

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.387.322

В. А. Коротченко, В. И. Соловьев, Ж. В. Солотенкова

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАМЫКАНИЯ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ

Разработана компьютерная модель процесса замыкания герконов в цепи с активной нагрузкой. Модель опробована в применении к геркону МКА-14108 при токе 0,1 А и напряжении до 100 В. Получены временные зависимости координаты контакт-детали, магнитной, упругой и электрической сил, действующих на деталь, и параметров магнитной и электрической цепей. Установлено, что при дребезге деталей на положительном электроде за счет импульсов автоэлектронного тока выделяется сравнительно большая (около 10 мкДж) энергия, что может быть одной из причин эрозии контактов. Достоверность результатов моделирования подтверждена экспериментом.

Ключевые слова: замыкание магнитоуправляемых контактов, магнитное сопротивление, движение контакт-деталей, ток управляющей катушки.

Введение. Магнитоуправляемые контакты широко используются в технике [1]. Среди основных тенденций развития этого класса приборов можно выделить повышение качества и снижение разброса параметров в пределах поставляемой партии. Одним из основных показателей качества является гарантированное максимальное число срабатываний или ресурс герконов. Износ контакт-деталей (КД) в основном происходит в динамических фазах работы прибора. Поэтому для решения задачи обеспечения большого ресурса при возрастающих требованиях к коммутируемой мощности необходимы исследования процессов замыкания и размыкания контактов.

В наших предыдущих работах исследована динамика размыкания магнитоуправляемых контактов при разрыве тока [2, 3]. В настоящей статье приведены результаты моделирования процесса замыкания герконов с управляющей катушкой. *Цель работы* – получение временных зависимостей основных механических, электрических и магнитных параметров процесса замыкания геркона в цепи с активной нагрузкой.

Физико-математическая основа модели. Зависимость координаты КД от времени определяется решением уравнения Ньютона:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m \frac{dv}{dt} = F_S = F_U - F_M - F_E, \quad (1)$$

где m – приведенная масса КД; x – координата массы, отсчитываемая от границы раздела замкнутых КД (в исходном разомкнутом состоянии $x = \delta_0/2$, где δ_0 – межконтактный зазор); t – время; v – скорость; F_S – суммарная сила, действующая на массу; F_U , F_M и F_E – упругая, магнитная и электрическая составляющие силы.

Упругая сила, размыкающая контакты, увеличивается с уменьшением координаты x в соответствии с формулой [1]:

$$F_U = b E_U (h/l)^3 (\delta_0/2 - x)/4, \quad (2)$$

где E_U – модуль упругости материала; b , h и l – ширина, толщина и длина КД внутри геркона.

Магнитная сила для каждого шага решения уравнения (1) определяется соотношением [1]:

$$F_M = \frac{\Phi_d^2}{2 \mu_0 S_k}, \quad (3)$$

где Φ_d – магнитный поток в КД; S_k – площадь перекрытия (произведение перекрытия a на ширину b); $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Расчет магнитного потока затруднен тем, что магнитное сопротивление КД в соответствии с кривой намагничивания зависит от потока. Для его определения необходимо численным способом решать первое уравнения Кирхгофа для магнитной цепи с нелинейным элементом:

$$I_k N_w - \Phi R_{ms} = 0, \quad (4)$$

где I_k и Φ – ток и магнитный поток катушки; N_w – число её витков; R_{ms} – суммарное сопротивление магнитной цепи.

Величина R_{ms} включает в себя сопротивление межконтактного зазора R_b , контакт-деталей R_d , воздушной среды вне и внутри катушки R_{v1} и R_{v2} [4]. Приближенно полагается, что сопротивление КД вне катушки входит в магнитное сопротивление R_{v1} .

Уравнение (4) необходимо решать на каждом шаге решения уравнения движения (1), поскольку сопротивление зазора R_b зависит от координаты x в соответствии с формулой (без учета краевых эффектов):

$$R_b = \frac{2x + h_k}{\mu_0 S_k}, \quad (5)$$

где h_k – высота микровыступа, замыкающего контакты.

В ходе численного решения уравнения (4) для текущей величины напряженности H_m по кривой намагничивания находится индукция поля в контакт-деталях B_d и вычисляется значение магнитного потока $\Phi_d = B_d S_{kd}$ (S_{kd} – площадь поперечного сечения КД). Определяется падение магнитного напряжения на контакт-деталях $U_{md} = H_m l_k$ (l_k – длина катушки). Находится падение магнитного напряжения на сопротивлении зазора $U_{mb} = \Phi_d R_b$ и на сумме сопротивлений деталей и зазора $U_{mdb} = U_{md} + U_{mb}$.

Сопротивление воздушной среды внутри катушки R_{v2} рассчитывается по соотношению:

$$R_{v2} = \frac{4l_k}{\mu_0 \pi D_k^2}, \quad (6)$$

где D_k – внутренний диаметр катушки, скорректированный с учетом толщины обмотки.

Определяется магнитный поток через сопротивление воздушной среды внутри катушки $\Phi_{v2} = U_{mdb} / R_{v2}$ и суммарный поток катушки $\Phi = \Phi_d + \Phi_{v2}$. Вычисляется магнитное сопротивление цепи из элементов R_{v2} , R_d и R_b :

$$R_{vdb} = U_{mdb} / \Phi. \quad (7)$$

Находится падение напряжения на сопротивлении воздушной среды снаружи катушки $U_{mv1} = \Phi R_{v1}$. Напряженность поля H_m варьируется до совпадения суммы ($U_{mv1} + U_{mdb}$) с произведением $I_k N_w$ (МДС катушки), что соответствует решению уравнения (3).

Магнитное сопротивление воздушной среды снаружи катушки R_{v1} определяется по экспериментальному значению тока отпускания с помощью соотношения, отражающего равенство упругой и магнитной сил в момент размыкания контактов [5]:

$$R_{v1} = \frac{I_0 N_w}{\sqrt{\mu_0 S_k C \delta_0}} - R_{vdb}, \quad (8)$$

где I_0 – ток отпускания; $C = b E_U (h/l)^3 / 4$ – жесткость контакт-детали. Величина R_{vdb} находится численным решением уравнения (4) при $I_k = I_0$ и $R_{v1} = I_0 N_w / \sqrt{\mu_0 S_k C \delta_0}$.

Полное магнитное сопротивление и индуктивность катушки определяются по соотношениям: $R_{ms} = R_{v1} + R_{vdb}$ и $L_k = N_w^2 / R_{ms}$.

Значение тока катушки, необходимое для решения уравнения (4), изменяется во времени в соответствии с первым уравнением Кирхгофа для электрической цепи катушки:

$$N_w \frac{d\Phi}{dt} = U_{0k} - I_k R_k, \quad (9)$$

где U_{0k} – напряжение питания катушки; R_k – электрическое сопротивление обмотки. Поскольку поток в соответствии с уравнением (4) зависит от изменяющегося во времени сопротивления R_{ms} , соотношение (9) после дифференцирования представляется в виде:

$$\frac{dI_k}{dt} = \frac{(U_{0k} - I_k R_k) R_{ms}}{N_w^2} + \frac{I_k}{R_{ms}} \frac{dR_{ms}}{dt}. \quad (10)$$

В ходе численного решения уравнения движений (1) совместно с уравнением (10) величина dR_{ms} полагается равной разности значений R_{ms} на текущем и предшествующем шагах.

Электрическая сила рассчитывается с приближенным учетом шероховатости КД, что важно при малых межэлектродных расстояниях. Полагается, что контакты замыкаются на вершине одного микровыступа. При расхождении контактов электродная система эквивалентна двум параллельно соединенным конденсаторам, в каждом из которых действует своя электрическая сила, пропорциональная площади обкладок и квадрату напряженности

электрического поля. Сумма этих сил равна результирующей электрической силе притяжения контактов:

$$F_E = 0,5[\varepsilon_0(S_k - S_h)E_k^2 + \varepsilon_0 S_h E_h^2]; \quad (11)$$

$$E_k = U/(h_k + 2x), \quad E_h = U/(2x), \quad (12)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м (диэлектрическая постоянная); S_h – площадь вершины микровыступа; E_k и E_h – напряженности электрического поля в зазоре и на вершине микровыступа; U – напряжение между КД.

Величина напряжения U находится численным решением уравнения Кирхгофа для коммутируемой электрической цепи, которая содержит нелинейное сопротивление межконтактного зазора, определяющееся током автоэлектронной эмиссии и емкостным током:

$$U_0 - (I_E + I_C)R_0 - U = 0, \quad (13)$$

где U_0 – напряжение источника питания; I_E – ток автоэлектронной эмиссии в области микровыступа; I_C – емкостный ток; R_0 – сопротивление нагрузки геркона.

Автоэлектронный ток рассчитывается по соотношениям (в системе единиц СИ) [6]:

$$I_E = A E_h^2 S_h \exp\left[-\frac{B\theta(y)}{E_h}\right], \quad (14)$$

где $A = 1,54 \cdot 10^{-6} / e\varphi$; $e\varphi$ – работа выхода электрона (эВ); $B = 6,83 \cdot 10^9 \sqrt{(e\varphi)^3}$; $\theta(y)$ и y – функция Нордгейма и её аргумент: $\theta(y) = 1 - y^{1,7}$; $y = 3,79 \cdot 10^{-5} \sqrt{E_h} / e\varphi$. Автоэлектронный ток вне области микровыступа не учитывается, поскольку в соответствии с формулами (12) $E_k \ll E_h$ при малых значениях x .

Емкостный ток определяется по уравнению:

$$I_C = C_S \frac{dU}{dt} + U \frac{dC_S}{dt}, \quad (15)$$

где C_S – суммарная емкость между контактами:

$$C_S = C_0 + \varepsilon_0 \frac{(S_k - S_h)}{h_k + 2x} + \varepsilon_0 \frac{S_h}{2x}, \quad (16)$$

где C_0 – паразитная емкость.

В разработанной модели предусмотрен случай, при котором за счет большой электрической силы координата x оказывается отрицательной. Физически это означает повторное замыкание контактов. В модели предполагается частично упругое отражение КД при соударениях. Поскольку реальная масса контакт-детали распределена по её длине, полагается, что детали после замыкания изгибаются при неподвижных концах и расходятся только после полупериода коле-

баний. Поэтому в модель введена задержка расхождения контактов Δt_0 , в течение которой координата конца КД и её скорость равны нулю. Приближенно, с учетом экспериментальных данных, полагается $\Delta t_0 = 10$ мкс.

Результаты моделирования. С помощью разработанной компьютерной модели исследовалась динамика замыкания контактов геркона типа МКА-14108 (без контактных покрытий). В расчеты были заложены следующие значения параметров: приведенная масса КД $m = 2 \cdot 10^{-6}$ кг; начальный зазор между контактами $\delta_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ м; модуль упругости $E_U = 1,4 \cdot 10^{11}$ Н/м; перекрытие $a = 0,0005$ м; ширина $b = 0,001$ м; толщина $h = 0,0002$ м; длина КД внутри геркона $l = 0,005$ м; высота микровыступа $h_k = 1 \cdot 10^{-6}$ м; площадь его вершины $S_h = 2,5 \cdot 10^{-11}$ м²; ток отпускания геркона $I_0 = 0,001$ А; число витков катушки $N_w = 5000$, её длина $l_k = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м, эффективный внутренний диаметр $D_k = 8,5 \cdot 10^{-3}$ м; работа выхода автоэмиттера $e\varphi = 4,5$ эВ; минимальное расстояние электрического разрыва контактов $x_0 = 5 \cdot 10^{-10}$ м; коэффициент частично упругого отражения КД – 0,5.

Параметры электрической цепи: напряжение источника $U_0 = (10 - 100)$ В; сопротивление коммутируемой цепи $R_0 = 1$ кОм; сопротивление цепи заряда катушки $R_k = 870$ Ом; напряжение питания катушки $U_{ok} = 5$ В; паразитная межконтактная емкость $C_0 = 50$ пФ.

Кривая намагничивания пермаллоя 50 Н и зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для частоты 1 кГц представлены на рисунке 1 [7]. Кривые аппроксимировались степенными полиномами.

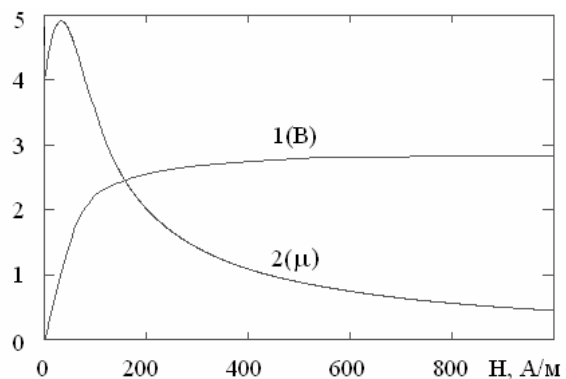


Рисунок 1 – Зависимости индукции магнитного поля (1) и относительной магнитной проницаемости (2) от напряженности поля. Цена делений по оси ординат: 1 – 0,5 Тл; 2 – 2500

Результаты моделирования приведены на рисунках 2 – 5. Из рисунка 2 следует, что ток катушки (кривая 3) через 500 мкс после включения её питания при коммутируемом напряжении 10 В (кривая 6) увеличивается до 4,2 мА. На зависимости наблюдается характерный изгиб, соответствующий замыканию контактов, который объясняется уменьшением магнитного сопротивления межконтактного зазора и нелинейностью кривой намагничивания пермаллоя.

Напряженность и индукция магнитного поля непрерывно возрастают приблизительно до 900 А/м и 1,4 Тл соответственно (кривые 4 и 5).

Индуктивность катушки увеличивается (кривая 2) за 250 мкс от 0,34 Гн до 0,85 Гн за счет роста магнитной проницаемости и уменьшения межконтактного зазора (кривая 1), а затем падает до 0,4 Гн, что связано с насыщением магнитопровода.

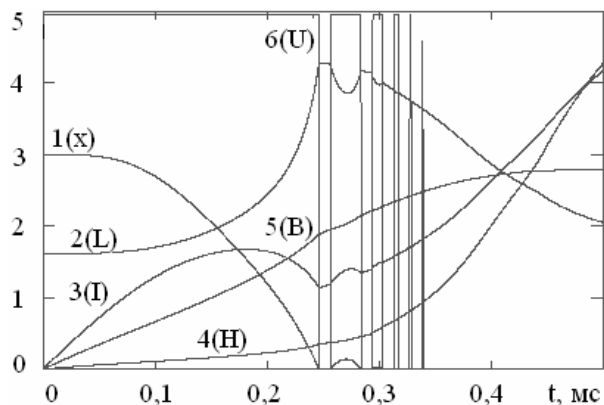


Рисунок 2 – Зависимости координаты КД (1), индуктивности и тока катушки (2 и 3), напряженности и индукции поля (4 и 5), напряжения на герконе (6) от времени. Цена делений: 1 – 5 мкм; 2 – 0,2 Гн; 3 – 1 мА; 4 – 200 А/м; 5 – 0,5 Тл; 6 – 2 В

Зависимость напряжения на герконе от времени (кривая 6) подтверждает возникновение дребезга контактов после замыкания.

Зависимости сопротивлений магнитной цепи от времени представлены на рисунке 3.

Суммарное магнитное сопротивление цепи R_{ms} за время, соответствующее замыканию контактов (250 мкс), снижается от $7,6 \cdot 10^7$ Гн⁻¹ до $3,2 \cdot 10^7$ Гн⁻¹ (кривая 5) в результате уменьшения межконтактного зазора (кривая 3) и его магнитного сопротивления R_b (кривая 4). Сопротивление зазора падает более чем на порядок, но величина R_{ms} уменьшается значительно меньше (примерно в 2 раза), что объясняется влиянием сопротивления воздушной среды снаружи катушки R_{v1} (прямая 2). После 250 мкс значение

R_{ms} увеличивается за счет насыщения пермаллоя и соответствующего роста сопротивления контактно-деталей R_d (кривая 1).

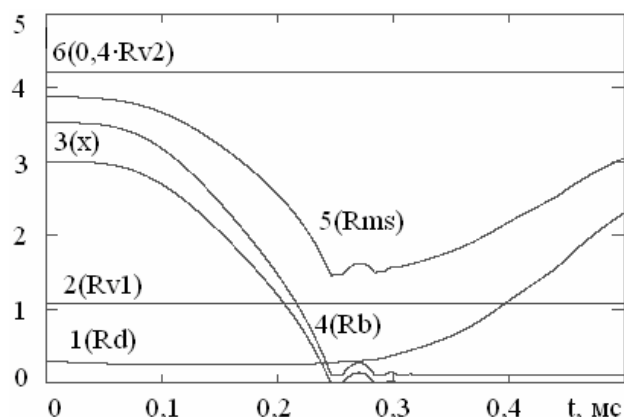


Рисунок 3 – Зависимости координаты КД (3); магнитных сопротивлений КД (1), воздушной среды внутри и вне катушки (6, 2), зазора (4) и всей цепи (5) от времени. Цена делений по оси ординат: сопротивления – $2 \cdot 10^7$ Гн⁻¹; координаты – 5 мкм

Магнитное сопротивление воздушной среды внутри катушки велико ($\sim 2 \cdot 10^8$ Гн⁻¹ – прямая 6) и заметно проявляется лишь на начальном и конечном отрезках времени.

На рисунке 4 представлены временные зависимости сил, действующих на контактно-детали.

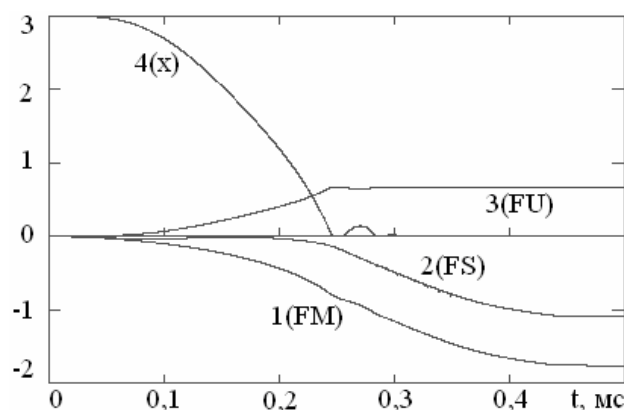


Рисунок 4 – Зависимости магнитной (1), суммарной (2) и упругой (3) сил; координаты КД (4) от времени при коммутируемом напряжении 10 В. Цена делений: силы – 50 мН; координаты – 5 мкм

Из рисунка следует, что до момента замыкания контактов (250 мкс – кривая 4) магнитная и упругая силы увеличиваются по модулю за счет роста тока катушки и уменьшения зазора (кривые 1 и 3). Силы растут приблизительно с одинаковой скоростью и поэтому их алгебраическая сумма, опре-

деляющая результирующую силу, много меньше слагаемых (кривая 2).

После замыкания контактов упругая сила с течением времени лишь немного изменяется за счет их дребезга, а затем стабилизируется на уровне около 40 мН. Магнитная сила на временном отрезке (250 – 450) мкс увеличивается (по модулю) до 90 мН, а далее её рост резко замедляется из-за магнитного насыщения КД. Результирующая сила, обеспечивающая сжатие контактов, увеличивается примерно до 50 мН.

Электрическая сила в рассматриваемом случае низкого (10 В) коммутируемого напряжения оказалась пренебрежимо малой. При увеличении напряжения до 100 В сила становится соизмеримой с магнитной и даже превышает её, но лишь в короткие отрезки времени (1– 10 мкс), когда межконтактный зазор очень мал (до 0,1 мкм). В этих условиях электрическое притяжение контактов заметно изменяет значения суммарной силы, уменьшает амплитуду и длительность отскоков деталей при дребезге, хотя общий характер зависимостей, представленных на рисунке 4, значительно не изменяется.

Зависимости координаты контакт-детали, напряжения на герконе и тока автоэлектронной эмиссии от времени для одного из участков между размыканием и повторным замыканием контактов при коммутируемом напряжении 100 В представлены на рисунке 5. Увеличение координаты КД до 20 нм (кривая 3) связано с начальной скоростью движения приведенной массы после частично упругого отражения. Торможение КД и уменьшение координаты обусловлено действием магнитной и электрической сил.

Рост напряжения на герконе (кривая 2 на рисунке 5) объясняется зарядом межконтактной емкости током источника питания, а спад – разрядом емкости током автоэлектронной эмиссии. Заметим, что оба тока зависят от напряжения и координаты.

Сравнительно большие (до 0,1 А), короткие (менее 1 мкс) импульсы автоэлектронного тока (кривая 1 на рисунке 5) наблюдаются при малых значениях координаты, обеспечивающих высокую напряженность электрического поля. Поскольку напряжение в это время сравнительно велико (десятки вольт), автоток сопровождается значительным локальным выделением энергии на положительном электроде. За время дребезга контактов выделяется энергия 12 мкДж, достаточная для испарения материала КД из полусферы с радиусом до 4,5 мкм. Испарение

может быть одной из причин эрозии контактов при длительной работе.

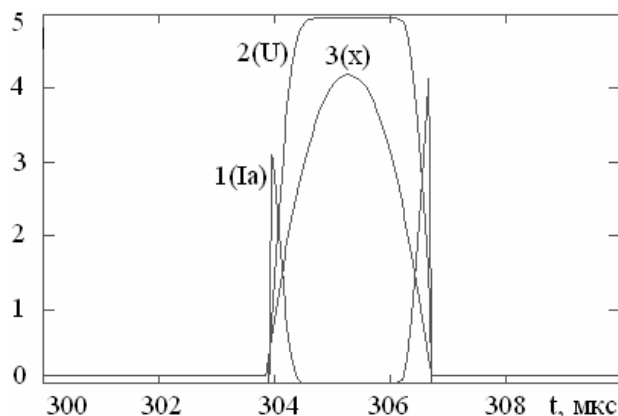


Рисунок 5 – Зависимости автоэлектронного тока (1), напряжения на герконе (2) и координаты (3) от времени при коммутируемом напряжении 100 В. Цена делений: 1 – 20 мА, 2 – 20 В, 3 – 5 нм

Указанная величина энергии, выделяющейся за счет автоэлектронного тока при замыкании контактов, приблизительно на порядок меньше, чем при их размыкании в процессе выключения геркона [2,3]. Это объясняется тем, что перед первым замыканием скорость КД много больше, чем при выключении. Высокие значения скорости сохраняются после отскоков КД, а в связи с ростом магнитной силы с течением времени – и перед повторными замыканиями. В результате детали быстрее проходят область малых зазоров, соответствующую большой напряженности электрического поля, и уменьшается длительность импульсов автоэлектронного тока.

Экспериментальная часть. Целью экспериментов являлась оценка достоверности результатов моделирования путем сопоставления осциллограмм напряжения на герконе и тока управляющей катушки с расчетными графиками.

Электрическая схема экспериментального устройства представлена на рисунке 6. Геркон V (МКА–14108), размещенный в стандартной управляющей катушке L (число витков 5000, сопротивление 870 Ом), соединялся с источником постоянного напряжения БП через сопротивление R (1 кОм). На катушку от генератора ГИ (Г5-63) подавались одиночные прямоугольные импульсы напряжения. Изменения напряжения на герконе и тока катушки наблюдались с помощью цифрового двухканального осциллографа АСК-3104. Напряжение на вход осциллографа подавалось через делитель (1:10) с входным сопротивлением 10 МОм и емкостью 15 пФ. Для измерения тока в цепь катушки включался резистор 50 Ом, согласованный с сопротивлением кабеля осциллографа.

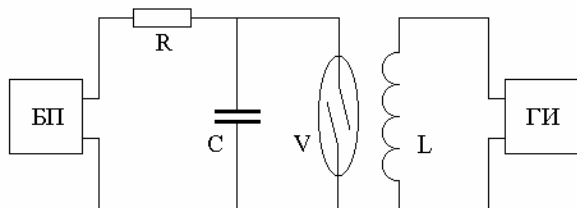


Рисунок 6 – Схема измерений: БП – источник коммутируемого напряжения, R – резистор, C – паразитная емкость, V – геркон, L –управляющая катушка, ГИ – генератор импульсов

Результаты эксперимента представлены на рисунке 7. Осциллограммы напряжения показывают, что контакты замыкаются через ~ 300 мкс после подачи импульса напряжения на катушку, что удовлетворительно совпадает с результатами моделирования (~ 250 мкс – рисунок 2). На зависимости тока управляющей катушки от времени наблюдается изменение скорости нарастания после замыкания контактов (характерный изгиб). Значение тока катушки достигает 4,8 мА за 500 мкс, что приблизительно соответствует результатам моделирования ($\sim 4,5$ мА – рисунок 2).

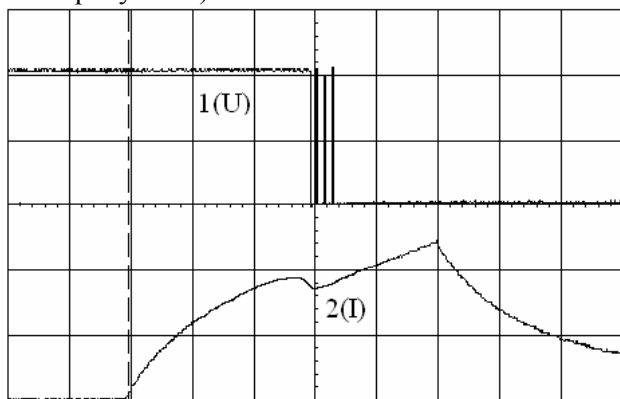


Рисунок 7 – Осциллограммы напряжения на герконе (1) и тока катушки (2) при коммутируемом напряжении 10 В. Цена делений: 5 В, 2 мА, 100 мкс

Осциллограмма напряжения (кривая 1 на рисунке 7) подтверждает возникновение дребезга контактов: после первого замыкания они трижды разомкнулись в течение 30 мкс. По результатам моделирования контакты размыкаются 5 раз за 90 мкс (кривая б на рисунке 2). Различия результатов моделирования и эксперимента связаны с приближенностью разработанной модели и индивидуальными особенностями использованного в экспериментах образца геркона (зазор, микрорельеф КД, их перекосы, смещения и др.).

Основные результаты работы

1. Разработана численная модель процесса замыкания герконов электромагнитом в электрической цепи с активной нагрузкой. В модели уравнение движения контакт-детали решается с учетом электрического притяжения контактов. На каждом шаге решения определяются параметры магнитной цепи, содержащей два нелинейных элемента в виде пермаллового стержня и межконтактного зазора, а также параметры коммутируемой электрической цепи, которая содержит нелинейный элемент в виде промежутка с автоэлектронным током и паразитную емкость между контактами.

2. С помощью модели для процесса замыкания геркона типа МКА-14108 с длиной баллона 14 мм, межконтактным зазором 30 мкм получены временные зависимости координаты приведенной массы КД, тока стандартной управляющей катушки, сопротивлений элементов магнитной цепи, магнитной, упругой и электрической сил, определяющих движение массы, напряжения на герконе и тока автоэлектронной эмиссии.

3. Установлено, что геркон замыкается через 250 мкс с момента включения напряжения 5 В на управляющей катушке. После замыкания следует несколько размыканий-замыканий (дребезг контактов), возникающих за счет частично упругого отражения приведенных масс КД и их последующего торможения магнитной и электрической силами. Дребезг прекращается приблизительно через 100 мкс.

4. Показано, что ток катушки за 500 мкс увеличивается до 4,5 мА с заметным (до 30 %) характерным спадом перед замыканием контактов, причиной которого является резкое (от 0,4 Гн до 0,8 Гн) увеличение индуктивности катушки в результате уменьшения межконтактного зазора и его магнитного сопротивления.

5. Установлено, что при повышенных значениях коммутируемого напряжения (до 100 В) и тока (до 100 мА) дребезг контактов сопровождается импульсами автоэлектронного тока, которые приводят к локальному выделению сравнительно большой (12 мкДж) энергии на положительном электроде, что может являться причиной эрозии контактов при длительной работе.

6. Получены экспериментальные зависимости напряжения на герконе и тока управляющей катушки от времени, подтверждающие достоверность результатов моделирования процесса замыкания герконов.

Библиографический список

1. *Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н.* Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе: монография / под ред. д.т.н., профессора В.Н. Шоффы. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. 408 с.

2. *Коротченко В.А., Соловьев В.И., Солотенкова Ж.В.* Динамика размыкания магнитоуправляемых контактов при разрыве электрического тока // Научно-технический журнал «Вестник РГРТУ». Рязань: РГРТУ, 2011. Выпуск 36. С. 61 – 67.

3. *Коротченко В.А., Соловьев В.И., Соколовский Э.И., Солотенкова Ж.В.* Численная самосогласованная модель процесса размыкания герконов при разрыве тока в цепи с активной нагрузкой // Сборник трудов третьей международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые

контакты (герконы) и изделия на их основе». 27-30 сентября 2011 г. под ред. д.т.н. С.М. Карабанова – Рязань: ОАО «РЗМКП», 2011. С. 206 – 215.

4. *Шоффа В.Н.* Влияние начального рабочего зазора, перекрытия и жесткости контактных сердечников на чувствительность и коэффициент возврата герконов // Электротехника. М.: Энергия, 1970. № 7. С. 47 – 49.

5. *Коротченко В.А., Прадед В.В., Солотенкова Ж.В.* Исследование тяговой и механической характеристик магнитоуправляемых контактов // Электроника: межвуз. сб. Рязань: РГРТУ, 2011. С. 42 – 47.

6. *Егоров Н.В., Шешин Е.П.* Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. 704 с.

7. ГОСТ 10160-75. Сплавы прецизионные магнитомягкие. Технические условия.

УДК 621.319.71

Н.Н. Бисярин

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ В ИОННЫХ ЗАТВОРАХ СПЕКТРОМЕТРА ИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ

Представлены результаты компьютерного моделирования конфигурации поля в аналитической ячейке спектрометра ионной подвижности с несколькими типами ионных затворов. Исследовано влияние диаметра аналитической ячейки на распределение электрического поля в затворе. Выявлены особенности влияния конструкции затвора на аналитические характеристики прибора.

Ключевые слова: спектрометр ионной подвижности, ионный затвор, распределение поля.

Введение. Спектрометр ионной подвижности предназначен для определения содержания в атмосфере воздуха сверхмалых концентраций многоатомных молекул. Спектрометр состоит из устройства отбора пробы газа, аналитической ячейки и электронного блока регистрации и обработки сигнала. Аналитическая ячейка содержит ионизатор для ионизации пробы газа, затвор для порционного отбора ионов на анализ, систему дрейфовых электродов с однородным ускоряющим электрическим полем для разделения ионов по типам и коллектор для регистрации по количеству и по времени прилета групп ионов из дрейфового пространства.

Работа спектрометра ионной подвижности базируется на следующем принципе. Порция воздуха, содержащая анализируемые молекулы, устройством отбора пробы подается в ионизатор. Часть ионов пробы газа ионизируется и создается ионное облако (пространственный

заряд ионов) в ограниченном электрическом пространстве. С помощью ионного затвора за короткий промежуток времени (0,2 – 1 мс) ионное облако втягивается в дрейфовое пространство. После впуска порции ионов в дрейфовое пространство затвор снова закрывается. Разные типы ионов под действием электрического поля достигают разных определенных скоростей, то есть группируются по скоростям и далее вследствие сопротивления молекул атмосферы воздуха движутся с равномерными, но разными скоростями. При равных зарядах разные типы ионов движутся в однородном электрическом поле с разными скоростями вследствие различия атомного состава и конфигурации расположения атомов в молекуле. При подлете к коллектору разных групп ионов в разное время в его цепи регистрируется временная зависимость тока с последовательными максимумами. Величины максимумов пропорциональны концентрации ионов в группе, а

время дрейфа позволяет судить о подвижности, а соответственно о конфигурации и типе ионов.

Использование эталонных проб для градуировки прибора позволяет идентифицировать с большой достоверностью широкий круг молекулярных примесей в воздухе в концентрациях ниже предела запахов и ниже норм предельно допустимых концентраций.

Ионный затвор осуществляет отбор ионов из ионизатора на анализ и задает время и разброс по времени старта ионов в дрейфовом пространстве, что напрямую влияет на аналитические характеристики спектрометра. Он расположен между ионным источником и системой дрейфовых электродов и формирует и инжектирует пакет ионов в область дрейфа. Конструкция затвора оказывает существенное влияние на разрешение и чувствительность спектрометра. Основными требованиями к ионному затвору являются выпуск большого количества ионов за время, значительно меньшее времени дрейфа ионов, повторяемость результатов при разных выпусках. Этим требованиям в разной степени могут удовлетворять затворы различных типов [1].

Целью работы является выявление особенностей влияния конструкции ионных затворов разных типов на аналитические характеристики прибора посредством сравнительного анализа распределения поля в аналитической ячейке спектрометра ионной подвижности.

Модель аналитической ячейки. Аналитическая ячейка содержит последовательно расположенные реакционную камеру с ионным источником, ионный затвор, систему дрейфовых электродов, выполненных в виде совокупности механически соединенных друг с другом идентичных колец, образующих дрейфовое пространство с однородным электрическим полем, и детектор ионов.

Управляемый сеточный затвор размещен на входе дрейфового пространства. Ионный источник выполнен в виде источника ионов на основе коронного разряда. Ионы, образованные в ионном источнике под действием электрического поля, дрейфуют к детектору ионов. Величина и распределение поля оказывают определяющее влияние на аналитические характеристики устройства.

В данной работе выполнено компьютерное моделирование поля в аналитической ячейке цилиндрической формы спектрометра ионной подвижности с тремя различными типами ионных затворов. Первый тип: ионный затвор, образованный сеткой и охранным электродом,

расположенным в реакционной камере (рисунок 1,а). Второй тип: затвор Бредбери-Нильсена, представляющий собой два изолированных друг от друга набора параллельных проволочек, расположенных в одной плоскости (рисунок 1,б). Третий тип: двойной сеточный затвор – два параллельных сеточных электрода, расположенных напротив друг друга на расстоянии 2 мм (рисунок 1,в). Введем условные обозначения для затворов: первый тип – *СЭ* (затвор сетка-электрод), второй тип – *БН* (затвор Бредбери-Нильсена), третий тип – *ДС* (затвор двухсеточный). Ионный затвор может находиться в двух состояниях: закрыт и открыт. В закрытом состоянии между электродами затвора приложено запирающее напряжение, препятствующее прохождению ионов. Когда потенциалы электродов выравниваются, затвор открыт. Выбор для моделирования описанных выше типов затворов обусловлен их широким применением в спектрометрах ионной подвижности и обсуждением в научных работах [2–4].

Исходными данными модели являлись геометрия электродов и потенциалы на них. Геометрия модели аналитической ячейки осесимметричная. Разность потенциалов между электродами затвора равнялась запирающей разности потенциалов в закрытом состоянии и составляла несколько вольт в открытом состоянии для учета не идеальности реализованной системы переключения.

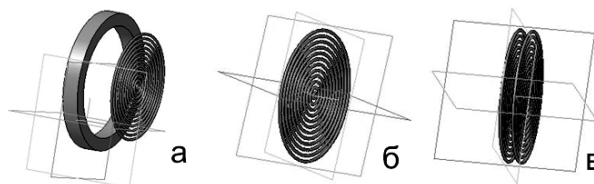


Рисунок 1 – Геометрическая модель: а – ионный затвор, образованный сеточным и охранным электродами (СЭ), б – затвор Бредбери-Нильсена (БН), в – двойной сеточный затвор (ДС)

Результаты и обсуждение. Для затворов трех типов моделировались следующие зависимости: распределение потенциала и напряженности поля вдоль оси аналитической ячейки и в поперечном сечении ионного затвора. Плоскость сечения проведена через геометрический центр затвора. Исследовалось влияние диаметра ячейки дрейфа и ионного затвора на распределение электрического поля.

Рассмотрим отдельно состояния затвора. Особое внимание следует уделить закрытому состоянию, так как в нем прослеживаются основные отличия во влиянии типа затвора на параметры поля.

1. Закрытое состояние

А) Ионный затвор сетка-электрод

Сравнение распределения потенциала в закрытом состоянии проведено для двух диаметров затвора и ячейки: $D_1 = 25$ мм и $D_2 = 50$ мм. Распределение потенциала вдоль оси аналитической ячейки в области ионного затвора при $D_2 = 50$ мм показано на рисунке 2 (линия СЭ). Расстояние по оси абсцисс отсчитывается от вершины острейшего электрода ионного источника на основе коронного разряда.

На графике можно выделить потенциальную яму, занимающую всю ширину затвора, что оказывает влияние на прохождение ионов. Глубина потенциальной ямы увеличивается в 6 раз при уменьшении диаметра в 2 раза. Величина потенциальной ямы составляет 7,4 % для 50 мм и 44,3 % для 25 мм от величины разности потенциалов, приложенной к электродам затвора.

На рисунке 3 (линия СЭ) представлено распределение потенциала в поперечном сечении затвора. Начало координат совмещено с геометрическим центром затвора. В затворе данного типа наблюдается провисание потенциала от стенок к оси трубки дрейфа. Провисание потенциала при уменьшении диаметра затвора и ячейки дрейфа в 2 раза уменьшается на 51,7 %. Форма распределения потенциала сохраняется.

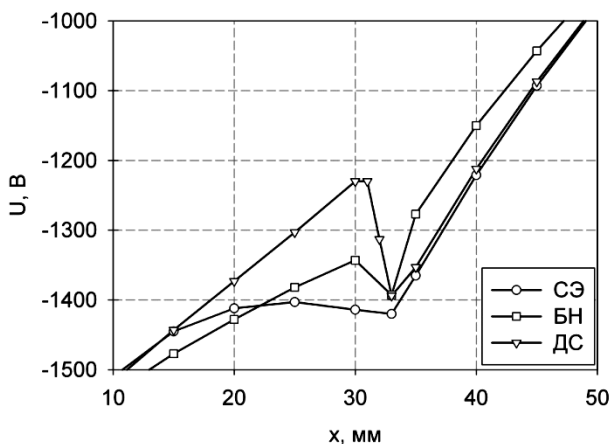


Рисунок 2 – Профиль распределения потенциала вдоль оси аналитической ячейки в области ионного затвора в закрытом состоянии для $D_2 = 50$ мм

Б) Ионный затвор Бредбери-Нильсена

Результаты моделирования показывают, что в системе с затвором БН изменение диаметра конструкции в 2 раза не оказывает влияния на профиль распределения потенциала вдоль оси аналитической ячейки. Сеточная структура определяет периодичное изменение потенциала и напряженности электрического поля в попе-

речном сечении ионного затвора (рисунок 3, линия БН).

В) Двухсеточный ионный затвор

На графике распределения потенциала для данного типа затвора наблюдается четко выраженная потенциальная яма (рисунок 2, линия ДС). Величина потенциальной ямы составляет ~ 70 % от величины разности потенциалов, приложенной к электродам затвора.

В поперечном сечении форма распределения потенциала периодична (рисунок 3, линия ДС). На неё оказывает влияние взаимное расположение нитей сеток. Отклонение потенциала от среднего значения составляет не более 0,35 % для диаметра 25 мм и не более 0,48 % для 50 мм.

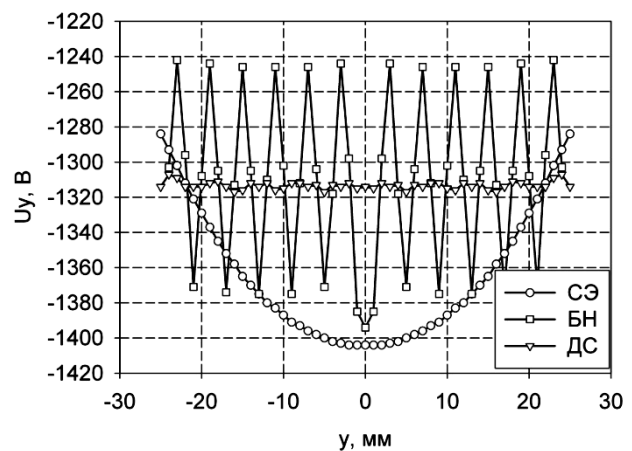


Рисунок 3 – Профиль распределения потенциала в сечении ионного затвора в закрытом состоянии для $D_2 = 50$ мм

2. Открытое состояние

Открытое состояние соответствует беспрепятственному прохождению ионного потока сквозь затвор. В этом состоянии ни конструкция затвора, ни диаметр системы не оказывают влияния на распределение потенциала вдоль оси аналитической ячейки, и оно совпадает для всех конструкций.

В поперечном сечении отклонение потенциала от среднего значения по сечению в открытом состоянии затвора составляет не более 1,52 % (0,87 %), 0,59 % (0,51 %), 0,175 % (0,17 %) для затворов СЭ, БН и ДС соответственно (в скобках указаны значения для диаметра 25 мм), что показывает характер влияния поперечного положения иона при прохождении затвора на аналитические характеристики, в частности на разрешение.

В работе исследованы параметры поля в аналитической ячейке спектрометра ионной подвижности с различными типами ионных затворов в статическом режиме, рассмотрены конечные состояния затвора – открыт и закрыт.

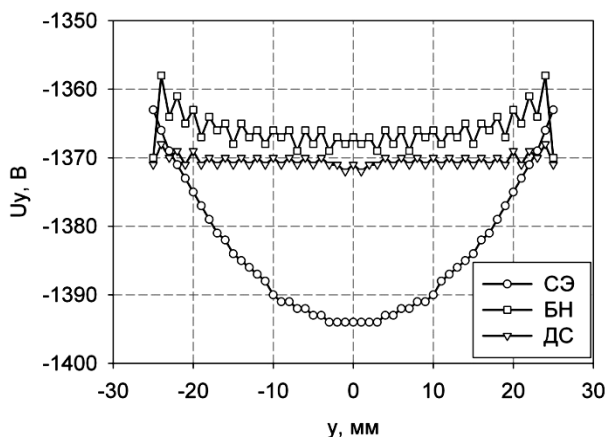


Рисунок 4 – Профиль распределения потенциала в сечении ионного затвора в открытом состоянии для $D_2 = 50$ мм

Сравнительный анализ результатов моделирования распределения потенциала в поперечном сечении ионного затвора показал, что при изменении диаметра затвора СЭ наблюдается изменение величины провисания потенциала при сохранении формы распределения. Для затворов БН и ДС с изменением диаметра затвора в центральной части сечения распределение потенциала сохраняется. Таким образом, можно говорить об отсутствии или слабом влиянии диаметра затворов БН и ДС на распределение поля в его сечении. В то же время, как отмечено в работе [5], использование второй сетки в затворе оказывает существенное влияние на величину ионного тока.

Ввиду указанного выше свойства в области затвора СЭ наблюдается изменение глубины потенциальной ямы в продольном профиле распределения потенциала с изменением диаметра ячейки. В затворе БН из-за сеточной структуры происходит периодическое изменение потенциала и напряженности электрического поля в поперечном сечении ионного затвора. В результате этого возникает зависимость эффективности прохождения ионами затвора от начальной поперечной координаты дрейфа [6].

Заключение. Результаты проведенного моделирования позволяют выявить особенности влияния типа и геометрии ионного затвора на распределение поля в его области с целью повышения аналитических характеристик спектрометра. Анализ результатов моделирования продольного и поперечного профилей распре-

деления потенциала позволил сделать следующие выводы:

- эффективность запирающего ионного потока затвором сетка-электрод определяется его поперечным размером, влияющим на величину потенциальной ямы, в частности глубина потенциальной ямы увеличивается в 6 раз при уменьшении диаметра в 2 раза;

- в двухсеточном ионном затворе наблюдается равномерный профиль распределения потенциала в сечении с погрешностью до 0,35 % для диаметра 25 мм и 0,48 % для диаметра 50 мм. Это обеспечивает равномерный по площади затвора эффективный отбор ионов из пространства ионизатора в дрейфовое пространство;

- в ионных затворах БН и ДС распределение потенциала в поперечном сечении остается неизменным независимо от их диаметра;

- конфигурация поля, создаваемая затворами СЭ и ДС, в силу наличия потенциальной ямы обеспечивает предварительное накопление ионного пакета перед инжекцией в область дрейфа, в отличие от затвора БН, в котором ионный поток отклоняется и нейтрализуется на элементах затвора.

Библиографический список

1. Eiceman G.A., Karpas Z. Ion mobility spectrometry // 2005 by Taylor & Francis Group, LLC.
2. Young D., Douglas K.M., Eiceman G.A., Lake D.A., Johnston M.V. Laser desorption-ionization of polycyclic aromatic hydrocarbons from glass surfaces with ion mobility spectrometry analysis / Analytica Chimica Acta 453 (2002)
3. Davis D.M., Harden C.S., Shoff D.B., Bell S.E., Eiceman G.A., Ewing R.G. Analysis of ion mobility spectra for mixed vapors using Gaussian deconvolution / Analytica Chimica Acta 289 (1994)
4. Бисярин Н.Н. Спектрометр ионной подвижности с односеточным ионным затвором // Сборник трудов науч.-практ. конференции «Инновации в науке, производстве и образовании», 2011.
5. Черняк Е.Я., Бисярин Н.Н. Исследование ионного источника коронного разряда с управляющей сеткой. Вестник РГРТУ №3(37), 2011.
6. Курнин И.В., Самокиш В.А., Краснов Н.В. Оптимальный режим работы затвора Бредбери-Нильсена в ион-дрейфовом спектрометре // Научное приборостроение. 2011. Том 21. №2. С. 34-39.

УДК 537.533.3

**А.А. Трубицын, А.Б. Толстогузов, А.О. Саулебеков, Д.В. Суворов,
Д.Ю. Тарабрин, Ж.Т. Камбарова, П.И. Кукса**
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЛИННОФОКУСНОГО
ОЖЕ-МИКРОАНАЛИЗАТОРА**

Представлен проект оже-микроскопического анализатора, включающего энергоанализатор со встроенной электронной пушкой. Расстояние от анализатора с внешним диаметром 80 мм до исследуемого образца составляет 20 мм. Относительное энергетическое разрешение анализатора допускает регулировку в пределах 0.2-1.3 % при светосиле 6 % от 2π. Пушка обеспечивает диаметр фокального пятна на образце порядка 1 мкм при токе не менее 100 нА.

Ключевые слова: электронная и ионная оптика, энергоанализатор, электронная пушка, оже-спектрометр.

Введение. Совмещение электронных и ионных методов анализа поверхности, в первую очередь, электронной оже-спектроскопии (ЭОС) и масс-спектрометрии вторичных ионов (МСВИ) в одной компактной установке представляется перспективным подходом при разработке технологического и контрольного (диагностического) оборудования для производства современных нано- и микроэлектронных приборов. Базовые требования к диагностическому оборудованию, встраиваемому в технологические линии, следующие: 1) относительное энергетическое разрешение анализатора – не хуже 0.5 %; 2) диаметр пучка зондирующих электронов (FWHM) – порядка 1 мкм и менее; 3) предел обнаружения примесей – не хуже 10^{19} ат.см⁻³. Дополнительные требования к оже-микроскопическому анализатору – малые габаритные размеры (размещение на фланце CF 100) и невысокая стоимость в несколько раз ниже стоимости основного технологического оборудования. Масс-спектрометрия вторичных ионов более чувствительный метод, чем электронная оже-спектроскопия, однако в режиме динамичного послойного анализа МСВИ разрушает образец за счет интенсивной ионной бомбардировки поверхности. Совмещение в одном встраиваемом аналитическом модуле двух методов – ЭОС и МСВИ, позволяет обеспечить быстрый неразрушающий элементный контроль поверхности методом ЭОС с приемлемым уровнем чувствительности и, в случае необходимости, более чувствительный (до уровня 10^{15} – 10^{16} ат.см⁻³) послойный анализ приповерхностных слоев

методом МСВИ. Для совмещения этих методов в одной камере нужны аналитические приборы (анализаторы), позволяющие работать с большими расстояниями «образец-анализатор». Решение такой задачи выдвигает жесткие требования к их геометрии и взаиморасположению (рисунок 1).

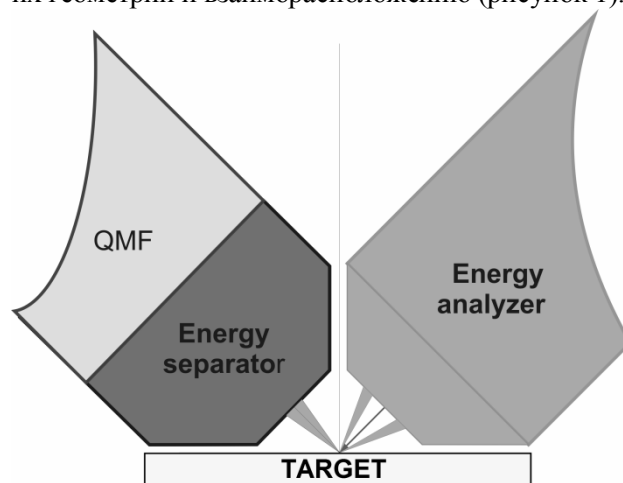


Рисунок 1 – Схема пространственного совмещения методов масс-спектрометрии вторичных ионов и электронной оже-спектроскопии: QMF – квадрупольный фильтр масс, Energy separator – сепаратор вторичных ионов по энергиям, Energy analyzer – энергетический анализатор вторичных электронов с коаксиально встроенной электронной пушкой, Target – исследуемый образец

Основное ограничение здесь следующее – расстояние от образца до края анализатора (и энергосепаратора), которое условно можно назвать фокусным расстоянием, должно быть не менее 20 мм при внешнем диаметре анализатора и сепаратора 80 мм, что позволяет разместить каж-

дое из устройств на фланцах CF 100. При этом ионная пушка размещается таким образом, что ее луч ориентирован по отношению к исследуемому образцу под некоторым углом, подобно энергетическому анализатору и сепаратору на рисунке 1. Поскольку фокус анализатора и коаксиально встроенной в него электронной пушки при проведении экспериментов совмещаются на поверхности образца, то пушка также предполагается длиннофокусной.

Цель работы – проектирование встраиваемого оборудования для метода ЭОС с учетом отмеченных выше ограничений.

Разработка электронно-оптической схемы энергоанализатора. Для оже-спектроскопии поверхности как одного из наиболее эффективных физических методов анализа in-situ процессов формирования микро- и наноструктур наиболее пригодными оказываются аксиально-симметричные энергоанализаторы, вследствие присущей им высокой светосилы (чувствительности) и разрешающей способности [1].

Классический зеркальный цилиндрический анализатор (ЦЗА) [2] принципиально не может обеспечить длинный фокус.

В последние десятилетия было предложено несколько новых конструкций аксиально-симметричных энергоанализаторов, альтернативных ЦЗА.

Квазиконический энергоанализатор [3], развиваемый усилиями российских ученых, несмотря на ряд его несомненных преимуществ (на порядок лучше энергетическое разрешение, чем у ЦЗА) имеет совсем малое расстояние «образец-анализатор» - не более 10 мм, поэтому в технологических установках применение его ограничено.

Разрешить проблему возможно на базе гексапольно-цилиндрических полей (ГЦП), нашедших свое последовательное исследование в работах казахстанских ученых [4, 5]. Гексапольно-цилиндрическое поле математически выражается следующим образом:

$$U(r, z) = \mu \ln r + \gamma U_h(r, z),$$

где

$$U_h(r, z) = \frac{1}{2} \left[\ln r \left[z^2 - \frac{1}{2} r^2 - \frac{1}{2} \right] + \frac{1}{2} r^2 - \frac{1}{2} \right] -$$

круговой гексаполь. Здесь r и z – цилиндрические координаты, μ – коэффициент, задающий весовой вклад цилиндрического поля $\ln r$, γ – весовая составляющая кругового гексаполя.

Электронно-оптическая схема гексапольно-цилиндрического энергоанализатора представлена на рисунке 2, а в таблице – его

геометрические и расчетные физические параметры. На рисунке 2 и в таблице использованы следующие обозначения: $r_0=l$ – радиус внутреннего заземленного цилиндра;

$$P_0^2 = \frac{E}{qU_0} \sin^2 \alpha_0 - \text{параметр отражения (приведенная энергия),}$$

связывающий геометрические и энергетические параметры зеркала; q и E – заряд и кинетическая энергия частицы, U_0 – потенциал внешнего электрода, α_0 – начальный угол, относительно которого осуществляется фокусировка второго порядка, ρ_m – точка перегиба траектории; $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ – проекция траектории в бесполево пространство на ось r ; l – проекция траектории на ось симметрии z от источника A до его изображения B ;

$$D = \frac{\partial l}{\partial W} - \text{линейная}$$

$$\text{дисперсия, } A_{III} = \frac{1}{3!} \frac{d^3 l}{d\alpha^3} - \text{кубическая угловая}$$

$$\text{абберация, } \delta = \frac{D}{A_{III}(\Delta\alpha)^3} - \text{удельная дисперсия}$$

по энергии.

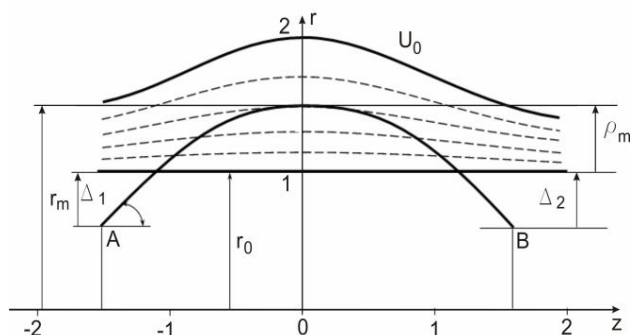


Рисунок 2 – Электронно-оптическая схема энергоанализатора с ГЦП при $\mu = 2, \gamma = 1$

Электронно-оптические параметры анализатора

P_0	α_0 (град)	ρ_m	Δ	l	D	A_{III}	δ
0.1	30.1650	0.0050	0.0100	0.051	0.0346	-0.1579	27.95
0.5	33.9220	0.1305	0.2640	1.192	0.8487	-2.8093	53.12
0.92	43.5506	0.4405	0.7800	3.027	2.3435	-0.4525	400.35

Анализ данных таблицы показывает, что в таких анализаторах возможна угловая фокусировка второго порядка со значением

центрального угла в диапазоне от 30° до 45° . При этом имеются варианты с малой величиной aberrаций A_{III} , что позволяет анализировать широкие пучки и тем самым обеспечивать режим высокой чувствительности. Близкой к оптимальной является схема анализатора с $P_0=0.92$, в которой удельная дисперсия равна $\delta=400$, что примерно в 6 раз превышает удельную дисперсию цилиндрического зеркального анализатора, имеющего для лучшей схемы фокусировки «ось-ось» $\delta=65.5$. Физическая величина «удельная дисперсия» является отражением сущности такого важного потребительского параметра энергоанализатора, как энергетическое разрешение: чем она выше, тем меньше (лучше) разрешение. Таким образом, гексапольно-цилиндрические поля по своим электронно-оптическим свойствам могут стать базой построения анализаторов с уникальными параметрами.

Но недостаток этих полей – сложная (дорогая в изготовлении) система полеобразующих электродов.

Тем не менее, можно сделать вывод о принципиальной возможности создания длиннофокусных энергоанализаторов на базе неоднородных по оси симметрии электрических полей для удовлетворения требований поставленной задачи.

При этом общий подход к проектированию таких систем основан на применении непараксиальных численных методик, обеспечивающих предельно высокий уровень точности прогнозируемых параметров [6].

Наиболее технологичными в изготовлении являются цилиндрические, кольцевые и конические электроды в отличие от электродов с криволинейным сечением. Очевидно, что простые и дешевые способы создания аксиально-симметричного электростатического поля осуществимы при использовании именно таких электродов, а управляемая неоднородность поля вдоль оси симметрии z может быть сформирована, например, размещением в пространстве между внутренним и внешним цилиндрическими электродами дополнительного кольцевого или конического электрода. На рисунке 3 представлена аксиально-симметричная конструкция описываемого типа и картина эквипотенциальных линий в ней.

Траекторный анализ конструкции и анализ ее фокусирующих свойств [7] позволил сделать заключение о возможности обеспечения требуемого фокусного расстояния 20 мм при внешнем диаметре 80 мм (см. рисунок 4). Указанная величина фокусного расстояния

определяется центральным углом фокусировки второго порядка, равны $\alpha_0=20^\circ$, и диапазоном входных углов $\alpha=\alpha_0\pm 15^\circ$. Второй порядок угловой фокусировки и рассчитанная величина центрального угла α_0 , в свою очередь, обеспечиваются 32° наклоном образующей конусообразного электрода 3 (см. рисунок 3) по отношению к оси z .

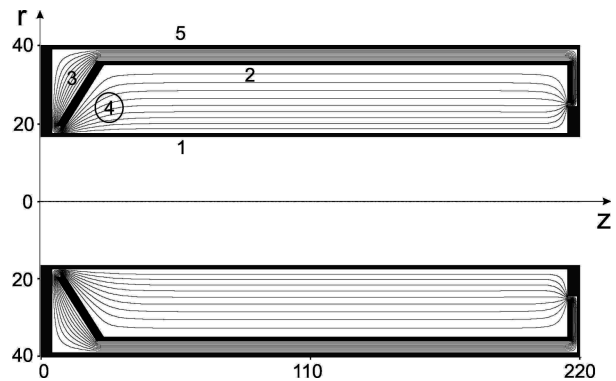


Рисунок 3 – Меридиональное сечение конструкции типа цилиндрического конденсатора с неоднородным по z полем: 1 – внутренний заземленный цилиндрический электрод, 2 – внешний цилиндрический электрод с потенциалом 1 В, 3 – конический электрод с потенциалом 1 В, создающий неоднородность поля; 4 – область неоднородности поля, 5 – магнитный экран

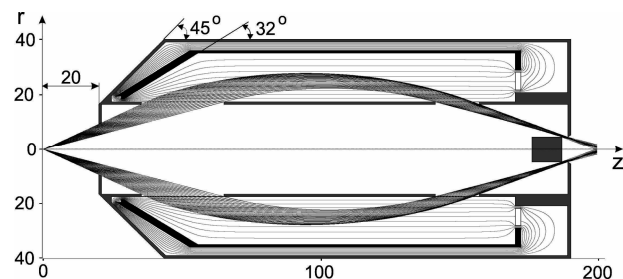


Рисунок 4 – Электронно-оптическая схема цилиндрического зеркала с дополнительным коническим электродом, обеспечивающим угловую фокусировку потока вблизи угла $\alpha_0=20^\circ$

Тип фокусировки – «ось-кольцо». Использование такого типа фокусировки позволяет обеспечить элементарно простой способ регулировки энергетического разрешения изменением ширины выходной кольцеобразной диафрагмы за счет перемещения вдоль оси z внешней (плоскость с отверстием) и/или внутренней (диск) ограничивающих апертур. В области вылета электронов из области поля в пространстве между цилиндрами размещается корректирующее кольцо с регулируемым потенциалом, используемое для подстройки положения фокуса. Места пролета электронов сквозь поверхность внутреннего цилиндра в реальной

конструкции затягиваются металлической мелкоструктурной сеткой с большим коэффициентом прозрачности. Угол наклона конусообразной части магнитного экрана составляет 45° , что позволяет организовать схему комбинированных измерений (рисунок 4).

Для совокупной оценки качества энергоанализатора и его потребительских параметров служит функция пропускания по энергиям – аппаратная функция. На рисунке 5 представлена аппаратная функция разработанного устройства, из анализа которой следует, что при светосиле $\Omega/2\pi = (\cos 15^\circ - \cos 25^\circ) \cdot 100\% = 6\%$ обеспечивается относительное энергетическое разрешение $R = \Delta E/E_0 \cdot 100\% = 1.3\%$, где ΔE – полная ширина аппаратной функции на полувысоте от ее максимума, E_0 – энергия настройки анализатора, соответствующая максимуму функции. Данные расчетные параметры соответствуют оптимальному случаю. Снижение (улучшение) разрешения анализатора в разумных пределах (вплоть до 0.2 %) возможно при уменьшении ширины выходной диафрагмы, что, однако, сопровождается естественным уменьшением светосилы.

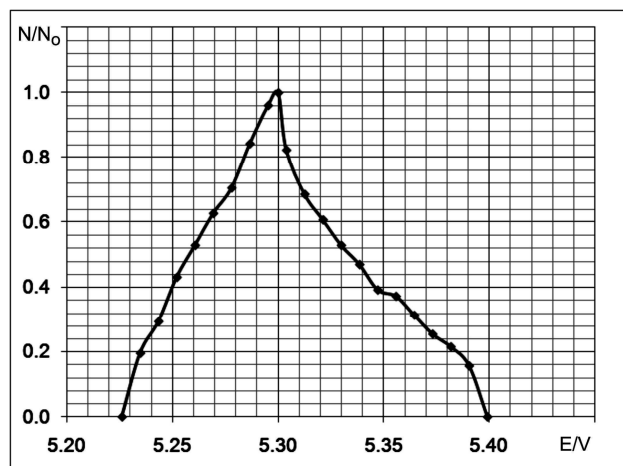


Рисунок 5 – Аппаратная функция анализатора:
 N_0 – число влетевших в анализатор частиц,
 N – число частиц, достигших коллектора,
 E – начальная энергия частиц,
 V – потенциал внешнего цилиндра

Разработка электронно-оптической схемы электронной пушки. Современные электронные технологии требуют локального анализа поверхности, поэтому размеры фокального пятна пушки не должны превышать 1 мкм при энергии электронов порядка 5 кэВ. При этом ток пушки на выходе для качественного проведения оже-анализа не может быть меньше 10 нА. В соответствии с поставленной в работе задачей требуется электронная пушка с фокусным расстоянием, значительно превышающим аналогичный параметр

стандартно используемых устройств. С учетом малых габаритов встраиваемой в анализатор пушки все выше сказанное подразумевает поиск оригинальных, нетрадиционных решений при разработке ее конструкции.

Задача электронной пушки, которая является по своей сути электронным прожектором, состоит в ускорении эмитированных катодом электронов и переносе изображения катода на мишень.

Традиционно электронные прожекторы выполняются в виде последовательности катодно-модуляторного узла, нескольких линзовых систем ускорения и фокусировки и при необходимости электронно-оптической схемы развертки электронного луча в растр на поверхности мишени.

Катодно-модуляторный узел как короткофокусная иммерсионная линза обеспечивает формирование кроссовера с некоторым диаметром. С точки зрения токопрохождения практичнее формировать кроссовер, собирая электроны как можно с большей поверхности катода, но в узком телесном угле, а не наоборот. С этой целью на модулятор подается небольшой положительный, а не отрицательный относительно катода потенциал.

В месте кроссовера располагается ускоряющий электрод, в котором выполняется диафрагма с небольшим диаметром. Эта диафрагма предназначена для уменьшения хроматических аберраций.

В соответствии с теоремой Гельмгольца-Лагранжа величина диаметра кроссовера прямо пропорциональна энергии электронов в прикатодной области. Эта энергия определяется начальной энергией эмитированных электронов и потенциалом ускоряющего электрода. Поэтому целесообразно снижать этот потенциал до разумного значения, а не использовать сразу максимально возможную его величину (напряжение ускорения пушки), как в большинстве известных моделей. Практическим нижним пределом потенциала может считаться величина в 500 В. При дальнейшем снижении начинают сказываться внешние магнитные поля и другие паразитные эффекты.

Кроссовер потока может рассматриваться как виртуальный источник с диаметром d мкм. Уменьшив далее этот диаметр в d раз двумя или тремя линзами (одна-две уменьшающие короткофокусные и последняя ускоряющая длиннофокусная, переносящая изображение на мишень), можно получить 1 мкм на поверхности мишени. На каждом этапе «лишние» электроны обрезаются диафрагмами, чтобы угловой

разброс не был слишком большим, который вследствие неустранимости сферических аберраций является причиной конечности размеров изображений.

В качестве линз переноса и уменьшения изображения пригодны и используются хорошо изученные трехэлектродные одиночные линзы. Характерной особенностью одиночной линзы является равенство потенциалов крайних электродов, вследствие чего при прохождении сквозь одиночную линзу энергия электронов не меняется. Оптические параметры одиночной линзы сильно зависят от отношения потенциалов внутреннего (среднего) и наружных (крайних) электродов. Во-первых, чем больше это *отношение* отличается от единицы, тем «сильнее» линза, т.е. выше степень уменьшения изображения. Во-вторых, при одинаковой по *абсолютной* величине разности потенциалов крайних и среднего электродов линза получается более сильной, если потенциал среднего электрода меньше потенциалов крайних (рисунок 6, а), а не наоборот (рисунок 6, б). При этом линза обладает меньшими аберрациями, т.к. в этом случае собирающая область лежит вблизи средней плоскости линзы и, следовательно, внутри линзы электронный пучок имеет наименьший диаметр. Поэтому логично заземлить средний электрод, а на крайние электроды подать потенциал ускоряющего электрода. Такое соотношение потенциалов выгодно еще по одной причине: для питания линзы не требуется дополнительный источник напряжения (при заданной энергии первоначально ускоренных термоэлектронов, например 500 эВ).

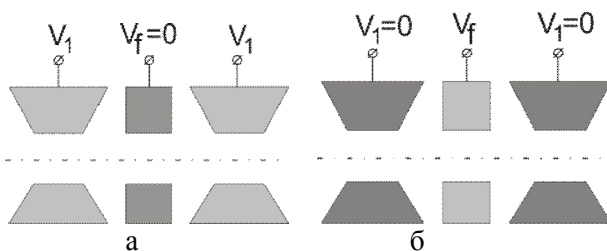


Рисунок 6 – Одиночные линзы переноса изображения

Несколько таких последовательно расположенных линз способны уменьшить диаметр пучка (изображения) до нужной величины, например до 1 мкм, и не превысить требуемую суммарную длину всей пушки.

Выходная длиннофокусная линза может быть построена аналогичным образом. За этой линзой в таком случае размещается выходной заземленный электрод с потенциалом $V_{ac}=0$

(катод находится под отрицательным потенциалом, равным, например -5 кВ относительно заземленной мишени), задающий полное ускорение электронов в пушке, например, $E=5$ кэВ (рисунок 7, а). Однако предварительные расчеты показывают, что конструкция такой (одиночной) линзы может быть упрощена за счет исключения среднего заземленного электрода. В этом случае роль выходной линзы начинает играть новая трехэлектродная линза, последним электродом в которой является упомянутый выше выходной заземленный электрод (рисунок 7, б). При этом для гибкости управления потенциал V_2 промежуточного электрода новой линзы может и должен допускать плавную регулировку. Предварительные численные исследования линзы показывают ее уникальные электронно-оптические свойства, в том числе способность переносить изображения без заметного увеличения на большие расстояния (длиннофокусность).

При построении существующих аналогов все выше перечисленные принципы не учитывались, что и является причиной отсутствия на рынке hi-tech электронной пушки с более или менее приемлемыми для актуальной оже-спектроскопии параметрами.

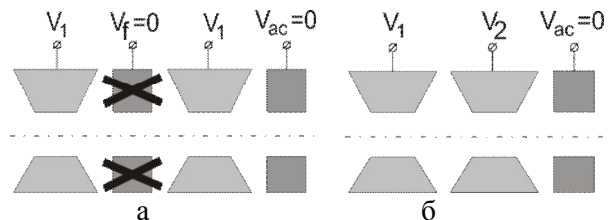


Рисунок 7 – Выходная ускоряющая линза

Результаты моделирования позволили сделать вывод о реальной достижимости диаметра минимального сечения электронного потока порядка 1 мкм на поверхности мишени, размещенной в фокусе энергоанализатора. В качестве катода при моделировании принималась в расчет конструкция стандартного LaB₆ катода модели ES-423. Поскольку катод ES-423 с диаметром площади эмиссии 16 мкм обеспечивает плотность тока эмиссии 5 А/см², а значит полный эмиссионный ток около 10⁻⁵ А, то с учетом потерь эмитированных электронов на стенках апертур делается заключение о том, что ток на выходе пушки может достигать величины порядка 10⁻⁷ А=100 нА. Электронно-оптическая схема таким образом разработанной пушки представлена на рисунке 8.

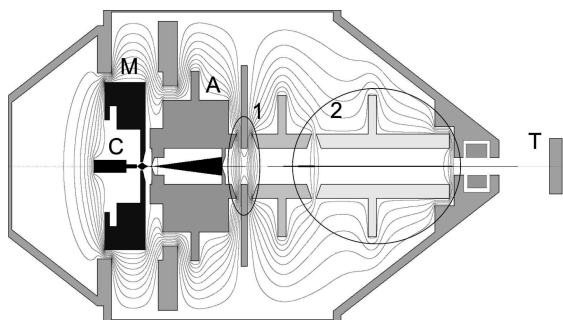


Рисунок 8 – Электронно-оптическая схема электронной пушки: С – катод, М – модулятор, А – ускоряющий электрод, Т – исследуемая мишень, 1 – одиночная короткофокусная линза, 2 – выходная длиннофокусная линза

Разработка конструкции длиннофокусного оже-микроанализатора. По результатам моделирования энергоанализатора и встраиваемой электронной пушки произведена разработка конструкторской документации на элементы длиннофокусного оже-микроанализатора в среде CAD SolidWorks [8] (рисунок 9).

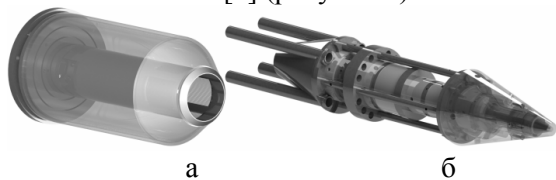


Рисунок 9 – 3D-модели: а- энергоанализатора; б- электронной пушки

Энергоанализатор со встроенной электронной пушкой размещается на фланце CF 100 (рисунок 10) и допускает плавное изменение ширины выходной диафрагмы без нарушения вакуумных условий. В качестве коллектора электронов применяется микроканальный вторично-электронный умножитель.

Предельное отклонение для линейных размеров при изготовлении элементов оже-микроанализатора – 50 мкм. Допуск на concentricity не хуже 10 мкм.

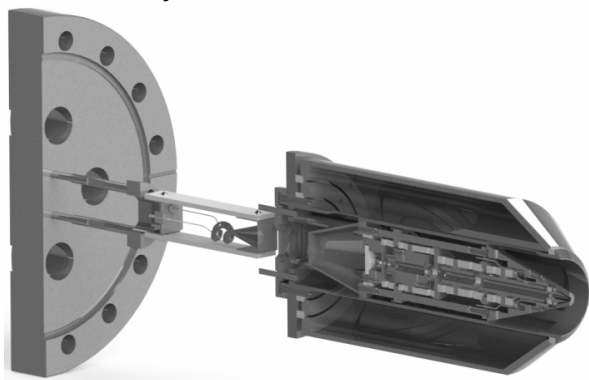


Рисунок 10 – Оже-микроанализатор в сборке

Заключение. Для локального анализа поверхности нами спроектирован длиннофокусный оже-микроанализатор, включающий

энергоанализатор со встроенной электронной пушкой. Расстояние от края анализатора до поверхности исследуемого образца составляет 20 мм при внешнем диаметре анализатора 80 мм, что позволяет разместить весь оже-микроанализатор на фланце CF 100. Большое рабочее расстояние «анализатор-образец» дает возможность пространственного совмещения оже-микроанализатора с другими приборами для анализа поверхности, в первую очередь масс-спектрометром вторичных ионов. Энергоанализатор допускает плавное регулирование разрешения в пределах 0.2-1.3 % при светосиле порядка 6 %. Встроенная в анализатор пушка при токе не менее 100 нА создает электронный пучок с диаметром фокального пятна порядка 1 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ГК № 14.740.11.0820 и ГК № 14.B37.21.0895.

Библиографический список

1. An Auger Electron Analyzer System for In Situ MBE Growth Monitoring / Monday, October 31, 2011, 3:40 pm, Room 106 / Session: In Situ Characterization of Solids: Film Growth, Defects, and Interfaces / Presenter: W.L. Calley, Georgia Institute of Technology / Authors: W.L. Calley, P.G. Staib, J.E. Lowder, J.D. Greenlee, M.W. Moseley, W.E. Henderson, W.A. Doolittle.
2. Заиквара В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С. Фокусирующие свойства электростатического зеркала с цилиндрическим полем // ЖТФ.- 1966.- Т. 36, вып.1.- С. 132-138.
3. K. Siegbahn et al. Nucl. Inst.And Meth.In Phys. Res. A 384 (1997), 563-57.
4. Ашимбаева Б.У., Саулебеков А.О., Чокин К.Ш. Фокусирующие свойства электростатического зеркала с гексапольно-цилиндрическим полем // Прикладная физика. – 2008.- №2. – С.74-78.
5. Саулебеков А.О., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т. Кесіктік электродтарга ие болатын гексапольдік-циліндрлік анализатордын электронды-оптикалык сулбасын модельдеу (Моделирование электронно-оптической схемы гексапольно-цилиндрического анализатора с торцевыми электродами) // Вестник Карагандинского университета. Серия ФИЗИКА. – Караганда, Издательство КарГУ им. Е.А. Букетова.- №1 (61), 2011, С. 73-77.
6. Трубицын А.А. Программа «Фокус» моделирования аксиально-симметричных электронно-оптических систем: алгоритмы и характеристики // Прикладная физика. №2. 2008, С. 56-62.
7. Трубицын А.А. Корреляционный метод поиска угловой фокусировки высших порядков // ЖТФ.- 2001.- Т.71, вып.5.- С. 126-127.
8. www.solidworks.com.

