14
ITEP - 14-01
Fermilab Library
0 1160 0092399 9

Институт Теоретической и
Экспериментальной Физики

14 – 01

Т.В. КУЛЕВОЙ, Р.П. КУЙБИДА,
С.В. ПЕТРЕНКО, Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ,
В.И. ПЕРШИН, В.А. БАТАЛИН,
А.А. КОЛОМИЕЦ.

ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ U^{7+}

НА ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ MEVVA-M

Москва 2001

FEB 25 2002

УДК 621.387.324 М – 16

Получение ионов U^{7+} на источнике ионов MEVVA-M: Препринт ИТЭФ 14–01/ Т.В. Кулевой, Р.П. Куйбида, С.В. Петренко, Д.К. Селезнев, В.И. Першин, В.А. Баталин, А.А. Коломиец – М., 2001 – 14 с.

В ИТЭФ в течение ряда лет ведется работа по развитию вакуумно-дугового источника ионов металлов типа MEVVA и его модификаций. В предлагаемой работе приводятся результаты измерений зарядового спектра пучка ионов урана, генерируемого источником ионов MEVVA-M при разрядном токе 2.4кА в цепи катод – анод-2, и исследуется его изменение в течение импульса тока. На основании представленных результатов можно сделать вывод, что в начале импульса тока пучка максимум распределения ионов пучка по зарядовым состояниям приходится на ионы U^{6+} и U^{7+}. Общий ток извлекаемого из источника пучка составил 100 –150 мА. К концу импульса тока пучка зарядность ионов заметно понижается и достигает величин, характерных для обычных источников типа MEVVA. Приводятся результаты измерения аксиальной составляющей магнитного поля вдоль оси источника.

Generation of U^{7+} ions beam by MEVVA-M ion source: Preprint ITEP 14–01/ T.V. Kulevoy, R.P. Kuibeda, S.V. Petrenko, D.K. Seleznev, V.I. Pershin, V.A. Batalin, A.A. Kolomiets.

In ITEP experiments with MEVVA ion source and its modifications are carried on. The CSD of uranium ion beam generated by MEVVA-M ion source with discharge current of 2.4 kA in cathode – anode-2 circuit are presented. The CSD changes during the beam pulse are investigated. It was found that the maximum of CSD measured for uranium beam of 100 – 150 mA falls on U^{6+} and U^{7+} ions. The result of axial magnetic field measurement is presented.

Рис. – 7, список лит. – 5 наим.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 2001

Введение

В ИТЭФ в течение ряда лет ведется работа по развитию вакуумно-дугового источника ионов металлов (ВДИИМ) типа MEVVA и его модификаций [1], [2], [3], [4], [5]. Эта работа связана с разработкой в ИТЭФ прототипа начальной части интенсивного ЛУ тяжелых ионов для инерционного термоядерного синтеза (ИТС). В процессе изучения работы источника ионов MEVVA-M (вакуумно-дугового источника с двумя последовательно расположенными анодами) обнаружена возможность повышения зарядности ионов генерируемого пучка при наличии в области вакуумно-дугового разряда нарастающего вдоль оси источника магнитного поля [5]. В предлагаемой работе приводятся результаты измерений зарядового спектра пучка ионов урана при разрядном токе 2.4 кА в цепи катод – анод-2 и исследуется изменение данного спектра в течение импульса тока. Приводятся результаты измерения аксиальной составляющей магнитного поля вдоль оси источника.

Описание экспериментальной установки

Эксперименты проводились на источнике MEVVA-M [5]. Схема источника показана на рис.1. Инициирование разряда происходит, как и в традиционном источнике, в результате пробоя по поверхности керамического изолятора между катодом и триггером. Для этого на триггер подается импульс высокого напряжения амплитудой 12 кВ и длительностью 15 мкс. Образовавшаяся плазма заполняет сначала промежуток катод – анод-1, после чего развивается разряд между этими электродами. Для питания данного разряда используется модулятор тока дуги с накопительной индуктивностью. Индуктивность 10 мГ стабилизирует ток разряда в данной цепи (I_{a1}) на уровне 120 А. Длительность разряда – 150 мкс. Дальнейшее распространение плазмы вдоль оси источника приводит к развитию разряда на анод-2. Регулировка тока разряда (I_{a2}) в данной цепи осуществляется за счет изменения величины накопительной емкости C и напряжения на ней. Для экспериментов использовалась емкость 200 мкФ при напряжении на ней 800 В. При этом ток разряда составил 2.4 кА.

Плазма разряда дрейфует внутри анода-2, длина которого 64 см, в направлении к системе формирования ионного пучка. Для удержания плазмы во время дрейфа, источник снабжен магнитной катушкой (SDC – Solenoid of Drift Channel), обеспечивающей аксиальное магнитное поле (B_{a2}) на оси

источника внутри анода-2 в диапазоне от 0.02 до 1.3 Т, при длительности импульса тока намагничивания 2 мс. Временное согласование магнитного поля со временем запуска источника проведено по максимуму ионного тока на выходе источника. При этом задержка запуска ионного источника относительно максимума импульса тока в катушке составила 240 мкс. Измерение задержки между максимум импульса тока в катушке и максимумом магнитного поля в области канала дрейфа дало величину порядка 50 мкс.

Формирование ионного пучка производилось сеточной оптикой с ускоряющим потенциалом 60 кВ.

Измерения зарядового спектра проводились магнитным массанализатором. Параметры анализатора представлены в табл.1.

Для повышения разрешающей способности магнита на его входе установлены две щелевые диафрагмы с шириной щели 2 мм и расстоянием между ними 180 мм. Измерения проведены для диапазона изменения магнитного поля в массанализаторе, соответствующего отклонению частиц с удельной массой от 12 до 80 (от ионов C^{+} до ионов U^{3+}). Ввиду низкой частоты повторений работы источника один цикл измерений занимает по времени 6-8 часов. При этом на каждый шаг магнитного поля проводилось измерение при одном – двух срабатываниях источника.

Таблица 1. Параметры магнитного масс анализатора

Угол поворота	60°
Диапазон изменения индукции магнитного поля	0.1 – 1 Т
Радиус поворота	0.3 м
Минимальный шаг изменения индукции магнитного поля	$3*10^{-4}$ Т
Ширина области однородного поля	0.03 м
Высота зазора	0.02 м

Результаты измерений и их обсуждение

Спектр пучка с током разряда 2.4 кА

В результате предыдущих измерений спектра уранового пучка, генерируемого источником MEVVA с двумя анодами, был выявлен рост зарядности пучка при условии, что в области разряда создается магнитное поле с большим градиентом вдоль оси источника [5]. Было зафиксировано, что при токе разряда 800 А в цепи катод – анод-2 спектр содержит ионы U^{7+}. Кроме того, было высказано предположение, что с ростом тока разряда возможно дальнейшее повышение зарядности генерируемого пучка. В

развитие данной работы проведены измерения зарядового распределения пучка ионов урана при токе разряда 2.4 кА в цепи катод – анод-2.Результат измерений представлен на рис.2. В спектре отчетливо идентифицируются пики ионов урана с зарядностью от U^{3+} до U^{8+}. Кроме того, спектр содержит пики соответствующих перезарядок ионов пучка. Причем для ионов урана восьмой и седьмой зарядности присутствуют пики, соответствующие потере двух зарядов (см. рис.2).

Отличное от колоколообразного распределение амплитуд для ионов урана объясняется двумя причинами. Во-первых, примененной методикой измерений, при которой амплитудное распределение измеренных пиков существенно зависит от нестабильности работы источника. Как уже говорилось выше, на каждый шаг магнитного поля проводилась регистрация тока пучка, дошедшего до детектора за один – два посыла источника. При этом фиксировалось максимальное значение измеряемого импульса тока на токоприемнике. Максимум регистрируемого пика ионов определенной зарядности приходит на 2 – 3 шага изменения магнитного поля. Принимая во внимание известную нестабильность от импульса к импульсу источника MEVVA как по току, так и по зарядовому распределению, становится очевидным, что наблюдаемое не колоколообразное распределение ионов урана по зарядовым состояниям может быть обусловлено выбранной методикой измерений, не учитывающей нестабильность от импульса к импульсу генерируемого пучка как по току, так и по зарядовому распределению.

Во-вторых, зарядовое распределение в генерируемом пучке может существенным образом изменяться в течение импульса. При этом фиксация при измерениях максимального значения за весь импульс тока приводит к тому, что на результирующем графике амплитуды разных пиков могут соответствовать различным временным отрезкам в течение импульса тока пучка, с различным распределением по зарядам.

Изменение зарядового спектра в течение импульса тока

Как уже говорилось выше, применяемая методика измерения зарядового спектра, обусловленная необходимостью проведения измерений за разумные временные сроки, имеет тот недостаток, что возможно искажение количественных соотношений между пиками измеряемых зарядовых состояний. Для устранения данного эффекта проведены измерения зарядового распределения пучка ионов урана с набором статистики на каждый шаг изменения магнитного поля. При работе с частотой повторения один выстрел за восемь секунд и наборе статистики, хотя бы по десять посылок источника на каждый шаг, одно полное измерение зарядового распределения требовало бы нереальных временных затрат. Однако провести такие измерения только для ионов урана, исключив из измерений ионы перезарядки и ионы

остаточного газа, представляется целесообразным для получения амплитудного распределения ионов пучка по зарядам. Измерения на магнитном массанализаторе, в отличие от время пролетных измерений, не позволяют в деталях проследить, как меняется зарядовое распределение пучка ионов за время импульса. Но, как оказалось, если разбить длительность импульса тока пучка на две половины и регистрировать отдельно амплитуды для начальной и конечной половин, то можно сделать выводы о динамике изменения зарядового распределения в течение импульса тока.

Таблица 2. Процентное содержание ионов (по электрическому току) урана различной зарядности в начале и конце импульса тока пучка

ионы	Начало импульса, %	Конец импульса, %
U^{3+}	2.6	39.4
U^{4+}	7.2	30
U^{5+}	17	21
U^{6+}	27.7	6.7
U^{7+}	27.9	2.7
U^{8+}	17.6	-

Результаты измерений с разбивкой импульса тока пучка на две временные области, проведенные с набором статистики, для ионов урана представлены на рис.3 (начало импульса тока) и рис.4 (конец импульса тока). Табл. 2 отображает процентное содержание ионов урана различной зарядности в начале и конце импульса тока пучка. При расчетах процентного содержания для нерегистрируемых пиков U^{2+} и U^{+} предполагалось, что их амплитуда равна амплитуде пика U^{3+}. В этом случае, из характера распределения измеренных пиков следует, что для ионов в начале импульса можно говорить, что их "не менее" приведенных величин, а для ионов в конце импульса, что их "не более" приведенных величин.

Предложенная методика позволила устранить не колоколообразное распределение по амплитудам ионов разной зарядности. Для начала пучка максимум распределения приходится на пики U^{6+} и U^{7+}. Измерения пика, соответствующего ионам U^{9+}, не проводились, ввиду сложности надежной идентификации данного пика среди большого числа пиков близкой амплитуды, соответствующих различным ионам остаточного газа. К концу импульса зарядовое распределение принимает вид, близкий к стандартному распределению, характерному для работы источника типа MEVVA с сильноточным вакуумно-дуговым разрядом. На рис.5 представлен спектр, полученный из спектров представленных на рис.3 и рис.4 при условии, что для

каждого значения магнитного поля выбиралось значение тока максимальное из соответствующих значений, представленных на этих двух графиках. Легко видеть, что зарядовое распределение имеет минимум в области ионов U^{5+} , как и на графике полномасштабных измерений (см. рис.2). Заметное отличие в амплитуде пика U^{3+} на рис.5 от соответствующего пика на рис.2 объясняется исключительно нестабильностью работы источника. Косвенным подтверждением этому является сильно изрезанная форма данного пика на рис.2. Насколько существенно влияние нестабильности генерируемого пучка по току и распределению по зарядностям хорошо видно из рис.6. На данном рисунке показано, как бы выглядели зарядовые спектры, если из данных, полученных в ходе измерений с набором статистики, выбрать только максимальные и только минимальные значения. Т.е. данный график можно рассматривать как диапазон возможных значений. Очевидно, что при таком разбросе возможных амплитуд, без набора статистики невозможно говорить о каких-либо количественных соотношениях между ионами различной зарядности. Интересно отметить, что для ионов урана с зарядом выше U^{3+} максимум распределения все равно приходится на ионы U^{7+}.

Помимо пиков, соответствующих ионам урана, так же для двух временных областей измерялся пик, соответствующий ионам водорода. Присутствие данного пика в обоих спектрах практически с одинаковой амплитудой позволяет утверждать, что присутствие ионов более высокой зарядности только в начале пучка не может быть объяснено эффектом разделения ионов в канале дрейфа источника за счет больших скоростей у ионов с меньшей удельной массой.

Измерения магнитного поля вдоль оси источника

Поскольку в работе [5] была выявлена зависимость зарядового распределения пучка ионов от конфигурации магнитного поля вдоль источника, нами было проведено измерение аксиальной составляющей данного поля в области от катода источника и до места, где поле катушки SDC достигает своего максимального значения. Результаты измерений представлены на рис.7. На рисунке указаны места расположения катода, анода-1 и анода-2. Как следует из результатов измерений, поле в области разряда не превышает 5 % (0.02 – 0.05 Т) от максимального значения магнитного поля, достигаемого в центре катушки. При этом поле в области катода меньше поля в области второго анода в 1.7 раза. Резкое нарастание магнитного поля происходит уже внутри анода-2, на расстоянии около 5 см от его торца. Такое распределение поля позволяет предположить, что в данной конструкции в области анода-2 магнитное поле имеет заметную радиальную составляющую и реализуется разряд в скрещенных магнитном и электрическом полях. Как известно из теории плазмы, в этом случае проводимость плазмы становится анизотропной и ее величина поперек

магнитного поля заметно снижается. За счет этого возможно повышение падения напряжения на разряде и, как следствие, смещение зарядового распределения генерируемого пучка в область более высоких зарядов. Кроме того, такое распределение магнитного поля может обуславливать как сильное сжатие дрейфующей плазмы, так и магнитную экстракцию ионов из плазмы. Оба эти механизма также могут вызвать смещение зарядового распределения генерируемого пучка в сторону больших зарядовых состояний.

Необходимо отметить, что установка дополнительной катушки, создающей в области разряда встречное магнитное поле по отношению к полю от катушки SDC, приводит к появлению пробоев между анодом и поджигающим электродом по поверхности внешнего изолятора, разделяющего эти два электрода. Вскрытие источника выявило, что при таком включении магнитных полей поверхность данного изолятора быстро покрывается тонкой пленкой распыляемого материала катода, которая и закорачивает эти два электрода между собой.

Выводы

В результате проведенных работ подтверждена возможность повышения зарядности генерируемого источником типа MEVVA ионного пучка при работе в режиме двух анодов с резко нарастающим магнитным полем. Зафиксировано, что при токе разряда 2.4 кА в цепи катод – анод-2 в извлекаемом из источника пучке ионов урана содержатся около 17 % ионов U^{8+}. При этом максимум распределения приходиться на ионы U^{6+} и U^{7+}. Проведенное исследование изменения зарядового спектра по длительности ионного пуча показало, что начало пучка содержит ионы более высокой зарядности. К концу импульса происходит понижение как максимально зафиксированного зарядового состояния, так и перераспределение амплитуд в пользу низких зарядностей. Так в конце импульса полностью отсутствуют ионы U^{8+}.

Дальнейшие исследования будут направлены на выяснение механизма влияния магнитного поля на зарядовое распределение ионов вакуумно-дугового разряда.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Ady Hershcovich (BNL США) за поддержку данной работы, а также Е.М. Оксу и Л.Б. Баграмбекову за ряд ценных замечаний, высказанных при обсуждении результатов данной работы.

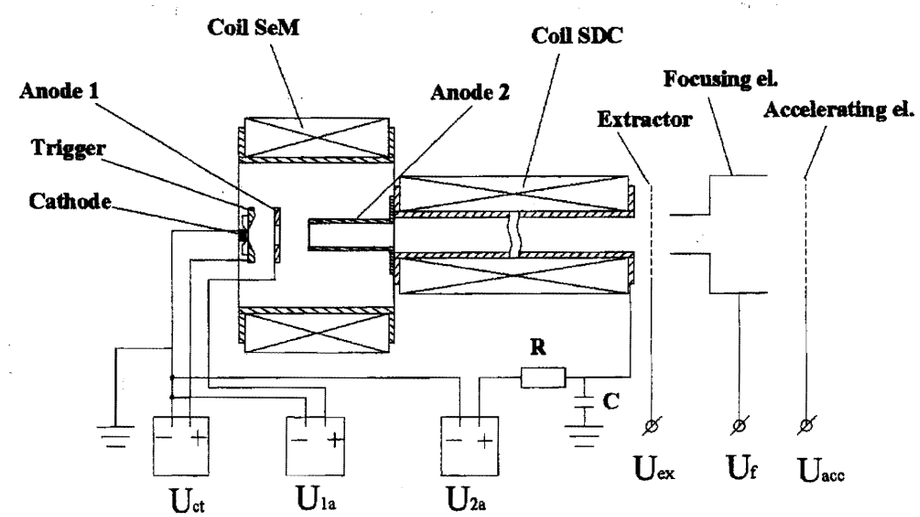

Рис. 1. Источник MEVVA с двумя анодами.

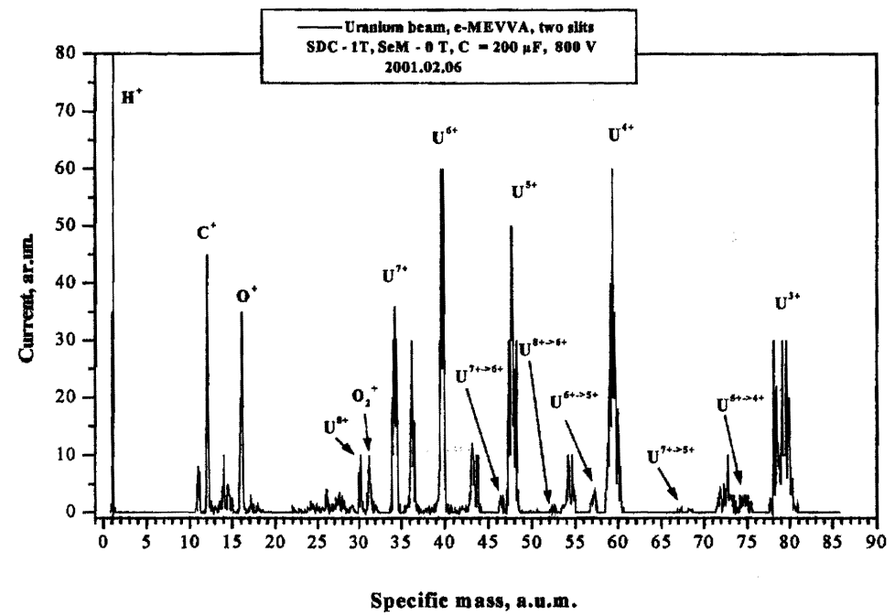

Рис. 2. Спектр пучка ионов урана при емкости на канале дрейфа 200 мкФ и напряжении на ней 800В. Магнитное поле в канале дрейфа - 1 Т. Катушка, обеспечивающая магнитное поле в области разряда - выключена.

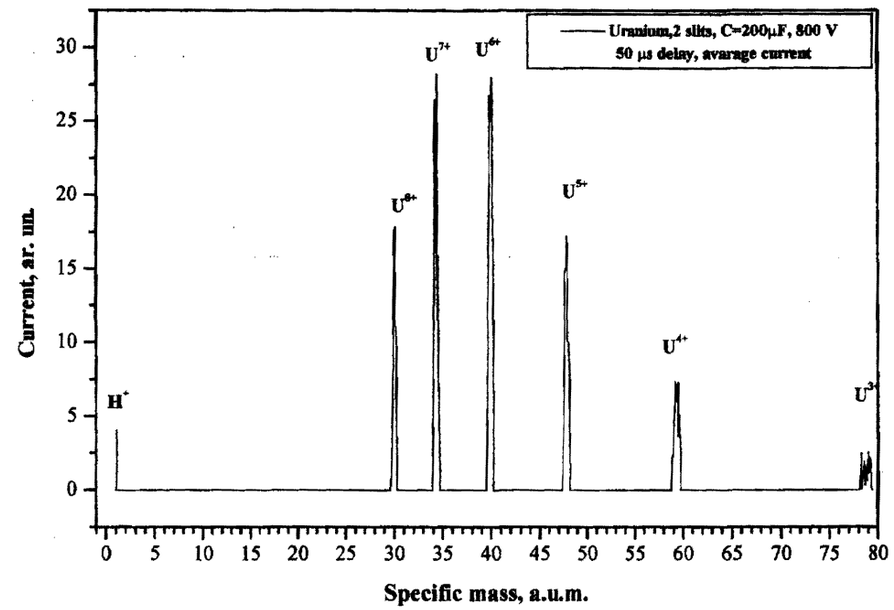

Рис. 3. Результат измерения спектра пучка ионов урана с набором статистики на каждый шаг магнитного поля (первая половина пучка). $C_{кд}$ = 200 мкФ, U_c = 800В, магнитное поле в канале дрейфа – 1 Т.

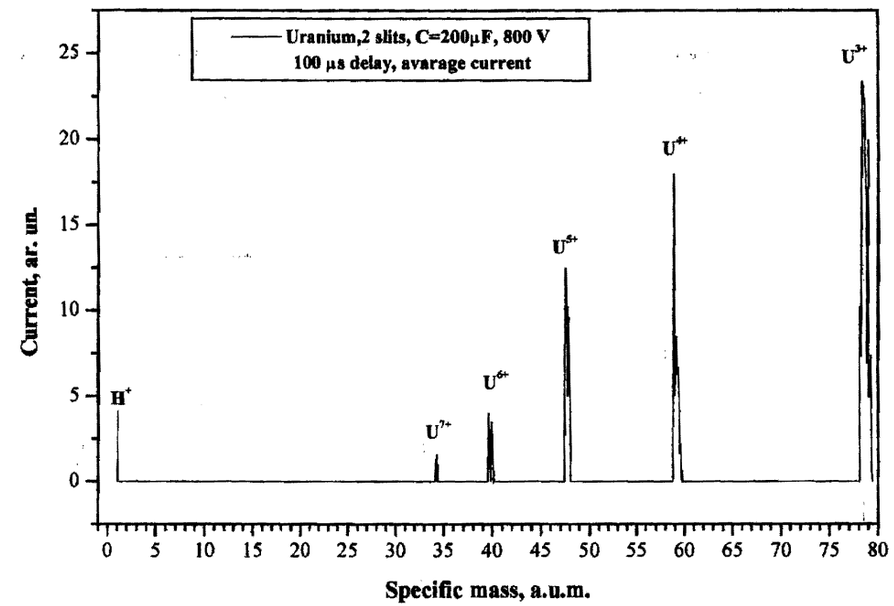

Рис. 4. Результат измерения спектра пучка ионов урана с набором статистики на каждый шаг магнитного поля (Вторая половина пучка). $C_{кд}$ = 200 мкФ, U_c = 800В, магнитное поле в канале дрейфа – 1 Т.

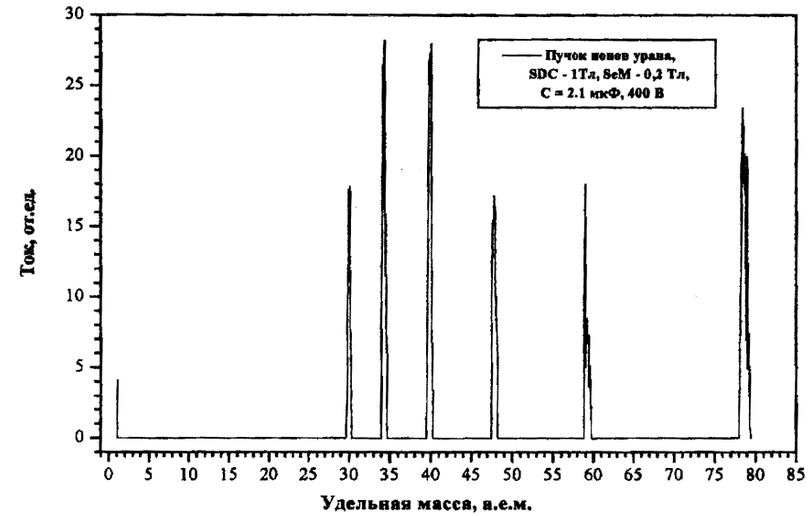

Рис. 5. Спектр, составленный выборкой максимальных значений из данных представленных на рис.3 и 4.

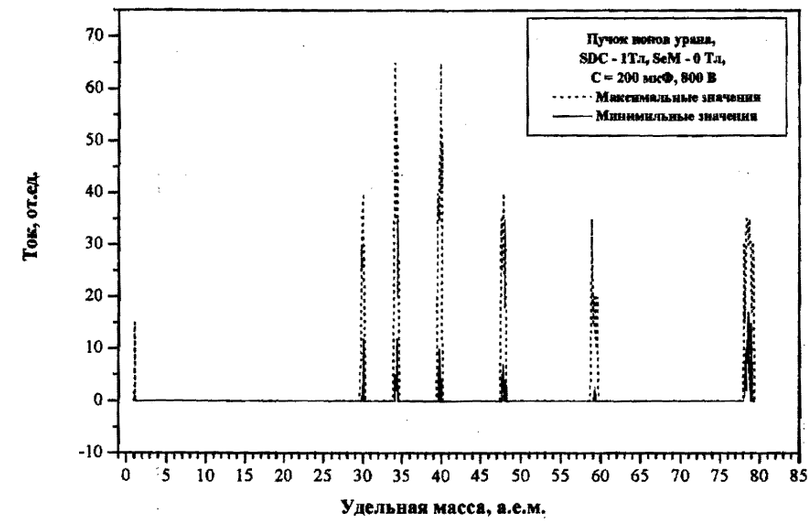

Рис. 6. Спектры пучка ионов урана построенные по максимальным и минимальным значениям измеренного сигнала при наборе статистики (ток разряда – 2.4 кА, магнитное поле в канале дрейфа – 1 Т).

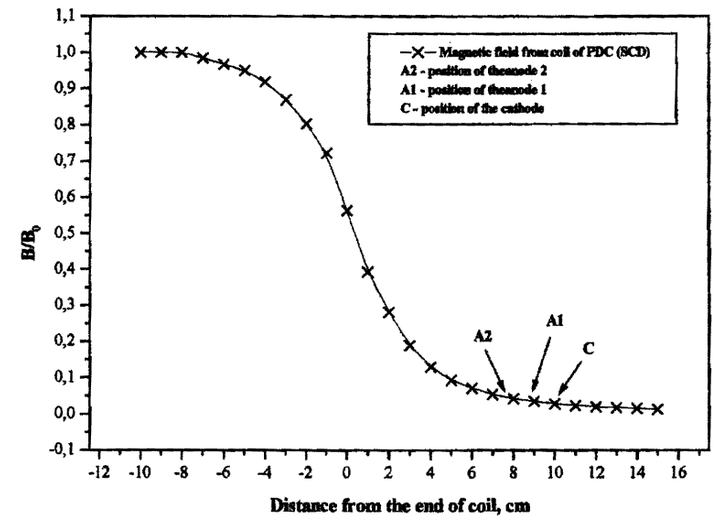

Рис.7. Распределение магнитного поля вдоль оси источника MEVVA-M, создаваемого катушкой SDC.

Литература

[1] Баталин В.А., Васильев А.А., Волков Ю.Н., Кулевой Т.В., Петренко С.В. Источник тяжелых малозарядных ионов с вакуумной дугой. // Вопросы Атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. (Теория и эксперимент). 1989г., Вып. 5(5), Стр. 98-100.

[2] V.Batalin, Y. Volkov, T. Kulevoy, S.Petrenko. "Vacuum Arc Ion Source for the ITEP RFQ Accelerator"// Rev. Sci. Inst. 65(10), P. 3104 – 3108 (Oct.1994)

[3] V.Batalin, Y. Volkov, T. Kulevoy, S.Petrenko "Producing of the High Charged Ions by the Modification of the MEVVA Ion Source"// Proceedings of EPAC-94 P.1560-1562

[4] V.Batalin, Y. Volkov, T. Kulevoy, S.Petrenko "The E-MEVVA Ion Source for High Charged Uranium Ions Generation".// Proceedings of LINAC-94 P.390-392

[5] Т.В. Кулевой, Р.П. Куйбида, С.В. Петренко, Д.К. Селезнев, В.И. Першин, В.А. Баталин, А.А. Коломиец. "Повышение зарядности пучка ионов урана в источнике MEVVA" М., Препринт ИТЭФ, 2001г., № 6.