

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)**

Физический факультет

Выпускная квалификационная работа магистерская диссертация

Кафедра физики плазмы

Сотников Олег Захарович

***СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНЫХ
ИСТОЧНИКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА С
РАЗЛИЧНЫМИ ГЕОМЕТРИЯМИ РАЗРЯДОВ***

Научный руководитель:
к.ф.-м.н. Санин Андрей Леонидович

Новосибирск – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

1. ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА.	5
1.1 ППИ для тандемного ускорителя БНЗТ	5
1.2 ППИ для производства изотопов для ПЭТ	7
2 ИСТОЧНИКИ ОИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В УСКОРИТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ	9
2.1 Источник ОИ для HERA.....	9
2.2 Источник ОИ для источника нейтронов на основе ускорителя в Беркли. 10	
2.3 TRIUMF	11
2.4 Импульсный магнетронный поверхностно плазменный источник ИЯФ . 11	
3 ПРИНЦИП ГЕНЕРАЦИИ ОИ ВОДОРОДА В ППИ	13
3.1 Газоразрядные системы	14
3.2 Конструкция источника.....	16
3.3 Газоразрядная камера	19
3.4 Система подачи водорода.....	21
3.5 Система подачи цезия	22
3.6 Ионно-оптическая система	23
3.7 Поисквые модификации источника.....	24
4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ГЕОМЕТРИЯМИ РАЗРЯДОВ	27
4.1 Зависимость тока пучка от напряжения на вытягивающем электроде ...	27
4.2 Зависимость тока пучка от подачи водорода.....	30
4.3 Зависимость тока пучка от тока разряда.....	32
4.4 Зависимость тока пучка от подачи цезия.....	34
4.5 Основные характеристики источников.....	38
5 ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	39
5.1 Оценка вклада катодной группы в ток пучка ОИ.....	39
5.1.1 Катодная группа магнетронного источника	39
5.1.2 катодная группа полупланотронного источника.....	41
5.2 Перегрев катода в полупланотронном источнике	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	44

Введение

Импульсные источники отрицательных ионов (ОИ) водорода на основе магнетронного и пеннинговского разряда широко используются в ускорительных лабораториях по всему миру для перезарядных технологий.

В типичном импульсном источнике с магнетронной геометрией пучок отрицательных ионов водорода с током 80 мА вытягивается из разряда, в который вкладывается мощность 1.5 кВт [1], в то время как при использовании пеннинговской геометрии 50 мА пучок ОИ формируется из разряда с вкладываемой мощностью 4 кВт [2]. Таким образом, относительная энергетическая эффективность импульсного источника с магнетронной геометрией в 4 раза выше, чем у источника с пеннинговской геометрией.

Современным ускорителям, наряду с уже используемыми импульсными источниками, необходимы стационарные источники отрицательных ионов. Одной из наиболее эффективных технологий получения отрицательных ионов является поверхностно-плазменная генерация. Ранее, в 2009 году, в ИЯФ для тандемного ускорителя для борнейтронзахватной терапии был создан мощный стационарный источник с пеннинговской геометрией, на котором удавалось получать ток пучка до 15 мА при вкладываемой в разряд мощности 1.2 кВт.

Для многочисленных применений необходимы дальнейшие модификации источника, с целью получить больший ток пучка в стационарном режиме работы.

В данной работе было проведено изменение геометрии электродов базового пеннинговского источника для получения

магнетронной и полупланотронной конфигурации разряда. Описывается источник, на котором впервые в мире была получена генерация отрицательных ионов в стационарном режиме с магнетронной и полупланотронной геометрией. Стационарная катодная генерация ОИ изучалась при вариации основных параметров источника для получения максимального тока пучка в каждой модификации. Был проведен сравнительный анализ основных характеристик двух новых модификаций источника.

1. Применение источников отрицательных ионов водорода

Отрицательные ионы обладают малой энергией сродства электрона, поэтому импульсные поверхностно-плазменные источники (ППИ) широко используются для получения пучков ОИ для перезарядных технологий: для перезарядной инжекции ОИ в накопители заряженных частиц, для удвоения энергии ускоренных частиц в тандемных ускорителях, для вывода протонов из циклотрона без использования дефлектора. Однако, для некоторых применений, таких, как борнейтронзахватная терапия рака (БНЗТ) или для наработки изотопов для позитронной эмиссионной томографии, необходимы стационарные ППИ.

1.1 ППИ для тандемного ускорителя БНЗТ

БНЗТ – это перспективный метод лечения злокачественных опухолей. Нейтронозахватная терапия рака привлекает всё возрастающее внимание благодаря высокой биологической эффективности, избирательности и достигнутому прогрессу в клинических испытаниях на реакторах.

Раствор, содержащий стабильный изотоп ^{10}B , вводится в кровь человека и через некоторое время бор сорбируется в клетках. Получаемая концентрация бора в клетках опухоли в 4 раза больше, чем в здоровых клетках. Затем опухоль облучается потоком тепловых нейтронов. В результате захвата теплового нейтрона стабильным изотопом ^{10}B происходит ядерная реакция с образованием α -частицы и иона ^7Li . Характерное расстояние пролета α -частицы - порядка размеров клетки. Таким образом, клетка

содержащая разрушенный бор, поглощает энергию α -частицы, что приводит к ее уничтожению.

Для широкого внедрения методики в медицинскую практику был предложен оригинальный нейтронный источник на основе тандемного ускорителя [4]. Общий вид экспериментальной установки для БНЗТ показан на Рис. 1. Пучок отрицательных ионов водорода инжектируется в электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией и после перезарядки пучка ОИ водорода в пучок протонов на перезарядной мишени на выходе из тандема формируется протонный пучок, ускоренный до энергии, соответствующей удвоенному потенциалу высоковольтного электрода. После попадания протонного пучка на литиевую мишень в результате пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ генерируется поток нейтронов. При энергии протонов 2,5 МэВ образующиеся нейтроны имеют широкий спектр энергий вплоть до 790 кэВ. Для понижения его энергии используются замедлители, коллиматоры и отражатели. Наиболее привлекательный режим генерации нейтронов реализуется при энергии протонов на 20 кэВ выше порога реакции (1,9 МэВ). В этом случае рожденные нейтроны имеют низкую среднюю энергию ~ 30 кэВ, направлены вперед и могут быть прямо использованы для терапии.

Более высокий ток пучка ионного источника позволяет уменьшить длительность терапевтического сеанса БНЗТ.

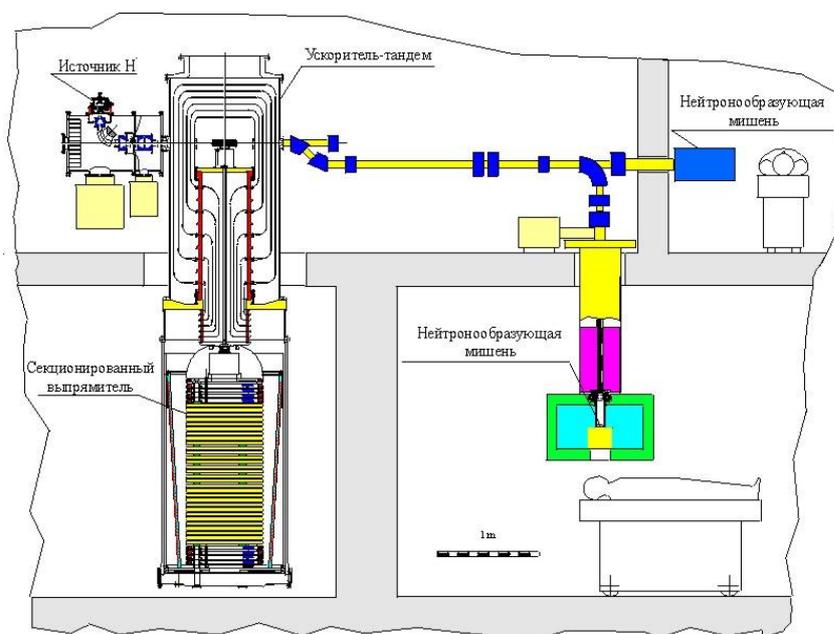


Рис. 1. Экспериментальная установка для БНЗТ.

1.2 ППИ для производства изотопов для ПЭТ

Позитронные эмиттеры применяются для медицинской диагностики путем позитронной эмиссионной томографии. С помощью ПЭТ можно изучать медленные процессы метаболизма и планировать точную дозиметрию препаратов.

Перед началом исследований пациенту вводится изотоп фтора ^{18}F . Принцип диагностики состоит в регистрации совпадений двух γ -квантов с энергией 511 кэВ, являющихся продуктом аннигиляции позитронов и летящих в строго противоположных направлениях. (Рис. 2) В процессе накопления данных на экране компьютера появляется изображение позволяющее анализировать метаболизм.

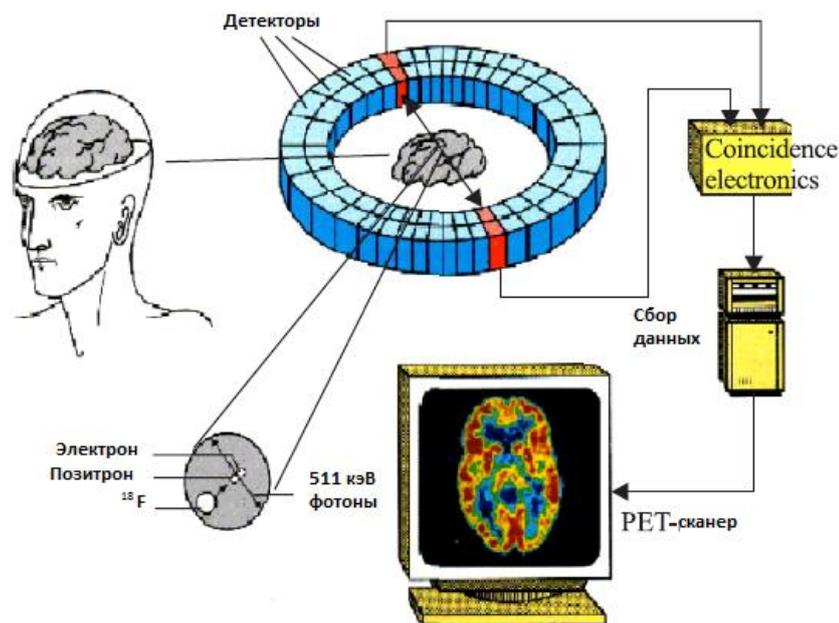


Рис.2. Принцип ПЭТ-диагностики – регистрация аннигиляции позитронов.

Изотопы, применяемые для ядерной медицинской диагностики опухолевых заболеваний, в неврологии, кардиологии, онкологии, нарабатываются путем бомбардировки мишеней пучками протонов, ускоряемых на компактных циклотронах.

Уже в конце 70-х появились коммерческие циклотроны, ускоряющие ОИ вместо протонов и использующие вывод пучка Н- на тонкой углеродной фольге. Энергия выведенного пучка варьируется путем радиального движения фольги внутрь циклотрона. Для инъекции начального пучка применяют внутренний источник с холодным разрядом Пеннинга, который размещается в центре циклотрона. Для увеличения скорости генерации короткоживущих изотопов в ускорителе необходимы источники с большим током ОИ.

2 Источники ОИ, используемые в ускорительных лабораториях

Следует различать 2 типа источников ОИ: с подачей цезия и без подачи цезия. В безцезиевых источниках ОИ образуются за счет генерации в плазменном объеме. Подача цезия уменьшает работу выхода электродов, что добавляет дополнительный канал генерации ОИ – поверхностную кинетическую эмиссию. В поверхностно-плазменных источниках применяют разряды в магнитном поле с пеннинговской и магнетронной геометрией электродов.

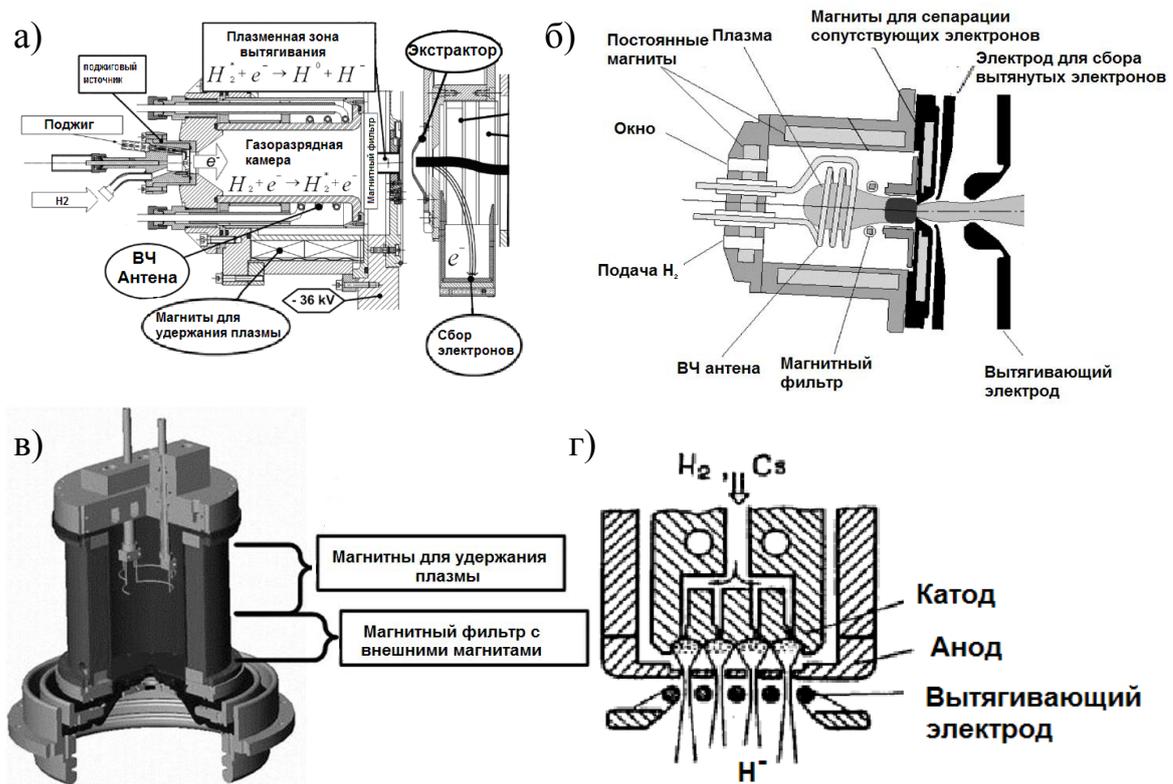


Рис.3. Современные источники ОИ:
 а) DESY-HERA; б) SNS/LBN; в) TRIUMF; г) магнетрон ИЯФ

2.1. Источник ОИ для HERA

HERA – это крупнейший ускоритель в лаборатории DESY. Он позволяет ускорять как протоны, так и электроны. Для инжекции

протонов в накопительное кольцо используется перезарядная инжекция ОИ. Для получения пучка ОИ используют ВЧ источник с объемной генерацией ОИ (рисунок 3а). Для зажигания разряда используется специальный поджиговой источник работающий на высокой подаче водорода. Для передачи энергии в плазму разряда использует внешнюю ВЧ антенну.

При объемной генерации ОИ быстрые электроны в газоразрядной камере образуют колебательно возбужденные молекулы водорода ($\text{H}_2 + e^- \rightarrow \text{H}_2^* + e^-$). Холодные электроны могут взаимодействовать с колебательно возбужденными молекулами водорода и образовать ОИ ($\text{H}_2^* + e^- \rightarrow \text{H}^0 + \text{H}^-$).

Источник ОИ для ускорителя HERA продемонстрировал стабильную работу (более года) при токе 40 мА с длительностью импульса до 200 мс и частотой 1 Гц.

2.2 Источник ОИ для источника нейтронов на основе ускорителя в Беркли

Ускорительный комплекс для получения нейтронов представляет собой линейный ускоритель и накопительное кольцо. ОИ ускоряются линейным ускорителем до энергии 1 ГэВ. Затем ускоренные ОИ проходят через обдирочную мишень, где теряют лишние электроны и образуют протоны, которые попадают в накопительное кольцо. Пучок протонов выводится на ртутную мишень-конвертер, в которой в результате реакции скалывания образуются нейтроны.

Для первичной инжекции ОИ был разработан источник (рисунок 3б), производящий пучок 40 мА с длительностью импульса 1 мс, работающий на частоте 60 Гц.

Для экстракции ионов используется плазма в мультипольном поле. Разряд возбуждается с помощью высокочастотной антенны, выдающей 20-50 кВт на частоте 2 МГц. Для того, чтобы получить высокий ток пучка, в источнике используется не только объемные, но и поверхностные процессы генерации ОИ. В безцезиевом режиме источник SNS только за счет объемной генерации производит 10-15 мА пучка ОИ. В цезиевом режиме пучок увеличивается за счет поверхностной генерации до 30-40 мА, поверхностная генерация даёт приблизительно 70% тока пучка.

2.1 TRIUMF

TRIUMF – стационарный источник ОИ, который активно используется для ускорителей (рисунок 3в). Плазма в разрядной камере удерживается мультипольной магнитной системой. Плазма создаётся разрядом с накаливаемыми катодами. Поле на оси сделано равным нулю, что снижает дрейф, уменьшает извлекаемый электронный ток и увеличивает ток пучка источника. До подачи цезия в источник был получен ток пучка 20 мА. В цезиевом режиме ток пучка увеличился на 25 % и стал 25 мА.

2.2 Импульсный магнетронный поверхностно-плазменный источник ИЯФ

Поверхностно-плазменные источники впервые были разработаны в ИЯФ СОРАН. Из-за высокой эффективности

поверхностно-плазменной генерации идею магнетронного источника применили Fermilab, Argonne National Laboratory, Brookhaven, DESY. С момента предложения оригинальной идеи поверхностно-плазменного источника было сделано много модификаций и улучшений. Ток пучка из импульсного магнетронного источника составил 80 мА при 0.5 мс длительности и частоте 2 Гц.

На Рис. 4 показано распределение по энергии ионов пучка вблизи эмиссионного отверстия. Энергия вытягиваемых ОИ имеет два удаленных пика. Пик при низкой энергии соответствует ОИ образованными на поверхности анода и в результате перезарядки ОИ на нейтральных атомах водорода. Пик с высокой энергией ~ 150 В соответствует ОИ, образованным на поверхности катода.

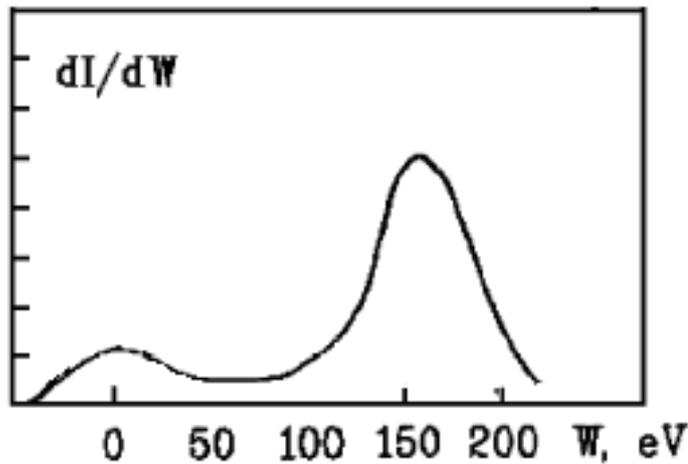


Рис. 4. Распределение по энергии ионов пучка вблизи эмиссионного отверстия

3 Принцип генерации отрицательных ионов водорода в ППИ

Отрицательные ионы образуются на поверхности электрода с пониженной работой выхода в результате бомбардировки быстрыми частицами плазмы за счет процесса кинетической эмиссии.

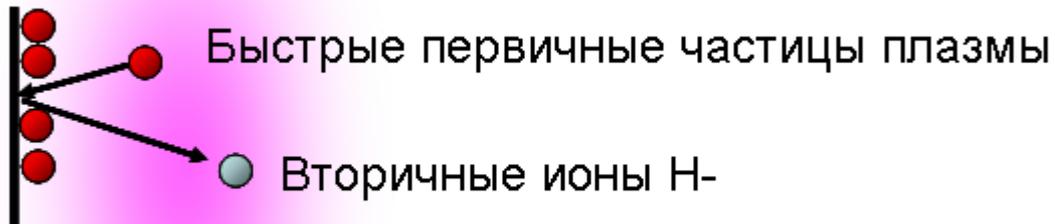


Рис. 5. Схема поверхностно-плазменной генерации ОИ

Процесс кинетической эмиссии ОИ (рис. 6) позволяет получить ОИ с энергией сродства электрона (S) 0.75 эВ, что меньше, чем работа выхода из электрода (ϕ) 1.5 эВ. Слева на рис. 6 расположен металлический электрод, в котором электроны находятся в море Ферми, справа находится вакуум, в котором образованный ОИ заперт вблизи электрода потенциалом сил изображения.

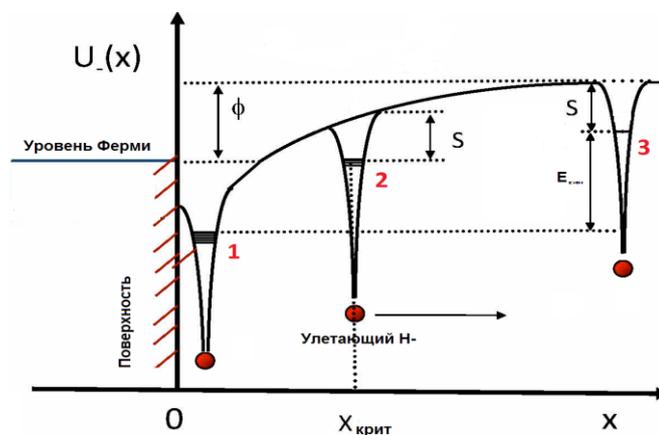


Рис. 6. Три положения уровня электронного сродства в процессе кинетической эмиссии: 1 – ниже уровня Ферми, 2 – на уровне Ферми, 3-выше уровня Ферми.

ОИ, образованный вблизи поверхности металла за счет захвата электрона с моря Ферми на уровень электронного сродства (левая квантовая яма на рис 6), для того чтобы избежать возвращения электрона на уровень Ферми должен быстро преодолеть зону, в которой уровень сродства находится ниже уровня Ферми ($x_{\text{крит}}$ на рис. 6). Если после преодоления критического расстояния кинетическая энергия ОИ больше потенциала сил изображения, то отрицательные ионы становятся свободными частицами, которые можно собрать в пучок. В результате понижения работы выхода и реализации термодинамически неравновесного электронного обмена при бомбардировке поверхности $\text{Mo}+\text{Cs}$ атомами с энергией 5 - 20 эВ коэффициент конверсии при отражении и распылении атомов достигает 25%.

3.1 Газоразрядные системы

Для получения ОИ в ППИ применяют газоразрядные системы в которых присутствуют катоды и аноды. Генерация ОИ происходит на поверхности катода и анода.

3.1.1 Анодные процессы

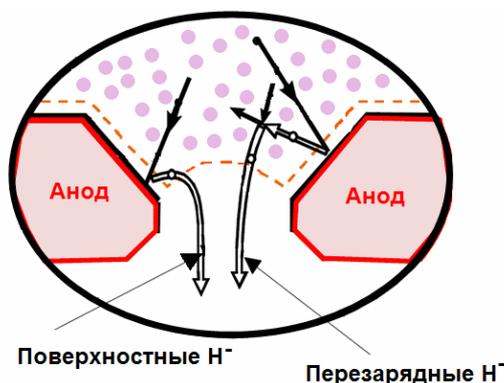


Рис. 7. Схема формирования анодной группы ОИ

Для начала рассмотрим анодные процессы. Анод интенсивно бомбардируется надтепловыми атомами водорода, образующимися в разряде. ОИ образуются в результате кинетической эмиссии из этих нейтральных атомов. Существует два типа сбора образованных ОИ. Образованные вблизи эмиссионного отверстия ОИ вытягиваются полем вытягивающего электрода и формируются в пучок. Другие же ОИ уходят в плазму и создают перезарядную мишень, на которой летящие в эмиссионное отверстие атомы за счет процесса перезарядки конвертируются в ОИ. Образованные таким образом ОИ летят в сторону эмиссионного отверстия, и, поэтому, могут быть захвачены полем вытягивающего электрода.

3.1.2 Катодные процессы

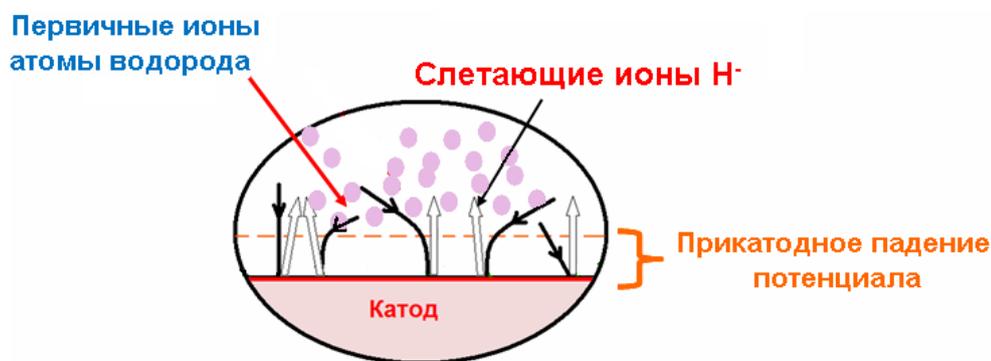


Рис. 8. Схема формирования катодной группы ОИ

Принципиальным отличием катодной генерации является наличие высокого прикатодного падения потенциала (до 70 % напряжения разряда), большая доля ионного тока на катод (около 30 % полного тока разряда), вызывает интенсивную бомбардировку поверхности катодов ионами. Отрицательные ионы образуются из надтепловых нейтральных атомов водорода, а также из

положительных ионов ускоренных прикатодным падением потенциала. Образованные ОИ ускоряются прикатодным падением потенциала, что уменьшает их разрушение плазмой.

Благодаря ускорению катодных ОИ в прикатодной области, можно собирать ионы, образованные на большой площади, в эмиссионное отверстие малого радиуса. На рис. 9 схематически показана картина сбора катодных ОИ со сферической поверхности катода в сечении вдоль и поперек магнитного поля. ОИ ускоряются катодным падением потенциала в малой зоне вблизи катода. Далее ОИ движется в магнитном поле по ларморовской окружности. Катодные ОИ фокусируются в малое пятно в центре эмиссионного отверстия. Это увеличивает плотность тока катодной группы. В импульсных источниках катодная группа составляет до 80% тока пучка.

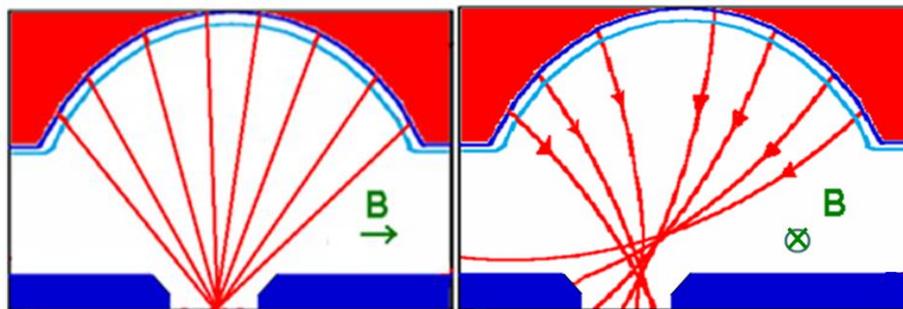


Рис. 9. Схема формирования катодной группы при геометрической фокусировке со сферической поверхности катода вдоль и поперек магнитного поля

3.2 Конструкция источника

В настоящее время на установке БНЗТ используется источник с максимальным током до 5 мА, разработанный в 2004 г. В дальнейшем был создан источник с большим током пучка. На рис. 10

показан общий вид источника, разработанного в 2009г с максимальным током пучка 15 мА.

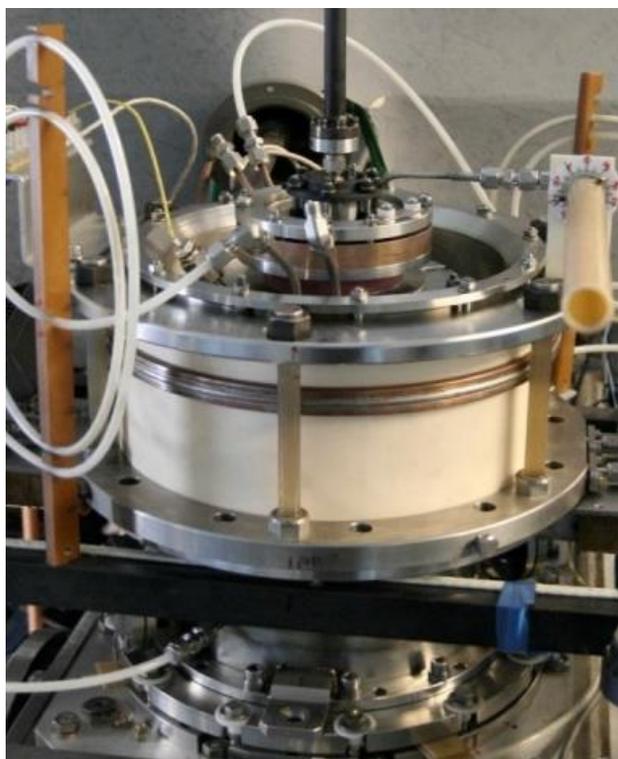


Рис. 10. Фотография поверхностно-плазменного источника.

Схема ППИ показана на рис. 11. Основными элементами конструкции ППИ являются газоразрядная камера (ГРК), ионно-оптическая система (ИОС), система подачи цезия, система подачи водорода и магнитная система. Плазма, необходимая для генерации ОИ, создается в ГРК. Система подачи водорода используется для создания рабочего давления водорода в разряде. Цезий используется для понижения работы выхода из электродов. Для поддержания оптимального покрытия подача цезия в разряд регулируется. Формирование пучка происходит с помощью трехэлектродной ИОС. Магнитная система создает необходимую конфигурацию магнитного поля, которое обеспечивает горение пеннинговского разряда и также

используется для сепарации пучка ОИ от пучка сопутствующих электронов.

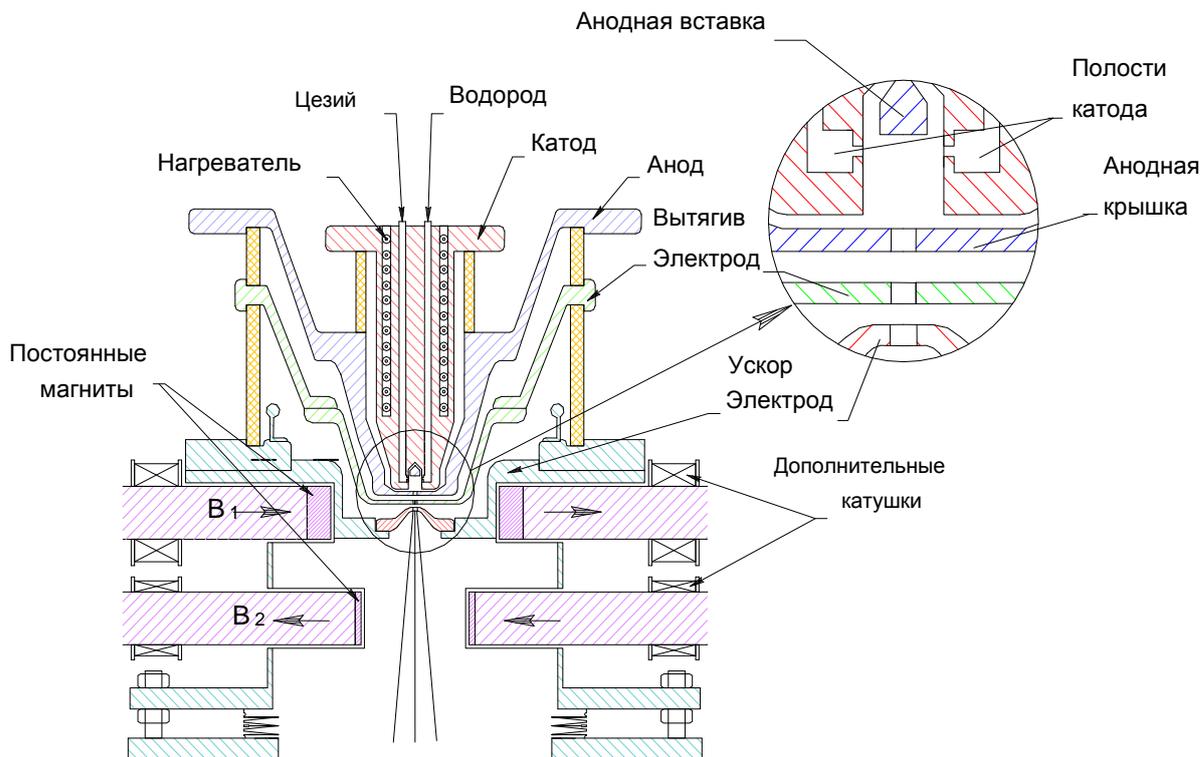


Рис. 11. Схема поверхностно-плазменного источника.

В таблице 1 приведены основные характеристики экспериментальной модели источника ОИ водорода.

Таблица 1. Основные параметры ионного источника

Ток разряда	2 - 15 А
Напряжение разряда	60 ... 110 В
Магнитное поле	0.08 Тл
Давление водорода	4 Па
Подача Cs	<5 мг/час
Вытягивающее напряжение	0-8 кВ

Ускоряющее напряжение	20-32 кВ
Ток пучка Н-	25 мА
Энергия пучка	32 кэВ
Вытягивающий зазор	2.3 мм
Ускоряющий зазор	4.2 мм

3.3 Газоразрядная камера

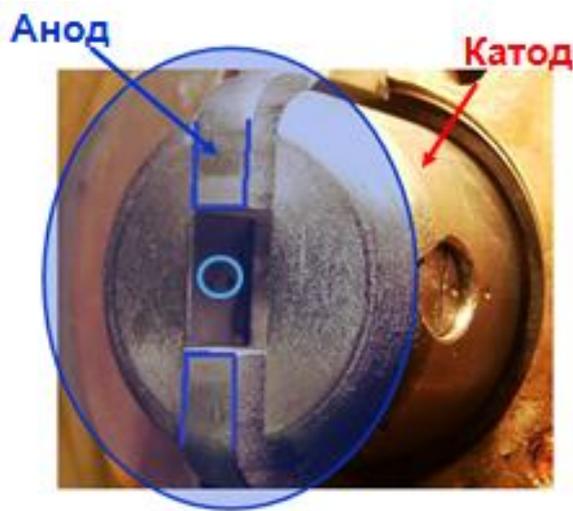


Рис. 12. Фото массивного катода пеннинговского разряда с вставленным в него массивным полукольцом анода; синим показано размещение анодной крышки

Ячейка пеннинговского разряда и схема генерации отрицательных ионов изображены на рис. 13. ГРК образована массивным охлаждаемым молибденовым катодом с двумя выступами, и анодным кольцом, образованным полукольцевой анодной вставкой и анодной крышкой. В крышке сделано эмиссионное отверстие. Объем газоразрядной камеры 1 см^3 .

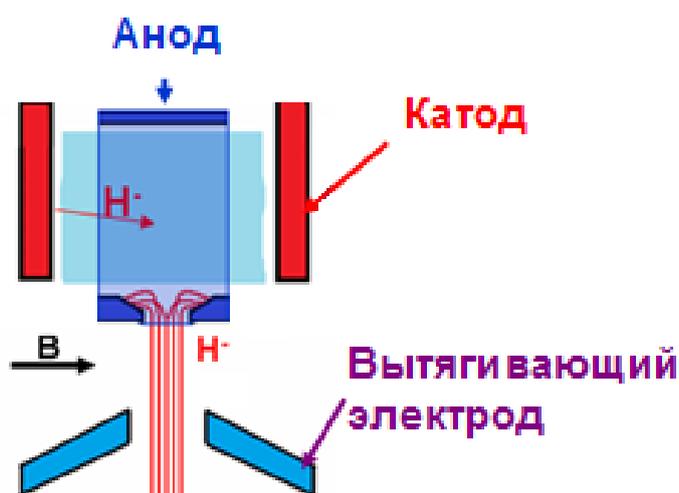


Рис. 13. Схема пеннинговского источника

Для уменьшения напряжения разряда источник располагается в магнитном поле $B = 0,08 \text{ Т}$, создаваемым внешним постоянным магнитом и направленным от одного выступа катода к другому, как показано на рис. 13. Магнитное поле препятствует прямому пролёту электронов от катода к аноду. Электроны, рождаемые на поверхности катода, ускоряются центральным анодным потенциалом и осциллируют между двумя катодными выступами. Источником электронов в разряде служат полые катоды и вторичная эмиссия при бомбардировке катода ионами.

Подача цезия снижает напряжение зажигания и поддержания разряда и позволяет понизить давление водорода в газоразрядной камере. Уменьшение напряжения разряда позволяет снизить тепловую нагрузку на электроды и избежать их интенсивного оплавления. Понижение давления газа принципиально важно для уменьшения разрушения извлекаемого пучка ионов H^- на молекулах сопутствующего газа.

Для облегчения зажигания и поддержания разряда в стенки массивных катодов вкручены вставки полых катодов (ПК) (Рис. 11), именно через них осуществляется подача водорода и цезия

непосредственно в разряд. Отверстия ПК имеют малый диаметр, что обеспечивает перепад плотности водорода. Благодаря проникновению плазмы пеннинговского разряда в полости вставок и интенсивной генерации электронов на их внутренних поверхностях возрастает плотность плазмы. Плазма полых катодов обеспечивает поддержание и стабильную работу разряда [7].

При подаче водорода и приложении напряжения между катодом и анодом порядка 100 В в межэлектродном промежутке зажигается разряд. ОИ образуются на поверхности катода и анода. Образованные на поверхности катода ОИ и ускоренные прикатодным падением потенциала не попадают в эмиссионное отверстие и вклада в пучок не дают. Пучок собирается из анодных ОИ, образованных вблизи эмиссионного отверстия.

3.4 Система подачи водорода

Система подачи водорода показана на Рис. 14. Водород, поступает из баллона (1), находящегося под потенциалом земли.

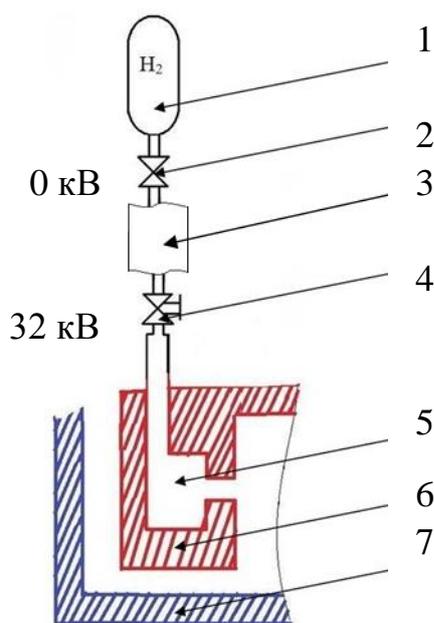


Рис. 14. Схема подачи водорода:

1 - баллон с водородом, 2 – редуктор, 3 – высоковольтная развязка, 4 - игольчатый напекатель, 5 - катодная полость, 6 - катод, 7 - анод.

Давление водорода в баллоне 50 атм. Редуктор (2) понижает давление до 5 атм., которое обеспечивает условия, препятствующие пробоям и зажиганию разряда в длинной трубке, через которую водород подается а игольчатый натекагель (4), находящийся под напряжением -32кВ. Вращая ручку игольчатого натекагеля, можно изменять поток водорода в газоразрядную камеру. Количество водорода, поступающего в камеру, в данной работе определялось количеством делений натекагеля.

3.5 Система подачи цезия

Подача цезия осуществляется, как показано на Рис. 15. Цезий образуется за счет химического взаимодействия хромата цезия с титаном ($\text{CsCrO}_4 + \text{Ti}$), помещаемых в виде таблеток в цезиевую печь (1). Скорость химической реакции нелинейно зависит от температуры, которая зависит от трудно контролируемых условий передачи тепла от цезиевой печи к таблеткам. Для обеспечения контролируемой подачи цезия используется эффект конденсация паров цезия на холодной точке.

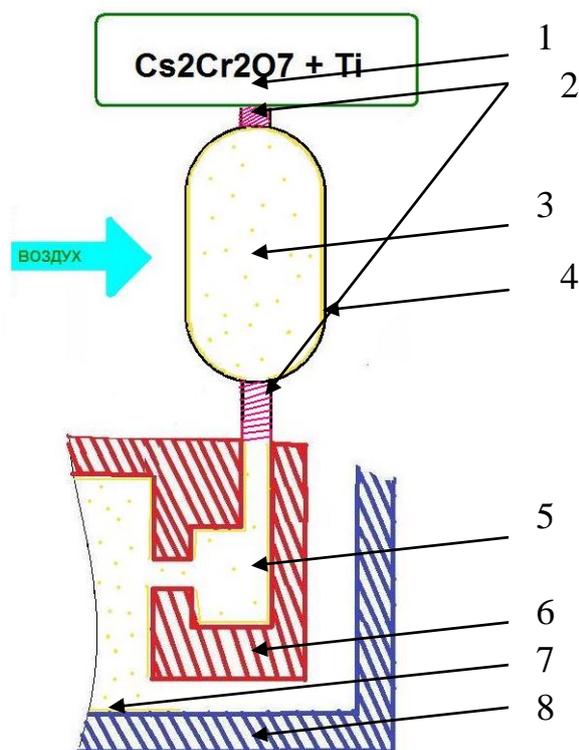


Рис. 15. Схема подачи цезия: 1- цезиевая печь, 2 – омические нагреватели канала, 3 - холодная точка, 4 – цезиевый слой, 5 - катодная полость, 6 – катод, 7 – монослой цезия, 8 - анод.

Поток паров цезия, подаваемых в канал ГРК, определяется давлением внутри небольшого промежуточного объёма с более холодными стенками (холодная точка (3)). С помощью изменения температуры холодной точки, охлаждаемой потоком воздуха от вентилятора, можно регулировать давление паров цезия. С целью предотвращения конденсации Cs на стенках поддерживается повышенная температура Cs-канала при помощи омических нагревателей (2).

3.6 Ионно-оптическая система

В ионном источнике используется трехэлектродная ИОС формирования пучка, включающая в себя анодную крышку с эмиссионным отверстием диаметром 5мм (эмиссионный электрод), вытягивающий электрод (экстрактор) и ускоряющий электрод. Для

высокой устойчивости ИОС к пробоям, все элементы ИОС изготовлены из особо чистого молибдена, имеющего высокую температуру плавления, высокую теплопроводность и низкую вероятность дугообразования на поверхности. Малый коэффициент теплового расширения молибдена обеспечивает малые изменения геометрии ИОС при повышенных тепловых нагрузках. Во время работы на эмиссионный электрод подается постоянное отрицательное напряжение -32 кВ, между ним и экстрактором поддерживается вытягивающая разность потенциалов 7 кВ, а ускоряющий электрод заземлен. В описываемом стационарном источнике электроды принудительно охлаждаются дистиллятом.

3.7 Поисковые модификации источника

В этой работе проводилась дальнейшая модернизация источника для исследования возможности применения катодной генерации в стационарном режиме. Для этого изменялся анод и катодный узел этого источника, остальные системы источника оставались неизменными.

3.7.1 Магнетронная модификация

В магнетронной геометрии ГРК два массивных выступа катода пеннинговской геометрии были соединены центральной катодной пластиной на которой была сделана сферическая лунка для фокусировки образованных на ней ОИ в эмиссионное отверстие в анодной крышке. Сверху анодное кольцо образовано внутренним анодом - стержнем, вкручивающимся сквозь боковые анодные

вставки. Вторая половина кольца образована анодной крышкой (рис. 16).



Рис. 16. Фото магнетронной модификации катода; синим показано положение анодной крышки, фиолетовым – положение внутреннего анода

Центральная катодная пластина кардинально меняет геометрию разряда. Вдоль магнитного поля электроны осциллируют между катодными выступами сверху и снизу центральной катодной пластины (рис. 17). В сечении поперек магнитного поля реализован азимутальный замкнутый $E \times B$ дрейф электронов вокруг пластины по рейс треку. Вклад в пучок дают не только анодные ОИ (как в пеннинговской геометрии), но и ОИ, образующиеся на сферической лунке катода, которые геометрически фокусируются в эмиссионное отверстие. Недостатком данной геометрии является то, что часть плазмы отделена от эмиссионного отверстия центральной катодной пластиной, поэтому плазма используется неэффективно.

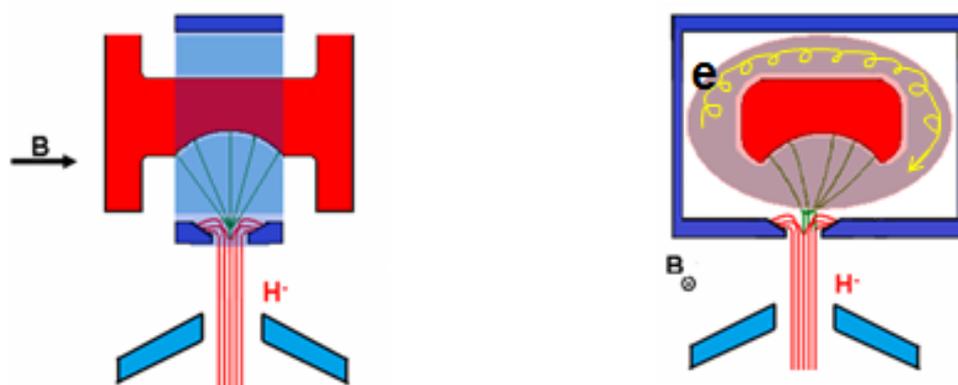


Рис. 17. Схема магнетронного разряда; сечения вдоль и поперек магнитного поля

3.7.2 Полупланотронная модификация источника

В полупланотронной геометрии была убрана верхняя часть геометрии магнетрона.

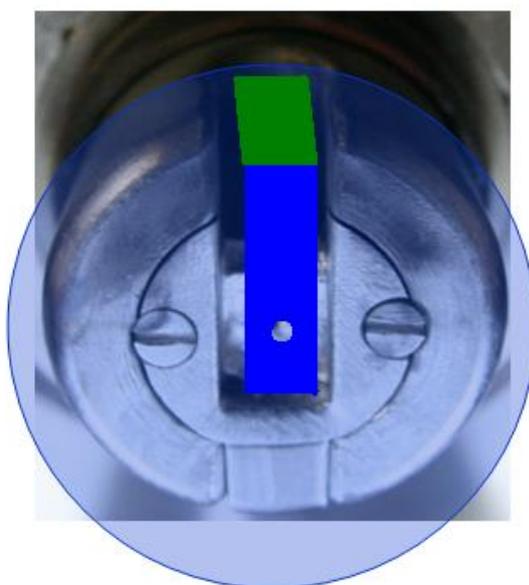


Рис. 18. Фото массивного катода полупланотронной модификации; синим обозначено положение анодной крышки, зеленым- анодная вставка в поджиговую область разряда

В катод была сделана специальная вставка для предотвращения замкнутого дрейфа электронов. Для облегчения зажигания и поддержания разряда сделана поджиговая область.

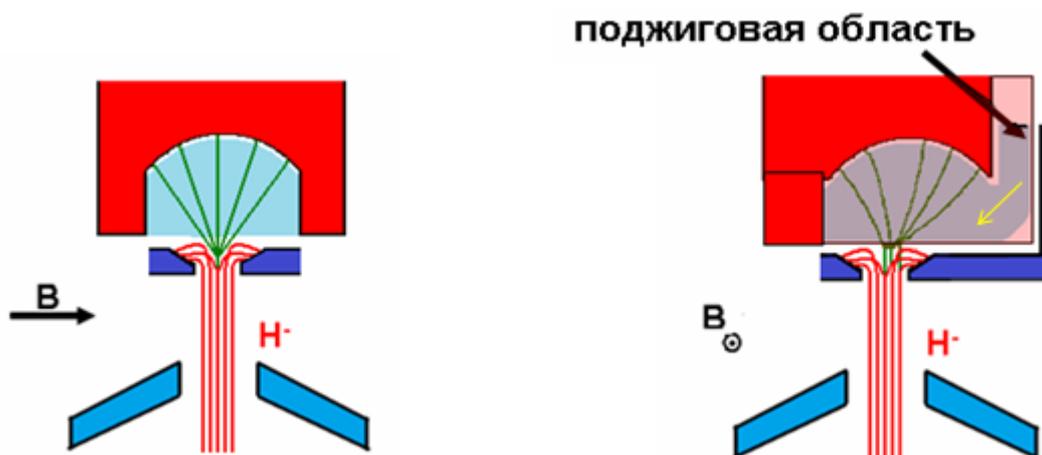


Рис. 19. Схема полупланотронного разряда; сечения вдоль и поперек магнитного поля

Плазма зарождается в поджиговой области и попадает в эмиссионную за счет незамкнутого $E \times B$ дрейфа. Для облегчения зажигания плазма в поджиговую область выведено отверстие канала подачи цезия в разряд. ОИ в пучок формируются с катодной лунки и анодной области вблизи эмиссионного отверстия.

4 Характеристики источников с различными геометриями разрядов

С целью получения пучка ОИ с максимальным током были измерены зависимости тока пучка от параметров источника, проведен их сравнительный анализ. Были проведены эксперименты по оптимизации цезиевой подачи в эмиссионную зону магнетрона. Оценены катодные вклады в ток пучка магнетронного и полупланотронного источника.

4.1 Зависимость тока пучка от напряжения на вытягивающем электроде

На рис. 20 показана зависимость токов пучка I - от напряжения на вытягивающем электроде U_1 для различных модификаций источника

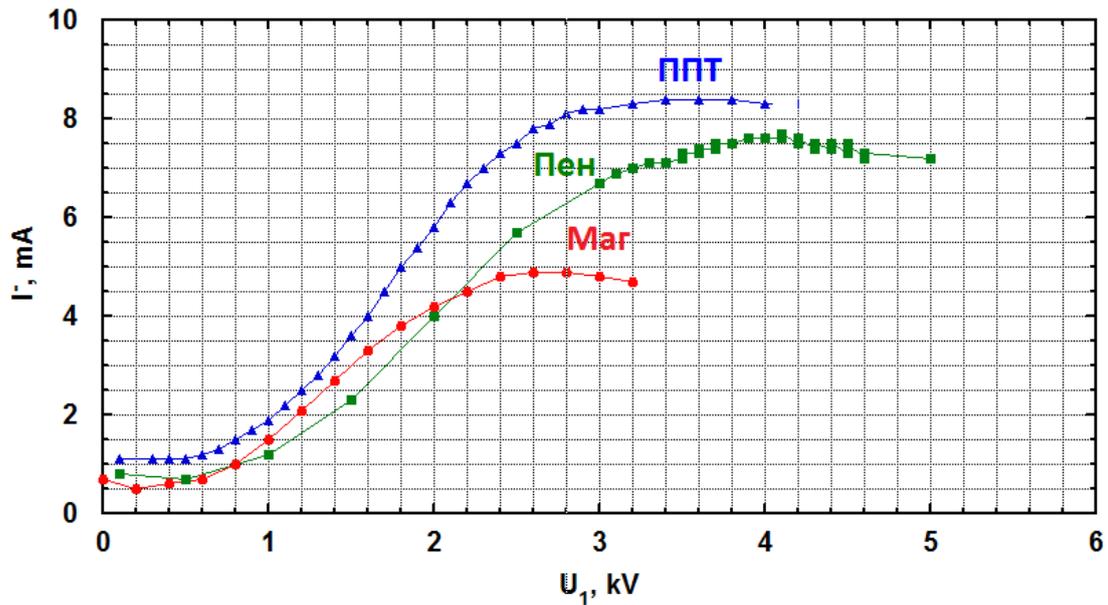


Рис. 20. Зависимость тока пучка I от вытягивающего напряжения U_1 . ток разряда $7A$

Форма и расстояние от центра плазменной границы до электрода являются функцией напряжения на вытягивающем электроде и плотности тока эмиссии

($d_{ca} = \frac{1}{\sqrt{9\pi}} \left(\frac{2e}{M} \right)^{1/4} \frac{U_0^{3/4}}{j_{H^-}^{1/2}}$), а плотность

тока j_{H^-} , извлекаемого из плазмы, является функцией её плотности и температуры. На Рис. 21 показаны формы плазменных границ при разных напряжениях на вытягивающем электроде, полученные в результате численного моделирования с использованием программы PBGUNS.

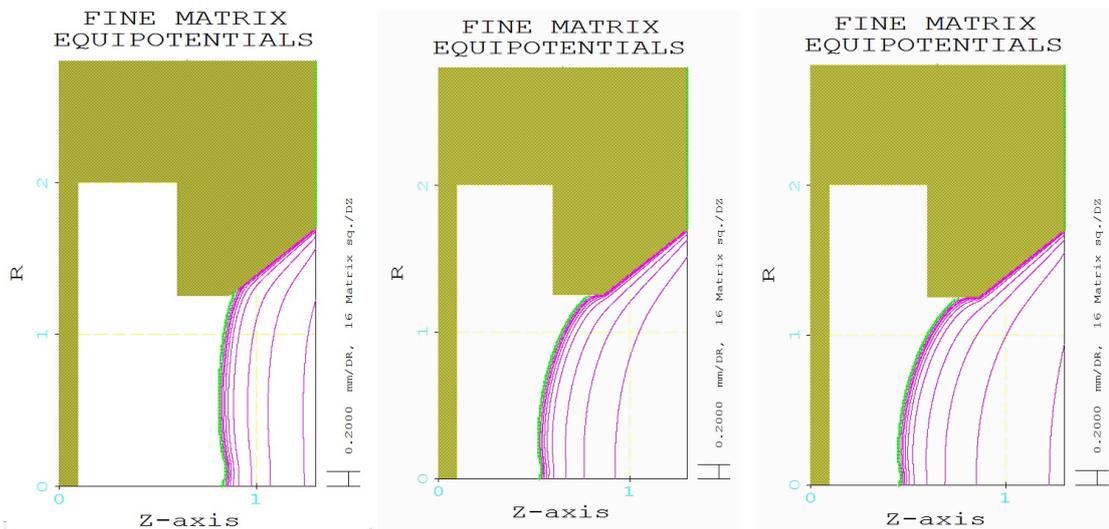


Рис. 21. Форма плазменной границы, рассчитанная для пеннинговского источника при напряжениях на вытягивающем электроде 3kV, 4kV, 5kV, соответственно.

Изменение формы плазменной границы влияет на расходимость группы пучка, образованной на аноде. При слишком низком напряжении плазменная граница является выпуклой, что приводит к сильной расходимости пучка, и пучок не может пройти ИОС без потерь на электродах. При сильно высоком напряжении плазменная граница становится вогнутой, что приводит к перефокусировке пучка. В этом случае также часть пучка не может пройти ИОС. При правильном выборе вытягивающего напряжения может быть получен пучок с минимальной угловой расходимостью, и весь пучок ОИ пройдет через ИОС.

Для всех трех модификаций источника используемых источников напряжения на вытягивающем электроде достаточно для поддержания оптимальной формы плазменной границы. В полупланотронной и магнетронной конфигурациях источника необходимо прикладывать меньшее напряжение для поддержания оптимальной формы плазменной границы и полного прохождения пучка ОИ, чем в пеннинговском источнике потому, что прохождение

катодной группы слабо зависит от напряжения на вытягивающем электроде.

4.2 Зависимость тока пучка от подачи водорода

Для самостоятельного разряда необходимо некоторое минимальное давление газа в ГРК [9]. Основной причиной ионизации газа в разряде является ионизация атомов водорода электронным ударом ($e^- + H = H^+ + e^- + e^-$) свободными электронами, образованными за счет вторично-электронной эмиссии с покрытого цезием катода при бомбардировке катода положительными ионами. При повышении плотности водорода увеличивается плотность плазмы, что за счет более интенсивной бомбардировки анода и катода улучшает генерацию ОИ. С другой стороны при увеличении концентрации водорода обдирка ОИ ($H^- + H_2 \rightarrow H + H_2 + e^-$) приведет к уменьшению тока пучка.

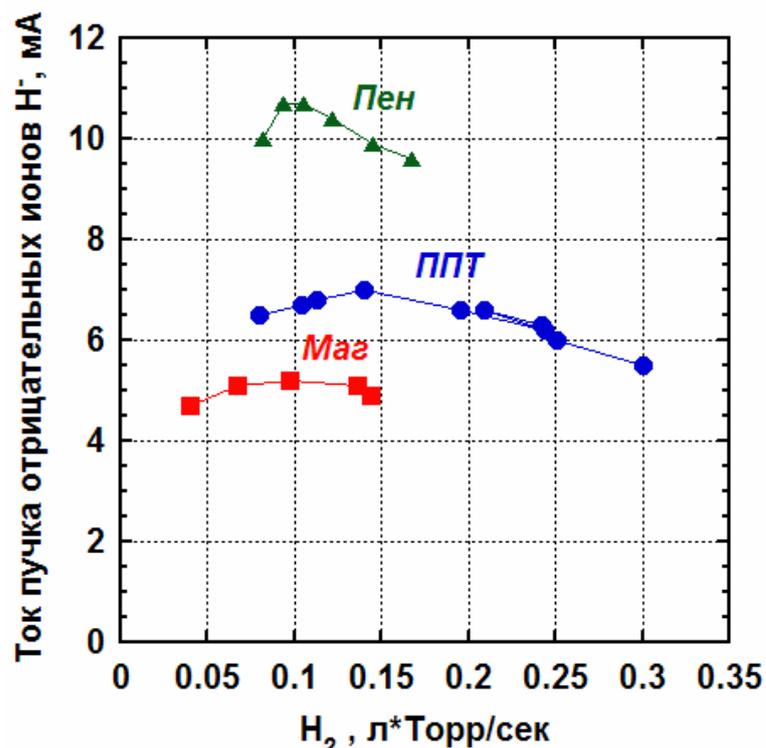


Рис. 22. Зависимость тока пучка от подачи водорода.

Регулировка подачи водорода осуществлялась, как описано в главе 3, подача водорода измерялась с помощью Mass flow контроллера. На рис. 22 показаны зависимости тока пучка от подачи водорода для трёх модификаций источника. Левые точки на графике соответствуют минимальным подачам водорода при которых разряд работает стабильно. Из-за реализации замкнутого ЕхВ дрейфа электронов магнетрон работает стабильно при вдвое меньших подачах водорода чем полупланотрон и Пеннинг. В пеннинговском источнике при повышенной подаче водорода более 0.1 л*Торр/сек ток пучка Н- уменьшается из-за разрушения отрицательных ионов на подушке вытекающего газа. В полупланотронном и магнетронном источнике разрушение пучка слабо зависит от подачи водорода из-за лучшего прохождения катодной группы ОИ через плазму и подушку вытекающего газа.

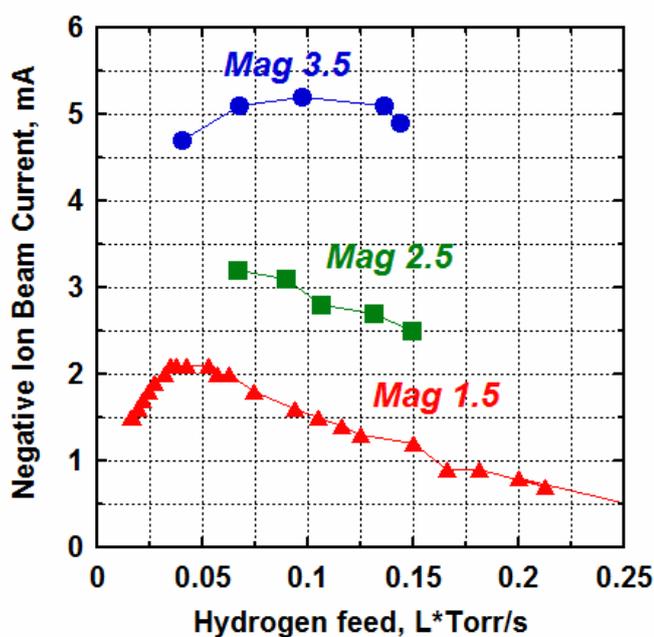


Рис 23 Зависимости тока пучка от подачи водорода для магнетронных источников с разными диаметрами эмиссионных отверстий

Были проведены эксперименты для стационарного магнетронного источника с тремя диаметрами эмиссионных отверстий 1.5 мм, 2.5 мм, 3.5 мм. На рис. 23 показаны зависимости тока пучка от подачи водорода. Максимальный ток ОИ вытягиваемый из магнетронного источника был 2.1 мА при отверстии 1.5 мм, 3.2 мА при 2.5 мм и 5.5 мА при 3.5 мм, что не пропорционально площади эмиссионного отверстия, это будет описано далее.

Оптимальная подача водорода для эмиссионного отверстия 1.5 мм является 0.4 л*Торр/сек, а для эмиссионного отверстия 3.5 мм (в 5.4 раза большее по площади) 0.1 л*Торр/сек . Относительно малое изменение оптимальной подачи водорода для случая эмиссионных отверстий диаметра 1.5 мм и 3.5 мм показывает слабую эффективность запираения водорода в ГРК от диаметра эмиссионного отверстия, так как водород эффективно запирается разрядом.

4.3 Зависимость тока пучка от тока разряда

Увеличение тока разряда приводит к возрастанию мощности, вкладываемой в плазму. В результате плотность плазмы возрастает, и увеличивается поток быстрых атомов на анод, что пропорционально увеличивает анодную генерацию отрицательных ионов. Увеличение плотности тока разряда на катодной лунке улучшает геометрическую фокусировку (так как катодный слой становится уже), что приводит к нелинейной зависимости при малых токах разряда. При увеличении тока разряда все катодные ОИ собираются в эмиссионное отверстие, и при дальнейшем увеличении тока разряда линейно увеличивается ток пучка за счет пропорционального увеличения потока ионов и нейтральных атомов водорода на катод.

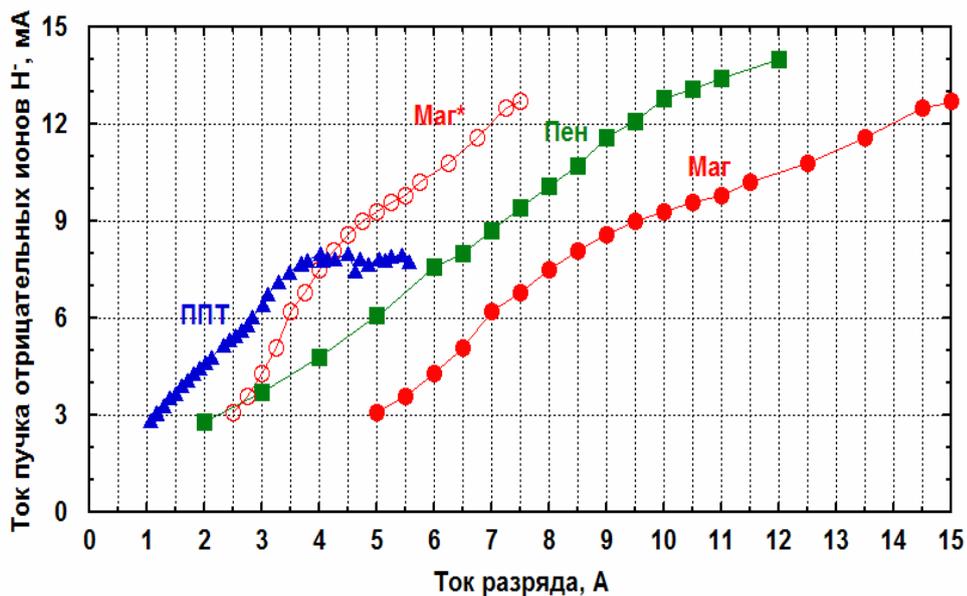


Рис. 24. Зависимость тока пучка от тока разряда

Ток пучка базового пеннинговского источника линейно зависит от тока разряда, максимальный достигнутый ток пучка 14 мА. В полупланотронном источнике за счет катодной генерации удавалось получать больший ток пучка при токах разряда менее 5 А. При токах более 5 А достигалось насыщение по току разряда. В магнетронном источнике ток пучка вытягиваемого из источника оказался меньше, чем в пеннинговском источнике. Это связано с неэффективным использованием плазмы разряда (часть плазмы закрыта катодной пластиной).

На рис 24 пустыми кругами показана зависимость тока пучка магнетронного источника нормированная на эффективный объем плазмы. На ней ток пучка магнетронного источника при низких токах разряда равен току пучка пеннинговского источника, а при увеличении плотности тока (она в 2 раза ниже чем при том же токе разряда полупланотронного источника) выше тока пучка пеннинговского за счет катодной группы. Из разницы тока пучка

модификаций источника и пеннинговского (базового) источника при одинаковом токе разряда, нормированном на эффективный объем плазмы, был оценен вклад катодной группы: 50% тока пучка для полупланотронного источника и 30% тока пучка для магнетронного источника.

4.4 Зависимость тока пучка от подачи цезия

Подача цезия в ионном источнике выполняет две функции. Во-первых, при покрытии поверхности электродов цезием снижается работа выхода, что увеличивает вероятность образования ОИ и увеличивает ток пучка ОИ. Во-вторых, пониженная работа выхода приводит к росту вторично-электронной эмиссии, что уменьшает напряжение горения разряда при постоянном токе. Основным средством диагностики количества цезия в газоразрядной камере является напряжение разряда при фиксированном токе разряда.

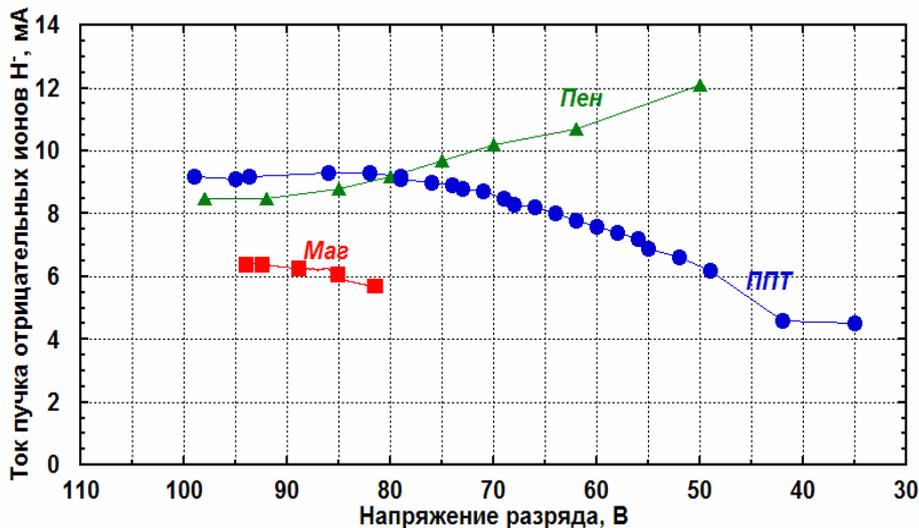


Рис. 25. Увеличение напряжения разряда (по оси X) и снижение тока пучка при увеличении подачи цезия, ток разряда 8.5А.

4.4.1 Дополнительная подача цезия в эмиссионную зону разряда во время пауз в работе разряда

Центральная катодная пластина и плотная плазма магнетронного разряда препятствует перераспределению цезия из верхней части разряда в эмиссионную зону. Уменьшенный поток цезия не достаточен для оптимального цезиевого покрытия электродов (катодной лунки и анода). Для увеличения потока цезия в эмиссионную зону был испытан режим работы, в котором после 1 минуты работы разряд на 1 минуту выключался для дополнительного перераспределения цезия. Во время паузы цезий конденсируется на холодной поверхности анода, понижая ее работу выхода и увеличивая анодную генерацию ОИ.

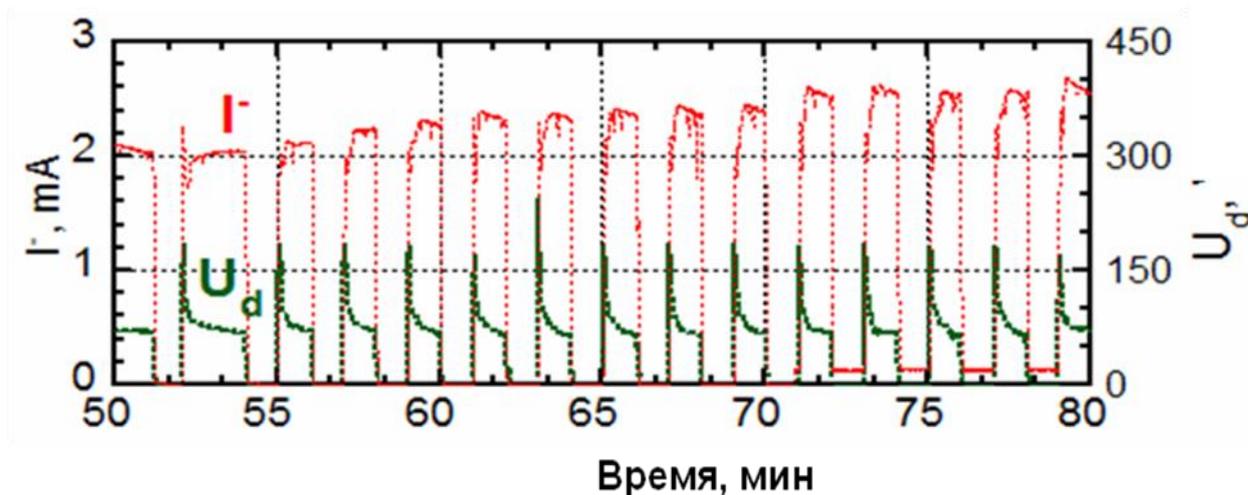


Рис. 26 Эволюция тока пучка ОИ и напряжения разряда во время работы разряда в режиме работы с выключением разряда для перераспределения цезия

После 10 пауз в работе разряда напряжение разряда не изменилось, что означает, что плазма на 50 мин. и на 80 мин. имеет одинаковые характеристики. При этом ток пучка при тех же параметрах плазмы вырос с 2 мА до 2,7 мА. Это демонстрирует необходимость дополнительной подачи цезия в эмиссионную зону магнетрона.

Значительное уменьшение напряжения разряда в течение 10 сек после его зажигания показывает характерное время перераспределения цезия в эмиссионную зону разряда.

4.4.2 Подача цезия в эмиссионную зону разряда через канал в катоде

Для подачи цезия в эмиссионную зону разряда без запирающего в верхней зоне разряда в стационарном режиме работы была изменена геометрия цезиевого канала. Были заткнуты ПК для подачи цезия и водорода в верхнюю часть разряда, а для подачи цезия и водорода были просверлены каналы напрямую в эмиссионную зону разряда рис. 27. Поданный таким образом цезий запирается у центральной катодной пластины, что уменьшает её работу выхода и увеличивает плотность тока положительных ионов на центральную катодную пластину.

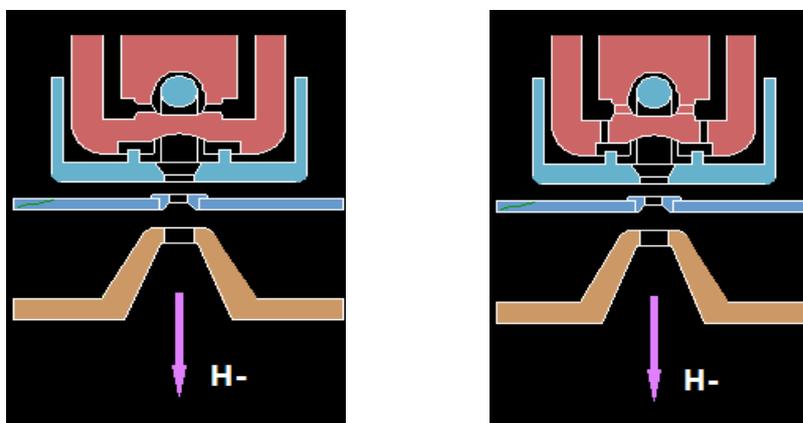


Рис. 27 Два сечения магнетронного источника вдоль магнитного поля; с каналами в верхнюю зону разряда, с каналами в эмиссионную зону разряда.

На рис. 28 показаны зависимости тока пучка от тока разряда магнетронного источника с подачей цезия через верхний ПК и напрямую в эмиссионную зону разряда. При токах разряда меньше 7 А ток пучка с подачей в эмиссионную зону выше, чем с подачей в верхнюю. Однако, при дальнейшем увеличении тока разряда

повышенная плотность тока ионов на эмиссионную зону катода приводит к его перегреву и возникает насыщение. При быстром увеличении тока разряда, когда катод не успевает перегреться (полые квадраты на графике на рис. 28), насыщение не возникает.

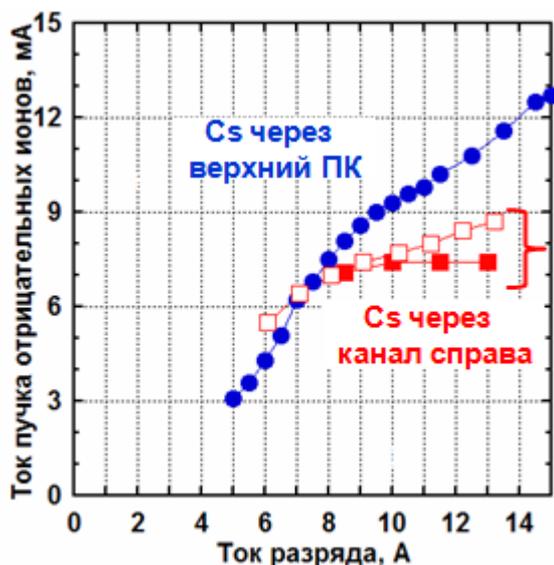


Рис. 28 Зависимости тока пучка от тока разряда: синие круги – магнетрон с подачей цезия вверх, сплошной и полый квадрат - подача цезия вниз.

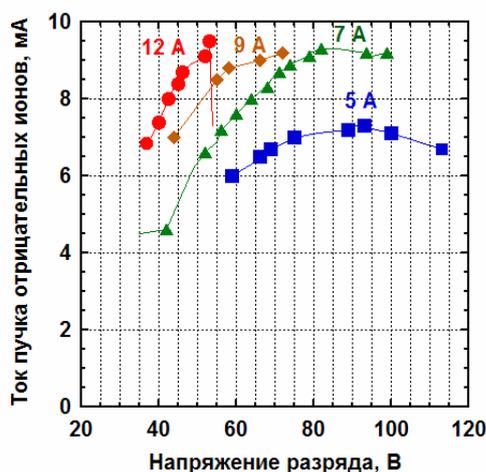


Рис. 29. Зависимость тока пучка полупланотронного источника от напряжения разряда при разных токах разряда

На рис. 29 показана зависимость тока пучка полупланотронного источника от напряжения разряда, изменяемого подачей цезия, при разных токах разряда. Максимальные напряжения разряды

показанные на рис. 29 соответствуют предельным напряжением при которых разряд работает стабильно. Видно, что при увеличении тока разряда из-за перегрева уменьшается максимально допустимое напряжение разряда (при котором разряд работает стабильно), из-за чего при токах разряда больше 7А приходится работать при неоптимальном пониженном напряжении разряда, что приводит к уменьшению эффективности катодной генерации при больших токах разряда.

4.5 Основные характеристики источников

В таблице приведены основные характеристики источников с разными геометриями разрядов. Наибольшей энергетической эффективностью 45 Вт/мА обладает полупланотронный источник. В магнетронном источнике за счет замкнутого дрейфа в скрещенных полях удаётся работать при меньшей подаче водорода 0.04 л*Торр/сек.

Таблица 2. Основные характеристики источников

	Пеннинг	Магнетрон	ППТ
Энергетическая эффективность, Вт/ мА	50	90	45
Подача водорода, л*Торр/сек	0.08	0.04	0.08
Максимальный ток пучка, мА	14	13	8
Вклад катодной группы	-	25%	35%

5 Обсуждение результатов

5.1 Оценка вклада катодной группы в ток пучка ОИ

Были проведены эксперименты по оценке вклада катодной группы в ток пучка вытягиваемого из магнетронного и полупланотронного источников.

5.1.1 Катодная группа магнетронного источника

На рис. 30. показана зависимость тока пучка магнетронного и пеннинговского источника при оптимальных параметрах работы разряда для модификаций источника с разными диаметрами эмиссионных отверстий.

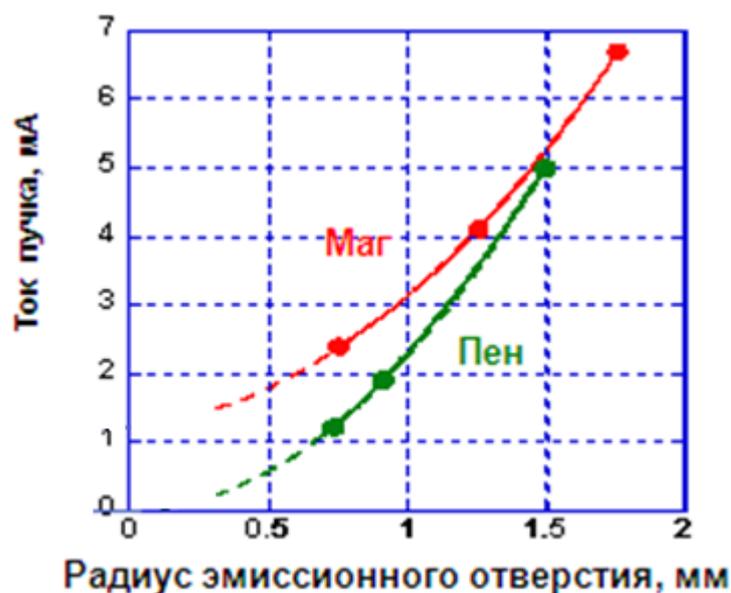


Рис. 30. Зависимости тока пучка от диаметра эмиссионного отверстия для пеннинговского и магнетронного источников.

На ранее исследуемом пеннинговском источнике ток пучка, состоящий в основном из анодной группы, пропорционален площади эмиссионного отверстия.

Нелинейность от площади зависимости магнетронного источника связана с тем, что пучок ОИ вытягиваемый из магнетронного источника состоит из анодной и катодной фракций. Интенсивность вытягивания анодной фракции пропорциональна площади эмиссионного отверстия [5], в то время как катодная фракция геометрически фокусируется в пятно малого радиуса и имеет треугольный профиль [8]. Геометрически сфокусированная катодная фракция слабо уменьшается при уменьшении диаметра эмиссионного отверстия, поэтому низкое измеренное отношение токов пучка (2.5:1.5:1) вытягиваемых из магнетронного источника с отношением площадей эмиссионных отверстий (5.4:2.8:1) может быть объяснено, если катодная фракция ОИ сфокусирована в малое пятно диаметром ≤ 1.5 mm, а катодный вклад в ток пучка составляет 1.2-1.4 мА.

Если катодная группа фокусируется в отверстии 1.5 мм при учете разрушения на струе, получаем следующую систему уравнений (прошедшая катодная группа + прошедшая анодная группа = полному току пучка):

$$\begin{cases} 2.25A + K = \frac{2.1 \text{ mA}}{0.86} = 2.44 \\ 6.25A + K = \frac{3.2 \text{ mA}}{0.78} = 4.11 \\ 12.25A + K = \frac{5.2 \text{ mA}}{0.7} = 6.74 \end{cases}$$

где A – интенсивность анодной группы, K – вклад катодной группы. Получаем $A=0.4$ мА; $K=1.2$ мА. Таким образом ток катодной группы $K=1.2$ мА. При увеличении диаметра эмиссионного отверстия ток пучка увеличивается только из-за анодной группы рис. 31.

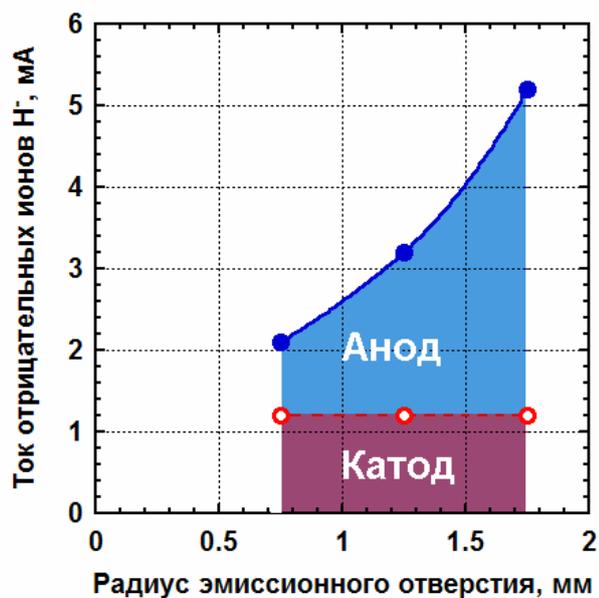


Рис. 31 Вклад катодной и анодной групп магнетронного источника при разных эмиссионных отверстиях.

5.1.2 Катодная группа полупланотронного источника

Для оценки катодного вклада в генерацию пучка ОИ в полупланотронном источнике был проведен эксперимент в котором была подавлена катодная генерация. Для этого фокусирующая лунка катода была закрыта тонкой катодной пластиной, которая не влияла на общую геометрию разряда. В результате был нарушен сбор ОИ образованных на катоде. Из-за плохого охлаждения пластинки (только на периферии) она перегревалась. Перегрев приводил к перераспределению цезия с эмиссионной зоны катода, что уменьшало генерацию ОИ, и соответственно, катодной вклад в пучок. В таблице 3 представлены токи пучка при токах 3 А и 5 А для источника с активной и подавленной катодной генерацией. Таким образом вклад катодной генерации в ток пучка при токе разряда 3 А составлял 2.2 мА - 35% тока пучка, а при токе разряда 5А – 3.3 мА – 45 % тока пучка. Результат этой оценки тока пучка совпадает с результатом

оценки, проведенной на основании сравнения зависимостей тока пучка от тока разряда для пеннинговского и полупланотронного источника (пункт 5.3)

Таблица. 3. Ток пучка ОИ при открытой и закрытой эмиссионной области катода

	3 А	5 А
фокусирующая катодная поверхность открыта	6	7.5
фокусирующая катодная поверхность закрыта пластинкой	3.8	4.2

5.2 Перегрев катода в полупланотронном источнике

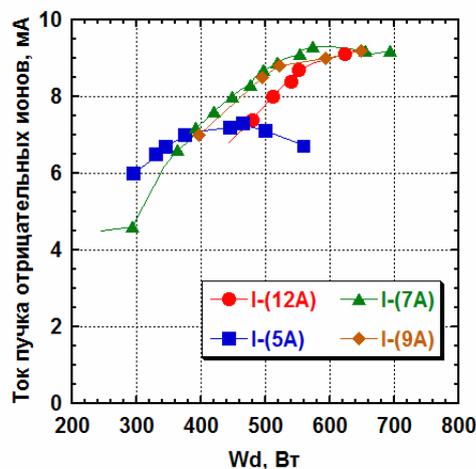


Рис. 32. Зависимость тока пучка от мощности, вкладываемой в разряд при фиксированной подаче цезия при разных токах разряда

На рис. 32 показана зависимость тока пучка от мощности разряда, которая изменялась изменением напряжения разряда (регулируемого подачей цезия), при разных фиксированных токах разряда. Видно, что при максимальном напряжении стабильной работы разряда мощности разрядов при разных токах разряда (>7А)

равны 700 Вт. Это означает, что при мощности, вкладываемой в разряд 700 Вт, происходит перегрев центральной пластины катода, разрушение цезиевого покрытия на ней, которое уже не компенсируется бомбардировкой цезием из плазмы.

На рис. 33 показан ход эксперимента на источнике: До 17:38:40 в источнике горел стабильный разряд, постоянное напряжение ~ 90 В, постоянный ток пучка 6 А. В 17:38:40 ток разряда был увеличен до 6.3 А, сразу появились микроброски ($\sim 10\%$) напряжения разряда. Через 3 минуты катод окончательно перегрелся, что привело к неустойчивому цезиевому покрытию и к броскам напряжения разряда $\sim 40\%$, приводящим к уменьшению вытягиваемого тока пучка. В 17:40:40 ток разряда был уменьшен до 4 А, это привело к охлаждению катода и к стабилизации цезиевого покрытия. Ток пучка и напряжение разряда стали вновь гладкими.

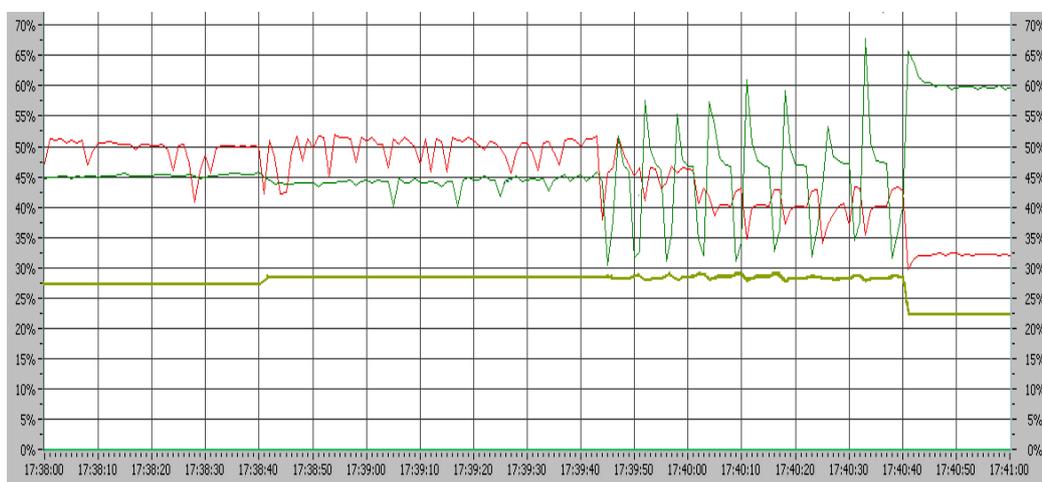


Рис. 33. Изменение тока пучка и напряжения разряда во время экспериментов на источнике: *красный цвет*- ток пучка, *зеленый цвет* – напряжение разряда, *коричневый цвет* – ток разряда.

Таким образом, было выявлено, что при увеличении мощности, вкладываемой в разряд, происходит перегрев катода и разрушение цезиевого покрытия. Для дальнейшего увеличения тока разряда (при оптимальном напряжении) необходимо усилить теплоотвод катода.

Заключение

Впервые в мире были созданы и испытаны сильноточные стационарные ПШИ ионов Н- с полупланотронной и магнетронной геометриями электродов. В полупланотронном разряде ОИ сгенерированные на катоде составляют ~30% тока пучка, а в магнетронном разряде ~20%. Было выявлено, что в Пеннинговском источнике выгодно работать при высокой подаче цезия и малом напряжении разряда (~50 В). А в магнетроне и полупланотроне необходимо поддержание высокого (~100 В) напряжения разряда – приходится работать при пониженной подаче цезия. В разряде с магнетронной геометрией удаётся работать с вдвое меньшей подачей водорода, чем в разрядах с полупланотронной и пеннинговской геометриями. В магнетронном источнике ток пучка меньше, чем в пеннинговском из-за того, что часть плазмы находится сверху центральной катодной пластины. Необходимо увеличить плотность плазмы вблизи эмиссионного отверстия путем дальнейшего увеличения тока разряда или с помощью дополнительной подачи цезия в эмиссионную зону разряда. Полупланотрон обеспечивает наиболее высокую эффективность генерации ионов Н- при токах разряда 1-5 А, при токах разряда более 5А ток пучка насыщался из-за перегрева эмиссионной области катода.

Список использованной литературы

- 1) *Н.Н. Семашко, А.Н. Владимиров, В.В. Кузнецов, В.М. Кулыгин, А.А. Панасенков*, «Инжекторы быстрых атомов водорода» Энергоиздат, (1981) – 168 с.
- 2) *Г.И. Димов, Ю.И. Бельченко, Г.С. Крайнов, Р.А. Салимов, Н.К. Куксанов, Г.И. Сильвестров, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Туунов, Д.К. Топорков, В.В. Широков*, «Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для борнейтронозахватной терапии и обнаружения взрывчатых веществ методом резонансного поглощения γ -излучения» Атомная энергия, 94, 2 (2003), 155-159 с.
- 3) *Yu. Belchenko, I. Gusev, A. Khilchenko, A. Kvashnin, V. Rashchenko, A. Sanin, V. Savkin, and P. Zubarev*, «Advanced direct current negative-ion source for accelerator use» RSI, **77**, 1 (2006), 03A527.
- 4) *B. Bayanov*, «Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital.» Nucl. Inst. And Meth. In Phys. Res. A, **413**/2-3 (1998) 397-426 с.
- 5) *Ю.И. Бельченко, Г.И. Димов, В.Г. Дудников*, «Физические основы поверхностно-плазменного метода получения пучков отрицательных ионов» ИЯФ (1977).
- 6) *Под ред. Б.Я. Мойжеса, Г.Е. Пикуса*, «Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма» Наука (1973) – 480 с.
- 7) *Б.И. Москалев*, «Разряд с полым катодом» Энергия (1969) – 184 с.
- 8) *Под ред. Я. Брауна*, «Физика и технология источников ионов» Мир (1998) – 496 с.

9) Метель, «Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов для генерации плазмы и пучков ускоренных частиц» Москва (2005)

10) *М.Д. Габович*, «Физика и техника плазменных источников ионов» Атомиздат (1972) – 304 с.