

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НГУ)**

физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени бакалавра**

Кафедра физики плазмы

Юров Дмитрий Викторович

Измерение энергетического спектра пучка отрицательных ионов водорода

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

Новосибирск – 2009 год

Содержание

1	ВВЕДЕНИЕ	3
2	СТАЦИОНАРНЫЙ ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ.....	4
2.1	Принцип работы источника H^- с пеннинговской геометрией электродов и эмиссией плазмы из полых катодов.....	4
2.2	Конструкция экспериментального источника отрицательных ионов	6
2.3	Параметры вытягиваемого пучка	8
3	АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА	10
3.1	Электростатический анализатор энергоспектра пучка	10
3.1.1	<i>Принцип работы электростатического анализатора.....</i>	<i>10</i>
3.2	Проведение эксперимента и обработка сигналов.....	15
3.2.1	<i>Схема проведения эксперимента</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>Учет паразитных сигналов</i>	<i>17</i>
4	РЕЗУЛЬТАТЫ.....	20
5	ВЫВОДЫ	24
	БЛАГОДАРНОСТИ.....	24
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	25

1 Введение

Разработка источников отрицательных ионов (ОИ) водорода на сегодняшний день является актуальной и активно развивающейся областью исследований. Благодаря небольшой величине энергии связи электрона, нейтрализация отрицательных ионов водорода является эффективным способом получения мощных пучков быстрых атомов с энергиями более 100 кэВ для нагрева термоядерной плазмы в системах с магнитным удержанием [1]. Использование отрицательных ионов водорода в тандемных ускорителях позволяет получать пучки протонов, ускоренных до удвоенной энергии. Также отрицательные ионы водорода применяются в технологиях обработки поверхностей [2].

В ИЯФ СО РАН им. Будкера разработан стационарный поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов водорода с пеннинговской геометрией газоразрядной камеры и инжекцией плазмы из полых катодов (стационарный ППИ) для установки борнейтронзахватной терапии, базирующейся на ускорителе-тандеме [3]. Данная работа посвящена исследованию энергетического спектра пучка ионов на прототипе данного источника. Энергетический спектр может дать информацию о вкладе различных процессов генерации отрицательных ионов в ток вытягиваемого пучка. Поэтому измерение спектра пучка позволяет получить информацию о физических явлениях в газоразрядной плазме, которую в дальнейшем можно использовать для совершенствования источника.

Ранее подобные исследования проводились в ИЯФ СО РАН для импульсных источников с пеннинговской и планотронной геометрией газоразрядной камеры [4].

В данной работе применена методика определения энергетического спектра пучка отрицательных ионов водорода с помощью электростатического анализатора и экспериментально зарегистрированы зависимости энергетического спектра пучка от различных параметров горения разряда.

2 Стационарный источник отрицательных ионов

2.1 Принцип работы источника H^- с пеннинговской геометрией электродов и эмиссией плазмы из полых катодов

Газоразрядная камера источника отрицательных ионов водорода образована двумя выступами массивного молибденового катода, анодной вставкой, охватывающей камеру с боков и сверху, и расположенной снизу анодной крышкой с отверстием для вытягивания пучка ионов, как показано на рисунке 1. Внутри каждого из катодных выступов сделаны углубленные полости с небольшими отверстиями, открывающимися в газоразрядную камеру. В обеих полостях размещены молибденовые прогреваемые вставки, выполняющие роль полых катодов (ПК).

С помощью внешних электромагнитов в камере создается магнитное поле, параллельное поверхности анодной крышки.

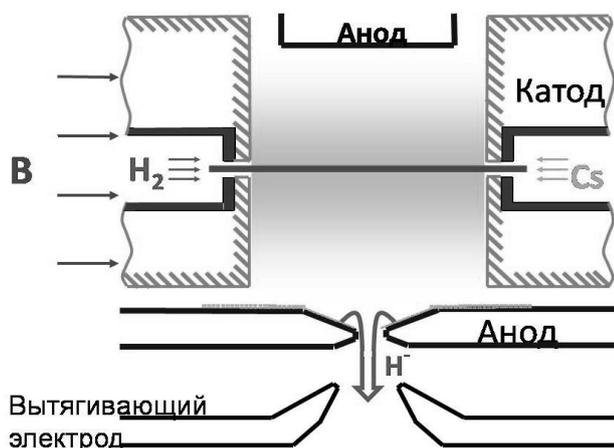


Рис. 1. Принципиальная схема пеннинговского источника с полыми катодами

При приложении напряжения около 400 В между анодом и катодом и подаче водорода и цезия в камеру зажигается сильноточный, с током до 10 А разряд в магнитном поле. При этом, за счет удержания магнитным полем электроны долгое время остаются в объеме газоразрядной камеры и более эффективно ионизуют газ, вследствие чего в цезиевом режиме разряд поддерживается при пониженном напряжении (60-100 В). Уход электронов на анод происходит вследствие диффузии поперек силовых линий магнитного поля. Снижение напряжения горения разряда необходимо для уменьшения мощности, выделяемой на электродах газоразрядной камеры и понижения энергоразброса вытягиваемых в дальнейшем отрицательных ионов.

Проникновение плазмы пеннинговского разряда в полые катоды обеспечивает зажигание разряда в их полостях. Интенсивная генерация электронов на внутренних поверхностях ПК обеспечивает высокую плотность плазмы на оси разряда (см. рис. 1). В свою очередь, инжекция плазмы из полых катодов обеспечивает поддержание и

стабильную работу пеннинговского разряда. Полые катоды обеспечивают горение непрерывного разряда при пониженной плотности водорода порядка 30 мТор. Низкая плотность водорода необходима для снижения обдирки отрицательных ионов на вытекающем газе при последующем доускорении ионов и транспортировке пучка.

Подача цезия в объем газоразрядной камеры приводит к его осаждению на поверхности электродов. Вместе с тем цезий осаждается на поверхности полых катодов. Это приводит к снижению работы выхода электронов с поверхностей источника и, соответственно, обеспечению условия зажигания разряда при пониженном напряжении. Также цезирование поверхностей увеличивает вероятность образования отрицательных ионов водорода на поверхностях электродов. Наиболее активно образование ОИ происходит при покрытии $\sim 0,7$ монослоя Cs (работа выхода $\sim 1,5$ эВ). Толщина слоя напыленного на поверхности электродов цезия может регулироваться с помощью нагревания или охлаждения катодов. Активное выделение цезия из газоразрядной камеры могло бы привести к увеличению проводимости поверхностей изолирующих элементов и, как следствие, замыканию изолированных компонентов источника ОИ. Контрагирование (сжатие) плазмы в отверстиях вставок приводит к запираению цезия внутри них и уменьшает его вынос из газоразрядной камеры. Поэтому источник работает при малой, менее 1 мг/час, подаче цезия.

Процессы образования отрицательных ионов в водородном разряде с добавлением цезия подробно описаны в работе [5]. В соответствии с данной работой, образование отрицательных ионов наиболее вероятно в результате трех процессов:

- Перезарядка атомов и протонов при неупругих соударениях с поверхностью катода (катодная группа генерации ОИ).
- Перезарядка атомов при неупругих соударениях с поверхностью анода (анодная группа генерации ОИ).
- Образование ионов H^- в объеме газоразрядной камеры в результате неупругих соударений электронов и молекулярных ионов а также в результате перезарядки ионов катодной и анодной групп на атомарном водороде газового разряда (объемная группа генерации).

Вероятность конверсии частиц в отрицательные ионы при столкновении с цезированной поверхностью может достигать величин 0,05-0,3 для частиц с энергиями 2 - 20 эВ [5]. Поэтому поверхностные процессы вносят определяющий вклад в генерацию пучка отрицательных ионов в источниках данного типа.

Наибольшую энергию имеют ионы катодной группы, так как перед попаданием в область эмиссионного отверстия происходит их доускорение за счет разности анодного и

катодного потенциалов (~50-80 эВ). Отметим, что в область эмиссионного отверстия могут попадать только наиболее энергичные ионы катодной группы, так как в объеме газоразрядной камеры происходит разрушение и перезарядка отрицательных ионов, и более медленные ионы успевают разрушиться. Ионы объемной группы генерации имеют тем большую вероятность попасть в формируемый пучок, чем ближе к области эмиссионного отверстия происходит образование иона. Вследствие этого энергия ионов, образовавшихся в объеме газоразрядной камеры мало отличается от энергии ионов анодной группы генерации (не более, чем на значение прианодного падения потенциала, ~ 10 - 20 эВ). Ионы, образующиеся на анодной крышке газоразрядной камеры, имеют минимальную кинетическую энергию, равную суммарному потенциалу вытягивающего и ускоряющего электродов. Эта группа ионов не испытывает дополнительного ускорения за счет разности потенциалов электродов газоразрядной камеры.

2.2 Конструкция экспериментального источника отрицательных ионов

Схема экспериментального стационарного источника отрицательных ионов водорода приведена на рис. 2. Объем газоразрядной камеры составляет 1 см³. В стенки массивных катодов помещены термоизолированные вставки, именно через них осуществляется подача водорода и цезия непосредственно в разряд. Каналы инжекции цезия и водорода прогреваются омическими нагревателями. Повышенная температура Cs-канала необходима для предотвращения конденсации цезия на стенках. Отверстия вставок имеют малый диаметр, что обеспечивает перепад плотности водорода и цезия между полостями катодов и объемом газоразрядной камеры. Подача цезия осуществляется за счет нагрева таблеток из смеси бихромата цезия с титаном ($Cs_2Cr_2O_7 + Ti$) в печи, соединенной с каналом в катоде (на схеме не показана). Количество подаваемого в установку цезия регулируется с помощью изменения тока накала цезиевой печи и, соответственно, скорости выделения цезия из нее. Температура цезиевой печи меняется в пределах 20 – 600 С°. Контроль количества цезия в камере производится по величине напряжения горения разряда. Оптимальное покрытие поверхностей пеннинговской ячейки обеспечивается при напряжении горения $U \sim 70-80$ эВ.

Магнитное поле источника ($B = 0,3-1$ кГс), создаваемое внешним электромагнитом, обеспечивает горение пеннинговского разряда в ГРК, уменьшает выход электронов в область вытягивания и сепарирует пучок H^- от сопутствующих электронов и тяжелых ионов примесей.

Ионно-оптическая система источника включает в себя анодную крышку с эмиссионным отверстием, вытягивающий электрод (экстрактор) и ускоряющий электрод. Все элементы ИОС изготовлены из особо чистого молибдена, имеющего высокую температуру плавления, высокую теплопроводность и низкую вероятность дугообразования на поверхности, что обеспечивает повышенную устойчивость системы к пробоям. Также у молибдена малый коэффициент теплового расширения, что необходимо для уменьшения изменения геометрии ИОС при повышенных тепловых нагрузках. Во время работы на эмиссионный электрод подается отрицательное постоянное напряжение

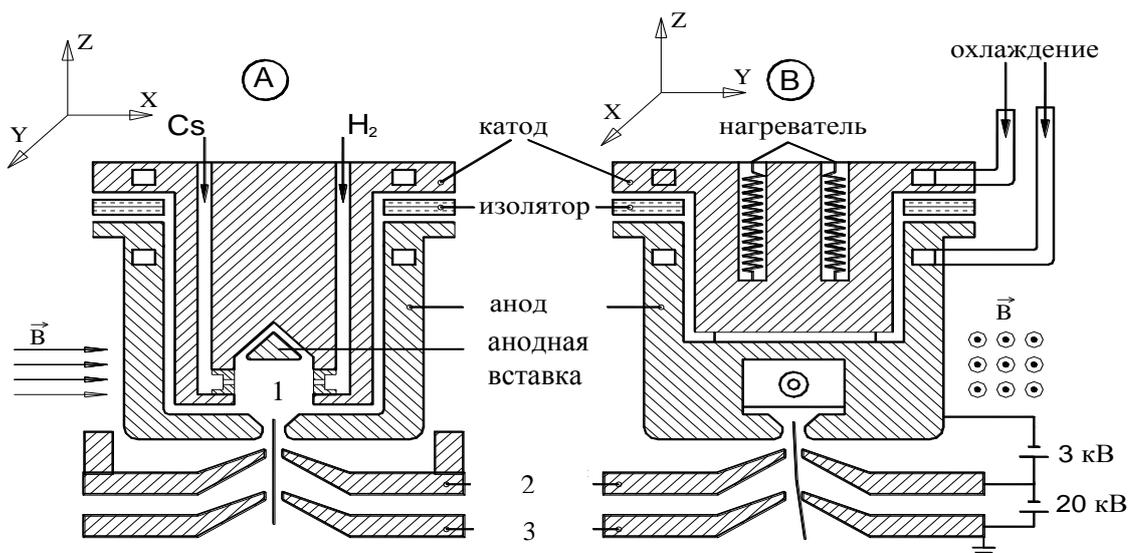


Рис. 2. Схема экспериментального источника.
A – разрез вдоль магнитного поля, *B* – поперек поля.
1 – полые катоды; *2* – экстрактор; *3* – ускоряющий электрод.

6 – 20 кВ, между ним и экстрактором поддерживается вытягивающая разность потенциалов 1-2 кВ, а ускоряющий электрод заземлен. По бокам экстрактора, на периферии промежутка между эмиссионным и вытягивающим электродами установлены массивные молибденовые ребра для перехвата потока сопутствующих электронов на потенциал экстрактора. Это необходимо для снижения вероятности возникновения паразитных разрядов между ними.

Следует отметить, что стационарный источник работает при высокой тепловой нагрузке на электроды (порядка 0,2 кВт/см² на катоде и до 2 кВт/см² на кромке ускоряющего электрода), могущей приводить к тепловой деформации и оплавлению электродов. Ввиду непрерывной подачи газа и цезия в разряд источник требует высокой скорости откачки газа и тщательной оптимизации теплового режима электродов, во избежание накопления цезия на них.

2.3 Параметры вытягиваемого пучка

Пучок, генерируемый источником, в дальнейшем требует транспортировки и преобразования размеров в соответствии с входными параметрами ускорителей. При этом его геометрические характеристики, угловой разброс и поперечные размеры, изменяются, однако, объем фазового пространства, занимаемого пучком, сохраняется. Эмиттансом пучка называется объем 6-мерного фазового пространства координат и импульсов частиц:

$$\mathcal{V}_6 = \iiint dx \cdot dy \cdot dz \cdot dp_x \cdot dp_y \cdot dp_z$$

Определения и свойства эмиттанса пучка подробно описаны в работе [6]. Обычно значение эмиттанса определяется для заданного количества частиц пучка, чаще всего для 90% полного количества частиц. Это объясняется бесконечным значением фазового объема для некоторых распределений частиц, например для гауссового распределения по скоростям. В случае, если аксиальное и поперечное движение ионов независимы, то таким же образом можно определить продольный и поперечный эмиттанс:

$$\mathcal{V}_6 = \iiint dx \cdot dy \cdot dp_x \cdot dp_y \cdot \iint dz \cdot dp_z = \mathcal{V}_4^T \cdot \mathcal{A}^L$$

Аналогично, при независимом движении частиц по осям X и Y в плоскости, ортогональной направлению движения пучка, могут быть введены отдельные значения эмиттанса для данных осей.

Для описания свойств пучка часто используется понятие поперечного RMS-эмиттанса. При его определении учитывается плотность потока частиц $c(x, x')$ в выделенном фазовом объеме. Вместо импульса \vec{p} в данном определении используются углы отклонения движения частиц от основного направления движения пучка x', y' . Для фазовой плоскости с координатами (x, x') он определяется как

$$E_{rms}^x = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x \cdot x' \rangle^2}$$

где

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\sum_{all} (x - \bar{x})^2 \cdot c(x, x')}{\sum_{all} c(x, x')}, \quad \bar{x} = \frac{\sum_{all} x \cdot c(x, x')}{\sum_{all} c(x, x')}$$

$$\langle x'^2 \rangle = \frac{\sum_{all} (x' - \bar{x}')^2 \cdot c(x, x')}{\sum_{all} c(x, x')}, \quad \bar{x}' = \frac{\sum_{all} x' \cdot c(x, x')}{\sum_{all} c(x, x')}$$

$$\langle x \cdot x' \rangle = \frac{\sum_{\text{all}} (x - \bar{x}) \cdot (x' - \bar{x}') \cdot \alpha(x, x')}{\sum_{\text{all}} \alpha(x, x')}$$

Приведенная величина позволяет единым стандартным образом охарактеризовать фазовый объем вытягиваемого пучка для различных функций распределения, что особенно актуально при сравнении сильно различающихся фазовых распределений.

Разброс поперечных скоростей ионов в пучке, обуславливающий эмиттанс определяется энергией поперечного движения частиц, которую они имели до момента ускорения в ионно-оптической системе. Отрицательные ионы анодной группы имеют тепловую энергию порядка температуры плазмы (1-3 эВ). В то же время ионы катодной группы за счет разности потенциалов между электродами газоразрядной камеры приобретают дополнительную поперечную кинетическую энергию движения, значения которой могут достигать падения напряжения на разряде (~ 80 эВ). Величина поперечной скорости зависит от траектории движения частицы относительно оси формируемого пучка. Аналогично, часть ионов объемной группы генерации приобретает кинетическую энергию поперечного движения за счет прианодного падения потенциала, составляющего около 30% от напряжения разряда.

Экспериментально определенный RMS - эмиттанс стационарного источника отрицательных ионов водорода с пеннинговской геометрией электродов и инжекцией плазмы из полых катодов составляет $E^x = 0.2\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$, $E^y = 0.3\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ [7], в то время как для импульсных пеннинговских источников отрицательных ионов он составляет соответственно $0.002\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$, $0.045\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ [8]. Серьезное увеличение значения эмиттанса вытягиваемого пучка в стационарном ППИ можно объяснить, учитывая отличия импульсных пеннинговских источников от стационарного источника. В частности, стационарный источник работает при гораздо меньшем давлении водорода в газоразрядной камере (4 Па в стационарном источнике и 13 Па в импульсном). При одинаковом напряжении горения разряда в стационарном источнике это может привести к попаданию большего количества отрицательных ионов катодной и объемной групп генерации в вытягиваемый пучок. Также неизвестно влияние полых катодов на характеристики вытягиваемого пучка.

С учетом того, что различные группы генерации разряда можно четко разделить по энергии вытягиваемых частиц, анализ энергоспектра пучка представляется эффективным средством исследования влияния характеристик генерации отрицательных ионов в разряде на свойства исследуемого пучка. С помощью данного анализа представляется возможным определить и исследовать относительную активность групп генерации

отрицательных ионов при различных параметрах работы источника. Следует заметить, что анализ энергетического спектра является эффективной методикой исследования катодной и анодной групп генераций, в то время, как разделение анодной и объемной групп с помощью данного анализа сильно затруднено.

3 Анализ энергетического спектра

3.1 Электростатический анализатор энергоспектра пучка

3.1.1 Принцип работы электростатического анализатора

Для анализа энергетического спектра пучка был выбран электростатический анализатор с углом влета ионов 45° относительно поверхности пластин. К достоинствам прибора можно отнести простоту его конструкции и наличие фокусировки первого порядка по углу влета частиц. Принцип работы анализатора энергетического спектра становится понятен из рисунка 3. Отрицательные ионы водорода с кинетической энергией W попадают в однородное электрическое поле анализатора через входное отверстие. Траектории частиц в данном поле представляет собой параболу.

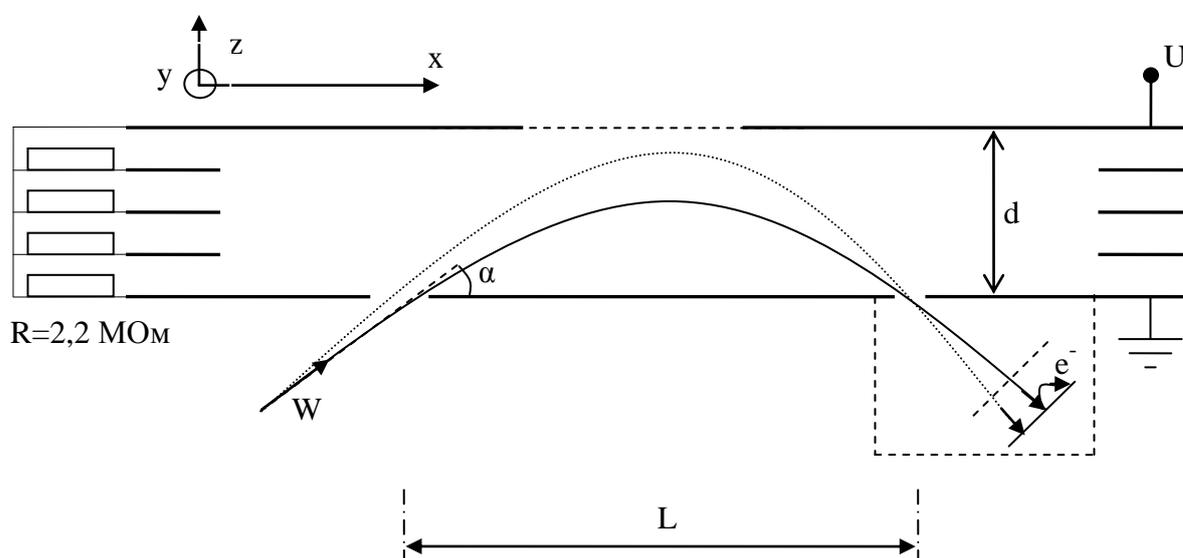


Рис. 3. Принцип действия электростатического анализатора энергетического спектра

В однородном поле анализатора происходит пространственная сепарация отрицательных ионов по энергиям. Расстояние от точки влета частицы до точки вылета вдоль обкладок анализатора может быть выражено через энергию налетающих частиц W , напряжение на пластинах анализатора U , расстояние между ними d и угол влета α :

$$L = \frac{2dW}{eU} \sin 2\alpha \quad (1)$$

Стоит отметить, что наибольшая длина траектории частицы вдоль обкладок анализатора и расстояние между обкладками связаны соотношением

$$\frac{l}{4d} = \operatorname{ctg} \alpha \quad (2)$$

При расстоянии между пластинами анализатора, меньшим необходимого значения, как следует из формулы (2), в выходную щель не будут попадать частицы анализируемого пучка.

Определим разрешение анализатора $\frac{\Delta W}{W}$, рассмотрев полный дифференциал энергии налетающих частиц в соответствии с приведенной формулой:

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta U}{U} - \frac{\Delta d}{d} - 2\operatorname{ctg} 2\alpha \cdot \Delta\alpha \quad (3)$$

Формула (3) характеризует погрешности, накладывающие ограничения на точность определения энергии. При этом, для оценки разрешения необходимо все слагаемые последней формулы взять с одинаковым знаком.

Первый член в правой части формулы (3) отвечает неопределенности регистрируемой энергии частицы за счет конечной ширины входной и выходной щелей анализатора. Таким образом, разрешение анализатора линейно зависит от суммарной ширины входной и выходной щелей. Для оценки разрешения анализатора энергетического спектра также необходимо учесть неопределенность регистрируемой энергии, связанную с поперечным размером щелей анализатора. Ширина щелей ΔY вносит вклад в погрешность измерения энергии из-за не равной нулю поперечной составляющей скорости движения ионов W_y :

$$\frac{W_y}{W} \approx \left(\frac{v_y}{v} \right)^2 \leq \left(\frac{\Delta Y_1 + \Delta Y_2}{2L} \right)^2 \quad (4)$$

Изменение расстояния между обкладками от точки к точке Δd вносит систематическую погрешность, не увеличивающую неопределенность регистрируемой энергии, но приводящую к отклонению траекторий частиц от параболических. Устранить данную погрешность можно с помощью калибровки анализатора.

Последний член правой части отвечает погрешности, вносимой разбросом углов движения частиц относительно направления распространения пучка. Установка анализатора под углом $\alpha=45^\circ$ относительно направления движения пучка ионов позволяет минимизировать ее, иными словами, обеспечивается фокусировка первого порядка по

углу влета частиц. Вместе с тем, при данном угле обеспечивается максимальная пространственная дисперсия ионов по энергиям: $\frac{\partial L}{\partial W} = \max$. При этом сохраняется квадратичная зависимость разрешения от угла влета. Это видно из разложения зависимости энергии частиц от угла влета в ряд Тейлора:

$$W(\alpha) = \frac{LeU}{2d} \left[\frac{1}{\sin 2\alpha} - \frac{2 \cos 2\alpha}{\sin^2 2\alpha} \Delta\alpha + \left(\frac{4}{\sin 2\alpha} + \frac{8 \cos^2 2\alpha}{\sin^3 2\alpha} \right) (\Delta\alpha)^2 + \dots \right] \quad (5)$$

Оценим погрешность определения энергии за счет флуктуаций значений углов влета

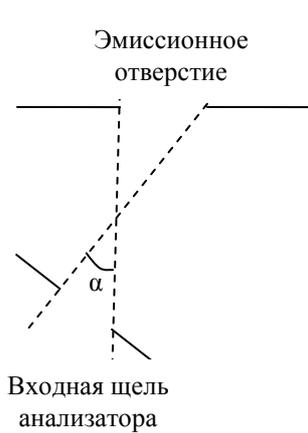


Рис. 4 Разброс углов влета частиц в анализатор

частиц при среднем угле влета $\alpha=45^\circ$ как $\frac{\Delta W}{W} \approx 4(\Delta\alpha)^2$. При этом разброс углов влета частиц в анализатор может быть оценен из расстояния между выходным отверстием источника отрицательных ионов и входной щелью анализатора энергетического спектра (см. рисунок 4). С учетом того, что в действительности входная щель анализатора гораздо уже эмиссионного отверстия источника, может быть написана оценка

$$\alpha \approx \frac{2r}{l} \quad (6)$$

где r – радиус выходного отверстия источника, l – расстояние между входной щелью анализатора и выходной апертурой ППИ.

3.1.2 Выбор параметров анализатора энергетического спектра

Максимально допустимая погрешность определения энергии ΔW обусловлена различием энергий ионов двух основных групп генераций (80 эВ) и должна быть существенно меньше данного различия для возможности выделения групп. Выберем максимально допустимое значение погрешности равным $\Delta W = 30$ эВ. Для решения поставленной задачи определения энергетического спектра при энергии частиц пучка

$W \approx 6$ кэВ необходимо разрешение анализатора не хуже $\frac{\Delta W}{W} \approx 5 \cdot 10^{-3}$.

В соответствии описанным принципам работы анализатора, погрешностям определения энергии частиц и параметрам работы установки были выбраны геометрические параметры анализатора. Длина базы сконструированного анализатора и продольный размер обкладок ограничены размерами рабочей камеры источника

отрицательных ионов ($450 \times 670 \times 480 \text{ мм}^3$). Для возможности правильного размещения в камере и работы с пучком отрицательных ионов была выбрана длина базы $L=120 \text{ мм}$ при продольном размере обкладок 150 мм . Существенно меньшее значение длины базы по сравнению с продольным размером пластин объясняется влиянием краевых эффектов на концах обкладок анализатора.

Расстояние между обкладками d было выбрано равным 35 мм в соответствии с формулой (2) и предполагаемым углом влета ионов $\alpha=45^\circ$. Исходя из формулы (2) максимальное допустимое отклонение угла α от значения 45° составляет 4° , то есть при значении угла $\alpha=41^\circ$ регистрация сигнала на выходной щели становится невозможной.

Размеры входной щели были выбраны $\Delta X_1 \cdot \Delta Y_1 = 0,3 \times 1,2 \text{ мм}^2$. Размеры входной и выходной щелей ограничены снизу величиной минимально регистрируемого сигнала, сверху – величиной погрешности анализатора. Стоит обратить внимание, что эффективная

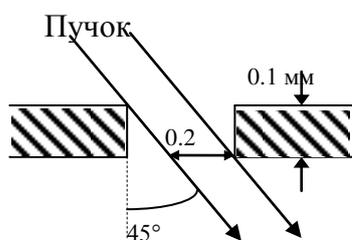


Рис. 5 Прохождение пучка через входную щель анализатора

ширина входной щели составляет $0,2 \text{ мм}$ за счет прохождения пучка ионов через щель под углом 45° (см. рисунок 5). Кромка входной щели изготовлена из танталовой фольги толщиной $0,1 \text{ мм}$. Необходимость применения тантала вызвана сильным нагревом входной щели в результате взаимодействия с пучком отрицательных ионов.

Выходное отверстие имеет размеры $\Delta X_2 \cdot \Delta Y_2 = 0,1 \times 1 \text{ мм}^2$. Пластинки выходной щели изготовлены из нержавеющей стали и заострены на кромке. Таким образом, эффективная ширина щели совпадает с ее реальной шириной.

В анализаторе энергетического спектра устанавливаются промежуточные рамки с целью подавления неоднородности электрического поля на краях пластин анализатора. Расстояние между двумя ближайшими рамками составляет 8 мм . Численно было рассчитано, что при расстоянии между промежуточными рамками $a=8 \text{ мм}$, длине рамок $l=150 \text{ мм}$, на расстоянии 12 мм от края пластины неоднородность электрического поля составляет $\frac{\Delta E}{E} = 10^{-3}$.

Пластины анализатора были выполнены из нержавеющей стали и соединены с помощью крепежных болтов. Поверх крепежных болтов надеваются изолирующие трубки и изолирующие шайбы для изоляции пластин и рамок анализатора друг от друга. Все пластины и рамки последовательно соединены сопротивлениями номиналом $2,2 \text{ МОм}$. Установка сопротивлений необходима для равномерного распределения потенциала между пластинами и создания однородного поля в анализаторе. Выбор величины

сопротивлений определяется выделяемой на них мощностью и скоростью запыления диэлектрических держателей.

В области входной щели анализатора установлен танталовый экран (толщина 1мм). Он необходим для уменьшения тепловой нагрузки на входную пластину анализатора. При прямом попадании пучка на поверхность входной пластины может происходить ее распыление и, соответственно, напыление проводящего слоя на поверхность диэлектриков крепежа, что может повлечь нежелательное изменение распределения потенциала на пластинах.

После сепарации пучка в электростатическом поле, при соотношении энергии ионов и напряжения на обкладках анализатора, определяемом формулой (1), частицы попадают на выходное отверстие и после этого на коллектор. Коллектор представляет собой металлическую пластину, закрытую заземленным кожухом (данный кожух устанавливается с целью предотвращения попадания на коллектор нежелательного тока посторонних частиц или излучения) и заземленную через сопротивление номиналом $R=100$ кОм. Сигнал с сопротивления регистрируется с помощью вольтметра или цифрового осциллографа. Ток вторичных электронов, выбиваемых отрицательными ионами с поверхности коллектора, подавляется с помощью сетки, находящейся под запирающим потенциалом.

Оценим разрешение сконструированного анализатора. Неопределенность регистрируемой энергии за счет конечных размеров входной и выходной щелей $\frac{\Delta W}{W} \approx 2,6 \cdot 10^{-3}$ в соответствии с формулами предыдущей главы. Разброс углов влета в анализатор должен быть оценен с учетом расположения анализатора относительно выходного отверстия газоразрядной камеры. В течение эксперимента анализатор находился на расстоянии 160 мм от выходного отверстия источника ионов, поэтому, используя формулу (6), получим оценку для разброса углов влета $\Delta\alpha \approx 1,8 \cdot 10^{-2}$ рад. Соответствующий ему энергоразброс составляет $\frac{\Delta W}{W} \approx 1,3 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, суммарная погрешность анализатора энергетического спектра составляет $\frac{\Delta W}{W} \approx 4 \cdot 10^{-3}$, то есть меньше максимально допустимой.

В процессе транспортировки пучка от эмиссионного отверстия до входной щели анализатора возможна его сепарация остаточным магнитным полем источника ОИ за счет различия ларморовских радиусов частиц с разной энергией. Оцененное характерное

расстояние разлета частиц пучка на входной пластине анализатора вследствие сепарации по энергиям много меньше размера пучка.

3.2 Проведение эксперимента и обработка сигналов

3.2.1 Схема проведения эксперимента

Общая блок-схема измерений энергоспектра приведена на рисунке 6. Пучок отрицательных ионов водорода с помощью ионно-оптической системы вытягивается из эмиссионного отверстия источника, происходит его поворот в остаточном магнитном поле электромагнитов и под углом 45° попадает на входное отверстие электростатического анализатора. Далее происходит пространственная сепарация ионов по энергиям, как это было описано в главе 3.1.1. Анализатор закреплен на координатном механизме. Он может быть перемещен в плоскости, параллельной поверхности вытягивающего и ускоряющего электродов. Это необходимо для установки анализатора в центр пучка для дальнейшего его анализа. Напряжение на обкладки анализатора подается

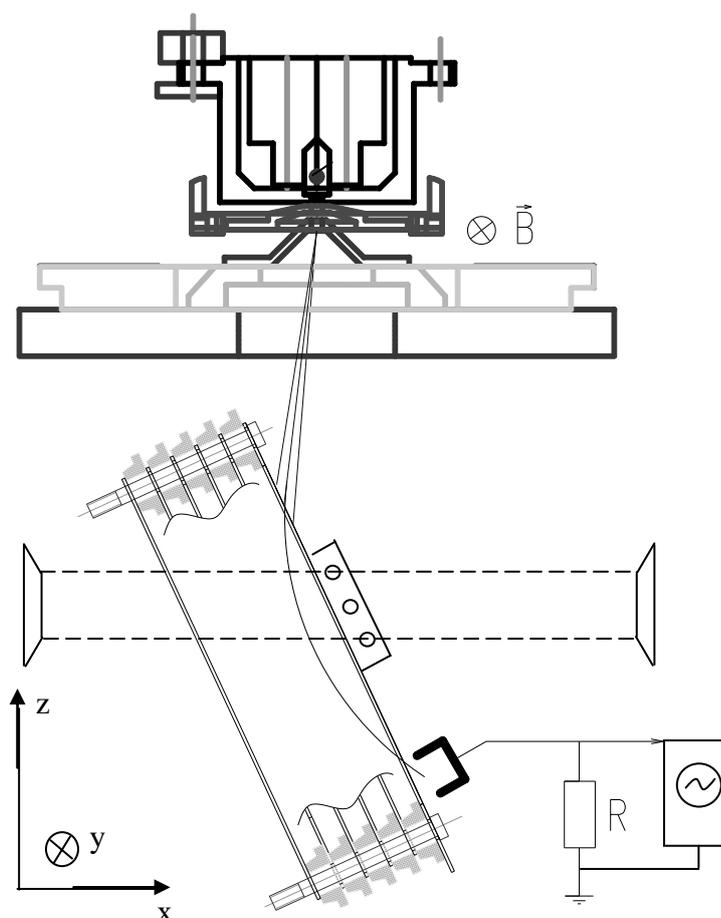


Рис. 6. Схема проведения измерений.

с помощью источника питания, соединенного с анализатором через отдельный высоковольтный ввод. Также с помощью источника напряжения Б5-49 на запорную сетку коллектора анализатора подается напряжение -100 В. Коллектор анализатора соединяется с резистором номиналом 100 кОм, напряжение на котором измеряется с помощью цифрового осциллографа. Соединительный кабель помещается в заземленную оплетку для уменьшения влияния паразитных наводок. Стенки вакуумной камеры, координатный механизм и входная пластина анализатора являются заземленными.

Суммарное напряжение на экстракторе и ускоряющем электроде измеряется с помощью цифрового вольтметра через омический делитель. Вольтметр регистрирует одну тысячную напряжения, подаваемого на экстрактор и ускоряющий электрод.

Напряжение на обкладки анализатора подавалось с помощью сконструированного источника питания, схема которого приведена на рисунке 7. Диапазон выдаваемого источником напряжения на выходе 0-6 кВ. К сети питания подключен повышающий трансформатор с регулируемым числом включенных в работу витков (ЛАТР), рассчитанный на ток в цепи питания 18 мА.

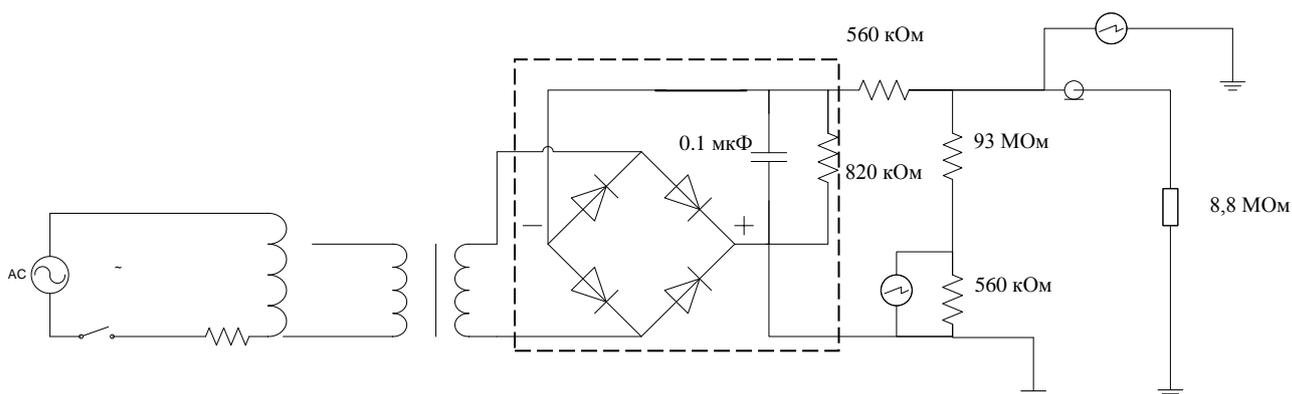


Рис 7. Электрическая схема источника питания анализатора. Пунктирным прямоугольником выделена двухполупериодная схема выпрямителя

Выдаваемое ЛАТРОм переменное напряжение подается на выпрямитель двухполупериодной схемы. Интегрирующая цепочка выпрямителя образована конденсатором с емкостью 0,1 мкФ и сопротивлением 820 кОм. Постоянная времени интегрирования составляет $\tau \sim 0,1$ с. Данная интегрирующая цепь позволяет уменьшить амплитуду пульсаций выходного напряжения. Постоянная времени интегрирования выбрана с учетом удобства сканирования энергетического спектра пучка: при рабочем напряжении на обкладках анализатора $U \sim 3-4$ кВ амплитуда пульсаций напряжения составляет ~ 200 В. Таким образом, источник питания анализатора обеспечивает сканирование энергоспектра пучка с частотой 100 Гц и амплитудой 200 В. В электрическую цепь также введено балластное сопротивление номиналом 560 кОм.

Параллельно сопротивлению анализатора в цепь источника включен вольтметр, регистрирующий полное падение напряжения на анализаторе.

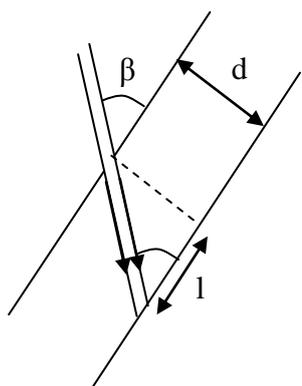


Рис. 8. Измерение угла влета ионов пучка

Как это было описано в главе 3.1.1, точность установки угла влета частиц в анализатор сильно влияет на его разрешение. Угол влета частиц в анализатор энергетического спектра отслеживался по расстоянию напыления, образуемого отрицательными ионами и нейтрализованными частицами на пластине анализатора (см. рисунок 8), от входной щели анализатора 1. При определении угла влета частиц напряжение на анализатор не подается. Изменение угла установки анализатора в вакуумной камере

предусмотрено конструкцией его держателя. Угол может быть изменен в диапазоне $\pm 30^\circ$ от вертикального положения обкладок.

3.2.2 Учет паразитных сигналов

Характерный регистрируемый на осциллографе сигнал представлен на рисунке 9.

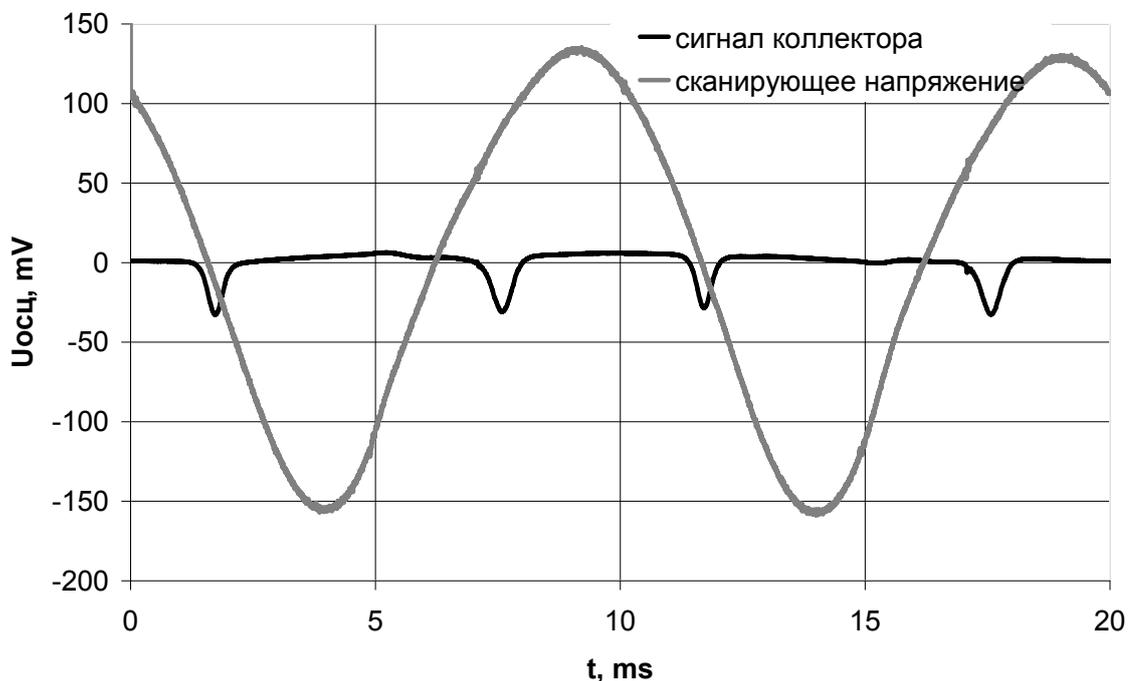


Рис. 9 Характерный сигнал, поступающий на осциллограф. Приведен сигнал сканирующего напряжения и сигнал коллектора анализатора

Осциллограф регистрировал только переменную компоненту сканирующего напряжения, в то время как вольтметрами регистрировались средние напряжения экстрактора плюс ускоряющего зазора и тормозящее напряжение на анализаторе. Для уменьшения влияния

шумов осциллографом регистрировался сигнал, усредненный по 32 кадрам, что снижало некоррелированные шумы в 6 раз.

Рассмотрим подробно паразитные сигналы, искажающие форму профиля энергетического спектра пучка или вносящие систематическую ошибку определения его энергии. Необходимо учитывать паразитный сигнал коллектора, появляющийся в результате электромагнитной наводки на кабель, соединяющий коллектор и систему регистрации. Электромагнитная наводка является причиной систематической ошибки определения энергоспектра пучка и может быть зарегистрирована отдельно и затем вычтена из полученного сигнала (см. рисунок 10).

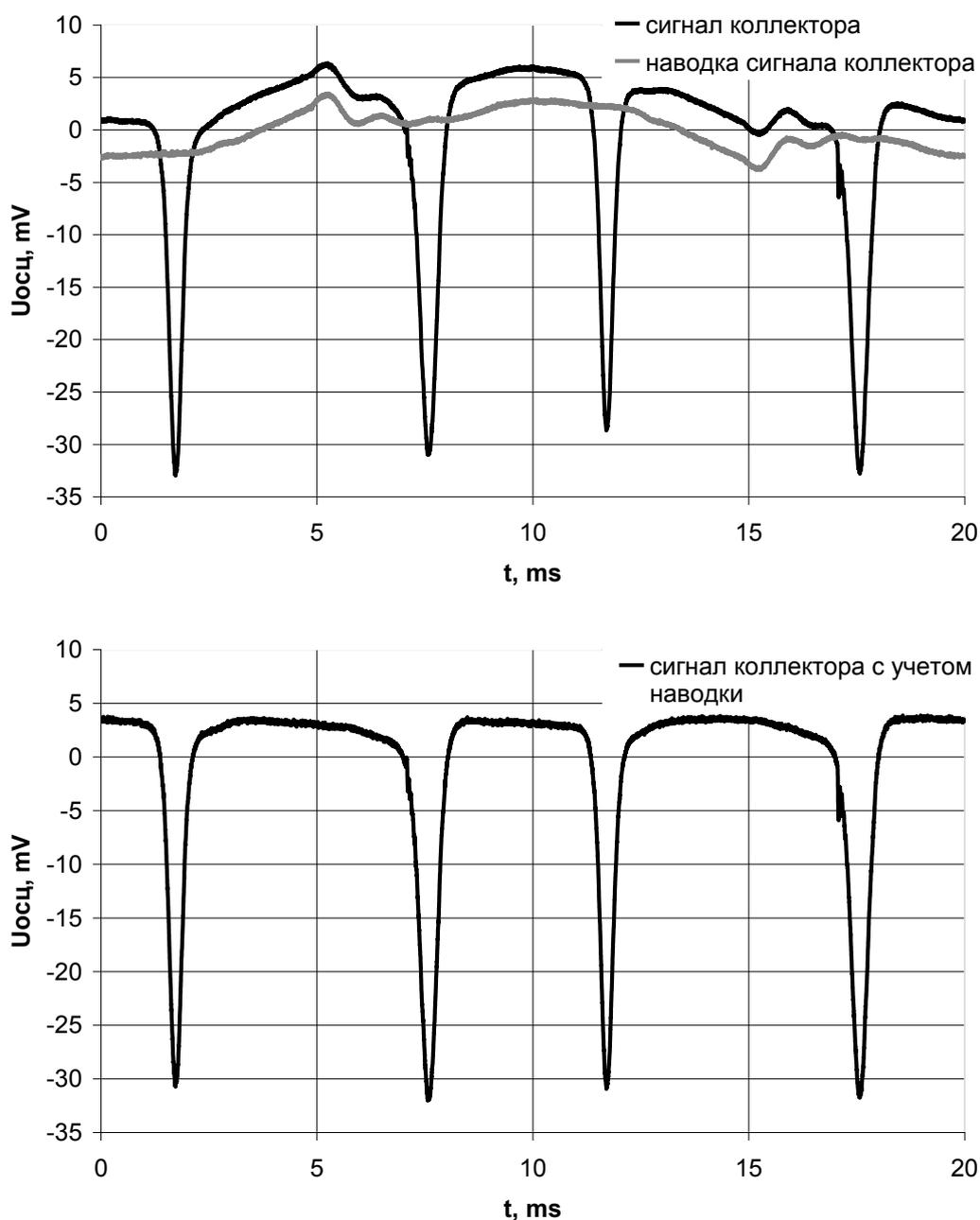


Рис. 10. Учет наводки на сигнал коллектора

Уровень нуля сигнала коллектора смещен относительно нуля осциллографа в результате проведения измерений в режиме регистрации переменной компоненты напряжения. В данном режиме сигнал смещается таким образом, чтобы усредненное напряжение на осциллографе равнялось нулю.

Из рисунков 9 и 10 можно заметить искажение формы спектра пучка при регистрации на восходящем фронте сканирующего сигнала. Данный эффект вызван явной нелинейностью восходящего фронта сигнала сканирующего напряжения.

Регистрируемый сигнал может искажаться паразитной емкостью подводящих к регистратору проводов. Сопротивление, на котором производится измерение напряжения и паразитная емкость подводящего кабеля вместе работают как интегрирующая цепь (см. рисунок 11). Данный эффект приводит к искажению формы регистрируемого сигнала и

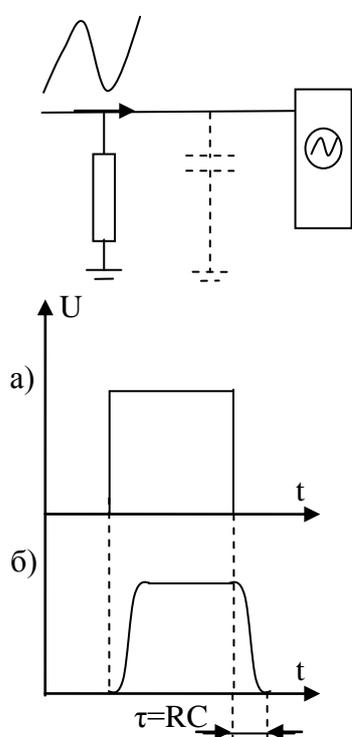


Рис. 11. Влияние паразитной емкости подводящего кабеля на регистрируемый сигнал.
 а) исходный сигнал
 б) регистрируемый сигнал

при сопоставлении двух сигналов приводит к смещению фазы одного относительно другого. На 1 м длины стандартного коаксиального кабеля приходится паразитная емкость ~ 100 пкФ. В процессе проведения эксперимента производилась одновременная регистрация осциллографом переменной составляющей сканирующего напряжения и сигнала коллектора анализатора. Сканирующее напряжение регистрировалось через омический делитель с коэффициентом деления 10^3 и номиналом меньшего плеча 1 МОм. Осциллограф подключался к делителю через подводящий кабель длиной ~ 5 м. Таким образом, постоянная времени для сигнала сканирующего напряжения составляет $\tau \sim 5 \cdot 10^{-4}$ с. Соответствующее смещение по времени синусоидального сигнала сканирующего напряжения относительно сигнала с коллектора в экспериментально полученных результатах

учитывалось при обработке сигналов. Вычисленная аналогичным образом постоянная интегрирования для сигнала коллектора при длине подводящего провода 3 м и шунтирующем сопротивлении 100 кОм составляет $3 \cdot 10^{-5}$ с, что не приводит к существенному искажению формы сигнала.

4 Результаты

Экспериментально были исследованы зависимости энергетического профиля пучка ОИ от трех параметров:

- Напряжение горения разряда
- Ток разряда источника
- Магнитное поле разряда

Недостатком проведенных измерений является отсутствие абсолютной привязки энергоспектров относительно анодного потенциала. Поскольку малые смещения максимумов энергопрофилей друг относительно друга не регистрировались, на всех графиках максимумы представленных распределений совмещены для более наглядного представления.

Зависимость формы энергетического профиля пучка от напряжения горения разряда приведена на рисунках 12 и 13. Данные профили были получены при следующих параметрах горения разряда: магнитное поле $B=0,6$ кГс, ток разряда $I_{\text{разр}}=6$ А. Напряжение вытягивания пучка составляло $U_{\text{полн}}=6,4$ кВ. Регулировка напряжения горения разряда производилась с помощью изменения интенсивности подачи цезия в газоразрядную камеру. Как видно из приведенных рисунков, при уменьшении напряжения горения снижается амплитуда сигнала и возрастает ширина энергетического профиля. Разность ширин профилей на полувысоте для $U_p=92$ В и $U_p=56$ В составляет ~ 10 эВ.

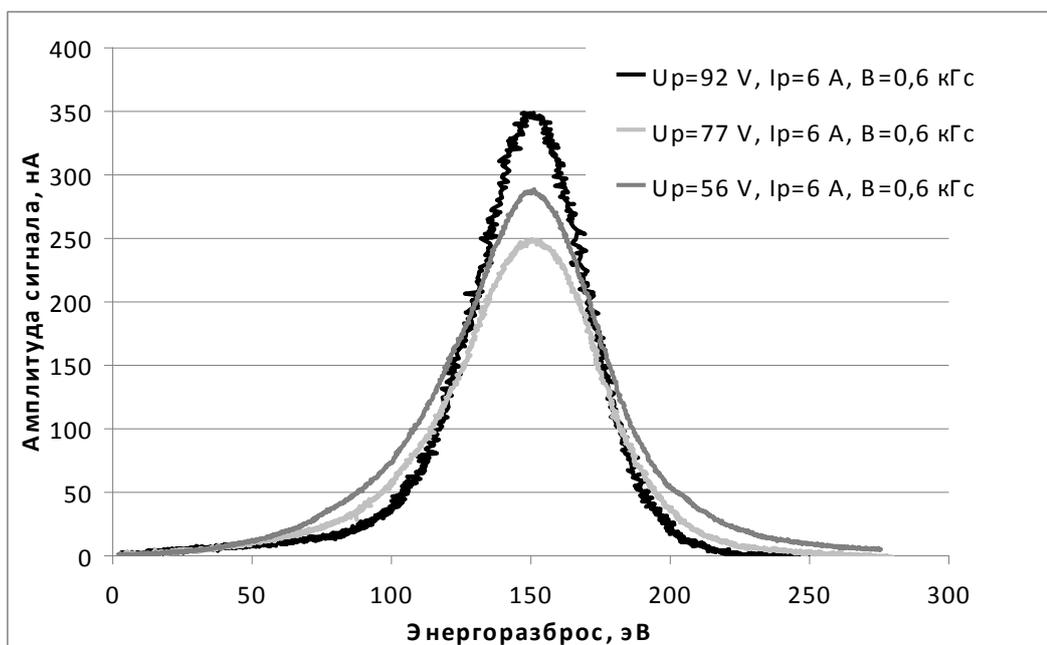


Рис. 12. Зависимость энергетического спектра пучка от напряжения горения разряда

Оба перечисленных эффекта могут быть вызваны понижением плотности газоразрядной плазмы при уменьшении напряжения на разряде. С одной стороны, это ведет к снижению интенсивности образования отрицательных ионов в разряде. С другой стороны,

повышается вероятность попадания ионов катодной и объемной групп генерации в вытягиваемый пучок, так как в менее плотной плазме вероятность разрушения отрицательных ионов падает.

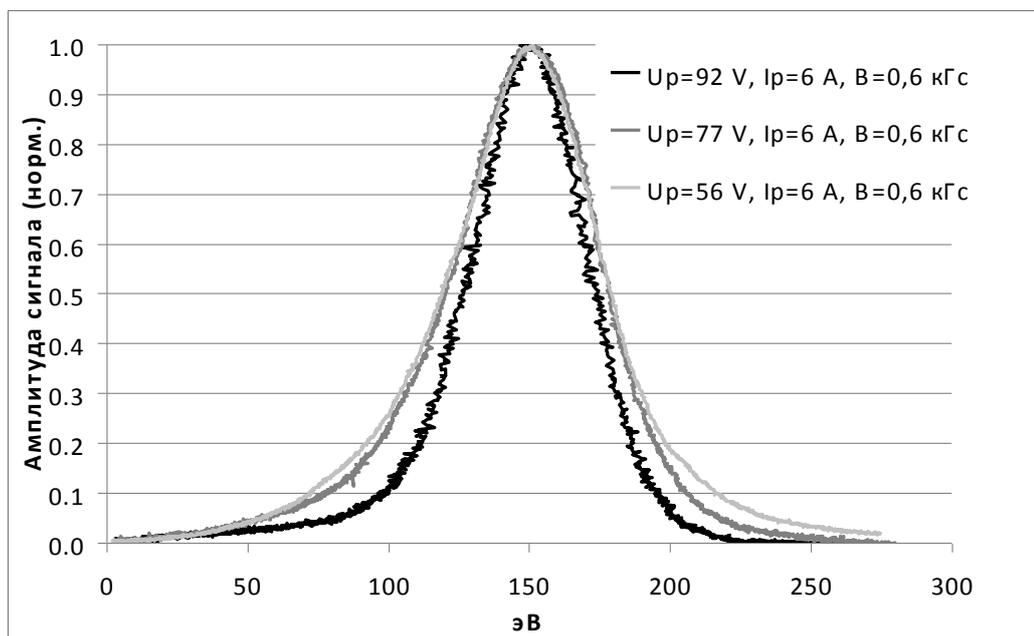


Рис.13. Зависимость нормированного сигнала коллектора от напряжения горения разряда

Также была экспериментально изучена зависимость формы энергетического профиля пучка от величины индукции магнитного поля B (см. рисунок 14, 15). Из данных рисунков видно, что при ослаблении магнитного поля уменьшается амплитуда сигнала, а ширина профиля остается неизменной.

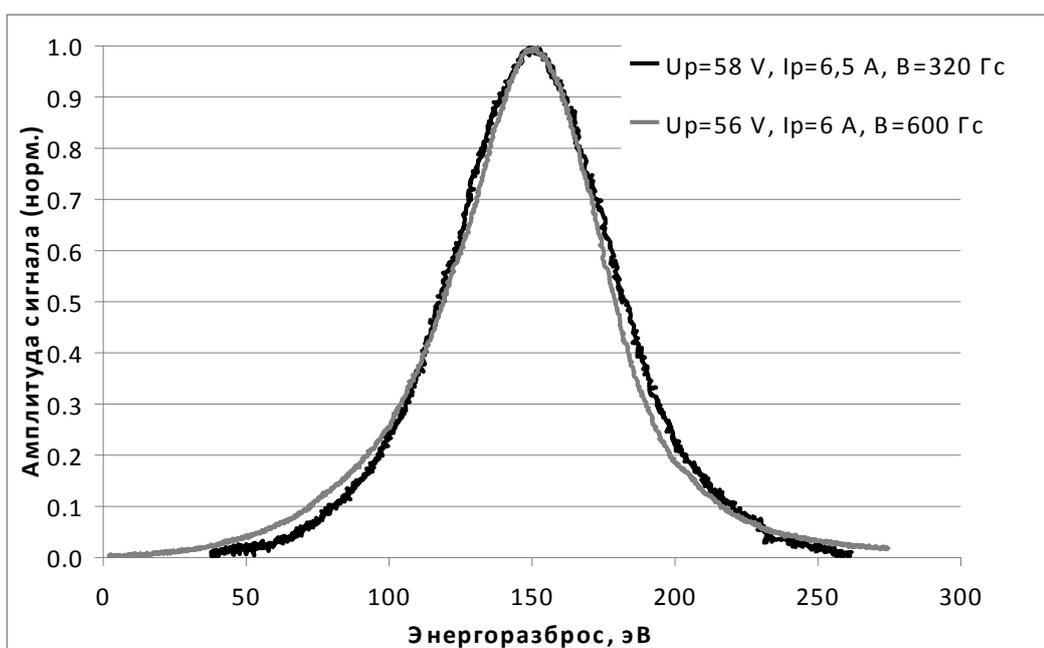


Рис. 14. Зависимость нормированного сигнала коллектора от магнитного поля B .

Уменьшение амплитуды сигнала при снижении магнитного поля вызвано одновременным понижением эффективности ионизации газа в разряде и соответствующим понижением активности образования отрицательных ионов водорода.

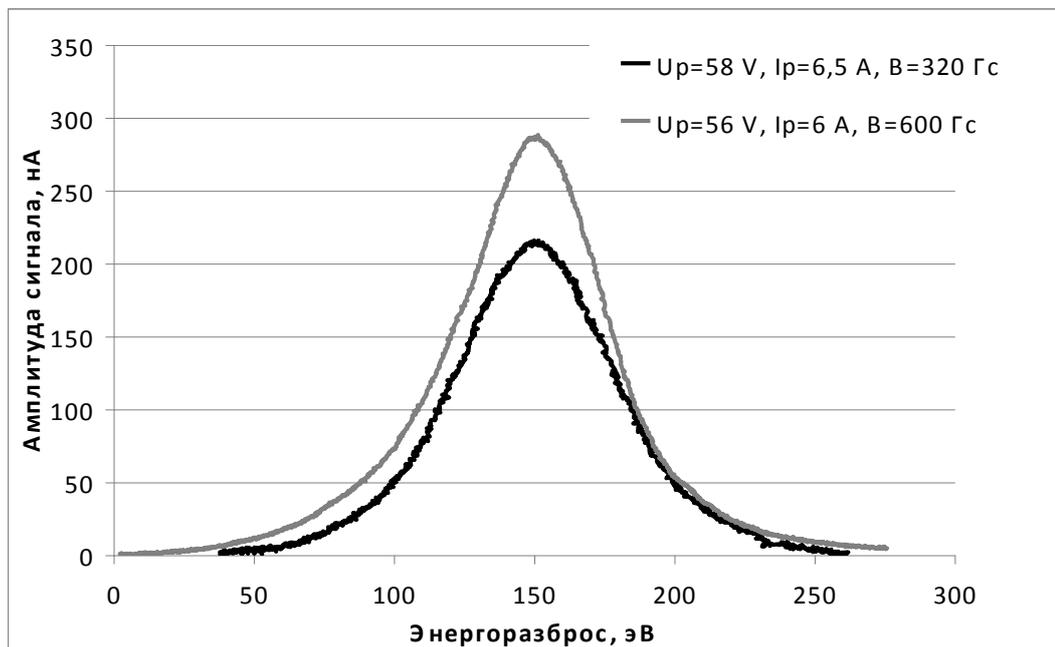


Рис. 15 Форма энергоспектра пучка ОИ в зависимости от магнитного поля B .

Зависимость формы энергетического спектра пучка ионов от тока разряда приведена на рисунках 16, 17. При меньшем токе разряда ширина спектра увеличивается. Это может быть вызвано ослаблением разрушения медленных ионов катодной группы в газоразрядной плазме с меньшей плотностью.

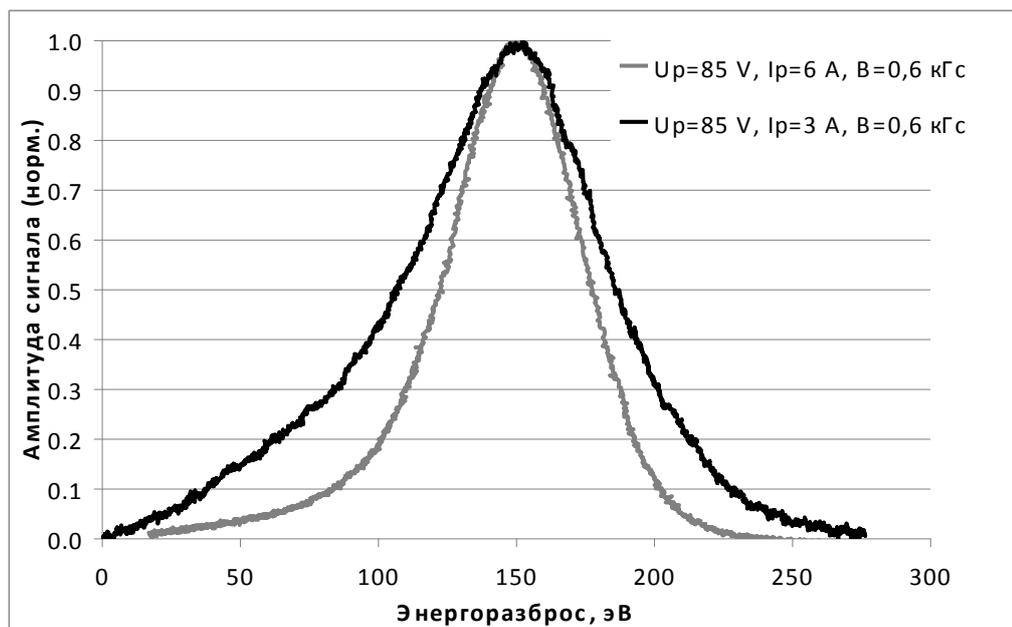


Рис. 16. Форма нормированного энергоспектра пучка ОИ в зависимости от тока горения разряда I .

В то же время, на рисунка 17 видно, что происходит существенное ослабление сигнала в разряде с меньшим током заряженных частиц на электроды. Данный эффект вызван понижением плотности плазмы в газоразрядной камере и ослаблением процесса генерации отрицательных ионов.

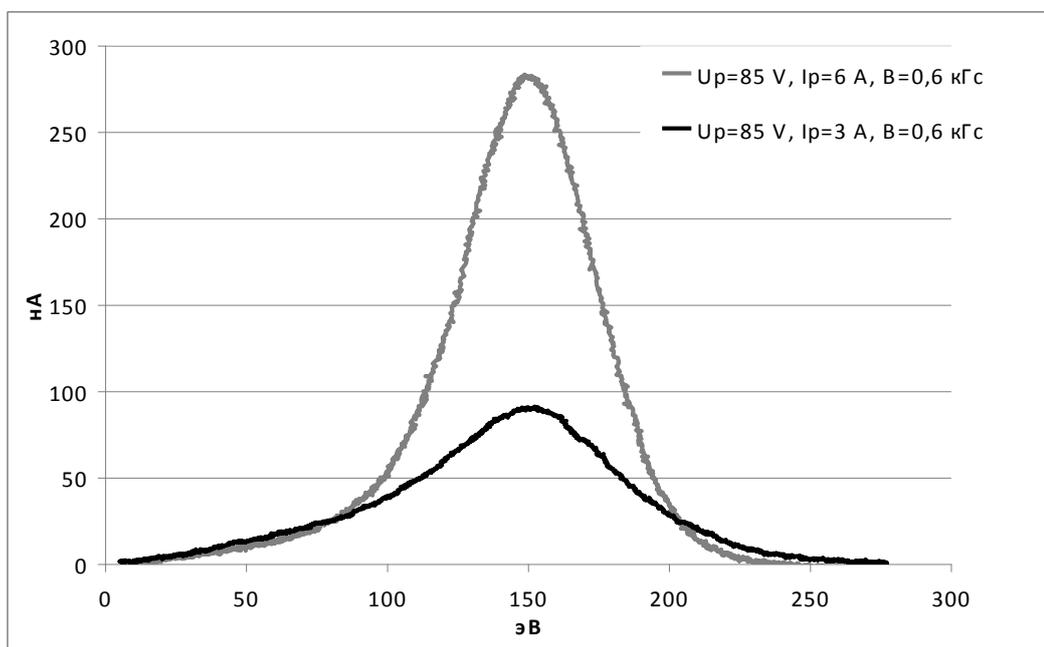


Рис. 17. Форма энергоспектра пучка ОИ в зависимости от тока горения разряда I_p .

Полученные результаты свидетельствуют, что созданный нами анализатор энергий может использоваться для регистрации спектра пучка отрицательных ионов поверхностно-плазменного пеннинговского источника. Записанные профили говорят о том, что энергоразброс частиц пучка составляет $\sim 50-60$ эВ (приведена оценка полной ширины характерного профиля на его полувысоте), то есть приблизительно равен напряжению горения разряда. При этом, исходя из полученных данных, выделения катодной и анодной групп генерации не происходит. К такой картине может привести постоянное перемещение максимума энергии генерации ионов катодной группы относительно пика энергии анодной группы за счет шумов разряда пеннинговского источника. Если катодная группа генерации существенно более активна, чем анодная и объемная, то происходит образование сплошного широкого спектра с единственным максимумом.

5 Выводы

- Разработан электростатический анализатор энергий отрицательных ионов с разрешением $\frac{\Delta W}{W} \approx 4 \cdot 10^{-3}$ при энергии частиц анализируемого пучка ~ 6 кэВ.
- Разработана схема измерений энергетического спектра пучка с применением цифровых методов регистрации сигналов.
- Проведены измерения энергоразброса пучка отрицательных ионов при различных параметрах горения разряда поверхностно-плазменного пеннинговского источника.
- Рассмотрена зависимость энергоспектра ионов от напряжения горения разряда, тока разряда и магнитного поля.
- Продолжается работа по калибровке абсолютной энергии регистрируемого пучка отрицательных ионов водорода для выявления основных каналов генерации ионов в источнике ионов с пеннинговской геометрией электродов и инъекцией плазмы из полых катодов.

Благодарности

Хотелось бы поблагодарить моего научного руководителя, Санина Андрея Леонидовича, а также Юрия Ивановича Бельченко, за уделенные на работу со мной время и терпение. Их рекомендации и руководство помогли мне в понимании физики работы источника и в понимании того, что такое работа исследователя.

Список литературы

1. *Н.Н. Семашко, А.Н. Владимиров, В.В. Кузнецов, В.М. Кулыгин, А.А. Панасенков*, «Инжекторы быстрых атомов водорода» // Энергоиздат, (1981) – с. 9-10
2. *Y.S. Hwang*, «Ion source development for various applications in Korea» (invited, abstract) // RSI 79, 02C722 (2008)
3. *Yu. Belchenko, V. Savkin*, «Direct current H^- source for medicine accelerator» (invited) // RSI 75, 5 (2004)
4. *Ю.И. Бельченко, Г.И. Димов, В.Г. Дудников*, «Эмиссия интенсивных потоков отрицательных ионов с поверхностей, бомбардируемых быстрыми частицами из разряда» // Известия Академии Наук СССР, серия физическая, т. XXXVII. № 12 (1973)
5. *Ю.И. Бельченко*, «Исследование эмиссии отрицательных ионов из сильноточных разрядов» // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1974), с. 30-55, 70-81
6. *Martin P. Stockli*, «Measuring and analyzing the transverse emittance of charged particle beams» // AIP Conference Proceedings, 868 (2006) с. 26-33
7. *Yu. Belchenko, I. Ivanov, I. Piunov*, «Study of direct current negative ion source for medicine accelerator» // AIP Conference Proceedings, 763 (2005), с. 325
8. *Г.В. Деревянкин*, «Разработка и исследование поверхностно-плазменных источников отрицательных ионов водорода для ускорителей» // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, с. 100