

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ярыгова Влада Максимовна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение угловых характеристик мощных ионных пучков в
зависимости от извлекаемого тока и потенциала электродов в ускоряющей
ИОС**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18307

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. Дейчули П. П.

аспирант Бруль А.В.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к. ф.-м. н. Харламов А. Г.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019 г

Аннотация

Целью работы является исследование угловой расходимости атомарно-ионного пучка эллиптического сечения. Угловая расходимость пучка является одной из важнейших характеристик ионного инжектора, так как позволяет рассчитать гауссовский радиус пучка на любом расстоянии от источника. Для создания пучка был использован ионный источник, оснащённый щелевой четырех-электродной ионно-оптической системой. Для измерения профиля пучка и дальнейшего вычисления угловой расходимости использовалась линейка вторично-эмиссионных детекторов, передающих сигнал на АЦП, что позволило построить относительное распределение плотности тока пучка. На основе полученных данных были построены графики зависимости гауссовского радиуса пучка и его угловой расходимости от тока пучка, а также найдена зависимость гауссовского радиуса от потенциала электродов в ИОС.

Ключевые слова: атомарный пучок, профиль пучка, угловая расходимость, вторично-эмиссионные датчики.

Оглавление

1	Введение.....	4
2	Теоретическая часть	6
2.1	Вторичная ионно-электронная эмиссия.....	6
3	Экспериментальная часть	8
3.1	Схема установки	8
3.2	Методы измерения угловой расходимости пучка.....	11
4	Основные результаты	14
4.1	Зависимость угловой расходимости от тока пучка и потенциала электродов.....	14
5	Анализ и выводы.....	18
6	Список литературы	19

1 Введение

Инжекция мощных пучков атомов водорода или дейтерия широко используется для нагрева и поддержания плазмы в установках с магнитным удержанием [1]. Этот способ является основным для создания плазмы с термоядерными параметрами. Получают пучок следующим образом: в камере газового дугового разряда образуется ионизированный газ, который под действием собственного давления расширяется и попадает на полупрозрачные электроды (сетки) ионно-оптической системы (ИОС). При помощи высоковольтного напряжения, приложенного между сетками ИОС, из плазмы извлекаются и ускоряются положительно заряженные ионы, обычно это водород или дейтерий. Затем ускоренный пучок пропускается через нейтрализатор – трубу с газовой мишенью. При пролете через газ пучок быстрых ионов нейтрализуется в результате перезарядки на атомах, т. е. захватывая электрон при прохождении рядом с атомом или молекулой газа. В зависимости от энергии пучка (от 10 до 100 кэВ) от 90% до 20% ионов исходного пучка преобразуются в атомы. После чего оставшиеся заряженные частицы отводятся магнитным полем, а полученный атомарный пучок попадает во входной порт плазменной камеры магнитной ловушки. Захват пучка в магнитной ловушке происходит за счет ионизации пучка плазмой и воздействия магнитного поля ловушки на образовавшиеся ионы. Нагрев плазмы происходит в результате торможения быстрых частиц в плазме и передачи энергии захваченного пучка плазме. Схема получения и инжекции нейтрального пучка показана на рис. 1.

В зависимости от типа магнитной ловушки, возникает ряд требований к параметрам пучка – энергия, мощность в пучке, длительность импульса выпускаемого пучка, сорт частиц др. Одним из важнейших является поперечная угловая расходимость, которая определяет размер пучка после пролета дистанции в несколько метров от ИОС до входного порта установки, и, соответственно, возможность его инжекции в вакуумную камеру.



Рис. 1. Схема получения и инжекции нейтрального пучка.

Работа заключается в нахождении угловой расходимости мощного атомарного пучка с энергией частиц (атомы водорода) 40 кэВ и с эквивалентным током 15А. Длительность импульса выпускаемого пучка – до 30 мс. По измеренному профилю пучка на некотором расстоянии от ИОС, т. е. по распределению плотности тока по поперечному сечению, можно определить его угловую расходимость.

Существует множество видов диагностики угловой характеристики пучка: вторично эмиссионные датчики, термопарные, проволочные калориметры, оптическая диагностика и другие.

В данной работе для анализа поведения угловых характеристик пучка используется набор вторично-эмиссионных датчиков. В работе используются 17 датчиков, располагающихся так, чтобы линейка датчиков оказалась на диаметральной оси поперечного сечения пучка. Так как пучок нейтральный, величина тока измеряется за счет эффекта вторичной ионно-электронной эмиссии, возникающей при попадании быстрого пучка атомов, ионов на поверхность датчиков.

2 Теоретическая часть

2.1 Вторичная ионно-электронная эмиссия

Вторичная ион-электронная эмиссия (В. и.-э. э.) – испускание электронов твёрдым телом при бомбардировке его ионами или атомами. Это явление открыто в 1899 г. Виллардом [2]. Различают потенциальное вырывание электронов (потенциальная ионно-электронная эмиссия) и кинетическое выбивание [3].

В случае потенциального вырывания энергия, выделяющаяся при переходе бомбардирующего иона в основное состояние атома, передаётся электронам мишени. Такой переход чаще всего осуществляется путём оже-нейтрализации. Этот процесс наблюдается, если к эмиттеру приближается ион, незанятый энергетический уровень которого ниже уровня Ферми. Тогда на этот уровень перейдёт электрон из зоны проводимости, нейтрализуя ион. Высвобожденная при этом энергия передаётся другому электрону бомбардируемого тела, что позволяет ему покинуть поверхность. Потенциальная ионно-электронная эмиссия возможна только в случае, если выполняется неравенство $E_{и} > 2\Phi$, где $E_{и}$ — энергия ионизации атомов, ионы которых бомбардируют металл, Φ — работа выхода электрона из металла. Для неметаллов вместо Φ в граничное условие входит энергия наивысшего заполненного электронами уровня; например, для собственного проводника – «потолок» валентной зоны.

В вакуум выходят электроны атомов мишени и самих бомбардирующих частиц. Некоторое количество электронов возбуждается быстрыми атомами отдачи. Распределение эмитированных электронов по энергиям имеет максимум и протяжённый спад. Особенности спектра обусловлены оже-переходами в соударяющихся частицах и другими процессами.

Эффективность эмиссии характеризуется коэффициентом и.-э. э.

$$\gamma = \frac{n_e}{n_i}$$

Для медленных ионов γ практически не зависит от их энергии E_i и массы m_i (рис. 2а), но зависит от их заряда. Для многозарядных ионов коэффициент может превышать единицу за счёт многоступенчатого процесса нейтрализации иона. При энергии бомбардирующих ионов более 1-3 кэВ коэффициент γ начинает снижаться, а затем стремится к нулю, так как при бомбардировке быстрыми ионами происходит интенсивный электронный обмен, при котором электрон может перейти из валентной зоны в зону проводимости, а затем и в вакуум.

В основе кинетического выбивания электронов лежит процесс ударной ионизации атомов мишени и бомбардирующих ионов, поэтому для него характерно наличие порогового значения энергии ионов. Величина порога зависит от материала мишени и от используемых ионов. При высоких энергиях падающих ионов кинетическая ионно-электронная эмиссия преобладает над потенциальной. При росте энергии ионов выше пороговой коэффициент вырывания γ сначала растёт, затем начинает снижаться (рис. 2б)

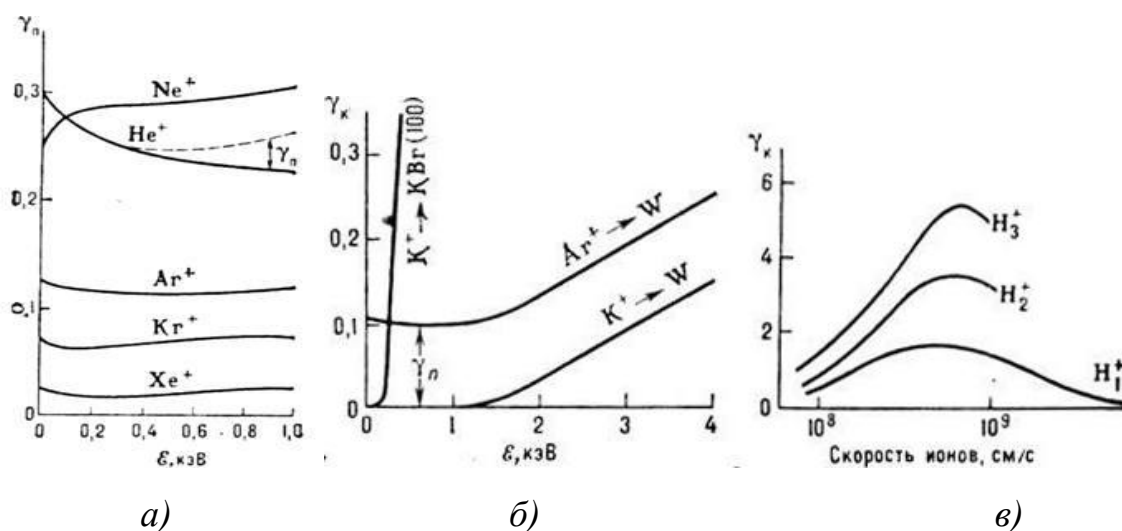


Рис. 2. а) зависимость коэффициента потенциального вырывания электронов γ_n из Mo от энергии E ионов инертных газов; б) вид зависимости коэффициента кинетического выбивания γ_k от энергии ионов E для W, KBr; в) зависимость коэффициента кинетического выбивания γ_k от скорости ионов, см/с

Потенциальная и кинетическая и.-э. э. металлов пространственно и во времени разделены. При подлёте ионов к поверхности сначала происходит их нейтрализация и испускаются электроны, обуславливающие потенциальную и.-

э. э. Затем при соударениях атомных частиц возникают электроны, обуславливающие кинетическую и.-э. э. Обычно обе и.-э. э. аддитивны: $\gamma = \gamma_{\pi} + \gamma_{\kappa}$.

Коэффициент γ так же немонотонно зависит от угла падения ионов на мишень и имеет максимум, положение которого зависит от сорта и энергии бомбардирующей частицы и материала мишени (рис.3).

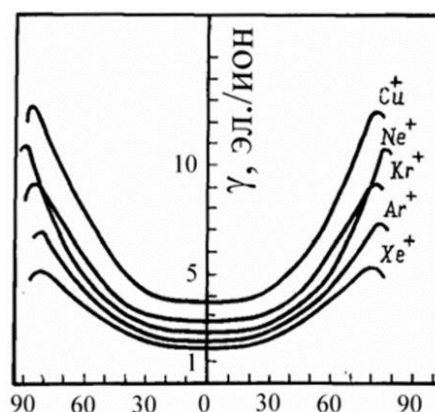


Рис. 3. Зависимость γ от угла падения θ ионов с энергией 40 кэВ на медную мишень

Стоит заметить, что при углах меньше некоторого, коэффициент вторичной эмиссии практически константа.

3 Экспериментальная часть

3.1 Схема установки

Схема установки представлена на рис. 4. Исследуемый атомарный пучок получают в ионном источнике. Фокусировка пучка обеспечивается ионно-оптической системой, важной частью которой являются сетки, располагаемые на пути только что полученного ионного газа. Сетки имеют форму сегмента сферы, радиус которой является фокусным расстоянием оптической системы. Форма сеточных ячеек определяет поперечное сечение пучка. Дальнейшее движение пучка происходит в вакуумной камере, частично заполненной газом, необходимым для нейтрализации ионов.

Для измерения профиля пучка (распределения плотности тока по сечению пучка) используются ВЭД. Явление В. И-Э. Э. получило широкое применение,

в том числе существуют датчики, работа которых на нём основана. Они позволяют измерить параметры ионного пучка, такие как распределения плотности тока по сечению пучка.

Вторично-эмиссионный датчик представляет из себя молибденовый приемник-конус, закрепленный на керамическом изоляторе в отверстии медного вкладыша (рис. 5). На контактный лепесток, закрепленный на

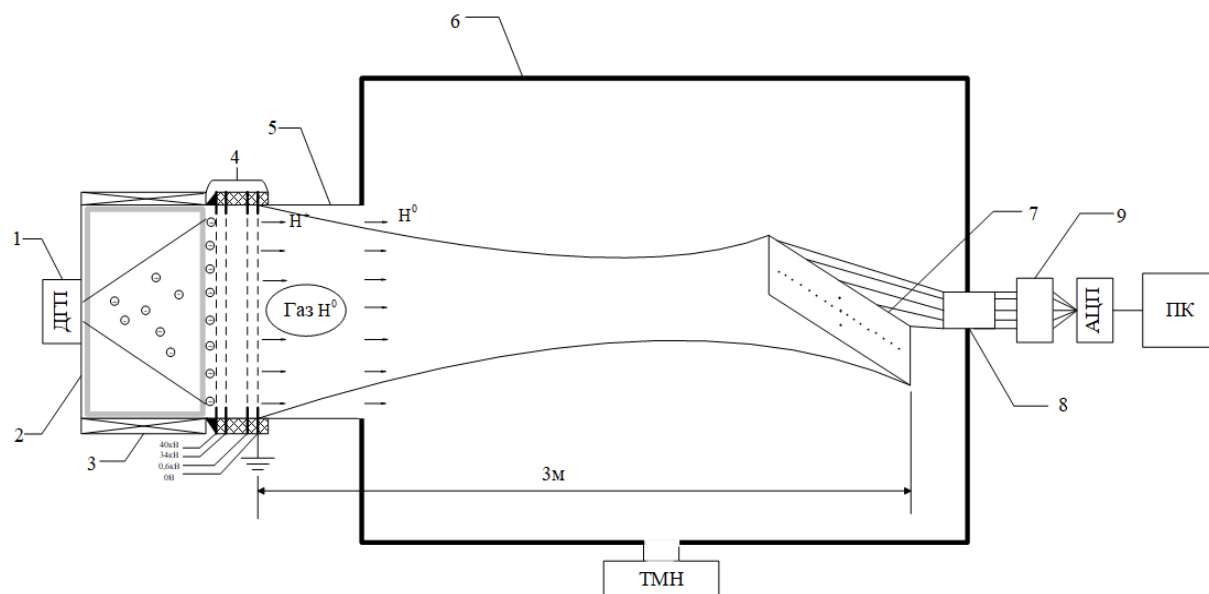


Рис. 4. Схема установки. 1 – дуговой генератор плазмы; 2 – плазменная камера; 3 – магнитный экран; 4 – ионно-оптическая система; 5 – нейтрализатор; 6 – вакуумная камера; 7 – вторично-эмиссионный детектор; 8 – вакуумный многотищевый разъём; 9 – измерительная схема.

противоположном конце конуса, подается отрицательный потенциал ~ -200 В.

Каждый атом пучка, попадающий в отверстие площади S , выбивает 1 – 2 электрона, и под действием вытягивающего потенциала вторичные электроны попадали с поверхности конуса на заземленный медный вкладыш. Вторичная эмиссия электронов с конуса вызывала в измерительной цепи ток, который измерялся с шунта $R_{\text{изм}}$ при помощи плата сбора данных NI PCI-6224. Схема вторично-эмиссионного датчика представлена на рис. 6.

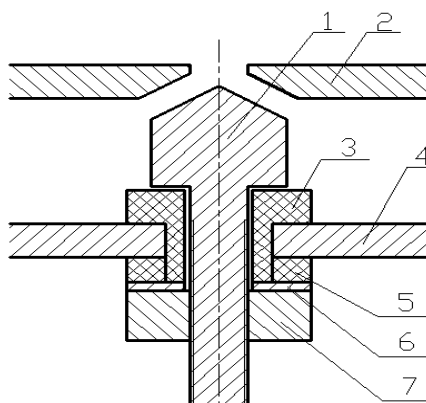


Рис. 5. Схематическое изображение детектора в разрезе. 1 - вторично-эмиссионный детектор; 2 - экранирующая пластина (заземлена); 3 - керамическая втулка; 4 - пластина для крепления детекторов (заземлена); 5 - керамическая шайба; 6 - шайба; 7 - гайка.

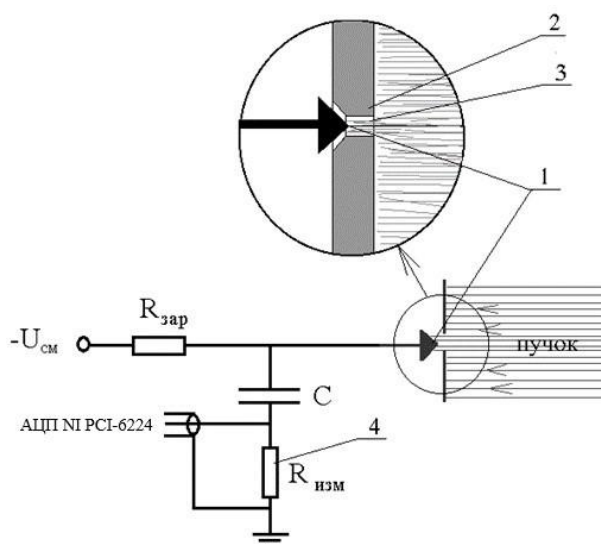


Рис. 6. Вторично эмиссионный датчик с измерительной схемой. 1 – коллектор ВЭД, 2 – калориметр, 3 – отверстие в калориметре для ВЭД, 4 – измерительный шунт.

Полученный сигнал пропорционален плотности тока пучка в области конуса:

$$I = j_{\text{дет}} \cdot S,$$

$$U_{\text{дет}} = I_{\text{дет}} \cdot R_{\text{изм}} = j_{\text{дет}} \cdot S \cdot 1000 \, \Omega,$$

$$j_{\text{дет}} = j_{\text{пучка}} \cdot \gamma_{\text{в/э}}.$$

Абсолютные величины тока довольно приближенные. Коэффициент ионно-электронной эмиссии примерно равен 2 и может меняться со временем от воздействия высокоэнергетических частиц и изменений свойств поверхности материала от температуры. Однако этого достаточно для относительных

измерений.

Линейка аналогичных датчиков применяется для нахождения профиля плотности пучка атомов и ионов. Вторичная эмиссия от атома и иона практически одинакова. На рис. 7 представлен рисунок медной пластины, на которую крепились ВЭД.

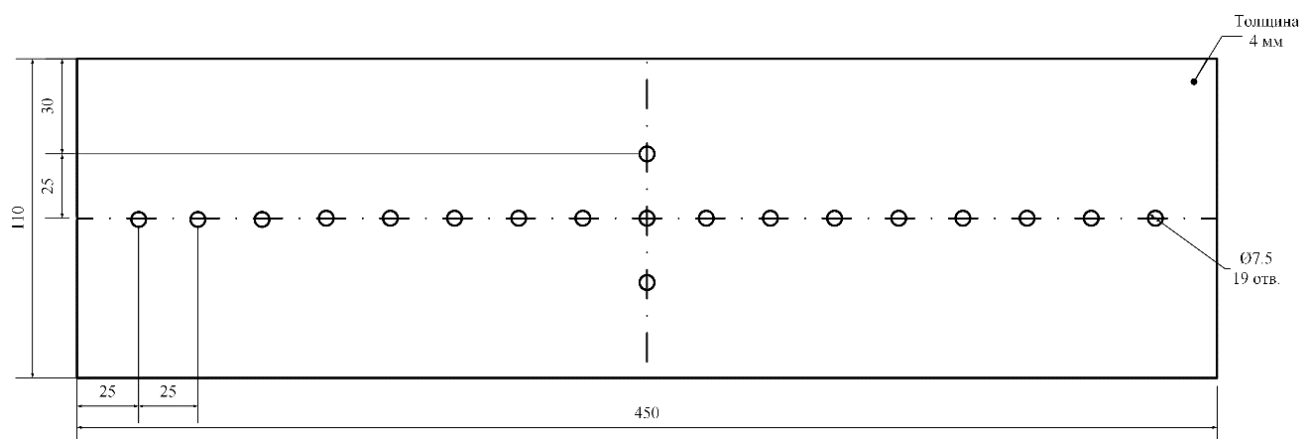


Рис. 7. Медная пластина для крепления вторично-эмиссионных детекторов

3.2 Методы измерения угловой расходимости пучка.

Для определения угловой расходимости достаточно знать профиль пучка в относительных единицах. Поскольку пучок атомарный, речь идет о токе и плотности тока в эквивалентных амперах. В данной работе с щелевой формой ячеек пучок имеет эллиптическое сечение, вытянутое поперек щелей. Ввиду этого пучок будет иметь различные профили в плоскостях осей эллипса. Экспериментальные данные со всех датчиков обрабатываются при помощи программы, которая интерполирует относительные значения плотности тока j_i и строит профиль пучка, характерным параметром которого является гауссовский радиус R_e , при котором максимальное значение тока уменьшается в e раз.

Расчет угловой расходимости производится при помощи математической модели [4], принципом которой является описание расходимости микропучка гауссовым распределением (рис. 8). Программа вычисляет профиль пучка $J(x,y,z_0)$ в мА/см^2 . Суммарный пучок в каждой точке (x,y) в плоскости $z = z_0$ (где ось z — это ось пучка) складывается из микропучков, стартующих с первой сетки и направленных по нормальям к сферической поверхности сеток.

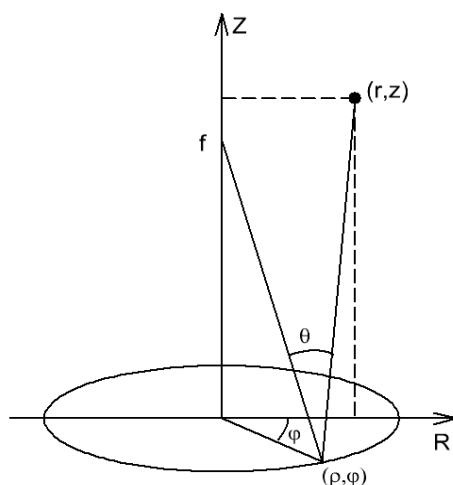


Рис. 8. Геометрия пучка и плоскости наблюдения.

Программа, написанная в Mathcad, по заданным параметрам выполняет интегрирование всех микропучков. Изменяя параметры пучка в программе, а именно расстояние, на котором располагается линейка датчиков и угловую расходимость, и сравнивая гауссовские радиусы профиля пучка с экспериментальными, можно определить угловую расходимость пучка. При этом угловая расходимость вдоль щелей остаётся неизменной в ходе всего эксперимента, поскольку слабо зависит от энергии и плотности извлекаемого тока и имеет угловую расходимость порядка 10 мрад. Поэтому все расчёты производятся только для угловой расходимости поперёк щелей.

На рис. 9 приведено решение задачи для ионного источника с параметрами, соответствующими проведённому эксперименту:

Полный ток пучка

$$I = 4.7 \text{ А}$$

Апертура ИОС

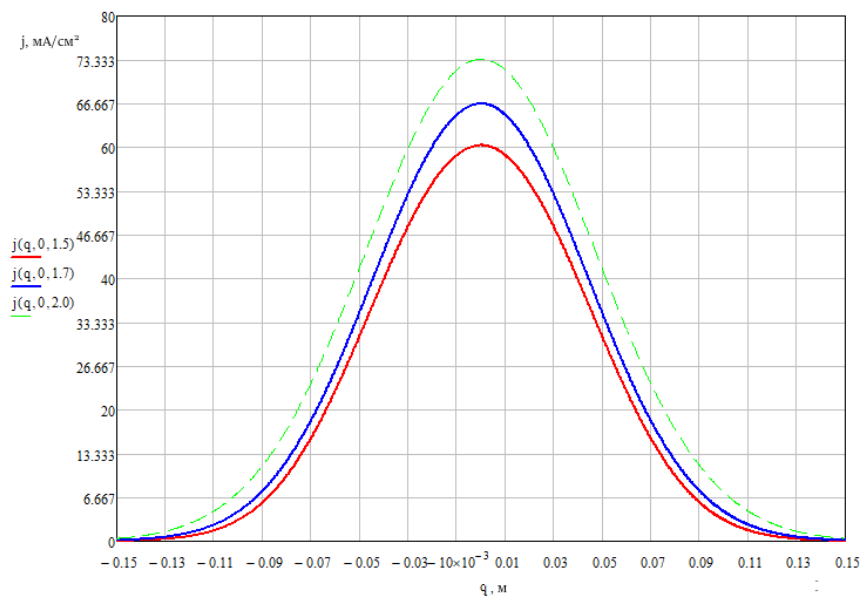
$$D = 90 \text{ мм}$$

Фокус ИОС

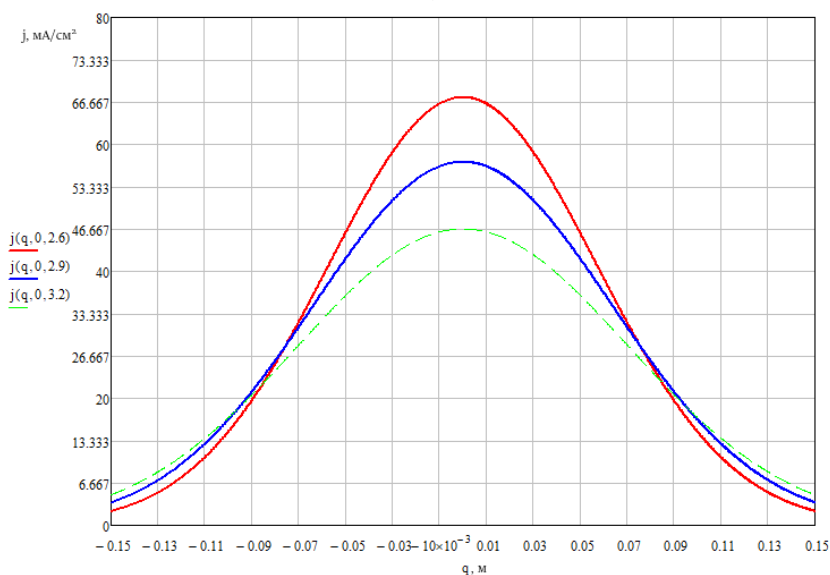
$$F = 3 \text{ м}$$

Угловая расходимость

$$\varphi_0 = 31 \text{ мрад}$$



a)



б)

Рис. 9. а) Сужение пучка при приближении к фокусу. Распределение плотности тока пучка на расстояниях 1,5 м, 1,7 м и 2 м.
б) Расширение пучка после прохождения фокуса. Распределение плотности тока пучка на расстояниях 2,6 м, 2,9 м и 3,2 м.

Зная зависимость угловой расходимости пучка от тока пучка, можно определить наиболее подходящее значение тока, при котором угловая расходимость будет минимальной.

4 Основные результаты

4.1 Зависимость угловой расходимости от тока пучка и потенциала электродов

Проведена серия измерений. В эксперименте использовались сетки, с щелевой формой ячеек (рис. 10).

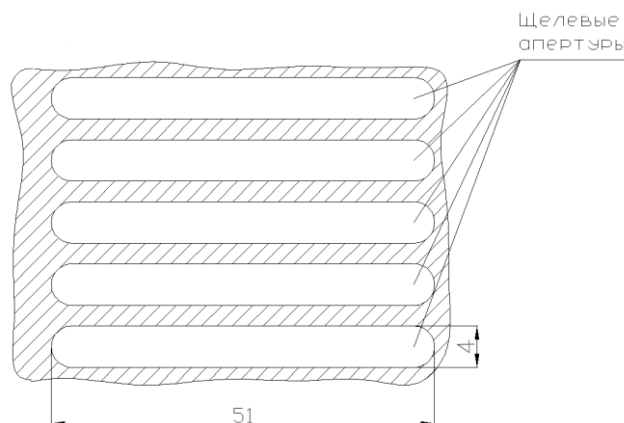


Рис. 10. Щелевая ИОС

На рис. 11 представлен скриншот программы, интерполирующей профиль по данным с датчиков. данные обрабатывались программой, выдающей интерполированный профиль пучка, построенный по 17-ти точкам вторично-эмиссионных датчиков. Программа также аналитически рассчитывает радиус пучка. Данному графику соответствует радиус 98,7 мм.

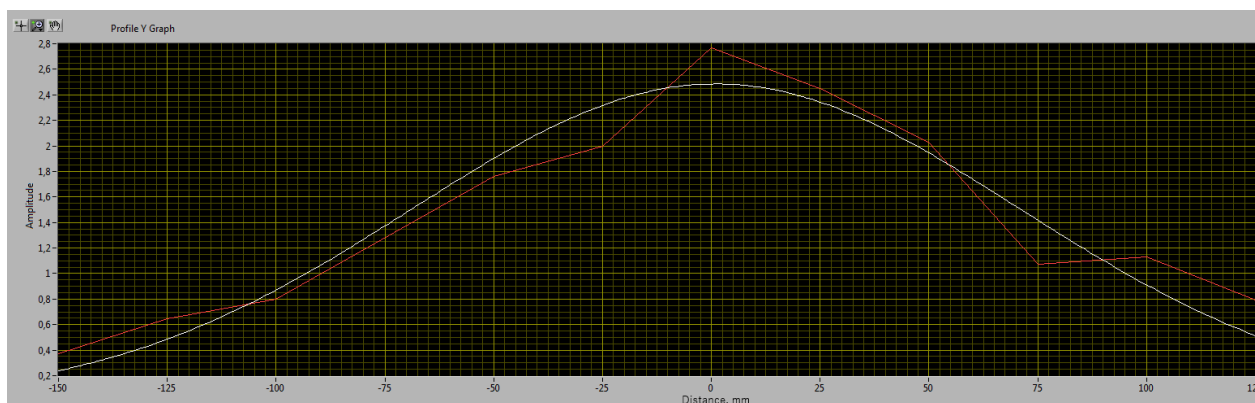


Рис. 11. Измеренный профиль пучка.

На рис. 12 приведены осциллограммы тока и напряжения ионного источника в зависимости от времени.

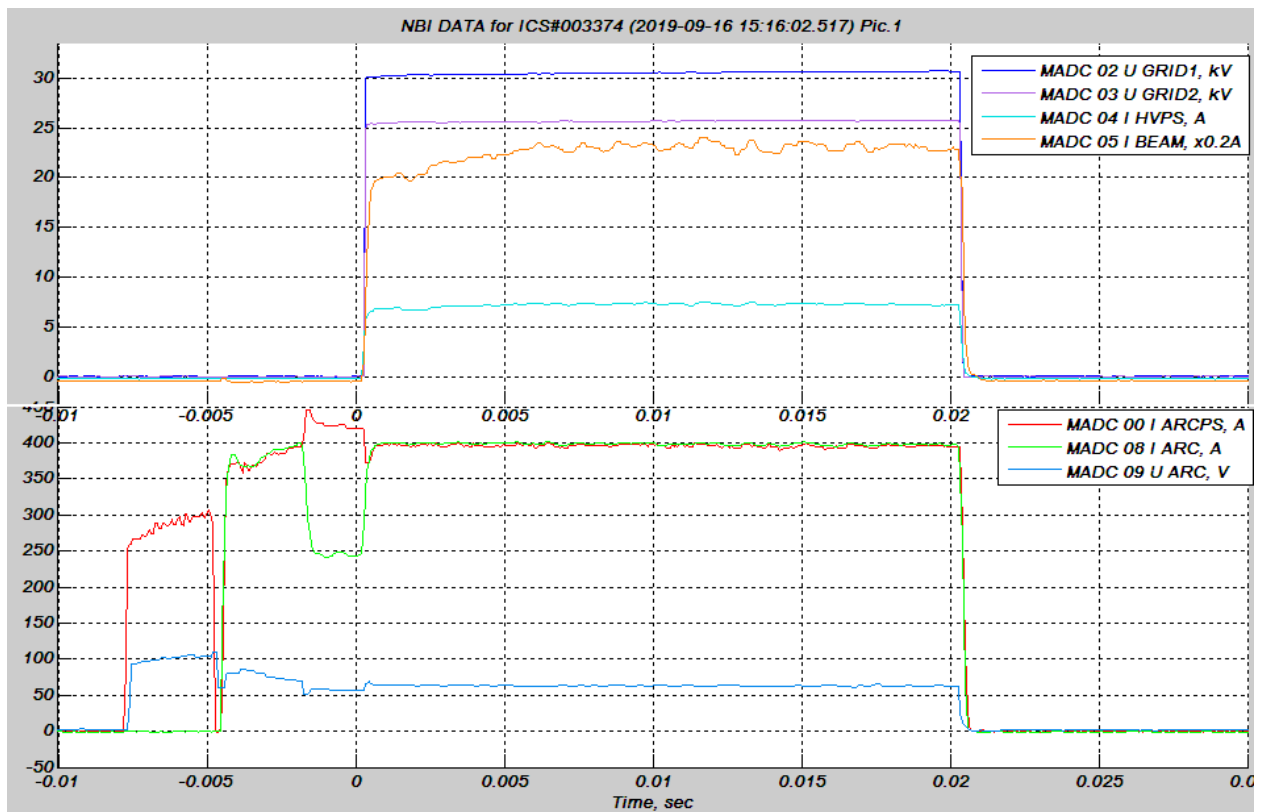


Рис. 12. Осциллограммы тока и напряжения.

В ходе работы были получены зависимости гауссовского радиуса R_e пучка (рис.13) и его угловой расходимости δ от тока пучка $I_{\text{пучка}}$ (рис. 14).

Измеряемые значения радиуса пучка с одними и теми же параметрами работы ионного источника (ток дуги, напряжение на ИОС) могут отличаться по разным причинам: неповторяемость импульсов; различие коэффициента вторичной эмиссии, вследствие изменения чистоты поверхности и температуры датчиков. Погрешность считалась как среднеквадратическое отклонение. При этом погрешность составила не более 5 %. Из графиков видно, что пучок имеет наименьшую угловую расходимость при извлекаемом токе, примерно равном 4,6 мА, при этом угловая расходимость поперёк щелей $\approx 30,3$ мрад.

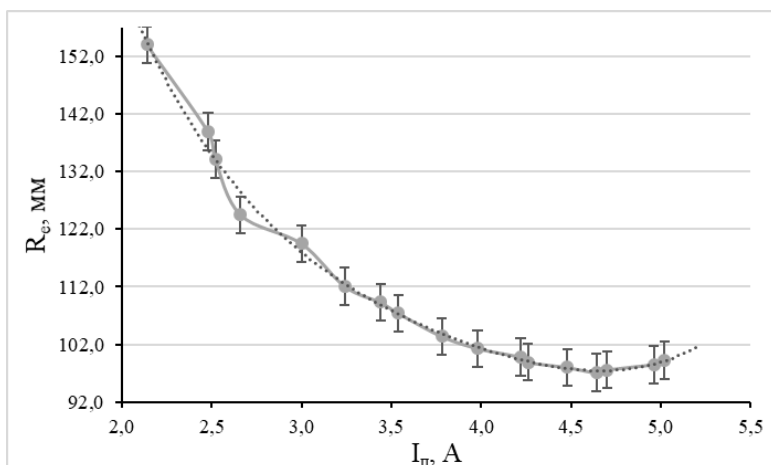


Рис. 13. График зависимости гауссовского радиуса пучка от тока пучка на расстоянии 3.2м

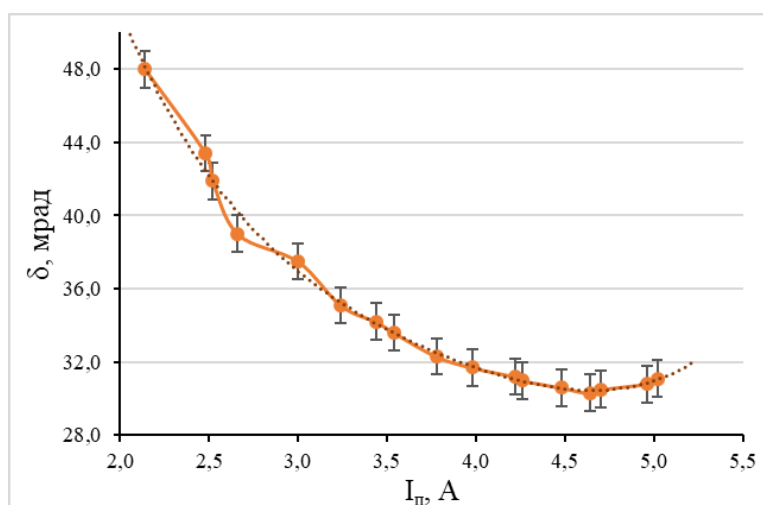


Рис. 14. График зависимости угловой расходимости δ пучка от тока пучка на расстоянии 3.2м

Графики зависимости радиуса пучка и его угловой расходимости от тока пучка имеют V-образную форму, так как форма плазменной границы, определяющая расходимость пучка, зависит от плотности плазмы [5]. При очень маленькой плотности плазмы её граница имеет вогнутую форму, и происходит перефокусировка пучка, что объясняет большую угловую расходимость. При плотности плазмы большей некоторой пучок расфокусируется, так как ее граница имеет выпуклую форму. Существует некоторое значение плотности, при котором плазменная граница имеет такую форму, что пучок формируется с минимальной угловой расходимостью (рис. 15). Этому значению плотности тока соответствует минимум графика зависимости угловой расходимости от плотности извлекаемого тока пучка.

Допустимая величина плотности плазмы или говоря другими словами плотность извлекаемого тока напрямую зависит от величины ускоряющего поля согласно закону Чайлда-Ленгмюра:

$$j_i = \frac{4\sqrt{2}}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{q}{M_+}} \frac{U^{3/2}}{d^2},$$

где q , M – заряд и масса иона; d – расстояние между вытягивающими электродами, U – вытягивающее напряжение. А оптимальная угловая расходимость находится при плотности извлекаемого тока 0.7 от $j_i(U)$.

Помимо формы плазменной границы, на угловую расходимость пучка влияет объемный заряд, который так же зависит от плотности извлекаемого тока пучка.

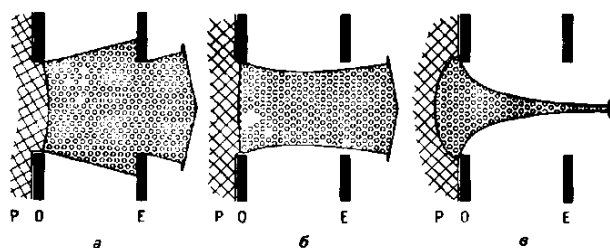


Рис. 15. Три случая извлечения ионов из плазменного источника, а – сверхплотная плазма; б – плазма промежуточной плотности; в – разреженная плазма.

На рис. 16 представлен график зависимости гауссовского радиуса пучка R_e от разности потенциалов между первым и вторым электродом щелевой ИОС ΔU_{12} . При этом напряжение на первом электроде постоянно и равно 40 кВ.

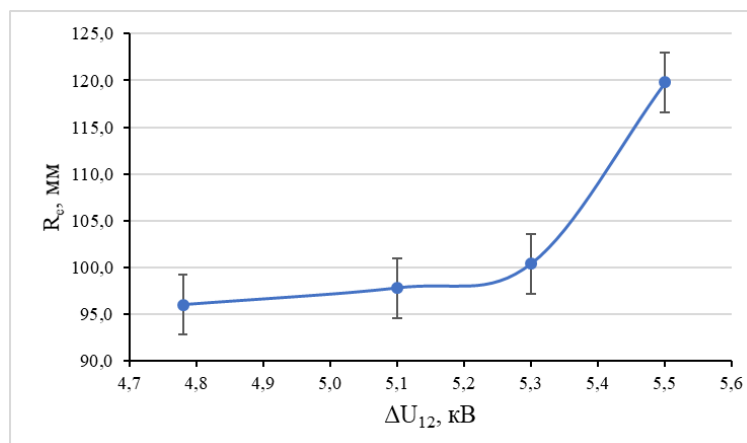


Рис. 16. График зависимости гауссовского радиуса пучка от разности потенциалов между двумя первыми электродами ИОС на расстоянии 3,2 м.

С увеличением разности потенциалов радиус пучка также увеличивается, так как фокусирующие свойства четырёхэлектродной ИОС зависят от отношения E_2/E_1 , где E_2 – напряжение электрического поля между вторым и третьим электродами, а E_1 – между первым и вторым. Чем больше напряженность поля во втором зазоре тем сильнее фокусируется пучок [1]. Таким образом при увеличении ΔU_{12} отношение E_2/E_1 уменьшается, что приводит к увеличению угловой расходимости пучка, и размер пучка увеличивается.

5 Анализ и выводы

В ходе выполнения работы с помощью вторично-эмиссионных датчиков были измерены профили пучка при разном извлекаемом токе на заданном расстоянии. Распределение плотности тока пучка хорошо описывается гауссовским распределением, что позволило определить гауссовский радиус пучка.

С учётом полученных значений гауссовского радиуса пучка на фиксированном расстоянии от ИОС была построена теоретическая модель распределения плотности тока пучка, на основе которой найдено значение угловой расходимости пучка поперек щелей.

Также в ходе работы была выявлена зависимость угловой расходимости поперек щелей от извлекаемого тока. Установлен оптимальный режим работы ионного источника, при котором угловая расходимость минимальна и равна примерно 30 мрад. Эта характеристика позволяет узнать профиль пучка на произвольном расстоянии от ИОС.

Основным источником погрешностей измерений в данной работе являлись электромагнитные шумы и неповторяемость сигналов в серии выстрелов инжектора. Погрешность измерений составила не более 5% полезного сигнала.

6 Список литературы

1. Семашко Н. Н., Владимиров А. Н., Кузнецов В. В. и др., Инжекторы быстрых атомов водорода, М., 1981.
2. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В., Эмиссионная электроника, М., 1966.
3. А. М. Прохоров и др. Физическая энциклопедия, М., 1988.
4. Model of a neutral beam with geometric focusing and apertures. BINP Preprint 2007-25, Novosibirsk, 2007. A. A. Ivanov, T. D. Akhmetov, V. I. Davydenko.
5. Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986.