

УДК 621.384.62

**Детектор высокоскоростных микрочастиц на основе  
ионизационного принципа измерения**

А. М. Телегин

*Описана конструкция детектора высокоскоростных микрочастиц на основе ионизационного принципа измерения. Приведены методика проведения эксперимента и результаты проведенных экспериментов. В частности, в диапазоне скоростей частиц 500÷2500 м/с минимальные величины сигналов с указанного типа приемника находятся на уровне шумов как 2 к 1, что затрудняет анализ характеристик объекта исследования. Эксперименты по регистрации зарядов при ударе соответствуют расчетным результатам поверхностной ионизации. Минимально регистрируемые заряды ионов находятся на уровне  $10^{-14} \div 10^{-15}$  Кл. Чувствительность детектора зависит от емкости приемника ионов и свойств мишени. Увеличение входной емкости детектора приводит к снижению уровню входных помех, при этом уменьшается коэффициент усиления входной цепи.*

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

*Ключевые слова:* ускоритель, микрометеороид, космический мусор, детектор.

**Введение**

В околоземном пространстве космические аппараты подвергаются воздействию множества факторов космического пространства. Одним из важнейших факторов является космический мусор и микрометеороиды. Эти частицы размерами более 1 мм хорошо отслеживаются наземными средствами (радиолокационными и оптическими). Частицы же более мелкого размера измеряются с помощью различных детекторов, устанавливаемых на космических аппаратах. Одним из самых чувствительных методов измерения таких высокоскоростных микрочастиц является ионизационный метод [1—3]. Скорости частиц космического мусора лежат в пределах от 1 до 16 км/с, поэтому важным является расширение возможности регистрации их в области скоростей 500÷2500 м/с. В этом диапазоне для регистрации частиц используется эффект поверхностной ионизации.

Целью данной работы является разработка и испытание детектора высокоскоростных микрочастиц на основе ионизационного принципа измерения.

**Конструкция детектора  
высокоскоростных микрочастиц**

Для измерения высокоскоростных микрочастиц в Институте космического приборостроения Самарского университета был разработан детектор на основе ионизационного принципа измерения, представленный на рис. 1 и 2.

Рассмотрим более подробно принцип измерения.

В космическом пространстве микрометеороиды и частицы космического мусора в большинстве случаев имеют некоторый заряд, который появляется на их поверхности вследствие воздействия на них факторов космического пространства (электронов, протонов). Поэтому, когда частицы пролетают через систему электродов приемника ионов, на них наводится заряд, пропорциональный заряду частицы.

Пылевая частица 3 с высокой скоростью ударяется в мишень 1, при этом происходит образование ионов и электронов в зоне контакта микрочастицы и мишени.

---

**Телегин Алексей Михайлович**, доцент.  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С. П. Королева.  
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.  
Тел. (846) 267-48-50. E-mail: talex85@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21 октября 2016 г.

© Телегин А. М., 2016

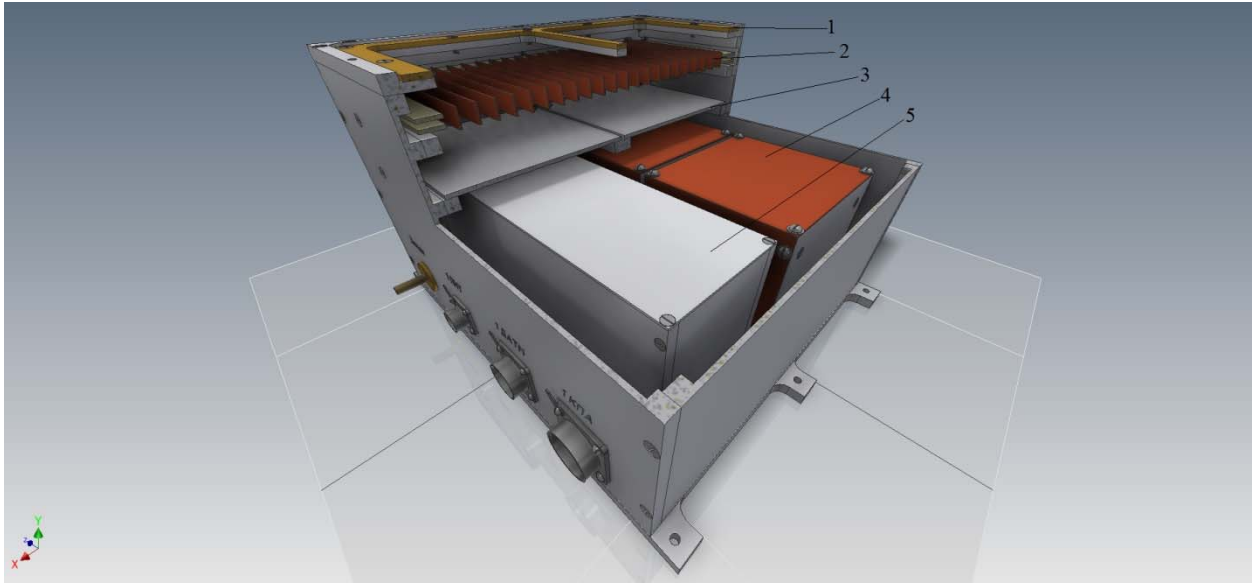
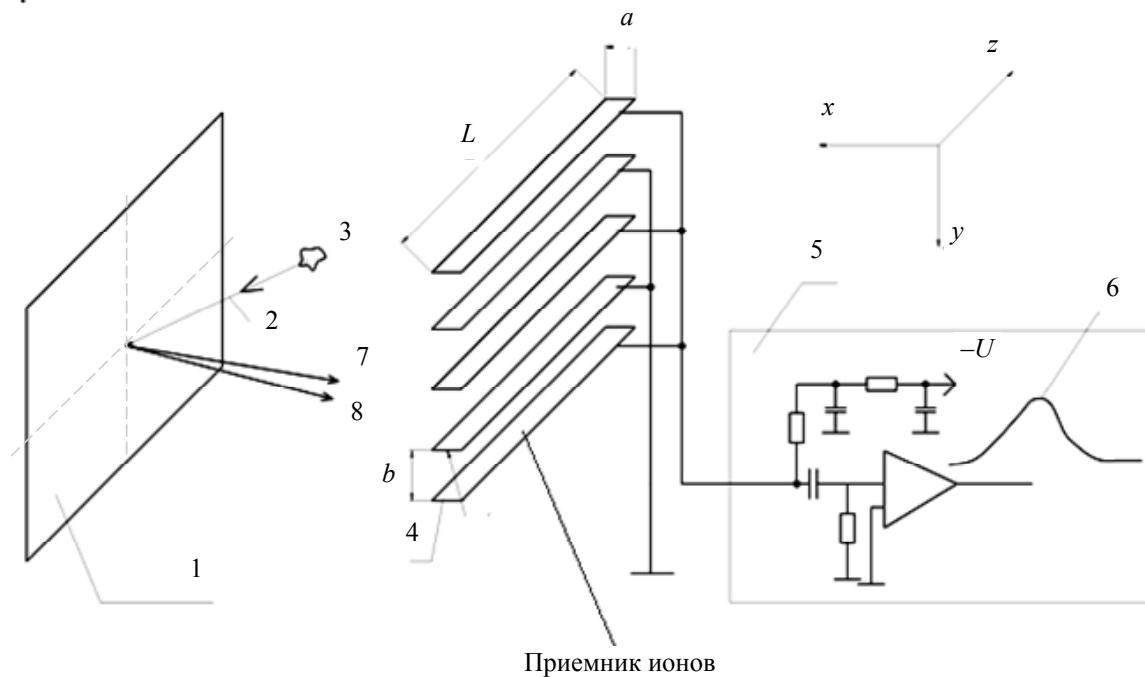


Рис. 1. Детектор микрометеороидов и частиц космического мусора: 1 — место крепления защитной сетки (заземленной на корпус детектора), 2 — электроды, 3 — мишень, 4 — блок аналоговой части, 5 — блок цифровой части.



Приемник ионов

Рис. 2. Схематическое изображение ионизационного детектора: 1 — мишень, 2 — траектория движения высокоскоростной микрочастицы, 3 — высокоскоростная микрочастица, 4 — измерительные электроды (двухфазная штыревая решетка), 5 — схема входной части приема сигнала с измерительных электродов, 6 — форма импульса, 7, 8 — разлет ионов.

Мишень подключена к нулевому потенциалу, а на измерительные электроды через фильтр подается напряжение порядка  $-200\text{В}$ . В результате влияния электрического поля положительно заряженные ионы летят в сторону измерительных электродов 4, с которых сигнал снимается с помощью зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ).

В основе ионизационного метода измерения физических параметров космических частиц при высокоскоростном ударе лежит явление образования и эмиссии заряженных частиц (ионов, элек-

тронов) вещества ударника и мишени. Механизм данного явления в различных диапазонах скоростей различен, и в рамках одной модели описание его не представляется возможным [1, 4]. Поэтому для диапазона скоростей  $0,5\text{--}7\text{ км/с}$  справедлива модель термоэлектронной эмиссии и поверхностной ионизации [4], для диапазона  $15\text{--}40\text{ км/с}$  принимается модель объемной ионизации; для скоростей выше  $40\text{--}50\text{ км/с}$  — модель Томаса-Ферми. Наименее изученным остается ударное взаимодействие в интервале скоростей  $6\text{--}15\text{ км/с}$ ,

решение поставленной задачи для которого сопряжено с целым рядом трудностей (учет сложных фазовых переходов вещества ударника и мишени и т.п.).

Суммарный заряд, образованный при высокоскоростном ударе ионов, можно вычислить согласно формуле из работ [5, 6]:

$$Q^+ = C_1 \cdot m^\alpha \cdot W^\beta,$$

где  $\alpha = 0,9 \pm 0,1$ ,  $\beta = 2,8 \pm 0,5$ ,  $C_1$  — постоянная, зависящая от свойств материала мишени и конструкции ионизационного детектора,  $m$ ,  $W$  — масса и скорость частицы при ударе соответственно.

Скорость частицы определяется по измеренной длительности  $T$  наведенного в приемнике ионов заряда:

$$T = C_2 \cdot W^{-1}$$

где  $C_2$  — постоянная, зависящая от конструкции ионизационного детектора.

Таким образом, информационный сигнал будет состоять из двух составляющих: наведенного заряда  $S1$  и ионизационного импульса  $S2$  (см. рис. 3), точные значения будут связаны с геометрией конкретного прибора. При этом длительность наведенного заряда может составлять порядка 10—70 мкс, длительность ионизационного импульса порядка 150—600 мкс. Эксперименты для испытания таких детекторов проводят на ускорителях частиц [7]. В процессе эксперимента было замечено, что много частиц с относительно небольшими скоростями наводили большой по амплитуде заряд на электроды. Это, в первую очередь, связано с

тем, что эти частицы обладали большой массой, а значит, заряжались в инжекторе до большого значения.

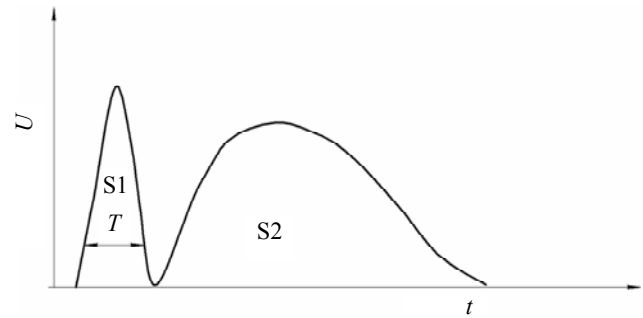


Рис. 3. Ожидаемый сигнал  $U$  на входе усилителя в зависимости от времени  $t$ :  $S1$  — наведенный заряд,  $S2$  — ионизационный импульс.

Конструкция приемной части детекторов может быть самой разнообразной, что может влиять только на коэффициент сбора ионов. Для защиты от внешних шумов приемника ионов его защищают заземленной сеткой 1 (рис. 1).

Согласно структурной схеме, изображенной на рис. 4, сигнал с электродов, усиленный ЗЧУ, поступает на АЦП конвейерного типа, которое преобразует полученный сигнал в цифровой код. Как только сигнал с ЗЧУ превышает заданное значение при сравнении на компараторе, срабатывает триггер, который запускает запись в FIFO память, откуда потом с помощью микроконтроллера происходит считывание информации и передача ее пользователю.

В экспериментах на ускорителе частиц были получены скорости до 3 км/с, поэтому далее более подробно рассмотрим модель поверхностной ионизации.

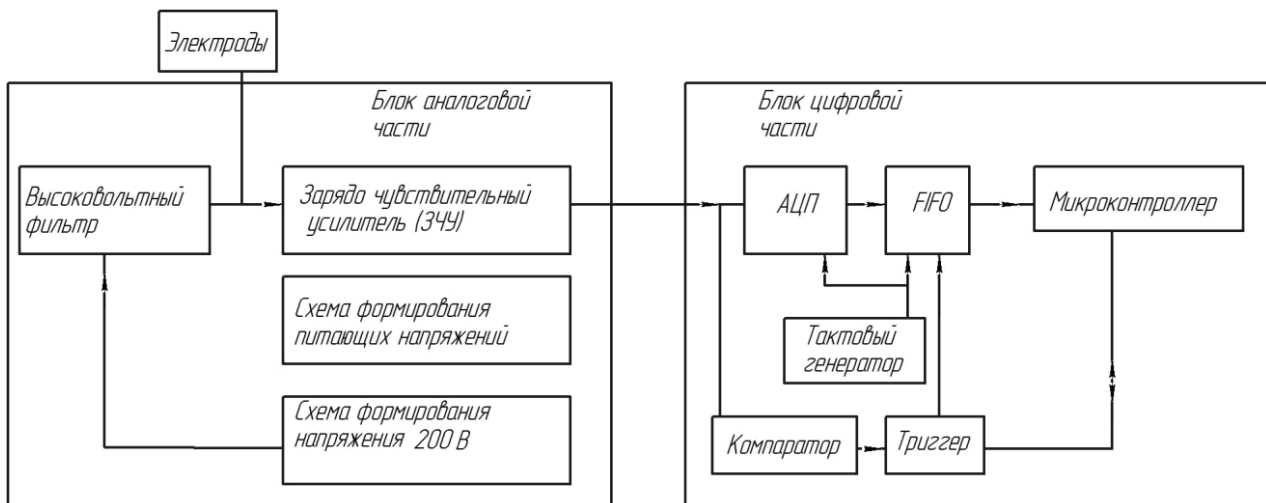


Рис. 4. Структурная схема блока обработки детектора.

### Модель расчета детектора

Рассмотрим конструкцию детектора с приемником ионов, выполненных в виде плоских пластин. Принцип измерения детектора основан на сборе ионов на электродах, поэтому для начала рассчитаем электростатическое поле в приемнике ионов. Электростатическое поле задается уравнением Лапласа [8]:

$$\Delta\varphi = 0$$

где  $\varphi$  — потенциал электрического поля.

Численный расчет производился по пятиточечной схеме (рис. 5) итерационным способом методом Якоби [8, 9]. При этом взяты следующие допущения: на границах потенциал поля равен 0 В, что соответствует случаю заземления корпуса прибора, а схема итерации основана на соотношении:

$$\varphi_{i,j}^{(p+1)} = \frac{1}{4} \left( \varphi_{i-1,j}^{(p)} + \varphi_{i,j-1}^{(p)} + \varphi_{i,j+1}^{(p)} + \varphi_{i+1,j}^{(p)} \right)$$

где верхний индекс каждого члена соотношения указывает на номер итерации.

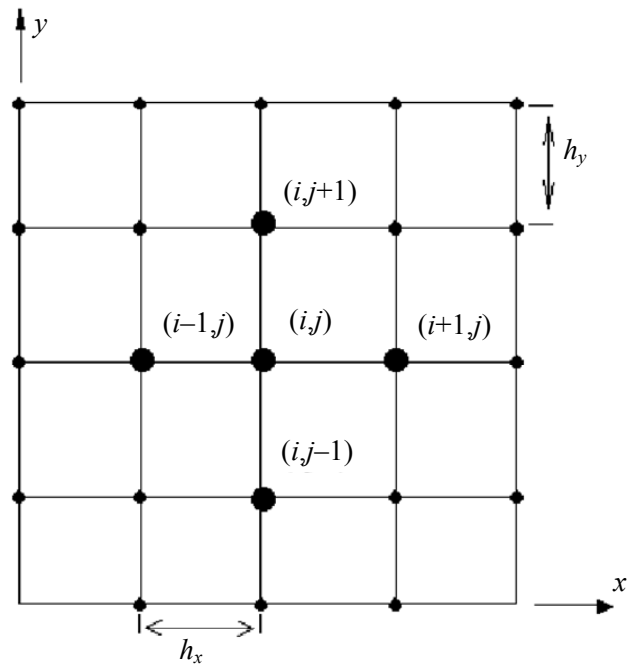


Рис. 5. Пятиточечная прямоугольная сетка в соответствии с работой [9].

На рис. 6 представлены рассчитанные эквипотенциальные поверхности электростатического поля внутри прибора.

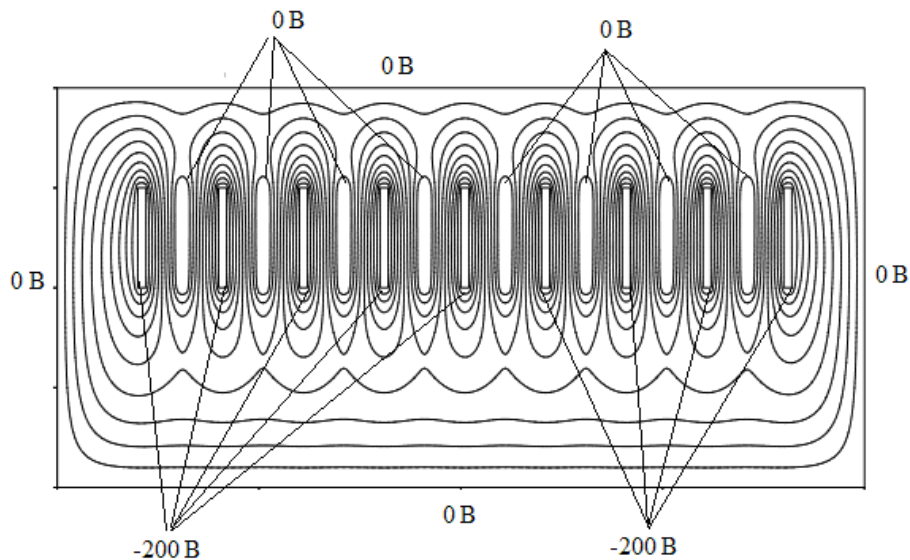


Рис. 6. Структура электростатического поля внутри блока при 9 электродах, находящихся под потенциалов -200 В и при 8 электродах, находящихся под потенциалом 0 В.

Электроды под нулевым потенциалом необходимы для того, чтобы создать большую напряженность электрического поля, тем самым увеличив сбор ионов.

После расчета электростатического поля производится анализ множества траекторий полета частиц с точки зрения оценки сбора ионов электродами.

В период функционирования детектора возможны несколько ситуаций.

1) Частица пролетает через электроды и ударяет в мишень, при этом имеется наведенный импульс и ионный импульс.

2) Частица ударяет в электрод под потенциалом -200 В. В этом случае наблюдается скачок потенциала на входе усилителя.

3) Частица ударяет в электрод под 0 потенциалом. В этом случае ионы практически полностью собираются электродом под потенциалом -200 В за счет большей напряженности поля.

При малых скоростях частиц (менее  $500 \div \pm 600$  м/с) процесс ионообразования мал и ионный импульс не наблюдается.

### Методика проведения экспериментов

Для исследования был разработан экспериментальный стенд (см. рис. 7) на основе электростатического ускорителя частиц [7].

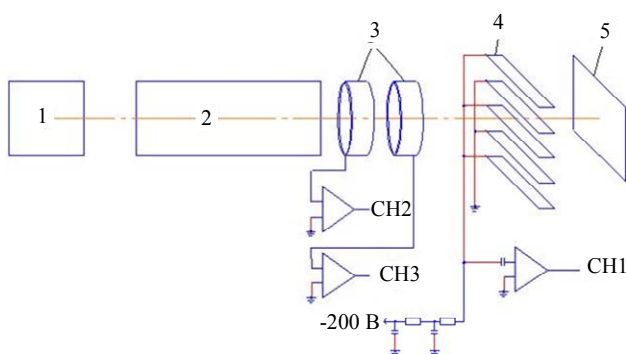


Рис. 7. Блок-схема измерения: 1 — инжектор; 2 — линейный электростатический ускоритель; 3 — кольца Фарадея; 4 — измерительные электроды (двухфазная штыревая решетка); 5 — мишень.

Принцип измерения следующий. Микрочастица заряжается в инжекторе. Потом под действием электростатического поля микрочастица ускоряется до скоростей порядка  $500\text{—}2500$  м/с. Далее микрочастица ударяется в мишень 5, при этом происходит образование положительно заряженных ионов и электронов в зоне контакта микрочастицы и мишени. Мишень подключена к нулевому потенциалу, а на измерительные электроды через фильтр подается напряжение порядка -200 В. В результате влияния электрического поля, поло-

жительно заряженные ионы летят в сторону измерительных электродов 4, с которых сигнал снимается с помощью зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) [10].

Измерения проводились на электростатическом ускорителе, описанном в [7]. На выходе ускорителя микрочастицы из алюминия размерами от 1 до 10 мкм ударяли по мишени из медной фольги, нанесенной на слой диэлектрика. Медь содержит меньше примеси, чем алюминий, поэтому и ионизация наблюдается не каждый раз. Так как каждая частица в процессе работы ускорителя заряжается, то при пролете собирающих электродов (рис. 1) на них наводится импульс тока (наведенный заряд). Так как скорости микрочастиц относительно небольшие, то процесс ионизации протекает слабо, практически нет объемной ионизации, а существует только поверхностная [1]. В экспериментах амплитуды сигналов на выходе ЗЧУ составляли  $50 \div 250$  мВ в диапазоне скоростей частиц  $500 \div 2500$  м/с, что соответствует зарядам частиц ионов  $10^{-14} \div 10^{-15}$  Кл и менее.

### Обсуждение результатов экспериментов

В результате эксперимента наблюдалось несколько развитий событий:

1) микрочастица ударяется в кольцо Фарадея (рис. 8);

2) микрочастица ударяется в собирающие электроды (рис. 9) (при этом частица сообщает электроду заряд, находящийся на ней и наблюдается скачок напряжения на выходе ЗЧУ);

3) микрочастица пролетает через собирающие электроды при этом, наводя на них заряд и не наблюдается ионизационный импульс (рис. 10);

4) микрочастица пролетает через собирающие электроды при этом, наводя на них заряд и наблюдается ионизационный импульс (рис. 11), причем, по нашему мнению, это наиболее информативный случай.

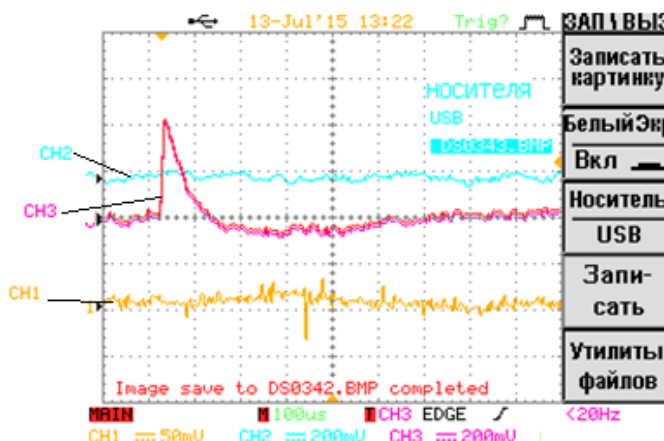


Рис. 8. Осциллограмма, когда микрочастица ударяется в кольцо Фарадея.

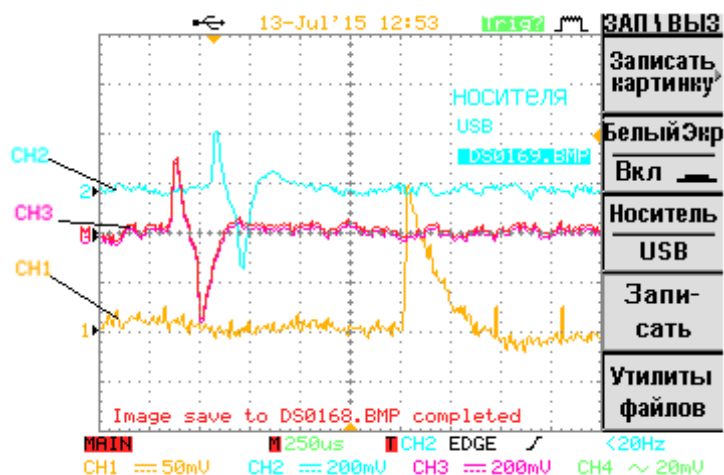


Рис. 9. Микрочастица ударяется в собирающие электроды.

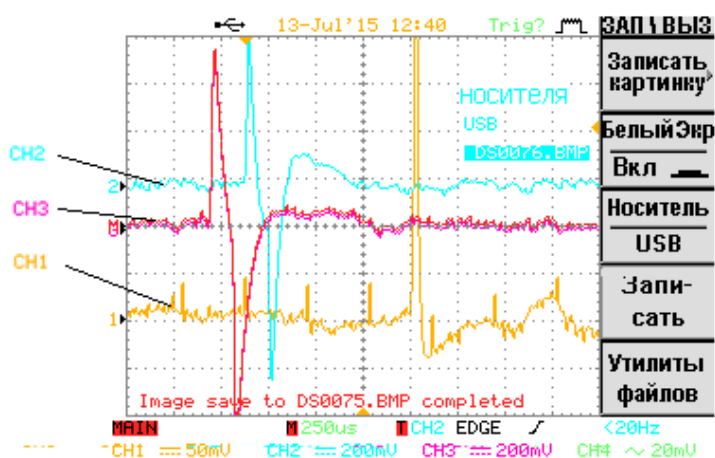


Рис. 10. Микрочастица пролетает через собирающие электроды при этом наводя на них заряд при этом не наблюдается ионизационный импульс.

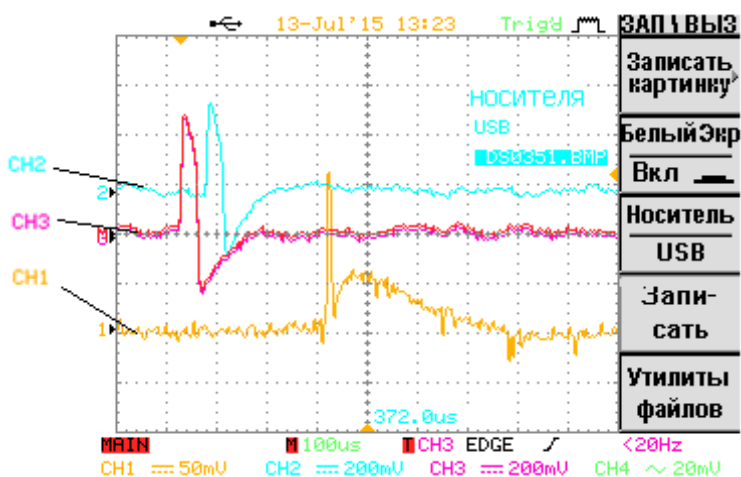


Рис. 11. Микрочастица пролетает через собирающие электроды при этом наводя на них заряд при этом наблюдается ионизационный импульс.

Скорость высокоскоростной частицы можно оценить по наведенному заряду, если сравнить длительность наведенного импульса и скорость частицы (рис. 12).

Определить массу микрочастицы можно из экспериментально полученных данных, представленных на рис. 13.

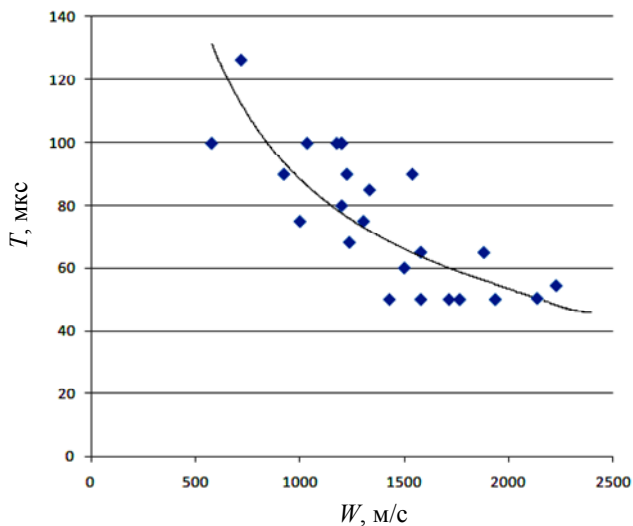


Рис. 12. Графики зависимости длительности  $T$  пролетного импульса от скорости частицы  $W$ : аппроксимация соотношением  $T = 12500/W$ .

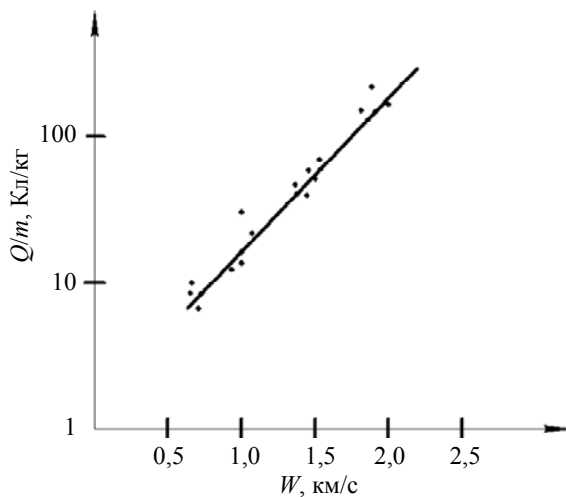


Рис. 13. График зависимости  $Q/m$  от скорости частицы.

### Заключение

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Рассмотрена конструкция и принцип действия детектора высокоскоростных микрочастиц ионизационного типа. Представленные экспериментальные результаты показывают многообразие форм импульсов тока с приемника ионов при различных соударениях высокоскоростных микрочастиц с элементами конструкции детектора (мишенью, электродами).

2. В диапазоне скоростей частиц  $500 \div 2500$  м/с минимальные величины сигналов с указанного

типа приемника находятся на уровне шумов как 2 к 1, что затрудняет анализ характеристик объекта исследования. Эксперименты по регистрации зарядов при ударе соответствуют расчетным результатам поверхностной ионизации. Минимально регистрируемые заряды ионов находятся на уровне  $10^{-14} \div 10^{-15}$  Кл. Чувствительность детектора зависит от емкости приемника ионов и свойств мишени. Увеличение входной емкости детектора приводит к снижению уровню входных помех, при этом уменьшается коэффициент усиления входной цепи.

3. Ионизационный детектор позволяет определить скорость и массу частицы по двум зависимостям  $T = f(W)$  и  $Q^+ = C_1 \cdot m^\alpha \cdot W^\beta$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по соглашению № 14.575.21.0107 о предоставлении субсидии в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Семкин Н. Д., Телегин А. М. Преобразователи информации в электронных устройствах бортовых систем: учебно-методическое пособие. — Самара: СГАУ, 2012.
2. Semkin N. D., Voronov K. E., Piyakov A. V., Piyakov I. V. // Instruments and Experimental Techniques. 2009. Vol. 52. No. 4. P. 595.
3. Bauera W., Romberg O., Wiedemann C., Drolshagen G., Vörsmann P. // Advances in Space Research, 2014. Vol. 54. P. 1858.
4. Drapats S., Michel K. W. // Naturforsch Z. 1974. Vol. 29. P. 870.
5. Friichtenicht J. F., Slattery J. C. Ionization associated with hypervelocity impact — NASA Technical Note D-2091, Washington. 1953.
6. Semkin N. D., Pomel'nikov R. A., Telegin A. M. // Technical Physics. 2014. Vol. 59. No. 5. P. 663.
7. Сухачев К. И., Семкин Н. Д., Пияков А. В. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 2. С. 49.
8. Миролобов Н. Н., Костенко М. В., Левинштейн М. Л., Тиходеев Н. Н. Методы расчета электростатических полей. — М.: Изд-во «Высшая школа». 1963.
9. Зайцев В. В., Занин В. И., Трещев В. М. Электростатическое моделирование полосковых линий: Учебное пособие. — Самара: Изд-во «Универс-групп». 2005.
10. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Телегин А. М., Пияков А. В., Пияков И. В. // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 7. С. 30.

## A detector of high-speed microparticles on the basis of the ionization principle of measurements

*A. M. Telegin*

Samara National Reserch University  
34 Moskovskoe sh., Samara, 443086, Russia  
E-mail: talex85@mail.ru

*Received October 21, 2016*

***Consideration is given to a design of high-speed detection of microparticles based on the ionization principle of measuring. The technique of the experiment and its results are presented.***

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

*Keywords:* accelerator, micrometeoroids, space debris, detector.

### REFERENCES

1. N. D. Semkin and A. M. Telegin, Information Converters in Electronic Devices of Onboard Systems (Samara, SSAU, 2012) [in Russian].
2. N. D. Semkin, K. E. Voronov, A. V. Piyakov, and I. V. Piyakov, Instruments and Experimental Techniques **52** (4), 595 (2009).
3. W. Bauera, O. Romberg, C. Wiedemann, G. Drolshagen, and P. Vörsman, Advances in Space Research **54**, 1858 (2014).
4. S. Drapats, K. W. Michel, Naturforsch Z. **29**, 870 (1974).
5. J. F. Friichtenicht and J. C. Slattery, *NASA Technical Note D-2091*, (Washington, 1953).
6. N. D. Semkin, R. A. Pomel'nikov, and A. M. Telegin, Technical Physics **59**, 663 (2014).
7. K. I. Sukachev, N. D. Semkin, and A. V. Piyakov, Fizika Voln. Protsesov Radio Inzhnern. Sistem **17** (2), 49 (2014).
8. N. N. Mirolyubov, M. V. Kostenko, M. L. Levinstein, N. N. Tikhodeev, *Methods of Calculation of Electrostatic Fields* (Vyssh. Shkola, Moscow, 1963) [in Russian].
9. V. V. Zaytsev, V. I. Zanin, and V. M. Treshchev. *Electrostatic Modeling of Strip Lines* (Samara: Univers-group publishing house. 2005) [in Russian].
10. N. D. Semkin, K. E. Ravens, A. M. Telegin, A. V. Piyakov, and I. V. Piyakov, Aerokosmicheskoe Priborostroenie No. 7, 30 (2014).