Т. 63. № 2. С. 142.
36. Warren J. Jasper. On-axis electric field of a hollow cylinder.
37. Verolino L. / Electrical Engineering. 1995. Vol. 78. P. 201.
38. Ralf Srama, Siegfried Auer / Meas. Sci. Technol. 2008. Vol. 19. P. 055203.
39. Semkin N. D., Voronov K. E., Piyakov A. V., Piyakov I. V. / Instruments and Experimental Techniques. 2009. Vol. 52 (4). P. 595.
40. Trottenberg Thomas, Schneider Viktor, Kersten Holger / XXIVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Braunschweig, 2010.
41. Li Y., Bauer M., Kelz S., Strack H., Simolka J., Mazur C., Sommer M., Mocker A., Srama R. / Appl. Sci. 2023. Vol. 13. P. 4441.
42. Kelz S., Veigel T., Grözing M., Berroth M. / 2018 14th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). – Prague, 2018. P. 13.
43. Duncan N., Sternovsky Z., Grun E., Auer S., Horanyi M., Drake K., Xie J., Lawrence G., Hansen D., Le H. / Planetary and Space Science. 2011. Vol. 59. P. 1446.
44. Thomas E., Auer S., Drake K., Horanyi M., Munsat T., Shu A. / Planetary and Space Science. 2013. Vol. 89. P. 71.
45. Brakel J. P. G. Robust peak detection algorithm using z-scores / Stack Overflow. – 2014.
46. Каламбет Ю. А., Мальцев С. А., Козьмин Ю. П. / Заводская Лаборатория. Диагностика Материалов. 2015. Т. 81. С. 69.
47. Сухачев К. И., Телегин А. М., Григорьев Д. П., Шестаков Д. А., Дорофеев А. С. / Приборы и техника эксперимента. 2023. № 2. С. 46.
48. Siegfried Auer, George Lawrence, Eberhard Grun, Hartmut Henkel, Sascha Kempf, Ralf Srama, Zoltan Sternovsky / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2010. Vol. 622. P. 74.
49. Evan Thomas, Siegfried Auer, Keith Drake, Mihaly Horanyi, Tobin Munsat, Anthony Shu / Planetary and Space Science. 2013. Vol. 89. P. 71.
50. Сухачев К. И., Григорьев Д. П., Исмагилова Е. В. / Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2023. Т. 16. № 5. С. 12.

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

Study of sensor designs for recording the parameters of high-speed microparticles in the accelerator path (review)

A. M. Telegin^{1,2}

¹ 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 26.10.2023; accepted 10.11.2023

The paper provides an overview of various designs of sensors for recording the parameters of microparticles in the accelerator path, with the help of which the impact of micrometeor-

oids and space debris particles on the structural elements of a spacecraft is simulated. The model of a cylindrical induction type sensor (Faraday cup) is considered in more detail, as well as a possible modification of the design of this sensor to measure the distribution of microparticles in the accelerator path.

Keywords: micrometeoroids, accelerator, sensor, microparticles, photosensor.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-540-552

REFERENCES

- Smalyuk V. V. Diagnostika puchkov zaryazhenykh chastic v uskoritelyakh, Novosibirsk, Parallel, 2009 [in Russian].
- Pilyugin N. N., TVT **32** (1), 114 (1994) [in Russian].
- Krabekov I. P. and Martisyan M. A., Atomnaya energiya **13** (3), 337 (1962) [in Russian].
- Telegin A. M. and Piyakov A. V., Instruments and Experimental Techniques **60** (6), 870 (2017).
- Voronov K. E., Grigorev D. P. and Telegin A. M., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **9** (3), 245 (2021) [in Russian].
- Popov A. M. Tekhnogennyj kosmicheskij musor: – Monografiya, M., OOO "Rusajns", 2023 [in Russian].
- Veniaminov S. S. and Chervonov A. M. Kosmicheskij musor – ugroza chelovechestvu, Moscow, IKI RAN, 2012 [in Russian].
- Novikov L. S. and Panasyuk M. I., Vozdejstvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov, Moscow, EHCITEKH, 2000 [in Russian].
- Usherenko Yu. S., Aleksenceva S. E. and Usherenko S. M., Tekhnologiya metallov № 5, 52 (2022) [in Russian].
- Piyakov A. V., Telegin A. M. and Rodin D. V., Kompyuternoe i laboratornoe modelirovanie mikrometeoritov i tekhnogennykh pylevykh chastic: Monografiya, Samara, Samarskij universitet, 2021 [in Russian].
- James F. Vedde, Rev. Sci. Instrum. **34**, 1175 (1963).
- Ostrowski D. and Bryson K., Planetary and Space Science **165**, 148 (2019).
- Campbell-Brown M. D., Planetary and Space Science **169**, 1 (2019).
- Mironov V. V. and Tolkach M. A., Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii **2** (17), 49 (2017) [in Russian].
- Nazarenko A. I., Modelirovanie kosmicheskogo musora: Monografiya, M., IKI RAN. Seriya «Mekhanika, upravlenie i informatika», 2013 [in Russian].
- Ovchinnikov V. I., Ilyushchenko A. F. and Sudnik L. V., Perspektivnye materialy i tekhnologii. Monografiya. V 2-kh tomakh, Vitebsk, 2017, pp. 129–149 [in Russian].
- José Manuel Sánchez-Pena, Carlos Marcos, Carlos Marcos, María Y. Fernández, Ramon Zaera and Ramon Zaera, Optical Engineering **46** (5), 051014 (2007).
- Gladyshev A. I., Telegin A. M. and Shchelokov E. A., Cifrovaya obrabotka signalov, № 1, 39 (2023) [in Russian].
- Gladyshev A. I., Shchelokov E. A. and Telegin A. M., Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki **30** (3), 6 (2022) [in Russian].
- Russell Paul Cain, Jeffery Lesho and O. Manuel Dy, Acta Astronautica **35**, 145 (1995).
- Wang W., Xue W., Wu S., Mu Z., Yi J. and Tang A. J., Materials **15**, 3871 (2022).
- Semkin N. D., Baryshev E. Yu. and Telegin A. M., Applied Physics, № 1, 94 (2010) [in Russian].
- Weiner M. Rust and Donnelly T. D., Am. J. Phys. **69**, 129 (2001).
- Kalaev M. P., Rodina A. V., Telegin A. M. and Ismagilova E. V., Pribory i tekhnika ehksperimenta, № 6, 1 (2023) [in Russian].
- Wu X., Zhang Y., Li N., Qian Z., Liu D., Qian Z. and Zhang C., Sensors **21**, 7556 (2021).
- Zoltan Sternovsky, Miha'ly Horanyi and Scott Robertson, J. Vac. Sci. Technol. A **19** (5), 2533 (2001).
- Gershtejn G. M. Modelirovanie polej metodom ehlektrostaticheskoy indukcii, Moscow, Nauka, 1970 [in Russian].
- Shockley W., J. Appl. Phys. **9**, 635 (1938).
- Feld Ya. N., Dokl. AN SSSR **93** (3), 447 (1953) [in Russian].
- Poklonskij N. A., Mityanok V. V. and Vyrko S. A., Pisma v ZHTF **28** (15), 33 (2002) [in Russian].
- Paige Northway, Siegfried Auer, Keith Drake, Mihaly Horanyi, Anna Mocker, Tobin Munsat, Anthony Shu, Zoltán Sternovsky, Evan Thomas and Jianfeng Xie, Measurement Science and Technology **23** (10), 105902 (2012).
- Yanwei Li, Sascha Kempf, Jonas Simolka, Heiko Strack, Eberhard Grün and Ralf Srama, Advances in Space Research **59** (6), 1636 (2017).
- Katharina A. Otto, Ralf Srama, Siegfried Auer, Sebastian Bugiel, Eberhard Grün, Sascha Kempf and Jianfeng Xie, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **729**, 841 (2013).
- Piyakov A. V. and Telegin A. M., Instruments and Experimental Techniques **65** (4), 636 (2022).
- Pilyugin N. N. and Tihomirov S. G., ZHTF **63** (2), 142 (1993) [in Russian].
- Warren J. Jasper. On-axis electric field of a hollow cylinder.
- Verolino L., Electrical Engineering **78**, 201 (1995).
- Ralf Srama and Siegfried Auer, Meas. Sci. Technol. **19**, 055203 (2008).

39. Semkin N. D., Voronov K. E., Piyakov A. V. and Piyakov I. V., *Instruments and Experimental Techniques* **52** (4), 595 (2009).
40. Thomas Trottenberg, Viktor Schneider, and Holger Kersten. XXIVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Braunschweig, 2010.
41. Li Y., Bauer M., Kelz S., Strack H., Simolka J., Mazur C., Sommer M., Mocker A. and Srama R., *Appl. Sci.* **13**, 4441 (2023).
42. Kelz S., Veigel T.; Grözing M. and Berroth M., 14th Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). Prague, 2018.
43. Duncan N., Sternovsky Z., Grun E., Auer S., Horanyi M., Drake K., Xie J., Lawrence G., Hansen D. and Le H., *Planetary and Space Science* **59**, 1446 (2011).
44. Thomas E., Auer S., Drake K., Horányi M., Munsat T. and Shu A., *Planetary and Space Science* **89**, 71 (2013).
45. Brakel J. P. G. Robust peak detection algorithm using z-scores, *Stack Overflow*, (2014).
46. Kalambet Yu. A., Malcev S. A. and Kozmin Yu. P., *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* **81**, 69 (2015) [in Russian].
47. Sukhachev K. I., Telegin A. M., Grigoriev D. P. et al., *Instruments and Experimental Techniques* **66** (2), 228 (2023).
48. Siegfried Auer, George Lawrence, Eberhard Grun, Hartmut Henkel, Sascha Kempf, Ralf Srama and Zoltan Sternovsky, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **622**, 74 (2010).
49. Evan Thomas, Siegfried Auer, Keith Drake, MihályHorányi, Tobin Munsat and Anthony Shu, *Planetary and Space Science* **89**, 71 (2013).
50. Sukhachev K. I., Grigorev D. P. and Ismagilova E. V., *Izvestiya SPBGEHTU "LEHTI"* **16** (5), 12 (2023) [in Russian].