УДК 537.291

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕГМЕНТОИДНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

© 2022 г. В. П. Петухов^{а,} *

^аНаучно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия *e-mail: petukhov.v.p@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2021 г. После доработки 19.01.2022 г. Принята к публикации 19.01.2022 г.

Электростатический сегментоидный анализатор предназначен для регистрации низкоэнергетических заряженных частиц магнитосферной плазмы. Представлены результаты измерения основных характеристик спектрометрического модуля — энергогеометрического коэффициента, функций пропускания от входных углов и константы анализатора. Расчетные значения функции пропускания от входных углов хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Разработана и описана методика градуировки спектрометрических модулей, предназначенных для исследования параметров магнитосферной плазмы. Использование разработанной методики также позволяет не только измерять эффективность вторичных электронных умножителей при регистрации электронов в широком диапазоне значений энергии (0.01–20 кэВ), но и провести паспортизацию тритиевых источников электронов, используемых для градуировки спектрометрической аппаратуры.

Ключевые слова: сегментоидный анализатор, энергогеометрический коэффициент, функция пропускания, атом трития, вторичный электронный умножитель, дифференциальный спектр, магнитосферная плазма, эффективность детектора, спектрометрический модуль, детектор частиц.

DOI: 10.31857/S1028096022080118

введение

Тщательная и точная калибровка приборов является основой для анализа и правильной интерпретации результатов измерений в космических условиях. Сегодня большая часть знаний и опыта в области калибровки космической измерительной аппаратуры передается в рамках отчетов отдельных исследовательских групп, которые не публикуются. В [1-3] описаны основные принципы этой калибровки. В монографии [1] дан обстоятельный обзор методов калибровки детекторов заряженных и нейтральных частиц с энергией менее 100 кэВ, применяемых для исследований в области космической физики. Авторы описывают разные классы инструментов, методы и процессы калибровки приборов на Земле перед полетом и после старта в полете. Даны несколько полезных советов, как калибровка может быть улучшена в будущем.

Для регистрации низкоэнергетических заряженных частиц Марьин Б.В. и Поландов А.Г. [4] разработали электростатический сегментоидный анализатор и провели теоретический анализ его выходных характеристик. Эти анализаторы в настоящее время успешно используются в космофизических исследованиях. Целью работы было измерение основных характеристик анализаторов этого типа и разработка методики их градуировки.

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ

Конструкция спектрометрического модуля, состоящего из двух электростатических сегментоидных анализаторов и вторичного электронного умножителя (ВЭУ), регистрирующего электроны на выходе модуля, показана на рис. 1. Частицы, прошедшие первый сегментоидный анализатор, пройдя небольшой зазор, попадают в поле второго такого же анализатора, а затем на входное окно детектора ВЭУ-7. Использование двух сегментоидов в одном модуле обеспечивает существенное ослабление ультрафиолетового излучения.

Основные характеристики спектрометрического модуля

Энергогеометрический коэффициент анализатора (ЭГК [см² · ср · кэВ]) определяется как отношение наблюдаемой на выходе скорости счета про-



Рис. 1. Конструкция спектрометрического модуля.

шедших анализатор частиц к интенсивности входного изотропного пучка с плоским энергетическим спектром S(E) [(с · см² · ср · кэВ)⁻¹] в пределах полосы пропускания анализатора.

Дифференциальный спектр потока заряженных частиц исследуемого источника S(E), измеряемый спектрометрическим модулем, рассчитывается по формуле:

$$S(E) = \frac{N(E)}{\Im \Gamma K(E) \cdot K\xi(E)} = N(E) \cdot K(E),$$

где N(E) [имп./c] — скорость счета импульсов ВЭУ-7 на выходе анализатора в зависимости от энергии частицы, т.е. его счетная характеристика, $\xi(E)$ [имп./част.] — эффективность детектора ВЭУ при регистрации заряженных частиц. Для получения исследуемого спектра из результатов измерений скорости счета импульсов, выполненных в космосе, для каждого спектрометрического модуля необходимо измерить коэффициент пропускания

$$K(E) = \frac{1}{\Im \Gamma K(E) \cdot \xi(E)} [(имп. \cdot см^2 \cdot ср \cdot \kappa \exists B)^{-1}].$$

Константа анализатора — отношение разности потенциалов на его пластинах $U_{\rm pl}$ к регистрируемой энергии заряженной частицы *E*: $k = U_{\rm pl}/E$ [B/эB]. Энергетическое разрешение анализатора $R = \Delta E/E$. Здесь ΔE — энергетическая ширина кривой пропускания на половине ее высоты.

Следует отметить, что энергогеометрический коэффициент ЭГК, константа анализатора k и энергетическое разрешение R определяются только конструкцией спектрометрического модуля и анализаторов. Поэтому для конкретной конструкции достаточно один раз провести измерение этих характеристик на нескольких спектрометрических модулях и определить их средние значения, которые и используются при последующих измерениях и обработке результатов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментального определения основных характеристик составных сегментоидных анализаторов создан стенд на базе экспериментальной вакуумной камеры UNIVEX-350 (LEYBOLD VACUUM GMBH, Germany). Рабочее давление в камере $(2-5) \times 10^{-6}$ Topp. Основные элементы стенда: электронная пушка – диаметр пучка 0.5–2 мм, угловая расходимость пучка определяется коллиматором и составляет ~ 0.5° , энергетический разброс $\Delta E/E = 3\%$, ток пучка 5–300 фА; плоский тритиевый излучатель — пластинка с размерами $30 \times 10 \times$ × 0.5 мм; гониометр; спектрометрический модуль с детектором электронов ВЭУ-7; цилиндр Фарадея для измерения тока пучка фемтоамперметром B2983A (Keysight Technologies, USA). Фемтоамперметр соединен с цилиндром Фарадея через триаксиальный вакуумный ввод КF40-TRIAX/BNK.

Ток пучков измеряли в следующем порядке. Перед началом измерений включенный прибор выдерживали 2—3 ч. Затем включали режим обнуления, и через несколько минут считывали фоновый ток. После этого включали источник электронов и с интервалом в несколько минут между измерениями регистрировали результаты. В процессе измерения иногда проводили обнуление для стекания накопленного заряда. Измерения тока пучка электронной пушки, выполненные с интервалом в несколько месяцев, совпадают с точностью до 10%.

Авторы [4] выполнили расчет основных выходных характеристик составного спектрометрического модуля. На рис. 2 представлены результаты этого расчета в виде поверхности в координатах X, Y, Z. Каждая координата Z поверхности — это энергогеометрический коэффициент для заданного тангенциального угла в полосе $\pm 0.5^{\circ}$ и заданной энергии в полосе ± 0.01 кэВ. Полный объем фигуры — это суммарный ЭГК модуля. Как видно, пропускание модуля зависит не только от энергии

заряженных частиц, но и от углов входа частиц в анализатор.

Используя электронную пушку, установленную на гониометре на расстоянии 30 мм от входа в один из секторов анализатора, измеряли функции пропускания спектрометрического модуля, т.е. зависимости скорости счета импульсов ВЭУ-7 от угла (азимутального и тангенциального) входа электронов в анализатор. Шаг гониометра 0.1°. При измерениях в этом диапазоне углов электронный пучок направляли к центру входного сектора и сканировали по углам: тангенциальному углу σ в плоскости ХОΖ и азимутальному углу β в плоскости YOZ, как показано на рис. 3. Углы отсчитываются от нормали Z к входной поверхности анализатора. Измерения проведены при энергии электронов E = 0.2 кэВ. На рис. 4 показаны расчетная и экспериментальная зависимости пропускания от входного тангенциального угла. Видим, что расчетное значение хорошо согласуется с результатами измерений. Средняя полоса пропускания для тангенциального угла равна 9.5°. Расчетная и экспериментальная зависимости пропускания от входного азимутального угла представлены на рис. 5. Средняя полоса пропускания для азимутального угла равна 4.5°. Заметное расхождение расчетных и экспериментальных значений, скорее всего, обусловлено неточностью установки электронной пушки в ходе измерения при нулевом тангенциальном угле. По результатам этих измерений можно сказать, что программа расчета функций пропускания [4] хорошо описывает входные характеристики анализатора.

Функции пропускания спектрометрического модуля существенно зависят не только от энергии заряженной частицы, но и от входных углов. Потоки электронов и протонов магнитосферной плазмы изотропны [5]. Поэтому для измерений ЭГК и коэффициента пропускания К(Е) спектрометрических модулей, используемых для регистрации электронов, оптимальным является эталонный плоский тритиевый излучатель, испускающий изотропный поток электронов с непрерывным спектром в диапазоне от 0 до 18 кэВ [6-8]. На рис. 6 приведен результат измерения зависимости потока электронов, излучаемых плоским тритиевым источником, от угла между нормалью к плоскости источника и направлением наблюдения. Поток электронов этого источника можно считать изотропным в пределах полосы пропускания от -10° до $+10^{\circ}$.

МЕТОДИКА ГРАДУИРОВКИ

Вначале измеряют константу спектрометрического модуля $k = U_{\rm pl}/E$ и энергетическое разрешение $R = \Delta E/E$. Для этого на входе спектрометрического модуля на расстоянии 20 мм монтируют электронную пушку малой интенсивности с вы-



Рис. 2. Общая расчетная характеристика пропускания спектрометрического модуля.



Рис. 3. Геометрия падения электронного пучка (штриховые линии) на вход анализатора.



Рис. 4. Функция пропускания спектрометрического модуля от входного тангенциального угла, О – результаты расчета.



Рис. 5. Функция пропускания спектрометрического модуля от входного азимутального угла, ○ – результаты расчета.



Рис. 6. Угловое распределение потока электронов, излучаемых плоским тритиевым источником.



Рис. 7. Функция пропускания спектрометрического модуля при регистрации электронов с энергией 4 кэВ.

сокой стабильностью электронного пучка. Измерение проводят для электронов разной энергии, например 0.2, 1.0, 2.0, 4.0 кэВ. Электронный пучок распространяется через центр входного сектора строго параллельно оси анализатора. С помощью источника питания электронной пушки поочередно устанавливают указанные значения энергии излучаемых электронов. Для каждого значения энергии *E* измеряют функцию пропускания $N(U_{\rm pl})$ – зависимость скорости счета импульсов ВЭУ-7 на выходе модуля от напряжения на пластинах его анализаторов. График функции пропускания для электронов с энергией 4 кэВ показан на рис. 7. Максимальное пропускание при напряжении на пластинах анализатора 495 В соответствует энергии 4 кэВ, т.е. константа анализатора k = 0.124 В/эВ. Ширина кривой на половине ее высоты равна 56 В, что соответствует энергетической ширине $\Delta E =$ = 460 эВ и разрешению $R = \Delta E/E = 0.115$. По результатам этих измерений рассчитывают средние значения константы анализатора и энергетического разрешения.

Затем методом задерживающего потенциала [9-11], используя ВЭУ с предварительно измеренной эффективностью $\xi(E)$, измеряют дифференциальный спектр эталонного плоского тритиевого излучателя электронов $S_{\text{Tr}} [(\mathbf{c} \cdot \mathbf{c}\mathbf{M}^2 \cdot \mathbf{c}\mathbf{p} \cdot \mathbf{k}\mathbf{i}\mathbf{B})^{-1}]$ в диапазоне энергии электронов от 0.1 до 18 кэВ. Исследованный образец эталонного плоского тритиевого излучателя — это молибденовая пластинка, на рабочую поверхность которой нанесено сорбирующее покрытие из титана. Тритий вводят в титан путем насыщения до заданной активности. Материал, в котором зафиксирован тритий, - титан иодидный. На рис. 8 приведены электронный спектр свободных атомов трития и дифференциальный спектр эталонного плоского тритиевого излучателя электронов. Атомы трития внутри образца в результате бета-распада изотропно излучают электроны в диапазоне энергии от единиц эВ до 18.61 кэВ. В результате процессов упругого и неупругого взаимодействия этих электронов с атомами титана и йода [12] энергетический спектр электронов на выходе из пластины будет отличаться от энергетического спектра электронов, эмитируемых атомами трития внутри образца. Измеренный дифференциальный спектр S_{Tr} эталонного излучателя в дальнейшем используется как эталонный для определения основных характеристик анализатора.

Далее, используя электронную пушку и фемтоамперметр, соединенный с цилиндром Фарадея, измеряют эффективность детектора ВЭУ-7 в зависимости от энергии электронов $\xi(E)$. Эффективность ВЭУ зависит от угла падения заряженной частицы на микроканальную пластину [13]. Поэтому при измерениях пучок направляют на поверхность входной пластины ВЭУ под тем же углом, что и при падении на ВЭУ на выходе из ана-



Рис. 8. Дифференциальный спектр эталонного плоского тритиевого излучателя электронов $S_{\text{Tr}}(E)$ (\bigcirc) и свободных атомов трития (\bullet).

лизатора. Затем на входную поверхность модуля ставят пластинку эталонного плоского тритиевого излучателя и на выходе ВЭУ измеряют скорость счета импульсов в зависимости от энергии электронов $N_{\rm Tr}(E)$ (рис. 9). При этом пластинка излучателя полностью закрывает входной сектор модуля. По результатам измерения определяют энергогеометрический коэффициент по формуле:

$$\Im \Gamma \mathbf{K}(E) = \frac{N_{\mathrm{Tr}}(E)}{S_{\mathrm{Tr}}(E) \cdot \xi(E)}.$$

Эти измерения выполняют на нескольких спектрометрических модулях с одним и тем же ВЭУ и рассчитывают среднее значение $\Im \Gamma K(E)$ для данной конструкции. На рис. 10 приведены экспериментальные значения $\Im \Gamma K$ спектрометрического модуля в зависимости от энергии электронов.

После этого на градуируемых спектрометрических модулях с детекторами ВЭУ-7 и эталонным тритиевым излучателем на входе измеряют $N_{\rm Tr}(E)$. На основе полученных результатов для каждого модуля рассчитывают коэффициент пропускания:

$$K(E) = \frac{S_{\rm Tr}(E)}{N_{\rm Tr}(E)}$$

Пример экспериментального коэффициента пропускания K(E) для одного из спектрометрических модулей представлен на рис. 11. Так как коэффициент пропускания спектрометрических модулей, регистрирующих электроны, определяется непосредственно по результатам измерения $N_{\rm Tr}(E)$ этих модулей и дифференциального спектра эталонного тритиевого излучателя, нет необходимости измерять эффективность установленных в них ВЭУ.

Энергогеометрический коэффициент, измеренный на электронном пучке, используется для определения коэффициента пропускания спектромет-



Рис. 9. Скорость счета импульсов спектрометрического модуля $N_{\text{Tr}}(E)$, \bullet – скорость счета фона без источника трития.

рических модулей, регистрирующих протонные пучки. Для этого определяют эффективность детекторов в зависимости от энергии протонов $\xi_{np}(E)$. Измерения выполняют на протонном пучке, падающем на поверхность входной пластины ВЭУ под тем же углом, что и при падении протонного пучка на ВЭУ на выходе из анализатора. Коэффициент пропускания $K_{np}(E)$ для каждого протонного модуля определяется по формуле:

$$K_{\rm np}(E) = \frac{1}{\Im \Gamma K(E) \cdot \xi_{\rm np}(E)}$$

Экспериментальные значения измеренных коэффициентов пропускания используют в дальнейшем в процессе обработки результатов измерений потока заряженных частиц магнитосферной плазмы. Исходя из вышеизложенного необходимо сказать, что точность градуировки определяется, глав-



Рис. 10. Экспериментальная зависимость ЭГК спектрометрического модуля от энергии электронов.



Рис. 11. Экспериментальные значения коэффициента пропускания K(E) в зависимости от энергии электронов.



Рис. 12. Функции пропускания спектрометрических модулей: 1 - спектр электронов с энергией 16 кэВ на выходе из электронной пушки, измеренный цилиндрическим 127°-анализатором с разрешением R = 1.25%; 2 - функция пропускания электронов с энергией 16 къВ, измеренная спектрометрическим модулем с незаземленными пластинами; 3 и 4 - функции пропускания электронов с знергией 16 и 18 кэВ, соответственно, измеренные анализатором с заземленной внутренней пластиной.

ным образом, тщательностью и точностью измерения дифференциального спектра эталонного тритиевого излучателя, и скоростью счета импульсов спектрометрических модулей.

СРАВНЕНИЕ АНАЛИЗАТОРОВ РАЗНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Измерения функции пропускания спектрометрических модулей показали, что в области энергии электронов E > 12 кэВ спектральные пики несим-

метричны (рис. 12, пики 3 и 4). Напряжение на внешней пластине анализатора $U_{\rm pl} > 1.2$ кВ, а внутренняя пластина заземлена на корпус прибора. Кроме того, из рисунка видно, что при этих напряжениях наблюдается увеличение скорости счета импульсов, заметно превышающее фоновый счет, в области энергии выше максимума соответствующего пика (например, пик 4). Эти "хвосты", видимо, обусловлены пробоями в элементах конструкции анализаторов. Аналогичные измерения были проведены на спектрометрическом модуле, в котором внутренние и внешние пластины анализаторов изолированы от заземления. Напряжение на пластины подается от двух полярного источника питания. Внутренний электрод находится под положительным потенциалом относительно внешнего и под нулевым потенциалом относительно корпуса. При использовании электронной пушки и ВЭУ-7 были измерены функции пропускания электронов с энергией 16 и 18 кэВ на спектрометрических модулях обоих вариантов. Как видим, при 16 кэВ ширина пиков на половине их высоты следующая: пик $1 - \Delta E = 0.5$ кэВ; пик $2 - \Delta E = 1.3$ кэВ; пик $3 - \Delta E = 1.75$ кэВ. На выходе анализатора с незаземленными пластинами регистрируется симметричный пик 2, ширина которого на половине его высоты заметно меньше, чем у несимметричного пика З. Видно, что спектрометрическая характеристика модуля с незаземленными пластинами существенно лучше, и это следует иметь в виду при разработке конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для экспериментального определения основных выходных характеристик спектрометрических модулей создан измерительный стенд и разработана методика их градуировки. Выполнены измерения функции пропускания модуля в зависимости от энергии электронов и углов входа. Расчетные значения функции пропускания от входных углов хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Измерены основные параметры спектрометрического модуля - энергогеометрический коэффициент, его константа и коэффициент пропускания, необходимые для последующей обработки результатов измерений, выполняемых на этих модулях. Использование разработанной методики также позволяет не только измерять эффективность вторичных электронных умножителей при регистрации электронов в широком диапазоне значений энергии (0.01-20 кэВ), но и провести паспортизацию тритиевых источников электронов, используемых для градуировки спектрометрической аппаратуры. Сравнение функций пропускания анализаторов двух разных конструкций показало, что спектрометрическая характеристика модуля с незаземленными пластинами анализаторов существенно лучше. Необходимо отметить, что точность градуировки спектрометрических модулей определяется, главным образом, тщательностью и точностью измерения дифференциального спектра эталонного тритиевого излучателя, и скоростью счета импульсов спектрометрических модулей. Как показали измерения, анализатор работает в диапазоне энергии от 0.1 до 20 кэВ.

Конфликт интересов: Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Calibration of Particle Instruments in Space Physics / Ed. Wüest M. et al. ISSI Sci. Rep. SR-007 September 2007. Noordwijk: ESA, 2007. 611 p.
- 2. *Cruise A.M., Bowles J.A., Patrick T.J., Goodall C.V.* Principles of Space Instrument Design. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 395 p.
- 3. Горн Л.С., Хазанов Б.И. Спектрометрия ионизирующих излучений на космическом аппарате. М.: Атомиздат, 1979. 248 с.
- 4. *Марьин Б.В., Поландов А.Г.* // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 3. С. 73.

- 5. *Novikov L.S., Makletsov A.A., Sinolits V.V. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2019. V. 47. № 8. P. 3931.
- Изотопы: свойства, получение, применение. Т. 2. / Ред. Баранов В.Ю. М.: Физматлит, 2005. 728 с.
- 7. Беловодский А.Ф., Гаевой В.К., Гришмановский В.И. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985. 250 с.
- Mertens S., Lasserre T., Groh S. et al. // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2015. V. 2015. № 02. P. 020. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1475-7516/2015/02/020
- 9. Керков Х., Марьин Б.В., Петухов В.П., Рубинштейн И.А., Штолле Р. // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 1. С. 89.
- Баранова Л.А., Явор С.Я. // Журн. технической физики. 1988. Т. 58. Вып. 2. С. 217.
- Erskine J.L. Electron Energy Analyzers // Atomic, Molecular, and Optical Physics: Charged Particles / Ed. Dunning F.B., Hulet R.G. Vol. 29A. Experimental Methods in the Physical Sciences. San Diego: Academic Press, 1995. P. 209.
- 12. *Bruining H.* Physics and Applications of Secondary Electron Emission. New York: McGraw-Hill Book; London: Pergamon Press, 1954. 103 p.
- 13. Gao R.S., Gibner P.S., Newman J.H., Smith K.A., Stebbings R.F. // Rev. Sci. Instrum. 1984. V. 55. Iss. 11. P. 1756.

Measurement of the Parameters of the Segmentoid Electrostatic Analyzer of Low-Energy Charged Particles

V. P. Petukhov^{1, *}

¹Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia *e-mail: Petukhov.V.P@mail.ru

The electrostatic segmentoid analyzer is designed for the detection of low-energy charged particles of magnetospheric plasma. The results of measuring the main characteristics of the spectrometric module – the energy-geometric coefficient, the transmission functions of the entrance angles and the analyzer constant – are presented. The calculated values of the transmission function of the entrance angles are in good agreement with the experimental results. A technique for calibrating modules intended for studying the parameters of magnetospheric plasma has been developed and described. The use of the developed technique also makes it possible not only to measure the efficiency of secondary electron multipliers when registering electrons in a wide energy range (0.01-20 keV), but also to certify tritium electron sources used for calibrating spectrometric equipment.

Keywords: segmentoid analyzer, energy-geometric coefficient, transmission function, tritium atom, secondary emission multiplier, differential spectrum, magnetospheric plasma, detector efficiency, spectrometric module, particle detector.