

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра **ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Ушмоткин Виталий Олегович

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Изучение подачи цезия в ВЧ источник отрицательных ионов с большой площадью эмиссии

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

д-р физ.-мат. наук, профессор

ИЯФ СО РАН

Иванов А. А. /.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2018 г.

Научный руководитель

канд. физ.-мат. наук,

с.н.с., ИЯФ СО РАН

Санин А. Л. /.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2018 г.

Дата защиты: «.....».....2018 г.

Новосибирск, 2018

Оглавление

1. Введение	3
2. Цезий в источниках отрицательных ионов	5
2.1. Получение отрицательных ионов.....	5
2.2. Роль цезия в генерации отрицательных ионов	7
2.3. Свойства цезия и способы его подачи в источник	8
2.4. Термодесорбция цезия с поверхности плазменного электрода	9
3. Описание установки	11
4. Эволюция содержания цезия в источнике	14
4.1. Контроль подачи цезия.....	14
4.2. Зависимость тока пучка от подачи цезия	16
4.3. Вольт-амперные характеристики источника	17
5. Выводы.....	19
6. Список литературы.....	20

1. Введение

Главная задача исследования управляемого термоядерного синтеза (УТС) – это получение устойчивой, долгоживущей горячей плазмы. Одна из проблем физики УТС – это проблема ввода в плазму мощности, необходимой для нагрева до термоядерной температуры. В настоящее время, одним из эффективных способов нагрева в установках с магнитным удержанием плазмы является инжекция в плазму пучков быстрых атомов (нейтральная инжекция или NBI). Инжектируемые в плазму атомы взаимодействуют с ней через перезарядку и ионизацию электрон-ионным ударом, тем самым передавая энергию плазме.

Основным элементом в инжекторе нейтралов является источник отрицательных или положительных ионов. Магнитное поле в термоядерных установках препятствует попаданию инжектируемых ионных частиц внутрь плазмы, поэтому следует инжектировать нейтралы с энергией необходимой для нагрева. Пучки нейтралов с большой энергией получают путём нейтрализации положительных или отрицательных ионов.

Для современных магнитных ловушек, имеющих большие размеры, необходимо использовать пучки нейтралов с энергией частиц до 1 МэВ. Эффективность нейтрализации пучка ускоренных положительных ионов водорода при энергии в 100 кэВ составляет 20 %, а при энергиях в 1 МэВ стремится к нулю, для отрицательных ионов (ОИ) она составляет около 60% в диапазоне энергий от 100 кэВ до 1 МэВ. Это объясняется тем, что дополнительный электрон слабо связан с атомом водорода (средство к электрону 0,75 эВ) и легко отрывается при взаимодействии с другими частицами [1].

К примеру, инжекторы быстрых атомов на основе источников ОИ используются для нагрева плазмы в стеллараторе LHD и будет использоваться в токамаке JT-60SA.

Технология получения пучков отрицательных ионов сложнее, чем положительных. Пучок ОИ в большей степени подвержен различным

разрушающим процессам, и, как правило, плотность тока, получаемая в источнике ОИ, на порядок меньше плотности тока, получаемой в источнике положительных ионов с сопоставимыми характеристиками. Однако все сложности, возникающие при создании и транспортировке пучка отрицательных ионов, окупаются за счет высокой эффективности нейтрализации.

2. Цезий в источниках отрицательных ионов

2.1. Получение отрицательных ионов

Отрицательные ионы водорода обладают малым сродством к электрону, поэтому их трудно получать в источниках с плазменной (объемной) генерацией. Поверхностно-плазменный механизм генерации ионов, разработанный в 1972 г. в ИЯФ, позволяет получать ОИ с высокой плотностью тока. В поверхностно-плазменном механизме генерация отрицательных ионов происходит за счет конверсии быстрых положительных ионов и нейтральных атомов на поверхности с низкой работой выхода.

На рисунке 1 схематично показан поверхностно-плазменный метод образования отрицательных ионов. К примеру, из плазмы ВЧ разряда на поверхность сетки ионно-оптической системы (ИОС) летят надтепловые положительные ионы и нейтральные атомы водорода. Налетающие частицы перезаряжаются на поверхности электрода. За счёт кинетической эмиссии быстрый атом захватывает электрон с электрода, имеющего низкую работу выхода, и образует отрицательный ион.

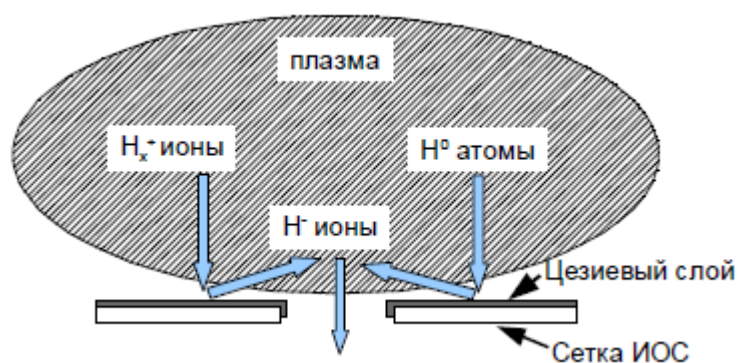


Рисунок 1. Схема поверхностной генерации отрицательных ионов.

Образованные ионы вытягиваются и формируются в пучок ионно-оптической системой. В экспериментальном источнике использовалась трёхэлектродная ИОС. Для того, чтобы сформировать пучок с током в несколько ампер и энергией в сотни килоэлектронвольт, используются многоапертурные ИОС.

На формуле 1 представлен закон Чайлда-Ленгмюра для вакуумного диода.

$$j_{3/2} = \frac{\sqrt{2e}}{9\pi\sqrt{m_i}} \frac{|U|^{3/2}}{d^2} \quad (1)$$

где d – величина зазора между электродами, U – приложенное напряжение.

В случае плазменного эмиттера закон имеет иной смысл. Ток эмиссии определяется процессами внутри плазмы ($j = en_0c_s$, где c_s – скорость ионного звука), при этом меняется зазор d . При заданном напряжении U плазма заполняет пространство, чтобы до коллектора остался зазор нужного размера [2]. Поэтому приравнивая $j = j_{3/2}$ получаем формулу 2.

$$d = \frac{\sqrt{2}}{3} * \left(\frac{2e|U|}{T_e} \right)^{3/4} * \lambda_d \quad (2)$$

где $\lambda_d = \sqrt{T_e/4\pi e^2 n}$ – дебаевский радиус, T_e – температура электронов, d – зазор между поверхностью эмиттера и коллектором ионов.

Для расчета формирования пучка использовался коммерческий код PB-GUNS. На рисунке 2 показана схема ячейки ИОС, используемая в эксперименте и смоделированная программой PB-GUNS. На рисунке также показаны траектории пробных частиц пучка (красный цвет) и эквипотенциальные линии электрического поля (зелёным цветом).

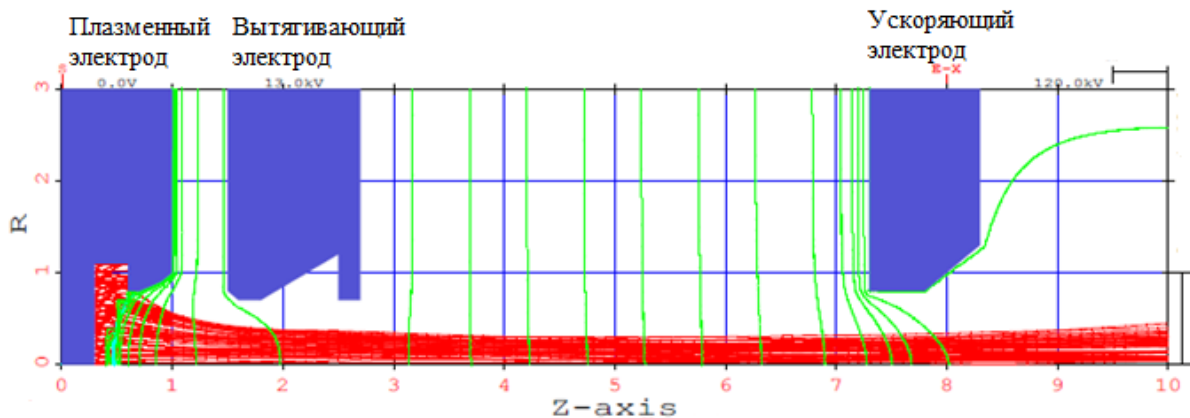


Рисунок 2. Элементарная ячейка ионно-оптическое системы и результат моделирования в программе PB-GUNS траектории пучка и эквипотенциалей.

2.2. Роль цезия в генерации отрицательных ионов

Чистая поверхность электродов имеет недостаточно низкую работу выхода (более 4 эВ) для генерации необходимого количества отрицательных ионов. Для того чтобы уменьшить работу выхода, на поверхности эмиттера отрицательных ионов создают однородное самоподдерживающееся цезиевое покрытие. Поверхность, покрытая цезием, имеет работу выхода заметно ниже чем у чистого электрода. Для удобного описания степени покрытия поверхности используется внесистемная единица измерения монослой, который для молибдена соответствует $4,5 \times 10^{14}$ атомам на см^2 на плазменном электроде. Значение плотности покрытия монослоя варьируется в зависимости от материала покрытия и материала электрода [3].

Зависимость работы выхода от коэффициента покрытия и от разных материалов электрода, показана на рисунке 3. Наименьшая работа выхода достигается при частичном покрытии электрода. Работа выхода имеет минимум. Этот минимум достигается при покрытии $\sigma_{min} = 0,5 - 0,7$ монослоя. и составляет $\varphi_{min} \sim 1,5$ эВ [4].

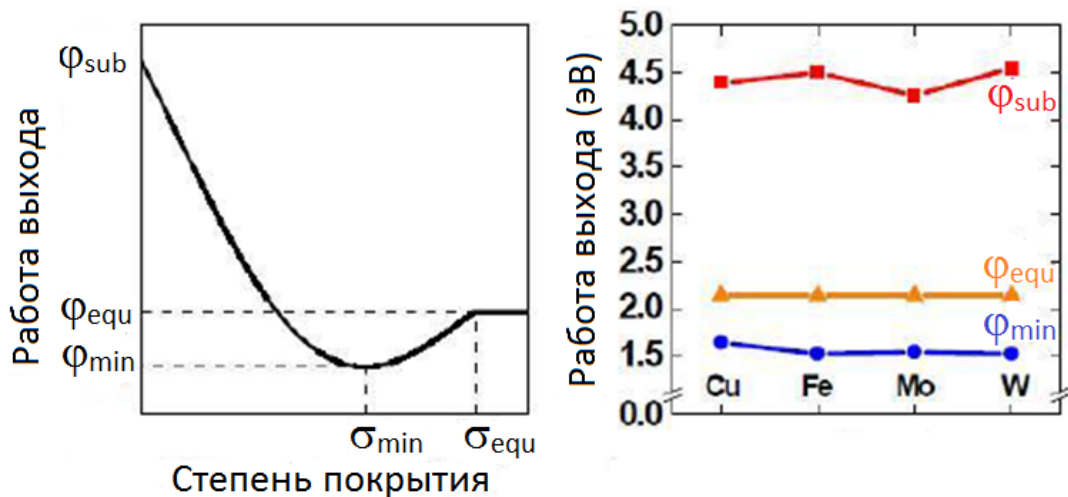


Рисунок 3. Зависимость работы выхода от степени покрытия цезием (слева) и от материала электрода (справа).

Уменьшение работы выхода происходит благодаря формированию химического соединения между цезием и металлом электрода, в результате чего образуется дипольный слой. В свою очередь, если толщина цезиевого

слоя на электроде превысит значение в $0,5 - 0,7$ монослоя, то работа выхода начинает расти, и дорастает до уровня чисто цезиевой поверхности.

2.3. Свойства цезия и способы его подачи в источник

Цезий химически самый высокоактивный металл, который является сильнейшим восстановителем. Из-за своей химической активности он образует огромное количество соединений на основе ионной связи, в связи с чем его используют как гетер, для поглощения остаточных газов.

Цезий легко воспламеняется на воздухе, образуя пероксид, а при малом содержании кислорода образуются оксиды, к примеру, на плазменном электроде. Энергия связи оксида цезия $Cs_2O \sim 2$ эВ. Образование оксида цезия на плазменном электроде увеличивает работу выхода, необходимую для кинетической эмиссии. Отсюда вытекает проблема ввода цезия в источник. Помимо этого, при контакте чистого (металлического) цезия с водой выделяется много энергии.

На данный момент для подачи цезия в источники отрицательных ионов используются 2 основных способа: металлический цезий из ампул и выделение прореагировавшего цезия из таблеток.

Металлический цезий. Из-за его активного взаимодействия с атмосферой, данный способ можно отнести к опасному типу подачи. Чистый цезий перевозится в закрытых стеклянных ампулах (рисунок 4, слева), которые помещаются в печь и лишь после откачки атмосферы данные ампулы разламываются, тем самым высвобождая чистый цезий.

Выделение прореагировавшего цезия из таблеток. Ввиду того, что таблетки, содержащие цезий, можно переносить на открытом воздухе, так как цезий в таком виде не вступает в реакции с атмосферой, данный способ можно считать безопасным. На установке использовались таблетки из смеси хромата цезия и титана (рисунок 4, справа). Данные таблетки при температуре порядка $500^\circ C$, в ходе экзотермической реакции по формуле 3, выделяют металлический цезий. Отсюда же можно понять основной недостаток данного

способа: помимо цезия из таблеток также выделяются другие элементы, например, водород и вода.

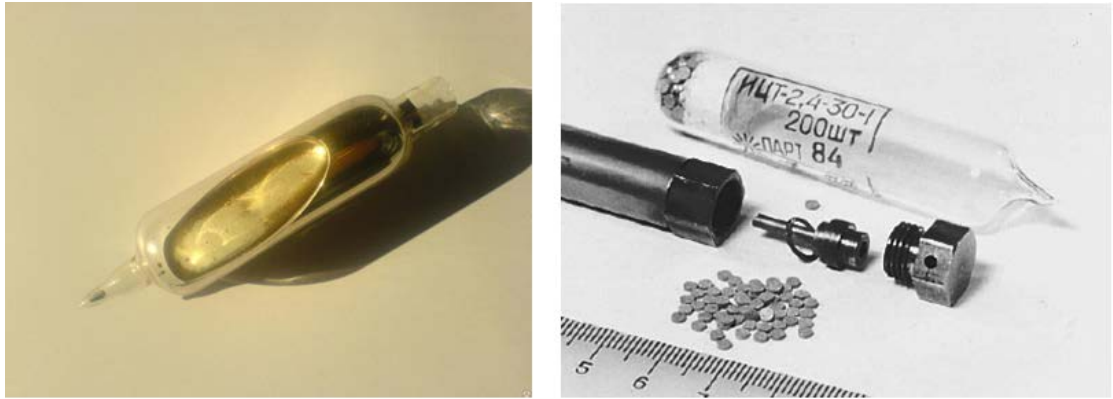
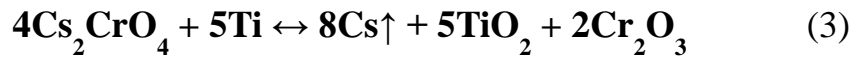


Рисунок 4. Металлический цезий и прореагировавший цезий в таблетках.

2.4. Термодесорбция цезия с поверхности плазменного электрода

Выделенный цезий с помощью галереи раздачи (описана в разделе 3) равномерно распределяется по плазменному электроду, но со временем слой деградирует. Одной из причин деградации слоя является термодесорбция атомов цезия с нагретой поверхности электрода.

Плотность термодесорбционного потока можно описать формулой Френкеля [5]:

$$\frac{dN}{dt} = -N\omega e^{-l^0/T} \quad (4)$$

где N – поверхностная концентрация, ω – эффективная частота колебаний адсорбированной частицы на поверхности, T – температура поверхности, l^0 – теплота десорбции цезия (для оптимальных покрытий цезия на молибдене $l^0 \sim 2$ эВ).

Ввиду того, что коэффициент прилипания цезия к поверхности тугоплавких металлов близок к единице, можно найти необходимый поток цезия для компенсации десорбции как:

$$N\omega e^{-l^0/T} = \frac{n\bar{v}}{4} \quad (5)$$

где n – объёмная плотность цезия, \bar{v} – средняя скорость атомов цезия.

К примеру, при температуре $T = 700$ К, для компенсации термодесорбции цезия на молибдене необходим поток цезия с плотностью примерно $3 \cdot 10^{14}$ см²с⁻¹ [5].

3. Описание установки

На рисунке 5 представлена схема мощного поверхностно-плазменного источника с индукционным ВЧ разрядом, разработанным в ИЯФ. Плазма создается в индукционном ВЧ драйвере и направляется в расширительную камеру и на плазменный электрод. В результате поверхностно-плазменного механизма генерации образуются отрицательные ионы H^- , которые вытягиваются и формируются в пучок с помощью трехэлектродной ИОС. В проводимых экспериментах, электрод, находящийся на потенциале земли, необходимый для запираания вторичного потока, идущего навстречу пучку, был убран.

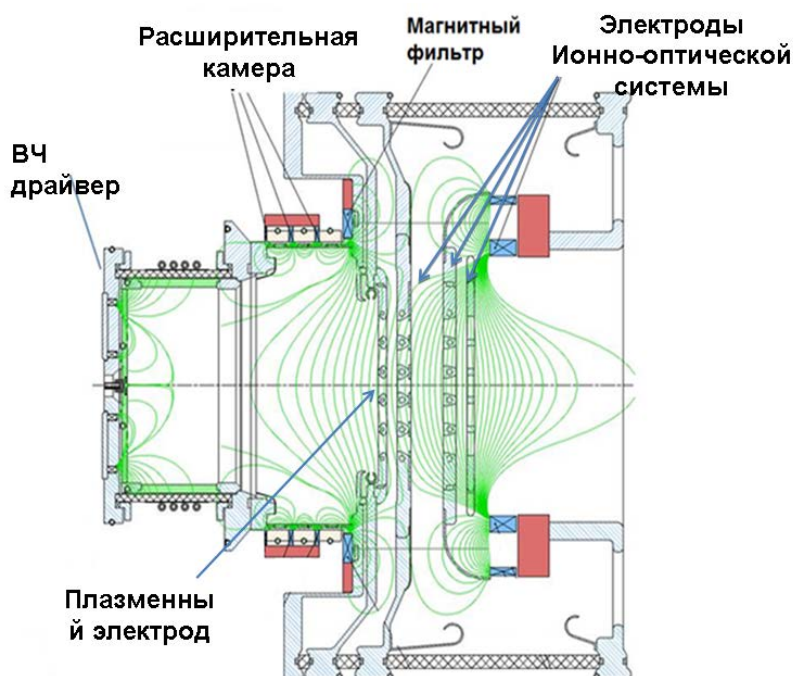


Рисунок 5. Схема источника.

На рисунке 6 изображена схема подачи цезия в распределительную систему. Таблетки, содержащие хромат цезия, загружаются в цезиевую печь. Далее с помощью внешнего нагревателя таблетки нагреваются и в результате экзотермической реакции, описанной формулой 3, выделяется металлический цезий, который, благодаря распределительной трубке, попадает на поверхность плазменного электрода. Для того чтобы избежать образования пробок, в распределительной трубке используется нагрев внутренним

термокабелем (5), который при выделении цезия из таблеток поддерживает температуру цезиевой галереи 260 °С.

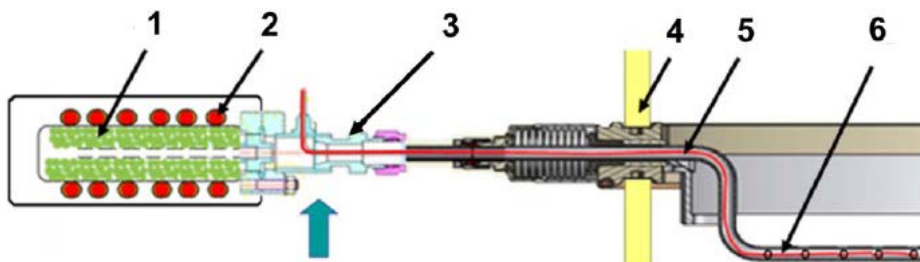


Рисунок 6. Схема подачи цезия: 1 – цезиевые таблетки, 2 – нагреватель контейнера, 3 – «холодная точка», 4 – граница атмосфера-вакуум, 5 – термокабель, 6 – Отверстия для подачи цезия на электрод. Стрелкой показано внешнее охлаждение «холодной точки» воздухом.

Усиление поверхностной генерации ионов H^+ обеспечивается подачей цезия на поверхность плазменного электрода. Плазменный электрод с галереей раздачи изображён на рисунке 7. Как видно из рисунков 6 и 7, металлический цезий попадает на плазменный электрод через распределительно-накопительную трубку диаметром 6 мм сквозь отверстия диаметром 0,3 мм, которая обеспечивает однородный поток цезия на поверхность плазменного электрода [6].

Главной особенностью такой схемы является то, что цезий попадает непосредственно на поверхность плазменного электрода через распределительную систему (галерею раздачи). Как видно по схеме, в источнике имеется 25 апертур для вытягивания и формирования пучка, в эксперименте отверстия по углам были закрыты.

Контроль подачи цезия из печи производился регулировкой температуры холодной точки. Часть выделенного из таблеток цезия остается на «холодной точке» и в трубках галерей раздачи. Поэтому с помощью подогрева трубки можно выделять дополнительный цезий, не включая печку.

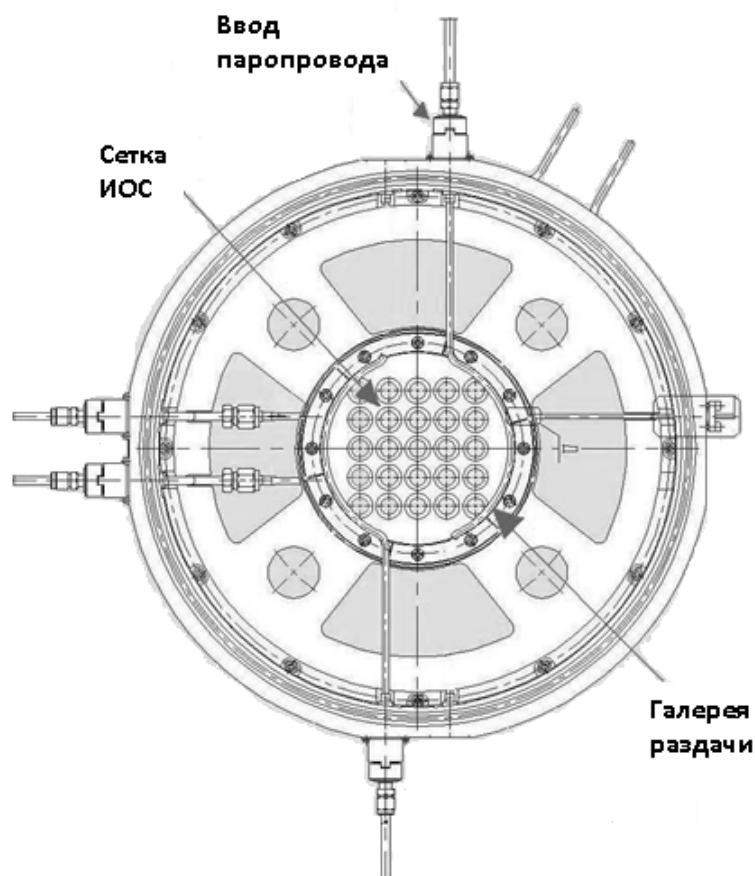


Рисунок 7. Схематичный вид галереи раздачи и плазменного электрода.

Контроль за выделением цезия из таблеток осуществлялся с помощью измерения тока пучка и наблюдением за давлением и составом газа в баке. Для измерения эволюции давления и состава газа в баке, к нему был присоединён квадрупольный масс анализатор QMG 220. Было бы неплохо с помощью масс анализатора измерить содержания цезия в баке, но так как масса цезия высока (133 а.е.м.), и цезий имеет высокий коэффициент прилипания к холодным поверхностям бака, то контролировать содержание цезия в источнике по линии цезия в QMG 220 не получится, так как такую же массу имеют некоторые молекулы и изотопы других химических элементов. Поэтому измеряется давление более лёгких молекул, в данном эксперименте наиболее заметными оказались изменения давления молекул водорода и воды.

4. Эволюция содержания цезия в источнике

4.1. Контроль подачи цезия

Основным признаком наличия водорода в источнике является высокий ток пучка ОИ. Экспериментально, было установлено, что подачу цезия в источник отрицательных ионов можно проконтролировать с помощью изменения линий воды и водорода в расширительной камере.

На рисунке 8 показано как изменялся ток пучка при нагреве печи. Стоит заметить, что основным признаком выделения цезия является увеличение тока пучка вследствие уменьшения работы выхода с плазменного электрода.

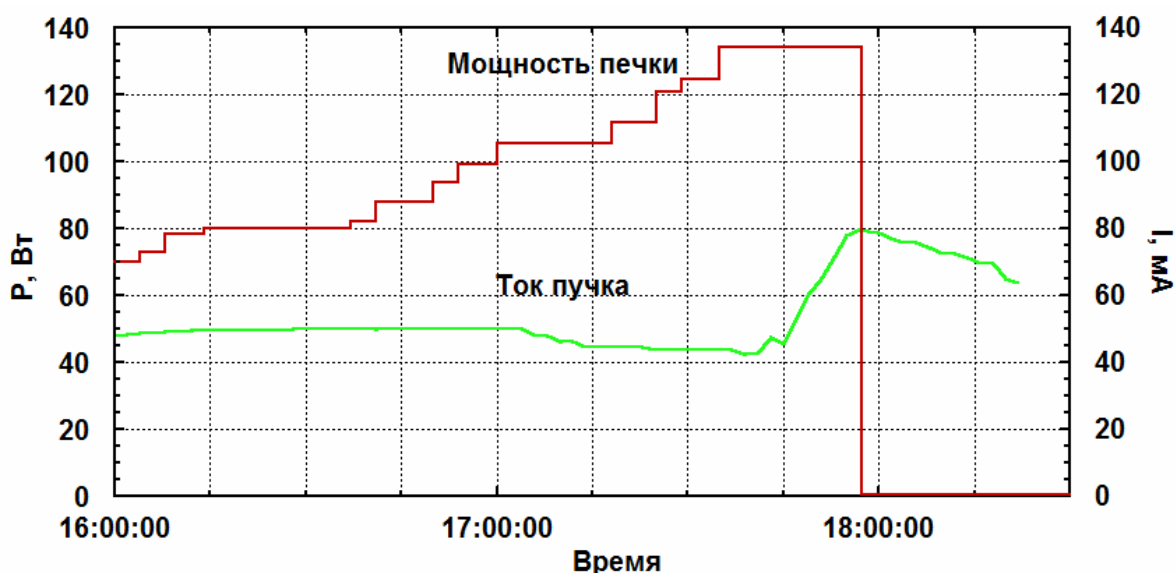


Рисунок 8. Эволюция тока пучка, измеренного цилиндром Фарадея при нагреве печи.

Уменьшение тока перед резким скачком обусловлено ухудшением цезиевого слоя на электроде при его отравлении газом из таблеток и со стенок нагретой печи.

В ходе экспериментов с помощью квадрупольного масс анализатора измерялось давление большого числа элементов, в том числе аргона, кислорода и т.д. На рисунке 9 представлены изменения линий давления воды и водорода в этом же эксперименте, так как эти линии значительно всего изменялись в ходе эксперимента.

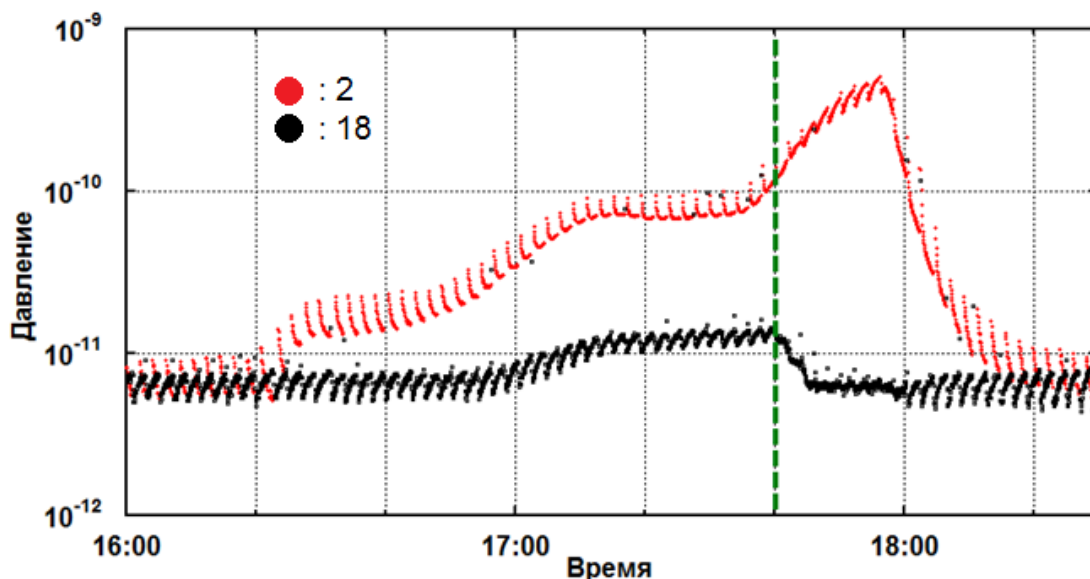


Рисунок 9. Эволюция линий давления воды и водорода при выделении цезия из таблеток в логарифмическом масштабе. 2 – водород, 18 – вода.

Скачкообразные увеличения давления водорода в баке связаны с тем, что в момент импульса пучка в источник напускался водород. Для улучшения восприятия основной тенденции графика, эти скачки были обрезаны.

Нагрев печки начался в 16:00 и через 22 минуты начал выделяться водород из таблеток. Давление растёт экспоненциально из-за увеличения температуры таблеток в печке. Далее давление водорода в баке не изменяется в интервале времени с 17:08 до 17:30. Стационарный уровень давления соответствует равенству выделения водорода и скорости откачки из бака. Последний рост начинается, когда мощность нагрева печки поднимается выше 120 ватт (~ 17:40). Это соответствует началу обильного выделения цезия. Так же, можно заметить, что в момент выделения цезия давление воды в баке резко падает, так как цезий активно реагирует с водой, а ток пучка начинает расти с 50 до 80 мА.

Нагрев цезиевых таблеток был отключен в 17:57, когда ток пучка и давление водорода начали спадать из-за того, что цезиевое покрытие в источнике возросло настолько, что откачка водорода цезием стала быстрее чем его выход из таблеток. В этот же момент охлаждение «холодной точки»

было включено на максимальную мощность, чтобы остановить экзотермическую реакцию в таблетках и прекратить напуск цезия в распределительную галерею.

Из вышеописанного следует, что подачу цезия можно контролировать как по изменению току пучка, так и по уровням давления воды и водорода.

4.2. Зависимость тока пучка от подачи цезия

Для того чтобы понять, как расходуется цезий после его однократной подачи, для анализа были взяты данные в период с 10.05 по 7.06 2014 года.

После промывки установки и заполнения печки новыми таблетками был измерен ток пучка в отсутствие цезия как видно из рисунка 10, значение тока было в районе 0,4 А. Важно отметить, что ток пучка зависит от тренировки поверхности плазменного электрода.

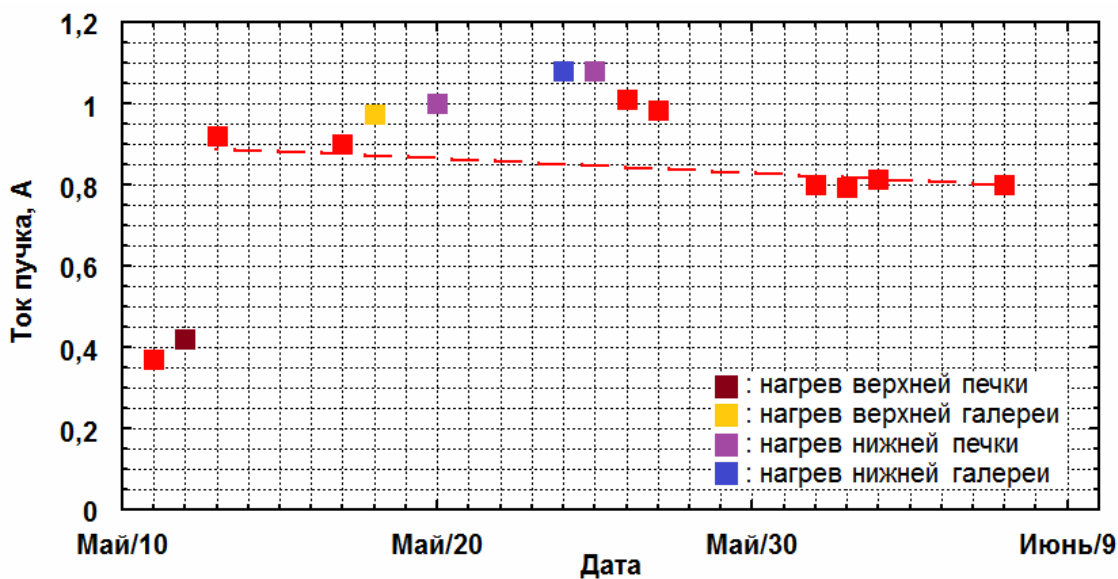


Рисунок 10. Эволюция тока пучка после нескольких подач цезия.

После нагрева верхней печки (коричневый квадратик) ток пучка резко вырос до уровня в 0,9 А, а после дополнительного нагрева верхней галереи (оранжевый квадратик) на следующий день ток пучка подскочил ещё на 10 %. После дополнительных подач цезия ток пучка возвращается на стационарный, постепенно спадающий уровень, показанный пунктирной линией. Как видно из рисунка 10, однократной подачи цезия оказалось достаточно на период с 26

мая по 7 июня. Хватило бы и на большее время, но в связи с летней паузой эксперименты были приостановлены.

В разделе 3, было отмечено, что цезий химически активный элемент, поэтому во избежание образования оксидов, которые бы увеличивали работу выхода с плазменного электрода, во время перерывов в установку напускали водород, с которым цезий образует гидрид. Данное соединение легко разрушается плазмой разряда.

4.3. Вольт-амперные характеристики источника

Изменение свойств плазмы ВЧ разряда в источнике можно исследовать, наблюдая за изменением вольт-амперной характеристики (ВАХ) плазменного электрода, которая показана на рисунке 11.

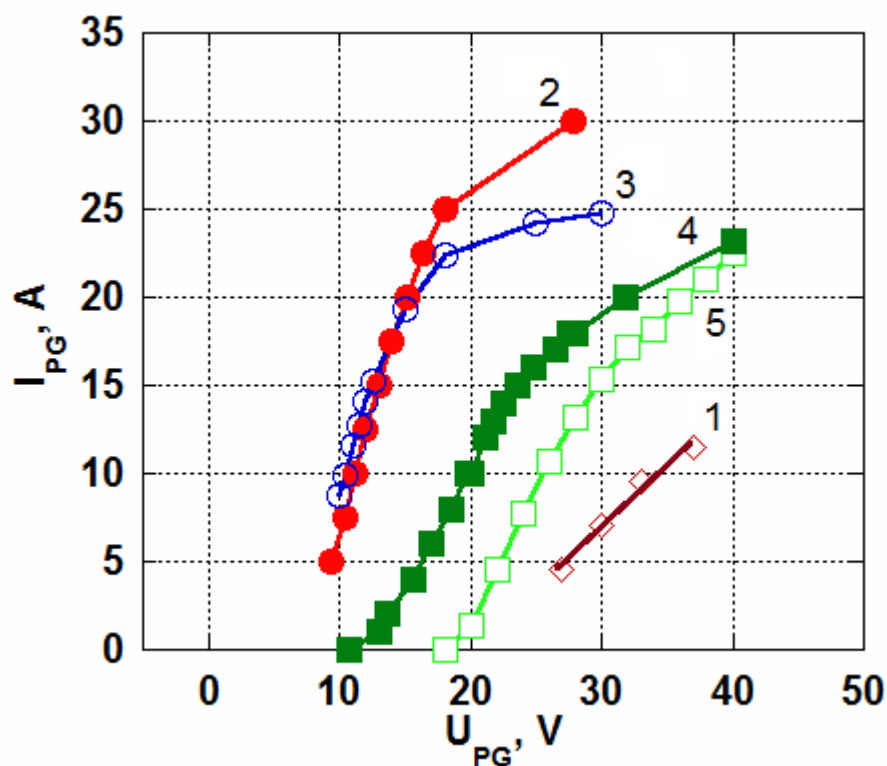


Рисунок 11. Изменение тока на плазменный электрод I_{PG} при различном напряжении U_{PG} и при различных цезиевых условиях: 1 – до самой первой подачи цезия в источник, 2 – после однократной подачи цезия, 3 – после очистки электрода, 4 – после длительной паузы, 5 – после 400 односекундных импульсов.

В начале экспериментов была снята ВАХ № 1, в этом случае ток от напряжения зависел линейно. Данные № 2 были взяты после однократной подачи цезия в источник и проведения примерно 2000 пятисекундных импульсов, при этом важно упомянуть, что часть цезия после подачи осталось в распределительных трубках в течение всей серии импульсов, таким образом, для последующего добавления цезия может быть достаточно нагрева распределительной трубки. После работы в цезиевом режиме был открыт источник и был промыт плазменный электрод, при этом цезий из галереи вымыт (смочен) не был, и после этого были сняты данные № 3. Данные № 4 были сняты после паузы в экспериментах длительностью в один год. Данные № 5 были получены после случая № 4 через 400 односекундных импульсов.

Данные № 2 и № 3, которые соответствуют сильно цезиевому и слабо цезиевому режиму соответственно, доходят до своих предельных значений тока.

После годовой паузы в распределительных трубках цезий, несмотря на малые отверстия в галерее, отравился, в результате ВАХ № 4 стала более вогнутой и больше похожа на изначальный № 1. Последующие 500 односекундных выстрелов ВЧ привели к заметному изменению ВАХ в результате ВАХ № 5 при тех же параметрах сместилась правее по оси U_{PG} и стала еще более похожа на ВАХ № 1.

Таким образом, видно, что дополнительная подача цезия из галереи при её нагреве плазменным разрядом уменьшает деградацию цезиевого покрытия на плазменном электроде. А отравление цезия в галерее после очень длинной паузы привело к усилению процессов деградации цезиевого покрытия на поверхности плазменного электрода.

5. Выводы

Подача цезия в источник повысила ток пучка с 0,4 А до 0,9 А. Дополнительный нагрев цезиевой галереи после подачи цезия из печи увеличивает ток пучка ещё примерно на 0,1 А.

В ходе работ было установлено, что выделение цезия сопровождается значительным повышением давления водорода в баке и уменьшением давления воды. Наблюдение за этими линиями позволяет определить момент выхода цезия из таблеток и вовремя остановить его подачу.

После однократной подачи цезия ток пучка выходит на стабильный уровень. Плазма ВЧ разряда нагревает галерею раздачи, и в результате термодесорбции высвобождает накопленный в галерее цезий. В таком режиме работы цезия из галереи раздачи хватает на несколько месяцев.

6. Список литературы

- [1] Сотников О. З. Исследование источника отрицательных ионов водорода для инжектора высокоэнергетичных нейтралов: дис. канд. физ. наук. — Новосибирск, 2018. — НГУ.
http://www.inp.nsk.su/images/diss/Sotnikov_disser.pdf
- [2] И. А. Котельников, В. Т. Астрелин. Теория плазменного эмиттера положительных ионов. — М.: УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК, июль 2015, 7. — 757 – 758 с.
- [3] Raphael Gutser. Experiments and Simulations for the Dynamics of Cesium in Negative Hydrogen Ion Sources for ITER N-NBI. Doctoral dissertation. University of Augsburg, 2010.
- [4] Мишенин Д. В. Система цезирования для сильноточных источников отрицательных ионов: дис. магистра физ. наук — Новосибирск, 2012. — НГУ.
- [5] Давыденко В. И. Цезий в поверхностно-плазменных источниках отрицательных ионов: дис. магистра физ. наук. — Новосибирск, 1977. — НГУ.
- [6] С.Г. Константинов. Система распределённой подачи цезия для увеличения эффективности мощных источников отрицательных ионов водорода. — М.: ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2017, 1. — 82 – 85 с.
- [7] Колмогоров А. В. Формирование сфокусированного пучка нейтральных атомов в диагностическом инжекторе: дис. магистра физ. наук. — Новосибирск, 2009. — НГУ.
- [8] Efficient cesiation in RF driven surface plasma negative ion source / Yu. Belchenko, A. Ivanov, S. Konstantinov, A. Sanin, O. Sotnikov // Review of Scientific Instruments 87, 02B133 (2016). doi: 10.1063/1.4935242.
- [9] Inductively driven surface-plasma negative ion source for N-NBI use / Yu. Belchenko, G. Abdrashitov, P. Deichuli, A. Ivanov, A. Gorbovsky,

A. Kondakov, A. Sanin, O. Sotnikov and I. Shikhovtsev // Review of Scientific Instruments 87, 02B316 (2016). doi: 10.1063/1.4932583.

[10] A. T. Forrester, Large Ion Beams: Fundamentals of Generation and Propagation, New York et al. 1988.