

АНАЛИЗАТОР ЭНЕРГИИ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТЕПЕНИ КОМПЕНСАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ИОННОГО ПУЧКА

© 2019 г. А. С. Белов^{а,*}, С. А. Гаврилов^а, В. Н. Зубец^а, Л. П. Нечаева^а,
Е. С. Никулин^а, О. Т. Фролов^а, Д. А. Чермошенцев^а

^аИнститут ядерных исследований РАН
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

*e-mail: belov@inr.ru

Поступила в редакцию 29.12.2018 г.

После доработки 28.02.2019 г.

Принята к публикации 06.03.2019 г.

Описан анализатор энергии вторичных медленных ионов, который используется для измерения степени компенсации пространственного заряда пучка ионов водорода в канале транспортировки на вход ускорителя с высокочастотной квадрупольной фокусировкой. Электростатический анализатор с задерживающим полем имеет повышенную точность за счет применения двойной анализирующей сетки. Представлены результаты по измерению степени компенсации пространственного заряда пучка ионов водорода с импульсным током 60 мА и энергией 400 кэВ. Анализатор позволяет также проводить бесконтактные измерения размера ионного пучка.

DOI: 10.1134/S0032816219050045

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование ускорителей с высокочастотной квадрупольной фокусировкой привело к снижению энергии инжектируемых в линейные ускорители ионных пучков до 30–100 кэВ. При этом при типичном импульсном токе ионного пучка в диапазоне 10–100 мА сильное влияние на транспортировку ионных пучков на участках между ионным источником и линейным ускорителем оказывает пространственный заряд ионного пучка. Влияние пространственного заряда уменьшается, если происходит компенсация заряда ионного пучка при ионизации молекул остаточного газа ионами пучка. При этом происходит захват электронов, возникающих при ионизации остаточного газа, в радиальную ловушку, образованную полем пространственного заряда пучка положительных ионов. Захваченные электроны нейтрализуют пространственный заряд ионного пучка. Конечная величина перепада потенциала в пучке определяется нагревом электронов за счет кулоновских столкновений с быстрыми ионами пучка [1, 2].

Компенсация пространственного заряда возможна в том случае, если при транспортировке пучка не используются сильные электрические поля, т.е. в каналах транспортировки с магнитными линзами и дрейфовыми промежутками.

В ИЯИ РАН пучок протонов с энергией 400 кэВ и импульсным током 60 мА, генерируемый источником ионов типа дуоплазматрон, транспортируется на вход ускорителя с высокочастотной квадрупольной фокусировкой в канале с магнитными фокусирующими соленоидами, поворотными и корректирующими магнитами. Длительность импульсов тока пучка равна 200 мкс, частота повторения импульсов 50 Гц [3]. Численные оценки и моделирование с программой COMSOL Multi-Physics [4] показывают заметное влияние пространственного заряда на фазовые характеристики ионного пучка с данными параметрами в канале инжектора.

Потенциал поля, создаваемого пространственным зарядом ионного пучка, может быть определен по измерению энергетического спектра медленных вторичных ионов, возникающих при ионизации молекул газа быстрыми ионами пучка и имеющих малую начальную энергию. Возникающие при ионизации медленные ионы ускоряются в поле пространственного заряда в радиальном направлении, причем их энергетический спектр определяется радиальным перепадом потенциала в поле пространственного заряда в ионном пучке.

Для измерения энергетического спектра медленных ионов используются спектрометры различных типов, в том числе электростатические

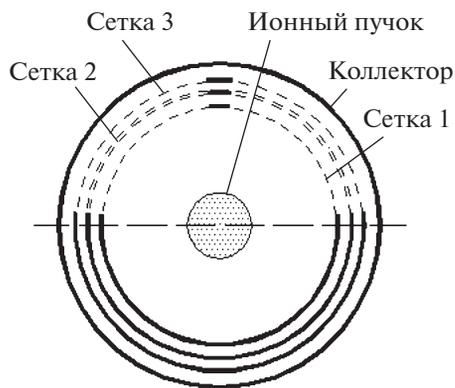


Рис. 1. Поперечное сечение анализатора энергии вторичных ионов.

анализаторы энергии с задерживающим полем [5–7].

В 3-сеточном анализаторе [8] первая из сеток заземлена, вторая является анализирующей, на третью сетку подается отрицательный потенциал, и она выполняет функцию подавления потока электронов из объема ионного пучка на коллектор и вторичных электронов, выбиваемых ионами из коллектора. Коллектор установлен за сетками. Зависимость потока медленных вторичных ионов на коллектор от задерживающего потенциала содержит информацию о спектре медленных ионов. В данном анализаторе плоский угол регистрации коллектором разлетающихся из пучка медленных ионов близок к 2π . Поэтому анализатор имеет относительно большую величину тока вторичных ионов, регистрируемых коллектором.

В сеточных анализаторах одним из источников систематической ошибки в измерении энергетического спектра медленных ионов является эффект “проникновения” поля в области анализирующей сетки, который приводит к возникновению систематической ошибки в измерении спектра энергии медленных ионов [8].

В данной работе описан электростатический сеточный анализатор энергии вторичных ионов с задерживающим полем, в котором систематическая ошибка, обусловленная эффектом “проникновения” поля, значительно уменьшена. Приведены описание устройства анализатора, результаты его численного моделирования и примеры измерений.

2. ОПИСАНИЕ АНАЛИЗАТОРА

Поперечное сечение анализатора показано схематически на рис. 1. Конструкция анализатора близка к конструкции 3-сеточного электростатического анализатора, описанного в работе [8]. Анализатор содержит три сетки и коллектор, которые имеют цилиндрическую форму. Длина се-

ток и коллектора вдоль направления ионного пучка равна 55 мм. Размер прямоугольной ячейки сеток 0.5×0.5 мм. Пучок ионов проходит вдоль оси анализатора. Размер пучка ионов изменяется при фокусировке электростатическими линзами, установленными после ионного источника, но остается, по условиям транспортировки, всегда меньше внутреннего диаметра заземленной сетки 1, равного 72 мм. Сетка 2 является анализирующей. На нее подается положительный потенциал, который создает электрическое поле, тормозящее медленные положительные ионы, выталкиваемые из объема ионного пучка силами пространственного заряда ионного пучка. Для уменьшения эффекта проникновения поля анализирующая сетка сделана из двух сеток, разделенных промежутком 2 мм и находящихся под одним потенциалом.

Сетки закреплены в двух из четырех квадрантов в цилиндрических электродах, ось которых совпадает с осью ионного пучка. В других квадрантах цилиндрических электродов вместо сетки 1 установлены заземленные экраны. При такой геометрии анализатора ионы и электроны, отраженные потенциальными барьерами сеток 2 и 3, попадают на заземленный экран внутреннего цилиндрического электрода.

Коллектор анализатора окружен заземленным экраном. Токовые сигналы с коллектора попадают на усилитель с полосой 1 МГц и коэффициентом передачи 1 В/мкА и регистрируются осциллографом с полосой пропускания 100 МГц.

Анализатор установлен в диагностическом боксе на выходе инжектора протонного пучка. Между инжектором и диагностическим боксом находится камера, которая откачивается двумя турбомолекулярными насосами со скоростью откачки 2000 л/с каждый. Давление остаточного газа в диагностическом боксе при включенном ионном источнике равно $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ мбар. Остаточный газ состоит из молекулярного водорода, молекулярного азота, паров воды и более тяжелых молекул.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛИЗАТОРА

Для однородного ионного пучка зависимость тока вторичных медленных ионов на коллектор от потенциала анализирующей сетки имеет вид [8]:

$$I_{s+}(\varphi_2) = I_{s+}(0) \quad \text{для} \quad \varphi_2 \leq (\varphi_b - \Delta\varphi_b), \quad (1)$$

$$I_{s+}(\varphi_2) = I_{s+}(0) \frac{(\varphi_b - \varphi_2)}{\Delta\varphi_b} \quad \text{для} \quad \varphi_b > \varphi_2 > (\varphi_b - \Delta\varphi_b), \quad (2)$$

где I_{s+} — ток медленных ионов на коллектор анализатора, φ_2 — потенциал анализирующей сетки, φ_b — потенциал оси ионного пучка относительно стенки ионпровода, $\Delta\varphi_b$ — разность потенциалов

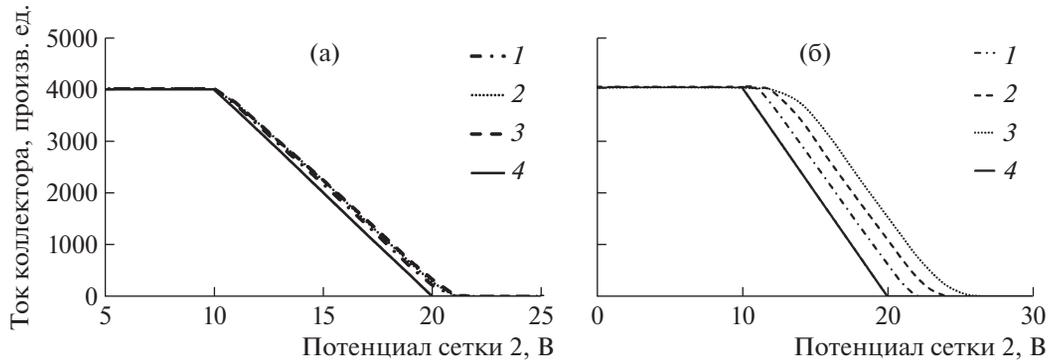


Рис. 2. Моделирование зависимости тока коллектора анализатора от потенциала сетки 2 при потенциалах сетки 3: -100 В (1), -300 В (2), -500 В (3); 4 – характеристики, вычисленные по формулам (1), (2); а – анализатор с двойной анализирующей сеткой, б – с одиночной сеткой.

границы ионного пучка относительно оси симметрии пучка.

Для некомпенсированного ионного пучка с однородным распределением плотности тока потенциал пучка относительно стенок ионпровода равен [9]

$$\phi_b = \frac{I_b}{4\pi\epsilon_0 v_b} \left(1 + 2 \ln \left(\frac{R_t}{R_b} \right) \right), \quad (3)$$

где I_b – ток ионного пучка, v_b – скорость ионов, R_t – радиус ионпровода, R_b – радиус ионного пучка.

Перепад потенциала от оси до края ионного пучка

$$\Delta\phi_b = \frac{I_b}{4\pi\epsilon_0 v_b}. \quad (4)$$

Разброс энергий вторичных ионов, достигающих коллектора, выраженный в электронвольтах, равен перепаду потенциала $\Delta\phi_b$. Для импульсного тока пучка протонов $I_b = 60$ мА и энергии 400 кэВ перепад потенциала $\Delta\phi_b = 62$ В.

Компенсация пространственного заряда приводит к уменьшению потенциала пучка до величины $\phi_{b\text{сcc}}$ и разброса энергий ионов $\Delta\phi_{b\text{сcc}}$ ($\phi_{b\text{сcc}}$ и $\Delta\phi_{b\text{сcc}}$ – потенциал оси пучка ионов с компенсированным пространственным зарядом относительно заземленного ионпровода и перепад потенциала в компенсированном ионном пучке соответственно). Для однородных ионных пучков величину степени компенсации определяют обычно как

$$\eta = 1 - \frac{\Delta\phi_{b\text{сcc}}}{\Delta\phi_b}. \quad (5)$$

Такое определение удобно, поскольку, как следует из формулы (4), перепад потенциала $\Delta\phi_b$ не зависит от радиуса ионного пучка.

Если распределение плотности тока в пучке не является однородным, удобнее использовать другое определение степени компенсации [9]:

$$\eta = 1 - \frac{\phi_{b\text{сcc}}}{\phi_b}. \quad (6)$$

Моделирование анализатора было выполнено с помощью программы COMSOL MultiPhysics [4], в которой имеется возможность для трехмерного вычисления электростатических полей и движения ионов.

При численном моделировании предполагалось, что медленные ионы имеют разброс энергий 10 эВ и стартуют с поверхности, совпадающей с внешней поверхностью пучка ионов, находящейся под потенциалом 10 В относительно заземленной сетки 1 анализатора. Для этого набора параметров имеем $\phi_b = 20$ В, $\Delta\phi_b = 10$ В. Потенциал сетки 3 являлся параметром моделирования и принимал значения -100 , -300 и -500 В. Результат моделирования зависимости тока коллектора ионов от потенциала анализирующей сетки показан на рис. 2а, а на рис. 2б – результат такого же моделирования для анализатора, в котором сетка 2 является одиночной [8].

Из результатов моделирования следует, что использование двойной анализирующей сетки приводит к значительному уменьшению ошибки, связанной со сдвигом и искажением формы характеристики при увеличении потенциала сетки 3. Сдвиг характеристики анализатора при потенциале сетки 3, равном -300 В для анализатора с двойной сеткой, меньше в 4 раза по сравнению с анализатором с одиночной сеткой. Соответственно, уменьшается систематическая ошибка в определении спектра энергии вторичных ионов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Ток медленных ионов и электронов на коллектор анализатора запирается подачей достаточно

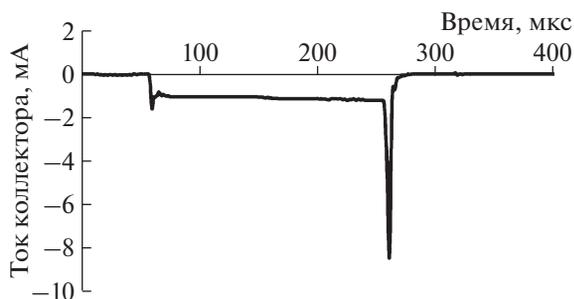


Рис. 3. Осциллограмма тока электронов на коллектор анализатора. Потенциалы сеток 2 и 3 равны +120 В и 0 В соответственно.

высокого потенциала на сетки 2 и 3 соответственно. При подаче запирающего ионы положительно потенциала на сетку 2 и при нулевом потенциале на сетке 3 на коллектор анализатора проходят электроны. Типичная осциллограмма импульсного тока электронов в этом режиме приведена на рис. 3.

Характерной чертой осциллограммы является резкое увеличение тока электронов в конце импульса, который связан, очевидно, со сбросом электронов, накопленных в объеме ионного пучка.

Для измерения тока медленных ионов выбирается потенциал сетки 3 анализатора, при котором ток электронов на коллектор запирается полностью или минимизируется. На рис. 4 приведена зависимость тока электронов, измеренного в середине импульса 200 мкс, от потенциала сетки 3 при импульсном токе пучка ионов водорода 60 мА.

Из графика на рис. 4 следует, что ток электронов уменьшается при увеличении потенциала сетки 3 по абсолютной величине до ~20% от первоначального значения при потенциале сетки 3 около -20 В, затем продолжается медленное уменьшение тока электронов до уровня ~2% от первоначального значения при потенциале сетки 3 около -300 В. Часть электронов с малым энергетическим разбросом возникает при ионизации остаточного газа. Электроны с относительно большим энергетическим разбросом, по-видимому, образуются за счет вторичной электронной эмиссии при бомбардировке поверхностей ионопровода быстрыми ионами из ореола ионного пучка. Увеличение средней энергии электронов происходит также при кулоновских столкновениях электронов, захваченных полем пространственного заряда, и быстрых ионов пучка.

В дальнейших измерениях тока медленных ионов потенциал сетки 3 выбирался равным -300 В.

Типичная осциллограмма тока медленных ионов на коллектор анализатора показана на рис. 5 вместе с осциллограммой тока ускоренного пучка ионов водорода. При регистрации медленных ионов проводилось усреднение 16 сигналов в ос-

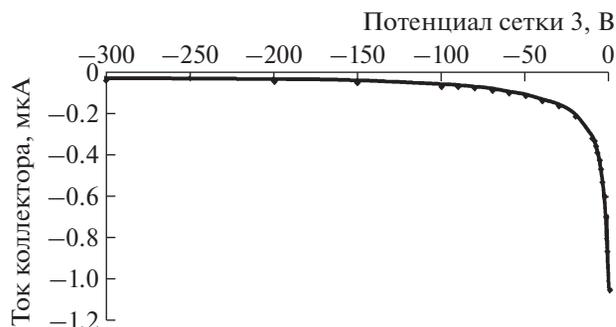


Рис. 4. Зависимость импульсного тока электронов от потенциала сетки 3. Потенциал сетки 2 равен +100 В.

циллографе для уменьшения уровня шумового сигнала.

Приближенное значение амплитуды импульсного тока вторичных ионов дается следующим выражением, в котором не учитываются ионы, возникающие при ионизации остаточного газа электронами [8]:

$$I_{s+}(0) = k I_b L \left(\frac{\Delta\alpha}{2\pi} \right) \sum \{n_{j1} [t\sigma_{j1}^+ + (1-t)\sigma_{j2}^+]\}, \quad (7)$$

где $I_{s+}(0)$ — амплитуда тока вторичных ионов при потенциале сетки 2, равном нулю; k — прозрачность всех сеток анализатора для вторичных ионов; L — длина окон анализатора вдоль оси пучка; $\Delta\alpha$ — плоский угол, под которым расположены сетки анализатора относительно оси ионного пучка; t — доля протонов в ионном пучке; $(1-t)$ — доля ионов H_2^+ ; n_{j1} — плотность молекул j -типа в остаточном газе; σ_{j1}^+ — поперечное сечение для образования положительных ионов при столкновении протонов пучка с молекулой остаточного газа j -го типа; σ_{j2}^+ — поперечное сечение для образования положительных ионов при столкновении ионов H_2^+ пучка с молекулой остаточного газа j -го типа. В данном анализаторе $k = 0.17$ (с учетом непрозрачных для ионов конструктивных элементов крепления сеток), $L = 55$ мм, $\Delta\alpha = 2.8$ рад, $t = 0.8$. Суммирование проводится по всем видам молекул остаточного газа. Принимая для оценки остаточный газ состоящим из 50% молекулярного водорода и 50% азота ($n_{\text{H}_2} = 1.3 \cdot 10^{11}$ см⁻³, $n_{\text{N}_2} = 1.3 \cdot 10^{11}$ см⁻³) и используя сечения ионизации $\sigma_{\text{H}_2,1}^+ = 0.8 \cdot 10^{-16}$ см², $\sigma_{\text{N}_2,1}^+ = 2.8 \cdot 10^{-16}$ см² и $\sigma_{\text{H}_2,2}^+ = 1.1 \cdot 10^{-16}$ см², $\sigma_{\text{N}_2,2}^+ = 3.5 \cdot 10^{-16}$ см² [10, 11], получим оценку для тока вторичных ионов $I_{s+}(0) = 1.2$ мкА, что хорошо совпадает с наблюдаемой величиной тока медленных ионов (1.15 мкА, см. рис. 5), учитывая принятые приближения.

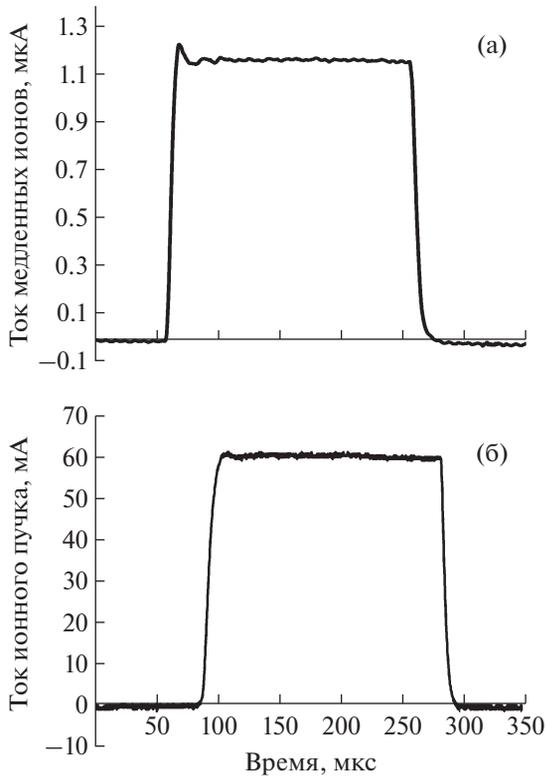


Рис. 5. Осциллограммы: **а** – тока медленных ионов на коллектор (потенциалы сетки 3 и сетки 2 равны -300 В и 0 В соответственно), **б** – тока пучка ионов водорода с энергией 400 кэВ. Временной сдвиг между началом импульсов тока медленных ионов (**а**) и тока ионного пучка (**б**) связан с регистрацией импульсов разными осциллографами.

На фронте импульса тока вторичных ионов наблюдается выброс, которого не должно быть при прямой пропорциональности току ионного пучка согласно выражению (7). По-видимому, это отклонение связано с процессом ионизации остаточного газа электронами, которые захватываются пространственным зарядом пучка и в начале импульса, пока не произошла компенсация пространственного заряда ионного пучка, приобретают энергию, сравнимую с 62 эВ ($\Delta\phi_b = 62$ В) и достаточную для ионизации молекул остаточного газа (потенциал ионизации молекул водорода и азота равен ~ 15.5 эВ [10]).

При увеличении положительного потенциала сетки 2 анализатора амплитуда импульсов тока вторичных ионов уменьшается, изменяется также форма импульсов, что отражает динамику процесса компенсации пространственного заряда ионного пучка. Поэтому зависимость тока вторичных ионов от величины задерживающего потенциала находилась для разных моментов времени от начала импульса тока ионного пучка. Измеренные характеристики для импульсного тока пучка протонов 60 мА, 200 мкс представлены

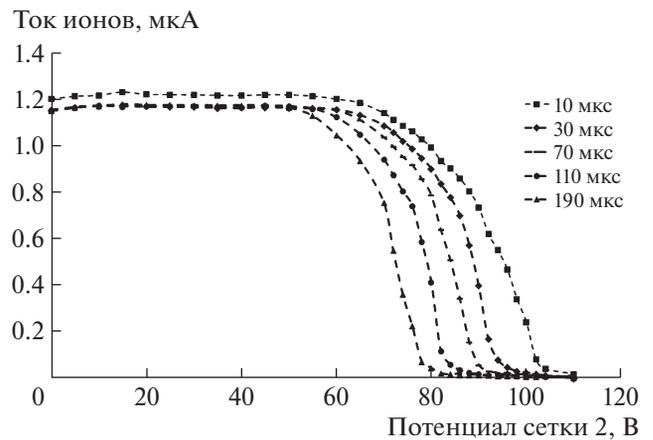


Рис. 6. Зависимости тока вторичных ионов от величины задерживающего потенциала для разных моментов времени от начала импульса ионного пучка. Потенциал сетки 3 равен -300 В, ток пучка протонов 60 мА, длительность импульса 200 мкс. Штриховые кривые показаны для наглядности рисунка.

на рис. 6. Изменение характеристик в течение импульса ионного тока связано с динамикой процесса компенсации пространственного заряда.

Аппроксимация измеренных характеристик по выражениям (1), (2) приводит к большой погрешности из-за нелинейности характеристик. Отклонение от линейности объясняется, в частности, неоднородностью поперечной плотности тока ионного пучка. Для определения степени компенсации из представленных характеристик использовалась аппроксимация распределения плотности тока гауссовским распределением. Характерный радиус распределения и величина потенциала на оси пучка определялись фитированием к экспериментальной кривой методом наименьших квадратов. Результат аппроксимации для одной из характеристик показан на рис. 7.

Следует отметить, что различие между аппроксимацией и измеренной характеристикой при задерживающем потенциале около 60 В на рис. 7 можно объяснить отклонением радиального распределения плотности ионов в пучке от гауссовского, а причиной соответствующего различия при задерживающем потенциале > 79.5 В на рис. 7 является, по-видимому, то, что часть медленных вторичных ионов приобретает энергию не только за счет ускорения в поле пространственного заряда ионного пучка, но и за счет других физических процессов в ионно-пучковой плазме [7, 8].

В результате аппроксимации найдены значения характерного радиуса R_b для радиального распределения плотности ионов в пучке 400 кэВ при параметрах инжектора, поддерживаемых во время измерений. Характерный радиус $R_b = 1.38 \pm 0.02$ мм не изменяется в пределах точности измерений в

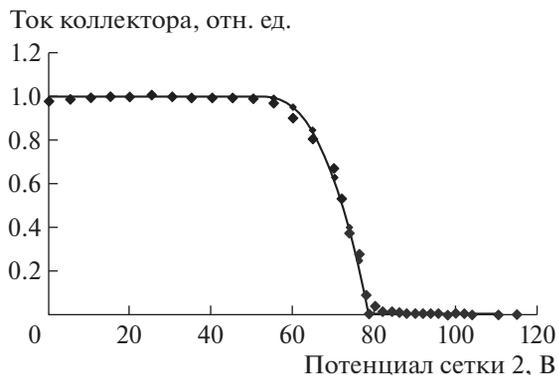


Рис. 7. Зависимость тока вторичных ионов от задерживающего потенциала для момента времени от начала импульса ионного пучка 170 мкс. Точки – экспериментальные данные, нормированные на средний ток при потенциале сетки 2 в диапазоне 0–40 В. Сплошная кривая – аппроксимация характеристики в предположении распределения Гаусса для плотности тока ионного пучка с параметрами $R_p = 1.38$ мм, $\Phi_{bsc} = 79.5$ В.

течение времени импульса, начиная с момента 30 мкс от начала импульса тока пучка. Этот результат согласуется с постоянством поперечного эмиттанта ионного пучка на выходе инжектора в течение длительности импульса 200 мкс, полученный в измерениях в работе [3].

Степень компенсации пространственного заряда ионного пучка определялась из выражения (6), причем потенциал пучка с компенсированным пространственным зарядом Φ_{bsc} определялся как параметр, полученный при аппроксимации измеренных характеристик. Потенциал некомпенсированного пучка определялся расчетом для тока ионного пучка 60 мА, используя полученное значение характерного радиуса пучка 1.38 мм и используя гауссовское распределение плотности тока пучка. Результаты для изменения измеренной и вычисленной таким образом степени компенсации в течение импульса тока ионного пучка приведены на рис. 8.

Из рис. 8 следует, что компенсация пространственного заряда пучка ионов водорода с рассматриваемыми параметрами происходит практически во время нарастания тока пучка на фронте импульса. В течение импульса происходит увеличение степени компенсации от 0.7 в начале импульса до 0.82 в конце импульса тока пучка. Моделирование транспортировки ионного пучка в канале инжекции в линейный ускоритель показывает, что изменение степени компенсации в таких пределах не оказывает заметного влияния на изменение фазовых характеристик ионного пучка. Измеренная степень компенсации ионного пучка согласуется с теоретической оценкой, сделанной по полученному в работе [2] выражению

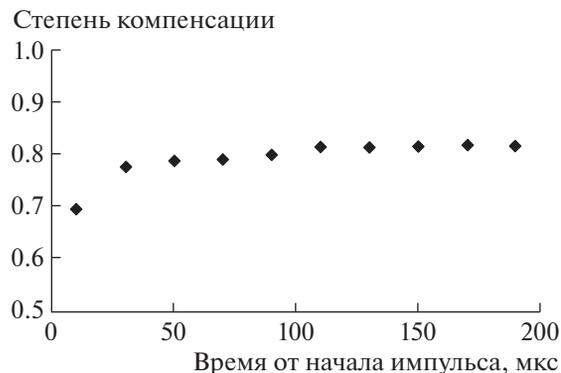


Рис. 8. Зависимость степени компенсации пространственного заряда пучка ионов водорода от времени в течение импульса тока пучка длительностью 200 мкс.

для перепада потенциала в ионном пучке с компенсированным пространственным зарядом.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено описание анализатора энергии медленных вторичных ионов с задерживающим потенциалом, предназначенного для измерения степени компенсации пространственного заряда ионного пучка. Особенностью анализатора является использование двойной анализирующей сетки, что, как показывает моделирование движения ионов, привело к значительному снижению систематической ошибки, связанной с эффектом “проникновения поля” через анализирующую сетку. Приведены зависимости тока вторичных ионов от величины задерживающего потенциала анализатора. Экспериментальные зависимости аппроксимируются в предположении гауссовского распределения плотности тока в первичном ионном пучке. При подгонке параметров распределения плотности определяется характерный размер ионного пучка, так что анализатор дает возможность бесконтактного не возмущающего пучок измерения размера ионного пучка. В данных измерениях для сфокусированного ионного пучка его характерный радиус равен 1.38 ± 0.02 мм и не изменяется в пределах точности в течение длительности импульса ионного пучка, что согласуется с постоянством поперечного эмиттанта в течение импульса тока ионного пучка. Из отличия измеренных характеристик от аппроксимации в области относительно больших задерживающих потенциалов следует наличие в спектре вторичных ионов с относительно большой энергией, которая приобретает не за счет ускорения в поле пространственного заряда ионного пучка, а за счет других физических процессов в ионно-пучковой плазме. Определена степень компенсации пространственного заряда пучка ионов водорода с импульсным током 60 мА, энергией 400 кэВ и дли-

тельностью импульса 200 мкс. Степень компенсации изменяется в течение токового импульса в пределах 0.7–0.82, что, как показывает моделирование, не оказывает заметного влияния на фазовый портрет ионного пучка при его транспортировке в канале инжекции в линейный ускоритель.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.В. Фещенко за внимание к работе и А.В. Турбабину за участие в изготовлении анализатора и измерениях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была выполнена в Ускорительном центре для нейтронных исследований и ядерной медицины Института ядерных исследований РАН при поддержке Министерства образования и науки РФ (RFMEFI62117X0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габович М.Д. // УФН. 1977. Т. 121. С. 259.
2. Soloshenko I.A. // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 6. P. 1646.
3. Белов А.С., Голубовский С.Е., Зубец В.Н., Никулин Е.С., Фролов О.Т. // ПТЭ. 2017. № 2. С. 5.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217020161>
4. <https://www.comsol.com/>
5. Kreisler P., Baumann H., Bethge K. // Vacuum. 1984. V. 34. P. 215.
6. Sherman J., Olivo M., Mariani E. // Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63. P. 2776.
7. Ferdinand R., Sherman J., Stevens R.R., Zaugg T. // Proceedings of the PAC'97. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1998. V. 3. P. 2723.
8. Belov A.S., Chermoshentsev D.A., Gavrilov S.A., Frolov O.T., Netchaeva L.P., Nikulin E.S., Zubets V.N. // JINST. 2018. V. 13. T05001.
9. Chauvin N., Delferrière O., Duperrier R., Gobin R., Nghiem P.A.P., Uriot D. // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 02B320.
<https://doi.org/10.1063/1.3678658>
10. Rudd M.E., DuBois R.D., Toburen L.H., Ratcliffe C.A., Goffe T.V. // Phys. Rev. A. 1983. V. 28. P. 3244 .
11. Rudd M.E., Kim Y.K., Madison D.H., Gallagher J.W. // Rev. Mod. Phys. 1985. V. 57. P. 965.