

УДК 621.357.6

## Конструкция датчиков потоков космической плазмы на основе цилиндра Фарадея

Мухуров Н.И.<sup>1</sup>, Гасенкова И.В.<sup>1</sup>, Андрухович И.М.<sup>1</sup>, Застенкер Г.Н.<sup>2</sup>, Бородкова Н.Л.<sup>2</sup>, Костенко В.И.<sup>2</sup>, Каримов Б.Т.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
пр-т Независимости, 68-1, г. Минск 220072, Беларусь

<sup>2</sup>Институт космических исследований Российской академии наук,  
ул. Профсоюзная, 84/32, г. Москва 117997, Россия

<sup>3</sup>СКБ космического приборостроения Института космических исследований Российской академии наук,  
ул. М. Горького, 33, г. Таруса 249101, Калужская область, Россия

Поступила 07.07.2017

Принята к печати 08.09.2017

Важными задачами современных космических исследований являются изучение и непрерывные наблюдения процессов космической и метеорологической «погоды». Одним из электронных приборов для проведения таких исследований является датчик плазмы на основе цилиндра Фарадея. Цель работы состояла в разработке конструктивного варианта цилиндра Фарадея с прецизионными чувствительными (селектирующими) элементами в виде металлических сеточных микроструктур и четырехсекторным коллектором, не имеющего аналогов в мировой технике.

Для формирования сеточных никелевых микроструктур разработан процесс создания с помощью фотолитографии матрицы из нанопористого анодного оксида алюминия как прецизионной формы (шаблона) для осаждения наноструктурированных металлических слоев. Разработаны методы проведения тестовых испытаний на механические (вибрационные) и термоциклические воздействия, соответствующие требованиям к космическим приборам.

Сеточные микроструктуры сформированы в едином технологическом цикле с кольцами-держателями по периметру сетки, с квадратным  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup> сечением полотна и ячейками размером  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>. Прозрачность каждой из сеток при нормальном падении света составила более 90 %. Габаритные размеры держателей и сеточных микроструктур: внутренние диаметры (34, 47, 60) ± 0,1 мм, внешние диаметры колец (42, 55, 68) ± 0,1 мм соответственно. Масса одной сетки составила менее 50 мг.

Результаты испытаний продемонстрировали работоспособность разработанных сеточных микроструктур при многократных термоциклических воздействиях от –50 до +150 °С и вибрационных и статических перегрузках, характерных при космических полетах. В составе приборов для проведения плазменных измерений в окрестности Земли и в межпланетном пространстве будут использованы шесть датчиков с различной угловой ориентацией. Это обеспечит возможность фиксирования ионов космической плазмы в телесном угле около 180°.

**Ключевые слова:** датчик потоков космической плазмы, цилиндр Фарадея, прецизионные чувствительные (селектирующие) элементы, четырехсекторный коллектор, широкоугольный прибор.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

**Адрес для переписки:**

Мухуров Н.И.  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
пр-т Независимости, 68-1, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

**Address for correspondence:**

Mukhurov N.I.  
SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»,  
Nezavisimosty Ave., 68-1, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

**Для цитирования:**

Мухуров Н.И., Гасенкова И.В., Андрухович И.М., Застенкер Г.Н.,  
Бородкова Н.Л., Костенко В.И., Каримов Б.Т.

Конструкция датчиков потоков космической плазмы на основе  
цилиндра Фарадея.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 305–313.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

**For citation:**

Mukhurov N.I., Gasenkova I.V., Andruhovich I.M., Zastenker G.N.,  
Borodkova N.L., Kostenko V.I., Karimov B.T.

[The Design of the Solar Wind Ion Flux Sensors Based  
on the Faraday Cup].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 4, pp. 305–313 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

# The Design of the Solar Wind Ion Flux Sensors Based on the Faraday Cup

Mukhurov N.I.<sup>1</sup>, Gasenkova I.V.<sup>1</sup>, Andruhovich I.M.<sup>1</sup>, Zastenker G.N.<sup>2</sup>, Borodkova N.L.<sup>2</sup>, Kostenko V.I.<sup>2</sup>, Karimov B.T.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Scientific and Production Association «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»,  
Nezavisimosty Ave., 68-1, Minsk 220072, Belarus

<sup>2</sup>Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow 117997, Russia

<sup>3</sup>Special Design Bureau for Space Instruments Engineering of the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
M. Gorky str., 33, Tarusa 249101, Kaluga region, Russia

Received 07.07.2017

Accepted for publication 08.09.2017

## Abstract

Important tasks of modern space research are the study and continuous observations of the processes of cosmic and meteorological «weather». One of the electronic devices for carrying out such researches is a plasma sensor based on Faraday cup. The purpose of the work was to develop a constructive variant of the Faraday cup with precision sensitive (selective) elements in the form of metal grid microstructures and a four-sector collector, which has no analogues in the world technology.

For the formation of grid nickel microstructures, a process has been developed for creating a matrix of nanoporous anodic aluminum oxide by photolithography as a precision shape (template) for depositing nanostructured metal layers. Methods for conducting testing for mechanical (vibrational) and thermocyclic impact that satisfies the requirements for space instruments have been developed.

The grid microstructures are formed in a unified technological cycle with the production of ring-holders along the perimeter of the grid, with a square  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  section of the web and square cells with a size of  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ . The transparency of each of the grids was more than 90 % for the normal incidence of light. Dimensions of holders and grid microstructures: internal diameters (34, 47, 60)  $\pm 0.1 \text{ mm}$ , external diameters of rings (42, 55, 68)  $\pm 0.1 \text{ mm}$ , respectively. The weight of one grid was less than 50 mg.

The test results demonstrated the operability of the developed grid microstructures with multiple thermocyclic actions from  $-50$  to  $+150 \text{ }^\circ\text{C}$  and vibrational and static overloads specific for space flights. Instruments for plasma measurements in the near of the Earth and in the interplanetary space will comprise six sensors with different angular orientations. This will make it possible to detect ions of cosmic plasma in a solid angle of about  $180^\circ$ .

**Keywords:** solar wind ion flux sensor, Faraday cup, precisions sensitive (selective) elements, four-sector collector, wide-angle device.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

---

### Адрес для переписки:

Мухуров Н.И.  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
пр-т Независимости, 68-1, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

### Address for correspondence:

Mukhurov N.I.  
SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»,  
Nezavisimosty Ave., 68-1, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

---

### Для цитирования:

Мухуров Н.И., Гасенкова И.В., Андрухович И.М., Застенкер Г.Н.,  
Бородкова Н.Л., Костенко В.И., Каримов Б.Т.

Конструкция датчиков потоков космической плазмы на основе цилиндра Фарадея.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 305–313.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

### For citation:

Mukhurov N.I., Gasenkova I.V., Andruhovich I.M., Zastenker G.N.,  
Borodkova N.L., Kostenko V.I., Karimov B.T.

[The Design of the Solar Wind Ion Flux Sensors Based on the Faraday Cup].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 4, pp. 305–313 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

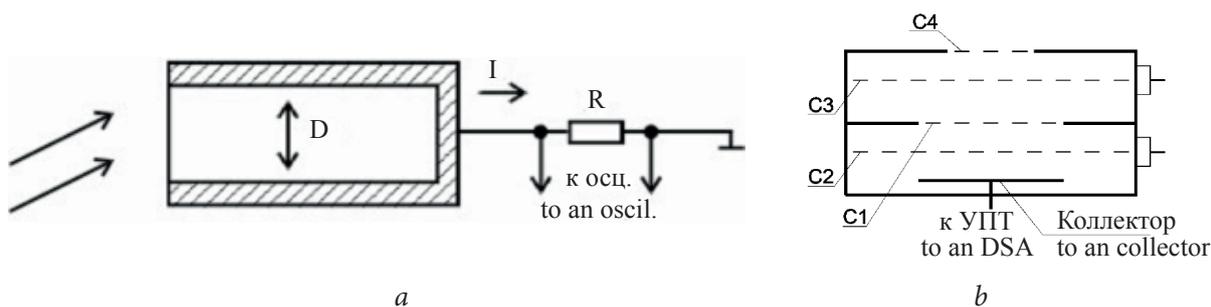
## Введение

Одной из проблем, возникающих при предсказании космической погоды, является существование непредсказуемых вариаций параметров (турбулентности) в солнечном ветре, магнитослое (области между околоземной ударной волной и границей магнитосферы – магнитопаузой) и в самой магнитосфере. Характеристики турбулентности в данных областях, особенно в высокочастотном диапазоне, несмотря на длительный период космических исследований у нас в стране и за рубежом, сравнительно мало исследованы, что было связано с определенными принципиальными трудностями (на одном космическом аппарате трудно различить пространственные и временные вариации) [1, 2]. Наблюдаемые значительные и быстрые вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля приводят к изменению состояния магнитосферы Земли, что влияет (иногда катастрофически) на жизнедеятельность человека, техносферную сферу [3–5]. Плотность плазмы солнечного ветра является одним из ключевых параметров для прогнозирования космической погоды. Существуют два метода определения плотности солнечного ветра: с использованием спектрометра и микроканальных пластин и ловушки, конструируемые на основе цилиндра Фарадея. К достоинствам первого метода относится хорошее измерение скорости и температуры плазмы солнечного ветра, но прямое измерение потока частиц в космической плазме представляет собой значительную

проблему. Только один апробированный в космических экспериментах тип датчика, который с некоторыми ограничениями может быть отнесен к измерителям потока частиц, – цилиндр Фарадея – позволяет определять концентрацию и скорость солнечного ветра с высокой точностью [5–7]. Это устройство может быть использовано для измерения параметров малоэнергетичной плазмы, имеющейся в солнечном ветре и переходной области, влияния солнечной активности на процессы в магнитосферно-ионосферной системе, механизмов, посредством которых это влияние осуществляется.

## Особенности функционирования датчика на основе цилиндра Фарадея применительно к измерениям потоков космической плазмы

Конструкция датчика на основе цилиндра Фарадея и принцип его работы (рисунок 1а) известны [8]. Это устройство для определения полного электрического заряда и интенсивности пучка частиц названо в честь английского физика М. Фарадея. Представляет собой металлический стакан с открытым входным окном, содержащий металлический коллектор для регистрации электрического тока, возникающего в измерительном контуре при движении заряженных частиц, входящих через окно. Цилиндры Фарадея используют для измерения распределения плотности электронного пучка, измерения поляризации, электрического потенциала и т. д. [5–8].



**Рисунок 1** — Упрощенное схематическое изображение конструкции цилиндра Фарадея и обобщенной схемы регистрации потока ионов (а) и принципиальная схема датчика потока космической плазмы на основе цилиндра Фарадея (b)

**Figure 1** — A simplified schematic representation of the design of the Faraday cylinder and the general scheme for recording the ion flux (a) and a schematic diagram of space plasma flow sensor based on the Faraday cylinder (b)

Применительно к экспериментальным исследованиям потока космической плазмы в качестве датчиков используются цилиндры Фарадея с элементами регистрации отдельных частиц

[9, 10]. Для разделения заряженных частиц по знаку заряда и по величине их энергии предусмотрен набор диафрагм, формирующих угловую диаграмму датчика, и набор сеток (рисунок 1b).

Эти селектирующие элементы являются существенной составляющей датчиков [11].

Цилиндр Фарадея состоит из корпуса, имеющего входное окно, сеток С1–С4 и коллектора. Принцип работы датчика заключается в следующем: при попадании на коллектор ионов плазмы в цепи коллектора возникает ток, который усиливается присоединенным к коллектору усилителем постоянного тока (УПТ) и затем преобразуется в выходное электрическое напряжение. Сетка С2 (супрессорная) предназначена для отсеки электронов солнечного ветра и возвращения на коллектор фотоэлектронов и вторичных электронов, выбиваемых из коллектора фотонами УФ-излучения Солнца и ударами ионов солнечного ветра. На сетку С2 подается отрицательное относительно корпуса напряжение порядка 300 В. Сетки С1, С4 (земляные) соединены с корпусом датчика. Сетка С3 (управляющая) служит для селекции потока ионов по величине их энергии, для чего на эту сетку подается фиксированное или переменное тормозящее ионы положительное относительно корпуса напряжение в пределах от нескольких десятков вольт до нескольких киловольт.

К преимуществам цилиндра Фарадея относятся его простота, высокая степень надежности, долгий срок службы (связанные с отсутствием полупроводниковых детекторов), возможности измерения полного, т. е. интегрального по энергии и по массам потока частиц, регистрации потоков частиц в довольно широком угловом окне и достижения высокого временного разрешения. Эти преимущества обеспечили широкое применение приборов с цилиндрами Фарадея в качестве датчиков во множестве экспериментов

по изучению межпланетной плазмы и плазмы в магнитосфере Земли и магнитосферах других планет. Они применялись на ряде американских космических аппаратов *WIND* и *Voyager-1, 2*. Одним из лучших по функциональным возможностям можно считать прибор *IAP* на французском спутнике *Demeter*. В области космических исследований с помощью цилиндров Фарадея осуществлялись измерения потоков частиц в рамках таких проектов, как «Прогноз-8», «Прогноз-10», «Прогноз-11», «Интербол», «Спектр-Р» и др.

Один прибор быстрого мониторинга солнечного ветра включает в себя несколько датчиков (цилиндров Фарадея), которые по назначению и конструкции делятся на две группы (рисунок 2). Один или несколько датчиков первой группы направлены в одну сторону и предназначены для измерения энергетических спектров потока ионов в диапазоне 0,25–3,0 кэВ/заряд. Для этого на управляющие сетки этих датчиков подается положительное относительно корпуса электрическое напряжение от 0,1 до 3,0 кВ. Изменение управляющего напряжения позволяет определять распределение по величине энергии на заряд, из которого, в свою очередь, вычисляются основные параметры потока ионов: переносная скорость, ионная температура и концентрация. Три датчика второй группы направлены в разные стороны и предназначены для определения величины и направления полного (т. е. интегрального по энергии) вектора потока ионов солнечного ветра (или магнитослоя). На них запирающее напряжение не подается. Для этого оси датчиков отклонены от главной оси прибора на 20° и друг от друга на 120°. Ширина и форма полной угловой



a



b

**Рисунок 2** – Прибор быстрого мониторинга солнечного ветра: *a* – основной блок с цилиндрами Фарадея; *b* – датчик ДП-5М

**Figure 2** – Device for rapid monitoring of solar wind: *a* – basic block with Faraday cups; *b* – sensor DP-5M

характеристики подбираются таким образом, что в пределах  $\pm 20^\circ$  от оси датчика суммарный ток трех коллекторов почти не зависит от угла прихода частиц. Электрический ток каждого коллектора при тех же отклонениях существенно зависит от направления приходящих ионов, что позволяет определять углы прихода ионов по соотношению измеренных токов каждым цилиндром Фарадея. Все датчики снабжаются супрессорными сетками, на них подается отрицательное относительно корпуса напряжение порядка 500 В, запирающее поток электронов солнечного ветра и возвращающее на коллектор вторичные электроны, выбитые из коллектора УФ-излучением Солнца или ионами потока солнечного ветра.

Сетки и коллектор изолированы друг от друга и от корпуса прокладками и стойками из фторопласта и капролона. Рабочая поверхность коллектора имеет специальную технологическую обработку для уменьшения коэффициента отражения в ультрафиолетовой области солнечного спектра до величины  $\leq 2\%$ . Поверхности корпуса датчика и диафрагмы имеют гальваническое покрытие Хс (хром черный) с коэффициентом отражения в ультрафиолетовой области  $\leq 6\%$ . Все сетки – электроды изготовлены из проволоки диаметром 0,015 мм, закрепленной на изолирующих кольцах. Материал проволоки – сплав ВК–20 (вольфрам-кобальт). Ячейка сетки квадратная размером  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>, покрытие сеток гальваническое Хс (хром черный).

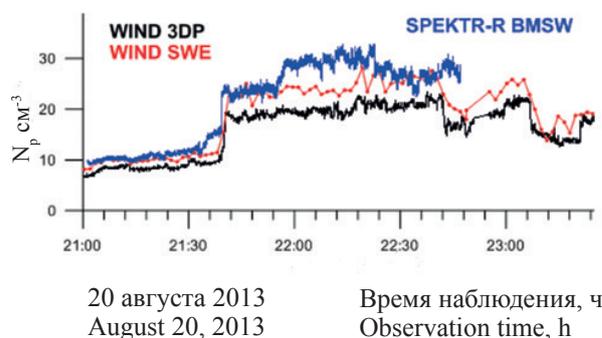
На рисунке 3 приведен пример измерения концентрации ионов солнечного ветра для одного и того же события электростатическим анализатором и цилиндрами Фарадея [3]. Видно, что концентрация, измеренная цилиндрами Фарадея на разных спутниках, совпадает по величине и больше, чем концентрация, измеренная спектрометром.

Результаты измерений позволяют судить о физических процессах, происходящих в космическом пространстве.

### Конструктивное исполнение экспериментальных датчиков потоков космической плазмы на основе цилиндра Фарадея

Современный технический уровень в области создания датчиков потоков космической плазмы характеризуется следующими показателями: чувствительность  $\approx 3 \cdot 10^5$  част.  $\cdot$  см<sup>-2</sup>  $\cdot$  с<sup>-1</sup>; масса  $\approx 200$  г;

габариты: высота  $\approx 40$  мм, диаметр  $\approx 80$ –100 мм, угол зрения  $\approx \pm 60^\circ$ ; максимальное значение электрического напряжения на селективирующей сетке  $\approx 3$  кВ; прозрачность набора сеток  $\approx 60\%$ .



**Рисунок 3** – Концентрация ионов солнечного ветра по данным приборов 3DP (анализатор), SWE (цилиндр Фарадея) и BMSW (цилиндр Фарадея)

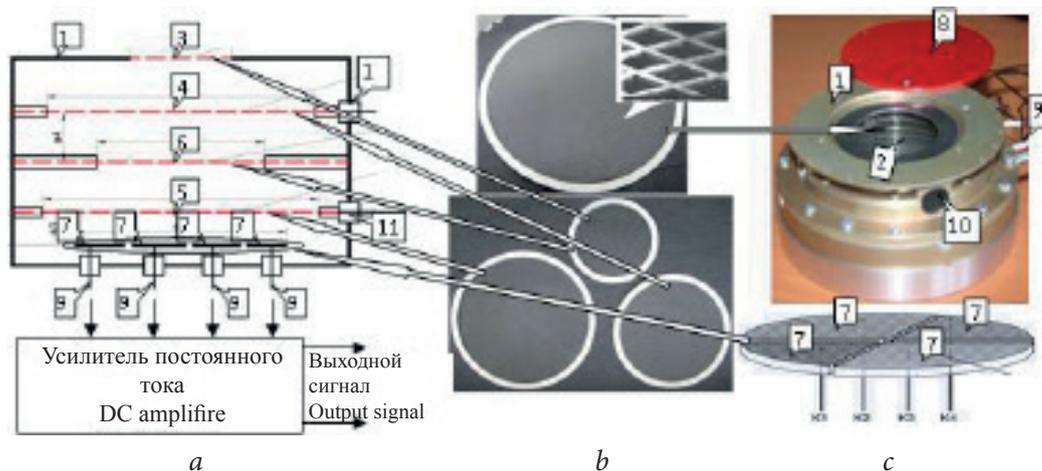
**Figure 3** – The concentration of solar wind ions according to 3DP (analyzer), SWE (Faraday's cylinder) and BMSW (Faraday's cylinder)

Основные тенденции развития направлены на снижение массы и размеров, повышение чувствительности, расширение энергетического диапазона измерений, уменьшение потерь тока коллектора вследствие токов фотоэлектронов и вторичных электронов, увеличение срока службы.

Конструкция экспериментального образца датчика потока космической плазмы представлена на рисунке 4. Особенность конструкции разработанного экспериментального образца датчика потока плазмы заключается в использовании составного коллектора, разделенного на четыре сектора, каждый из которых имеет свой отдельный вывод.

Это позволяет существенно улучшить алгоритм быстрого определения параметров потока плазмы и минимизировать массу прибора, в который будет встраиваться датчик потока плазмы. Увеличенный диапазон значений высокого электрического напряжения до 4–5 кВ, подаваемого на управляющую сетку, позволяет получать сведения о составе потока солнечного ветра, хотя датчик потока космической плазмы не содержит устройств для селекции ионов по массе.

При попадании на коллектор потока ионов солнечного ветра в цепи коллектора возникает электрический ток, который усиливается присоединенным к коллектору усилителем постоянного тока и затем преобразуется в выходное электрическое напряжение. Электрическое соединение



**Рисунок 4** – Схематическое изображение конструкции экспериментального образца (а), фотографии чувствительных элементов (сеточных структур) (b) и фотография датчика потока ионов космической плазмы и 4-секционного коллектора (с): 1 – корпус; 2 – входное окно; 3 – внешняя диафрагма; 4 – супрессорный элемент; 5 – управляющий элемент; 6 – внутренняя диафрагма; 7 – четыре секции коллекторов; 8 – технологическая пылевлагозащитная крышка; 9 – контакты коллекторов в виде штырей; 10 – гнездо для подключения высокого напряжения; 11 – изоляторы

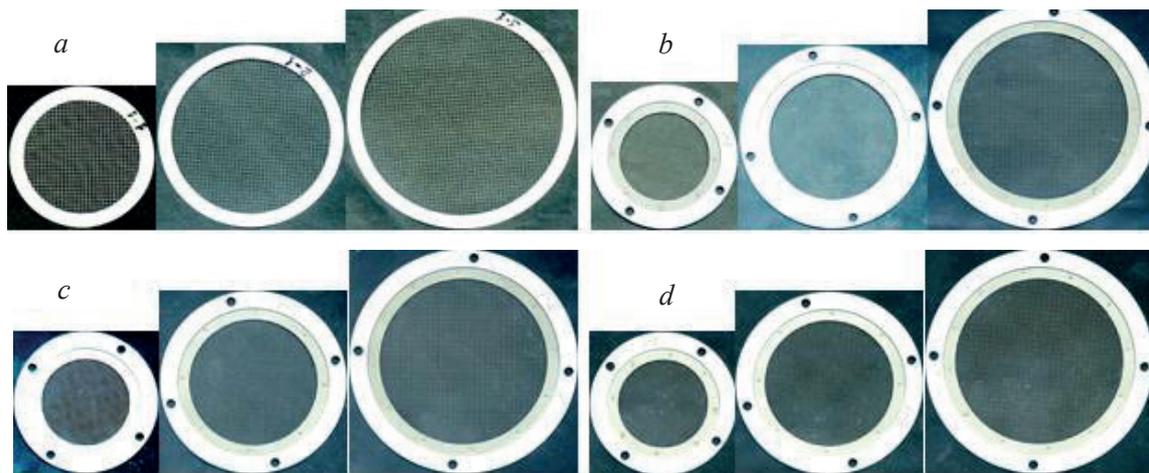
**Figure 4** – Schematic representation of the design of the experimental sample (a), photographs of the sensing elements (grid structures) (b) and a photograph of the ion flux sensor of the cosmic plasma and the 4-sectional collector (c): 1 – case; 2 – entrance window; 3 – external diaphragm; 4 – suppressor element; 5 – control element; 6 – internal diaphragm; 7 – four sections of collectors; 8 – technological dust and moisture protection cover; 9 – contacts of collectors in the form of pins; 10 – a socket for connection of a high voltage; 11 – insulators

датчика с цепями электроники осуществляется штыревыми контактами 9 коллекторов и высоковольтными вводами 10 к селекционирующим элементам. Набор электродов состоит из четырех элементов, в том числе двух диафрагм, имеющих электрическое соединение с корпусом. На супрессорные 4 и управляющие 5 элементы от источников электропитания подаются соответствующие относительно корпуса величины напряжения: супрессорное (–500 В) – для подавления тока вторичных электронов и фотоэлектронов с коллектора и отсечки потока электронов солнечного ветра; управляющее (от 0 до +4000 В) – для селекции ионов солнечного ветра по величине энергии. Супрессорные и управляющие элементы и коллектор 7 изолированы друг от друга и от корпуса прокладками-стойками 11 из фторопласта и капролона.

Комплект диафрагм, селекционирующих элементов и держателей для датчиков потока космической плазмы включает сетки и держатели разных модификаций и типоразмеров в соответствии с различными типами датчиков потока плазмы. Элементы представляют собой сеточные микроstructures с квадратными ячейками размером до  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>. Линейные составляющие микроstructures имеют квадратное сечение  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>.

Сеточные микроstructures прикрепляются по периметру к кольцам-держателям из аналогичных сетке материала и толщины. Габаритные размеры держателей и сеточных микроstructures составляют: внутренние диаметры  $(34, 47, 60) \pm 0,1$  мм, внешние диаметры колец  $(42, 55, 68) \pm 0,1$  мм соответственно. Материал сеток и колец – никель. Прозрачность каждой из сеток при нормальном падении света составила более 90 %. Минимальная масса одной сетки не превосходила 50 мг. Показано, что внешние размеры деталей могут варьироваться от 30 до 100 мм при общей толщине от 10 до 20 мкм, при этом микронные размеры сеточной структуры (сечение –  $10\text{--}20$  мкм<sup>2</sup>, расстояние между ячейками – 1000 мкм) сочетаются с миллиметровыми размерами ширины внешнего крепежного кольца (5–8 мм).

Определение способности конструкции и технологии изготовления экспериментальных образцов селекционирующих элементов противостоять типичным механическим и термоциклическим воздействиям, характерным для программы космического полета, выполнено с помощью лабораторных испытаний. Для этого была разработана программа и методики предварительных комплексных испытаний чувствительных элементов.



**Рисунок 5** – Чувствительные элементы различных диаметров в исходном состоянии (а), после микросварки оправы (b), механических (c) и термоциклических (d) воздействий

**Figure 5** – Sensitive elements of different diameters in the initial state (a), after micro-welding of the frame (b), mechanical (c) and thermocyclic (d) influences

### Стойкость экспериментальных образцов селективирующих элементов к термомеханическим воздействиям

Предварительные комплексные испытания экспериментальных образцов сеточных чувствительных элементов проводились при нормальных климатических условиях: температура  $25 \pm 10$  °С; относительная влажность воздуха не более 80 %; атмосферное давление от 84,0 до 106,7 кПа (630–800 мм рт. ст.). Термоциклирование выполнялось в климатической камере и термокамере. При проведении испытаний на термоциклирование были созданы следующие условия: минимальная температура окружающей среды  $-50 \pm 2$  °С, максимальная температура окружающей среды  $+150 \pm 2$  °С, атмосферное давление от  $1,3 \times 10^{-7}$  до 106,7 кПа ( $10^{-6}$  – 800 мм рт. ст.). Применяемые для испытаний и обработки стандартные средства измерений зарегистрированы в Госреестре и поверены метрологической службой в соответствии с ПР 50.2.006-94. Измерительные средства и приборы, не подлежащие поверке, имели технические паспорта или сертификаты, подтверждающие их исправность.

Критерием работоспособности чувствительных элементов – сеточных микроструктур является целостность их структуры. Целостность структуры сеток проверялась с помощью визуального контроля под микроскопом с 10-кратным увеличением.

Конструкции чувствительных элементов выдержали испытания проверкой на пробой.

Чувствительные элементы обеспечивали нормальное функционирование при приложении к ним (как в вакууме, так и на воздухе) постоянного положительного относительно корпуса электрического напряжения величиной до 4,0 кВ и отрицательного постоянного относительно корпуса напряжения величиной до 500 В. Испытательное электрическое напряжение прикладывалось между выводом чувствительного элемента при его установке на проводящем основании. Чувствительные элементы нормально функционировали при температуре от  $-50$  до  $+150$  °С и сохраняли свою работоспособность после воздействия механических нагрузок (вибрационных перегрузок, статических перегрузок от линейных ускорений и импульсных перегрузок). Статические перегрузки (действовали совместно 15 мин):  $n_x = \pm 4,0$  g;  $n_y = \pm 0,5$  g;  $n_z = \pm 0,5$  g. Испытания проводили на частоте для первого диапазона 15 Гц, для второго – 6 Гц.

Анализ качества разработанных чувствительных элементов после предварительных комплексных испытаний подтвердил неизменность геометрических параметров (рисунок 5).

Отдельные ячейки с незначительным отклонением от контролируемых параметров при общем количестве ячеек в несколько сотен практически не смогут оказывать сколь заметного влияния на характеристики датчиков плазмы.

### Заключение

Разработанные датчики потока космической плазмы с сеточными чувствительными

элементами удовлетворяют основным техническим требованиям к ним (величины прозрачности, однородности и целостности структуры, отклонения от плоскостности, надежности крепления контактов, теплового режима работы, стойкости к вибрационным и ударным воздействиям и т. д.) и, как следствие, могут быть использованы в качестве таких элементов в составе нового поколения датчиков потоков космической плазмы для проведения реальных космических экспериментов [12].

Создание нового поколения датчиков потоков космической плазмы позволит заменить собой несколько одноколлекторных цилиндров Фарадея, что приведет к существенному уменьшению массы и объема плазменного спектрометра при выполнении всех необходимых задач. Наличие нескольких коллекторов и параллельных измерительных цепей обеспечит резервирование, возможность гибкого алгоритма работы и тем самым существенно повысит надежность прибора.

Разработанный экспериментальный образец датчика потока космической плазмы на основе чувствительных (селектирующих) элементов из наноструктурированных материалов, с одной стороны, соответствует выявленным тенденциям, с другой – представляет собой новое устройство, не имеющее аналогов в мировой технике, в связи с выполнением его коллектора разделенным на несколько частей, а также применением в его конструкции абсолютно новых наноструктурированных материалов и увеличением диапазона значений электрического напряжения, подаваемого на управляющую сетку.

## Список использованных источников

1. Фундаментальные космические исследования: в 2 кн. Кн. 2. Солнечная система / под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова. – М.: Физматлит, 2014. – 456 с.
2. Basics of the Solar Wind (Cambridge Atmospheric and Space Science Series). – Cambridge University Press, 2007. – 478 p.
3. Kasper, J.C. Solar wind ion and electron distribution functions and the transition from fluid to kinetic behavior / J.C. Kasper. – Harvard-Smithsonian center for astrophysics. GYPW01, Isaac Newton Institute, 2010. – 46 p.
4. Shopov, Y. Cycles of the Solar Wind Flux at the Front of the Earth's Magnetosphere / Y. Shopov, D. Stoykova // AIP Conf. Proc. – 2011. – Vol. 1356. – P. 192. doi: 10.1063/1.3598105
5. Застенкер, Г.Н. Быстрые вариации величины и направления потока ионов солнечного ветра /

Г.Н. Застенкер [и др.] // Космические исследования. – 2015. – Т. 53, № 1. – С. 63–74.

6. Tariq, H.A.R. Variation of ion energy flux with increasing working gas pressures using Faraday cup in plasma focus device / H.A.R. Tariq, I.A.Khan, U. Ikhtlaq, A. Hussnain // Journal of Natural Sciences and Mathematics. – 2008. – Vol. 48, no. 1 & 2. – P. 65–72.

7. Vaverka, J. Calibration of Faraday Cups used on the Spectr-R Spacecraft for Monitoring the Solar Wind / J. Vaverka [et al.] // WDS'11 Proceedings of Contributed Papers. – Part II. – 2011. – P. 34–39.

8. Brown, K.L. Faraday-Cup Monitors for High-Energy Electron Beams / K.L. Brown, G.W. Tautfest // Review of Scientific Instruments. – 1956. – Vol. 27 (9). – P. 696–702. doi: 10.1063/1.1715674

9. Смолук, В.В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях / В.В. Смолук; под ред. чл.-корр. РАН Н.С. Диканского. – Новосибирск: Параллель, 2009. – 294 с.

10. Faraday cup for detecting plasma immersion-injection dose. Patent CN101615578 China, H01L21/265. Institute of microelectronics of Chinese academy of sciences. Patent Application no. CN20091304720. Priority date 23.07.2009. Date of publication 30.12.2009.

11. Мухуров, Н.И. Особенности формирования прецизионных чувствительных элементов датчиков космической плазмы / Н.И. Мухуров, И.В. Гасенкова, И.М. Андрухович // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 1. – С. 48–56.

12. Сайт Совета РАН по космосу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stp.cosmos.ru>. – Дата доступа: 05.06.2017.

## References

1. Fundamental'nye kosmicheskie issledovaniya [Fundamental cosmic research]. In 2 books. Book 2. Solnechnaya sistema [Solar system]. Under the scientific editorship of Dr. Sc., Prof. G.G. Raikunov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, 456 p. ISBN 978-5-9221-1559-9 (in Russian).
2. Basics of the Solar Wind (Cambridge Atmospheric and Space Science Series). Cambridge University Press, 2007, 478 p.
3. Kasper J.C. Solar wind ion and electron distribution functions and the transition from fluid to kinetic behavior. Harvard-Smithsonian center for astrophysics. GYPW01, Isaac Newton Institute, 2010, 46 p.
4. Shopov Y., Stoykova D. Cycles of the Solar Wind Flux at the Front of the Earth's Magnetosphere. AIP Conf. Proc., 2011, vol. 1356, p. 192. doi: 10.1063/1.3598105
5. Zastenker G.N., Khrapchenkov V.V., Koloskova I.V., Gavrilova E.A., Ryazanova E.E., Ryazanseva M.O., Gagua T.I., Gagua I.T., Shafrankova J., Nemechek Z., Prech L., Voita J. Rapid Variations of the Value and Direction of the Solar Wind Ion Flux. Cosmic Research, 2015, vol. 53, no. 1, pp. 59–69.

6. Tariq H.A.R., Khan I.A., Ikhlaq U., Hussnain A. Variation of ion energy flux with increasing working gas pressures using Faraday cup in plasma focus device. *Journal of Natural Sciences and Mathematics*, 2008, vol. 48, no. 1 & 2, pp. 65–72.
7. Vaverka J., Němeček Z., Přeč L., Šafránková J., Komárek A. Calibration of Faraday Cups used on the Spectr-R Spacecraft for Monitoring the Solar Wind. *WDS'11 Proceedings of Contributed Papers*, part II, 2011, pp. 34–39. ISBN 978-80-7378-185-9
8. Brown K.L., Tautfest G.W. Faraday-Cup Monitors for High-Energy Electron Beams. *Review of Scientific Instruments*, 1956, vol. 27 (9), pp. 696–702.  
**doi:** 10.1063/1.1715674
9. Smalyuk V.V. *Diagnostika puchkov zaryazhennykh chastits v uskoritelyakh* [Diagnosis of charged particle beams in the accelerators] Under the scientific editorship of member corr. RAS N.S. Dikanskii, Novosibirsk, Pararel' Publ., 2009, 294 p (in Russian).
10. Faraday cup for detecting plasma immersion-injection dose. Patent CN101615578 China, H01L21/265. Institute of microelectronics of Chinese academy of sciences. Patent Application no. CN20091304720. Priority date 23.07.2009. Date of publication 30.12.2009.
11. Mukhurov N.I., Gasenkova I.V., Andruhovich I.M. Specific Features of Formation of Precision Sensitive Elements for the Space Plasma Sensors. *Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2015, no. 1, pp. 54–56.
12. *Sait Soveta RAN po kosmosu* [Website of RAS Council on Space]. Available at: <http://stp.cosmos.ru>. (accessed 05.06.2017).