

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.386.22

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА
В МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКЕ****М. В. Блудов**, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0009-0004-1811-0344, e-mail: bludovmaksim@rambler.ru

Е. Ю. Грачев, к.т.н., доцент кафедры ПЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-7813-7769, e-mail: monopol_rus@mail.ru

Е. А. Козлов, к.т.н., доцент кафедры ПЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-2038-6732, e-mail: ewg.kozlov2015@yandex.ru

Э. Г. Кочергин, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0009-0007-7436-2708, e-mail: kochergin_aduard@mail.ru

А. А. Сережин, к.т.н., доцент кафедры ПЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-8134-8970, e-mail: andrei-serezhin@yandex.ru

А. А. Трубицын, д.ф.-м.н., профессор кафедры ПЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-9337-8947, e-mail: assur@bk.ru

*Проведено моделирование электронно-оптической схемы микрофокусной рентгеновской трубки прострельного типа с электромагнитной фокусировкой. Система электромагнитной фокусировки включает в себя две линзы: электростатическую катодную и магнитную объектную. В качестве базового средства моделирования использовано авторское программное приложение ФОКУС. **Целью работы** являются исследование и определение режимов работы линз, обеспечивающих микронный диаметр фокального пятна электронного потока на аноде трубки в режиме полного токопрохождения при ускоряющем потенциале 100 кВ.*

Ключевые слова: рентгеновская трубка, катодно-модуляторный узел, электронная линза, траекторный анализ.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-115-128**Введение**

Применение микрофокусных трубок, в отличие от макрофокусных, в рентгеновских установках обеспечивает ряд неоспоримых преимуществ – компактность оборудования, снижение радиационной нагрузки на персонал и на смежные области исследуемого объекта, возможность локальных исследований, возможность получения увеличенных изображений, более высокая резкость изображений при отсутствии паразитных теней [1].

Преимущества микрофокусных рентгеновских трубок могут быть максимально реализованы при использовании анодов прострельного типа, в отличие от анодов отражательного типа, за счет размещения объекта исследований на малом расстоянии (доли мм – единицы мм) от источника излучения.

Качество рентгеновских изображений, получаемых с помощью микрофокусных трубок, напрямую зависит от качества фокусировки электронного потока, определяющего в конечном счете диаметр фокального пятна, являющегося областью генерации рентгеновских лучей.

Формирование фокального пятна в современных трубках обеспечивается последовательно размещенными электрической и магнитной фокусирующими системами. Электростатиче-

ская катодная линза, в технических приложениях называемая катодно-модуляторным (КМУ) или катодно-сеточным узлом, служит для ускорения электронов и создания промежуточного фокуса. При построении магнитных фокусирующих систем используют либо одну объектную линзу, либо последовательность конденсорной и объектной линз.

Широко и традиционно практикуемый способ получения фокального пятна маленьких размеров в эмиссионных системах заключается в использовании промежуточных и выходных диафрагм, ограничивающих угловые и геометрические размеры сфокусированного электронного потока [2]. Однако такой способ минимизации размеров пятна приводит к снижению тока электронов и, как следствие, мощности трубки. В нашей работе исследуется возможность получения фокального пятна микронных размеров без ограничения тока эмиссии и определяются необходимые параметры фокусирующей системы.

Ускоряющее напряжение на аноде определяет максимальную энергию рентгеновских квантов, а значит, проникающую способность излучения. Для получения качественных теневых рентгеновских изображений в медицине и биологии достаточно ускоряющего напряжения порядка 10 кВ, в областях техники, где используются различные пластические материалы, тонкие слои полупроводников и металлов, требуется порядка 100 кВ, для анализа толстых слоев стали необходимо порядка 300 кВ. Разрабатываемая трубка предназначена для диагностики твердотельных объектов электроники и микроэлектроники, поэтому устанавливается величина ускоряющего напряжения $U_a = 100$ кВ.

В микрофокусных трубках ток эмиссии используемых прямонакальных катодов I_e может составлять несколько мА, и поэтому микропервеанс $\frac{I_e}{U_a^{3/2}} 10^6$ не превосходит величины $10^{-4} - 10^{-3}$ А/В^{3/2}. Влиянием пространственного заряда можно пренебречь, если микропервеанс не превышает 10^{-2} А/В^{3/2} [3], что позволяет моделировать поведение заряженных частиц в исследуемом приборе без учета пространственного заряда.

Методы исследования

Для исследования электронно-оптических свойств микрофокусной трубки использовалось авторское компьютерное приложение ФОКУС [4]. Приложение ФОКУС представляет собой объединение программных модулей, каждый из которых выполняет самостоятельную функцию. Модуль Design служит для ввода и модификации конструкции электронно-оптической системы (ЭОС) в графическом режиме, в модуле Field_E производится расчет электростатического поля методом граничных элементов [5, 6], а в модуле Field_M – расчет магнитного поля набора соленоидов произвольной пространственной ориентации методом токовых элементов [7]; модуль Path_S предназначен для траекторного анализа ЭОС с электростатическими полями, модуль Path_D – для траекторного анализа динамических ЭОС, в том числе с наложенным магнитным полем множества соленоидов на электрическое поле ЭОС. В приложении ФОКУС реализованы авторские методы численного поиска условий угловой [8, 9], геометрической [10] и времяпролетной [11] фокусировки высоких порядков.

Краткое описание электронно-оптической схемы трубки

Электронно-оптическая схема трубки, предлагаемая к исследованию, предельно проста – первичное формирование и ускорение потока электронов осуществляются в пространстве между КМУ и плоским анодом. В центре анода выполнено отверстие для выпуска ускоренных электронов в направлении мишени прострельного типа, размещаемой на противоположном конце пролетной трубки. Область пролетной трубки используется для фокусировки пучка с помощью системы магнитных линз.

Численный эксперимент

Проектирование катодно-модуляторного узла. Требования к габаритам трубки, ее техническим параметрам и условиям эксплуатации явились основными аргументами в пользу

выбора в качестве источника электронов термоэмиссионного катода марки ES-423E на основе гексаборида лантана (LaB_6) производства Kimball Physics Inc. Данный катод, внешний вид которого представлен на рисунке 1, обеспечивает плотность тока эмиссии $20 - 30 \text{ A/cm}^2$ при оптимальной рабочей температуре ($1700 - 1900 \text{ K}$). В ходе моделирования использовалась конфигурация катода, имеющая угол конуса 90° с диаметром эмитирующей площадки $d_c = 100 \text{ мкм}$. Соображения выбора диаметра такой величины будут представлены в разделе анализа результатов моделирования.

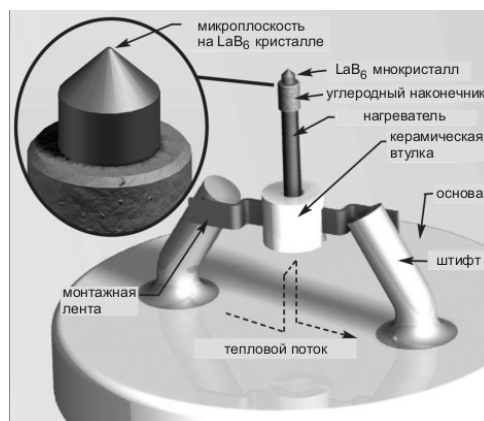


Рисунок 1 – Катод марки ES-423E на основе гексаборида лантана
Figure 1 – ES-423E cathode based on lanthanum hexaboride

Толщина пластины модулятора (электрода Венельта W), в котором выполняется круговая апертура для выпуска электронов к аноду (рисунок 2, *а*), выбирается исходя из габаритов КМУ и соображений механической прочности конструкции. Габариты КМУ в основном определяются размерами катода C и расстояниями между электродами, обеспечивающими электрическую прочность трубки. В нашем случае толщина электрода Венельта W выбрана равной $w = 2 \text{ мм}$, при этом внешняя плоскость электрода, обращенная к аноду, имеет скос в направлении оси до толщины 1 мм с целью некоторого «скругления» кромки отверстия во избежание развития электрических пробоев в этой области (рисунок 2, *а*). Диаметр апертуры $D = 2 \text{ мм}$ выбирался из условия исключения электрического пробоя между катодом диаметром $d_s = 0,3 \text{ мм}$ и электродом Венельта W , напряжение между которыми может достигать 1 кВ по порядку величины. Глубина h посадки катода C от фаски электрода Венельта W определяется из анализа вычисленной в процессе численного моделирования зависимости напряжения $U_{wc} = U_{lock}$ запирающего тока катода от h (рисунок 2, *б*, кривая 1).

Напряжение запирающего является важной характеристикой КМУ, поскольку управление током с катода осуществляется в небольшом диапазоне напряжений между катодом и электродом Венельта U_{cw} , верхний предел которого как раз и есть U_{lock} . С учетом уровня стабильности выходных напряжений современных высоковольтных источников питания напряжение между катодом и электродом Венельта ограничивают снизу напряжением около 100 В . Чем выше это напряжение, которое, однако, не может превышать напряжения пробоя, тем стабильнее окажутся параметры источника электронов. В удовлетворение этих требований из анализа зависимости на рисунке 2, *б* выбрана величина напряжения $U_{lock} = -626 \text{ В}$, соответствующая глубине посадки катода $h = 0,4 \text{ мм}$. Дополнительные соображения выбора значений этих величин лежат в практической плоскости и являются результатом учета огромного опыта разработчиков электронных микроскопов [12]. При разработке электронных пушек для электронных микроскопов было установлено, что для катодов низкой яркости, таких как вольфрамовые шпильки, оптимальным является отношение $D/h = 1 \div 2$. Для катодов высокой яркости требуется более сильное электрическое поле, снижающее пространственный заряд у эмитирующей поверхности катода, и поэтому необходима большая величина $D/h = 5 \div 7,5$. Катоды на основе гексаборида лантана относятся к катодам с одной из самых высоких эмиссионных способностей, поэтому выбранная в работе величина отношения $D/h = 2/0,4 = 5$ учитывает указанный факт.

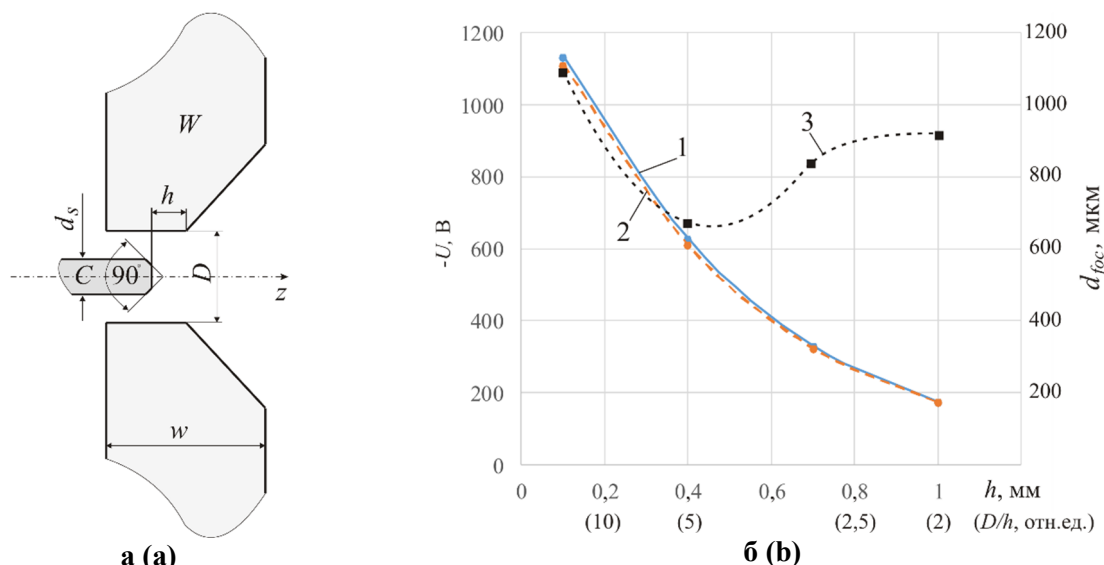


Рисунок 2 – Конструктивные особенности (а) и характеристики (б) КМУ разрабатываемой микрофокусной трубки: C – катод, W – электрод Венельта;

зависимости 1 – напряжения запирающего, 2 – напряжения, при котором эмитирует вся микроплоскость монокристалла LaB_6 , 3 – диаметра фокального пятна от глубины посадки h при $D = 2$ мм

Figure 2 – Design features (a) and characteristics (b) of CMU of the microfocus tube being developed: C – cathode, W – Wehnelt electrode; dependences 1 – blocking voltage, 2 – voltage at which the entire microflat of the LaB_6 single crystal emits, 3 – focal spot diameter on seating depth h at $D = 2$ mm

Одна из функций КМУ заключается в исключении электронного потока, эмитированного боковой поверхностью термокатода, из основного потока, направляемого на анод. В противном случае происходит неконтролируемое уширение фокального пятна на аноде вследствие сферических aberrаций. Область эмиссии электронов, например, лишь с торцевой микроплоскости кристалла LaB_6 фиксируется нулевой (по отношению к потенциалу катода) эквипотенциалью, положение которой в пространстве определяется потенциалом электрода Венельта. Заметим, что понятие «нулевая эквипотенциаль» является условным. Строго нулевая эквипотенциаль абсолютно точно повторяет конфигурацию катода. Поскольку электроны испускаются в пространство с тепловыми энергиями, чуть большими нуля, то сортировать электроны будет эквипотенциаль, отличающаяся от потенциала катода на величину этой энергии (в электронвольтах); именно она в рассуждениях принимается за нулевую. Примагнивание нулевой эквипотенциали к поверхности катода задает эффективную круговую область эмиссии: на электроны, подлетающие к нулевой эквипотенциали, действует тормозящая сила, направленная к оси, поэтому часть из них возвращается на катод, в то время как другая часть, испущенная из приторцевой области катода, ускоряется и направляется к аноду (рисунок 3). На рисунке 3, а представлены результаты траекторного анализа КМУ (электрод Венельта не показан) при напряжении между электродом Венельта и катодом, равным $U_{wc} = -520$ В, и ускоряющем напряжении 100 кВ. При таких напряжениях не все электроны, эмитированные с боковой поверхности катода, исключаются из потока на анод. На рисунке 3, б демонстрируется сечение оптимальной конфигурации нулевой эквипотенциали, когда электроны, испущенные только с торца катода, попадают далее на анод. Напряжение между катодом и электродом Венельта в этом случае составляет $U_{wc} = -610$ В. Для других значений величины посадки h напряжение, при котором наблюдается эмиссия со всей торцевой микроплоскости катода, носит характер зависимости, продемонстрированной на рисунке 2, б, кривая 2.

Дальнейшее увеличение величины отрицательного напряжения U_{wc} прогнозируемо приведет к уменьшению эффективного диаметра d_{ce} пятна эмиссии на торце катода (рисунок 3, в). Полная зависимость d_{ce} диаметра области эмиссии демонстрируется на рисунке 3, г.

Наличие такой зависимости делает возможным регулировку диаметра фокального электронного пятна на аноде трубки. Однако следует учитывать, что снижение диаметра области эмиссии приводит к уменьшению анодного тока и интенсивности рентгеновского излучения, поэтому такое снижение возможно лишь в разумных пределах.

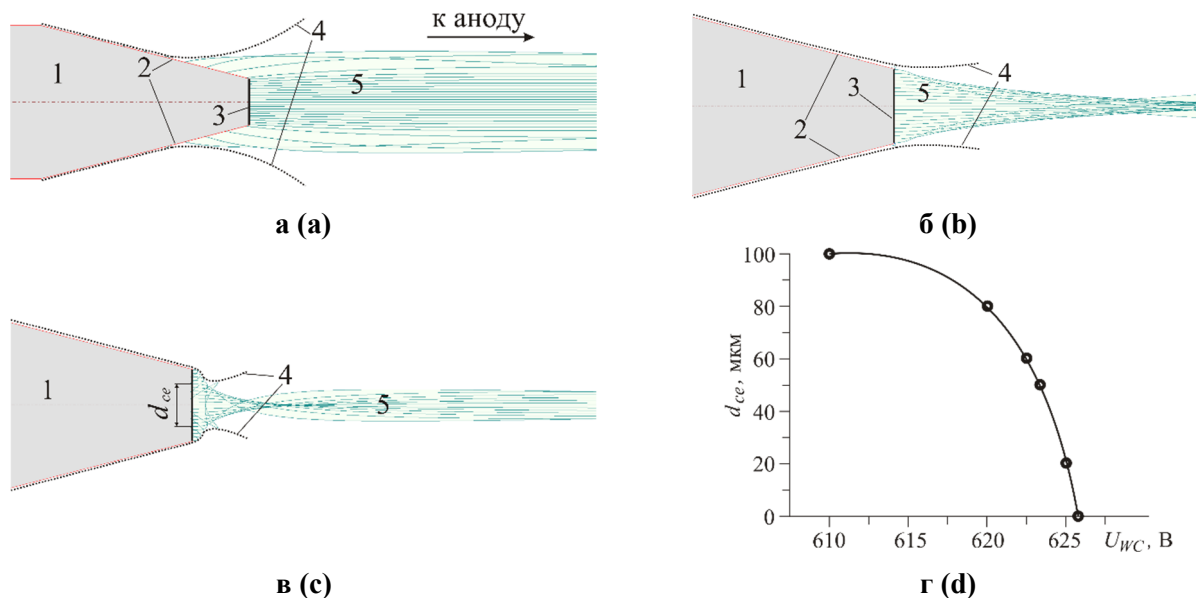


Рисунок 3 – Оценка эффективного диаметра пятна эмиссии d_{ce} катода в случае ускоряющего напряжения 100 кВ при разных напряжениях между катодом и электродом Венельта U_{we} при $D = 2$ мм и $h = 0,4$ мм: а – $U_{we} = -520$ В, б – $U_{we} = -610$ В, в – $U_{we} = -622$ В;

1 – тело катода, 2 – боковая поверхность катода, 3 – торцевая микроплоскость катода диаметром $d_e = 100$ мкм, 4 – нулевая эквипотенциаль, 5 – траектории электронов;

г – графическая зависимость d_{ce} от U_{we}

Figure 3 – Estimation of effective diameter d_{ce} of cathode emission spot in case of accelerating voltage of 100 kV at different voltages between cathode and Wehnelt electrode at $D = 2$ mm and $h = 0.4$ mm: а – $U_{we} = -520$ V, б – $U_{we} = -610$ V,

с – $U_{we} = -622$ V; 1 – cathode body, 2 – cathode side surface,

3 – cathode microplane with a diameter of $d_e = 100$ μ m, 4 – zero equipotential, 5 – electron trajectories; d – graphical dependence of d_{ce} on U_{we}

На рисунке 4 (левая ось ординат) представляется расчетная зависимость степени снижения анодного тока $q = I_a/I_c = N_a/N_c$ от напряжения U_{we} , где I_a – анодный ток, I_c – ток эмиссии с торца катода, N_a – количество электронов, достигших поверхности анода, N_c – общее количество электронов, испущенных с торца катода. При моделировании процесса токопрохождения от катода к аноду с катода запускались электроны с энергией 0,1 эВ в диапазоне начальных углов $-70^\circ \div +70^\circ$ по отношению к оси Oz с шагом 10° при равномерном распределении десяти начальных радиусов в диапазоне $0 \div 0,5d_c$, и определялась часть $q = N_a/N_c$ долетевших до анода электронов. Диапазон углов $-70^\circ \div +70^\circ$ выбирался потому, что, с одной стороны, этот диапазон составляет 90 % от телесного угла 2π рад, т.е. является репрезентативным, а с другой – позволяет исключить «хвосты» на различных характеристиках моделируемого устройства, создаваемые небольшим количеством крайних электронов, испущенных под углами, близкими к 90° . Правая ось графика на рисунке 4 позволяет оценить величину анодного тока при использовании выбранного катода ES-423E, плотность тока которого при температуре 1700 К составляет $j_c = 20$ А/см². Оценка тока проводилась по очевидной формуле $I_a = qI_c = 0,25 \cdot q \cdot \pi \cdot d_c^2 \cdot j_c = 0,5\pi q$ [мА].

На первый взгляд, величина q определяется отношением эффективной площади эмиссии к площади торца катода, т.е. $q = d_{ce}^2 / d_c^2$, и зависимость на рисунке 4 может быть легко вычислена из зависимости рисунка 3, г. Однако следует заметить, что в таком случае не будет

учтена связь эффективного диапазона углов с радиальной координатой испускания электронов. Под эффективным диапазоном углов понимается диапазон углов, в пределах которого эмитируются электроны, попадающие на анод. Поэтому в этом смысле график зависимости параметра $q = N_a/N_c$ от U_{wc} на рисунке 4 является уточнением и дополнением зависимости диаметра d_{ce} от U_{wc} на рисунке 3, з.

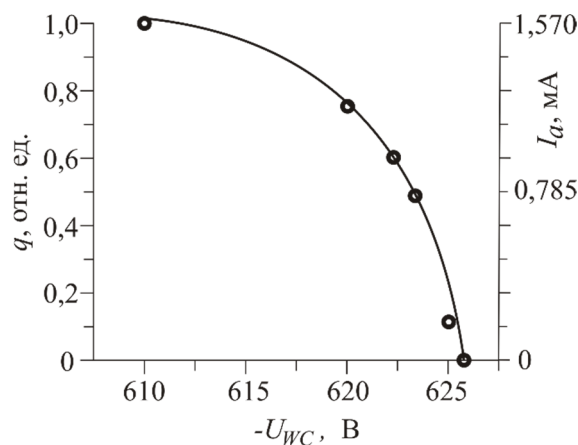


Рисунок 4 – Токпрохождение пространства «катод-анод» при разных напряжениях «катод-электрод Венельта»
Figure 4 – Current flow of the cathode-anode space at different cathode-Wehnelt electrode voltages

Необходимо заметить, что при изменении температуры катода величина q остается практически постоянной, а анодный ток I_a будет уменьшаться или увеличиваться вследствие соответствующих изменений плотности тока.

Для регулировки отрицательного относительно катода потенциала на электроде Венельта можно использовать дополнительный высоковольтный источник питания. В основу другого, более простого способа регулировки этого потенциала, а значит, и диаметра области эмиссии может быть положен принцип автосмещения, реализуемый за счет организации обратной связи анодного тока и потенциала электрода Венельта, электрическая схема которого представлена на рисунке 5.

Анализ схемы позволяет записать равенство $U_{cw} = U_{ba}$. В свою очередь $U_{ba} = I \cdot R_{cm}$, где $I = I_a$ – ток, протекающий в цепи. Тогда $U_{cw} = I_a \cdot R_{cm}$. Из данного равенства может быть найдена величина сопротивления смещения – $R_{cm} = U_{cw}/I_a$. В частности, для обеспечения режима, соответствующего эмиссии электронов со всего торца катода (см. рисунок 4), получаем $R_{cm} = 610/1,57 \cdot 10^{-3} \approx 0,4 \text{ МОм}$. В реальном эксперименте величина R_{cm} уточняется по результатам исследований. Регулировка области эмиссии в режиме автосмещения происходит следующим образом. После разогрева катода в момент подачи высокого напряжения ток на анод I_a будет включать в себя электроны, эмитированные практически всей поверхностью катода, и окажется больше номинального; поэтому напряжение смещения U_{cw} поднимется выше рассчитанной величины 610 В, что, в свою очередь, ограничит ток эмиссией лишь из торцевой области катода. При снижении диаметра за предел $d_c = 100 \text{ мкм}$ ток на анод станет меньше номинального 1,57 мА и автоматически вызовет снижение напряжения смещения и, как следствие, увеличение области, а значит, и тока эмиссии. Результатом авторегулировки напряжения смещения является заданная стабилизированная величина диаметра области эмиссии при фиксированной температуре катода.

Для уменьшения диаметра области эмиссии с целью сокращения диаметра фокального пятна на аноде трубки необходимо увеличить напряжение смещения при той же температуре катода. Например, величина $d_{ce} = 0,5d_c$ достигается подачей $U_{wc} = 623 \text{ В}$ (рисунок 3, з). При этом ток анода станет (см. рисунок 4) равным $I_a = 0,785 \text{ мА}$ и потребуется сопротивление смещения $R_{cm} = 623/0,785 \cdot 10^{-2} \approx 0,8 \text{ МОм}$.

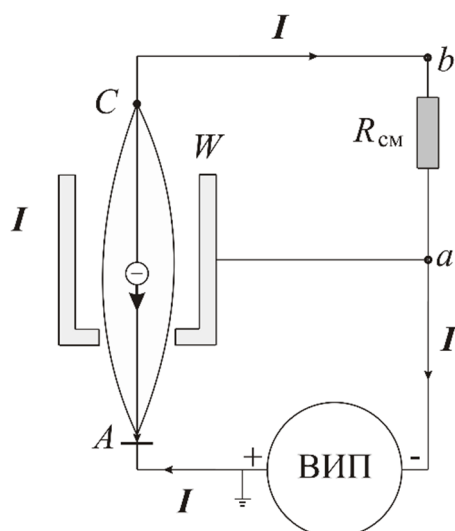


Рисунок 5 – Схема автосмещения: ВИП – высоковольтный источник питания, C – катод, W – электрод Венельта, A – анод
Figure 5 – Auto-bias circuit: VIP – high-voltage power supply, C – cathode, W – Wehnelt electrode, A – anode

Во всех следующих частях статьи рассматривается и решается проблема снижения диаметра фокального пятна на мишени анода.

Ход траекторий электронов, эмитированных катодом в диапазоне углов от -70° до $+70^\circ$, в пространстве между катодом и мишенью анода при напряжении $U_{wc} = -610$ В и ускоряющем напряжении 100 кВ показан на рисунке 6, где для справки представлены основные критические размеры микрофокусной трубки. Расчетный диаметр фокального пятна на поверхности анода в описанных условиях составил ~ 670 мкм.

Поскольку в работе поставлена задача получения фокального пятна определенных размеров, то в завершение текущего раздела статьи проверяется влияние глубины посадки h на диаметр d_{foc} этого пятна. На рисунке 2, б кривой 3 представлен соответствующий график в режиме полной эмиссии с торца катода, который обеспечивается подачей определенных фиксированных напряжений U_{wc} между катодом и электродом Венельта (рисунок 2, б, кривая 2). Из анализа данных на этом рисунке следует вывод о существовании оптимальной посадки h для достижения минимального d_{foc} . Положение минимума d_{foc} является дополнительным аргументом в пользу выбора $D/h = 5$ в нашем случае.

Снижение диаметра фокального пятна до требуемых нескольких микрон возможно применением системы магнитной фокусировки.

Моделирование магнитной линзы. Теорема Гельмгольца – Лагранжа, служащая в нашем случае отправной точкой для разработки схемы магнитной фокусировки ускоренного электронного луча, математически выражается следующим образом:

$$\Gamma \cdot M = \sqrt{\frac{E_c}{E_a}}, \quad (1)$$

где E_c и E_a – энергия электронов на катоде и аноде соответственно, а отношение E_a/E_c – ускорение электронно-оптической системы, Γ – ее угловое увеличение, M – линейное увеличение. Главный вывод, следующий из (1), заключается в обратной пропорциональности углового и линейного увеличений при конкретной величине ускорения системы, т.е.

$$M \sim \frac{1}{\Gamma}. \quad (2)$$

Поэтому для сокращения размеров фокального пятна (уменьшения M) нужно увеличить угловой разброс электронов при подлете к поверхности анода. Угловой разброс $\Delta\alpha$ потока после прохождения линзы L зависит от ее фокусного расстояния f – чем меньше фокусное расстояние, тем больше угловой разброс в точке фокуса (рисунок 7).

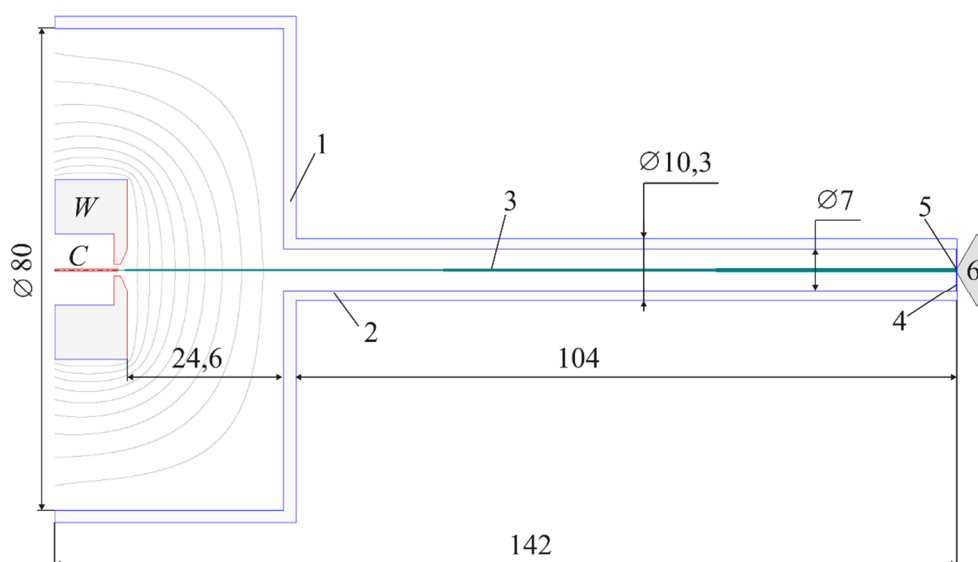


Рисунок 6 – Результаты траекторного анализа электронно-оптической схемы трубки при ускоряющем напряжении 100 кВ, начальной энергии электронов $E_c = 0,1$ эВ, напряжением $U_{wc} = -610$ В: 1 – анод, 2 – полый цилиндр для крепления системы магнитной фокусировки, 3 – траектории электронов, 4 – мишень анода, 5 – фокальное электронное пятно, являющееся областью эмиссии рентгена 6

Figure 6 – Results of path analysis of electron-optical scheme of the tube at accelerating voltage of 100 kV, initial electron energy $E_c = 0,1$ eV, voltage $U_{wc} = -610$ V: 1 – anode, 2 – hollow cylinder for attaching a magnetic focusing system, 3 – electron trajectories, 4 – anode target, 5 – focal electron spot, which is the area of X-ray emission 6

Однако фокусное расстояние линзы не может быть ниже определенного предела, обусловленного конструктивными особенностями реального прибора и самой линзы, и к тому же следует учесть, что увеличение диапазона выходных углов $\Delta\alpha$ ухудшает устойчивость величины диаметра электронного пятна d на поверхности анода a при случайных изменениях фокусного расстояния f , вызванных колебаниями напряжения питающей аппаратуры. Итак, линза должна быть короткофокусной, однако с практическим и конструктивным ограничением фокуса по нижнему пределу. В качестве такого предела в нашем случае примем $f = 14,5$ мм.

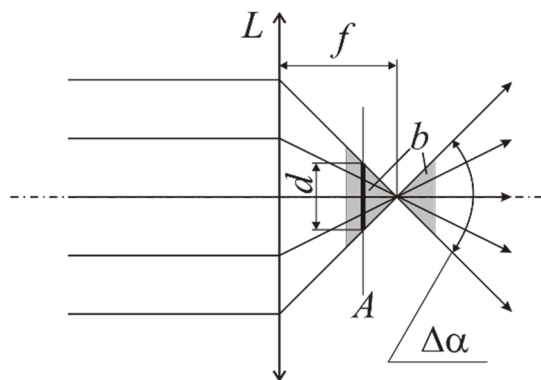


Рисунок 7 – Демонстрация связи между фокусным расстоянием f , угловым разбросом $\Delta\alpha$ и диаметром d электронного пятна на аноде a в линзе L :

b – область случайных изменений фокусного расстояния

Figure 7 – Demonstration of the relationship between focal length f , angular spread $\Delta\alpha$ and diameter d of electron spot on anode A in lens L :

b – region of random variations in focal length

В качестве магнитных линз чаще используют катушки с током (соленоиды) (рисунок 8), чем постоянные магниты, поскольку в этом случае проще регулировать фокусное расстояние за счет изменения тока катушки и величины магнитного поля.

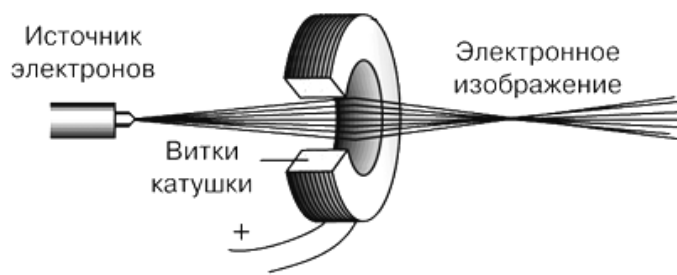


Рисунок 8 – Катушка с током как магнитная линза

Figure 8 – Coil with current as a magnetic lens

Фокусное расстояние тонкой магнитной линзы с хорошей точностью можно оценить по формуле [13]

$$f = \frac{98U_a R}{(IN)^2}, \quad (3)$$

где R – средний радиус катушки в см, I – ток катушки в А, N – число витков.

Сокращение фокусного расстояния за счет увеличения произведения (IN) [см. (3)] возможно лишь до определенного предела – дальше при сохранении габаритов катушки начинают возникать проблемы с перегревом проводников ее намотки. Альтернативный способ уменьшения f может быть объяснен следующим образом: при сжатии пространства вдоль оси Oz происходит пропорциональное сокращение продольных размеров катушки и фокусного расстояния, поэтому уменьшение длины катушки без изменения числа ампер-витков обеспечит нужное сокращение f . Сжать катушку, конечно, невозможно, однако известны технические способы сжатия магнитного поля в направлении оси Oz , основанные на погружении катушки внутрь магнитопроводящей оболочки. Суть таких способов демонстрируется на рисунке 9.

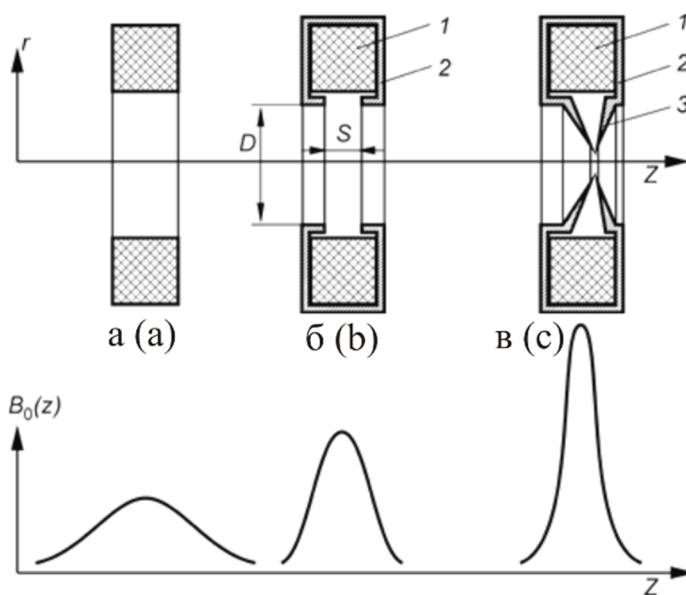


Рисунок 9 – Конструкции тонких магнитных линз и соответствующие качественные зависимости осевого распределения магнитной индукции $B_0(z)$:

а – незранированная тонкая линза, б – панцирная тонкая магнитная линза, в – панцирная тонкая магнитная линза с полюсными наконечниками, 1 – соленоид, 2 – ферромагнитный экран (магнитопровод), 3 – полюсный наконечник, D – рабочий диаметр магнитопровода, S – ширина прорези в магнитопроводе

Figure 9 – Designs of thin magnetic lenses and corresponding qualitative dependences of axial distribution of magnetic induction $B_0(z)$: а – unshielded thin lens, б – armored thin magnetic lens, в – armored thin magnetic lens with pole pieces, 1 – solenoid, 2 – ferromagnetic screen (magnetic core), 3 – pole piece, D – working diameter of magnetic core, S – slot width in magnetic circuit

Таким образом, в основе метода сокращения эффективной длины катушки лежит концентрирование поля в небольшом объёме с малой протяженностью вдоль оси Oz , которое обеспечивается применением ферромагнитных экранов.

Оценка требуемой величины произведения $I \cdot N$ соленоида, поле которого сконцентрировано в узкой области в направлении оси Oz , для обеспечения заданного фокусного расстояния $f = 14,5$ мм производилась средствами программы ФОКУС [4]. При расчетах внутренний и внешний диаметры соленоида принимались равными 10,3 мм, длина соленоида $S = 5$ мм. По результатам траекторного анализа (рисунок 10) сделан вывод о том, что фокус электронного потока фиксируется на поверхности мишени при значении $I \cdot N = 2180$ А·в, что, кстати, с погрешностью менее 40 % совпадает с величиной $f = 10,5$ мм, оцениваемой по приближенной формуле (3). Величина фокального пятна в таком случае составляет около 8 мкм, что позволяет считать теоретически решенной поставленную задачу. Расчеты показывают, что сокращение диаметра области эмиссии вызывает предполагаемое уменьшение размеров фокального пятна: при напряжении $U_{wc} = 624$ В диаметр области эмиссии составляет менее 50 % от диаметра торца катода (рисунок 3, з), а диаметр фокального пятна – меньше 5 мкм.

Распределение магнитного поля на оси системы, полученное численным моделированием в среде ФОКУС, представлено кривой 1 на рисунке 11. Это распределение является основой для разработки реальной магнитной панцирной линзы. Разрабатываемая линза должна создать магнитное поле, максимально приближенное к полю соленоида с осевым распределением, показанным на рисунке 11, кривая 1.

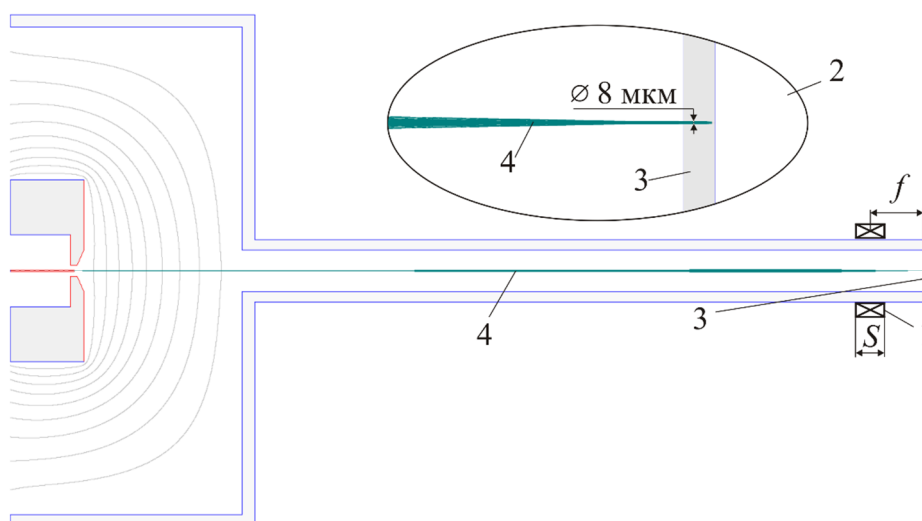


Рисунок 10 – Фокусировка ускоренного электронного потока в микрофокусной трубке магнитным полем соленоида длиной $S = 5$ мм: 1 – соленоид, 2 – конечный участок траекторий в увеличенном виде, 3 – мишень, 4 – траектории электронов
Figure 10 – Focusing of accelerated electron flow in a microfocus tube by magnetic field of a solenoid of length $S = 5$ mm: 1 – solenoid, 2 – final section of trajectories in enlarged view, 3 – target, 4 – electron trajectories

Разработка конструкции магнитной линзы. Решение задачи определения основных размеров и параметров линзы, обеспечивающих необходимое распределение магнитного поля на оси соленоида, проводилось в рамках численной модели магнитной линзы, построенной в среде Comsol Multiphysics [14]. В основу модели положена панцирная линза, изображенная на рисунке 9, б.

Средний радиус катушки R , ток катушки I и число витков N в формуле (3) позволили определить диаметр проводников намотки и габариты магнитной линзы. При этом учитывались ранее полученные значения величин фокусного расстояния, заданный зазор в магнитном экране и размеры трубки. Длина магнитной линзы лимитируется 80 мм, что дает возможность разместить и закрепить ее на пролетной трубке, заканчивающейся мишенью анода.

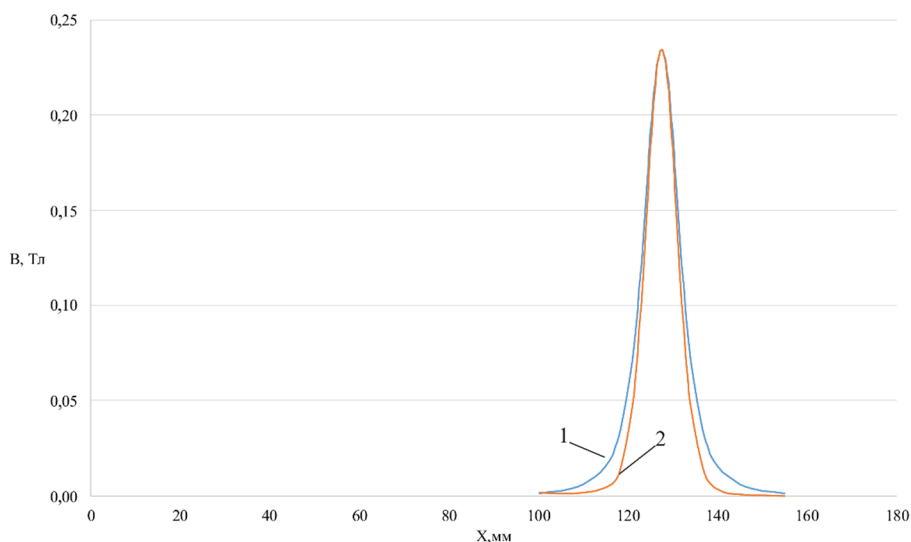


Рисунок 11 – Распределение магнитного поля на оси трубки
Figure 11 – Magnetic field distribution at tube axis

Толщина стенок экрана ограничивалась снизу величиной 8 мм, поскольку при меньших толщинах ферромагнитный материал переходит в режим насыщения – магнитное поле просачивается сквозь ферромагнетик и оказывается не полностью сконцентрированным в зазоре. Чертеж магнитной линзы представлен на рисунке 12.

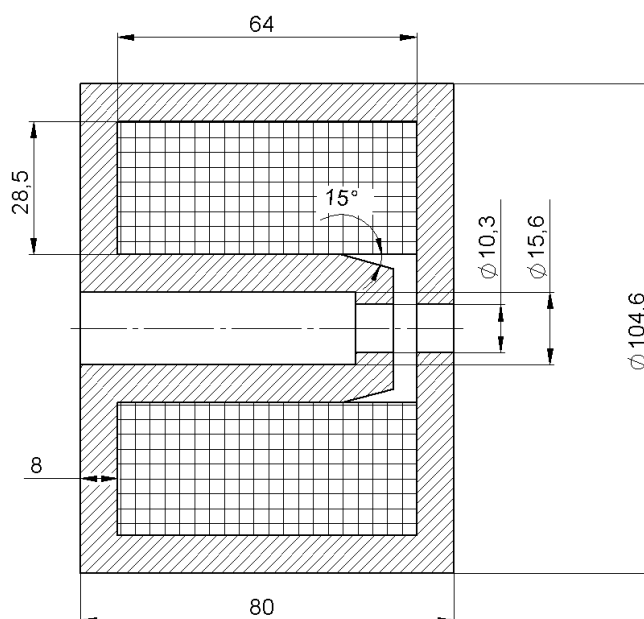


Рисунок 12 – Конструкция панцирной магнитной линзы
Figure 12 – Design of armored magnetic lens

Количество *ампер×витков* реальной панцирной линзы определялось из условия выполнения равенств максимумов ее магнитного поля и поля короткого соленоида, рассчитанного в компьютерном приложении ФОКУС методом токовых элементов (МТЭ) (см. рисунок 11, кривая 1). Моделирование магнитного поля панцирной линзы в среде Comsol Multiphysics [14] методом конечных элементов (МКЭ) позволило сделать вывод о том, что совпадение максимумов по величине обеспечивается обмоткой панцирной линзы, содержащей $N \cdot I = 1830 \text{ А} \cdot \text{в}$. Полная картина осевого распределения индукции магнитного поля на оси панцирной линзы показана на рисунке 11, кривая 2. Сравнительный анализ кривых 1 и 2 на рисунке 11 позволяет сделать вывод о наличии заметных расхождений величин индукции лишь ниже уровня 20 % от максимума, т.е. в области малого воздействия поля на движущие-

ся электроны. Средняя погрешность моделирования магнитного поля относительно максимума осевого распределения составляет 4,3 % при максимальной погрешности на «хвостах» функции распределения около 10 % (см. рисунок 11). Такой уровень ошибки соответствует технологическим погрешностям современного производства электромагнитных катушек, и поэтому нет никакого смысла в увеличении точности вычислений поля. Таким образом, может быть сделан вывод о разработке конструкции реальной линзы с требуемыми фокусирующими свойствами.

Другое заключение по результатам последнего раздела исследований состоит в констатации достаточно низкого уровня ошибки расчетов методом токовых элементов, что позволяет использовать его для экспресс-моделирования полей тонких магнитных панцирных линз и их траекторного анализа в реальном времени, поскольку скорость вычислений в МТЭ на несколько порядков выше скорости счета МКЭ.

Заключение

Развита методика моделирования слаботочных эмиссионных систем с электромагнитной фокусировкой электронного потока.

Исследованы и по результатам исследований разработаны конструкции катодно-модуляторного узла с катодом марки ES-423E на основе гексаборида лантана (LaB_6) и магнитной объектной панцирной линзы, обеспечивающие диаметр фокального электронного пятна порядка нескольких микрометров в режиме полного токопрохождения.

Метод токовых элементов является средством экспресс-моделирования полей и фокусирующих свойств магнитных панцирных линз и, как следствие, эмиссионных систем с электромагнитной фокусировкой.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. Потрахов Н.Н., Гук К.К., Бессонов В.Б. Контроль промышленных изделий методом микрофокусной рентгенографии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023; № 3 (89). С. 31-37.
2. Рентгеновские микрофокусные трубки фирмы X-ray WorX GmbH. [Электронный ресурс] <https://www.x-ray-worx.com> (дата обращения 05.04.2024).
3. Сушков А.Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы. СПб.: Лань, 2004.
4. Трубицын А.А. Система «ФОКУС» автоматизированного проектирования устройств электронной и ионной оптики // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-2. С. 121-130.
5. Трубицын А.А. Вычисление сингулярных интегралов при решении задачи Дирихле методом граничных элементов // Журнал вычислит. матем. и матем. физики. 1995. № 4 (35). С. 532-541.
6. Гуров В.С., Дягилев А.А., Иванов В.С., Трубицын А.А. Реализация алгоритма распараллеливания вычислений при решении задач теории потенциала методом граничных элементов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 27. С. 80-83.
7. Корытчинков Д.Е., Трубицын А.А., Дягилев А.А. Численное моделирование магнитного поля соленоида // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 25. С. 49-51.
8. Горелик В.А., Протопопов О.Д., Трубицын А.А. Поиск фокусировки высокого порядка в реальных электронно-оптических системах // ЖТФ. 1988. № 8 (58). С. 1531-1534.
9. Трубицын А.А. Корреляционный метод поиска угловой фокусировки высших порядков // ЖТФ. 2001. № 5 (71). С. 126-127.
10. Скунцев А.А., Трубицын А.А. Численный метод поиска условий пространственной фокусировки высших порядков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 30. С. 40-43.
11. Kambarova Z., Saulebekov A., Trubitsyn A. Numerical search for time-of-flight focusing conditions and its application to the analysis of TOF mass analyzer schemes // Engineering Research Express. 2024. 6(1). 015037, pp. 1-11.

12. **Haine M.E.** The Electron Microscope. NY: Interscience Publishers, 1961.

13. **Кельман В.М.** Электронная оптика. Серия: Научно-популярная серия. М.; Л.: Академия наук СССР, 1955.

14. Программная среда Comsol MultiPhysics [Электронный ресурс] <http://www.cc.spbu.ru/ru/content/comsol-multiphysics> (Дата обращения 05.04.2024).

UDC 621.386.22

MODELING OF A SYSTEM FOR ELECTROMAGNETIC FOCUSING OF ELECTRON FLOW IN MICROFOCUS X-RAY TUBE

M. V. Bludov, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0004-1811-0344, e-mail: bludovmaksim@rambler.ru

E. Yu. Grachev, PhD (in technical sciences), associate professor, department of industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-7813-7769, e-mail: monopol_rus@mail.ru

E. A. Kozlov, PhD (in technical sciences), associate professor, department of industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-2038-6732, e-mail: ewg.kozlov2015@yandex.ru

E. G. Kochergin, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0007-7436-2708, e-mail: kochergin_aduad@mail.ru

A. A. Serezhin, PhD (in technical sciences), associate professor, department of industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-8134-8970, e-mail: andrei-serezhin@yandex.ru

A. A. Trubitsyn, Doctor in Physics and Mathematics, full professor, department of industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-9337-8947, e-mail: assur@bk.ru

*The simulation of electron-optical circuit of microfocus X-ray tube of transmission type with electromagnetic focusing has been carried out. Electromagnetic focusing system includes two lenses: electrostatic cathode and magnetic object lens. The author's software application FOCUS was used as a basic modeling tool. **The aim of the work** is to study and determine operating modes of lenses that provide a micron diameter of electron flow focal spot on tube anode in the mode of full current passage at accelerating potential of 100 kV.*

Keywords: X-ray tube, cathode modulator unit, electron lens, trajectory analysis.

The work was performed as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSSN-2020-0003).

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-115-128

References

1. **Potrakhov N.N., Guk K.K., Bessonov V.B.** Kontrol' promyshlennyykh izdelij metodom mikro-vokucnoj rentgenogravii (Inspection of industrial products using microfocus radiography). *Sawodckaja laboratorija. Diagnostika materialov*. 2023, no. 3 (89), pp. 31-37. (in Russian).

2. *X-ray microfocus tubes from X-ray WorX Gmb.* [Electronic resource] <https://www.x-ray-worx.com> (access date 04/05/2024).

3. **Sushkov A.D.** *Vacuum electronics. Physical and technical fundamentals*. St. Petersburg: Lan, 2004.

4. **Trubitsyn A.A.** Sistema «FOKUS» avtomatizirovannogo proektirovaniya ustroystv jelektronnoj i ionnoj optiki (FOCUS system for automated design of electronic and ion optics devices). *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2012, no. 39-2, pp. 121-130. (in Russian).

5. **Trubitsyn A.A.** Vychislenie singuljarnykh integralov pri reshenii zadachi Dirihle metodom granichnykh jelementov // *Zhurnal vychislit. matem. i matem. Fiziki*. 1995, no. 4 (35), pp. 532-541. (in Russian).

6. **Gurov V.S., Dyagilev A.A., Ivanov V.S., Trubitsyn A.A.** Realizacija algoritma rasparrallelivaniya vychislenij pri reshenii zadach teorii potentsiala metodom granichnyh jelementov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2009, no. 27, pp. 80-83. (in Russian).
7. **Korytchinkov D.E., Trubitsyn A.A., Dyagilev A.A.** Chislennoe modelirovanie magnitnogo polja solenoida. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2008, no. 25, pp. 49-51. (in Russian).
8. **Gorelik V.A., Protopopov O.D., Trubitsyn A.A.** Poisk fokusirovki vysokogo porjadka v real'nyh jelektronno-opticheskikh sistemah. *Technical Physics*. 1988, no. 8 (58), pp. 1531-1534. (in Russian).
9. **Trubitsyn A.A.** Korreljacionnyj metod poiska uglovoj fokusirovki vysshih porjadkov. *Technical Physics*. 2001, no. 5 (71), pp. 126-127. (in Russian).
10. **Skuntsev A.A., Trubitsyn A.A.** Chislennyj metod poiska uslovij prostranstvennoj fokusirovki vysshih porjadkov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2009, no. 30, pp. 40-43. (in Russian).
11. **Kambarova Z., Saulebekov A., Trubitsyn A.** Numerical search for time-of-flight focusing conditions and its application to the analysis of TOF mass analyzer schemes. *Engineering Research Express*. 2024, 6(1). 015037, pp. 1-11.
12. **Haine M.E.** *The Electron Microscope*. NY: Interscience Publishers, 1961.
13. **Kelman V.M.** *Jelektronnaja optika. Serija: Nauchno-populjarnaja serija* (Electronic optics. Series: Popular science series). M-L: Academy of Sciences of the USSR, 1955.
14. *Software environment Comsol MultiPhysics* [Electronic resource] <http://www.cc.spbu.ru/ru/content/comsol-multiphysics> (Date of access: 04/05/2024).