

ИОННЫЙ ИСТОЧНИК НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДМС-01 МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «АИСТ № 2»

© 2016

Н. Д. Сёмкин

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, semkin@ssau.ru

И. В. Пияков

кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, pjajakov@ssau.ru

М. А. Родина

аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, rodina.ssau@gmail.com

Д. В. Родин

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, rodin@ssau.ru

Рассмотрены основные требования, предъявляемые к ионным источникам для бортовых времяпролётных масс-спектрометров. Приведена аппроксимационная формула для расчёта сечения ионизации вещества-аналита. Показана зависимость вероятности ионизации анализируемого вещества для выбранной конструкции ионного источника. Рассмотрено несколько конструкций источников ионов, обеспечивающих получение необходимой ширины зоны ионизации с помощью подбора параметров источника. Для использования в научной аппаратуре ДМС-01, устанавливаемой на борту малого космического аппарата «АИСТ № 2», выбрана конструкция ионного источника, обеспечивающая увеличение надёжности и срока службы прибора. Приведены результаты лабораторного эксперимента по функционированию данной конструкции источника. Полученные данные подтверждают применимость аппроксимационной формулы Лотца-Дрэвина для определения вероятности ионизации атомов или молекул анализируемого вещества в выбранной конструкции источника ионов.

Источник ионов; времяпролётный масс-спектрометр; бортовой масс-спектрометр; малый космический аппарат; аппроксимационная формула; надёжность; конструкция; вероятность ионизации.

Цитирование: Сёмкин Н.Д., Пияков И.В., Родина М.А., Родин Д.В. Ионный источник научной аппаратуры ДМС-01 малого космического аппарата «АИСТ № 2» // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 197-203. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-197-203

Введение

При разработке бортовых приборов необходимо выполнять требования минимизации массовых и габаритных характеристик и требования снижения энергопотребления. Также при проведении космических экспериментов важными параметрами являются высокая надёжность функционирования и длительный срок безотказной работы устройств. Кроме того, существуют специфические требования к ионным источникам, входящим в состав бортовых масс-спектрометров.

Цель данной работы – анализ степени ионизации исследуемого вещества и выбор конструктивных параметров ионного источника.

Требования, предъявляемые к ионным источникам

В масс-спектрометрии используется большое разнообразие ионных источников, соответствующих способу получения ионов. Выбор конкретного типа источника зависит от требований к формируемому ионному пучку и к самому источнику [1].

Основными требованиями являются:

1. Энергетический разброс ионов в пучке должен быть минимальным. Например, для получения в магнитном масс-спектрометре разрешающей способности $R = 1000$ относительный энергетический разброс не должен превышать 0,1% при отсутствии aberrаций источника и анализатора и 0,01% – при их учёте.

2. Должны быть выбраны оптимальные углы расходимости ионного пучка. Их повышение, с одной стороны, приводит к повышению чувствительности масс-спектрометра, а с другой – к росту aberrаций высокого порядка, отрицательно влияющих на разрешающую способность прибора.

3. Ионный ток должен быть стабильным во времени, что обеспечивает отсутствие дополнительной ошибки измерений.

4. Коэффициент использования вещества, равный отношению числа образовавшихся на выходе источника ионов к числу атомов или молекул анализируемого вещества, должен быть максимальным.

5. Ионизация атомов или молекул исследуемого вещества должна быть равновесной.

6. Отношение полезного сигнала ионного источника к фоновому должно быть максимальным.

Вероятность ионизации исследуемого вещества

Ионные источники масс-спектрометров предназначены для получения из нейтральных атомов и молекул вещества направленных пучков ионов [2]. Сечение ионизации атомов или молекул анализируемого вещества электронами, эмиттируемыми катодом, определяется с помощью аппроксимационной формулы Лотца-Дрэвина [3]:

$$\sigma = 2,66 \pi a_0^2 l \frac{R_d^2}{U_i^2} \beta_1 \frac{\frac{U}{U_i} - 1}{\left(\frac{U}{U_i}\right)^2} \ln \left(1,25 \beta_2 \frac{U}{U_i} \right), \quad (1)$$

где a_0 – радиус первой боровской орбиты атома водорода; l – число валентных электронов на внешней оболочке ионизируемого атома; R_d – потенциал ионизации атома водорода по Ридбергу; U – энергия ионизирующих электронов; U_i – потенциал ионизации атома или молекулы; β_1 и β_2 – аппроксимирующие коэффициенты.

Вероятности ионизации для гелия (He), азота (N₂) и углекислого газа (CO₂), рассчитанные по формуле (1), приведены на рис. 1.

Разброс ионов по энергиям существенно зависит от конструкции ионного источника и способа получения ионов.

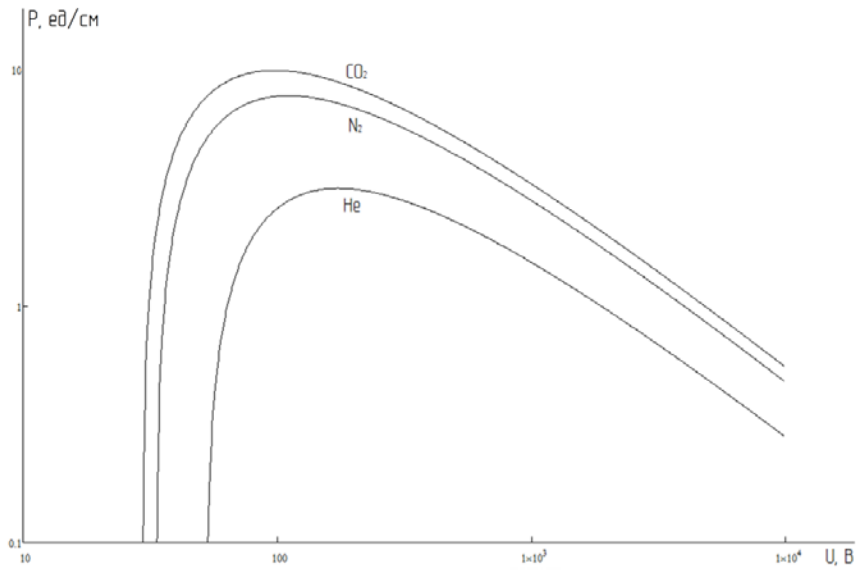


Рис. 1. Вероятность ионизации в зависимости от напряжения согласно аппроксимационной формуле Лотца-Дрэвина

Конструкции ионных источников

В работе [4] была предложена конструкция ионного источника, схематическое изображение которой показано на рис. 2.

На рис. 2 обозначено: 1 – выходная сетка источника ионов; 2 – ускоряющая сетка, формирующая зону ионизации; 3 – запирающая сетка; 4 – нить накала; 5 – отражатель электронов; Кл – ключ, управляющий запирающей сеткой; $U_{инп}$ – источник питания ионной пушки; $U_{кл}$ – источник питания ключа; $U_{зап}$ – запускающий импульс; U_n – напряжение питания нити накала; U_1 – опорное напряжение ключа; U_2 – опорное напряжение накала.

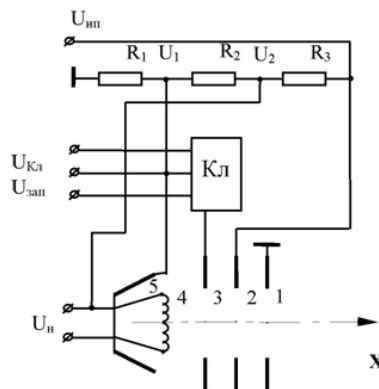


Рис. 2. Ионный источник

Преимуществом данного типа ионных источников является возможность получения необходимой ширины зоны ионизации подбором параметров источника $U_{зап}$, $U_{инп}$ и расстояния между сетками 1, 2 и 3.

Регулировкой ускоряющей разности потенциалов можно получить ионный пучок с заданным энергетическим распределением. Также данная конструкция затрудняет

попадание электронов в объём масс-анализатора, что значительно уменьшает уровень шумов на входе приёмника.

Для времяпролётного масс-спектрометра был разработан ионный источник с накоплением электронов (рис. 3), конструкция которого соответствует приведённой на рис. 2 и обладает высокой вероятностью ионизации исследуемого газа при относительно малом ионном потоке вследствие наличия малого окна.

Преимуществом разработанного источника является аксиально-симметричное расположение нити накала, ускоряющей и запирающей сеток. Благодаря такому расположению не требуется синхронизация импульсов выталкивающего и ускоряющего напряжений, что значительно упрощает настройку данного типа источника ионов.

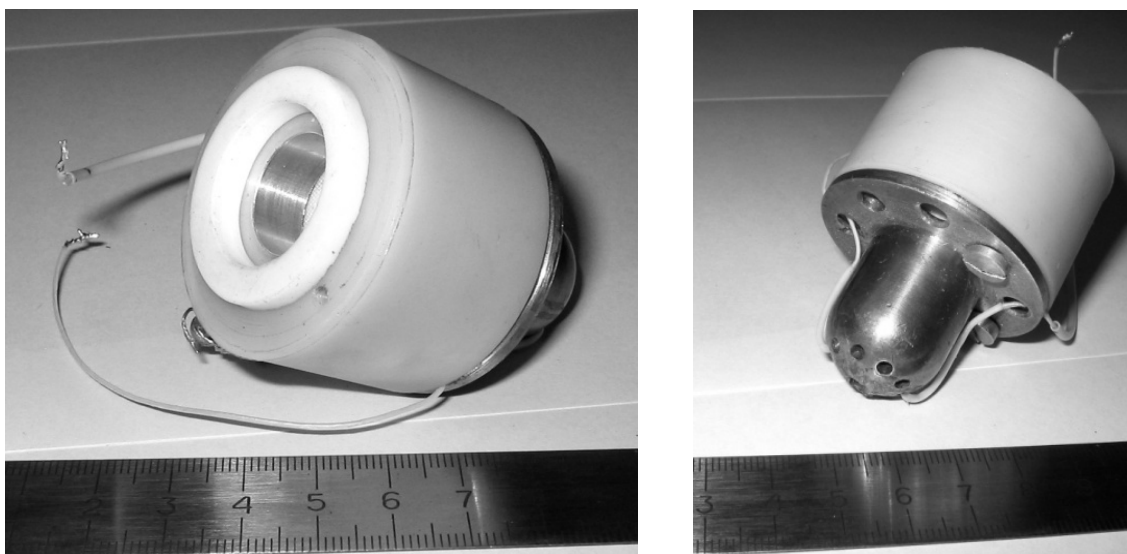


Рис. 3. Внешний вид ионного источника для времяпролётного масс-спектрометра

Недостатком такой конструкции является малый срок службы катода электронной пушки, требующий его периодической замены. В условиях проведения космических экспериментов такая замена невозможна. Поэтому для научной аппаратуры ДМС-01, предназначенной для установки на борту малого космического аппарата «АИСТ № 2», была разработана конструкция источника ионов с пятикратным резервированием канала ионизации (рис. 4).

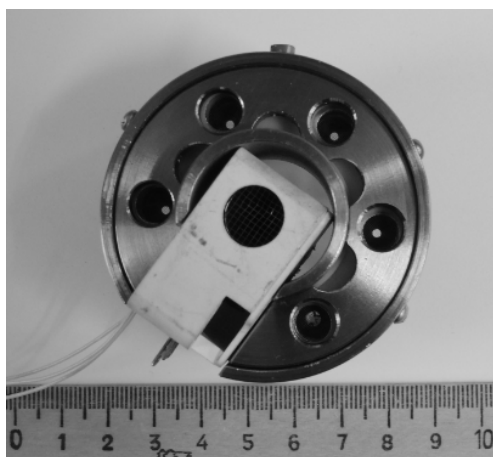


Рис. 4. Ионный источник с пятикратным резервированием

Экспериментальная проверка функционирования выбранного ионного источника с пятикратным резервированием, конструкция которого представлена на рис. 4, проводилась в вакуумной камере типа УВН. Приёмник ионов располагался на расстоянии 20 см от источника.

Осциллограммы ионных токов, равных 95 и 135 эВ, в зависимости от времени представлены на рис. 5 и рис. 6 соответственно.



Рис. 5. Осциллограмма ионного тока, равного 95 эВ

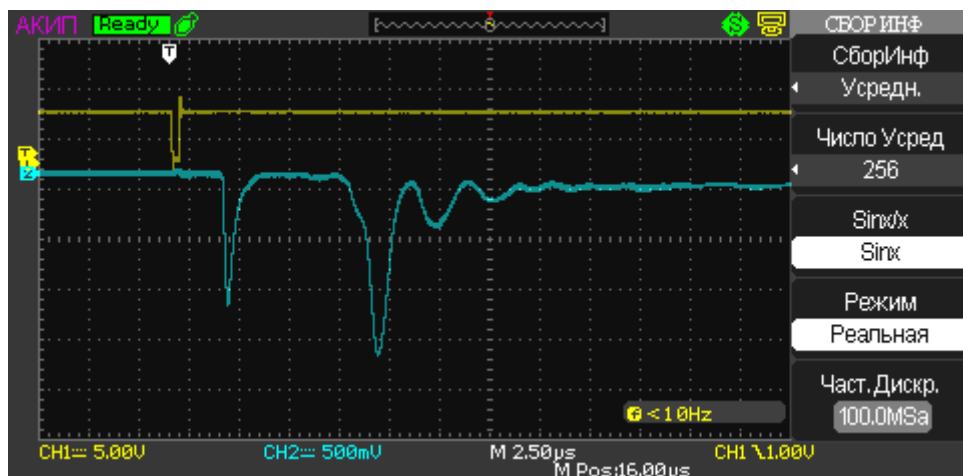


Рис. 6. Осциллограмма ионного тока, равного 135 эВ

Как видно из рис. 5, 6, вероятность ионизации анализируемого вещества для ионного тока, равного 135 эВ, в полтора-два раза превосходит вероятность ионизации для ионного тока, равного 95 эВ. Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими величинами, рассчитанными с помощью аппроксимационной функции Лотца-Дрэвина (1).

Заключение

В выбранной конструкции ионного источника благодаря дублированию электронных излучателей увеличивается его надёжность и срок службы. Это объясняется тем, что при прекращении корректной работы термокатода начинает использоваться один из резервных термокатодов. Пятикратное резервирование канала ионизации позволяет продлить срок службы источника ионов в пять раз, что является особенно важ-

ным при его использовании в научной аппаратуре ДМС-01 на борту малого космического аппарата «АИСТ № 2».

Экспериментальные данные подтверждают возможность использования аппроксимационной формулы Лотца-Дрэвина для определения вероятности ионизации анализируемого вещества в ионном источнике выбранной конструкции.

Библиографический список

1. Chhabil D. Fundamentals of contemporary mass spectrometry. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 587 p.
2. Котин В.В. Технология ионных источников: уч. пособие. М.: Московский инженерно-физический институт, 1990. 81 с.
3. Crandall D.H. Electron impact ionization of multicharged ions // *Physica Scripta*. 1981. V. 23, Iss. 2. P. 153-162. DOI: 10.1088/0031-8949/23/2/015
4. Родин Д.В., Пияков И.В. Ионный источник времяпролётного масс-спектрометра для космических исследований // Сб. трудов XI международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2012. С. 280-282.

ION SOURCE OF DMS-01 SCIENTIFIC EQUIPMENT FOR «AIST No 2» SMALL SPACECRAFT

© 2016

N. D. Semkin

Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, semkin@ssau.ru

I. V. Piyakov

Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, piyakov@ssau.ru

M. A. Rodina

postgraduate student of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, rodina.ssau@gmail.com

D. V. Rodin

Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Radio Engineering, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, rodin@ssau.ru

The main requirements imposed upon ion sources for on-board time-of-flight mass spectrometers are considered in the paper. An approximate formula to calculate the ionization cross section of an analyte substance is given. The dependence of the probability of analyte ionization for the selected ion source design is shown. Several designs of ion sources are proposed that provide the required width of the zone of ionization by selecting source parameters. A design of the ion source providing increased reliability and lifetime of the unit is selected for the use in scientific equipment DMS-01 installed aboard small spacecraft «AIST number 2». The results of a laboratory experiment on the operation of this design of the source are presented. The data obtained confirm the applicability of the Lotz-Drevin's approximation formula to determine the probability of ionization of atoms or molecules of an analyte in the chosen design of the ion source.

Ion source; time-of-flight mass spectrometer; on-board mass spectrometer; small spacecraft; approximation formula; reliability; construction; ionization probability.

Citation: [Semkin N.D.], Piyakov I.V., Rodina M.A., Rodin D.V. Ion source of DMS-01 scientific equipment for «AIST no 2» small spacecraft. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 197-203. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-197-203

References

1. Chhabil D. Fundamentals of contemporary mass spectrometry. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 587 p.
2. Kotin V.V. *Tekhnologiya ionnykh istochnikov: uch. posobie* [The technology of ion sources: Textbook]. Moscow: Moscow Engineering Physics Institute Publ., 1990. 81 p.
3. Crandall D.H. Electron impact ionization of multicharged ions. *Physica Scripta*. 1981. V. 23, Iss. 2. P. 153-162. DOI: 10.1088/0031-8949/23/2/015
4. Rodin D.V., Piyakov I.V. Ionnyy istochnik vremyaproletnogo mass-spektrometra dlya kosmicheskikh issledovaniy. *Sb. Trudov XI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov»*. Ekaterinburg: Ural Federal University Publ., 2012. P. 280-282. (In Russ.)