

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 533.9.072

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАССЕЙЯНИЯ ИОНОВ И НЕЙТРАЛЬНЫХ
АТОМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕНДА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

© 2020 г. Д. А. Моисеенко^{a,*}, А. Ю. Шестаков^a, О. Л. Вайсберг^a, Р. Н. Журавлев^a,
С. Д. Шувалов^a, М. В. Митюрин^b, И. И. Нечушкин^b, П. П. Моисеев^b

^aИнститут космических исследований РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

^bНПП “Астрон-Электроника”
Россия, 302019, Орел, ул. Веселая, 2

*e-mail: moiseenko-da@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.11.2019 г.

После доработки 12.11.2019 г.

Принята к публикации 16.11.2019 г.

Приведены результаты эксперимента по исследованию процессов рассеяния ионов и нейтральных атомов на мишени из шлифованного вольфрама, полученные с использованием стенда нейтральных частиц. Стенд нейтральных частиц – это лабораторная установка, предназначенная для изучения процессов отражения и рассеяния заряженных частиц и нейтральных атомов на поверхностях мишеней, изготовленных из различных материалов. Стенд позволяет регистрировать энергетическое и угловое распределения вторичных частиц, образованных в результате взаимодействия потока ионов различных энергий или нейтральных атомов с мишенью, устанавливаемой под разными углами.

DOI: 10.31857/S0032816220020147

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов взаимодействия солнечного ветра с реголитом и различными поверхностями в условиях космического пространства является актуальной научной и практической задачей, для решения которой разрабатываются научные приборы, устанавливаемые на отечественных и зарубежных космических аппаратах. Стенд нейтральных частиц разработан в рамках подготовки космических миссий по исследованию Луны и предназначен для отработки методик вторичной ионной масс-спектрометрии в космических экспериментах и исследования процессов взаимодействия нейтральных атомов и заряженных частиц с различными поверхностями. Одной из научных задач будущих лунных космических миссий является исследование потоков нейтральных атомов. Для решения этой задачи создан широкоугольный ионный энерго-масс-анализатор АРИЕС-Л [1] с функцией детектирования потока нейтральных частиц. В рамках миссии “Луна-25” прибор АРИЕС-Л должен обеспечить изучение процессов взаимодействия солнечного ветра с реголитом [2], исследование реголита методом вторичной ионной масс-спектрометрии, определение потока нейтральных атомов, выбитых из реголита под воздействием заряженных

частиц. Основными причинами возникновения нейтральных атомов на Луне являются воздействие фотонов солнечного излучения на реголит [3], микрометеоритная активность [4] и рассеяние протонов солнечного ветра [5].

Принцип работы конвертера нейтральных частиц, установленного на приборе АРИЕС-Л, основан на ионизации частиц в результате взаимодействия с мишенью-ионизатором [6], что позволит регистрировать нейтральные атомы с энергиями выше ~10 эВ, основным источником которых являются ионы солнечного ветра. Для определения режимов работы данного конвертера, а также выбора оптимального материала для изготовления электрода-ионизатора был создан лабораторный стенд для исследования процессов взаимодействия потоков нейтральных атомов и заряженных частиц с различными поверхностями.

Структура стенда позволяет осуществлять экспонирование мишени потоком заряженных частиц и нейтральных атомов с возможностью моделирования воздействия на поверхность ионов солнечного ветра и магнитосферной плазмы, а также исследования взаимодействия потоков нейтральных атомов с поверхностью различных материалов. Прототипом стенда является лабораторная установка, созданная в университете Бер-

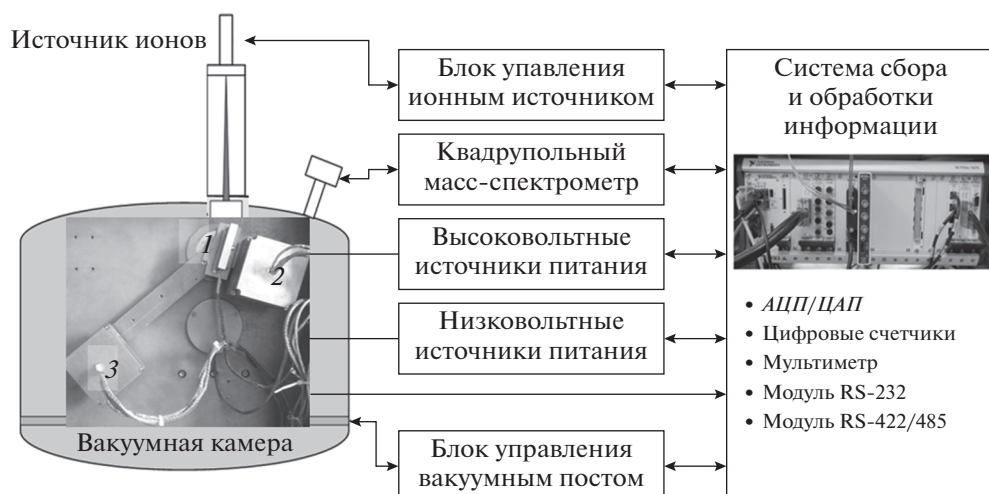


Рис. 1. Структура стенда для исследования нейтральных частиц. 1 – мишень для размещения исследуемого образца; 2 – детектор потока первичных частиц; 3 – детектор потока вторичных частиц.

на [7] и обладающая большими возможностями для исследования процессов взаимодействия ионов и нейтральных атомов с поверхностью рассеяния.

СТРУКТУРА И ПРИНЦИП ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТЕНДА

Конструкция стенда позволяет облучать исследуемую мишень как потоком электронов или заряженных частиц от источника ионов, так и потоком нейтральных атомов при условии установки дополнительного конвертера. Структура стенда нейтральных частиц показана на рис. 1.

Стенд размещен внутри вакуумной камеры и состоит из следующих основных узлов: мишени 1 для размещения исследуемого образца, расположенной на поворотном столике, детектора 2 потока первичных частиц и детектора 3 потока вторичных частиц. Механизм крепления мишени позволяет регистрировать ионный ток на мишени при ее облучении потоком заряженных частиц.

Мишень с детектором первичных частиц и детектор вторичных частиц размещены на двух независимых поворотных плечах, вращающихся вокруг одной оси, что позволяет устанавливать необходимый угол освещения мишени потоком первичных частиц и для выбранного угла освещения проводить анализ углового распределения вторичных частиц, выбиваемых с поверхности мишени. Поворот плеч стенда обеспечивается двумя независимыми трехфазными двигателями МАХОН, предназначенными для работы в условиях вакуума. Контроль угла поворота каждого плеча осуществляется оптическими датчиками и абсолютными энкодерами положения вала.

Схемы детекторов первичных и вторичных частиц приведены на рис. 2. Детектор вторичных частиц оснащен энергоанализатором, представляющим собой систему сеток и позволяющим анализировать энергетическое распределение заряженных частиц, выбиваемых с поверхности мишени. Для регистрации частиц используются детекторы на основе вторичных электронных умножителей ВЭУ-6. Схема включения детекторов позволяет регистрировать нейтральные атомы и либо положительные, либо отрицательные ионы.

Возможность независимого поворота мишени и детектора позволяет изменять углы регистрации вторичных частиц или угол освещения мишени первичным пучком частиц без открытия вакуумной камеры, что значительно ускоряет процесс измерений.

Для облучения исследуемого материала потоком нейтральных частиц используется источник нейтральных частиц (и.н.ч.), состоящий из системы отклоняющих и запирающих электродов и пластины-нейтрализатора. Источник выполнен по схеме, аналогичной предложенной в работе [8].

Принцип действия и.н.ч. основан на процессе нейтрализации ионов при взаимодействии с поверхностью мишени-нейтрализатора [9]. Для получения потока нейтральных частиц и.н.ч. устанавливается перед источником ионов таким образом, чтобы поток заряженных частиц попадал во входное окно. Затем поток ионов отклоняется дефлектором и под острым углом падает на поверхность мишени-нейтрализатора. Отраженные и вторичные заряженные и нейтральные частицы, образованные в результате взаимодействия первичного потока ионов с мишенью-нейтрализатором, движутся в сторону запирающего электрода и выходного окна. Для получения на выхо-

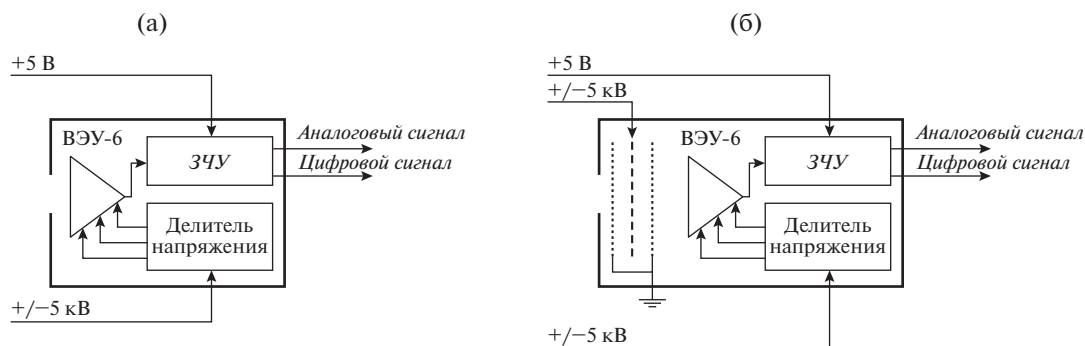


Рис. 2. Схемы включения детекторов первичных (а) и вторичных (б) частиц, входящих в состав стенда. ЗЧУ – зарядочувствительный усилитель.

де и.н.ч. потока нейтральных атомов без примеси заряженных частиц на запирающие электроды может быть подан потенциал, что позволяет исключить прохождение заряженных частиц через диафрагму.

Материал пластины-нейтрализатора может быть выбран в зависимости от задач эксперимента. Для работ со спектрометром АРИЕС-Л в рамках миссии “Луна-25” использовалась пластина из шлифованного вольфрама. Конструкция и.н.ч. позволяет изменять угол падения ионов на пластину-нейтрализатор в диапазоне от 1° до 10° к плоскости пластины.

Для облучения мишени потоком заряженных частиц используется ионный источник с ионизацией электронным ударом. Конструкция источника ионов позволяет работать как на остаточном газе, так и с напуском рабочего газа, обеспечивая поток частиц с энергиями от 30 до 5000 эВ. Уровень регистрируемого ионного тока составляет 10^{-11} – 10^{-9} А. Для данного источника ионов ширина энергетического интервала ΔE потока частиц зависит от энергии и составляет 2% для энергий >700 эВ. Стабильность потока ионов после прогрева источника лучше 3%.

Для управления составными частями стенда и мониторинга его работы используется система сбора и обработки информации, оснащенная многофункциональным модулем, содержащим многоканальные аналого-цифровые АЦП и цифроаналоговые ЦАП преобразователи, дискретные входы/выходы и счетчики. В состав системы входят также усилитель тока, цифровой мультиметр и платы интерфейсов RS-422 и RS-485. Многофункциональный модуль используется для управления лабораторными высоковольтными источниками питания и регистрации сигнала с детекторов частиц. Усилитель тока в паре с мультиметром используется для контроля ионного тока при работе с конвертером нейтральных частиц с целью прогнозирования ожидаемого потока нейтральных

атомов и мониторинга параметров работы ионного источника.

Для автоматизации процесса исследования образцов мишени было разработано специальное программное обеспечение (п.о.) для управления входящими в состав стенда отдельными устройствами и регистрации углового и энергетического распределений вторичных частиц при различных положениях мишени.

Программное обеспечение позволяет управлять лабораторными источниками питания и контролировать уровень выдаваемого потенциала, устанавливать требуемое положение в пространстве мишени и детектора стенда нейтральных частиц, измерять скорость счета детектора, управлять работой ионного источника и системой вакуумной откачки, контролировать ионный ток на мишени и уровень вакуума в камере.

В автоматизированном режиме п.о. позволяет осуществлять сканирование по энергиям потока частиц на детекторе для заданного диапазона положений мишени и детектора. При этом пользователем задаются такие параметры, как время экспозиции, шаг изменения потенциала на анализирующих сетках детектора, шаг изменения угла положения мишени и детектора, диапазон углов для мишени и детектора. Такие измерения позволяют получить информацию об угловых распределениях рассеянных и отраженных частиц различных энергий при различных углах освещения мишени.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ С ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНЬЮ

Настройки и испытания стенда нейтральных частиц проводились при исследовании взаимодействия заряженных частиц и нейтральных атомов с мишенью, изготовленной из шлифованного вольфрама. В разработанном стенде мишень

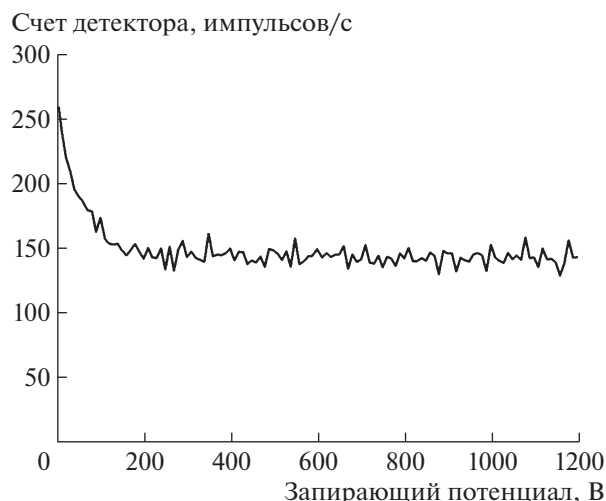


Рис. 3. Зависимость скорости счета детектора вторичных частиц от величины запирающего потенциала. Угол падения частиц 30° , угол регистрации 5° .

является источником нейтральных частиц, которые необходимы для проверок функционирования создаваемых спектрометров в режиме регистрации нейтральных атомов. При изготовлении ионизирующих электродов конвертеров нейтральных частиц, входящих в состав спектрометров, также может быть использован вольфрам.

Взаимодействие потока ионов с мишенью

Исследование процесса взаимодействия потока ионов с энергией 1 кэВ с поверхностью мишени, изготовленной из шлифованного вольфрама, проводилось для диапазона углов экспонирования мишени 5° – 45° , при этом угол регистрации вторичных частиц менялся в интервале от 0° до 85° с шагом 5° . Для каждого положения детектора вторичных частиц фиксировалось энергетическое распределение вторичных частиц. Одна из полученных зависимостей скорости счета детектора вторичных частиц от запирающего потенциала при облучении мишени потоком ионов с энергией 1 кэВ приведена на рис. 3. Согласно рисунку, вторичные заряженные частицы имеют энергию не более 150 эВ. Постоянный уровень счета для запирающих потенциалов более 150 В соответствует регистрации детектором потока нейтральных частиц, выбиваемых с поверхности мишени.

На основе полученных данных была определена зависимость эффективности выхода нейтральных частиц от угла освещения мишени (рис. 4). Согласно рис. 4, выход нейтральных атомов при облучении мишени потоком заряженных частиц больше при малых углах падения первичных ча-

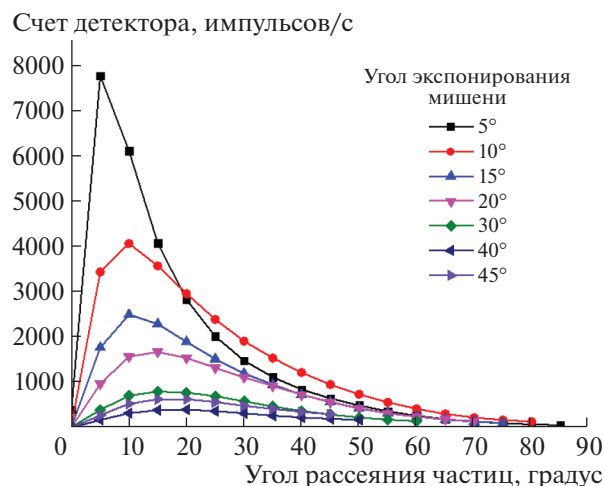


Рис. 4. Зависимости скорости счета детектора вторичных частиц от угла падения частиц при регистрации нейтральных атомов, выбиваемых с поверхности мишени при ее экспозиции потоком ионов с энергией 1 кэВ под различными углами.

стиц. При этом для углов падения $<15^\circ$ заметно, что максимум углового распределения интенсивности потока вторичных нейтральных частиц соответствует зеркальному отражению частиц от поверхности мишени.

Полученные данные использовались для настройки источника нейтральных частиц при проверке функционирования спектрометра АРИЕС-Л в режиме регистрации потока нейтральных атомов [10]. Проверки зависимости потока нейтральных частиц от угла показали, что максимальный выход нейтральных частиц достигается при падении ионов на мишень-нейтрализатор под углом 3° при экспозиции в потоке ионов с энергиями >400 эВ. В такой конфигурации и.н.ч. обеспечивает поток нейтральных атомов с плотностью до $9 \cdot 10^5$ частиц/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$).

Взаимодействие потока нейтральных частиц с мишенью

Для исследования процессов взаимодействия потока нейтральных частиц с вольфрамовой мишенью перед входным окном стенда был установлен конвертер нейтральных частиц. В ходе испытаний были получены угловые распределения потоков нейтральных атомов, образованных в результате взаимодействия нейтральных частиц с поверхностью мишени. Кроме того, исследовались эффективность выхода и энергетические распределения вторичных положительных и отрицательных частиц.

Пример полученных угловых распределений для вторичных частиц при экспонировании ми-

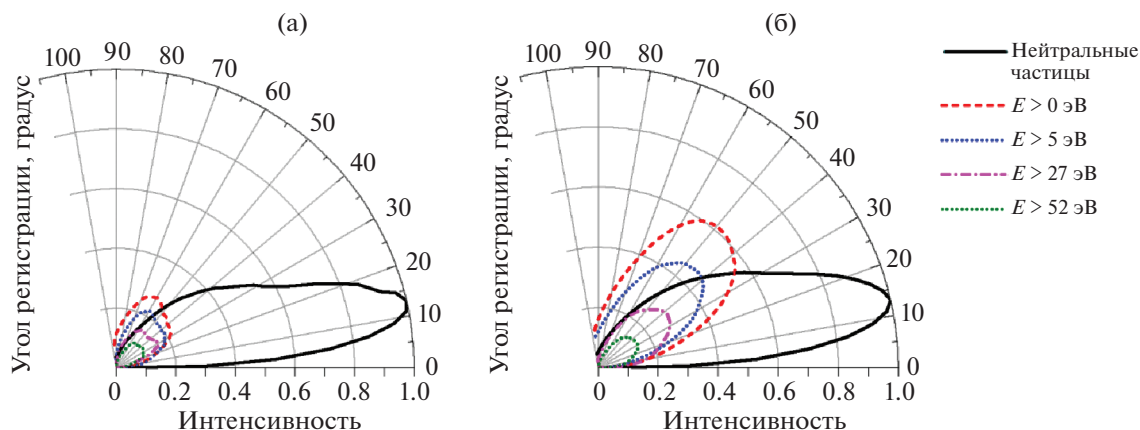


Рис. 5. Угловые распределения: а – нейтральных атомов и положительных частиц, б – отрицательных частиц – при облучении вольфрамовой мишени потоком нейтральных атомов под углом 15° .

шени в потоке нейтральных частиц для угла падения 15° приведен на рис. 5.

Проведенные испытания позволили выявить следующие основные особенности взаимодействия нейтральных атомов с поверхностью мишени: 1) при освещении мишени потоком нейтральных частиц, направленным под косыми углами, угол регистрации вторичных нейтральных атомов соответствует углу падения, что позволяет сделать вывод о преимущественно зеркальном отражении частиц; 2) эффективность выхода вторичных положительно заряженных частиц ниже, чем вторичных отрицательных ионов; 3) энергия вторичных заряженных частиц, как правило, не превышает 150 эВ. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с данными аналогичных экспериментов [7], что позволяет сделать вывод как о правильной интерпретации экспериментальных данных, так и о корректной работе созданного стенда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный стенд нейтральных частиц позволяет моделировать воздействие заряженных частиц и нейтральных атомов на различные поверхности и получать информацию о пространственном и энергетическом распределении вторичных частиц, образованных в результате этого взаимодействия. Для мишени, изготовленной из шлифованного вольфрама, были получены зависимости энергетических и угловых распределений вторичных частиц, образованных в результате взаимодействия потока ионов с мишенью. Полученные экспериментальные данные были использованы при настройках и калибровке конвертера нейтральных частиц, входящего в состав ионного энерго-масс-анализатора АРИЕС-Л, разрабатываемого в рамках космической миссии “Луна-25”.

Эксперименты со стендом нейтральных частиц, направленные на изучение процессов взаимодействия нейтральных атомов и заряженных частиц с различными поверхностями, будут продолжены в рамках работ по созданию приборов будущих лунных миссий. В частности, планируется проведение экспериментов по взаимодействию частиц с мишенями, используемыми в качестве ионизаторов в составе космических приборов, и исследованию процессов рассеяния частиц на имитаторе лунного реголита. Созданная установка позволит получить дополнительные данные, необходимые для настроек и калибровок создаваемых конвертеров нейтральных частиц.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность Алексею Козюре, Александру Васильеву, Вячеславу Семенову и Джеффри Хуангу за участие в работах со стендом нейтральных частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vaisberg O., Berthellier J.-J., Moore T., Avanyov L., Leblanc F., Moiseev P., Moiseenko D., Becker J., Collier M., Laky G., Keller J., Koynash G., Lichtenegger H., Leibov A. et al. // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V. 121. P. 11750. <https://doi.org/10.1002/2016JA022568>
2. Lue C., Halekas J.S., Poppe A.R., McFadden J.P. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2018. V. 123. P. 5289. <https://doi.org/10.1029/2018JA025486>
3. Yakshinskiy B.V., Madey T.E. // Nature. 1999. V. 400 (6745). P. 642. <https://doi.org/10.1038/23204>
4. Colaprete A., Sarantos M., Wooden D.H., Stubbs T.J., Cook A.M., Shirley M. // Science. 2015. V. 351 (6270).

- P. 249.
<https://doi.org/10.1126/science.aad2380>
5. *Dukes C.A., Johnson R.E.* // Encyclopedia of Lunar Science. Cham: Springer, 2017. P. 1–7.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-05546-6_96-1
6. *Sigmund P.* // Physical Review. 1969. V. 184. P. 383.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.187.768>
7. *Wahlström P., Scheer J. A., Wurz P., Hertzberg E., Fuse-lier S.A.* // Journal of Applied Physics. 2008. V. 104 (3). P. 034503.
<https://doi.org/10.1063/1.2957064>
8. *Wurz P.* // Meas. Sci. Technol. 2005. V. 16. P. 2511.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/12/016>
9. *Eckstein W.* // Chemical Physics. 1981. V. 17. P. 157.
10. *Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Шестаков А.Ю., Журавлев Р.Н., Шувалов С.Д., Митюрин М.В., Моисеев П.П., Нечушкин И.И., Родькин Е.И., Васильев А.Д., Летуновский В.В.* // ПТЭ. 2019. № 3. С. 52.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219020265>