

А.О. Саулебеков¹, Ж.Т. Камбарова²

¹Казахстанский филиал МГУ им.М.В.Ломоносова, Нур-Султан, Казахстан, ²КарГУ
им.Е.А.Букетова, Караганда, Казахстан, kambarova@bk.ru

Фокусирующие свойства электростатического квадрупольно-цилиндрического зеркала

Цилиндрическое зеркало (ЦЗ) получило самое большое распространение, став базовым элементом в большинстве электронных спектрометров. ЦЗ обладает рядом преимуществ, таких как высокое энергетическое разрешение, простота конструкции и т.д. Его работа основана на фокусирующем и диспергирующем действии поля в пространстве между двумя коаксиальными цилиндрическими электродами на пучок заряженных частиц. Детально теория и возможность практического применения ЦЗ исследована группой ученых под руководством профессора Зашквары В.В [1].

В настоящей работе предложена конструкция квадрупольно-цилиндрического зеркала (КЦП), обладающая более высокими корпускулярно-оптическими параметрами по сравнению с классическим цилиндрическим зеркалом.

Новый класс осесимметричных лапласовых полей, построенных на основе синтеза мультиполей и цилиндрического поля и представляющих практический интерес для решения задачи энергоанализа пучков заряженных частиц, был предложен впервые в работах [2,3]. Потенциал мультипольно-цилиндрического поля, построенного на основе суперпозиции полей цилиндрического типа зеркала и кругового мультиполя различного порядка имеет следующий вид:

$$U(r, z) = \mu \ln r + U_m(r, z) \tag{1}$$

где $U_m(r, z)$ - круговой мультиполь, μ - коэффициент, задающий весовой вклад цилиндрического поля.

Ранее в работе [4] приведен расчет структур электростатических квадрупольно-цилиндрических полей, синтезированных на основе суммы базового цилиндрического поля и осесимметричных цилиндрических квадрупольей различного вида. Представлены эквипотенциальные портреты квадрупольно-цилиндрических полей различного вида. Проведен анализ полученных эквипотенциальных портретов квадрупольно-цилиндрических полей. Установлено, что электронное зеркало с КЦП, потенциалом

$$U_q(r, z) = U_0(\mu + z) \ln r \tag{2}$$

более доступно для аналитического исследования его электронно-оптических свойств и для построения на его базе светосильного энергоанализатора. Отмечено, что данное КЦП при величине $\mu = 1$ совпадает с хорошо известным полем Ваннберга, предложенным для разработки устройства, работающего в режиме спектрографа. Потенциал поля Ваннберга в системе координат r, z описывается следующим выражением [5]:

$$U = \frac{V}{\ln(r_1/r_0)}(1 + Az) \ln \frac{r}{r_0} \tag{3}$$

где A – малый безразмерный параметр. Наличие малого параметра A дает дополнительную степень свободы в выборе нужного распределения электростатического поля и расширяет возможность поиска наиболее оптимальной схемы энергоанализатора на основе КЦП.

В работе [6] приведены результаты численного моделирования электронно-оптической схемы энергоанализатора с КЦП при $A=-0,05$. Рассчитаны корпускулярно-оптические параметры предложенной схемы. Найден режим угловой фокусировки второго порядка типа «кольцо-кольцо».

Целью данной работы являются расчет фокусирующих свойств электростатического квадрупольно-цилиндрического зеркала при $A=-0,01$ и поиск возможных режимов угловой фокусировки.

Исследуемое КЦП формируется в пространстве между двумя осесимметричными коаксиальными электродами, внутренний из которых имеет цилиндрическую форму (радиуса r_0) и находится под потенциалом Земли, на внешний электрод, имеющий криволинейный профиль

$r = r_0 \exp\left[\frac{\ln(r_1/r_0)}{1 + Az}\right]$, подается отклоняющий потенциал U_0 (рис.1).

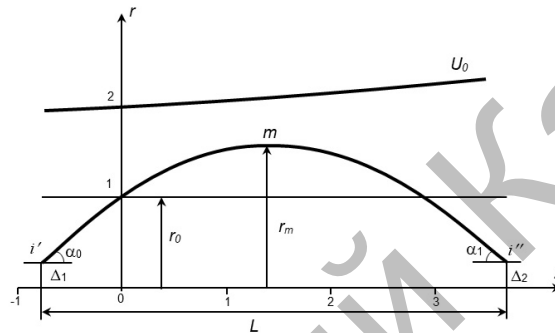


Рисунок 1. Электронно-оптическая схема зеркального анализатора с КЦП

Проведен расчет характеристик КЦП (3), выполненный на основе аналитического метода расчета траекторий, предложенного ранее в работах [7, 8]. Согласно этому методу, в точке поворота траектории **m** размещается система координат x, ξ и с этой точки начинается отсчет левой и правой ветвей траектории, несимметричных относительно оси x . Здесь и в дальнейшем все линейные размеры будут выдержаны в долях радиуса внутреннего цилиндрического электрода r_0 :

$$z = z_m \mu \xi, \quad \frac{r}{r_0} = \frac{(1 + \rho_m) r_0}{r_0} \frac{x \cdot r_0}{r_0} = R - x, \quad R = 1 + \rho_m. \quad (4)$$

Распределение КЦП (3) в координатах x, ξ имеет следующий вид:

$$U = U_{1,2}(x, \xi) = U_0 \omega (1 \pm \mu A' \xi) \ln(R - x), \quad (5)$$

где $R = \frac{r_m}{r_0} = 1 + \rho_m$, $\omega = (1 - A z_{m_1}) / \ln(r_1/r_0)$, $A' = \frac{A}{1 - A z_{m_1}}$.

Интегро-дифференциальное уравнение движения заряженных частиц в КЦП (3), в котором временно принято, что $A = \pm A'$ [1, 8], имеет вид:

$$\left(\xi'_{1,2}\right)^2 \left\{ -\ln\left(1 - \frac{x}{R}\right) + A \left[\xi \ln(R - x) - \int_0^x \ln(R - x) \xi' dx \right] \right\} = F_{m_1,2} + A \int_0^x \ln(R - x) \xi' dx. \quad (6)$$

Условие сшивания левой и правой ветвей траектории в точке поворота m :

$$P_1^2(A) \operatorname{ctg}^2 \alpha - A' f_{m_1} = P_2^2(A) \operatorname{ctg}^2 \alpha_1 + A' f_{m_2}, \quad (7)$$

где $f_{m_{1,2}} = \int_0^{\rho_m} \ln(R-x) \xi' dx$, $P_1^2(A) = \frac{P_o^2}{1-Az_m}$ - параметр отражения для левой ветви,

$$P_2^2(A) = \frac{P_o^2}{1-Az_m} \frac{\sin^2 \alpha_1}{\sin^2 \alpha_o} - \text{ для правой ветви и } P_o^2 = \frac{W}{qU} \ln\left(\frac{r_1}{r_o}\right) \sin^2 \alpha_o - \text{ параметр,}$$

связывающий геометрические и энергетические характеристики отражения цилиндрического зеркального анализатора [1].

Интегрируя уравнение (6) приближенно-аналитическим методом разложения величины

ξ в дробно-степенной ряд и $\xi = \sqrt{x} \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^n + \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^n$ [7, 8], используя при этом метод

последовательных приближений для определения R , получены уравнения для основных электронно-оптических характеристик КЦП. В качестве нулевого приближения при определении R использован параметр цилиндрического зеркального анализатора $R_0 = \exp(P^2)$ [1].

Полная проекция траектории на ось симметрии квадрупольно-цилиндрического зеркала от источника до его изображения:

$$l = \frac{L}{r_o} = \Delta_1 \operatorname{ctg} \alpha_o + \xi_i + \Delta_2 \operatorname{ctg} \alpha_1, \quad (13)$$

где Δ_1, Δ_2 - величины удаленности источника и его изображения от поверхности внутреннего цилиндрического электрода, которые считаются положительным по направлению внутрь от радиуса r_0 .

Для анализа характеристик электростатического квадрупольно-цилиндрического энергоанализатора были определены абберационные коэффициенты пространственной фокусировки 1, 2 и 3-го порядков. Получены основные электронно-оптические характеристики квадрупольно-цилиндрических энергоанализаторов для схем с $A = -0,01$, $A = 0$, $A = +0,01$, рассчитанные в зависимости от входного угла α_0 и параметра отражения

$$P, \text{ и удовлетворяющие условиям угловой фокусировки второго порядка } \frac{dl}{d\alpha} = \frac{d^2l}{d\alpha^2} = 0.$$

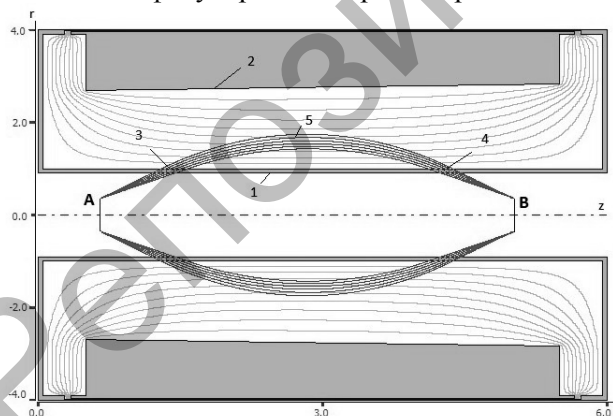
Сравнение параметров схем с различными значениями A показывает, что угловые абберации анализаторов с $A < 0$, внешний электрод которых имеет возрастающий экспоненциальный профиль, меньше, чем у квадрупольно-цилиндрических анализаторов с $A > 0$ и меньше, чем у цилиндрического зеркального анализатора, соответствующего схемам с $A = 0$. Это значит, что зеркальные анализаторы на основе КЦП с улучшенными электронно-оптическими характеристиками нужно выбирать среди схем с $A < 0$. При малых значениях параметра A профиль образующей внешнего электрода аппроксимируется наклонной прямой, что позволяет заменить внешний экспоненциальный электрод на конический.

Далее приведены результаты траекторного анализа системы, проведенного с помощью численной программы “Focus” для моделирования систем корпускулярной оптики [9]. Найдено три режима угловой фокусировки второго порядка «кольцо-кольцо», «кольцо-ось» и «ось-кольцо».

На рис.2 показаны траектории заряженных частиц в схеме энергоанализатора при $A = -0,01$, работающего в режиме фокусировки «кольцо-кольцо». Согласно схеме, заряженные частицы летят из тонкого кольцевого электронно-оптического источника А в интервале полярных углов от 35^0 до 45^0 , далее попадают через входную щель в поле, под действием потенциала на внешнем электроде отклоняются обратно, и фокусируются в кольцевое изображение В. Рассчитана аппаратная функция предложенного энергоанализатора, работающего в режиме угловой фокусировки «кольцо-кольцо». Относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции энергоанализатора с радиусом выходной диафрагмы $0,02r_0$ составляет 0,58 %.

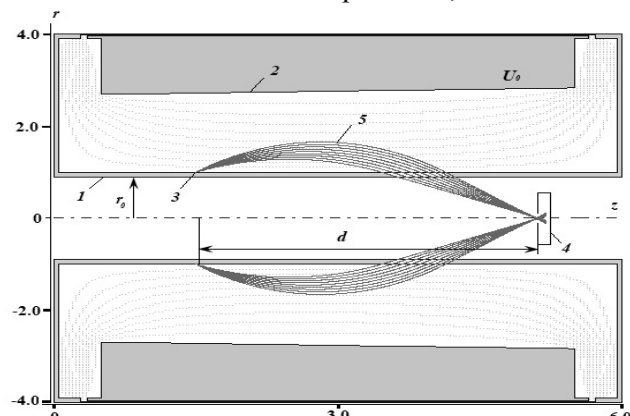
На рис. 3 дана схема исследуемого энергоанализатора при $A = -0,01$ и ход траекторий в нем в том случае, когда источником заряженных частиц служит кольцевая щель на внутреннем цилиндре, а детектор расположен на оси симметрии. Согласно схеме заряженные частицы, эмитируемые из реального источника, попадают в поле через входную кольцевую щель на внутреннем электроде, и под действием потенциала на внешнем электроде отклоняются обратно, и регистрируются детектором. Из траекторного анализа определено, что оптимальным диапазоном входных углов частиц в квадрупольно-цилиндрическое поле является интервал начальных углов 30^0-45^0 , обеспечивающий максимум светосилы $\Omega=16\%$ и наилучшей фокусировки пучка заряженных частиц. Относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции энергоанализатора с радиусом выходной диафрагмы $0,04r_0$ составляет 1,5 %.

На рис.4 приведено множество траекторий частиц в электронно-оптической схеме энергоанализатора. Источником первичных электронов служит встроенная электронная пушка, ось которой совпадает с осью симметрии энергоанализатора. Из рис.4 видно, как вторичные электроны, возбужденные из исследуемого образца (3) первичным излучением (6) (электронами), через входную щель (8) во внутреннем цилиндре, попадают в поле анализатора и при своем движении отклоняясь к оси цилиндра, фокусируются в кольцевое изображение. Электроны, прошедшие сквозь выходную диафрагму (4), регистрируются детектором (5). В схеме выполняется режим угловой фокусировки второго порядка «ось-кольцо». Моделирование электронно-оптической схемы показало возможность достижения фокусировки второго порядка вблизи угла вылета из источника порядка $36,6^0$.



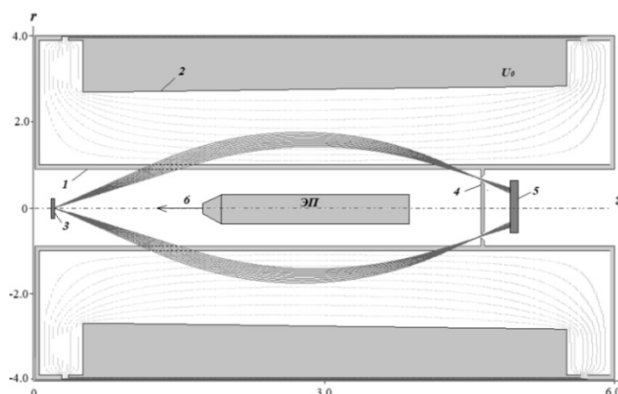
1 – внутренний заземленный цилиндр, 2 – внешний отклоняющий электрод, 3 и 4 – входная и выходная щели, А – тонкий кольцевой источник, В – кольцевое изображение, 5 – траектории частиц

Рисунок 2. Траектории частиц в квадрупольно-цилиндрическом зеркале (фокусировка «кольцо-кольцо»)



1 – внутренний заземленный цилиндр, 2 – внешний отклоняющий электрод, 3 – источник заряженных частиц, 4 – детектор, 5 – траектории частиц

Рисунок 3. Траектории частиц в квадрупольно-цилиндрическом зеркале (фокусировка «кольцо-ось»)



1 – внутренний заземленный цилиндрический электрод, 2 – внешний отклоняющий электрод, 3 – исследуемый образец с точечным источником частиц, 4 – выходная диафрагма, 5 – детектор, 6 – первичные электроны, ЭП – электронная пушка
Рисунок 4. Ход траекторий частиц в квадрупольно-цилиндрическом энергоанализаторе (режим фокусировки «ось-кольцо»)

В таблице 1 представлены результаты расчетов фокусирующие свойства энергоанализатора на основе квадрупольно – цилиндрического поля при $A= -0,01$ для различных режимов фокусировки.

Таблица 1 – Фокусирующие свойства энергоанализатора на основе электростатического квадрупольно – цилиндрического поля при $A= - 0,01$

| Тип фокусировки | «кольцо-кольцо» | «кольцо-ось» | «ось-кольцо» |
|--|-----------------|--------------|--------------|
| Порядок фокусировки | 2 | 2 | 2 |
| Центральный угол фокусировки | $38,3^0$ | $36,5^0$ | $36,6^0$ |
| X координата фокусировки | 5,03 | 5,12 | 4,6 |
| Y координата фокусировки | 0,35 | 0 | 0,7 |
| Общая протяженность электронно-оптической схемы, $l = L/r_0$ | 6,0 | 6,0 | 6,0 |
| Параметр отражения, P | 1 | 1 | 1 |

Таким образом, исследованы схемы квадрупольно-цилиндрического энергоанализатора при $A=-0,01$, реализующие различные режимы угловой фокусировки второго порядка. Рассчитаны фокусирующие свойства энергоанализатора на основе квадрупольно-цилиндрического поля для различных режимов фокусировки. Установлено, что на основе квадрупольно-цилиндрических полей могут быть построены светосильные энергоанализаторы, обеспечивающие режимы работы в условиях высокой разрешающей способности и большой светосилы.

Литературы:

1. Зашквара В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С. Фокусирующие свойства электростатического зеркала с цилиндрическим полем // ЖТФ. – 1966. - Т.36. - С.132.
2. Зашквара В.В., Тындык Н.Н. Осесимметричные электростатические мультиполи, их приложение // ЖТФ. – 1991. - Т.61. - С.148.
3. Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. Potential fields based on circular multipole series // Nuclear Instruments and Methods. -1996. - A370. – P. 452-460. doi.org/10.1016/0168-9002(95)00809-8

4. Kambarova Zh.T., Saulebekov A.O. Calculation of the structure of electrostatic quadrupole-cylindrical fields // Bulletin of the University of Karaganda-Physics. – 2018. – Vol.1. – Issue 89. – P. 66-71.
5. Wannberg B. An electrostatic mirror spectrometer with coaxial electrodes for multi-detector operation // Nuclear Instruments and Methods. – 1973. – V.107. – P. 549-556.
6. Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T. Development of mirror energy analyzer based on electrostatic quadrupole-cylindrical field // Eurasian Physical Technical Journal. – 2017. - V.14, No 2 (28). – P.42-47.
7. Zashkvara V.V., Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh. Calculation of trajectories in a multipole cylindrical field // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. - 2002. - Vol.122. – P.195-202. doi.org/10.1016/S0368-2048(01)00346-2
8. Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh., Saulebekov A.O. Focusing Properties of a mirror analyzer with hexapole cylindrical field // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. - 2005 – Vol.143. – P.29-32. dx.doi.org/10.1016/j.elspec.2004.11.002
9. Trubitsyn A., Grachev E., Gurov V., Bochkov I., Bochkov V. CAE “FOCUS” for modelling and simulating electron optics systems: development and application // Proceedings of SPIE. - 2017. - V.10250. - P.0V-1 – 0V-7. DOI: 10.1117/12.2256570

Кудусова И.А.

Магистрант физико-технического факультета КарГУ им. Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан, ilona256k@gmail.com

Изучение износостойкости особо твердых покрытий

Одной из важных характеристик физического тела является его твердость. Именно это свойство определяет срок эксплуатации деталей машин и механизмов. Уже более 50 лет с целью увеличения их срока службы используются различные технологии нанесения на поверхность деталей упрочняющих покрытий.

Одним их методов является нанесение тонких (~10 мкм) ионно-плазменных покрытий, который в настоящее время считается наиболее универсальным и перспективным, позволяющим получать покрытия с наперед заданными свойствами [1,2]. Нанесение защитных, упрочняющих, износостойких покрытий на различные изделия является эффективным способом повышения работоспособности и кроме того, использование относительно дешевых металлов также увеличивает экономический эффект.

В работе были изучены два вида покрытий: TiN и (Ti+Cu)N, которые наносились на подложки из стали марки 12X18H10T. Подложки, толщиной 5 мм, изготавливались из шестигранного прутка с гранью длиной 14 мм, после чего шлифовались и полировались на полировально-шлифовальном станке FORCIPOLO 102. Следует отметить, что только одна сторона подложки полировалась до зеркального блеска, противоположная сторона подвергалась только шлифовке, грани обработке не подвергались. Перед установкой в камеру подложки промывались органическим растворителем Нефрас С2-80/120, протирались этиловым спиртом-ректификатом и сушились при комнатной температуре.

Нанесение покрытий осуществлялось на установке вакуумного напыления ННВ 6.6-И1, на которой были установлены два электродуговых испарителя и плазменный источник с накаливаемым катодом (ПИНК), который совмещал в себе функции ионно-плазменной очистки и активации подложек, а также ионного ассистирования во время нанесения покрытий. Таким образом, в ННВ 6.6-И1 были установлены два катода: из Ti и Cu. Подложки располагались на вращающемся столике с плоскостью напыления под углом в 45 градусов к испарителям и к ПИНКу, что позволяло наносить покрытие в основном на полированную поверхность подложки.

Режим нанесения покрытий был выбран следующим. Рабочая камера установки откачивалась до давления $P = 0,005$ Па, затем с помощью системы напуска газа в камеру