

## Осесимметричный энергоанализатор на основе электростатического декапольно-цилиндрического поля

© Ж.Т. Камбарова,<sup>1</sup> А.А. Трубицын,<sup>2</sup> А.О. Саулебеков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Карагандинский государственный университет им. акад. Е.А. Букетова, 100028 Караганда, Казахстан

<sup>2</sup> Рязанский государственный радиотехнический университет, 390005 Рязань, Россия

<sup>3</sup> Казахстанский филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 010010 Астана, Казахстан  
e-mail: kambarova@bk.ru

(Поступило в Редакцию 13 января 2018 г.)

Представлена новая электронно-оптическая схема осесимметричного зеркального энергоанализатора на основе электростатического декапольно-цилиндрического поля. Выполнен траекторный анализ движения электронов. Описаны конструктивные особенности схемы предложенного энергоанализатора. Численно рассчитаны режимы с фокусировкой второго порядка для двух конфигураций: 1) кольцевой источник и его изображение находятся в области внутреннего цилиндра и 2) точечный источник на оси симметрии, находящийся на большом расстоянии от энергоанализатора. Показано, что на основе декапольно-цилиндрического поля может быть построен длиннофокусный зеркальный энергоанализатор с фокусировкой типа „ось—кольцо“. Для двух режимов энергоанализатора приведены аппаратные функции, оценены энергетическое разрешение и светосила устройства.

DOI: 10.21883/JTF.2018.11.46636.13-18

### Введение

Цилиндрический зеркальный анализатор энергий заряженных частиц благодаря достаточно высоким электронно-оптическим характеристикам в сочетании с простой конструкцией получил широкое применение в научных и технологических целях [1]. Одним из путей дальнейшего совершенствования этого устройства является модификация внешнего цилиндрического электрода.

Перспективным в этом направлении является серия работ Л.А. Барановой [2–5], в которых при минимальных изменениях в конструкции получено существенное улучшение фокусирующих свойств системы. В работах [2,3] предложена модифицированная конструкция цилиндрического зеркала, внешний электрод который образован отдельными электрически изолированными цилиндрами. Исследованы режимы „ось—ось“ и „кольцо—ось“ с фокусировкой пучка заряженных частиц второго порядка. Более острая фокусировка достигается в этих случаях за счет уменьшения коэффициента сферической аберрации третьего порядка по углу расходимости пучка в меридиональной плоскости на входе в анализатор.

В работе [4] предложено использовать двухкаскадный режим работы в модифицированном цилиндрическом зеркале при запуске заряженных частиц через торцевую диафрагму, перпендикулярную оптической оси. Найдено, что оптимальное расстояние источника заряженных частиц от анализатора находится в пределах от 5 до  $8r_1$ , где  $r_1$  — радиус внутреннего цилиндра. Показано, что линейная дисперсия двухкаскадного анализатора в

несколько раз превышает дисперсию однокаскадного прибора.

Усовершенствованный цилиндрический зеркальный энергоанализатор численно исследован в работе [5]. Отличие усовершенствованной конструкции от модифицированной конструкции цилиндрического зеркала, предложенной в работах [2–4], заключается в том, что как внешний, так и внутренний электроды анализатора разделены на три изолированные части каждый, вследствие чего потенциалы на отдельных частях регулируются независимо друг от друга. Данное зеркало обеспечивает большой угол захвата, равный  $30^\circ$  при сохранении острой фокусировки в режиме фокусировки „ось—ось“, и высокую линейную дисперсию, превышающую почти в 4 раза дисперсию классического цилиндрического зеркала.

Класс потенциальных полей, названных мультипольно-цилиндрическими, впервые обоснован и классифицирован Зашкварой В.В. и Тындык Н.Н. в работах [6,7]. Мультипольно-цилиндрические поля формируются по принципу суперпозиции электростатического поля цилиндрического типа и круговых мультиполей различного порядка, нулевая эквипотенциальная поверхность которых имеет цилиндрическую форму. Применение мультипольного подхода к синтезу отклоняющих полей дает возможность для развития эффективных методов энергоанализа потоков заряженных частиц.

Ранее были достаточно детально исследованы зеркальные энергоанализаторы на основе электростатических гексапольно-цилиндрических полей, большое количество

работ, например [8,9], в том числе монография [10], были направлены на изучение их электронно-оптических свойств и потенциальных возможностей, на выделение оптимальных схем с высоким качеством фокусировки и разрешения по энергии.

Электронно-оптическая схема электростатического зеркального декапольно-цилиндрического энергоанализатора, в котором доли цилиндрического поля и декаполя равны соответственно  $\mu = 1$  и  $\gamma = 1/100$ , впервые описана в работе [11]. Энергоанализатор состоит из внутреннего цилиндрического электрода и внешнего отклоняющего криволинейного (выпуклого) электрода. Приближенно-аналитическим методом, описанном в [10], рассчитаны электронно-оптические характеристики данного анализатора энергий заряженных частиц. Установлено, что на основе декапольно-цилиндрических полей могут быть построены светосильные энергоанализаторы с угловой фокусировкой второго порядка, если источник и его изображение находятся в области внутреннего цилиндрического электрода (тип фокусировки „кольцо–кольцо“).

В работе [12] приведены результаты численного моделирования электронно-оптической схемы электростатического декапольно-цилиндрического энергоанализатора с вкладами цилиндрического поля  $\mu = 1$  и кругового декаполя  $\gamma = 1/100$ . Найдены два режима угловой фокусировки второго порядка типа „кольцо–кольцо“ и „ось–кольцо“. Рассчитаны фокусирующие свойства энергоанализатора.

Целями настоящей работы являются численное моделирование электронно-оптической схемы декапольно-цилиндрического зеркального энергоанализатора, в котором доли цилиндрического поля и декаполя равны соответственно  $\mu = 3/2$  и  $\gamma = -1/100$ , и поиск режима фокусировки, обеспечивающего большое фокусное расстояние „образец–анализатор“.

### Схема декапольно-цилиндрического энергоанализатора

Потенциал электростатического декапольно-цилиндрического поля описывается в системе координат  $\rho, z$  следующим выражением:

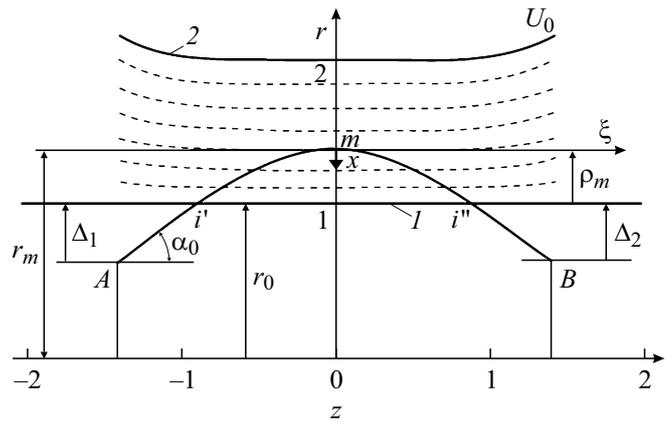
$$U(\rho, z) = \mu \ln(1 + \rho) + \gamma U_d, \tag{1}$$

где  $\ln(1 + \rho)$  — потенциал цилиндрического поля,  $\mu$  — коэффициент, задающий его весовой вклад,

$$U_d(\rho, z) = U_0 \rho \left( z^4 - 2\rho^2 z^2 + \frac{1}{5} \rho^4 \right)$$

— потенциал кругового декаполя,  $\gamma$  — весовой вклад кругового декаполя.

Рассчитано семейство эквипотенциальных линий электростатического декапольно-цилиндрического поля, в



**Рис. 1.** Схема осесимметричного энергоанализатора на основе декапольно-цилиндрического поля при  $\mu = 3/2$  и  $\gamma = -1/100$ : 1 — цилиндрический электрод, 2 — внешний отклоняющий электрод, A — источник,  $i'$  — входная кольцевая щель,  $i''$  — выходная кольцевая щель, B — приемник.

котором доли цилиндрического поля и декаполя равны соответственно  $\mu = 3/2$  и  $\gamma = -1/100$ . Расчеты эквипотенциалей выполнены в среде MathCAD и приведены на рис. 1 штриховыми линиями.

Схема декапольно-цилиндрического энергоанализатора с вкладами цилиндрического поля  $\mu = 3/2$  и кругового декаполя  $\gamma = -1/100$  представлена на рис. 1. Вследствие малой составляющей кругового декаполя распределения эквипотенциалей декапольно-цилиндрического поля имеют небольшое отклонение от прямых линий и близки к распределению эквипотенциалей цилиндрического поля. Электростатическое декапольно-цилиндрическое поле формируется в пространстве между двумя осесимметричными коаксиальными электродами, внутренний 1 из которых имеет цилиндрическую форму (радиуса  $r_0$ ) и находится под нулевым потенциалом, на внешний криволинейный (вогнутый) электрод 2, профиль которого повторяет эквипотенциаль декапольно-цилиндрического поля, подается отклоняющий потенциал  $U_0$ .

Приближенно-аналитическим методом расчета траекторий заряженных частиц установлено, что при определенном соотношении геометрических и энергетических параметров анализатора пучок заряженных частиц, выходящий из кольцевого источника A, отражается полем зеркала и фокусируется в кольцевое изображение B.

Для дальнейших расчетов точка начала отсчета траектории переводится в ее вершину m и в эту же точку размещается начало координат  $x, \xi$ . Все линейные размеры выдержаны в долях радиуса внутреннего цилиндрического электрода  $r_0$

$$\frac{r}{r_0} = \frac{r_0 + r_0 \rho}{r_0} = 1 + \rho, \quad x = \rho_m - \rho, \quad \xi = \frac{z}{r_0}. \tag{2}$$

Распределение декапольно-цилиндрического поля (1) в координатах  $x, \xi$  имеет следующий вид:

$$U_d(x, \xi) = U_0 g(x, \xi), \quad (3)$$

где

$$g(x, \xi) = \mu \ln(R-x) + \gamma \left[ (R-x-1)\xi^4 - 2(R-x-1)^3 \xi^2 + \frac{1}{5}(R-x-1)^5 \right], \quad R = 1 + \rho_m. \quad (4)$$

Движение заряженной частицы в поле (3) описывается системой уравнений

$$m\ddot{x} = qU_0 \varepsilon_1, \quad \varepsilon_1 = -\frac{\partial g(x, \xi)}{\partial x}, \quad (5a)$$

$$m\ddot{\xi} = qU_0 \varepsilon_2, \quad \varepsilon_2 = -\frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi}. \quad (5b)$$

Интегрируя сумму уравнений (5a) и (5b) вдоль траектории частицы в пределах от вершины  $m$  до произвольной точки, приходим к выражению для энергии частицы, движущейся в электростатическом поле, связывающему изменение кинетической энергии с разностью потенциалов

$$\frac{mv_m^2}{2} - \frac{m}{2}(x^2 + \xi^2) = -q(U_m - U(x, \xi)) = -qU_0(g_0 - g_x). \quad (6)$$

Здесь  $U_m = U_0 g(x_m, \xi_m) = U_0 g_0$  — потенциал поля в точке  $m$ , где  $x_m = \xi_m = 0$ ,  $g_x = g(x, \xi(x))$ .

Интегро-дифференциальное уравнение движения заряженной частицы в декапольно-цилиндрическом поле (3) имеет вид

$$(\xi')^2 = \frac{P^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + f_m - f_x}{g_0 - g_x + f_x}, \quad (7)$$

где

$$g_0 = g(x_m, \xi_m) = \mu \ln R + \frac{\gamma}{5}(R-1)^5, \quad (8)$$

$$f_x = \int_0^x \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi} \xi' d\xi = \gamma \left\{ (R-x-1)\xi^4 - 2(R-x-1)^3 \xi^2 + \int_0^x \xi^4 dx - 6 \int_0^x (R-x-1)^2 \xi^2 dx \right\}, \quad (9)$$

где  $P_0^2 = \frac{W}{qU_0} \sin^2 \alpha_0$  — параметр отражения, связывающий геометрические и энергетические параметры декапольно-цилиндрического зеркала.

Решение интегро-дифференциального уравнения (7) ищем в виде разложения в степенной ряд с неопределенными коэффициентами, которые рассчитываются из уравнения (7) при подстановке в него степенного ряда. Интегро-дифференциальное уравнение (7) имеет особую точку  $x = 0$ , так как множитель  $(\xi')^2$  в этом случае обращается в нуль, поэтому для интегрирования уравнения

используется метод разложения решения уравнения  $\xi$  в дробно-степенной ряд

$$\xi = \sqrt{x}(C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + C_4 x^4 + C_5 x^5 + C_6 x^6 + \dots). \quad (10)$$

Определены коэффициенты  $C_n$ , рассчитанные из условия удовлетворения уравнению (7). Радиальную составляющую точки поворота траектории  $R = 1 + \rho_m$ , необходимую для расчета  $\xi$ , можно определить, используя интегро-дифференциальное уравнение траектории (7) для точки  $x = \rho_m$ . В этом случае  $(\xi')^2 = \operatorname{ctg}^2 \alpha_0$ ,  $g_{x=\rho_m} = 0$  и

$$g_0 + f_m = P^2. \quad (11)$$

Подставив  $g_0$  из уравнения (8) в (11), приходим к выражению

$$\mu \ln R = P^2 - f_m - \frac{\gamma}{5}(R-1)^5, \quad (12)$$

из которого величина  $R$  определяется методом последовательных приближений. В качестве нулевого приближения используются параметры цилиндрического зеркального анализатора

$$R_0 = \exp(P^2) = 1 + P^2 + \frac{1}{2}P^4 + \frac{1}{6}P^6 + \frac{1}{24}P^8 + \dots$$

и  $f_{m_0} = 0$ .

Конечные результаты расчета траектории получены в виде разложения в ряд по величине параметра отражения зеркала  $P$  с точностью до 14 порядка включительно. Все расчеты выполнены в среде MathCAD.

Полная проекция траектории на ось симметрии  $z$  от источника  $A$  до его изображения  $B$  есть следующая сумма:

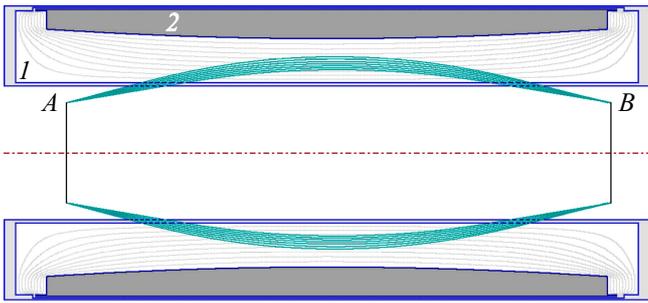
$$l = \frac{L}{r_0} = 2(\Delta \operatorname{ctg} \alpha_0 + \xi_m), \quad \Delta = \Delta_1 + \Delta_2, \quad (13)$$

где  $\Delta_1, \Delta_2$  — удаленность источника и его изображения от поверхности внутреннего цилиндрического электрода.

Расчет предложенного энергоанализатора приближенно-аналитическим методом также дополнен численным моделированием, которое подтвердило режим фокусировки типа „ось–кольцо“ в данной схеме.

## Моделирование электронно-оптической схемы декапольно-цилиндрического энергоанализатора

Проведено численное моделирование электронно-оптической схемы декапольно-цилиндрического энергоанализатора с распределением поля  $\mu = 3/2$  и  $\gamma = -1/100$ . Численное моделирование электронно-оптической схемы декапольно-цилиндрического энергоанализатора было выполнено посредством программы „Фокус“ для



**Рис. 2.** Траектории электронов в схеме энергоанализатора с декапольно-цилиндрическим полем (режим фокусировки типа „кольцо–кольцо“): *A* — тонкий кольцевой источник, *B* — кольцевое изображение, *1* — цилиндрический электрод, *2* — внешний отклоняющий электрод.

автоматизированного проектирования устройств электронной и ионной оптики.

Программа „Фокус“ позволяет в графическом режиме осуществить ввод и модификацию конструкции, вычислить распределение потенциала в выделенной области и провести траекторный анализ системы [13].

На рис. 2 представлен ход траекторий электронов в схеме энергоанализатора на основе декапольно-цилиндрического поля с кольцевыми источником и изображением. Длина электронно-оптической схемы составляет 11.4. Потенциал внешнего вогнутого электрода 2 равен единице. Радиус внутреннего цилиндрического электрода 1 составляет 4.2. Внутренний цилиндрический электрод под нулевым потенциалом. Отношение энергии электрона к потенциалу внешнего электрода составляет  $E/U = 1.3E[eV]/U[V] = 1.3$ . Все размеры выражены в условных единицах.

Кольцевой источник и кольцевое изображение часто необходимы по конструктивным соображениям. Кольцевой электронно-оптический источник (например, кольцевая диафрагма, облучаемая потоком частиц от образца большой площади) применяется при возбуждении электронов рентгеновским пучком в растровой оже-микроскопии и др. [14].

Согласно рис. 2, пучок электронов, выходящий из тонкого кольцевого источника *A*, отражается полем зеркала и фокусируется в кольцевое изображение *B*. Кольцевой источник *A* и его изображение *B* находятся в области внутреннего цилиндра. Таким образом, в схеме выполняется режим угловой фокусировки типа „кольцо–кольцо“. Из численных расчетов установлено, что в данной электронно-оптической схеме для широкого интервала изменения входных углов (30–42°) реализуется режим угловой фокусировки второго порядка с центральным углом 34.8°.

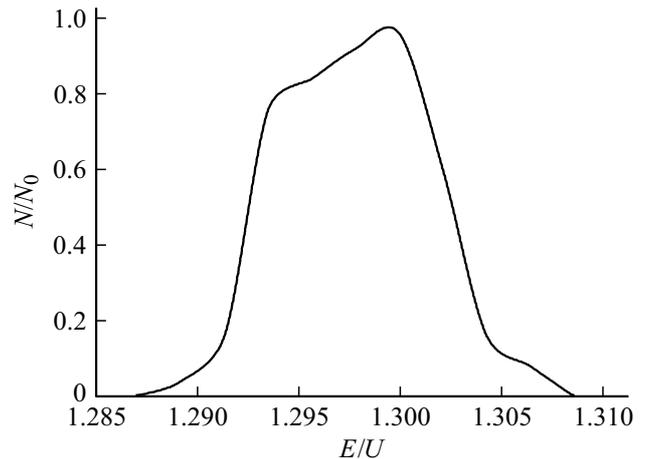
Для оценки энергетического разрешения энергоанализатора по результатам траекторного анализа была построена аппаратная функция. На рис. 3 представлена аппаратная функция предложенного устройства для режима угловой фокусировки типа „кольцо–кольцо“, из ана-

лиза которой следует, что при светосиле  $\Omega/2\pi = 12.3\%$  обеспечивается относительное энергетическое разрешение  $R = 0.8\%$ .

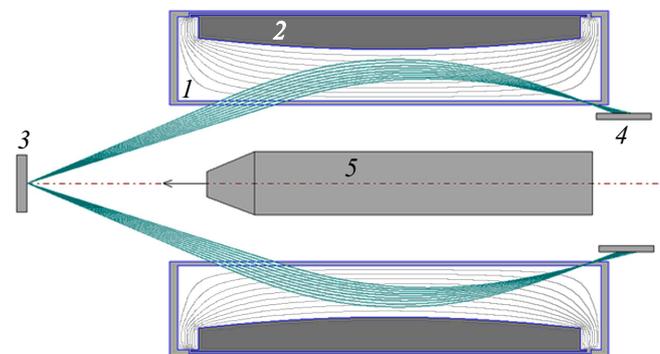
Таким образом, данная схема с кольцевым электронно-оптическим изображением может быть использована в качестве системы, где требуется свободная от анализируемых частиц область вблизи оси, например в оже- или рентгено-электронных спектрометрах.

На рис. 4 показано множество траекторий электронов в электронно-оптической схеме декапольно-цилиндрического энергоанализатора, в котором точечный источник расположен на оси симметрии на большом расстоянии от энергоанализатора. Отношение энергии электронов к потенциалу отклоняющего электрода составляет  $E/U = 1.64E[eV]/U[V] = 1.64$ . Интервал угла ввода электронов в энергоанализатор от 32 до 40°. Расстояние от исследуемого образца до энергоанализатора составляет  $z = 3.7$ .

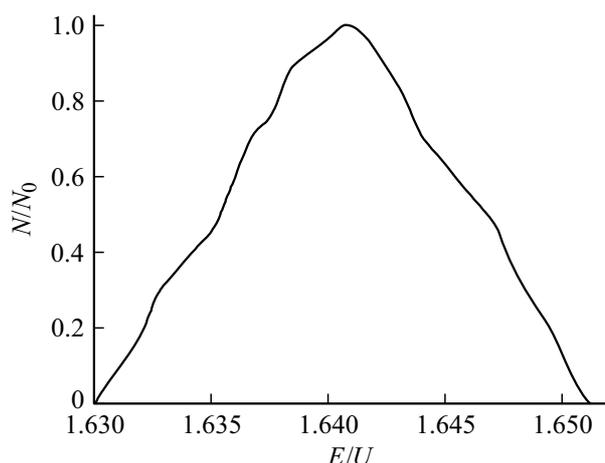
Согласно рис. 4, вторичные электроны, эмитированные с поверхности исследуемого образца 3 под дей-



**Рис. 3.** Аппаратная функция энергоанализатора с декапольно-цилиндрическим полем (режим угловой фокусировки типа „кольцо–кольцо“).



**Рис. 4.** Траектории электронов в схеме энергоанализатора с декапольно-цилиндрическим полем (режим фокусировки типа „ось–кольцо“): *1* — цилиндрический электрод, *2* — внешний отклоняющий электрод, *3* — исследуемый образец с точечным источником, *4* — детектор, *5* — электронная пушка.



**Рис. 5.** Аппаратная функция энергоанализатора с декапольно-цилиндрическим полем (режим угловой фокусировки типа „ось–кольцо“).

ствием первичного излучения, попадают в поле анализатора, после отражения от внешнего отклоняющего электрода 2 фокусируются в кольцевое изображение на поверхности цилиндрического электрода 1. Моделирование системы показало возможность достижения фокусировки второго порядка вблизи угла вылета из источника порядка  $36.8^\circ$ . В схеме выполняется режим угловой фокусировки второго порядка типа „ось–кольцо“.

Данная схема с режимом фокусировки типа „ось–кольцо“ обеспечивает большое фокусное расстояние „образец–анализатор“ и содержит коаксиально встроенную электронную пушку. Поскольку фокусы энергоанализатора и коаксиально встроенной в него электронной пушки при проведении экспериментов совмещаются на поверхности исследуемого образца, то пушка также предполагается длиннофокусной.

На рис. 5 показана аппаратная функция энергоанализатора с декапольно-цилиндрическим полем для режима угловой фокусировки типа „ось–кольцо“. Определено, что относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции устройства составляет 0.74% при светосиле  $\Omega/2\pi = 8.2\%$ .

Сравнительный анализ предложенного декапольно-цилиндрического энергоанализатора с модифицированным и усовершенствованным зеркалами (таблицы, приведенные в работах [2 и 5]) показал, что системы реализуют режим фокусировки пучка заряженных частиц второго порядка, декапольно-цилиндрический энергоанализатор уступает в разрешении, но имеет ряд других преимуществ. Преимуществом схемы энергоанализатора, реализующей режим фокусировки „ось–кольцо“, является большое фокусное расстояние „образец–анализатор“, что дает возможность пространственного совмещения, например, оже-микронзонда со средствами альтернативных методов исследований поверхности твердого тела [15]. Предложенный энергоанализатор обладает вы-

сокой светосилой и разрешающей способностью, не требует дополнительной системы питания, отличается компактностью и не уступает в качестве фокусировки частиц.

Схему энергоанализатора с режимом угловой фокусировки типа „ось–кольцо“, обеспечивающую большое фокусное расстояние, можно использовать в качестве диспергирующего элемента в электронных оже-спектрометрах как основных средств элементного анализа материалов на микро- и нанометровом масштабе.

## Заключение

Проведено численное моделирование схемы осесимметричного декапольно-цилиндрического энергоанализатора, в котором доли цилиндрического поля и декаполя равны соответственно  $\mu = 3/2$  и  $\gamma = -1/100$ . Получены численные модели схем энергоанализатора на основе электростатического декапольно-цилиндрического поля для двух режимов угловой фокусировки. Проведен траекторный анализ движения частиц. Построены аппаратные функции схемы для двух режимов фокусировки. Отмечено, что схема длиннофокусного энергоанализатора на основе декапольно-цилиндрического поля, дополненная встраиваемой электронной пушкой, может быть использована для локального исследования материалов и структур методом электронной оже-спектроскопии.

## Благодарности

Настоящая работа была выполнена в рамках грантового финансирования по научным и научно-техническим проектам Министерства образования и науки Республики Казахстан.

## Список литературы

- [1] *Защварова В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С.* // ЖТФ. 1966. Т. 36. Вып. 4. С. 132–138.
- [2] *Баранова Л.А.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 4. С. 149–151.
- [3] *Баранова Л.А.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 3. С. 155–158.
- [4] *Баранова Л.А.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 8. С. 153–155.
- [5] *Баранова Л.А.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 3. С. 458–461.
- [6] *Защварова В.В., Тындык Н.Н.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 4. С. 148–157.
- [7] *Zashkvara V.V., Tyndyk N.N.* // Nucl. Instrum. Method. Phys. Res. 1996. A370. P. 452–460.
- [8] *Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh., Saulebekov A.O.* // J. Electron. Spectroscop. Related Phenomen. 2005. Vol. 143. N 1. P. 29–32.
- [9] *Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh., Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T.* // Appl. Phys. 2012. N 2. P. 45–48.
- [10] *Gurov V.S., Saulebekov A.O., Trubitsyn A.A.* Analytical, Approximate-Analytical, and Numerical Methods for Design of Energy Analyzers. Advances in Imaging and Electron Physics. — Academic Press is an imprint of Elsevier Toulouse, France, 2015. P. 224.

- [11] *Ашимбаева Б.У., Чокин К.Ш., Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т.* // Вестник Карагандинского ун-та. Серия физика. 2012. № 4 (68). С. 86–92.
- [12] *Kambarova Z.T., Saulebekov A.O., Saulebekova D.A.* // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 12. Сер. „XII International Conference Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials“ 2017. С. 012078.  
DOI:10.1088/1757-899X/168/1/012078
- [13] *Trubitsyn A., Grachev E., Gurov V., Vochkov I., Vochkov V.* // Proceedings of SPIE. 2017. Vol. 10250. P. 0V-1–0V-7.
- [14] *Меньшиков К.А.* // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 11. С. 2245–2252.
- [15] *Трубицын А.А., Суворов Д.В., Тарабрин Д.Ю., Кукса П.И., Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т.* // Вестник РГРТУ. 2012. Вып. 42. № 4. Ч. 1. С. 54–59.