



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»**

Препринт 2025–5

Ю.А. Буданов, Б.А. Фролов

**Моделирование динамики ионов углерода и
оптимизация системы экстракции и транспортировки
пучка из лазерного источника с учетом ионов
различного заряда**

Направлено в *Письма в ЭЧАЯ*

Протвино 2025

Аннотация

Ю.А. Буданов, Б.А. Фролов. Моделирование динамики ионов углерода и оптимизация системы экстракции и транспортировки пучка из лазерного источника с учетом ионов различного заряда. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2025–5. – Протвино, 2025. – 13 с., 13 рис., 3 табл., библиогр.: 14.

В ИФВЭ рассматривается проект типового комплекса лучевой углеродной терапии. При расчете системы транспортировки и согласования пучка после лазерного источника рассмотрена динамика пучка, содержащего одновременно ионы углерода третьей и четвертой зарядности. В случае многокомпонентного пучка и с учетом кулоновского взаимодействия проведение согласования пучка с ускорителем по параметрам Твисса явно не достаточно. Для оценки качества согласования параметров системы согласования каждый пучок моделировался в канале RFQ. В результате оптимизации удалось получить захват в RFQ 97% для ионов четвертой зарядности.

Abstract

Budanov Yu.A., Frolov B.A. Simulation of carbon ion dynamics and optimization of the beam extraction and transportation system from a laser source, taking into account ions of various charges. NRC «Kurchatov Institute» IHEP Preprint 2025–5. – Protvino, 2025. – p. 13, fig. 13, tables 3, refs.: 14.

At IHEP, a for a typical complex of carbon radiation therapy is being considered. When calculating the beam transportation and matching system after the laser source, the dynamics of a beam containing both third- and fourth-charge carbon ions was considered. In the case of a multicomponent beam and taking into account the Coulomb interaction, matching the beam with the accelerator using the Twiss parameters is clearly not enough. To estimate the quality of matching the parameters of the matching system, each beam was modeled in the RFQ channel. As a result of optimization, it was possible to obtain 97% capture in RFQ for fourth-charge ions.

Введение

На площадке НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ в Протвино в настоящее время проводятся работы по созданию экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии на действующем ускорительном комплексе У-70 (Луч У-70). В качестве перспективной разработки в ИФВЭ рассматривается проект создания прототипа отечественного типового клинического центра ионной углеродной терапии (Луч ТИП) [1]. В данной работе для проекта Луч ТИП рассматривается система транспортировки и согласования пучка ионов с ускорителем после источника ионов.

В проекте луч ТИП пучок ионов углерода должен ускоряться в каскаде из линейного ускорителя на энергию 8 МэВ/нуклон (C^{4+} до выхода из перезарядной мишени) и сильнофокусирующего синхротрона КИТ (Курчатовский комплекс ионной лучевой терапии) на энергию ионов C^{6+} в пределах от 150 до 430 МэВ/нуклон. Линейный ускоритель должен обеспечить на выходе импульсный ток ускоренных ионов C^{4+} не менее 1 мА при длительности импульса тока от 10 до 15 мкс. В качестве первой секции линейного ускорителя предполагается использовать RFQ.

Для получения высокозарядных ионов углерода предлагается использовать лазерный источник ионов, способный генерировать плазму с высокой температурой [2,3]. Предполагаемые параметры работы импульсного CO_2 лазера – максимальная частота импульсов 0.5 Гц, энергия в импульсе до 6 Дж, предельная плотность потока излучения в центре мишени до 10^{11} Вт/см². Длительность образования многозарядных ионов составляет несколько десятков наносекунд. Пучок с необходимой для дальнейшего использования длительностью в микросекундном диапазоне формируется на дрейфовом

промежутке длиной, как правило, около одного метра от точки фокусировки лазерного излучения на мишени до плоскости экстракции. В этом промежутке в ходе разлета лазерной плазмы наблюдается значительный рост поперечного фазового объема ионов плазмы в процессе их взаимодействия с электронами, но несмотря на увеличение фазового объема, он, тем не менее, остается достаточно малым для применения в качестве источника ионов для ускорителей [4]. Многочисленные экспериментальные исследования в ОИЯИ, ИТЭФ и ИФВЭ показали, что пучок имеет сложную временную и зарядовую структуру [2,3,5-7]. Соотношение ионов с разным зарядом Z определяется в первую очередь температурой плазмы, которая существенно зависит от плотности мощности лазера на мишени. В течение импульса меняется профиль и интенсивность пучка с данным зарядом, а также соотношение между токами для ионов с разными Z . С точки зрения стабильности и величины тока, наибольший интерес представляют ионы с зарядом $Z=4$ [3,5-7]. В начальной части импульса тока основную часть составляют ионы с зарядом $Z=5$ и $Z=4$, затем в пучке преобладающими становятся ионы с зарядом $Z=4$ и значительную долю ($\sim 35\% \div 50\%$) составляют ионы с зарядом $Z=3$ [5-7]. Численные расчеты динамики ионов при моделировании проводились для двух соотношений ионов C^{4+} и C^{3+} в пучке ($65\% C^{4+} + 35\% C^{3+}$ и $50\% C^{4+} + 50\% C^{3+}$).

На рис. 1 изображена схема канала инжекции. При падении луча лазера на мишень рождается углеродная плазма. Плазма после дрейфа поступает в ионно-оптическую систему (ИОС), в ИОС из плазмы выделяется пучок ионов углерода и ускоряется при напряжении 100 кВ. Затем пучок поступает в систему согласования, состоящую из системы дрейфов с двумя соленоидами.

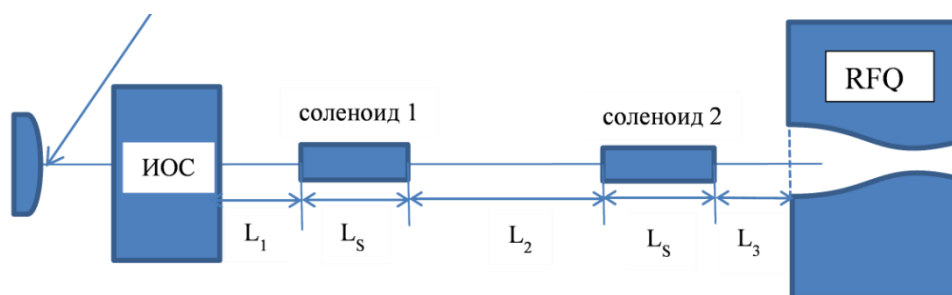


Рис. 1. Схема канала инжекции ионов углерода в RFQ с ИОС и системой согласования.

Пакет 3D программ IBSimu (Ion Beam Simulation) [8] с хорошей точностью описывает экспериментальные результаты [9,10] и применялся при моделировании рассматриваемой системы извлечения ионов из плазмы и транспортировки пучка. При расчетах ИОС вытягивания ионов из плазмы учитывались экспериментальные данные [3] по эмиттансу и плотности тока углеродного пучка для лазерного источника.

ИОС вытягивания ионов из плазмы и ускорения пучка при напряжении 100 кВ

Продольная и поперечная энергии ионов после их вытягивания из плазмы задают начальные условия для динамики пучка в ионно-оптической системе (ИОС). Ионно-оптические характеристики пучка на входе в ИОС существенно зависят от температуры поперечного движения ионов T . Температуру поперечного движения ионов в пучке можно оценить с помощью формулы для нормализованного 4 – rms эмиттанса пучка [11]:

$$\varepsilon_{n,4rms} = 0.0653r(kT/A)^{1/2} \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}, \quad (1)$$

где r - радиус отверстия эмиссии (мм), $k=8.617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана, A – массовое число иона. В работе [3] приведено определенное из эксперимента значение 4-rms эмиттанса $\varepsilon_{4rms} \approx 300 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ (при напряжении экстракции 50 кВ, радиусе отверстия эмиссии 10 мм, пиковой плотности тока $\sim 10 \text{ мА/см}^2$ и при преобладающем числе ионов C^{4+}), что соответствует по (1) значению $kT \approx 100$ эВ.

При моделировании динамики ионов начальная плотность тока на границе плазмы полагалась постоянной при максвелловском распределении по скоростям в поперечной плоскости с $kT=100$ эВ. Вычисления проводились для плотности тока 10 мА/см^2 при радиусах отверстия эмиссии $r=5 \div 7$ мм, например, при $r=6$ мм по (1) начальный нормализованный среднеквадратичный эмиттанс пучка составлял $\varepsilon_{n,rms}=0.28 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. В дальнейшем в размерности эмиттанса число π не указывается. Общее число частиц обоих зарядов на границе плазмы 100 000.

Ввиду нестационарности плазменного потока для фиксации границы плазмы в плоскости плазменного электрода устанавливается сетка. При расчетах были рассмотрены два варианта ИОС: экстракция ионов из плазмы осуществляется с помощью двухсеточного плазменного диода (на выходе из диода кинетическая энергия продоль-

ного движения ионов C^{4+} $E_{kin}=20\,000$ эВ и ионов C^{3+} $E_{kin}=15\,000$ эВ) и из эмиссионного отверстия, закрытого сеткой ($E_{kin}=1000$ эВ). Для случая эмиссионного отверстия рассматривались и другие варианты E_{kin} , в частности $E_{kin}=500$ эВ, что практически не влияло на параметры пучка на входе в RFQ.

На рис. 2 и рис. 3 изображена ИОС с плазменным диодом и с эмиссионным отверстием. Для плазменного диода было рассмотрено три варианта для расстояния между сетками: 5, 7.5 и 10 мм. Условие фиксации границы плазмы на первом сеточном электроде для плазменного диода

$$j_{in} \leq j_{CL} = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2q}{m}} \frac{U^{3/2}}{d^2} \quad (2)$$

где j_{in} – плотность тока из плазмы, j_{CL} – ограничение Чайлда-Ленгмюра, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, q и m – заряд и масса иона, соответственно, U – напряжение между сетками, d – расстояние между сетками. При $U=5$ кВ и $d=5\div 10$ мм условие (2) выполняется. ИОС была исследована численно для разных расстояний между электродами и нескольких значений их радиусов. На рис. 2,3 показан пучок ионов углерода в ИОС, схема экстракции и эквипотенциали электрического поля. Электрод с отрицательным потенциалом предназначен для отсеечения паразитных электронных потоков.

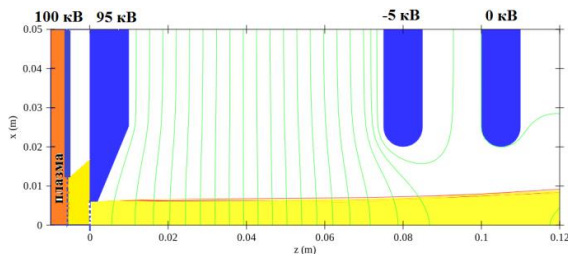


Рис. 2. Экстракция ионов углерода для плазменного диода.

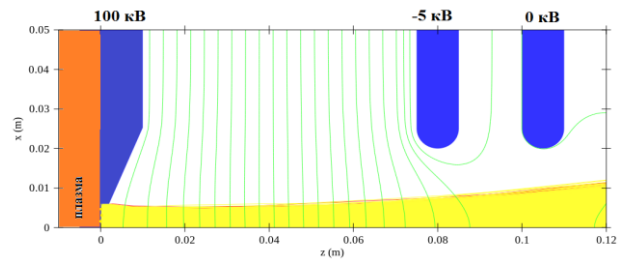


Рис. 3. Экстракция ионов углерода для эмиссионного отверстия.

На рис. 4 и рис. 5 изображены, соответственно, расчетный фазовый портрет и профиль пучка на выходе ИОС в варианте с плазменным диодом при расстоянии между сетками 7.5 мм. Все приведенные ниже рисунки, получены для соотношения ионов в плазме 65% C^{4+} и 35% C^{3+} при радиусе отверстия эмиссии $r=6$ мм.

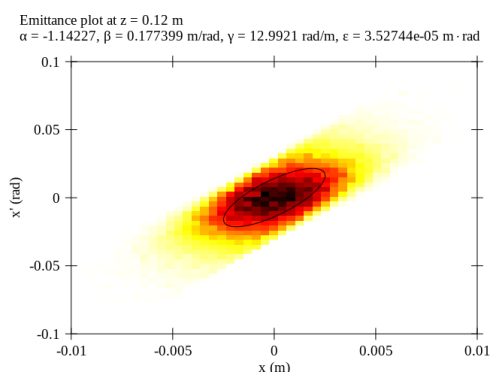


Рис. 4. Фазовый портрет пучка ионов углерода на выходе ИОС для плазменного диода.

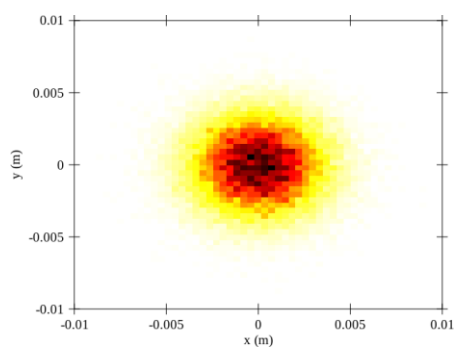


Рис. 5. Профиль пучка ионов углерода на выходе ИОС для плазменного диода.

На рис. 6 и рис. 7 приведены фазовый портрет и профиль пучка на выходе ИОС при вытягивании ионов из эмиссионного отверстия закрытого сеткой.

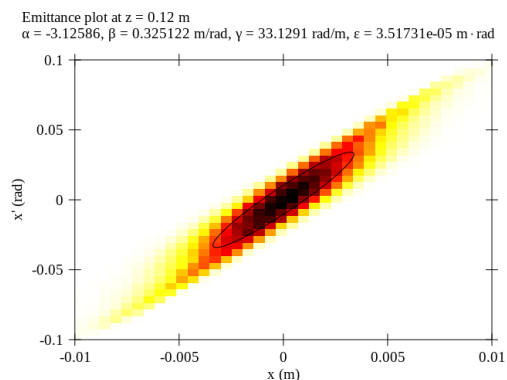


Рис. 6. Фазовый портрет пучка ионов углерода на выходе ИОС при экстракции ионов из эмиссионного отверстия с сеткой

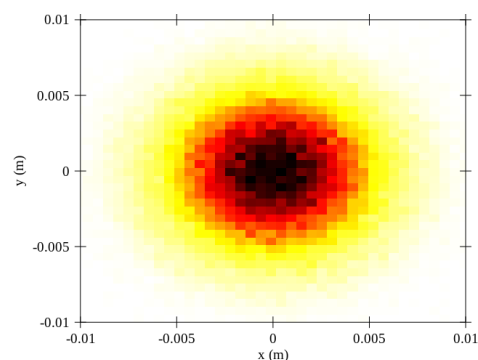


Рис. 7. Профиль пучка ионов углерода на выходе ИОС при экстракции ионов из эмиссионного отверстия с сеткой

Результаты расчетов среднеквадратичных эмиттансов ϵ_{rms} и импульсных токов I ионов C^{4+} на выходе ионно-оптической системы при вытягивании пучка из плазменного диода и экстракции из эмиссионного отверстия для радиусов входного отверстия $r=5\div 7$ мм приведены в таблице 1. При расчетах учитывалось, что прозрачность для двухсеточного плазменного диода будет на несколько процентов ($\approx 6\%$) меньше, чем для эмиссионного отверстия.

Таблица 1. Эмиттанс ϵ_{rms} и ток I пучков ионов углерода C^{4+} на выходе ИОС.

r, мм	Плазменный диод		Эмиссионное отверстие	
	ϵ_{rms} , м·рад	I , мА	ϵ_{rms} , м·рад	I , мА
5	$2.94 \cdot 10^{-5}$	4.61	$2.85 \cdot 10^{-5}$	4.89
6	$3.53 \cdot 10^{-5}$	6.62	$3.52 \cdot 10^{-5}$	7.11
7	$4.11 \cdot 10^{-5}$	8.98	$4.22 \cdot 10^{-5}$	9.75

Величина импульсного тока вполне достаточна для рассматриваемого проекта, в других случаях для получения большего тока необходимо увеличивать мощность лазера, однако плотность мощности лазера на мишени не должна быть очень большой, чтобы не генерировать ионы с высокой поперечной температурой. В то же время ионный источник должен создавать в достаточном количестве ионы с зарядом $Z=4$. Проведенные в [12,13] эксперименты показывают, что плотность тока ионов углерода C^{4+} в плоскости вытягивания можно повысить без увеличения мощности лазера, прикладывая продольное магнитное поле на дрейфовом промежутке.

Проведенное моделирование ИОС вытягивания ионов C^{4+} из плазмы показало существенную зависимость ионно-оптических характеристик пучка и величин средне-квадратичного эмиттанса на выходе ИОС от поперечной температуры ионов в пучке. При увеличении вдвое величины kT эмиттанс возрастает примерно в полтора раза. Прозрачность эмиссионного отверстия с сеткой на несколько процентов будет больше, чем для двухсеточного плазменного диода, и, соответственно, будут меньше потери пучка, но при этом на выходе ИОС огибающие пучка для варианта плазменного диода меньше (см. рис. 2,3). Проведенные работы привели к формированию базы данных для пучков, используемых в дальнейшем для построения и оптимизации согласующей системы для канала инжекции ионов углерода в линейный ускоритель.

Моделирование и оптимизация канала согласования пучка с линейным ускорителем

Согласующий канал состоит из двух соленоидов (рис. 1), чтобы обеспечить две степени свободы для согласования пучка со входом RFQ. Моделирование проводилось с помощью пакета программ IBSimu. Программа IBSimu позволяет рассчитывать толь-

ко электростатические поля. Поля соленоидов рассчитывались с помощью программы ANSYS и полученные данные магнитных полей использовались в IBSimu.

Моделирование согласующего канала проводилось для двух вариантов ИОС вытягивания ионов из плазмы. Фазовые координаты пучка на входе в согласующий канал были взяты из расчета ИОС. Энергия ионов C^{4+} на входе в канал согласования 100/3 кэВ/нуклон и 100/4 кэВ/нуклон для ионов C^{3+} . Критерием выбора оптимальных параметров согласующего канала была минимизация роста эмиттанса в канале согласования и получение параметров Твисса на входе в RFQ, для которых достигается максимальный захват пучка в режим ускорения и минимальный рост эмиттанса в ускорителе. На захват пучка в режим ускорения и минимальный рост эмиттанса в RFQ существенное влияние оказывает распределение заряда по сечению пучка на выходе согласующего канала [14]. Поскольку параметры Твисса не отражают характера распределения заряда в пучке, то в качестве окончательного критерия качества согласования пучка из системы инжекции с ускорителем были использованы результаты расчета динамики пучка в RFQ. Расчеты динамики исследуемых пучков в RFQ проводились для различных вариантов параметров согласующей системы, здесь будет приведен один из наиболее оптимальных вариантов. Вычисления проводились при разных значениях полей соленоидов. Расчеты показали, что для согласования пучка с RFQ расстояние между вторым соленоидом и входом в ускоритель должно составлять не более $7 \div 10$ см. На такой длине нельзя разместить корректоры. Минимальное расстояние между вторым соленоидом и входом в ускоритель, определяемое конструктивными особенностями, не менее 7 см (толщина фланца трубы соленоида ≈ 1 см, толщина фланца RFQ с затвором и датчиком тока - $3 \div 4$ см, зазор между фланцем RFQ и согласователем RFQ - 1 см). Для размещения между соленоидами двух корректоров и системы оперативной диагностики пучка расстояние между соленоидами было увеличено с 50 см до 60 см.

Для параметров согласующего канала с минимальным эмиттансом на выходе канала на рис. 8-11 приведены результаты моделирования динамики ионов в канале согласования. Радиус отверстия эмиссии $r=6$ мм, для плазменного диода расстояние между сеткам 7.5 мм.

В таблицах 2,3 приведены результаты вычислений характеристик пучка для ряда значений полей соленоидов с наименьшим ростом эмиттанса в согласующем канале,

радиус вытягивающего электрода ионного источника $r=6$ мм. В таблицах указаны: параметры Твисса (α , β), величина среднеквадратичного эмиттанта ϵ_{rms} , значения полей соленоидов B_1 и B_2 , ток ионов $I_{C^{4+}}$ на выходе канала согласования, расстояние L_3 от второго соленоида до входа в RFQ (для случая плазменного электрода расстояние между сетками 7.5 мм).

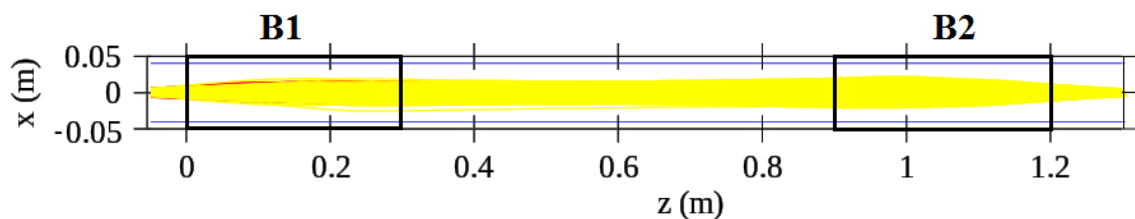


Рис. 8. Пучок в канале согласования при экстракции из двухсеточного плазменного диода ($B_1=0.899$ Тл, $B_2=0.899$ Тл).

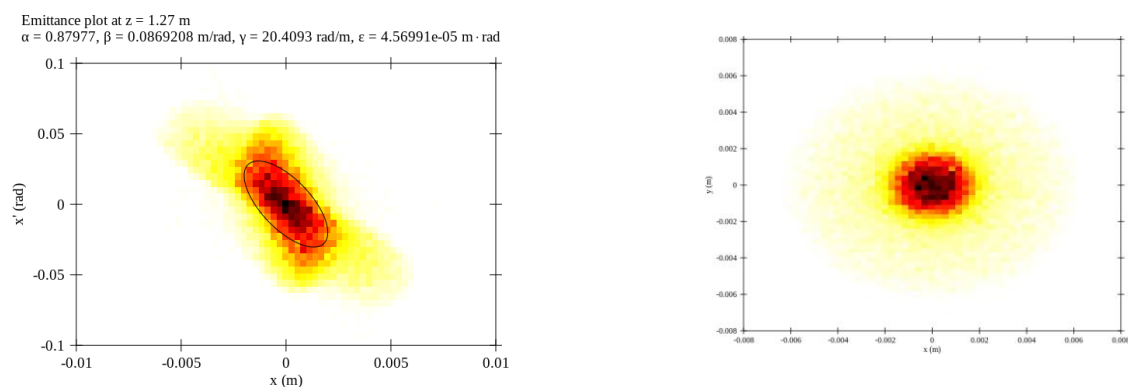


Рис. 9. Фазовый портрет и профиль пучка на выходе канала согласования при экстракции из двухсеточного плазменного диода ($B_1=0.899$ Тл, $B_2=0.899$ Тл).

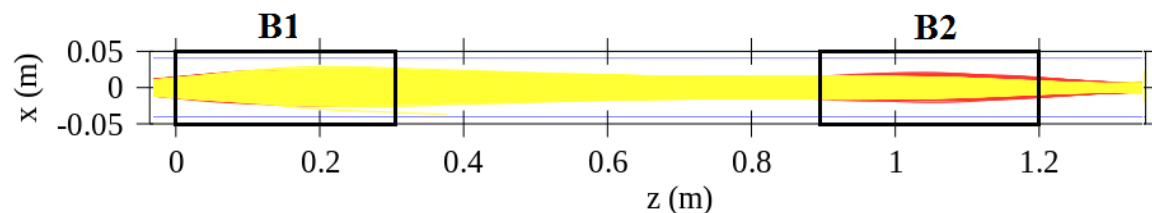


Рис. 10. Пучок ионов углерода в канале согласования при экстракция из эмиссионного отверстия, закрытого сеткой ($B_1=0.871$ Тл, $B_2=0.899$ Тл).

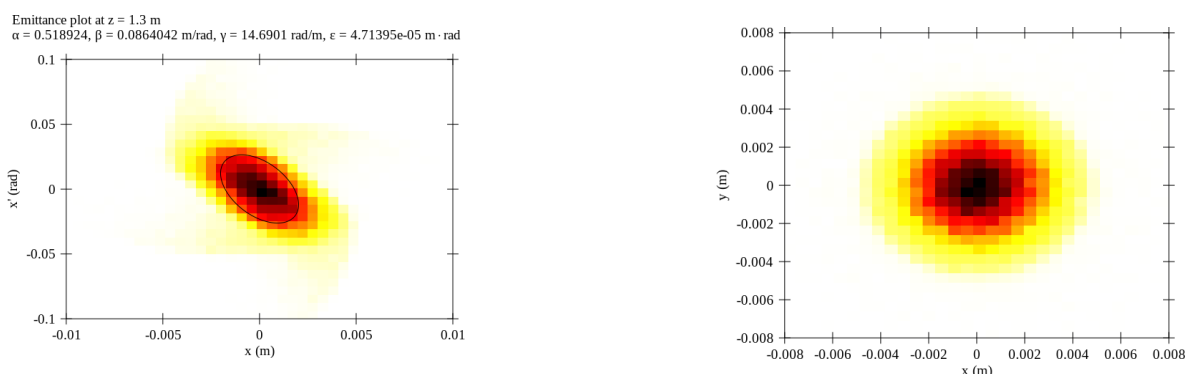


Рис. 11. Фазовый портрет и профиль пучка на выходе канала согласования при экстракции из эмиссионного отверстия, закрытого сеткой ($B_1=0.871$ Тл, $B_2=0.899$ Тл).

Таблица 2. Параметры пучка на выходе согласующего канала при экстракции ионов с помощью двухсеточного диода при расстоянии между сетками 7.5 мм.

B_1 , Тл	B_2 , Тл	L_3 , см	α	β , м/рад	ϵ_{rms} , м · рад	$I_{C^{+4}}$, мА
0.844	0.855	7	1.04	0.116	$5.11 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.844	0.855	10	0.457	0.071	$5.12 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.844	0.871	7	0.872	0.092	$5.16 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.844	0.871	10	0.256	0.0583	$5.19 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.855	0.871	7	0.930	0.0997	$4.97 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.855	0.871	10	0.324	0.0619	$4.99 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.871	0.871	7	1.02	0.111	$4.73 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.871	0.871	10	0.427	0.068	$4.74 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.871	0.899	7	0.729	0.0754	$4.81 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.871	0.899	10	0.071	0.0512	$4.84 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.899	0.899	7	0.88	0.087	$4.57 \cdot 10^{-5}$	6.62
0.899	0.899	10	0.22	0.054	$4.58 \cdot 10^{-5}$	6.62

Таблица 3. Параметры пучка на выходе согласующего канала при экстракции ионов из эмиссионного отверстия, закрытого сеткой.

B_1 , Тл	B_2 , Тл	L_3 , см	α	β , м/рад	ϵ_{rms} , м · рад	$I_{C^{+4}}$, мА
0,871	0,871	7	1.224	0.1839	$4.74 \cdot 10^{-5}$	7.11
0,871	0,871	10	0.763	0.124	$4.74 \cdot 10^{-5}$	7.11
0,871	0.899	7	1.035	0.133	$4.72 \cdot 10^{-5}$	7.11
0,871	0.899	10	0.5186	0.0864	$4.72 \cdot 10^{-5}$	7.11
0.899	0.899	7	1.088	0.1083	$5.67 \cdot 10^{-5}$	7.08
0.899	0.899	10	0.449	0.0627	$5.64 \cdot 10^{-5}$	7.08
0.844	0.899	7	0.683	0.125	$4.77 \cdot 10^{-5}$	7.11
0.844	0.899	10	0.278	0.0906	$4.78 \cdot 10^{-5}$	7.11
0.844	0.854	7	0.877	0.189	$4.83 \cdot 10^{-5}$	7.11
0.844	0.854	10	0.542	0.146	$4.83 \cdot 10^{-5}$	7.11
0.854	0.871	7	0.99	0.176	$4.68 \cdot 10^{-5}$	7.11
0.854	0.871	10	0.599	0.1285	$4.68 \cdot 10^{-5}$	7.11

Вариант с оптимизированной динамикой в RFQ (коэффициент захвата ионов C^{4+} в режим ускорения 0.97) достигается при использовании плазменного диода и параметров согласующего канала $r=6$ мм, $L_1=5$ см, $L_2=60$ см, $L_3=7$ см, $L_5=30$ см, $B_1=0.899$ Тл, $B_2=0.899$ Тл. Прохождение этого пучка в канале согласования отражено на рис. 8. Покажем на фазовых портретах пучка как варианты с учетом двух типов ионов (C^{4+} и C^{3+}), так и выделим ионы C^{4+} отдельно. На рис. 12 пучок на входе в RFQ (C^{4+} и C^{3+}) и тот же пучок, но показаны только ионы C^{4+} на входе в RFQ. Соответственно на рис.13 пучок на выходе RFQ для ионов C^{4+} и C^{3+} и только ионов C^{4+} .

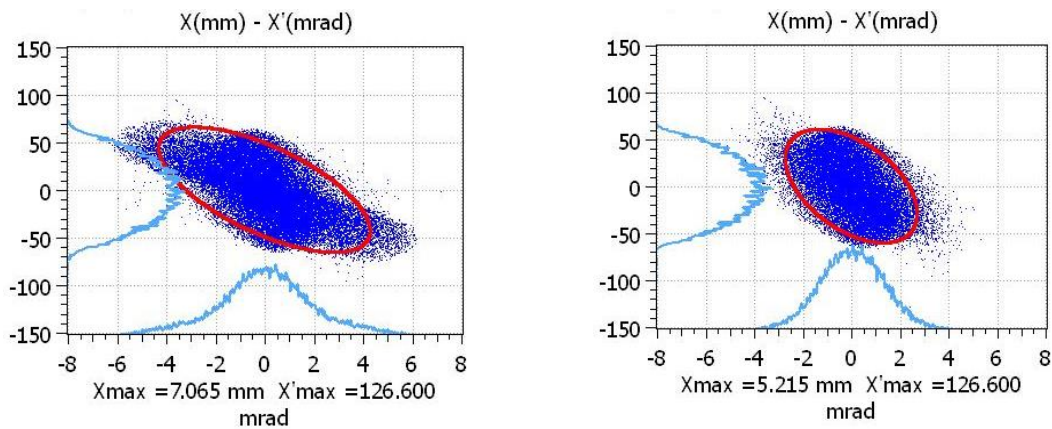


Рис. 12. Фазовый портрет пучка на входе в RFQ с ионами C^{4+} и C^{3+} (слева) и только с ионами C^{4+} (справа)

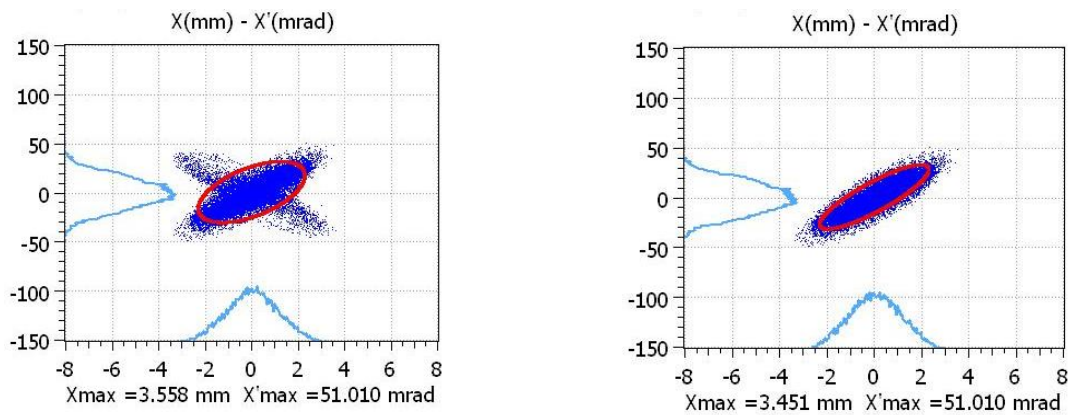


Рис. 13. Фазовый портрет пучка в плоскости (x, x') на выходе из RFQ с ионами C^{4+} и C^{3+} (слева) и с только с ионами C^{4+} (справа).

Заметна большая разница в результатах при введении в расчет «дополнительных» ионов C^{3+} . Существенно различаются как эмиттансы, так и параметры Твисса. Та-

ким образом, при измерениях эмиттансов и параметров Твисса для пучка с ионами C^{4+} и C^{3+} , возможно появление существенной ошибки, т.к. именно величина и ориентация эмиттансов ускоряемых пучков ионов C^{4+} необходима для успешного согласования. Захват в режим ускорения рассмотренного пучка C^{4+} при вытягивании ионов для плазменного диода составляет 97%. Качество согласования этого пучка оценивалось по росту нормализованного эмиттанса в ускорителе. Рост нормализованного эмиттанса 90% пучка не превышает 10%, что является хорошим показателем согласованности пучка из системы инъекции с RFQ. Рассматривалась секция RFQ с частотой 200 МГц и на энергию 0.6 МэВ/нуклон.

В рассматриваемом для ионов C^{4+} случае в номинальном режиме ионы C^{3+} не ускоряются, однако часть из них проходит в канале RFQ (до 20% от их исходного количества) и доходит до выхода из RFQ, что связано с однородностью фокусировки в RFQ. Эти ионы будут отсеяны на первых периодах следующей секции ускорителя, поскольку не попадут в синхронизм с эквивалентной бегущей волной, а фокусировка уже не будет однородной.

Проведенные численные эксперименты при равном количестве ионов C^{3+} и C^{4+} показывают, что доля пучка C^{4+} , захватываемого в режим ускорения в RFQ, меняется незначительно по сравнению с соотношением ионов 65% и 35%. При условии, что в пучке лишь 50% ионов C^{4+} , в рассмотренной системе инъекции можно добиться захвата ионов C^{4+} в режим ускорения в RFQ с захватом более 90%, при наличии в системе инъекции плазменного диода.

Заключение

Параметры пучка на выходе согласующего канала отличаются не очень значительно для двух способов вытягивания ионов из плазмы: экстракция ионов из отверстия, закрытого сеткой или же с помощью двухсеточного плазменного диода. Величина эмиттанса пучка на выходе канала согласования растет с увеличением поперечной температуры ионов углерода в плазме. Параметры Твисса на входе в RFQ можно регулировать, изменяя токи соленоидов. Наиболее критичным параметром, влияющим на захват ионов в режим ускорения и рост эмиттанса в RFQ, является поперечная температура ионов в пучке после экстракции из плазмы.

Рассмотренная схема ИОС, система согласования пучка и полученные параметры пучка позволяют, даже при учете в пучке ионов с другим зарядом, сформировать согласованный с RFQ пучок ионов углерода C^{4+} с малым ростом эмиттанса и с захватом 97% пучка в режим ускорения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.В. Иванов, А.И. Андриянов, А.А. Брагин, А.П. Солдатов, Н.Е. Тюрин «Проекты развития комплекса адронных ускорителей НИЦ КИ – ИФВЭ», Письма в ЭЧАЯ. 21 июня 2024, Т.21, № 3(254). С. 241–247.
2. http://www.ihep.su/files/Journal_2017_Final_2_05_02_2018.pdf. Центр ионной лучевой терапии на базе ускорительного комплекса У-70.
3. B. Sharkov, R. Scrivens «Laser Ion Sources», IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 33, No. 6, December 2005, pp. 1778-1785.
4. С.В. Латышев. Потенциальные возможности лазерной плазмы, производимой излучением CO_2 лазера, как источника высокозарядных ионов. Москва, препринт ИТЭФ, 1984, N2.
5. T. Kulevoy, N. Alexeev, A. Balabaev et al., Characteristics of a Heavy Ion Injector $Z/A > 1/3$ Based on Laser-Plasma Ion Source. Proceeding of 17th International Conference on Ion Sources, AIP Conf. Proc. 2011, 040015-1 – 040015-3.
6. A.A. Losev, A. Balabaev, I. Hrisanov et al., Characteristics of Laser-Plasma Ion Source Based on a CO_2 -Laser for Heavy Ion Accelerators at ITEP, 26th Russian Particle Accelerator Conference, THPSC47, 2018.
7. Ю.А. Сатов, А.В. Шумшуров и др., Влияние металлических сеток на характеристики ионного пучка в лазерно-плазменном источнике, ПТЭ, №1, с. 82-91, 2022.
8. Kalvas T., Tarvainen O., Ropponen T., Steczkiewicz O., Ärje J. and Clark H. IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle Optics. // Rev. of Sci. Instrum., 2010. Vol. 81. Issue 2. 02B703.

9. Kalvas T., Welton R.F., Tarvainen O., Han B.X. and Stockli M.P. Simulation of H-ion source extraction systems for the Spallation Neutron Source with IBSimu. // Rev. of Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. Issue 2. 02A705.
Midttun Ø., Kalvas T., Kronberger M., Lettry J., Pereira H., Schmitzer C. and Scrivens. A new extraction system for the Linac4 H- ion source // Rev. of Sci. Instrum. 2012. Vol.83. Issue 2. 02B710.
10. Valerio-Lizarraga C.A., Lallement J.-B., Leon-Monzon I., Lettry J., Midttun Ø. and Scrivens R. Space Charge Compensation in the Linac4 Low Energy Beam Transport Line with Negative Hydrogen Ions. // Rev. of Sci. Instrum. 2014. Vol.85. Issue 2. 02A505.
11. Я. Браун, Р. Келлер, А. Холмс и др. «Физика и технология источников ионов», Москва, Мир, 1998.
12. Takeshi Kanetsue, Yasuhiro Fuwa, Kotaro Kondo, Masahiro Okamura. Laser ion source with solenoid field.// Appl. Phys. Lett. 2014, Vol.105, Issue 19, 193506.
13. G.C. Wang, H.Y. Zhao, Q.Y. Jin, J.J. Zhang, X.Zh. Zhang, L.T. Sun, H.W.Zhao. Laser Ablation Plasma with Solenoid Field Confinement. // IPAC 2018, TUPML070, pp.1706-1708.
14. Ю. А. Буданов, В. А. Калинин, Б. А. Фролов. Последовательное моделирование динамики ионов Н-минус от источника до выхода из RFQ с поворотом пучка // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 4. С. 20–27.

Рукопись поступила 9 сентября 2025 г.

А. Буданов, Б.А. Фролов.

Моделирование динамики ионов углерода и оптимизация системы экстракции и транспортировки пучка из лазерного источника с учетом ионов различного заряда.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 15.09.2025	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.
Печ.л. 1, 13. Уч.– изд.л. 1,44.	Тираж 68. Заказ 5.	Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2025-5,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2025
