

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Охотников Никита Викторович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Изучение разрушения пучка отрицательных ионов водорода при
транспортировке в газе**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18305

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. Санин А. Л.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к. ф.-м. н. Иванов И. А.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019 г

Аннотация

Целью работы является изучение разрушения пучка отрицательных ионов водорода при транспортировке в газе. Мною было изучено строение источника отрицательных ионов, а также разобраны процессы, происходящие с пучком отрицательных ионов при транспортировке в газе (водороде и ксеноне). Для измерения параметров пучка были использованы высокоточные CCD камеры и вакуумметры, написана программа на языке Python для обработки данных. Получен график зависимости тока ионов и размера пучка от фонового давления водорода и ксенона в транспортной трубе. Также я качественно объяснил полученные зависимости.

Ключевые слова: отрицательные ионы, нейтрализация пучка, перезарядка пучка отрицательных ионов.

Оглавление

1	Введение	4
2	Теоретическая часть	5
2.1	Нейтрализация пучка отрицательных ионов	5
3	Экспериментальная часть	8
3.1	Источник отрицательных ионов	8
3.2	Схема установки	10
4	Основные результаты	13
4.1	Зависимость тока ионов от давления	13
4.2	Зависимость размера пучка от давления газа	14
5	Список литературы	16

1 Введение

Инжекция нейтрального пучка является одним из наиболее важных методов нагрева плазмы в экспериментах по термоядерному синтезу. Этот способ является основным для создания плазмы с термоядерными параметрами. Нейтральные пучки обычно создаются ионами, обладающими большой энергией, которые нейтрализуются перед инъекцией в плазму. При энергии частиц, необходимой для самых современных термоядерных устройств, нейтрализация положительных ионов очень неэффективна, так что используются отрицательные ионы.

История пучков отрицательных ионов насчитывает уже несколько десятилетий, и область их применения все еще расширяется. Так, пучок отрицательных ионов после ускорения проходит через тонкую фольгу и преобразуется в пучок, содержащий положительные ионы. Это может привести к удвоению энергии тандемного ускорителя, что находит применение в спектрометрии, сверхколлимированных пучках и инжекторах нейтралов высоких энергий в плазменные установки. Также отрицательные ионы можно использовать в ускорителях, в которых ионы движутся в магнитном поле. Вследствие прохождения пучка через фольгу, появляются положительные ионы с противоположным знаком кривизны траектории. Это используется для создания перезарядной инъекции в циклические ускорители и накопители.

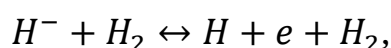
Секция транспортировки низкоэнергетического пучка, установленная между источником ионов и входом в ускоритель, позволяет сфокусировать и согласовать пучок с ускорителем и очистить его от сопутствующих частиц. Важно обеспечить компенсацию пространственного заряда пучка во время интенсивного переноса пучка, чтобы предотвратить распространение пучка и рост эмиттанса. Объемный заряд пучка отрицательных ионов водорода обычно самокомпенсируется с помощью положительных ионов, образующихся при ионизации остаточного газа пучком отрицательных

ионов. Компенсацию пространственного заряда и излучательную способность пучка можно улучшить, добавив тяжелый газ в секцию, когда образуется положительно заряженная яма в области пучка. С другой стороны, добавление тяжелого газа увеличивает удаление ионов водорода в транспортной линии, и это может быть неприемлемым. В случае импульсного пучка. Была изучена транспортировка интенсивного пучка отрицательных ионов с энергией 33 кэВ с добавлением водорода и ксенона в секцию.

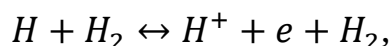
2 Теоретическая часть

2.1 Нейтрализация пучка отрицательных ионов

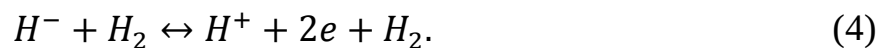
Для протонных пучков наиболее существенным механизмом взаимодействия частиц пучка с веществом является передача энергии от частицы пучка к электрону оболочки посредством кулоновского взаимодействия. Если цель является газообразной, происходит возбуждение и испускание света или ионизация частиц газа. В случае пучков отрицательных ионов сама частица пучка проявляет то же поведение: состояние заряда частиц пучка развивается вдоль области дрейфа из-за взаимодействия с фоном, состоящим из частично ионизованного газа. При прохождении пучка отрицательных ионов через камеру, наполненную водородом, проходят следующие реакции:



(О
ши
бка
!
Зак
лад
ка
не
опр
еде
лен
а.)



(О
ши



У каждой реакции своё сечение σ . Пусть σ_{ij} это сечение реакции, которая меняет заряд элемента пучка с i на j . Для энергии 33 кэВ сечение σ_{0-1} и σ_{1-1} очень мало, поэтому мы не будем рассматривать эти реакции. Фракции пучка, выраженные в виде потоков частиц отрицательных (F^-), нейтральных (F^0) и положительных (F^+) частиц, эволюционируют, как описано в следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dF^-}{dz} = -F^- \sum_k (\sigma_{-10}^k + \sigma_{-11}^k) n_k, \\ \frac{dF^0}{dz} = F^- \sum_k \sigma_{-10}^k n_k + F^+ \sum_k \sigma_{10}^k n_k - F^0 \sum_k \sigma_{01}^k n_k, \\ \frac{dF^+}{dz} = F^- \sum_k \sigma_{-11}^k n_k + F^0 \sum_k \sigma_{01}^k n_k - F^+ \sum_k \sigma_{10}^k n_k, \end{cases} \quad (5)$$

где σ^k – поперечное сечение для столкновений с k -м видом частицы (молекулярный водород, атомарный водород или ионы плазмы). Первое уравнение в системе включает в себя одинарный и двойной отрыв электрона от отрицательного иона, также называемый обдиркой. Второе уравнение состоит из уравнений нейтрализации H^+ и H , а реионизация это член потерь. В третьем уравнении поток протонов увеличивается путем двойного удаления и повторной ионизации, в то время как уменьшается через благодаря процессу нейтрализации. Примеры сечений можно посмотреть на рис. 1.

gas	$\sigma_i (10^{-16} \text{ cm}^2)$	$\sigma_{-10}(10^{-16} \text{ cm}^2)$	$\sigma_{-11} (10^{-16} \text{ cm}^2)$
H ₂	1.5	7.3	0.43
N ₂	3.8	13.2	1.7
Ar	5.0	16.0	1.6
Xe	8.0	40.0	1.8

Рис. 1. Сечения нейтрализации для некоторых газов при энергии 35 кэВ

Также сечение нейтрализации сильно зависит от энергии, что можно

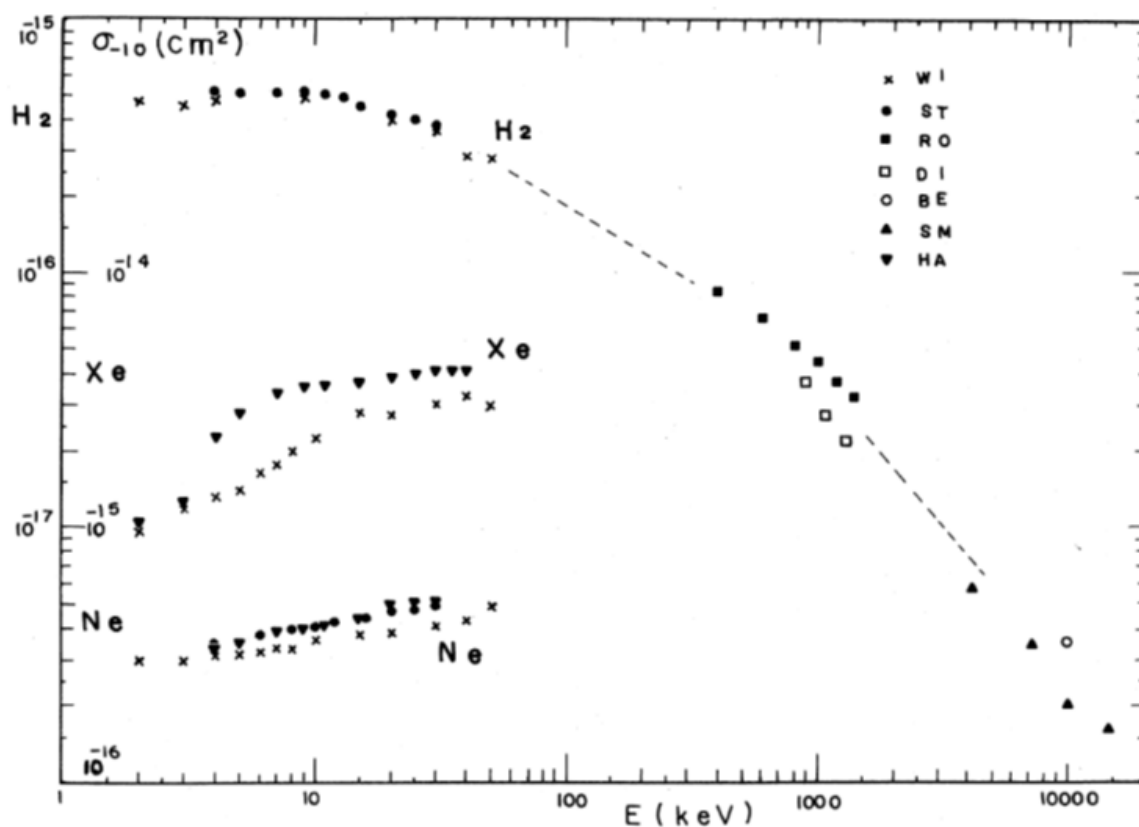


Рис. 2. σ_{-10} для некоторых газов при разных энергиях

заметить на рис. 2.

В результате решения трёх связанных уравнений в системе 5 получим зависимость, похожую на ту, что изображена на рис. 3.

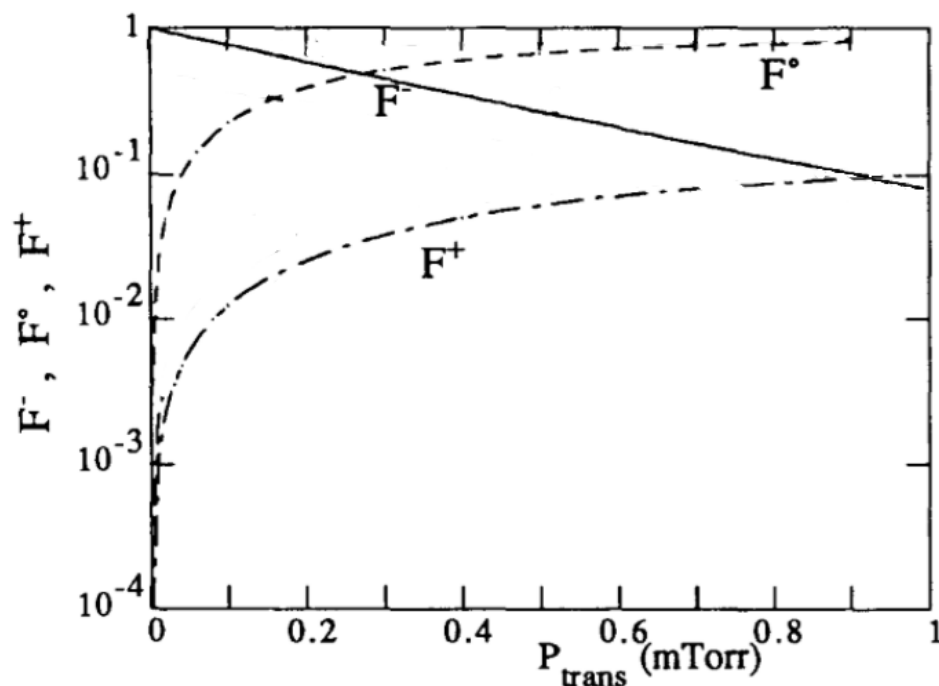


Рис. 3. Пример зависимости F^- , F^0 , F^+ от фонового давления газа для энергии 15 кэВ

Видим, что при повышении давления F^0 стремится к 1, а F^+ становится больше, чем F^- . Это означает, что знак тока, который мы фиксируем изменится.

3 Экспериментальная часть

3.1 Источник отрицательных ионов

Схема источника изображена на рис. 4. Он использует комбинированный разряд Пеннинга. Разрядная камера состоит из массивного цилиндрического анодного кожуха с закрытым корпусом катода. Разряд Пеннинга в водороде поддерживается колебаниями электронов вдоль магнитного поля между массивными катодными нижними выступами. Водород и цезий поступают в область разряда. Цезий необходим для поддержки дуги с полым катодом и для активации электродов разряда Пеннинга. Отрицательные ионы, произведенные на цезированном аноде с помощью поверхностно-плазменного механизма, извлекаются через эмиссионную апертуру, просверленную в центре нижней крышки анода. Триодная ионно-оптическая система используется для извлечения

пучка до 4-5 кэВ и последующего ускорения до 33 кэВ. К аноду подан отрицательный потенциал, а конический ускоряющий электрод заземлен. Напряжения извлечения и ускорения соединены последовательно между анодом и ускоряющим электродом. Магнитное поле в области разряда и извлечения создается постоянными магнитами NdFeB. Дополнительные катушки используются для усиления и регулировки магнитного поля. Подача водорода контролируется ручным краном и электромагнитным клапаном. Цезий подается нагреванием внешней печи, загруженной гранулами ($\text{Cs}_2\text{CrO}_4 + \text{Ti}$). Изменение мощности нагревателя печи обеспечивает контроль подачи цезия. Цезий и водород доставляются через каналы в корпусе катода, предварительно нагретые встроенным омическим нагревателем. Системы питания и управления собраны в стандартную стойку. Высоковольтные выпрямители используют масляную изоляцию. Все подсистемы питания оснащены компьютерными модулями, которые обеспечивают настройку и запись данных источника. Волоконно-оптические каналы используются для обмена данными между источником, стойкой и основным компьютером.

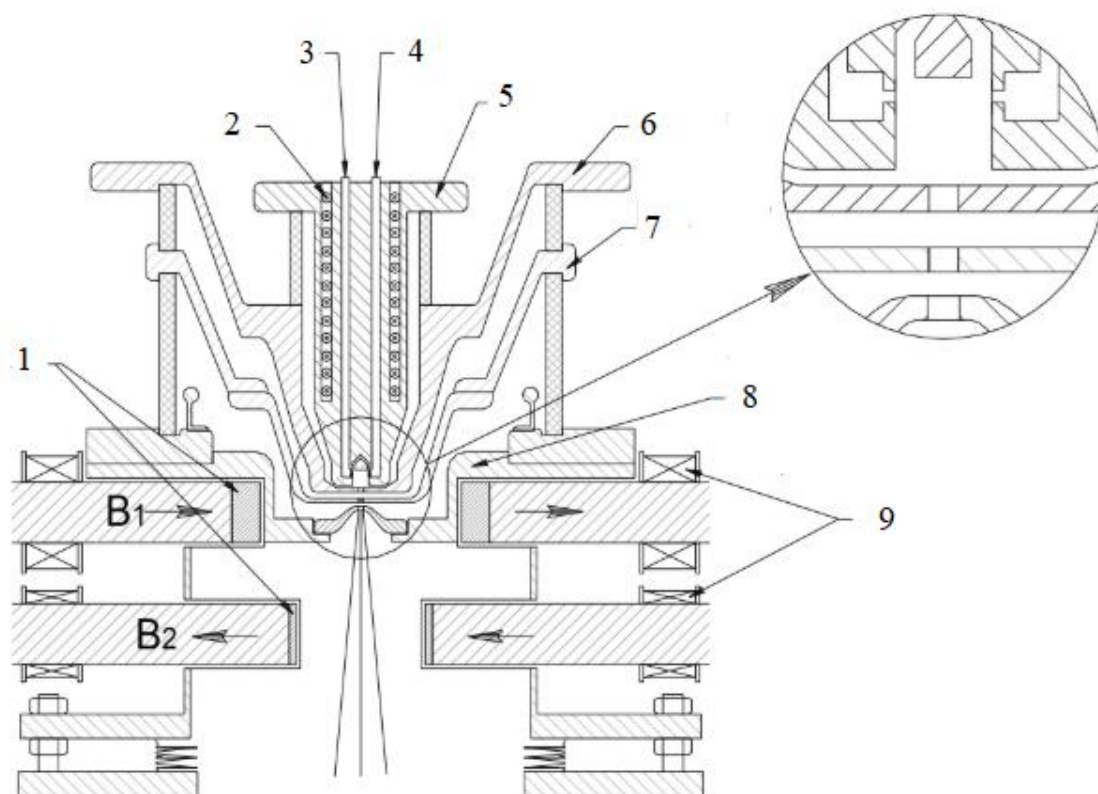


Рис. 4. Схема источника. 1 – постоянные магниты; 2 – нагреватель; 3 – источник цезия; 4 источник водорода; 5 – катод; 6 – анод; 7 – экстрактор; 8 – ускоряющий электрод; 9 – дополнительные катушки.

3.2 Схема установки

Схема установки представлена на рис. 5. Важнейшими частями в ней являются источник отрицательных ионов 1, поворачивающий магнит 6, отклоняющий пучок, транспортная труба с внутренним диаметром 10 см и цилиндр Фарадея 7.

Диафрагма радиусом 30 мм установлена между секцией с поворачивающим магнитом и транспортной трубой для поддержания разницы давления в них. На нее были установлены 4 термистора и 4 датчика вторичной электронной эмиссии для выравнивания положения пучка с осью транспортной трубы. Камера источника снабжена турбомолекулярным насосом для водорода с производительностью 2000 л/с, а транспортная труба

– насосом с производительностью 200 л/с. С помощью крана 4 в правой части установки в транспортную трубу подается газ (водород или ксенон).

С помощью высокоточных камер 2 и 3 отслеживается размер пучка с

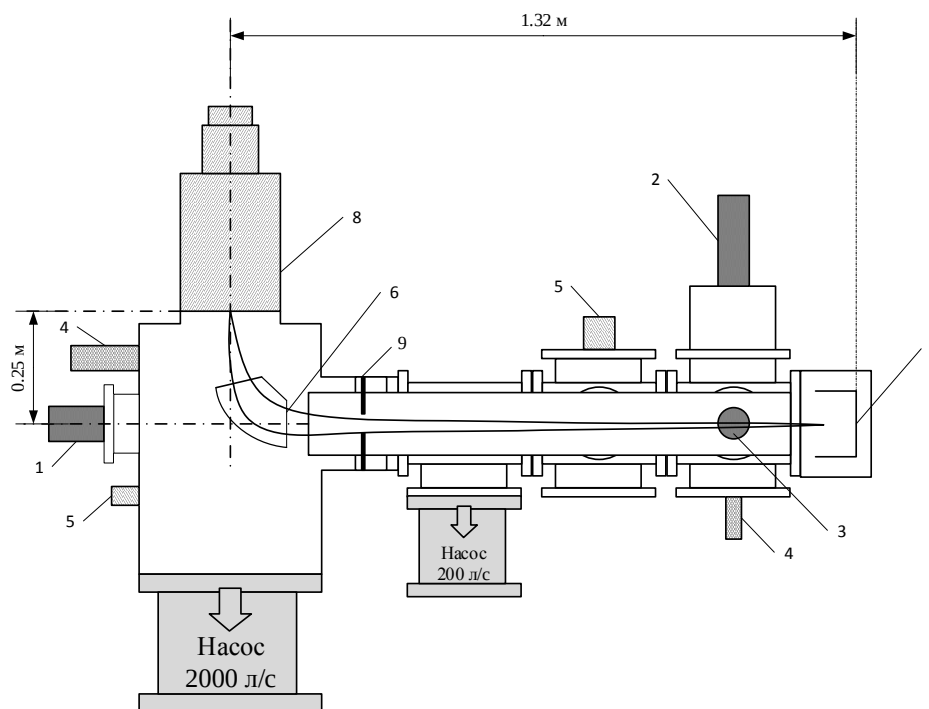


Рис. 5. Схема установки. 1 – задняя CCD камера; 2 – верхняя CCD камера; 3 – боковая CCD камера; 4 – краны для подачи газа; 5 – вакуумметры; 6 – поворачивающий магнит; 7 – цилиндр Фарадея; 8 – источник отрицательных ионов; 9 – диафрагма.

двух сторон. Камера 1 нужна для отслеживания траектории полёта пучка.

Источник создаёт пучок отрицательных ионов водорода с током до 15 мА и плотностью эмиссионного тока до 150 мА/см^2 . Пучок поворачивает на 90° под действием магнитного поля поворачивающего магнита 6 и источника 1. После поворота он залетает в транспортную трубу через диафрагму 9. Суммарный ток H^- и H^+ фиксируется цилиндром фарадея 6.

Схематическое изображение цилиндра изображено на рис. 6. Пучок ионов попадает на пластину 1. С нее ток идёт на землю через резистор, с которого, снимая напряжение, мы узнаём ток ионов. Чтобы уменьшить

влияние вторично электронной эмиссии, на цилиндр установлен постоянный магнит 3.

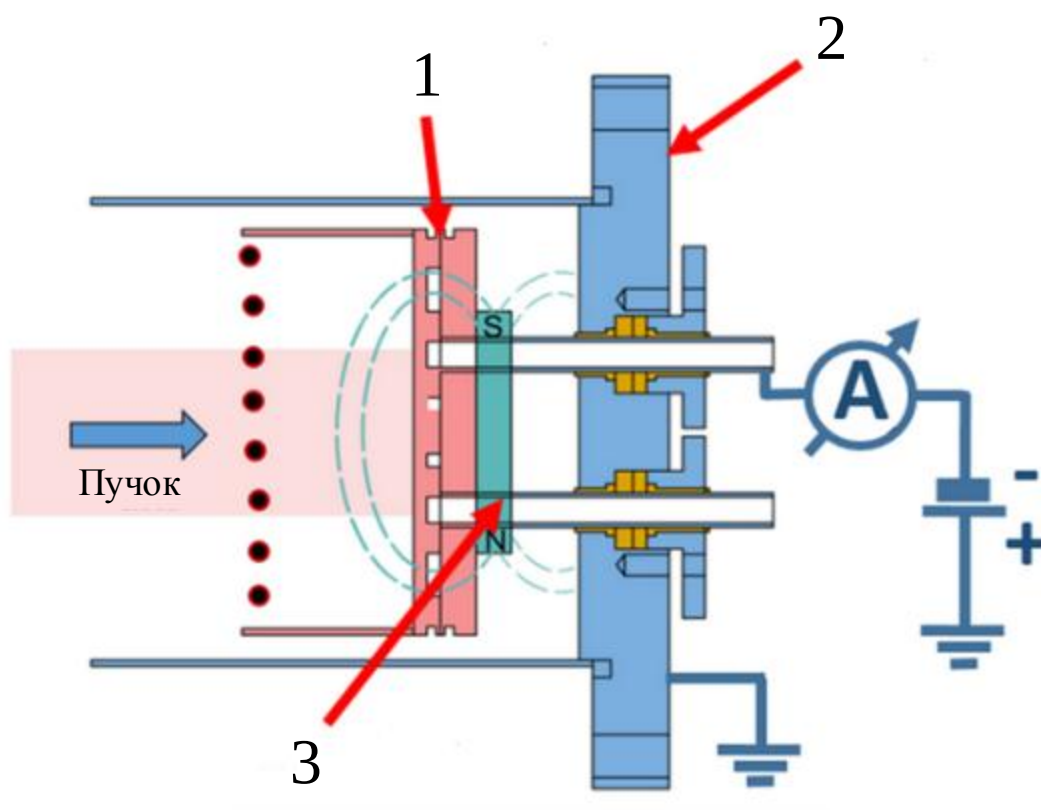


Рис. 6. Схематическое изображение чаши Фарадея. 1 – пластина, охлаждаемая водой; 2 – заземлённый фланец; 3 – постоянный магнит.

Измеренный ток прямо пропорционален разности токов положительных и отрицательных ионов в пучке.

4 Основные результаты

4.1 Зависимость тока ионов от давления

Получены графики зависимости тока ионов от фонового давления в транспортной трубе (рис. 7.).

$$I(P) = I(H^-) - I(H^+). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что при преобладании отрицательных ионов ток будет положительным, а при преобладании положительных – отрицательным. Заметим, что ток ионов, пропущенных через водород, убывает по экспоненциальной зависимости, что следует из решения системы дифференциальных уравнений (5). Но зависимость тока ионов, пропущенных через ксенон, сильно отличается. Скорее всего, это связано с тем, что график построен по значениям вакуумметра, который плохо работает с ксеноном.

По графику видно, что при увеличении фонового давления ток отрицательных ионов становится меньше, чем положительных, что объясняется тем, что реакции с образованием отрицательных ионов идут намного реже, и пучок отрицательных ионов водорода превращается в пучок нейтралов и положительных атомов водорода.

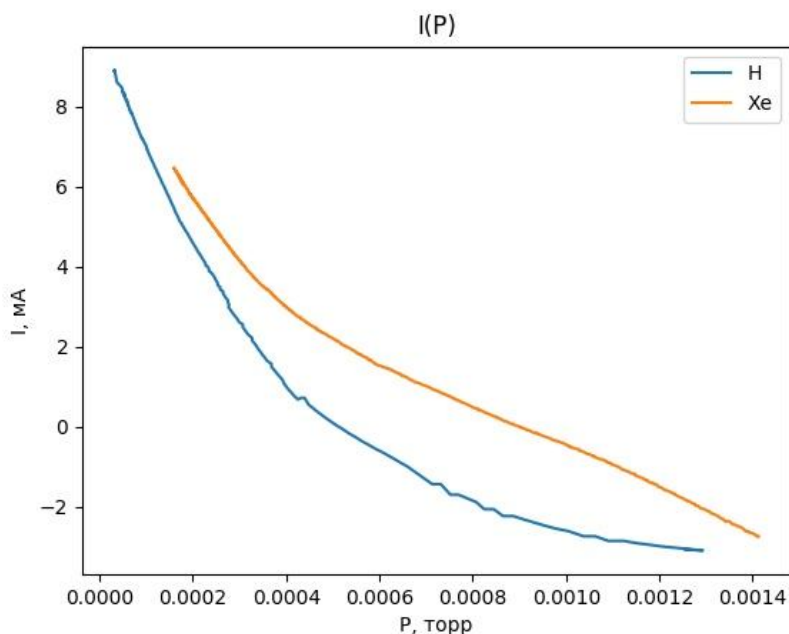


Рис. 7. График зависимости тока ионов от фонового давления в транспортной трубе

4.2 Зависимость размера пучка от давления газа

С помощью высокоточных CCD камер был замерен профиль пучка на рис. 8. Можно заметить, что от при повышении давления в отсутствии электрического поля размер пучка сначала уменьшается, а потом увеличивается.

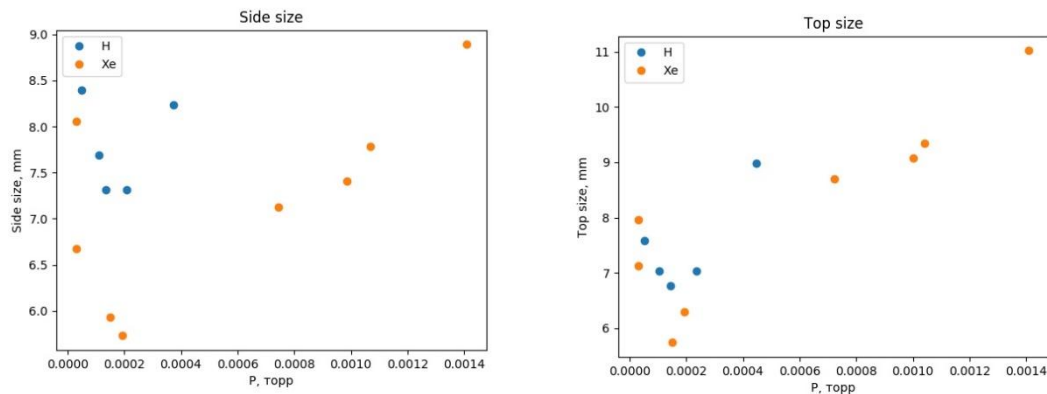


Рис. 8. Графики зависимости размера пучков от фонового давления в транспортной трубе

Во-первых, пучок пытается расшириться под действием собственного пространственного заряда. Во-вторых, у пучка есть тенденция становиться всё шире и шире, потому что в нём есть лучи, которые движутся под углом, относительно направления пучка. Но взаимодействие между отрицательным пучком и фоновым газом приводит к образованию положительных ионов и электронов. Частицы, имеющие ту же полярность заряда, что и частицы пучка, как правило, выталкиваются из пучка, тогда как частицы с противоположной полярностью заряда, как правило, попадают в потенциальную яму пучка. Вместе с бегущими отрицательными ионами все эти частицы создают плазму, которая частично компенсирует объемный заряд пучка. Следовательно, расходимость луча уменьшается, и луч может распространяться на большие расстояния. Характеристики такой плазмы определяются конкуренцией между явлениями генерации, описанными в предыдущих разделах, и потерей частиц, отслаивающихся на краю пучка. Дальнейшее повышение фонового давления газа увеличит потери пучка из-за

столкновений с переносом заряда и приведет к большей расходимости пучка из-за упругих столкновений.

5 Список литературы

1. G Serianni, P Agostinetti, M Agostini. и др., Neutralisation and transport of negative ion beams: physics and diagnostics, NJP, 2017.
2. Yu. Belchenko, A. Sanin, and A. Ivanov, A 15 mA CW H- Source for Accelerators, AIP, 2009.
3. A. Sanin, Yu. Belchenko, S. Popov, и др. Study of continuous wave 33 keV beam transport through the low energy beam transport section, RSI, 2019.
4. M. Bacal, P. Devynck, C. Michaut, Z. Sledziewski, Investigation of an Intense H- Ion Beam Produced by a Volume Source, 1991
5. G. Dimov, Use of hydrogen negative ions in particle accelerators, AIP, 1996.