

Министерство образования Республики Беларусь  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 537.533; 621.384, 621.785

№ ГР 20160829 от 08.04.16

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Д.О. Глухов  
" 20 " декабря 2018 г.

**ОТЧЕТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**«РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МАКЕТОВ  
ЭЛЕКТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ ДЛЯ  
КОМПЕНСАЦИИ ИОННОГО ПУЧКА ИЛИ СОВМЕСТНОГО  
ИОННО-ЭЛЕКТРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ»**

(заключительный)

задание 4.1.01 / ГБ 1516

ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии»

Задание «Комбинированные электронно-ионные системы и плазменно-пучковые процессы модификации поверхности и нанесения легированных диэлектрических слоев для электроники»

Начальник ОСНИ

\_\_\_\_\_ Т.В. Гончарова  
«20» декабря 2018 г.

Руководитель НИР,  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Д.А. Антонович  
«20» декабря 2018 г.

Ответственный исполнитель  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Ю.П. Голубев  
«20» декабря 2018 г.

Новополоцк 2018

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

<p>Руководитель работы, главный научный сотрудник, к.т.н., доцент</p>	<p>_____</p> <p>«20» декабря 2018 г.</p>	<p>Антонович Д.А. (общее руко- водство, введение, заключение, разделы 2, 6)</p>
<p>главный научный сотрудник, д.т.н., профессор</p>	<p>_____</p> <p>«20» декабря 2018 г.</p>	<p>Груздев В.А. (введение, разде- лы 2, 6)</p>
<p>Исполнители: Ответственный исполнитель, ведущий научный сотрудник, к.т.н., доцент</p>	<p>_____</p> <p>«20» декабря 2018 г.</p>	<p>Голубев Ю.П. (разделы 1, 2, 5)</p>
<p>Младший научный сотрудник</p>	<p>_____</p> <p>«20» декабря 2018 г.</p>	<p>Солдатенко П.Н. (разделы 3-5)</p>
<p>Нормоконтролер</p>	<p>_____</p> <p>«20» декабря 2018 г.</p>	<p>Ищенко Л.В.</p>

## РЕФЕРАТ

Отчет 60 с., 26 рис., 8 табл., 43 ист.

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫЕ ПУЧКИ, КОМПЕНСАЦИЯ ИОННОГО ОБЪЁМНОГО ЗАРЯДА, ПЛАЗМЕННЫЕ ЭМИТТЕРЫ, ЭЛЕКТРОННО- И ИОННОЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.

**Объектом исследований** являются потоки заряженных частиц, эмитированные из плазмы, формируемой в газоразрядных структурах, с параметрами, достаточными для реализации технологий модификации поверхностей и других родственных технологий.

**Цель работы** – разработка плазменных источников электронов, формирующих низкоэнергетичные пучки для компенсации ионного объёмного заряда, создание и исследование экспериментальных макетов комбинированных электронно- и ионно-плазменных источников, предназначенных для поверхностной модификации материалов.

**В результате выполнения работы** определена возможность совместимости электронных и ионных источников, выявлены основные особенности такого применения. Определены основные требуемые параметры и характеристики электронно-ионных источников. Предложен ряд электродных структур электронно-ионных источников, сконструирован, изготовлен и исследован плазменный электронно-ионный источник, показана его перспективность для дальнейшей разработки технологического электронно-ионного источника.

**Область применения:** полученные результаты будут использованы для разработки экспериментальных макетов электронных источников с плазменным эмиттером для компенсации ионного пучка или совместного ионно-электронного воздействия.

**Основные показатели:** высокая эффективность разрабатываемых источников заряженных частиц, способная обеспечить возможность реализации энерго- и ресурсосберегающие технологий модификации поверхностей различных материалов.

**Степень внедрения:** результаты исследований планируется использовать для создания отечественных электронно-ионно-лучевых энергокомплексов различного технологического назначения и разработки новой технологии модификации различных материалов. Полученные новые научные результаты используются при подготовке научных кадров в рамках магистратуры и аспирантуры. Результаты будут использованы при подготовке к защите 2 магистерских и одной кандидатской диссертаций.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Анализ электродных структур и параметров источников ионов различных конструкций.....	8
1.1 Технологии, допускающие электронно-лучевое ассистирование.....	8
1.2 Источники ионов на основе магнетронного разряда.....	12
1.3 Источники ионов на основе стационарных газовых разрядов с холодным катодом.....	16
1.4 Ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя.....	19
1.5 Конструкции плазменных источников ионов.....	23
2. Анализ концепции плазменных источников для формирования совмещенных электронно-ионных пучков.....	30
3. Внешний вид разработанных конструкций.....	37
4. Моделирование магнитных полей в разработанных конструкциях.....	40
5. Экспериментальное исследование электронно-ионного источника со скрещенными $E \times H$ полями.....	45
6. Анализ возможности и условий реализации электрической сепарации электронно-ионного пучка.....	52
Заключение.....	56
Список использованных источников.....	57

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует достаточно большое количество способов обработки и модификации поверхностей материалов в вакууме с использованием потоков заряженных частиц. Наибольшего развития получили электронно-лучевые, ионные и комбинированные способы воздействия на поверхности материалов [1-8].

При электронно-лучевом нанесении вакуумных покрытий нагрев и испарение вещества осуществляются в результате теплового действия электронов, бомбардирующих испаряемую мишень. Данным методом получают покрытия из сплавов металлов, полупроводников и даже диэлектриков. Электронно-лучевое нанесение покрытий характеризуется следующими преимуществами: при электронно-лучевом испарении капельная фракция практически отсутствует; при использовании составных тиглей (испаряемых материалов) достаточно просто изменить химический состав наносимых покрытий и их пространственное распределение; возможность автоматизации процесса испарения и, соответственно, нанесения покрытия в целом; получение химически чистых покрытий, т.к. нагревается только испаряемый материал.

Для реализации электронно-лучевого нанесения покрытий необходимо: ускоряющее напряжение электронно-лучевой пушки до 10 кВ; плотность мощности  $10^4 - 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>; скорость испарения  $2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^{-2}$  г/(см<sup>2</sup>·с); скорость роста покрытий – 10...60 нм/с [4-6, 8].

Однако электронно-лучевые методы нанесения покрытий имеют ряд недостатков: относительно невысокий КПД электронно-лучевых устройств, поскольку более 25 % потребляемой мощности идет на вторичное электронное излучение, нагрев тигля и т.д.; в процессе роста покрытия поверхность подложки подвергается воздействию высокоэнергетичных электронов, что может приводить к возникновению дефектов [7, 9, 10].

Электронно-лучевое испарение диэлектриков имеет ряд особенностей, основная из которых состоит в том, что их поверхность имеет высокое электрическое сопротивление и при взаимодействии с ней потока электронов происходит накопление электронов в поверхностном слое (зарядка поверхности) приводящее к образованию тормозящего электрического поля. Для увеличения скорости испарения диэлектриков используются ряд технологических приемов: предварительный нагрев поверхности мишени до температуры, при которой поверхностная электрическая проводимость возрастает и соответственно снижается эффективность зарядки поверхности; испарение диэлектрика с помощью двух и более электронных пушек, одна из которых является источником медленных электронов, при взаимодействии которых с поверхностью происходит снятие электрического заряда. Поэтому перспективным является использование источников электронов, работающих при повышенных давлениях и имеющих высокий ресурс, например, ПИЭЛ или пушек на основе ВТР, когда объемный заряд электронного пучка компенсируется зарядом ионов [5].

Ионные источники широко применяются для нанесения тонкоплёночных слоёв металлов, полупроводников и диэлектриков, считаются наиболее перспективными для реализации подобных технологий. При этом одним из методов увеличения эффективности таких источников является использование сильноточных эмиттеров электронов для поддержания процессов ионизации и обеспечения устойчивого горения разряда, компенсации как объёмного заряда в пучке, так и поверхностного на формируемой плёнке. В настоящее время для этих целей используются твердотельные накаливаемые эмиттеры. Однако в условиях интенсивных ионных потоков ресурс таких эмиттеров ограничен вследствие интенсивной ионной бомбардировки. Поэтому поиск безнакальных компенсационных эмиттеров электронов достаточно актуален. Низкоэнергетичные электронные пучки также представляют интерес для реализации плазмохимических процессов и технологий нанесения плёнок и покрытий различного назначения методами попеременного или одновременного теплофизического электронного и модифицирующего ионного воздействия.

В системах с плазменным эмиттером получение низкоэнергетичных компенсирующих электронных пучков возможно либо вследствие рекуперации энергии, либо за счёт создания оптимальных условий для формирования таких пучков непосредственно в источнике. При формировании электронных пучков требуемой геометрии в системах с плазменным эмиттером определяющими являются положение и форма эмиттирующей плазменной поверхности. Они в свою очередь обусловлены параметрами плазмы, характеристиками системы формирования пучка (потенциал и геометрия формирующих электродов) и величиной приведённой напряжённости поля, ускоряющего электроны. Последнее определяет энергию электронов в пучке.

Поскольку условия формирования ионных пучков в известных системах магнетронного типа близки, в первую очередь по давлению, к условиям формирования электронных пучков в системах с плазменным эмиттером, то возможно создание комбинированных источников, обеспечивающих формирование как электронных, так и ионных пучков [11-16]. Такие системы могут формировать скомпенсированные ионные пучки, пучки нейтральных атомов или обеспечивать попеременное или одновременное воздействия пучками обоих типов заряженных частиц, и, значит, представляют уникальный универсальный инструмент для нанесения плёночных покрытий различного назначения [17].

В настоящее время существуют конструкции ионных источников и накальные системы, создающие компенсирующие электронные пучки. Однако для этих целей источники электронов с плазменным эмиттером не использовались. Кроме этого до настоящего времени не разработаны конструкции источников заряженных частиц, обеспечивающих попеременное или одновременное ионно-электронное воздействие, а также эффективных ионных ис-

точников, совмещённых с компенсирующими электронными источниками с плазменным эмиттером.

В рамках данной работы была определена возможность совместимости электронных и ионных источников. Определены основные требуемые параметры и характеристики электронно-ионных источников. Предложен ряд электродных структур электронно-ионных источников, сконструирован, изготовлен и исследован плазменный электронно-ионный источник, показана его перспективность для дальнейшей разработки технологического электронно-ионного источника.

## 1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОДНЫХ СТРУКТУР И ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 1.1 Технологии, допускающие электронно-лучевое ассистирование

Ниже представлено краткое описание основных применяемых на производстве технологий, реализация электронно-лучевого ассистирования которых позволило бы повысить их эффективность [5, 8, 10-13, 18-20].

**Ионная имплантация.** Ионная имплантация – метод легирования поверхностных слоев, заключающийся в обработке поверхности потоком высокоэнергетичных ионов и внедрении их в поверхностный объем материала. Ионная имплантация характеризуется следующими основными преимуществами: отсутствие термодинамических ограничений по составу образующихся в поверхностных слоях сплавов и химических соединений; возможность создания неравновесных метастабильных структур, которые в ряде случаев имеют уникальные физико-механические свойства; универсальность и гибкость процесса (разнообразный профиль концентраций легирующих элементов); высокая чистота процесса (процесс осуществляется в высоком вакууме; различные условия и режимы процесса; возможность создания поверхностных слоев с высокими физико-механическими свойствами).

К основным недостаткам процесса ионной имплантации относятся: образование в поверхностных слоях высокой концентрации дефектов; относительно сложное технологическое оборудование и низкая производительность процесса обработки.

Процесс ионной имплантации и состояние модифицированных слоев характеризуются следующими основными параметрами, изменение которых оказывает определяющее влияние на свойства обрабатываемых поверхностей:

- распределение внедренных атомов по толщине (зависит от энергии ионов, природы материала подложки, температуры поверхности);
- параметры, характеризующие взаимодействие ионов с атомами поверхностного слоя;
- параметры, определяющие изменения структуры и свойств легированных слоев в зависимости от дозы облучения, плотности радиационных дефектов и т.д.

Основной характеристикой степени обработки при ионной имплантации является распределение имплантированных ионов по толщине поверхностного слоя. При взаимодействии иона с поверхностью в процессе многократных столкновений с атомами мишени происходит передача кинетической энергии, и в итоге ион, внедрившийся на некоторое расстояние от поверхности, теряет эту энергию полностью.

Наиболее существенным недостатком ионного внедрения является нарушение кристаллической структуры полупроводника, или металла (диэлектрика) Для устранения обра-



зовавшихся нарушений, необходимо проведение соответствующих термообработок ионно-легированных образцов. Это может быть равновесный отжиг в печах, или неравновесный (быстрый) фотонный, электронный, лазерный отжиг.

**Ионно-плазменное азотирование (ИПА)**– метод химико-термической обработки изделий из стали и чугуна с большими технологическими возможностями, позволяющий получать диффузионные слои нужного состава путем использования разных газовых сред, т.е. процесс диффузионного насыщения управляем, и может быть оптимизирован в зависимости от конкретных требований к глубине слоя и твердости поверхности. Этот метод относят к **ионно-лучевому упрочнению**. Упрочняющей обработке методом ИПА могут подвергаться различные детали и инструменты. В результате ИПА можно улучшить следующие характеристики изделий: износостойкость, усталостную выносливость, антизадирные свойства, теплостойкость и коррозионную стойкость.

В сравнении с широко используемыми способами упрочняющей химико-термической обработки стальных деталей, такими, как цементация, нитроцементация, цианирование и газовое азотирование в печах, метод ИПА имеет следующие основные преимущества: более высокая поверхностная твердость азотированных деталей; отсутствие деформации деталей после обработки и высокая чистота поверхности; повышение предела выносливости и увеличение износостойкости обработанных деталей; более низкая температура обработки (400-600 °С), благодаря чему в стали не происходит структурных превращений; возможность обработки глухих и сквозных отверстий; сохранение твердости азотированного слоя после нагрева до 600-650 °С; возможность получения слоев заданного состава; возможность обработки изделий неограниченных размеров и форм; отсутствие загрязнения окружающей среды; повышение культуры производства; снижение себестоимости обработки в несколько раз.

Принцип действия ИПА заключается в том, что в разряженной (от единиц до сотен паскаль) азотсодержащей газовой среде между катодом (деталью) и анодом (стенками вакуумной камеры) возбуждается газовый разряд, образующий активную среду (ионы, атомы, возбужденные молекулы), обеспечивающую формирование азотированного слоя, состоящего из внешней – нитридной зоны и располагающейся под ней диффузионной зоны.

Технологическими факторами, влияющими на эффективность ионного азотирования, являются температура процесса, продолжительность насыщения, давление, состав и расход рабочей газовой смеси. Основным недостатком такого процесса является существенное время воздействия (десятки и сотни часов), необходимого для достижения требуемой толщины. Поэтому современные исследования по улучшению этого метода направлены на поиск способов уменьшения время обработки. Одним из факторов, способствующих этому, является температура подложки. Для повышения температуры подложки применяют различные

нагреватели. Электронный пучок способен обеспечить эффективный управляемый локальный (поверхностный) нагрев. Поэтому предполагается перспективным использование электронного пучка, для повышения температуры подложки и, тем самым увеличивая эффективность азотирования

**Термоионное нанесение покрытий.** Термоионное нанесение покрытий широко применяется при изготовлении интегральных микросхем, магнитных пленок, оптических и износостойких слоев. Осаждение пленок в условиях, когда материал поступает на подложку в виде атомов и ионов позволяет в широких пределах изменять композиционный состав покрытия и его структуру. Ионная бомбардировка в ряде случаев способствует снижению внутренних напряжений, возникающих в процессе формирования пленки.

Более простыми и надежными при сравнимой эффективности осаждения являются плазменные электронно-лучевые системы, в которых формирование электронного пучка происходит непосредственно у поверхности испаряемого вещества. В таких системах эмиттером электронов служит не катод электронной пушки, а окружающая тигель поверхность плазмы. Ускорение же электронного потока происходит электрическим полем приповерхностного слоя, которое возникает за счет разности потенциалов между плазмой и тиглем. При этом неотъемлемым элементом плазменных электронно-лучевых систем является внешний источник плазмы, основанный на каком-либо типе газового разряда.

Процесс образования ионного потока на обрабатываемую подложку происходит следующим образом. Пушкой создается первичный пучок электронов с энергиями порядка нескольких сотен эВ. Атомы рабочего газа в разрядном промежутке ионизируются первичными электронами, создавая плотную газоразрядную плазму. К тиглю с испаряемым веществом прикладывается положительный потенциал, необходимый для создания положительного смещения у поверхности тигля. При подаче положительного смещения на тигель, испаряемое вещество разогревается с образованием потоков ионов и нейтрального пара на обрабатываемую поверхность.

Процесс осаждения покрытий осуществляется как при заземленном, так и при изолированном подложкодержателе. В случае изолированного подложкодержателя его поверхность за счет непрерывного потока на нее электронов первичного пучка термоэлектронного источника (ТЭИ) заряжается отрицательно и начинает притягивать к себе ионы плазмы, тем самым, формируя ионный поток. Формирование ионного потока на изолированную поверхность посредством первичного электронного пучка используется для предварительной ионной очистки обрабатываемого образца и при синтезе покрытий на основе сложных химических соединений.

**Ионное распыление** – распространенная технология нанесения качественных тонкопленочных покрытий различного назначения [5, 9–11, 20, 21]. Среди других подобных технологий она занимает особое место, так как относится к методам осаждения из паровой фазы в вакууме (под вакуумом, как правило, понимается разряженный газ в камере при давлении не более 10 Па), что обуславливает высокую воспроизводимость результатов, низкий уровень загрязнений, возможность нанесения сложных материалов и т.д.

Процесс ионного распыления проходит в 3 этапа. Первый этап — переходный, предравновесный. В ходе первого этапа происходит удаление поверхностных загрязнений, изменение рельефа поверхности, ее структуры, энергии связи атомов на поверхности. Распыление проводится пучком ионов, бомбардирующих поверхность под определенным углом по отношению к нормали к поверхности. Второй этап — установившийся режим процесса ионного распыления. Распыляются собственно материал и внедренные в него ионы, концентрация которых установилась. Этот этап является основным в процессе распыления. Третий этап характеризует завершение удаления пленки материала. В ходе третьего этапа начинается распыление подложки. Наблюдается влияние свойств подложки на свойства граничного с ней слоя распыляемого материала. В результате проникновения ионов до границы раздела пленка-подложка и смещения атомов происходит перемешивание атомов пленки и подложки. Ширина перемешанной зоны увеличивается с увеличением энергии и уменьшением массы бомбардирующих ионов.

Существует множество вариантов построения распылительных систем, которые классифицируются в основном в зависимости от используемого источника ионов. Однако целесообразным представляется рассмотреть две основных группы таких источников – магнетронные и газоразрядные источники ионов, действие которых основано на плазменных эмиссионных процессах. Такой выбор обусловлен, прежде всего, задачами проводимого исследования, которые определены, с одной стороны широким распространением и проработкой технологических конструкций первого типа, с другой – возможностями получения ионных и электронных потоков в источниках второго типа. Это открывает перспективы реализации совмещенного воздействия электронными и ионными пучками, компенсации объемного заряда ионного пучка и ряд других практических применений.

## 1.2 Источники ионов на основе магнетронного разряда

В настоящее время технологические распылительные системы строятся преимущественно на основе магнетронов, которые являются эффективными источниками ионных потоков. С использованием магнетронных распылительных систем можно распылять большинство используемых в технологиях осаждения материалов, включая металлы и сплавы, диэлектрики, полупроводниковые и керамические материалы.

Несмотря на то, что магнетронные распылительные системы являются достаточно хорошо исследованными объектами, неоднократно рассматривались в литературе, эта область постоянно развивается, так как процессы ионного распыления сопровождаются рядом сопутствующих физических процессов, что в комплексе позволяет находить и решать новые проблемы, связанные с повышением эффективности распыления, или созданием новых комплексных систем, реализующих совместно и другие лучевые технологии. Можно выделить следующие основные процессы, сопровождающие распыление [21]: вторичная ион-электронная эмиссия с мишени, нагрев мишени, имплантация и адсорбция ионов в мишень, обратное рассеивание ионов и др.

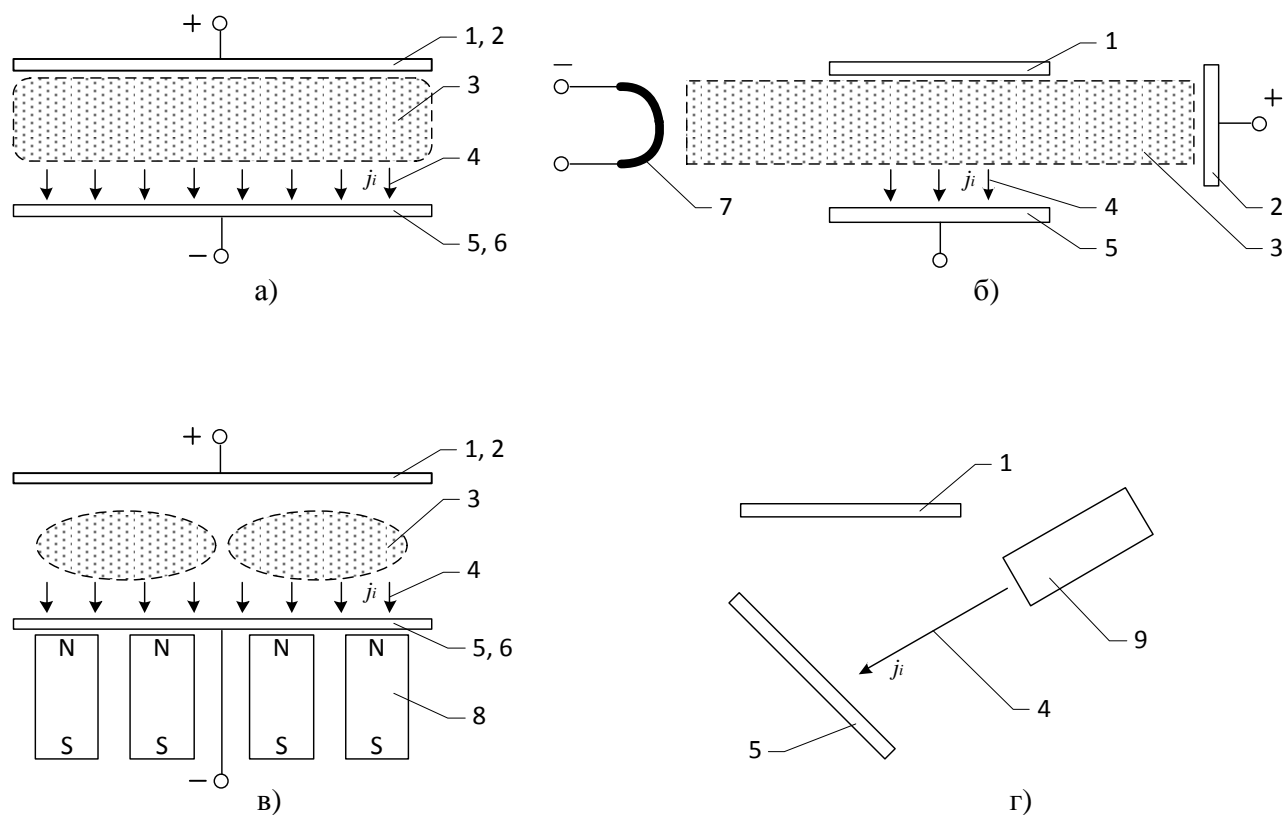
На рисунке 1 показаны четыре основные используемые схемы магнетронных распылительных систем [21]: диодная (а), триодная (б), планарная магнетронная (в), с автономным ионным источником (г).

В части исследования возможности совмещения ионного и электронно-лучевого воздействия, а также использования электронных пучков для компенсации пространственного заряда ионов, представляет интерес изучение основных рабочих параметров различных схем и сравнения их с параметрами плазменных источников электронов, которые предполагается использовать в совмещенных технологиях. Для этого проведен анализ публикаций [5, 9-13, 19-21], по результатам которого можно сделать выводы о возможностях построения соответствующих систем для реализации совмещенных ионно-электроннолучевых технологий.

Можно выделить три группы рабочих параметров, влияющих на возможность совмещения электронных и ионных источников: газодинамические и вакуумные, электрические и электромагнитные.

Что касается вакуумных условий, рабочие давления в вакуумной камере магнетронов и электронных пушек с плазменным эмиттером находятся в совпадающем диапазоне 1...10 Па.

Расход рабочего газа в электронных источниках и магнетронных системах подобен и измеряется десятками см<sup>3</sup>/атм·мин. Наибольший интерес представляет сравнение электрических параметров, что определит возможность совместного использования систем электропитания.



1 – подложка; 2 – анод; 3 – плазма; 4 – поток ионов; 5 – мишень; 6 – катод;  
 7 – накали́нный катод; 8 – магнит; 9 – источник ионов

Рисунок 1 – Электродные структуры различных распылительных систем

Диапазоны параметров рабочего напряжения и тока разряда диодной и магнетронной распылительных систем на основе анализа ВАХ этих систем [21, с. 23] представлены в таблице 1:

Таблица 1 – Диапазоны параметров диодной и магнетронной распылительных систем

Распылительная система	$U$ , кВ	$I$ , А
Плоскопараллельная распылительная система без магнитного поля	1,1–5,8	0,1–0,6
Цилиндрический стержневой магнетрон	0,5–0,7	0,4–6
Круглый планарный магнетрон	0,4–0,6	0,4–5
Цилиндрический магнетрон с мишенью в виде трубы	0,3–0,5	0,1–3
Прямоугольный планарный магнетрон	0,4–0,5	1–9

Рабочие параметры различных типов распылительных систем [21, с. 23; 22, с. 43] представлены в таблице 2:

Таблица 2 – Рабочие параметры различных типов распылительных систем

Параметр	Диодная пост.ток	Триодная без магнитного поля	Триодная с магнитным полем	Система с ионным источником	Магнетронная пост.ток
Давление газа $p$ , Па	1–15	0,05–0,7	0,01–0,15	$(1–15) \cdot 10^{-3}$	0,3–1,5
Напряжение разряда $U_p$ , кВ	3–5	1–2	1–2	1–3	0,4–0,8
Ток ионов на мишень $I_i$ , А	0,5–0,8	3–5	10–15	0,2–0,5	15–20 (до 100)
Суммарная потребляемая мощность $W_c$ , кВт	2–5	10–15	35–40	8–10	8–15 (до 100)

Особенности конфигурации электрических и магнитных полей в известных конструкциях магнетронных источников ионов открытого типа представленные в [21, с. 30-32], изображены на рисунке 2.

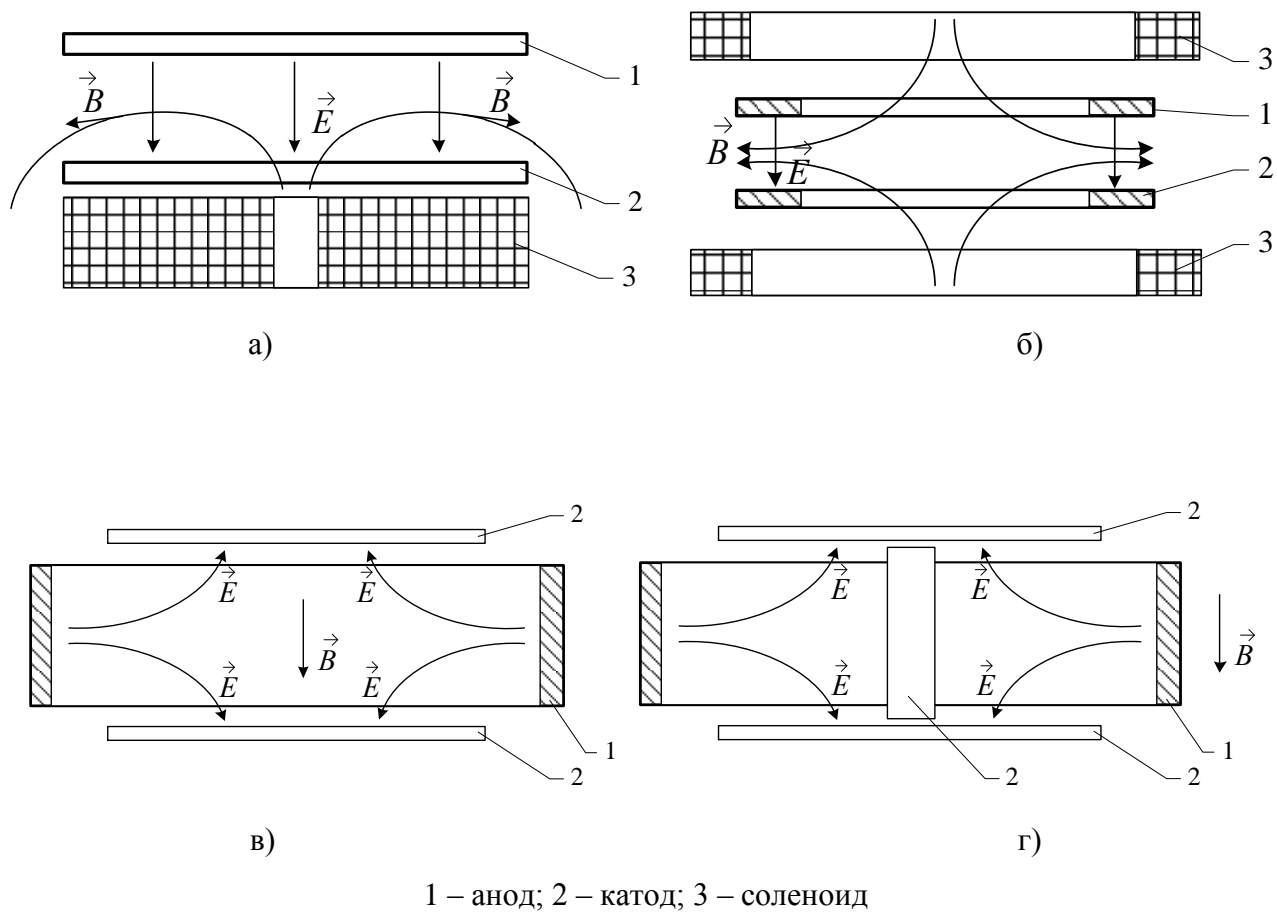


Рисунок 2 – Электродные структуры магнетронов различных типов:

- а) система с плоскими электродами и радиальным магнитным полем (планарный магнетрон);
- б) система с квадрупольным магнитным полем; в) двухкатодная электродная система с аксиальным магнитным полем (ячейка Пеннинга); г) стержневой цилиндрический магнетрон с катодными торцами

### 1.3 Источники ионов на основе стационарных газовых разрядов с холодным катодом

В технике ионного распыления получили наибольшее распространение лишь некоторые типы конструкций источников ионов. Далее приведены параметры тех вариантов электродных структур, которые с одной стороны имеют параметры, достаточные для осуществления технологий распыления, с другой – характеризуются высокой эмиссионной эффективностью и устойчивостью горения разряда. В разделе 1.4 будут представлены некоторые конструкции рассматриваемых типов источников.

Характеристики источников газовых ионов с пучками малого сечения на основе отражательного или магнетронного разряда с холодным полым катодом [19, с. 41–48] приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики источников газовых ионов с пучками малого сечения на основе отражательного или магнетронного разряда с холодным полым катодом

Параметр	Разрядная структура		
	Отражательный разряд с полым катодом (цилиндрическая катодная полость)	Отражательный разряд с полым катодом (коробчатая катодная полость)	Магнетронный разряд с полым катодом
Ток разряда $I_p$ , А	0,05–0,6	0,05–1	0,05–2
Напряжение зажигания $U_z$ , В	500–600	500–600	500–600
Напряжение горения разряда $U_p$ , В	380–450	350–380	85–180
Давление в катодной полости $p_{к.п.}$ , Па	5–8	5–13	1,3–10
Давление в ускоряющем промежутке $p$ , Па	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Ускоряющее напряжение $U_{уск.}$ , кВ	10–20	10–20	10–20
Ток ионного пучка $I_i$ , мА	20–30	50–80	100–150
Расход газа $Q$ , мПа·м <sup>3</sup> /с	0,8–1,2	0,8–1,2	0,8–1,2



В таблице 4 приведены характеристики источников газовых ионов с широкими пучками на основе:

- а) дуговых разрядов низкого давления с экранированным катодным пятном и расширенной анодной частью [19, с. 48–50];
- б) открытого разряда низкого давления с холодным полым катодом [19, с. 50–52];
- в) стационарного контрагированного дугового разряда с холодным катодом [19, с. 54];
- г) вспомогательного разряда с полым катодом и экспандером [19, с. 54–56];
- д) вспомогательного кругового разряда в стержневой структуре катодных электродов с общим полым анодом [4, с. 56–64];
- е) вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика [19, с. 64–66];
- ж) одноканального контрагированного разряда низкого давления с холодным полым катодом [19, с. 66–67];
- з) электродной системы типа «обращенный магнетрон» с цилиндрическим полым катодом с закрытыми торцами и стержневым анодом [19, с. 68–69].

Таблица 4 – Характеристики источников газовых ионов с широкими пучками

Параметр	Разрядная структура							
	а)	б)	в)	г)	д)	е)	ж)	з)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ток разряда $I_p$ , А		2			0,04–0,5	<0,5		~2
Напряжение зажигания $U_z$ , В					300–700		~400	
Напряжение горения разряда $U_p$ , В					300–700	360–390	~600	
Давление в катодной полости $p_{к.п.}$ , Па		$>4 \cdot 10^{-1}$						$\sim(4-6) \cdot 10^{-2}$
Давление в ускоряющей промежутке $p$ , Па	$8 \cdot 10^{-2}$				$\sim(2,6-6,6) \cdot 10^{-2}$	$\sim 3 \cdot 10^{-2}$		$\sim(4-6) \cdot 10^{-2}$
Ускоряющее напряжение $U_{уск.}$ , кВ		10	10	10	10	<20	4	2–3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ток ионного пучка $I_i$ , мА	>100	200	200	$j_i=0,75$ мА/см <sup>2</sup>	3–7	<70	~80	150
Расход газа $Q$ , мПа·м <sup>3</sup> /с	300		8				9	
Площадь сечения ионного пучка $S$ , см <sup>2</sup>	>100		200	80	154		125	~80

Источники ионов металлов с приемлемыми характеристиками также могут быть построены на основе отражательного разряда с холодным полым катодом. При этом зажигание и горения газового разряда происходит в парах металлов, получение которых наиболее целесообразно осуществлять с помощью испарения металла в вакууме электронным нагревом. В электродных структурах с полым катодом испарение металла происходит в катодной полости пучком электронов [19, с. 77]. В таблице 5 представлены параметры источника ионов такого типа [23].

Таблица 5 – Характеристики источника ионов металлов на основе отражательного разряда с холодным полым катодом [23]

Ускоряющее напряжение $U_{уск.}$ , кВ		10
Мощность электронного пучка $P_e$ , Вт		100
Ток разряда $I_p$ , А		0,1
Ток ионов металлов $I_i$ , мА	Zn	0,2
	Cu	0,13
	Ti	0,3
	Fe	0,25
	Sn	0,15

В работе [24] описан источник ионов металлов, в котором для испарения металлов используется электронный пучок, формируемый в плазменном источнике электронов на основе отражательного разряда с полым катодом. Характеристики данного источника ионов приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики источника ионов металлов на основе отражательного разряда с холодным полым катодом [24]

Ионы	Мощность разряда источника электронов $P_p$ , Вт	Мощность электронного пучка $P_e$ , Вт	Напряжение горения основного разряда $U_p$ , В	Ток основного разряда $I_p$ , А	Ток ионного пучка $I_i$ , мА
Zn	30	120	460	0,15	8
Cd	30	120	640	0,32	6
Sb	30	120	420	0,02	10
P	30	120	600	0,25	7
He	–	–	380	0,13	10

#### 1.4 Ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя

В ходе исследования, в качестве ориентира выходных параметров разрабатываемой конструкции предполагается взять параметры источника на основе торцевого холловского ускорителя с накальным нейтрализатором ЕНРМ-100 [22], разработанного в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники.

Источник применяется в технологии вакуумного ионно-плазменного нанесения тонких пленок и предназначен для предварительной ионной очистки, ионного ассистирования и нанесения тонкопленочных слоев методом непосредственного нанесения из ионного пучка. Принцип действия ионного источника основан на формировании высокоплотной плазмы за счет ионизации рабочего газа в тлеющем разряде в скрещенных электрическом и магнитном полях, отборе ионов с границы плазмы и их ускорении электрическим полем. Параметры источника приведены в таблице 7.

Вольтамперные характеристики разряда представлены на рисунках 3, 4. Характеристика извлечения ионов представлена на рисунке 5.

Таблица 7 – Параметры источника на основе торцевого холловского ускорителя с накальным нейтрализатором ЕНРМ-100 [22]

Анодное напряжение, В	40–300
Ток разряда, А	до 3,5
Энергия ионов, эВ	30–210
Рабочее давление, Па	0,01–0,06
Расход газа, мл/мин	5–30
Рабочие газы	Ar, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , углеводороды, хлор- и фторсодержащие газы
Нейтрализация ионного пучка	накальный W компенсатор

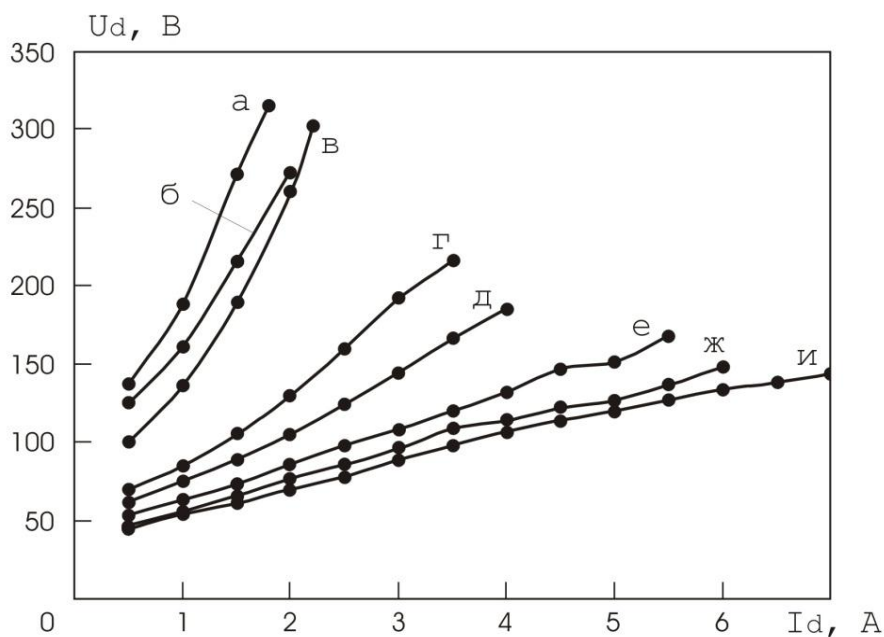


Рисунок 3 – Вольтамперные характеристики газового разряда в ионном источнике при токе накального катода – компенсатора 19 А при различном потоке рабочего газа Ar:

а – 5 мл/мин; б – 7,5 мл/мин, в – 10 мл/мин, г – 15 мл/мин, д – 20 мл/мин, е – 25 мл/мин, ж – 30 мл/мин

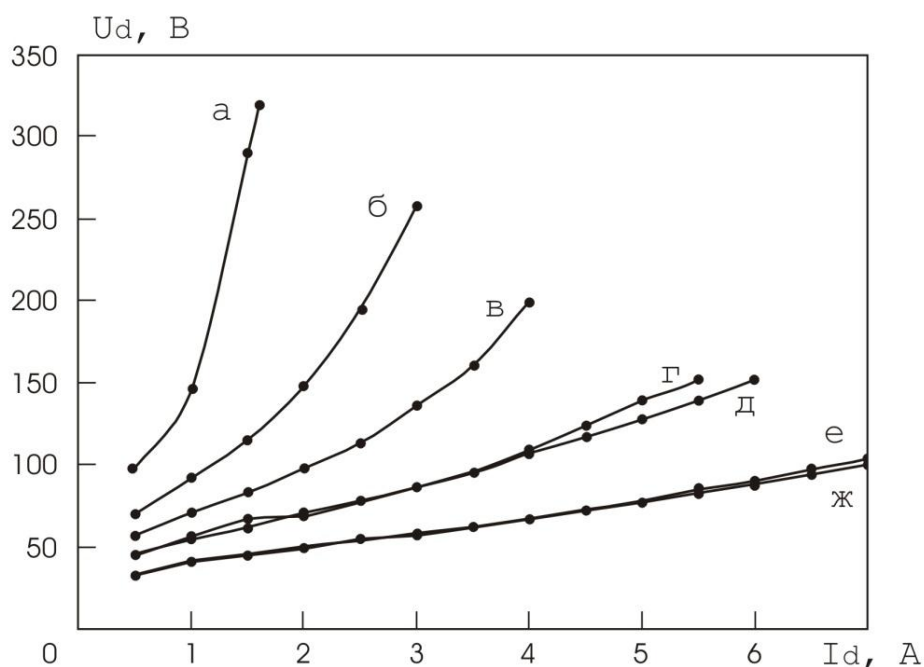


Рисунок 4 – Вольтамперные характеристики газового разряда в ионном источнике при токе накального катода – компенсатора 20 А при различном потоке рабочего газа Ar:

а – 5 мл/мин; б – 7,5 мл/мин; в – 10 мл/мин; г – 15 мл/мин;

д – 20 мл/мин; е – 25 мл/мин; ж – 30 мл/мин

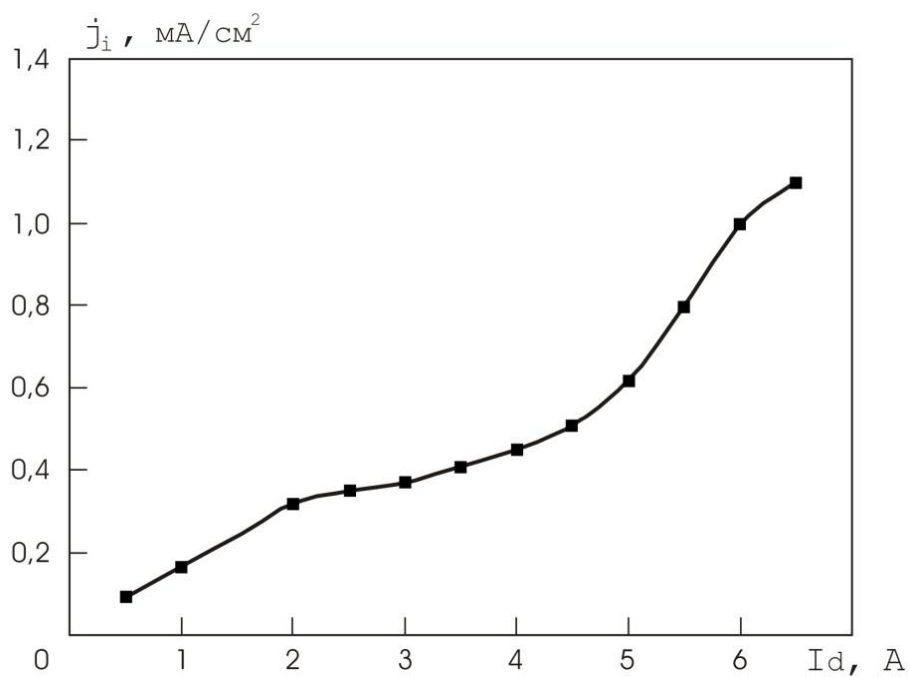


Рисунок 5 – Зависимость плотности ионного тока от тока разряда ионного источника на расстоянии 20 см от разрядной зоны ионного источника при расходе рабочего газа

Ar 20 мл/мин

Аналогичными параметрами обладает ионный источник с накаливаемым катодом (также выполняющим роль компенсатора) eH 400 фирмы Kaufman & Robinson Inc. (USA) [25]. Его основные параметры приведены в таблице 8, а вольтамперные характеристики показаны на рисунке 6.

Таблица 8 – Основные характеристики ионного источника с накаливаемым катодом eH 400 фирмы Kaufman & Robinson Inc. (USA) [25]

Напряжение разряда, В	40–300
Ток разряда, А	до 3,5
Энергия ионов, эВ	30–210
Рабочее давление, Па	0,01–0,06
Расход газа, мл/мин	5–40
Нейтрализация ионного пучка	накаливаемый катод (компенсатор)

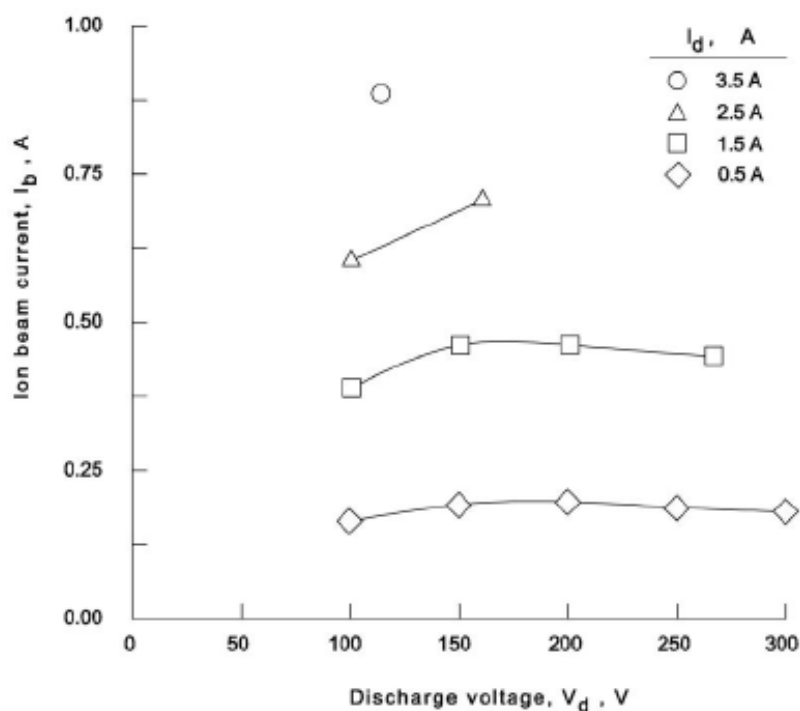


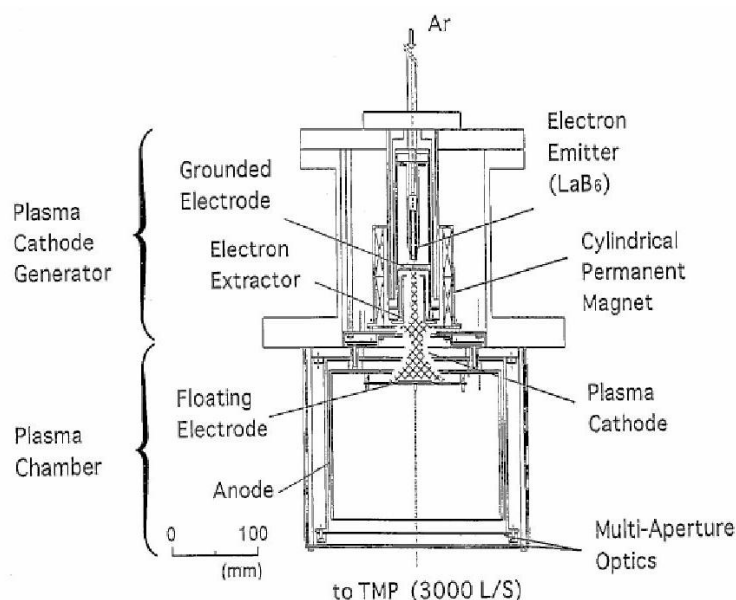
Рисунок 6 – Вольтамперные характеристики ионного источника [25] при разных токах разряда, рабочий газ – Ar

## 1.5 Конструкции плазменных источников ионов

При разработке источника предварительно, в качестве некоторого ориентира, были изучены конструктивные особенности ряда источников ионов, конструкции некоторых из них приведены ниже.

### 1.4.1 Ионный источник с плазменным катодом.

Конструкция ионного источника с плазменным катодом [26] представлена на рис. 1.9.



- 1 – заземленный электрод; 2 – электронный эмиттер; 3 – цилиндрический постоянный магнит; 4 – экстрактор электронов; 5 – плазменный катод; 6 - плавающий электрод; 7 – анод; 8 – многоапертурная оптика

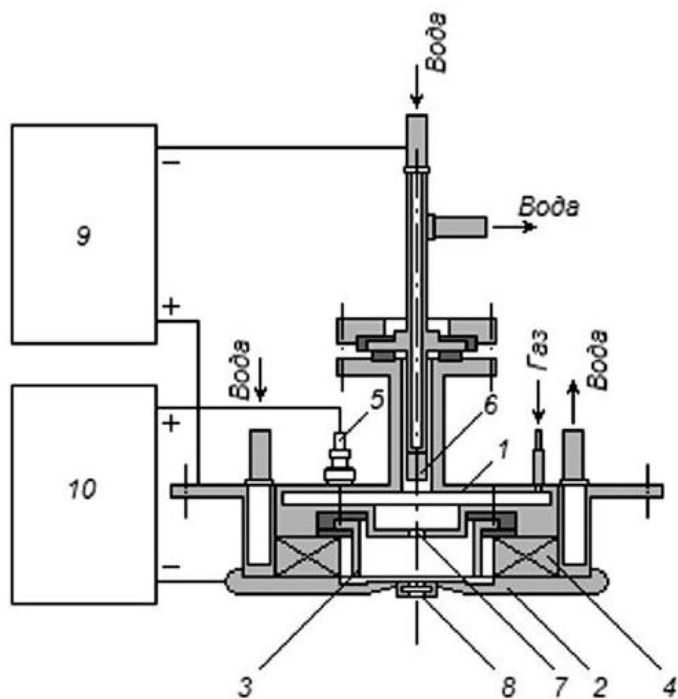
Рисунок 7 – Схема ионного источника с плазменным катодом [26]

Плазменный катод состоит из электронного эмиттера, изготовленного из  $\text{LaB}_6$ , заземленного электрода, электронного экстрактора и цилиндрического постоянного магнита. Постоянный магнит используется для создания аксиального магнитного поля, которое имеет максимум 0.1 Тл у заземленного электрода. Давление в камере плазменного катода (240 Па) намного больше, чем в рабочей камере 0,1 Па. Газ подается в ионный источник через трубчатый электронный эмиттер. Плазменный катод работает в режиме дугового разряда постоянного тока с напряжением от 30 до 40 В. Плазма создается в камере плазменного катода и перемещается в рабочую камеру за счет разницы давлений в этих камерах. Рабочая камера представляет имеет цилиндрический анод диаметром 200 мм и длиной 150 мм, электрод, находящийся под плавающим потенциалом, и многоапертурные сетки для экстракции ионов. Плавающий электрод располагается напротив плазменного катода. Электронный пучок из

плазменного катода достигает этого электрода и вызывает накопление отрицательного заряда на его поверхности. Затем электронный пучок замедляется и растекается радиально во все стороны. Положительное напряжение в диапазоне от 30 до 120 В подается на анод и в рабочей камере загорается тлеющий разряд. В результате плазма распространяется по рабочей камере с высокой однородностью.

1.4.2 Источники ионов на основе разряда с полым катодом.

Конструктивная схема источника ионов на основе разряда с полым катодом [19], представлена на рисунке 8. Отражательный разряд с полым катодом, характеризующийся свойствами аномального тлеющего разряда, возбуждается в разрядной камере, образованной катодами 1 и 2 с осевыми отверстиями  $\varnothing 8$  мм и цилиндрическим медным анодом 3 с отверстием  $\varnothing 16$  мм и длиной 12 мм. Расстояние между отражательным и полым катодами 10 мм. Катоды 1 и 2, изолированные от анода 3 фторопластовыми прокладками, изготовлены из магнитной стали и служат полюсными наконечниками кольцевого магнита 4. Продольное магнитное поле в анодной полости с индукцией 0,1 Тл создается кольцевым постоянным ферритовым магнитом 4. Нагрев катодов и магнита снижается теплоотводом к медному корпусу разрядной камеры, охлаждаемому проточной водой. Анод 3 соединяется внутренним разъемом с внешним электрическим разъемом 5.



1 – полый катод; 2 – отражательный катод; 3 – анод; 4 – постоянный кольцевой магнит; 5 – внешний электрический разъем; 6 – мишень; 7 – отверстие в полем катоде; 8 – катодная вставка; 9,10 – высоковольтные источники питания

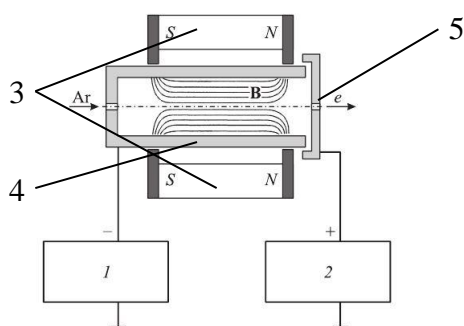
Рисунок 8 – Конструктивная схема ионного источника [19]



В центре дна полого катода 1, на изолированном от катода держателе, установлена охлаждаемая водой плоская графитовая мишень 6 диаметром 6 мм. Расстояние между плоскостью дна полого катода и мишенью 4 мм. Катодная полость сообщается с анодной полостью через отверстие 7 Ø4 мм. В осевом отверстии катода 2 крепится катодная вставка 8 в форме тора Ø8 мм с проходными отверстиями Ø3,5 мм, образующая эмиссионный канал.

#### 1.4.3 Источники ионов на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях.

Схема источника ионов на основе разряда в скрещенных  $E \times H$  полях (ЕНРМ-100 [22]) приведена на рисунке 9. Разрядная камера представляет собой водоохлаждаемый катодный узел с магнитной системой. Магнитная система на постоянных магнитах формирует внутри разрядной камеры магнитное поле, силовые линии которого направлены параллельно поверхности катода. В разрядную камеру катодного узла устанавливаются трубчатые катоды. Одна из боковых стенок камеры является анодом. Анод источника изолирован от катода и находится под нулевым потенциалом.



1 – блок питания катода; 2 – блок питания анода; 3 – постоянные магниты; 4 – катод; 5 – анод;

Рисунок 9 – Конструкция плазменного источника ионов на основе разряда в скрещенных  $E \times H$  полях (ЕНРМ-100 [22])

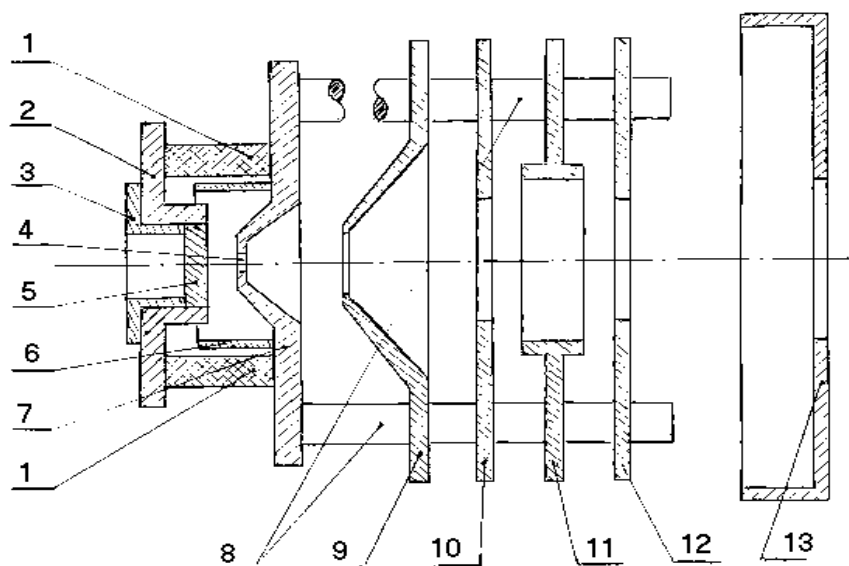
Работа источника основана на ионизации атомов в разряде с холловским током в скрещенных  $E \times H$  полях. Рабочий газ подается в квазизамкнутый объем разрядной камеры источника ионного пучка. При этом возникает существенный градиент давления между разрядной камерой и вакуумным объемом. Подобная компоновка минимизирует влияние внешних факторов на генерацию заряженных частиц. Электроны, эмитируемые из катода под действием ионной бомбардировки и возникающие в результате ионизации атомов рабочего газа, захватываются магнитным полем и совершают движение по замкнутым циклоидальным траекториям. Степень ионизации плазмы возрастает за счет резкого увеличения интенсивности электрон-атомного взаимодействия вследствие замагничивания электронов. Образующиеся в результате ионизации ионы ускоряются и бомбардируют поверхность катода. При этом происходят распыление материала катода и ионно-электронная эмиссия. Распыленный поток

переосаждается на стенки катода. Небольшая апертура эмиссионного отверстия в аноде практически исключает загрязнение растущей пленки. Для формирования потока электронов используется положительно смещенный дополнительный электрод или пространственный заряд ионного источника.

#### 1.4.4 Плазменный источник ионов на базе модифицированной газоразрядной камеры Пеннинга.

Источники этого типа называются РІГ-источниками (Пеннинговский ионизатор газа), в них возбуждается отражательный разряд, впервые применённый Пеннингом и названный в его честь. Существует достаточно большое разнообразие их конструкций, что обусловлено использованием такого типа источников для решения многих задач в инжекторах ускорителей и технологических установках для формирования пучков лёгких и тяжёлых ионов как однозарядных, так и многозарядных, ленточных и аксиально-симметричных. РІГ-источники бывают как с накаливаемыми катодами, так и холодными, поэтому в них могут возбуждаться как дуговые, так и тлеющие разряды.

Конструкция ионного источника [27], формирующего смешанные пучки ионов газа и металла показана на рисунке 10.



- 1 – керамический изолятор; 2 – катодный блок; 3 – держатель диска-катода; 4 – эмиссионное отверстие; 5 – катод-диск; 6 – экран изолятора; 7 – анод; 8 – керамические стержни; 9 – ускоряющий электрод; 10 – замедляющий электрод (заземленный электрод линзы); 11 – центральный (фокусирующий) электрод одиночной электростатической линзы; 12 – заземленный электрод линзы; 13 – экран

Рисунок 10 – Конструкция РІГ-источника [27]

Он состоит из двух основных узлов:

- генератора плазмы, способного генерировать ионы, как из газообразных веществ, так и из мишеней твёрдых элементов (металлов и металлоидов);
- системы отбора и первичного формирования ионного пучка, обеспечивающей возможность изменять энергию ионов в пучке в широком диапазоне без изменения интенсивности ионного потока.

Генератор плазмы представляет собой цилиндрическую газоразрядную камеру, расположенную между плоским катодным блоком и конусообразным анодом. Анод также выполняет роль эмиссионного электрода, в центре которого расположено эмиссионное отверстие диаметром 3мм. Эта газоразрядная ячейка помещена в магнитное поле со сходящимися силовыми линиями к катоду, силовые линии которого расходятся от катода к аноду. Катодный блок (2) включает в себя: контейнер - держатель (3), находящийся в центре катодного блока и выдвинутый в глубь газоразрядной камеры; диск из распыляемого рабочего вещества (5), вставляемый в контейнер; систему напуска рабочего газа и измерения вакуума в камере источника. Изолятор (1), изолирующий катод от анода, защищён экраном (6) от покрытия плёнками распыляемого вещества.

К аноду (эмиссионному электроду) (7) газоразрядной ячейки присоединяется соосная с ним ионно-оптическая система ускорения - замедления (ИОС-УЗ). Анод и первый электрод ИОС-УЗ (9) образуют ускоряющий зазор (высоковольтный промежуток). Используемая трехэлектродная ИОС-УЗ, состоит из четырех элементов в виде металлических дисков, собранных на диэлектрических стержнях (8). Первый диск является ускоряющим электродом (экстрактором) (9). Второй - замедляющим электродом (10). Он также выполняет роль первого крайнего электрода одиночной электростатической линзы. Третий диск, является центральным (фокусирующим) электродом (11) одиночной электростатической линзы. Четвертый диск - последний крайний электрод (12) этой линзы. Экран (13), помещённый между последним электродом линзы и мишенью, разделяет вакуумную камеру на две области, с целью уменьшения влияния обратных потоков газа и распыляемых частиц.

Отличительной особенностью, описанной выше конструкции, является отсутствие антикатада, роль которого выполняет открытая эмиссионная граница плазмы, располагающаяся в промежутке между анодом и экстрактором. При работе в непрерывном режиме из источника можно было сформировать поток ионов с интенсивностью в несколько миллиампер, а в импульсных режимах интенсивность пучка возрастала примерно на порядок.

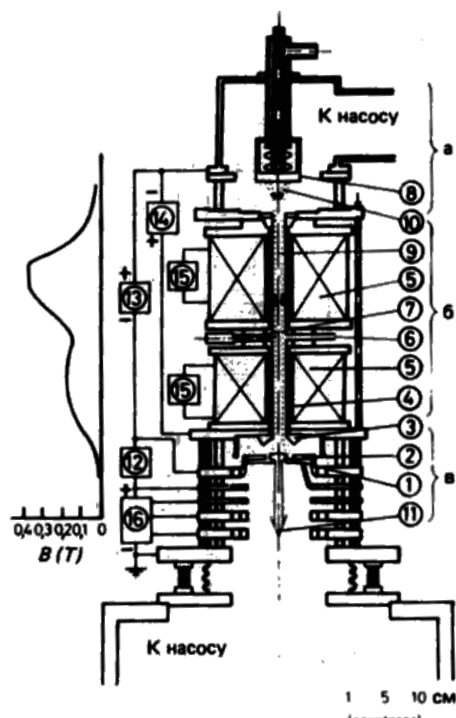
#### 1.4.5 Пучково-плазменные ионные источники

Существуют два типа ионных источников, в которых плазма создается управляемым электронным пучком с энергией в несколько килоэлектронвольт. Первый тип – это ионные источники на электронных пучках для создания многозарядных ионов [5, 10-13]. Такие ионные источники функционируют при очень низких давлениях газа. Электронный пучок создает ионы путем ударной ионизации и не взаимодействует с возникающей плазмой. В основу ионных источников второго типа положен механизм ионизации путем пучково-плазменного разряда, предложенный в [19, 24, 28].

В пучково-плазменном ионном источнике электронный пучок эффективно используется в двух целях: для создания плотной плазмы с помощью пучково-плазменного разряда и вытягивания сильноточного ионного пучка с компенсацией объемного заряда ионов. Плазма сильноточного ионного источника должна иметь как высокую плотность плазмы, так и высокую температуру электронов, поскольку ионный ток насыщения пропорционален произведению плотности плазмы на корень квадратный из электронной температуры. В то же время ионная температура должна быть низкой, чтобы получить ионный пучок с низким значением эмиттанса. Для этих целей в источнике используется комбинация микроволнового разряда и электронно-циклотронного резонанса при создании плазмы ионного источника. Для реализации эффективных условий создания плазмы в некоторой области камеры происходит как генерация микроволн, так и ионизация нагретыми электронами. При помощи пучково-плазменного взаимодействия микроволновое излучение, мощность которого достаточна для создания плазмы ионного источника, может генерироваться внутри самой плазмы, если определенные параметры электронного пучка и области взаимодействия согласованы. Такой тип плазмы называют пучково-плазменным разрядом [13].

При отборе ионов из плотной плазмы влияние объемного заряда ионов препятствует извлечению сильноточного ионного пучка. Поэтому ионный ток в несколько сотен миллиампер обычно не может быть получен с помощью одиночного отверстия с ускоряющим напряжением в несколько киловольт. Один из методов решения этой проблемы – компенсация объемного заряда ионов с помощью внесения объемного электронного заряда в область извлечения [10-12]. С этой целью пучок первичных электронов инжектируется в плазму со стороны ускоряющего электрода, а обратный поток термализованных вторичных электронов втягивается в область извлечения ионов. В этом случае ионный ток, в несколько десятков раз превышающий обычный ток, ограниченный объемным зарядом, может быть получен с помощью одиночного отверстия при условии компенсации объемного заряда ионов.

На рисунке 11 представлена конструкция пучково-плазменного ионного источника [12].



а – область коллектора электронного пучка;  
 б – дрейфовый промежуток;  
 в – область извлечения ионов и электронная пушка;

1 – катодная нить канала; 2 – электрод, вытягивающий ионы; 3 – расширительная чаша для плазмы (анод); 4 – дрейфовая труба; 5 – соленоид; 6 – щель для инъекции газа; 7 – зонд; 8 – коллектор; 9 – пучок первичных электронов; 10 – пучок вторичных электронов; 11 – ионный пучок; 12 – источник питания катода; 13 – источник питания для ускорения пучка первичных электронов; 14 – источник питания для ускорения пучка вторичных электронов; 15 – источник питания соленоида; 16 – источник питания для ускорения ионов

Рисунок 11 – Схема пучково-плазменного ионного источника [12]

## 2. АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОВМЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ ПУЧКОВ

На основе проведенного анализа были установлены три возможных и принципиально отличающихся способа реализации компенсации заряда пучков распыляющих ионов на распыляемой поверхности электронами.

Первый заключается в том, что распыляемая мишень облучается одновременно ионным и электронным пучками, генерируемыми независимыми источниками ионов и электронов, использующими независимые системы электропитания и управления. В известных случаях реализации такого способа ионный пучок генерируется системой с плазменным эмиттером ионов на основе газового разряда, а электронный пучок генерируется системой на основе термоэмиссии (с термокатодом) [5, 10, 12].

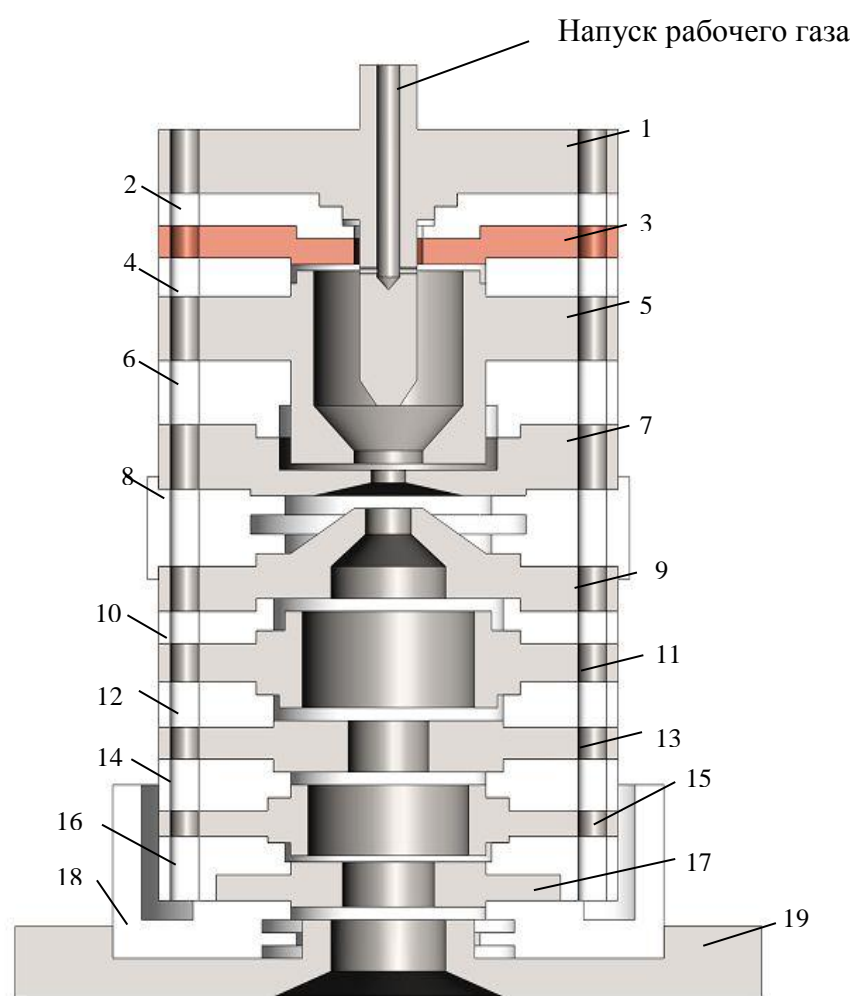
Второй способ заключается в поочередно-периодическом воздействии на распыляемую мишень ионного и электронного пучков. Этот способ основан на использовании способности плазменного эмиттера эмитировать как ионы, так и электроны в зависимости от полярности ускоряющего заряда напряжения. При этом частота переменного ускоряющего напряжения в электронно-ионной оптической системе с плазменным эмиттером определяется, в основном, как показали известные примеры использования этого способа [29-31], временем формирования условий на мишени для образования микродуг, и в зависимости от распыляемого материала обычно должна быть в диапазоне от единицы до десятков килогерц. Таким образом, второй способ может быть реализован на основе единой ионно-электронной оптической структуры [14-16, 32].

Третий возможный, но практически не исследованный способ заключается в том, что электронный и ионный пучки формируются в единой мультиразрядной структуре, не содержащей накаливаемых элементов. При этом взаимосвязь раздельно управляемых разрядов в структуре должна способствовать повышению степени ионизации газа при пониженном давлении, а также формированию в плазме двойных электрических слоев, обеспечивающих образование в единой структуре совмещенных ионно-электронных потоков.

Можно представить несколько типов устройств для реализации этого (третьего) способа формирования совмещенных ионно-электронных пучков. Далее (на рисунках 12-14) представлены три частные схемы электродных структур таких устройств и предполагаемые принципы их действия.

На рисунке 12 показана схема электродной структуры для формирования последовательно (вдоль оси) двух плазменных эмиттеров: электронного и ионного. Плазма, через часть поверхности которой осуществляется отбор (эмиссия) электронов, формируется в объеме,

ограниченном внутренними поверхностями стержневого катода 1, цилиндрического катода 5, вспомогательного анода 3 и основного анода 7. Указанные электроды разделены изоляторами 2, 4 и 6. Катоды 1 и 5 являются наконечниками постоянного магнита, создающего между ними магнитное поле, которое способствует осцилляции вторичных  $\gamma$ -электронов с катодов в пространство формирования плазмы. Электроды 7 и 9 образуют промежуток ускорения электронов, где формируется поверхность плазмы, эмитирующая электроны. Изолятор 8 должен быть рассчитан на напряжение, на 50-100 В превышающее напряжение ускорения ионного пучка. Это напряжение по величине более 2-3 кВ использовать нецелесообразно, так как интенсивность распыления материалов ионами с дальнейшим его увеличением возрастает незначительно.



- 1 – стержневой катод; 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 – изоляторы; 3 – вспомогательный анод;  
 5 – цилиндрический катод; 7 – основной анод; 9,13,17 – катоды; 11, 15 – аноды;  
 19 – ускоряющий электрод

Рисунок 12 – Электродная структура для формирования последовательно (вдоль оси) двух плазменных эмиттеров: электронного и ионного

Электроды 9, 11, 13, 15 и 17 образуют газоразрядную структуру, формирующую плазму, являющуюся источником распыляющих ионов. Эта структура состоит из двух соединенных последовательно (вдоль оси) газоразрядных ячеек «пеннинговского» типа. Элементы этой структуры 10, 12, 14 и 16 являются соответствующими изоляторами; элементы 11 и 15 являются анодами разрядных ячеек; элементы 9, 13 и 17 – катодами, которые одновременно являются полюсными наконечниками постоянных магнитов, обеспечивающих осцилляцию электронов между катодами этой (второй) газоразрядной структуры. Одновременно с этим магнитное поле, формируемое катодами 9, 13 и 17 образует некоторую магнитную фокусирующую систему для ускоренного электронного пучка, распространяющегося вдоль оси этой (второй) газоразрядной структуры до выхода из источника ионно-электронного пучка в технологическую камеру.

Между электродами 17 и 19 прикладывается напряжение, ускоряющее ионы до требуемой технологией энергии распыляющих ионов. Одновременно в этом же промежутке между электродами 17 и 19 осуществляется торможение пучка электронов, ускоренных в промежутке между электродами 7 и 9. Эмитирующая ионы поверхность плазмы, формирующаяся между электродами 17 и 19, определяет траектории как ионов, так и электронов в пространстве дрейфа электронно-ионного пучка до распыляемой мишени, а значит и определяет распределение плотностей ионного и электронного тока по поверхности мишени.

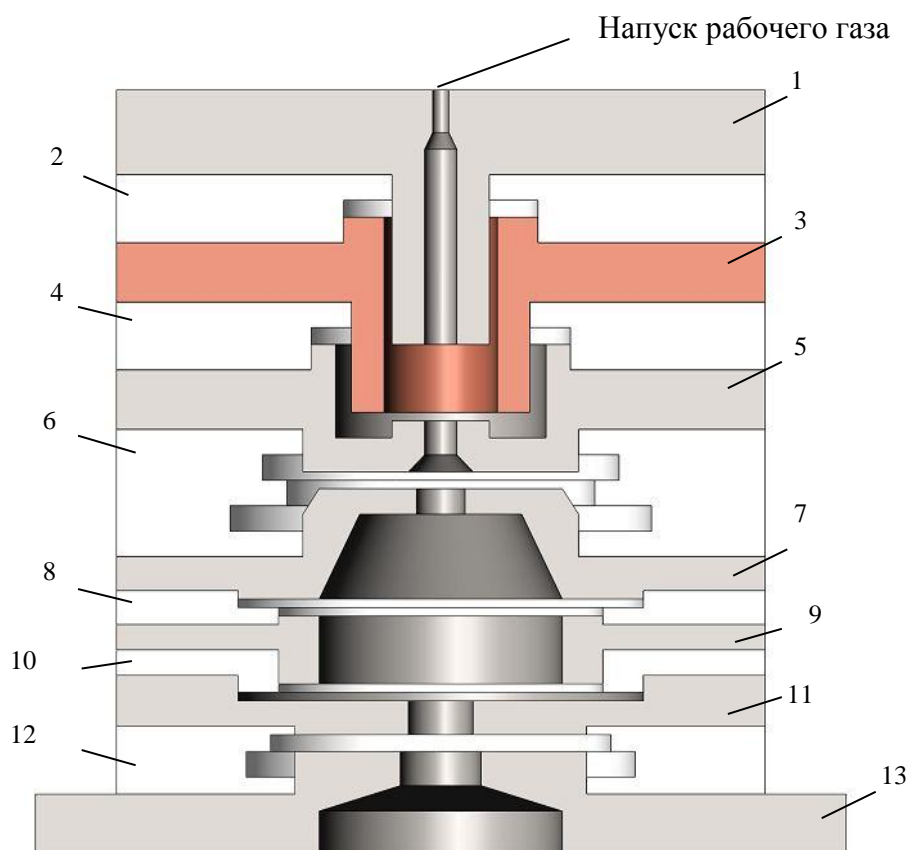
Напуск рабочего газа в ионно-электронный источник осуществляется через отверстия в катоде 1, а откачка газа из источника – через отверстие в электроде 19. Формирующийся поток газа создает во всей электродной структуре 1 – 19 источника определенное распределение давления газа, зависящее как от потока напускаемого газа, так и отдаваемое в технологической камере. Последнее определяет также длину дрейфа ионного пучка в технологической камере с приемлемой потерей энергии и импульса пучка ионов.

При давлении в технологической камере порядка  $10^{-2}$  Па приемлемая длина дрейфа ионно-электронного пучка составляет около 0,1 – 0,2 метра, что обычно достаточно и для технологических целей. Оценочные расчеты показали, что при таком давлении в технологической камере ( $10^{-2}$  Па) давление в верхней части второй газоразрядной структуры достигает величины порядка  $10^{-1}$  Па. Можно предполагать, что при таком давлении во второй газоразрядной структуре необходимые параметры электронного пучка из первой газоразрядной структуры (электроды 1 – 8) будут определяться не только условиями заряда мишени ионным пучком источника, но и условиями инициирования разряда во второй разрядной камере и достижения в ней необходимых параметров плазмы.

На рисунке 13 показана электродная структура источника с совмещенным ионным и электронным пучками, отличающаяся от предыдущей структуры (рисунок 12), тем, что в



первой газоразрядной ячейке для формирования эмитирующей плазмы реализуется отражательный разряд пеннинговского типа с полым катодом. Эта ячейка образована полым катодом 1, анодом 3 и катодом 5. Катоды 1 и 5 одновременно являются полюсными наконечниками постоянного магнита и формируют в разрядной ячейке магнитное поле с осевой магнитной индукцией. Этот тип разряда достаточно хорошо изучен и применяется эффективно в плазменных источниках электронов и ионов.



1 – полый катод; 2, 4, 6, 8, 10, 12 – изоляторы; 3, 9 – аноды; 5, 7, 11 – катоды;  
13 – ускоряющий электрод

Рисунок 8 – Электродная структура источника с совмещенным ионным и электронным пучками и с использованием эффекта полого катода в разрядах

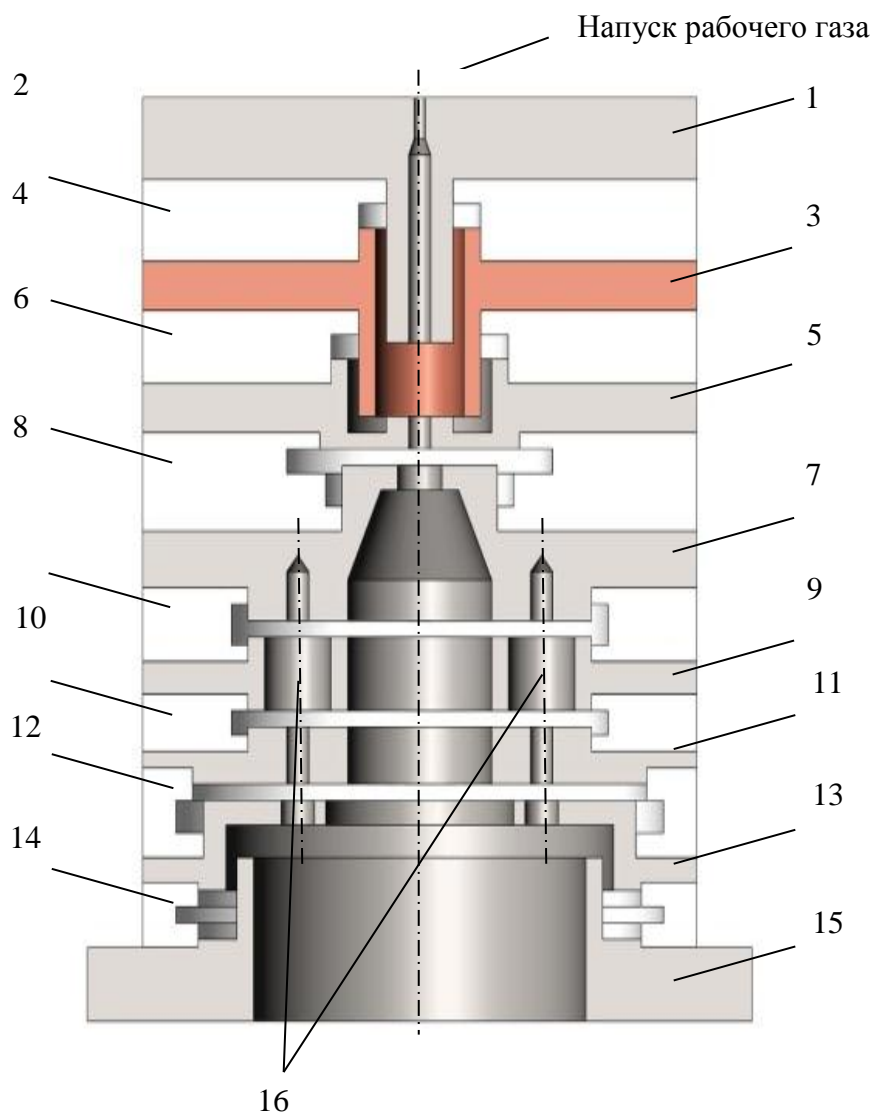
Вторая газоразрядная ячейка также является модифицированной ячейкой пеннинговского типа и образована катодами 7, 11 и анодом 9. Катоды 7 и 11 являются также полюсными наконечниками постоянного магнита, формирующими магнитное поле в ячейке с осевой индукцией. Применение естественной газоразрядной ячейки для формирования второго

плазменного объема (в отличие от структуры, представленной на рисунке 12), обусловлено тем, что из первого плазменного объема (отражательного разряда с полым катодом) будет осуществляться отбор ионов и с помощью ускоряющего электрода 7 формироваться ионный пучок, часть которого будет использована для инициирования разряда во второй разрядной ячейке с постоянным давлением газа, а другая часть ионов пучка, пройдя через систему электродов 7, 9, 11, 13 попадет на распыляемую мишень. При этом длина дрейфа ионного пучка возрастает (в сравнении с источником (рисунок 12)) и возникает необходимость его сокращения, в частности за счет уменьшения осевой длины второго плазменного образования, которое в источнике рассматриваемого типа является эмиттером электронов. Ускорение электронного пучка осуществляется электродом 13.

Элементы 2, 4, 6, 8, 10 и 12 являются изоляторами между электродами источника. Изолятор 6 должен выдерживать приложение к электродам 5 и 7 полного ускоряющего ионы пучка напряжения. Очевидно, что рассмотренная электродная структура (рисунок 13) может работать и по принципу, рассмотренному для электродной структуры (рисунок 12). В этом случае изолятор 12 должен быть таким же высоковольтным, как и изолятор 6.

На рисунке 14 показана одна из возможных схем электродной структуры ионно-электронного источника с параллельным относительно оси источника расположением и не связанных между собой (как в источниках на рисунках 12 и 13) газоразрядных объемов, эмитирующих электроны и ионы. Смешивание электронного и ионного пучков в этом источник должно происходить во внутреннем объеме электрода 15 и в области дрейфа пучка от источника до распыляемой мишени под действием радиальной компоненты напряженности электрического поля, обеспечиваемой электродами 13 и 15, а также объемным зарядом ионного пучка.

Электродная структура, включающая полый катод 1, анод 3 и катод 5, образует газоразрядную ячейку пеннинговского типа с полым катодом и обеспечивает эмиссию ионов в ускоряющий промежуток между катодом 5 и ускоряющим электродом 7. Давление газа в области осевых отверстий в электродах 7, 9, 11, и 13 вследствие их достаточно большого диаметра оказывается почти таким же низким, как и в технологической камере. Поэтому предполагается, что плазма в этой области практически не образуется и внутренние стенки осевых отверстий в электродах 7, 9 и 11 образуют электростатическую линзу, оказывающую некоторое фокусирующее действие на ионный пучок и ограничивающую расходимость пучка.



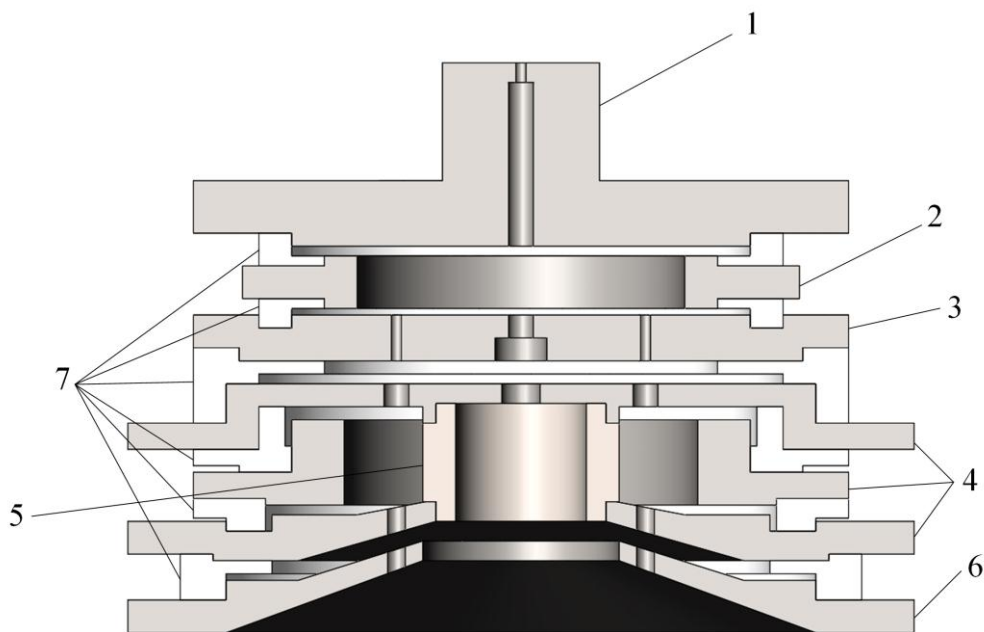
1 – полый катод; 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 – изоляторы; 3 – анод; 5 – катод; 7 – ускоряющий электрод;  
 9, 11, 13, 15 – электроды, формирующие магнитную фокусирующую систему,  
 16 – газоразрядные ячейки

Рисунок 14 – Электродная структура ионно-электронного источника с параллельными (относительно оси источника) не связанными между собой газоразрядными объемами, эмитирующими электроны и ионы

Кроме этого, периферийные отверстия в электродах 7, 9 и 11 образуют газоразрядные ячейки 16 пеннинговского типа, расположенные соосно с главной осью источника равномерно по окружности вокруг главной оси. В масштабе, использованном в рисунке 14, их количество может достигать десяти. Электроды 7 и 11 являются, как и электроды 1, 5 полюсными наконечниками постоянных магнитов.

Эта мультячейчатая газоразрядная структура обеспечивает эмиссию электронов в ускоряющие их промежутки между электродами 11 и 13. После ускорения дискретные электронные пучки смешиваются благодаря электрическим полям с ионным пучком. При необходимости в реальных источниках ионно-электронного пучка может быть использована отдельная система напуска рабочего газа в мультячейчатую разрядную систему, а также электромагнитная система, установленная ниже электрода 15, для управления и оптимизации смешивания дискретных электронных пучков с ионным, в частности по распределению плотностей ионного и электронного тока на мишени.

Электродная структура, подобная изображенной на рисунке 14, но с взаимной связью всех возбуждаемых в ней разрядов, показана на рисунке 15. В этой структуре взаимосвязь разрядов обеспечивается модификацией полого катода 1 (рисунок 14) как показано на рисунке 15.

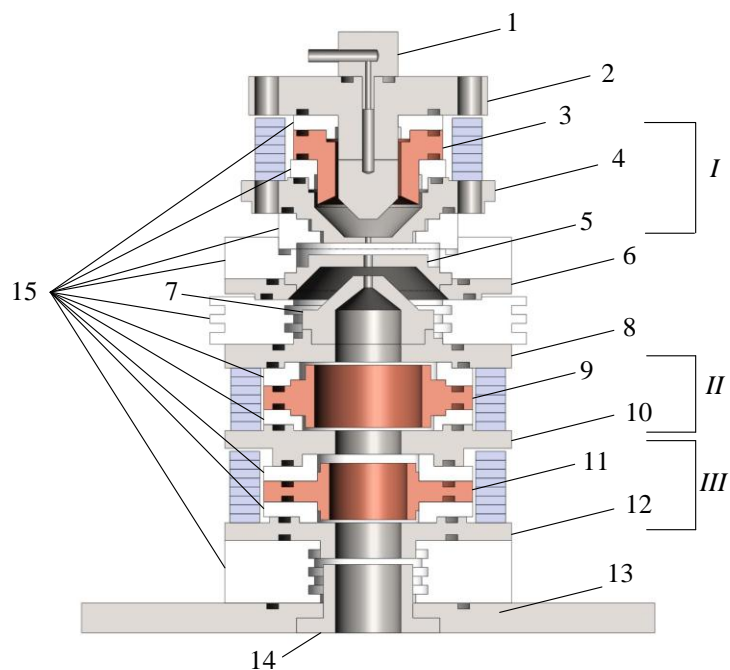


1 – полый катод; 2 – главный анод; 3 – отражательный катод; 4 – вспомогательные катоды;  
5 – вспомогательный анод; 6 – ускоряющий электрод; 7 - изоляторы

Рисунок 15 – Электродная структура ионно-электронного источника с параллельными (относительно оси источника) связанными между собой газоразрядными объемами, эмитирующими электроны и ионы

### 3. ВНЕШНИЙ ВИД РАЗРАБОТАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

На рисунках 15 – 17 представлен эскизы конструкций и внешний вид разработанных источников заряженных частиц [33-35] в соответствии с предложенными эскизами разрядных систем:



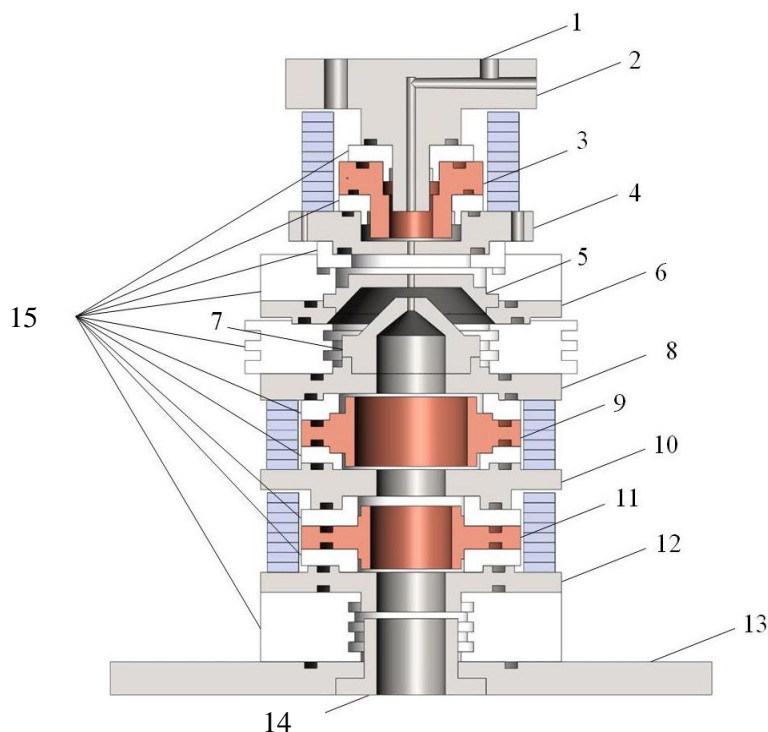
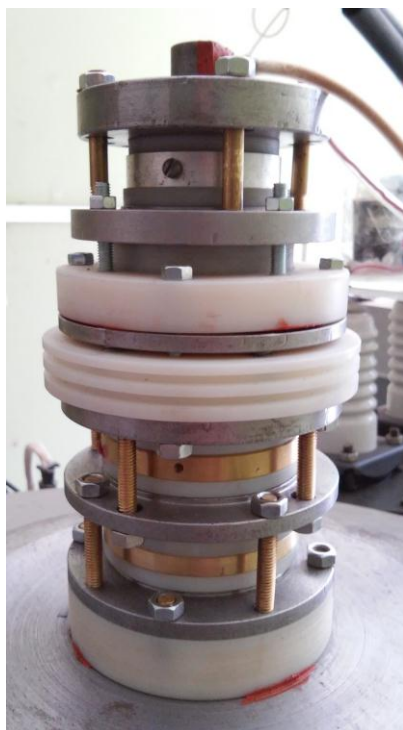
1 – штуцер для напуска плазмообразующего газа; 2 – внутренний катод; 3 – главный анод; 4 – внешний катод; 5 – эмиттерный электрод; 6 – вспомогательный анод; 7 – ускоряющий электрод; 8, 10, 12 – катоды; 9, 11 – аноды; 13 - фланец для установки структуры на рабочую камеру; 14 – согласующий электрод; 15 – изоляторы; *I*, *II*, *III* – области разрядных камер

Рисунок 15 – Внешний вид и внутренняя структура разработанного макета электронно-ионного источника со скрещенными  $E \times H$  полями

Разработанный макет электронно-ионного источника представляет собой генератор эмиттирующей плазмы, формируемой в объеме, ограниченном внутренними поверхностями катодов 2 и 4, анода 3 и эмиттерного электрода 5 (разрядная камера *I*). Электроды 6 и 7 образуют промежуток ускорения электронов, где формируется поверхность плазмы, эмиттирующая электроны. Электроды 8-12 образуют газоразрядную структуру, формирующую плазму, являющуюся источником распыляющих ионов. Эта структура состоит из двух соединенных последовательно (вдоль оси) газоразрядных ячеек «пеннинговского» типа (*II* и *III*). Элементы этой структуры 9 и 11 являются анодами разрядных ячеек; элементы 8, 10 и 12 – катодами, которые одновременно являются полюсными наконечниками постоянных магнитов, обеспечивающих

осцилляцию электронов между катодами этой (второй) газоразрядной структуры. Одновременно с этим магнитное поле, формируемое катодами 8, 10 и 12 образует некоторую магнитную фокусирующую систему для ускоренного электронного пучка, распространяющегося вдоль оси этой (второй) газоразрядной структуры до выхода из источника ионно-электронного пучка в технологическую камеру. Между электродами 12 и 14 прикладывается напряжение, ускоряющее ионы до требуемой технологией энергии распыляющих ионов. Одновременно в этом же промежутке между электродами 12 и 14 осуществляется торможение пучка электронов, ускоренных в промежутке между электродами 6 и 7. Эмитирующая ионы поверхность плазмы, формирующаяся между электродами 12 и 14, определяет траектории как ионов, так и электронов в пространстве дрейфа электронно-ионного пучка до распыляемой мишени, а значит и определяет распределение плотностей ионного и электронного тока по поверхности мишени.

Конструкция, представленной на рисунке 16, отличается от конструкции, представленной на рисунке 15 тем, что в качестве генератора эмитирующей электроны плазмы применена структура с полым катодом:

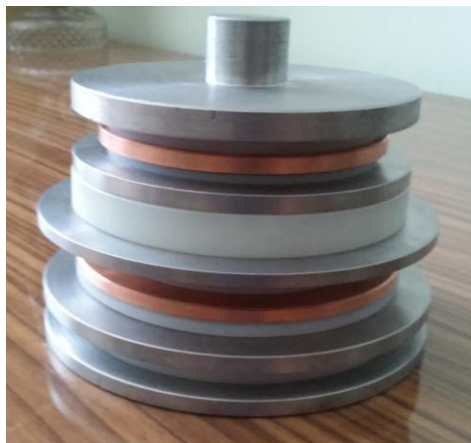


1 – канал для напуска плазмообразующего газа; 2 – полый катод; 3 – главный анод; 4 – отражательный катод; 5 – эмиттерный электрод; 6 – вспомогательный катод; 7 – ускоряющий электрод; 8, 10, 12 – катода; 9, 11 – аноды; 13 – фланец для установки структуры на рабочую камеру; 14 – согласующий электрод; 15 – изоляторы

Рисунок 16 – Внешний вид и внутренняя структура разработанного макета

электронно-ионного источника с полым катодом

На рисунке 17 показан внешний вид конструкции ионно-электронного источника с параллельным относительно оси источника расположением и не связанных между собой (рисунок 14) газоразрядных объемов, эмитирующих электроны и ионы.



1 –полый катод; 2 – главный анод; 3 – отражательный катод; 4 – вспомогательные катоды; 5 – вспомогательный анод; 6 – ускоряющий электрод; 7 – изоляторы

Рисунок 17 – Внешний вид конструкции ионно-электронного источника с параллельными связанными между собой газоразрядными объемами, эмитирующими электроны и ионы (электродная структура приведена на рисунке 14)

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В РАЗРАБОТАННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

В электронной оптике потоки заряженных частиц формируются с помощью электрических и магнитных полей, которые могут быть созданы с помощью диафрагм и фокусирующих систем – электростатических и магнитных линз [36-38]. Фокусирующая система в разрабатываемом источнике реализуется за счет конфигурации электродов и наличия постоянных магнитов в конструкции. Поскольку в конструкциях применяются цилиндрические электроды, формируемые поля обладают полной аксиальной симметрией.

Ниже, на рисунках 18 – 23 представлено распределения магнитных полей в разработанных структурах, проведенный с использованием пакета прикладных программ ELCUT [39], который обеспечивает решение уравнения Лапласа в системе с электродами заданной геометрии и с заданными потенциалами.

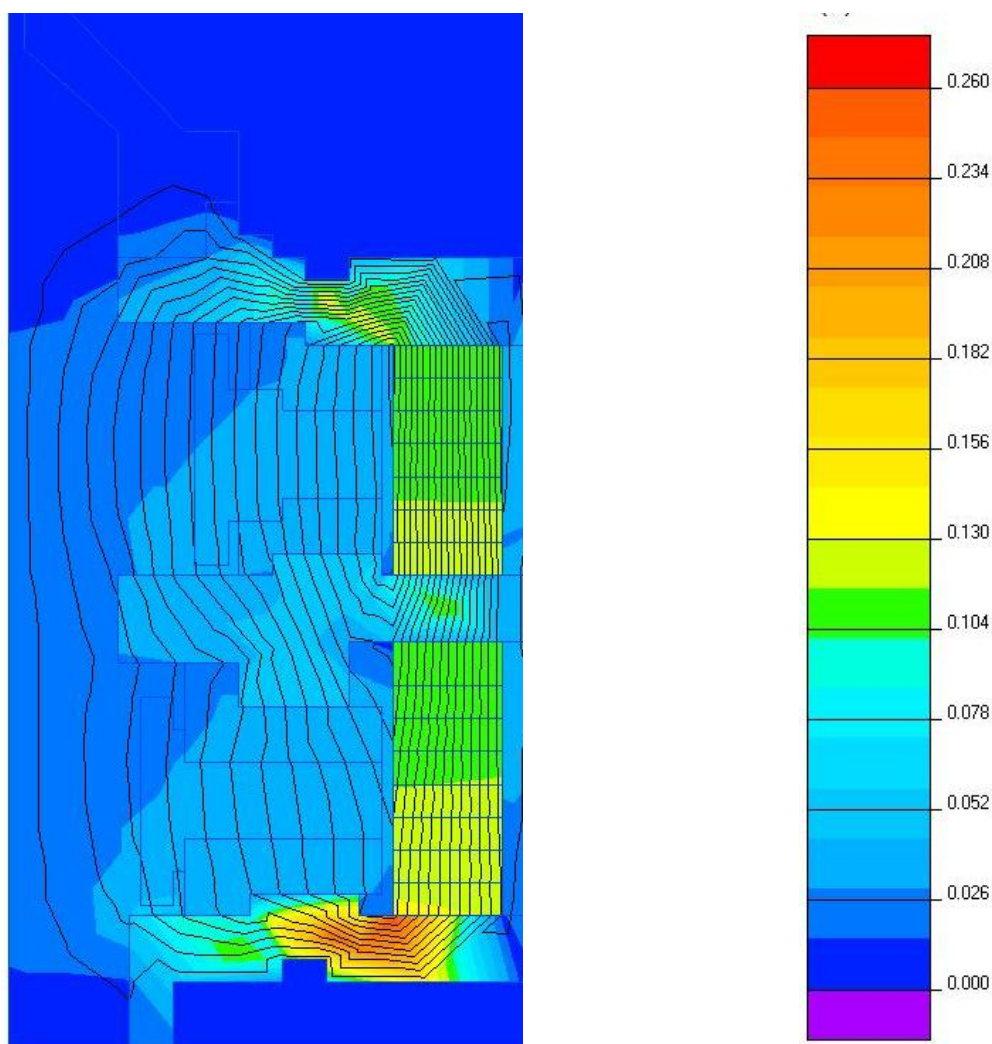


Рисунок 18 – Распределение индукции магнитного поля (Тл) в структуре, представленной на рисунке 15



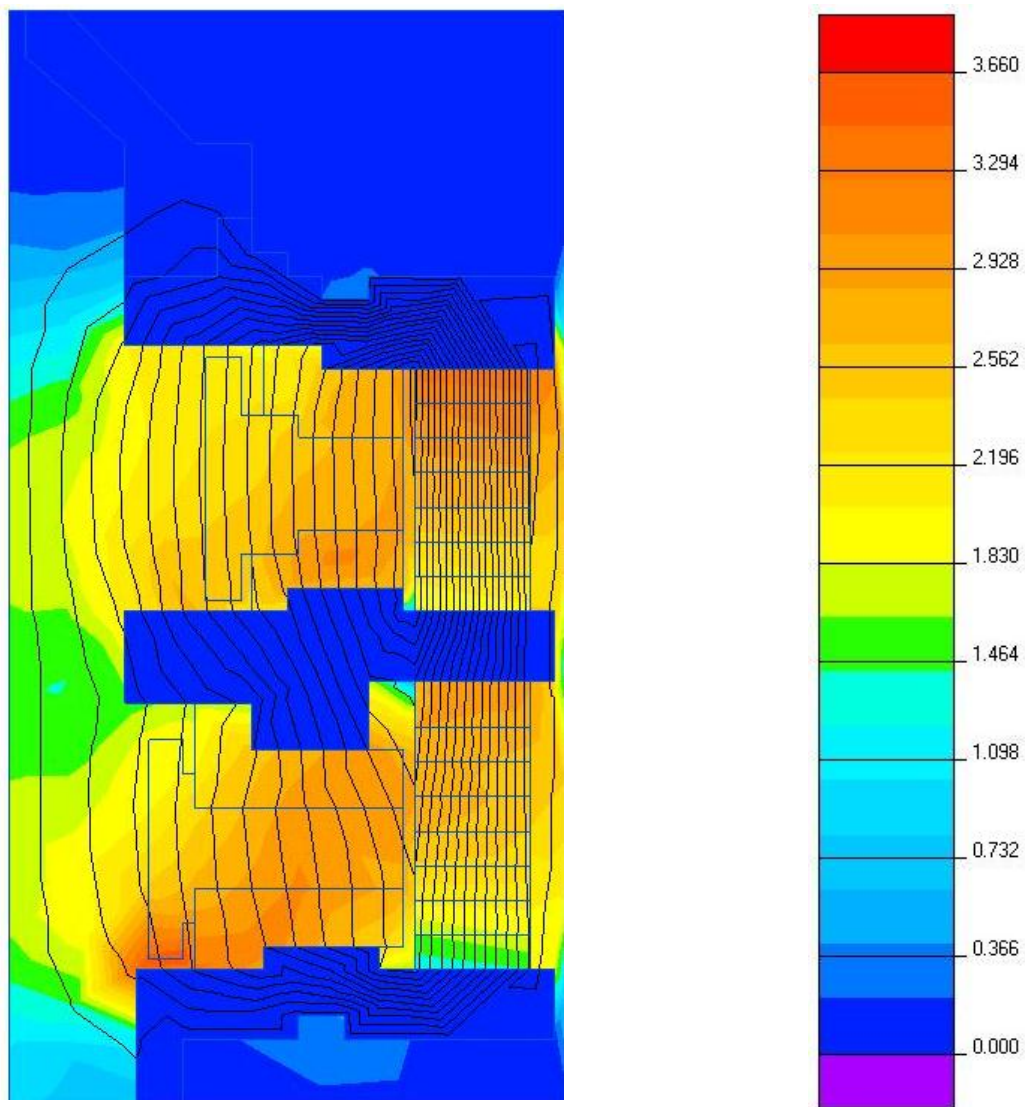


Рисунок 18 – Распределение напряженности магнитного поля ( $10^4$  А/м) в структуре, представленной на рисунке 15

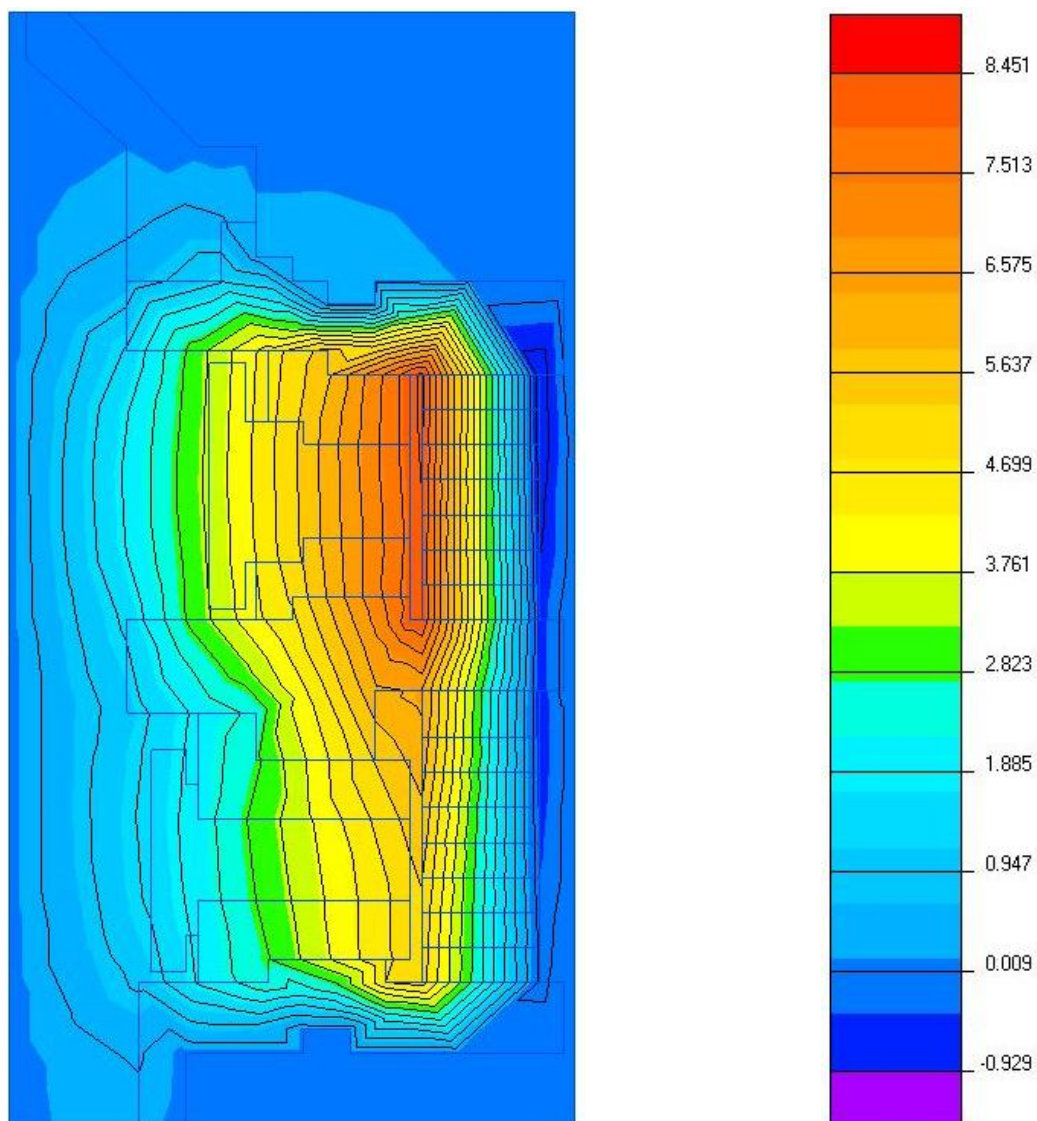


Рисунок 18 – Распределение потока магнитного поля ( $10^{-5}$  Вб) в структуре, представленной на рисунке 15

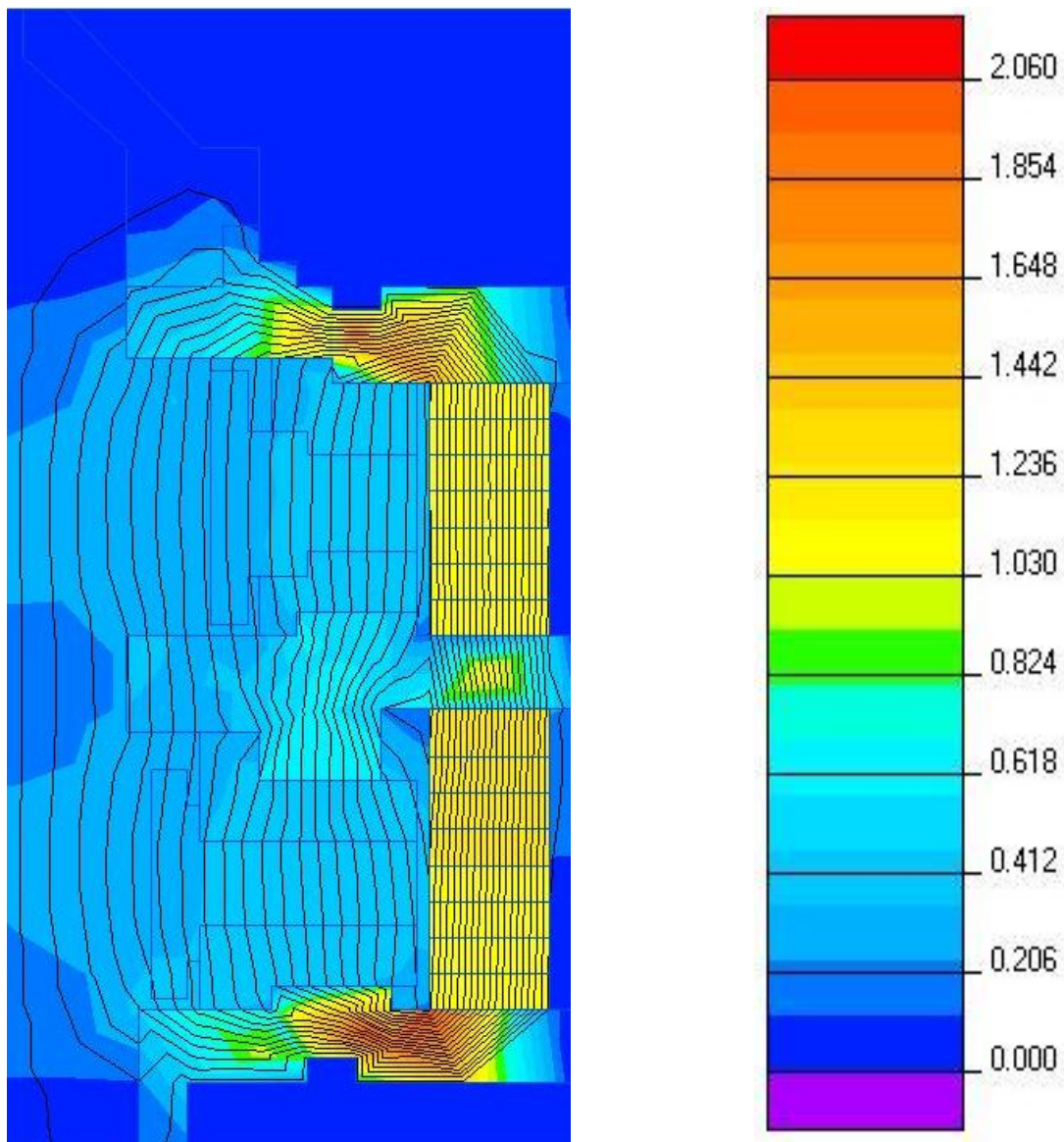


Рисунок 19 – Распределение индукции магнитного поля (Тл) в структуре, представленной на рисунке 16

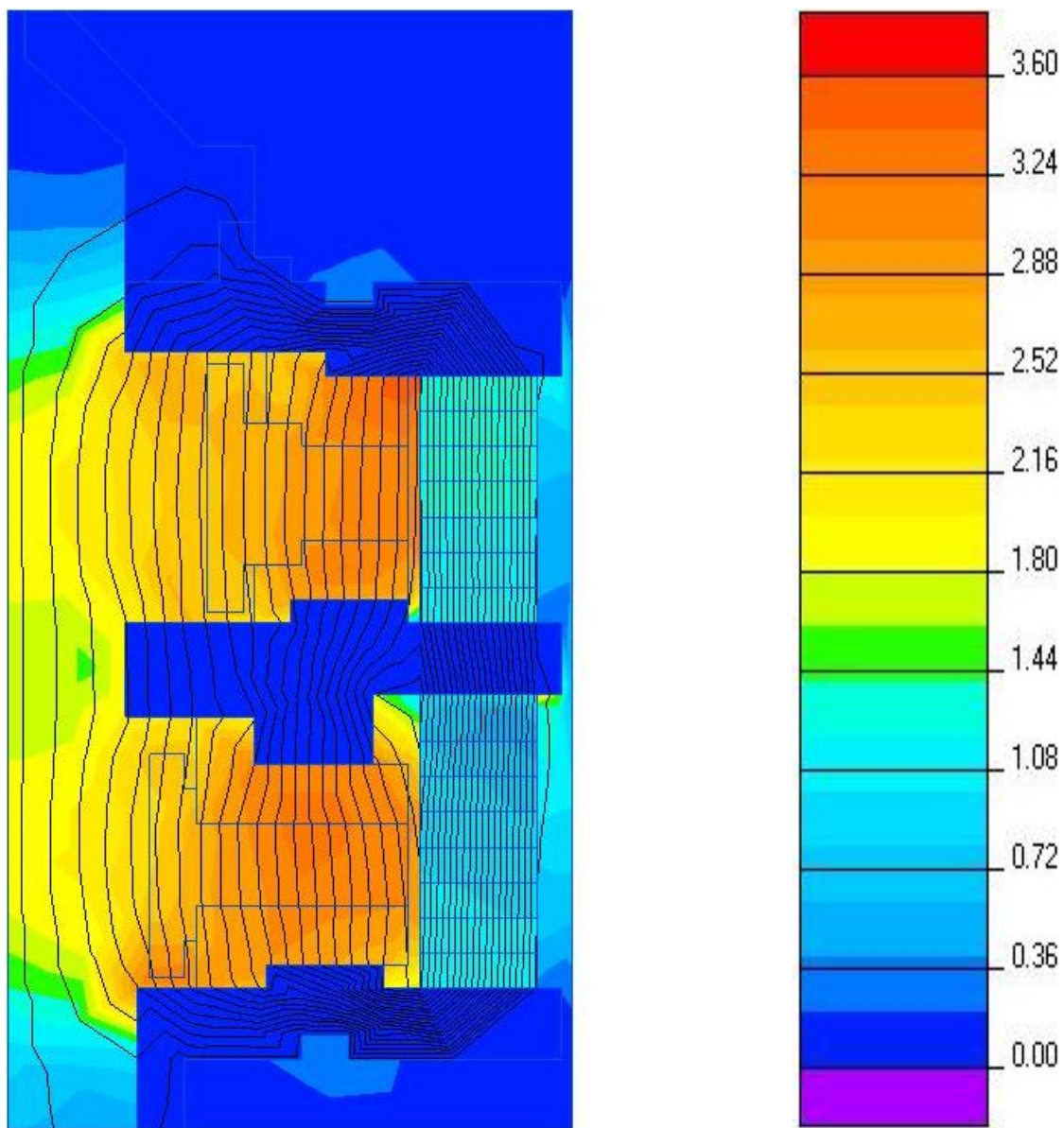


Рисунок 20 – Распределение напряженности магнитного поля ( $10^5 \text{ A/m}$ ) в структуре, представленной на рисунке 16

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННОГО ИСТОЧНИКА СО СКРЕЩЕННЫМИ $E \times H$ ПОЛЯМИ

В качестве наиболее оптимальной и перспективной для дальнейшей разработки была определена конструкция электронно-ионного источника со скрещенными  $E \times H$  полями (рисунок 15). Этот выбор был определен рядом факторов.

1. Инициирование разряда с полым катодом требует дополнительных электротехнических решений для обеспечения приемлемых характеристик зажигания и горения разряда с полым катодом и означает существование некоторого минимально возможного значения тока разряда, а значит и тока эмиссии [6, 7]. Это усложняет систему управления плазменным источником на основе разряда с полым катодом и затрудняет получение слаботочных электронных пучков [6, 7].

2. Ионная бомбардировка эмиттерного электрода с катодным потенциалом в области эмиссии приводит к изменению геометрии эмиссионного канала, изменению газодинамических условий и эмиссии, а также снижает ресурс плазменного источника [40, 41].

3. Давление газа в областях формирования плазменного эмиттера электронов, их ускорения и первичного формирования электронного пучка достаточно высокое, чтобы обеспечить повышенные значения плотности эмиссионного тока электронов и перванса промежутка ускорения.

4. Электронный пучок дрейфует через всю часть электродной структуры, обеспечивающую формирование ионного тока источника, что способствует повышенной степени ионизации газа в этой области. Кроме этого, предусмотренное физической концепцией источника торможение электронного пучка в промежутке ускорения ионов обеспечивает возвращение электронов, потерявших часть своей энергии на ионизацию газа, в область формирования плазмы, эмитирующей ионы. Это также способствует повышению плотности эмиссионного тока ионов.

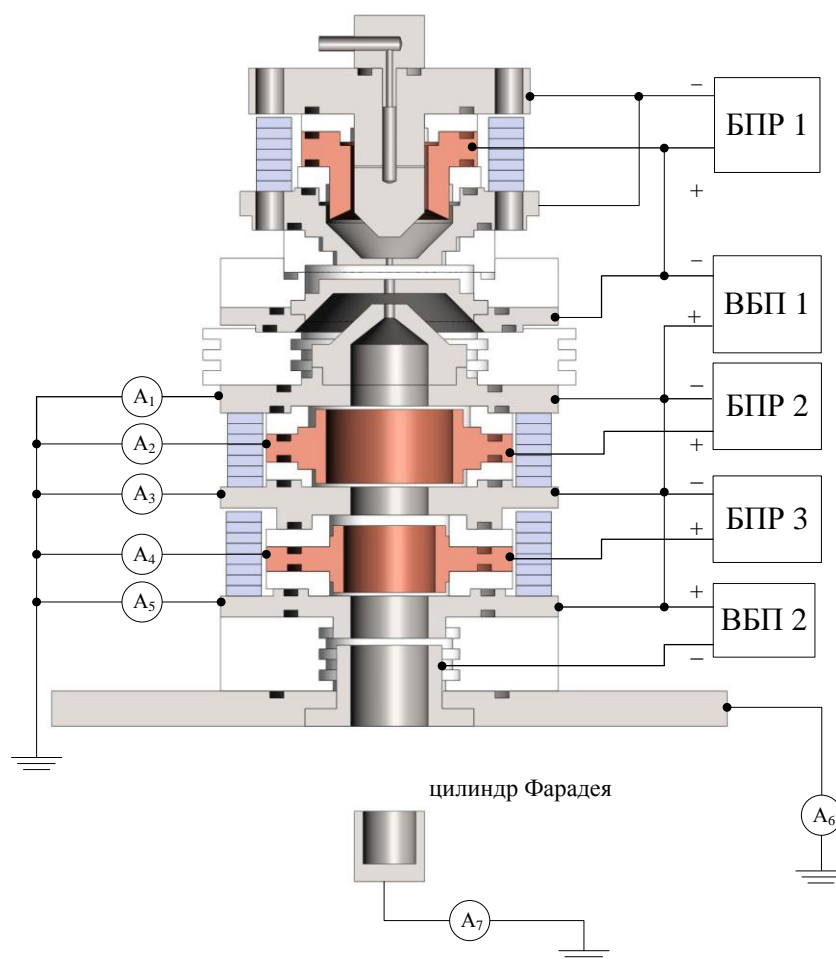
5. Возможность отдельного регулирования ускоряющего напряжения электронов и ионов обеспечивает регулирование в широком диапазоне соотношения энергии электронов и ионов в электронно-ионном пучке. Это расширяет диапазон возможного технологического применения источника электронно-ионных пучков.

6. Такая электродная структура представляется наиболее пригодной для создания блоков электронно-ионных источников для обработки больших поверхностей [14-16, 42, 43].

Приведенные факторы не исключают возможность разработки электронно-ионного источника на основе плазменного эмиттера с полым катодом в ситуациях, когда в наибольшей степени проявляются преимущества плазменных эмиттеров с полым катодом.

Ниже приведены основные характеристики источника, представленного на рисунке 15.

На рисунке 21 представлена экспериментальная схема подключения электродов разрядной структуры, на рисунке 22 приведены вольтамперные характеристики разряда при раздельном подключении к источнику питания разряда камер *I* – *III* (БПР1, БПР2, БПР3 – рисунок 21) для различных напусков газа. На рисунке 23 приведены вольтамперные характеристики разряда для попарно подключаемых камер *I* и *II* (рисунок 23, а), *I* и *III* (рисунок 23, б), *II* и *III* (рисунок 23, в). Приведенные характеристики имеют вид типичный для вольтамперных характеристик разряда источников данного типа [ ] и не оказывают существенного влияния на параметры горения разряда в соседних камерах при их одновременной работе (рисунок 23).

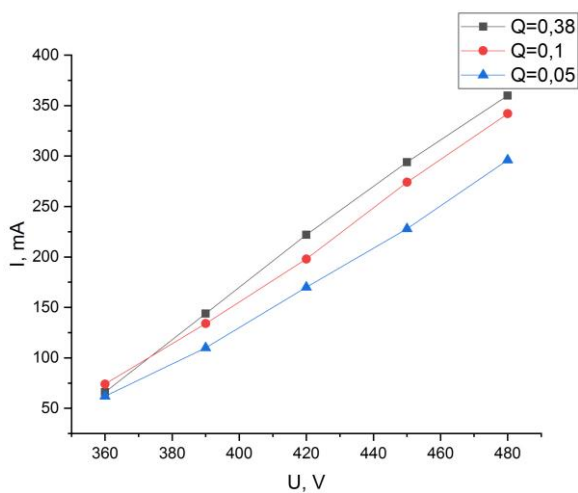


БПР – блок питания разряда соответствующей разрядной (*I*, *II* или *III* камеры) с напряжением разряда  $U_p$  до 1000 В и током  $I_p$  до 1,2 А;

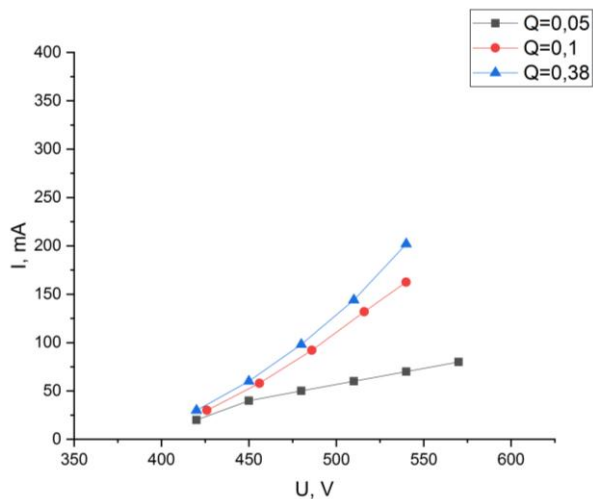
ВБП – высоковольтный блок питания с ускоряющим напряжением  $U_y$  до 5 кВ и током до 0,5 А;

ВБП 1 – блок ускорения электронов; ВБП 2 – блок ускорения ионов

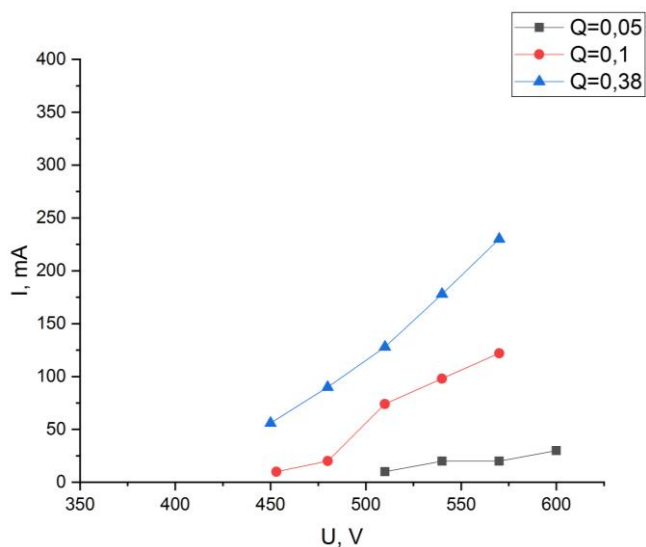
Рисунок 21 – Схема подключения электродов разрядных камер электронно-ионного источника на основе разряда в скрещенных  $E \times H$  полях



а)

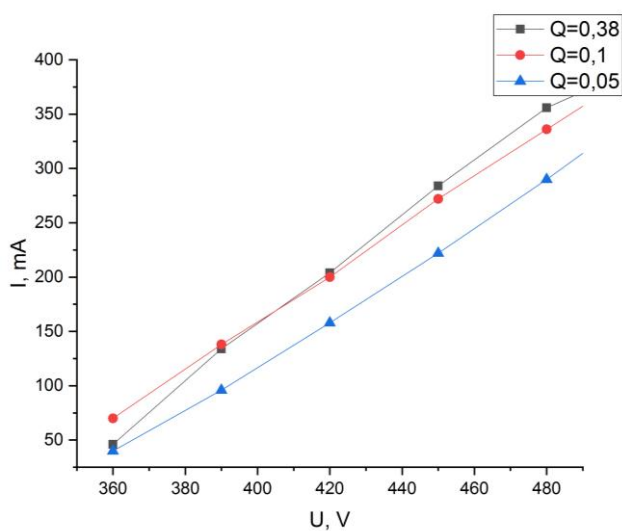


б)

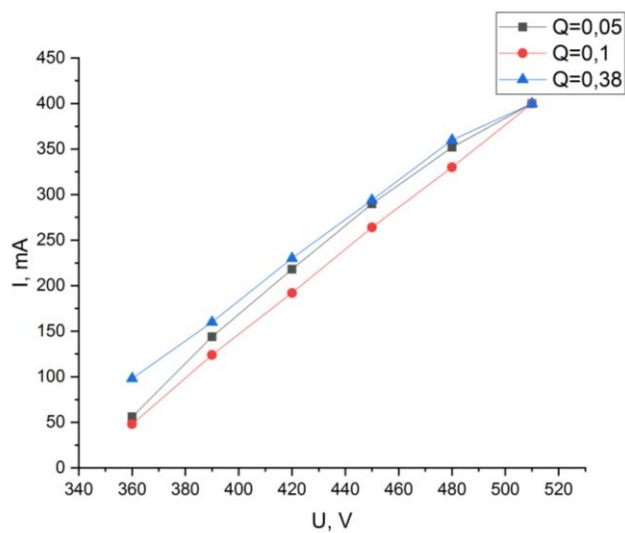


в)

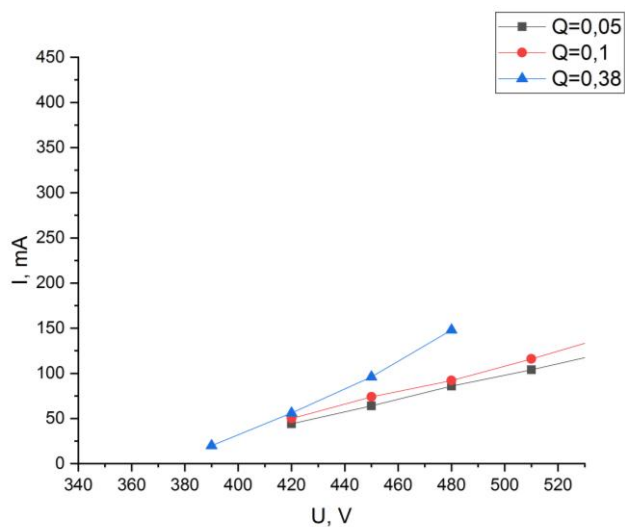
Рисунок 22 – Вольтамперные характеристики разряда газоразрядных камер I (а), II (б) и III (в) электронно-ионного источника приведенного на рисунке 15 для различных значений напуска газа  $Q$ ,  $10^{-4}$  л/с



а)



б)



в)

Рисунок 23 – Вольтамперные характеристики разряда газоразрядных камер I (а), II (б) и III (в) при попарном включении камер I и II (а), I и II (б) и II и III (в) электронно-ионного источника приведенного на рисунке 15 для различных значений напуска газа  $Q$ ,  $10^{-4}$  л/с



Инициирование разряда в двух разрядных камерах (*I* и *II* – рисунок 15) в режиме извлечения электронов свидетельствует о перспективности применения подобных структур в качестве прототипов высокоперевансных плазменных источников электронов. Предполагается следующий механизм работы в таком режиме: электронный пучок, формируемый в *I* камере (рисунок 15) попадающий после ускорения в структуру, образованную электродами камеры *II* (рисунок 15), распространяется вдоль оси в этой структуре и инициирует разряд низкого давления, в котором формируется плазма, эмитирующая ионы. Ионы распространяются в верхнюю структуру повышая ионизацию газа в области отбора электронов повышая плотность эмиссионного тока и частично компенсируют объемный заряд ускоряющего промежутка, что в целом приводит к увеличению переванса источника. Об этом свидетельствуют вольтамперные характеристики извлечения при наличии и отсутствии инициации разряда в разрядной камере *II* (рисунок 15, а) макета источника, приведенные на рисунке 24.

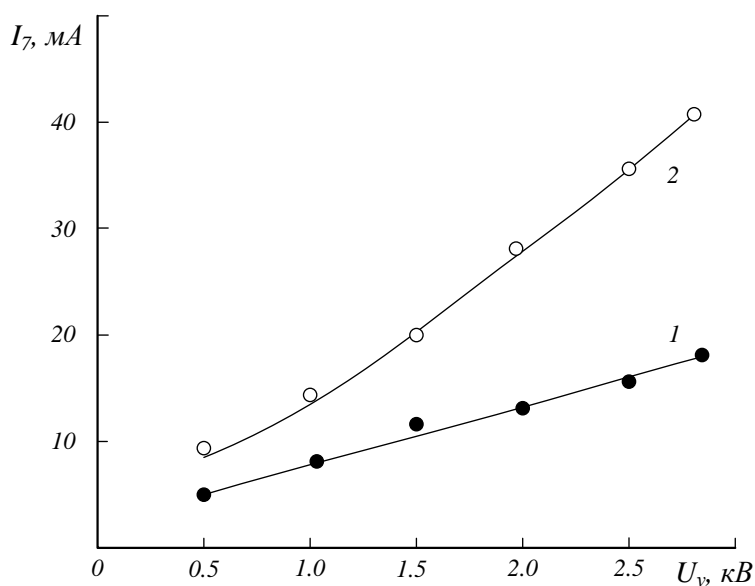
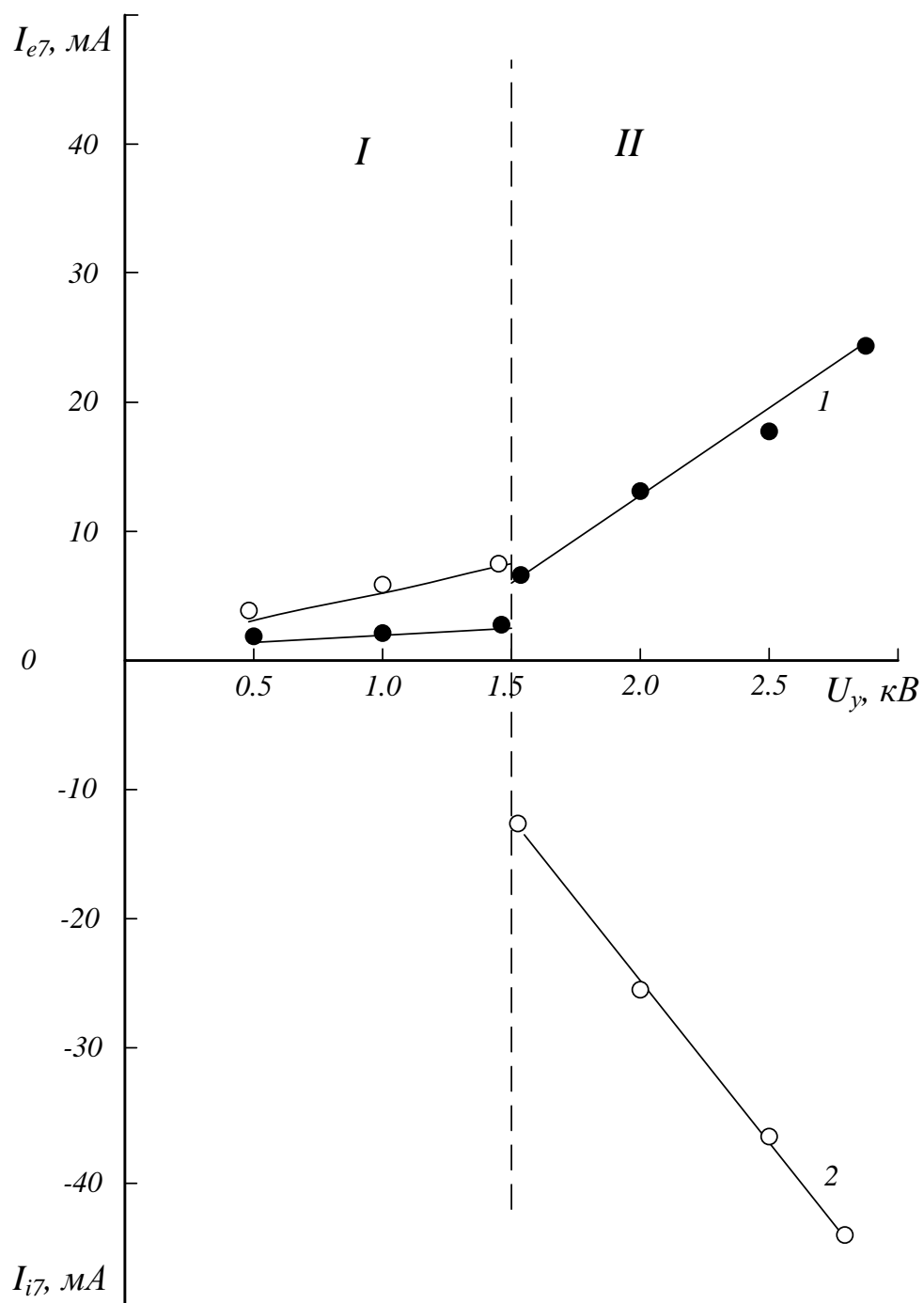


Рисунок 24 – Ток  $I_7$  (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1) и наличии (2) инициации разряда в разрядной камере *II* (рисунок 15),

ток разряда в камере *I* (рисунок 15) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В

ток разряда в камере *II* (рисунок 15) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В

На рисунке 25 представлены вольтамперные характеристики извлечения при одновременном формировании пучка электронов и ионов для двух режимов: фиксированное напряжение блока ускоряющего ионы 1,5 кВ (ВБП 2, рисунок 21) и варьирование напряжения блока ускорения электронов (ВБП 1, рисунок 21) – рисунок 25 (кривая 1) и второй режим работы, когда фиксировалось напряжение ускорения электронов, а варьировалось напряжение ускорения ионов.



$I_{e7}$  – электронный ток в цилиндр Фарадея;  $I_{i7}$  – ионный ток в цилиндр Фарадея;  
 1 – фиксированное напряжение ускорения ионов 1,5 кВ (ВБП 2, рисунок 21);  
 2 – фиксированное напряжение ускорения электронов 1,5 кВ (ВБП 1, рисунок 21);  
 ток разряда в камере I (рисунок 15) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В;  
 ток разряда в камере II (рисунок 15) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В

Рисунок 25 – Ток  $I_7$  (в цилиндр Фарадея)

В случае фиксированного напряжения ускорения ионов на участке *I* (кривая 1, рисунок 25) реализуется практически полная компенсация электронного пучка в диапазоне от 0 до 1,5 кВ и ток в цилиндр Фарадея близок к нулевому значению. При превышении ускоряющего электроны напряжения 1,5 кВ (фиксированное значение напряжения ускорения ионов) ток в цилиндр Фарадея повышается, однако он (область *II* на кривой 1, рисунок 24) ниже значения тока эмиссии при инициации разряда в разрядных камерах *I* и *II* (рисунок 23, кривая 2) и подаче ускоряющего электроны напряжения.

При фиксации напряжения ускорения электронов на уровне 1,5 кВ и варьировании напряжения ускорения ионов (область *I*, кривая 2 на рисунке 25), ток в цилиндр Фарадея претерпевает скачкообразное повышение области напряжения 1,5 кВ (рисунок 24, кривая 2), что свидетельствует о взаимной компенсации электронного и ионного пучков до этого значения и эмиссии из источника ионов при напряжениях свыше 1,5 кВ. Значение тока эмиссии при напряжении 3 кВ составляет 45 мА, а плотность тока эмиссии порядка 10 мА/см<sup>2</sup>, что свидетельствует о перспективности применения данной конструкции для разработки технологического электронно-ионного источника для реализации различных технологий обработки и модификации поверхностей материалов.

В области графиков *I* (рисунок 25) существует некоторая неопределенность токов, что обусловлено, по-видимому, наличием в разрядных структурах *II* и *III* (рисунок 15) двойных электрических слоев, которые требуют дополнительного экспериментального исследования.

В области графиков *II* (рисунок 25), т.е. при ускоряющих напряжениях более 1,5 кВ, поле двойных электрических слоев оказывает уже слабое влияние на движение зарядов в газоразрядных структурах *II* и *III* (рисунок 15), а токи электронов  $I_{e7}$  и ионов  $I_{i7}$  (рисунок 25) имеют более определенные значения.

Приведенные характеристики в целом (рисунки 22 – 25) подтверждают сформулированную в начале этого раздела физическую концепцию источника с совмещенными ионными и электронными пучками и возможностью раздельного регулирования их плотности тока.

## 6. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ И УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ ЭЛЕКТРОННО-ИОННОГО ПУЧКА

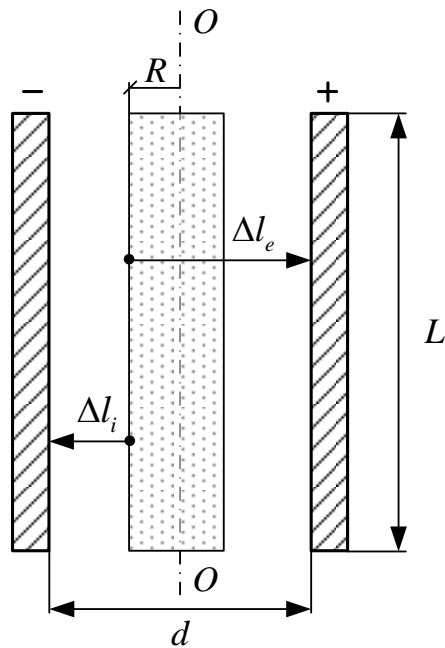
Необходимость детального экспериментального исследования влияния режимов работы элементов достаточно сложной газоразрядной структуры на состав формируемого электронно-ионного пучка обусловлена отсутствием в настоящее время математической модели, адекватной сформулированной физической концепции источника такого типа в связи с её новизной. Можно было предполагать, что наиболее информативными окажутся исследования раздельного влияния режимов работы элементов источника на электронную и ионную компоненты пучка, формируемого в единой газоразрядной структуре. Для практической реализации таких исследований в пространстве дрейфа электронно-ионного пучка необходимо было разработать и применить устройство с независимыми коллекторами электронной и ионной компонент пучка, слабо влияющее при этом на режим работы источника и состав пучка. Кроме этого, исследования с применением сепарации компонент пучка целесообразно проводить с учётом технологических требований к параметрам пучка. Например, при использовании электронно-ионного пучка для ионного распыления (особенно токонепроводящих веществ) энергия ионов обычно достигает величины порядка тысяч эВ, а электронов, компенсирующих заряд распыляемой поверхности, не должна превышать десятков эВ для исключения вторичной электронно-электронной эмиссии с поверхности.

Наиболее простой для технического исполнения и применения для сепарации компонент электронно-ионного пучка представляется известная система электростатического отклонения движущихся зарядов, состоящая из двух пластин, на которые подаётся отклоняющее напряжение. Такая система может быть установлена на выходе источника электронно-ионного пучка и её влияние на формирование пучка в источнике может быть исключено. Однако, не смотря на простоту этой системы, для каждого конкретного применения её требуется некоторый анализ специфических условий работы системы с целью определения её параметров.

Возможны два принципа использования такого сепаратора компонент совмещённого электронно-ионного пучка в условиях приведённого примера технологического применения пучка. Первый заключается в полном осаждении электронной компоненты пучка на одном из электродов отклоняющей системы (под положительным потенциалом). Второй – в частичном отклонении электронной компоненты при прохождении сепаратора и полном разделении компонент при дальнейшем дрейфе пучка до раздельных принимающих их коллекторов.

Для расчёта размеров элементов сепаратора (упрощенная модель которого приведена на рисунке 26) первого типа введём следующие параметры, необходимые для этого.

$U_y$  – ускоряющее напряжение,  $U_0$  – отклоняющее напряжение,  $L$  – длина отклоняющей системы,  $d$  – расстояние между пластинами отклоняющей системы,  $R$  – радиус электронно-ионного пучка,  $v$  – скорость ускоренных частиц, индекс  $e$  – для электронов, индекс  $i$  – для однозарядных ионов.



$L$  – длина отклоняющей системы,  $d$  – расстояние между пластинами отклоняющей системы,  $R$  – радиус электронно-ионного пучка

Рисунок 26 – К расчету электрической сепарации электронно-ионного пучка

Скорости  $v$  входящих в систему отклонения:

$$v_e = \sqrt{\frac{2eU_{ye}}{m_e}}, \quad v_i = \sqrt{\frac{2eU_{yi}}{m_i}} \quad (1)$$

Время пролёта частиц системы отклонения,  $\tau$ :

$$\tau_e = \frac{L}{v_e}, \quad \tau_i = \frac{L}{v_i} \quad (2)$$

Во время пролёта частиц системы отклонения на них действуют силы:

$$F_e = eE, \quad F_i = e_i E \quad (3)$$

где  $E = \frac{U_0}{d}$ . Для электронов и однозарядных ионов силы одинаковы по модулю, противоположны по направлению и перпендикулярны плоскости  $OO$  (рисунок 26). Во время  $\tau$  заряды электронно-ионного пучка будут испытывать ускорения (в противоположных направлениях, перпендикулярных плоскости  $OO$  (рисунок 26):

$$a_{e\perp} = \frac{eU_0}{dm_e}, \quad a_{i\perp} = \frac{e_i U_0}{dm_i} \quad (4)$$

а также смещение  $\Delta l$  в направлении соответствующих пластин системы отклонения

$$\Delta l_e = \frac{a_e \tau_e^2}{2} = \frac{e U_0 L^2}{m_e d 2 v_e^2} = \frac{U_0 L^2}{U_{ye} 4d} \quad \Delta l_i = \frac{a_i \tau_i^2}{2} = \frac{e U_0 L^2}{m_i d 2 v_i^2} = \frac{U_0 L^2}{U_{yi} 4d}, \quad (5)$$

последнее выражение справедливо для ионов с любой степенью ионизации.

При сепарации электронно-ионного пучка осаждением электронов на пластину системы отклонения с положительным потенциалом величина  $\Delta l_e$  должна быть не менее показанной на рисунке 25. Поэтому условие (5) для электронов для этого способа сепарации можно записать приближённо в виде (приравнивая  $\Delta l_e$  к  $d$ ):

$$\left(\frac{d}{L}\right)^2 \geq \frac{U_0}{4U_{ye}}. \quad (6)$$

Для ионов максимальное отклонение в системе не должно превышать величины  $\Delta l_i$  (рисунок 26), чтобы исключить их потерю на системе отклонения. Поэтому для ионов можно записать:

$$\frac{\left(\frac{d}{2} - R\right)d}{L^2} \leq \frac{d^2}{2L^2} - \frac{Rd}{L^2} \leq \frac{U_0}{4U_{yi}}. \quad (7)$$

Исходя из физического смысла неравенств (6) и (7), их можно представить в виде:

$$\left(\frac{d}{L}\right)^2 = \frac{U_0}{4U_{ye}} \quad \text{и} \quad \frac{d^2}{2L^2} - \frac{Rd}{L^2} = \frac{U_0}{4U_{yi}}. \quad (8)$$

Учитывая идентичность  $U_0$  в равенствах (8), можно получить:

$$\frac{U_{ye}}{U_{yi}} = 0,5 - \left(\frac{R}{d}\right), \quad (9)$$

где реальное отношение  $\frac{R}{d}$  не может превышать значения 0,5, так как при более высоких значениях система сепарации оказывается внутри пучка.

Из физической концепции разработанного экспериментального источника электронно-ионного пучка и его технологического назначения следует, что наиболее целесообразны минимальные значения  $\frac{U_{ye}}{U_{yi}}$ . Оценки показывают, что минимальные значения  $\frac{U_{ye}}{U_{yi}}$ , равные 0,1

и 0,05, реализуются при приемлемых значениях  $\frac{R}{d}$ , равных 0,4 и 0,45 соответственно, а так

же близки к значениям  $\frac{U_{ye}}{U_{yi}}$ , требуемым условиями технологического применения электронно-ионного пучка. Исходя из выбранных значений  $\frac{R}{d}$ ,  $U_{ye}$  экспериментального значения  $R$  на

входе в систему сепарации и предполагаемого значения  $U_0$  на отклоняющих пластинах си-

стемы сепарации, можно определить требуемую длину пластин  $L$  системы по соотношению (10), тождественному соотношению (6):

$$L = \sqrt{\frac{d^2 4U_e}{U_0}} = 2d \sqrt{\frac{U_e}{U_0}}. \quad (10)$$

Таким образом задавая соответствующие значения результирующего ускоряющего напряжения электронов ( $U_e = U_{ye} - U_{yi}$ ) и приемлемые значения отклоняющего напряжения ( $U_0$ ), а так же расстояние между отклоняющими пластинами ( $d > 2R$ ) можно определить длину  $L$  отклоняющих пластин при условии полного осаждения на одну из пластин электронной компоненты совмещенных пучков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные физические концепции газоразрядных структур, принципиально способных обеспечить формирование совмещенных ионно-электронных пучков, позволяет сделать вывод, что наиболее перспективной для создания опытного образца источника электронно-ионного пучков и его экспериментального исследования, является электродная структура, показанная на рисунке 12. Её перспективность обосновывается следующими факторами.

Во-первых, давление газа в областях формирования плазменного эмиттера электронов, их ускорения и первичного формирования электронного пучка достаточно высокое, чтобы обеспечить повышенные значения плотности эмиссионного тока электронов и проанса промежутка ускорения.

Во-вторых, электронный пучок дрейфует через всю часть электродной структуры, обеспечивающую формирование ионного тока источника, что способствует повышенную степень ионизации газа в этой области. Кроме этого, предусмотренное физической концепцией источника торможение электронного пучка в промежутке ускорения ионов обеспечивает возвращение электронов, потерявших часть своей энергии на ионизацию газа, в область формирования плазмы, эмитирующей ионы. Это также способствует повышению плотности эмиссионного тока ионов.

В-третьих, возможность отдельного регулирования ускоряющего напряжения электронов и ионов обеспечивает регулирование в широком диапазоне соотношение энергии электронов и ионов в электронно-ионном пучке. Это расширяет диапазон возможного технологического применения источника электронно-ионного пучка.

В-четвёртых, такая электродная структура представляется наиболее пригодной для создания мультиблоков электронно-ионных источников для обработки больших поверхностей.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении / В. А. Груздев, В. Г. Залесский, Д. А. Антонович, Ю. П. Голубев // Тяжелое машиностроение (Россия). – 2004. – № 9. – С. 25–32.
2. Ремпе, Н.Г. Промышленное применение электронных пушек с плазменным катодом / Н.Г. Ремпе // Плазменная эмиссионная электроника : труды II Междунар. семинара, Улан-Уде, 17-24 июня 2006 г. / БНЦ СО РАН. – Улан-Уде, 2006. – С. 108–112.
3. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / П.М. Щанин [и др.]. – Екатеринбург : Наука, 1993. – 149 с.
4. Шипко, А.А. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А.А. Шипко, И.Л. Поболь, И.Г. Урбан. – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.
5. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко [и др.], под общ. ред. В.Т. Барченко // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 208 с.
6. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий / Ю. Е. Крейнделъ [и др.] ; под общ. ред. Ю. Е. Крейнделя. – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.
7. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом / Е.М. Окс. – Томск: НТЛ, 2005. – 216 с.
8. Попов, В.Ф. Процессы и установки электронно-ионной технологии / В.Ф. Попов, Ю.Н.Горин. – М. : «Высшая школа», 1988. – 255 с.
9. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые / А. П. Достанко [и др.], под ред. А. П. Достанко // Белорус.гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск: Бестпринт, 2009. – 199 с.
10. Семенов, А. П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. – 207 с.
11. Форрестер, А.Т. Интенсивные ионные пучки / А.Т. Форрестер. – М.: Мир, 1992. – 358 с.
12. Физика и технология источников ионов / Под ред. Я. Брауна: Пер. с англ. – М. : Мир, 1998. – 496 с.
13. Габович, М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов / М.Д. Габович. – М. : Атомиздат, 1972. – 304 с.
14. Груздев, В.А. Плазменный электронно-ионный источник // В.А. Груздев, В.Г. Залесский, П.Н. Солдатенко / Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2013. – № 4. – С. 63–68.

15. Антонович, Д.А. Электронно-ионный источник для реализации комбинированного воздействия на поверхность / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам.науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.
16. Антонович, Д.А. Применение низкоэнергетичных пучков заряженных частиц для реализации комбинированного воздействия на материалы / Антонович Д.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н. // Сборник материалов международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». Витебск, 2015. – С. 216-218.
17. Завьялов, В.А. Экспериментальные и теоретические аспекты формирования электронно-ионных потоков / В.А. Завьялов, В.А. Сыровой // Плазменная эмиссионная электроника: труды III Междунар. семинара, Улан-Уде, 23-30 июня 2009 г. / Изд-во БНЦ СО РАН. – Улан-Уде, 2009. – С. 45–61.
18. Молоковский, С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. – Л.: Энергия, 1972. – 271 с.
19. Семенов, А. П. Техника распыления ионными пучками. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1996. – 120 с.
20. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Дж. М. Поут [и др.] под общ. ред. Дж. М. Поуга; пер. с англ. Н.К. Мышкин [и др.] под общ. ред. А.А. Углова. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
21. Кузьмичёв, А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – Киев: Аверс, 2008. – 244 с.
22. Ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя с накальным нейтрализатором ЕНРМ-100. Руководство по эксплуатации ГЛЮИ.443224.004 РЭ; Белорус.гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск: 2016. – 31 с.
23. Соловьев, А.А. Устройства со скрещенными электрическим и магнитным полями для нанесения тонкопленочных покрытий на подложки большой площади / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, 2007.
24. Груздев, В. А. Источник ионов металлов / В. А. Груздев, Ю. Е. Крейндель, А. П. Семенов // Приборы и техника эксперимента. – 1978. – № 2. – С. 193–195.
25. eN 400 Ion Source Manual, Filament Cathode Version. Kaufman&Robinson, Inc. – Fort Collins, Colorado: October 2013, Version A. – 91 p.
26. A new large-scale plasma source with plasma cathode / К. Yamauchi, К. Hirokawa, Н. Suzuki and Т. Satake / Vacuum, V.47, № 6-8, 1996, p. 1009-1012.
27. Физика и технология плазменных эмиссионных систем / под общ. ред. В. Т. Барченко. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 286 с.

28. Белюк, С. И. Источник ионов твердых и газообразных веществ / С. И. Белюк, Р. Г. Каримов, Ю. Е. Крейндель и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – № 2. – С. 155–158.
29. Исследование влияния ионно-электронной эмиссии на характеристики электронного источника с плазменным катодом/ С.В. Григорьев [и др.] // Плазменная эмиссионная электроника: тр. II Междунар. сем., Улан-Уде, 23-30 июня 2009 г. / Изд-во БНЦ СО РАН – Улан-Уде, 2009. – С. 37–44.
30. Гаврилов, Н.В. Формирование пучка ионов, извлекаемых из плазмы тлеющего разряда / Н.В. Гаврилов, Д.Р. Емлин // ЖТФ. – 2000. – Т. 70, № 5. – С. 74–81.
31. Никулин, С.П. Влияние ионной эмиссии на характеристики тлеющего разряда с полым катодом / С.П. Никулин // ЖТФ. – 2000. – Т. 70, № 10. – С. 122–124.
32. Семенов, А.П. Эмиссия ионов из разряда с полым катодом в режиме проникновения плазмы в высоковольтный промежуток / А.П. Семенов // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, № 4. – С. 42–47.
33. Antonovich D.A. Plasma emission systems for electron and ion-beams technologies / D.A. Antonovich, V.A. Gruzdev, V.G. Zaleski, I.L. Pobol, P.N. Soldatenko // High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes) v. – 21 iss. 2. P. 143-159.
34. Антонович, Д.А. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 1 / Д.А. Антонович [и др.] // Вестник ПГУ. Сер С., Фундам.науки. – 2016. – №12. - С.37-44.
35. Антонович Д.А., Груздев В.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 2 – Сер. С: Фундаментальные науки. – 2017. – №4 – С. 45–51.
36. Силадьи М., Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. — М.: Мир, С36 1990. — 639 с.
37. Свешников, В.М. Моделирование ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчетной области / В.М. Свешников, В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Прикладная физика.– 2012. – № 2. – С.40–44.
38. Залесский, В. Г. Эмиссионные и электронно-оптические системы плазменных источников электронов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.04 / В. Г. Залесский. – Минск, 2015. – 316 с.
39. ООО «Тор» Elcut, Моделирование двумерных полей методом конечных элементов / Версия 5.10 / Руководство пользователя -2012.
40. Zaleski, V. G. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures / V. G. Zaleski, D.A. Antonovich // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – № 40. – P. 7771–7777.

41. Gruzdev, V.A. Electron-optical characteristics of the beam generated by the electron plasma sources / V.A Gruzdev, V.G. Zalesski // *Electrotechnica and electronica (Bulgaria)*. – 2014 – V. 49, № 5-6. – P. 264–268.
42. V.A. Grusdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich, Yu.P. Golubev. Universal plasma electron source. – *Vacuum*. – 2005. – № 77. – P. 399–405.
43. Антонович Д.А. Разработка концепции и опытных образцов плазменных источников электронов для технологических целей / ДА Антонович, АВ Груздев - *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки*, 2018, № 4. – С. 119-123.