

УДК 621.3.082

PACS: 87.65.+y, 96.50.Pw

Формы наведенного импульса в датчике микрометеороидов и частиц космического мусора

К. Е. Воронов, А. М. Телегин, К. И. Сухачев, М. П. Калаев

В статье приведено краткое описание датчика микрометеороидов и частиц космического мусора ионизационного принципа действия. Предложен алгоритм определения формы наведенного импульса на основе теоремы Рамо-Шокли, возникающего на измерительных электродах при пролете заряженных микрочастиц в зависимости от траектории их полета. Показано как определить наклон пролета микрочастицы при ее движении через электроды в виде пластин.

Ключевые слова: микрометеороиды, космический мусор, регистрация, научная аппаратура.

Ссылка: Воронов К. Е., Телегин А. М., Сухачев К. И., Калаев М. П. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 6. С. 411.

Reference: K. E. Voronov, A. M. Telegin, K. I. Sukhachev, and K. P. Kalaeв, Usp. Prikl. Fiz. **8** (6), 411 (2020).

Введение

Изучение параметров микрометеороидов и частиц космического мусора в околоземном космическом пространстве является актуальной задачей, которой занимаются исследователи по всему миру [1–4].

Одной из важных задач для оценки воздействия высокоскоростных микрочастиц на поверхность космического аппарата является измерения вектора ско-

рости микрочастиц. Для решения поставленной задачи в мировой практике используются измерители вектора скорости [5–8].

Рассмотрим принцип действия таких устройств. Микрочастицы (космический мусор и микрометеороиды), находясь в околоземном пространстве, заряжаются до некоторого потенциала под действия факторов космического пространства [9]. При пролете через измерительный электрод (обычно измерительная сетка), на нем наводится некоторый потенциал пропорциональный параметрам частицы (скорости и заряду).

В работе [5] приведена конструкция прибора, состоящего из позиционно чувствительной электродной системы. Типичный датчик для измерения траектории имеет четыре плоскости электродов, состоящие из 16 проволочных электродов каждый. Электроды каждой из плоскости направлены параллельно в одной плоскости и ортогонально относительно электродам соседних плоскостей. Датчик обладает высокой прозрачностью и механической

Воронов Константин Евгеньевич, директор института космического приборостроения, к.т.н.

Телегин Алексей Михайлович, с.н.с., доцент, к.ф.-м.н.

Сухачев Кирилл Игоревич, с.н.с., к.т.н.

Калаев Михаил Павлович, с.н.с., к.т.н.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (Самарский университет).

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

E-mail: talex85@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2020 г.

© Воронов К. Е., Телегин А. М., Сухачев К. И., Калаев М. П., 2020

прочностью, большой чувствительной областью. Недостатком такого прибора является большое количество усилителей и конструктивная сложность прибора.

В устройстве, приведенном в работе [6], дополнительно введен источник напряжения с целью измерения массы высокоскоростных микрочастиц путем контроля отклонения их траектории под действием электрического поля.

В работе [10] описано устройство для измерения двух составляющих вектора скорости при условии, что при измерении пренебрегают третьей составляющей вектора скорости. Такое устройство можно использовать для измерения потоков микрочастиц, летящих с заранее заданного направления.

В работе [11] описан новый подход к измерению траектории заряженной частицы пыли. Для вычисления скорости, траектории частиц используется анализ формы наведенного сигнала. В детекторе используется два полукруглых сеточных электрода. Моделирование, проведенное авторами, показывало, что выбранная концепция измерения является эффективным методом для маломощных и маломассивных датчиков измерения траектории движения микрочастиц.

В представленных работах [5–10] приведены множество конструкций измерителей вектора скорости, обладающие как преимуществами, так и своими недостатками: необходимость использования большого количества усилителей [5], использование стороннего отклоняющего поля, измерение только двух составляющих вектора скорости. В работе [11] приведена плоская конструкция измерителя вектора скорости, что является с нашей точки зрения наиболее перспективным направлением для использования в космическом приборостроении, хотя при таком способе, скорее всего, будет снижена точность измерения из-за особенностей обработки информации. Подобный же принцип измерения был использован в работе [12].

В качестве измерителей координат пролета микрочастиц в работе [12] используются параллельные электроды в виде проводников, к которым подключены усилители. Для того чтобы правильно оценить координаты пролета микрочастицы были заранее просчитаны несколько возможных выходных сигналов с измерительных усилителей для различных траекторий движения микрочастиц. Точность измерения составила порядка 0,5 мм.

В работе [3] рассмотрена конструкция и принцип работы ионизационного датчика высокоскоростных микрочастиц, который может быть использован для регистрации массы и скорости микрометеороидов и частиц космического мусора в околоземном пространстве [4]. В основу принципа измерения параметров микрометеороидов и частиц космического мусора лежит взаимосвязь параметров разлета плазмы, образовавшейся при высокоскоростном соударении микрочастицы с поверхностью датчика. При этом одним из важных параметров, который оказывает влияние на процессы при высокоскоростном соударении, является угол удара микрочастицы с мишенью [13]. Для расширения функциональных возможностей датчика высокоскоростных микрочастиц ионизационного типа, была поставлена задача проанализировать формы импульсов, снимаемых с измерительных электродов в зависимости от траектории движения заряженной микрочастицы.

Краткое описание датчика высокоскоростных микрочастиц ионизационного типа

Разработанный датчик представляет собой систему плоскопараллельных электродов (рис. 1), при этом каждый нечетный электрод соединен с напряжением -200 В, а четный электрод с напряжением 0 В. При пролете микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) через параллельные электроды, на них

наводится определенный заряд, а при ударе микрочастиц о мишень происходит процесс ионообразования, если скорость частицы невелика, то процесс ионнообразования наблюдается слабо, либо не наблюдается вообще [3].

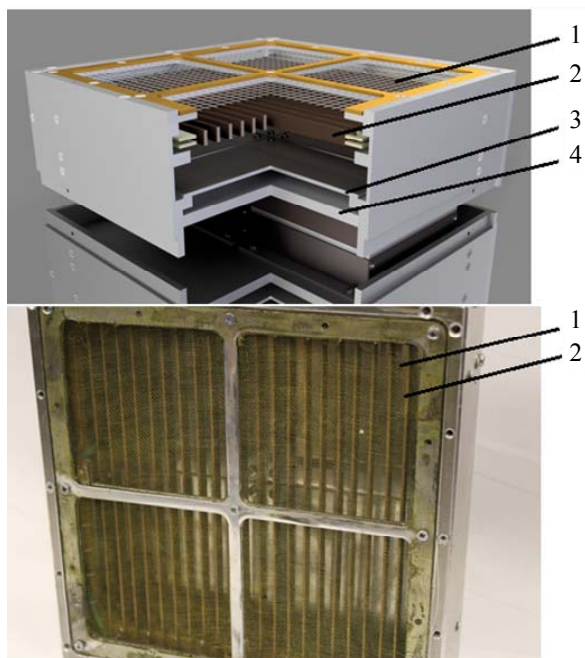


Рис. 1. Сверху изображена трехмерная модель датчика, снизу фотография датчика: 1 – защитная сетка; 2 – измерительные электроды; 3 – мишень; 4 – корпус прибора.

Моделирование формы импульса

Введем следующие допущения:

1) Размеры микрочастицы гораздо меньше размеров измерительных электродов.

2) Микрочастицы не ударяют в измерительные электроды. В случае удара об электрод, микрочастицы сообщают ему весь свой заряд [3].

3) Не учитывается конечность скорости распространения электромагнитных волн.

Заряженная микрочастица (микрометеороид или частица космического мусора), подлетая к измерительным электродам, как упоминалось выше, наводит на них импульс тока. Форма тока можно рассчитать с использованием теоремы Рамо-

Шокли [14]. Согласно этой теореме, если в пространстве, в котором располагаются электроды со скоростью \vec{V} движется заряд Q , то на k -электрод наводится ток:

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

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 [14–17]. $(\vec{V} \cdot \vec{E}_k)$ – скалярное произведение вектора скорости и эффективной напряженности.

Если учитывать параметры внешней измерительной цепи, которая подключена через разделительный конденсатор большой емкости, то получим формулу, связывающий напряжения на нагрузке $U_H(t)$ с наведенным током $i_{ind}(t)$ [18, 19]

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

где R_H – входное сопротивление усилителя, подключенного к измерительным электродам; C – суммарная емкость электродов и паразитной емкости нагрузки.

Считаем, что R_H бесконечно велико (на практике эта величина порядка от 5 до 10 МоМ), тогда выражение (2) можно упростить

$$\frac{d}{dt}U_H(t) = i_{ind}(t)\frac{1}{C}.$$

Или переписать в виде:

$$U_H(t) = Q \cdot \phi^*(t)\frac{1}{C},$$

где $\phi^*(t)$ – эффективный потенциал поля в точке, где находится заряд Q в момент времени t .

Таким образом, зная $\varphi^*(t)$ в определенный момент времени t и зная $U_n(t)$ – можно рассчитать заряд частицы Q .

Тогда получим, что

$$\varphi_{ind}^*(t) = Q \times \varphi^*(t)$$

где $\varphi_{ind}^*(t)$ – потенциал, наведенный на электродах при условии, что емкость $C = 1$.

Так как в нашем случае рассматривается датчик с электродами в виде пластин, то наведенный импульс напряжения, возбуждаемый на электродах, заряженной микрочастицей, пролетающей между электродами можно описать моделями, разработанными для заряженных частиц в плоском конденсаторе [18, 19]. Тогда получим, что

$$\varphi_{ind}^*(t) = Q \times \frac{l}{d},$$

где l – кратчайшее расстояние от электрода под 0 потенциалом до точки расположения заряженной микрочастицы; d – расстояние между электродами.

При движении микрочастицы в поле плоского конденсатора изменение координаты микрочастицы параллельно плоскости электродов не приводит к изменению наведенного на электроды заряда, поэтому изменение амплитуды наведенного заряда во время его движения внутри плоского конденсатора связано только с перпендикулярной относительно плоскости электродов составляющей вектора скорости микрочастицы.

Результаты моделирования

На рис. 2 представлена осциллограмма наведенного импульса, измеренного на ускорителе заряженных микрочастиц согласно методике, приведенной в работе [20].

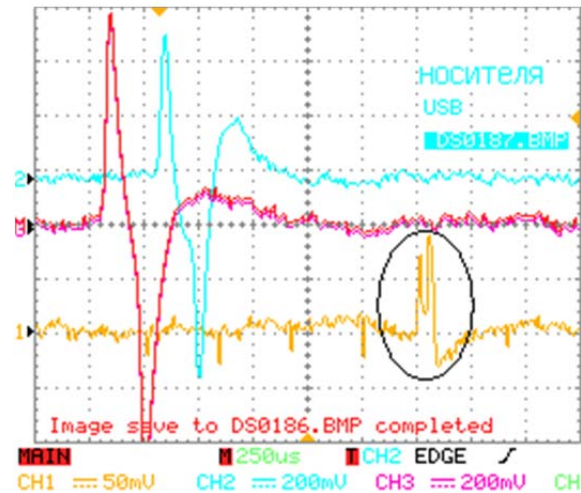


Рис. 2. Пример наведенного сигнала с датчика (обведен овалом).

Рассмотрим численный способ расчета наведенного на электроды потенциала. Сначала численными методами был рассчитан эффективный потенциал поля внутри прибора (рис. 3). На рис. 3 показаны также обозначения геометрических размеров $h1, h2, h3, h4, h5$, которые используются в последующих рисунках.

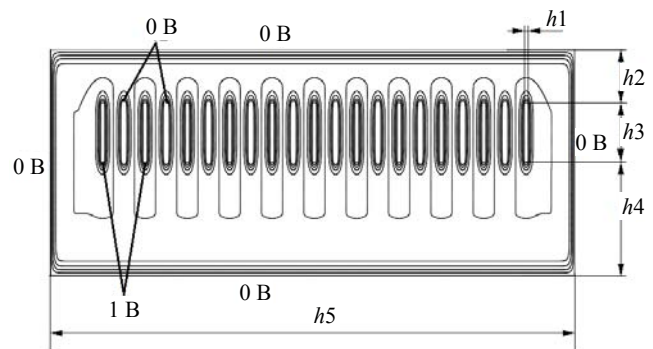


Рис. 3. Картина распределения электростатического потенциала вблизи измерительных электродов.

Как видно из рисунка 3 картина эквипотенциальных линий электростатического поля периодична и отличается в основном только на боковых электродах, а значит, на наведенный сигнал в первом приближении оказывает малое влияние значение между какими электродами пролетела микрочастица.

Траектории движения микрочастицы показаны на рисунке 4, 6. На рисунках 5, 7 показано ожидаемые осциллограммы, по оси абсцисс отложено произведение скорости микрочастицы на время, при этом было принято, что $C = 1, Q = 1$.

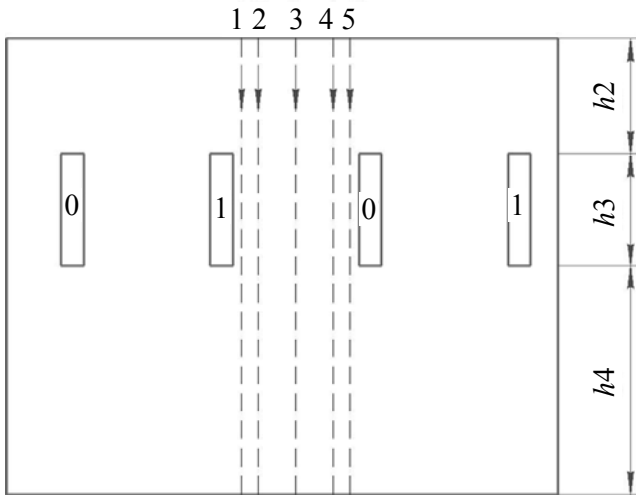


Рис. 4. Траектории полета микрочастицы в датчике. 0 – нулевой электрод, 1 – электрод, на котором измеряется наведенный сигнал.

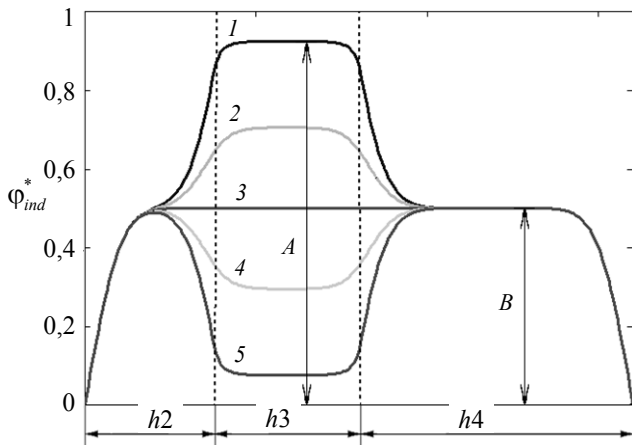


Рис. 5. Рассчитанные осциллограммы наведенного на электродах потенциала в координатах расстояния (нумерация траекторий соответствует рис. 4).

Согласно рисункам 4 и 5 определение траектории зависит от отношения A/B .

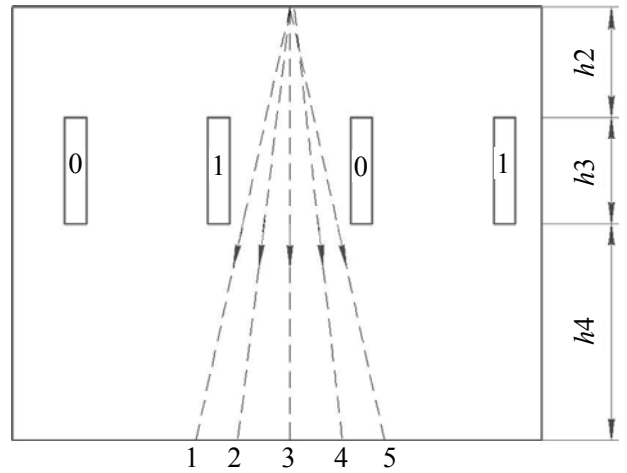


Рис. 6. Траектории полета микрочастицы в датчике при вариации угла влета (1 – (-10 градусов); 2 – (-5 градусов); 3 – (0 градусов); 4 – (+5 градусов); 5 – (+10 градусов)). 0 – нулевой электрод, 1 – электрод, на котором измеряется наведенный сигнал.

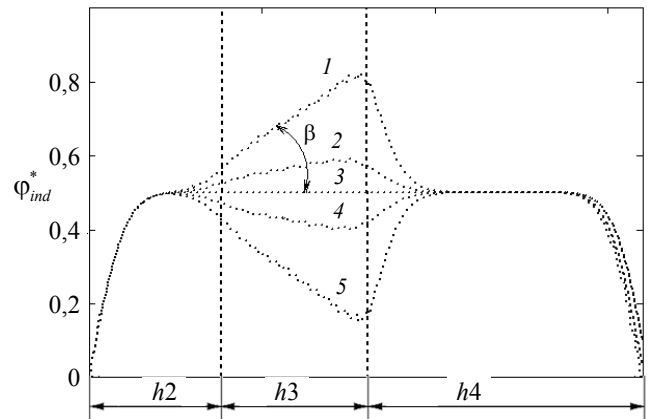


Рис. 7. Рассчитанные осциллограммы наведенного на электродах потенциала в координатах расстояния (нумерация траекторий соответствует рис. 6).

Согласно рис. 6 и 7 угол влета микрочастицы соответствует углу β .

Для того, чтобы анализировать наведенный сигнал необходимо его записать в память. В работах [22, 23] рассмотрена реализация цифрового модуля регистрации сигнала, который позволяет записать сигнал, полученный с входного усилителя (рис. 8).

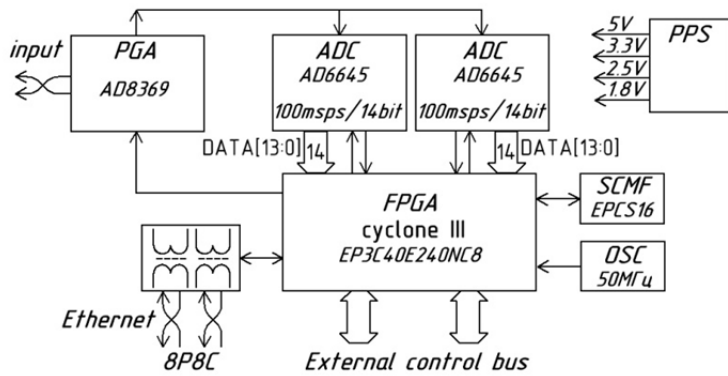


Рис. 8. Структурная схема модуля регистрации сигнала.

Дальнейшим направлением разработки, с нашей точки зрения, является использование синтезированного микроконтроллера внутри ПЛИС, что позволяет упростить схему цифрового модуля регистрации сигнала датчиков микрометеороидов и частиц космического мусора за счет исключения из структуры схемы внешнего микроконтроллера. Микроконтроллер в составе цифрового модуля регистрации сигнала отвечает за связь с ПК, управление ПЛИС и входным усилителем.

Заключение

Было показано, что траектория движения заряженной микрочастицы влияет на форму наведенного импульса в датчике микрометеороидов и частиц космического мусора ионизационного типа. Для того чтобы оценить заряд микрочастицы надо знать напряжение на выходе измерительной схемы в определенны момент времени и эффективный потенциал в точке пространства, где располагается микрочастица в данный момент времени. Анализ показал, что эффективный потенциал одинаков для любой траектории только в начальный момент влета частицы в зону между сеткой заземления и мишенью.

В проведенных расчетах формы наведенного импульса не учитывается компонента вектора скорости микрочастицы, расположенная параллельно электродам и мишени. Изменение конфигурации системы измерительных электродов, конечно,

приводит и к изменению формы импульсов наведенного тока. При этом аналитическое описание наведенного импульса во многих случаях затруднено. Поэтому предлагается использовать численные способы расчета наведенного импульса, как показано в данной работе и работах [21, 22].

При анализе реального сигнала возникнет сложность, связанная с зашумленностью сигнала и влиянием параметров измерительных цепей. Предлагается в дальнейшем использовать дополнительную фильтрацию сигнала, а также рассмотреть возможность использование нейронных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райкунов Г. Г. Космический мусор. В 2 кн. Кн.1. Методы наблюдения и модели космического мусора. – М.: Физматлит, 2014.
2. Семкин Н. Д., Калаев М. П., Телегин А. М., Пияков А. В., Родин Д. В. // Прикладная физика. 2012. № 2. Р. 104.
3. Телегин А. М. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 6. С. 618.
4. Телегин А. М., Воронов К. Е., Авдеев В. А. // Прикладная физика. 2016. № 6. Р. 116.
5. Auer S., Grün E., Kempf S., Srama R., Srowig A., Sternovsky Z., Tschernjowski V. // Review of scientific instruments. 2008. № 79. Р. 100.
6. Xie J., Sternovsky Z., Auerd S., Drake K., Grün E., Horanyi M., Le H., Srama R. // Planetary and Space Science. 2013. Vol. 89. Р. 63.
7. Auer S. // OPTICA ACTA. 1982. Vol. 29. № 10. Р. 1421.
8. Auer S. // Rev. Sci. Instrum. 1975. Vol. 46. № 2. Р. 127.

9. Horanyi M. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 1996. № 34. P. 383.
10. Auer S., Grün E., Srama R., Kemp S., Auer R. // Planetary and Space Science. 2002. Vol. 50. № 7-8. P. 773.
11. Li Y., Kempf S., Simolka J., Strack H., Grün E., Srama R. // Advances in Space Research. 2017. № 59. P. 1636.
12. Auer S., Drake K., Horanyi M., Mocker A., Munsat T., Shu A., Sternovsky Z., Thomas E., Xie J. // Measurement Science and Technology. 2012. Vol. 23. № 10.
13. Nicholas Robert George Shrine. Laboratory Investigation of Oblique Hypervelocity Impacts with Relevance to In situ Meteoroid and Space Debris Detectors. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, November 1999, – 231 p.
14. Shockley W. // J. Appl. Phys. 1938. Vol. 9. P. 635.
15. Фельд Я. Н. // Докл. АН СССР. 1953. Т. 93. № 3. С. 447.
16. Герштейн Г. М. Моделирование полей методом электростатической индукции. – М.: Наука, 1970.
17. Тонких В. А., Иванков Ю. В., Крисилов А. В. // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2013. № 1. С. 114.
18. Иновенков А. Н., Константинов О. В., Пирогов В. И. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 9. С. 1.
19. Поклонский Н. А., Върко С. А., Кочерженко А. А. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 11. С. 75.
20. Semkin N. D., Voronov K. E., Piyakov A. V., Piyakov I. V. // Instruments and Experimental Techniques. 2009. Vol. 52. № 4. P. 595.
21. Mathieson E., Gordon J. S. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1984. № 227. P. 277.
22. Воронов К. Е., Телегин А. М., Лисян Ц., Цзилун Ц. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 594.
23. Пияков И. В., Калаев М. П., Сухачев К. И., Воронов К. Е., Телегин А. М. // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 6. С. 83.

PACS: 87.65.+y, 96.50.Pw

Investigation of the shape of the induced pulse from the sensor of micrometeoroids and particles of space debris of ionization type with plate electrodes

K. E. Voronov, A. M. Telegin, K. I. Sukhachev, and M. P. Kalaev

Samara University
34a Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia

Received November 24, 2020

The article provides a brief description of the sensor of micrometeoroids and space debris particles of the ionization principle of operation. An algorithm is proposed for determining the shape of the induced pulse based on the Shockley–Ramo theorem, which occurs on measuring electrodes during the passage of charged microparticles depending on their flight path. It is shown how to determine the slope of the micro-particle flight when it moves through the electrodes in the form of plates.

Keywords: micrometeorites, space debris, registration, scientific equipment.

REFERENCES

1. G. G. Raikunov, *Space debris. In 2 books. Book 1. Methods of observation and space debris models* (Fizmatlit, Moscow, 2014) [in Russian].
2. N. D. Semkin, M. P. Kalaev, A. M. Telegin, A. V. Piyakov, and D. V. Rodin, Applied Physics, No. 2, 104 (2012) [in Russian].

3. A. M. Telegin, *Successes in applied physics* **4** (6), 618 (2016).
4. A. M. Telegin, K. E. Voronov, and V. A. Avdeev, *Applied Physics*, No. 6, 116 (2016) [in Russian].
5. S. Auer, E. Grün, S. Kempf, R. Srama, A. Srowig, Z. Sternovsky, and V. Tschernjawski, *Review of scientific instruments*, № 79, 100 (2008).
6. J. Xie, Z. Sternovsky, S. Auerd, K. Drake, E. Grün, M. Horanyi, H. Le, and R. Srama, *Planetary and Space Science* **89**, 63 (2013).
7. S. Auer, *OPTICA ACTA* **29** (10), 1421 (1982).
8. S. Auer, *Rev. Sci. Instrum.* **46** (2), 127 (1975).
9. M. Horanyi, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 34, 383 (1996).
10. S. Auer, E. Grün, R. Srama, S. Kempf, and R. Auera, *Planetary and Space Science* **50** (7-8), 773 (2002).
11. Y. Li, S. Kempf, J. Simolka, H. Strack, E. Grün, and R. Srama, *Advances in Space Research*, 59, 1636 (2017).
12. S. Auer, K. Drake, M. Horanyi, A. Mocker, T. Munsat, A. Shu, Z. Sternovsky, E. Thomas, and J. Xie, *Measurement Science and Technology* **23** (10), (2012).
13. Nicholas Robert George Shrine, *Laboratory Investigation of Oblique Hypervelocity Impacts with Relevance to In situ Meteoroid and Space Debris Detectors*. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, November 1999, 231 p.
14. W. Shockley, *J. Appl. Phys.* **9**, 635 (1938).
15. Ya. N. Fel'd, *Dokl. AN SSSR* **93** (3), 447 (1953).
16. G. M. Gershtein, *Modeling fields by electrostatic induction* (Nauka, Moscow, 1970) [in Russian].
17. V. A. Tonkikh, Yu. V. Ivankov, and A. V. Krisilov, *Vestnik VGU. Seriya: Fizika. Matematika*, No. 1, 114 (2013).
18. A. N. Inovenkov, O. V. Konstantinov, and V. I. Pirogov, *Technical Physics* **63** (9), 1 (1993).
19. N. A. Poklonski, S. A. Vyrko, and A. A. Kocherzhenko, *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* **49** (11), 1469 (2004).
20. N. D. Semkin, K. E. Voronov, A. V. Piyakov, and I. V. Piyakov, *Instruments and Experimental Techniques* **52** (4), 595 (2009).
21. E. Mathieson and J. S. Gordon, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, No. 227, 277 (1984).
22. K. E. Voronov, A. M. Telegin, Jiang Lisyan, and Jiao Jilong, *Usp. Prikl. Fiz.* **7** (6), 594 (2019).
23. I. V. Piyakov, M. P. Kalaev, K. I. Sukhachev, K. E. Voronov, and A. M. Telegin, *Instruments and Experimental Techniques* **63** (6), 870 (2020).