



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

ИФВЭ 2016–11

В.С. Кленов¹, Б.А. Фролов

**Сравнительное исследование систем транспортировки
низкоэнергетичного пучка для ионов Н-минус**

¹ИЯИ РАН, Москва, Россия

Протвино 2016

Аннотация

Кленов В.С., Фролов Б.А. Сравнительное исследование систем транспортировки низкоэнергетического пучка для ионов Н-минус: Препринт ИФВЭ 2016–11. – Протвино, 2016. – 10 с., 8 рис., 2 табл., библиогр.: 10.

В ИФВЭ совместно с ИЯИ разрабатывается источник ионов Н-минус для инъекции в линейный ускоритель ЛУ-30. Для моделирования и оптимизации ионно-оптической системы извлечения пучка из плазмы и его ускорения до энергии 100 кэВ и системы транспортировки и согласования пучка из источника ионов Н-минус в RFQ использовалась трехмерная программа IBSimu. Были исследованы магнитные системы транспортировки низкоэнергетического пучка (LEBT), состоящие из двух соленоидов и из шести квадрупольных линз. В качестве исходных данных для моделирования LEBT были взяты параметры частиц, полученные в результате моделирования системы вытягивания пучка из источника с током 50 мА и энергией 100 кэВ. Конечной целью расчетов было достижение требуемых Твисс-параметров и минимизация роста эмиттанса на входе в RFQ. LEBT, состоящая из двух соленоидов, более удобна в настройке и, как показали результаты моделирования, эта система позволяет получить более приемлемые характеристики пучка в точке согласования по сравнению с LEBT, составленной из квадрупольных линз.

Abstract

Klenov V.S., Frolov B.A. Power supplies for IHEP negative hydrogen ions source: IHEP Preprint 2016–11. – Protvino, 2016. – p. 10, figs. 8, tables 2, refs.: 10.

The source of H-minus ions for the injection in LU-30 accelerator is constructed in IHEP. A three-dimensional ion optical code IBSimu has been utilized for simulation and optimization the extraction system and ion beam acceleration to energy of 100 keV and the transport and matching system of beam from the H-minus ion source into RFQ. A magnetic low energy beam transport (LEBT) line consisting of two solenoids and LEBT consisting of six magnetic quadrupole lenses were analyzed. The particle data from the 50 mA 100 keV ion beam extraction system simulations were taken as the starting data for the LEBT simulations. The final aim of calculations was to achieve the required Twiss parameters and to minimize emittance growth of beam at RFQ entrance. LEBT consisting of two solenoids is more convenient in adjustment and as simulation results have shown this system offers more acceptable beam characteristics at the match point in comparison with LEBT composed of quadrupole lenses.

Введение

В ИФВЭ совместно с ИЯИ разрабатывается источник отрицательных ионов водорода (H-минус) для инъекции в линейный ускоритель ЛУ-30. Внедрение источника отрицательных ионов в качестве инжектора линейного ускорителя и организация многооборотной перезарядной инъекции на выходе кольцевого ускорителя У-1.5 (бустера) позволит поднять интенсивность ускорительного комплекса ИФВЭ в несколько раз что создаст новые возможности для фундаментальных научных и прикладных исследований. Для реализации перезарядной инъекции разрабатывается источник, генерирующий пучки ионов H-минус с параметрами: ток ≥ 50 мА, длительность импульса – 25 мкс, частота повторения – 25 Гц, энергия ионов - 100 кэВ, нормализованный rms эмиттанс $\leq 0.25 \pi$ мм·мрад, отношение $e/H^- < 5$. На основе опыта работы с источником отрицательных ионов в ИЯИ РАН [1] и ИЯФ СО РАН [2], а также анализа публикаций о работе источников отрицательных ионов в BNL [3], ISIS [4], FNAL [5], CERN [6] в качестве источника H-минус был выбран поверхностно-плазменный источник с газоразрядной камерой пеннинговского типа с осесимметричным эмиссионным отверстием на выходе ионного источника. Для вытягивания ионов H-минус из плазмы, формирования пучка и ускорения его до энергии 100 кэВ в [7] с помощью 3D программы IBSimu (Ion Beam Simulation) [8] была рассчитана трехэлектродная ионно-оптическая система (ИОС). IBSimu используется в ведущих ускорительных центрах (CERN, SNS и др.) для моделирования процессов извлечения из плазмы

отрицательных ионов и транспортировки пучка. Программа с хорошей точностью описывает экспериментальные результаты [9].

На входе в ускоритель ЛУ-30 пучок ионов с энергией 100 кэВ должен иметь следующие параметры: нормализованный эмиттанс (для 50 мА тока пучка) $\leq 1 \pi$ мм·мрад, Твисс-параметры фазового эллипса $\alpha = 2.3$, $\beta = 0.14$. В [7] в качестве первого приближения расчет линии транспортировки низконергетичного пучка (LEBT), состоящей из двух соленоидов, до входа в RFQ был выполнен с помощью программы TRACE-2D [10]. Расчеты согласующего канала, выполненные с помощью TRACE-2D, не учитывают распределение полей и пространственный заряд и не позволяют оценить рост эмиттанса пучка при его транспортировке до RFQ. В данной работе с помощью программы IBSimu проведено 3D моделирование всей системы, включающей трехэлектродную ИОС и двухсоленоидальную LEBT, с учетом реального распределения полей для пучка с током 50 мА. Рассмотрен вариант канала согласования, состоящий из магнитных квадрупольных линз. Для канала из квадрупольных линз оказалось трудно обеспечить согласование пучка с входом ускорителя из-за значительного углового разброса, приобретаемого пучком на длине дрейфа перед входом в канал. Для уменьшения радиуса и угла расходимости пучка на входе в согласующий канал была рассчитана ИОС, состоящая из пяти электродов.

ИОС вытягивания и ускорения пучка до энергии 100 кэВ

3-электродная ИОС экстракции ионов Н-минус образована плазменным, вытягивающим и ускоряющим электродами. Плазменный электрод является анодом газового разряда и находится под импульсным потенциалом 100 кВ. Вытягивающий электрод имеет потенциал +20 кВ относительно плазменного электрода, ускоряющий электрод заземлен. Эмиссионное отверстие диаметром 3 мм выбрано по аналогии с версией пеннинговского источника, разработанного в ИЯФ СОРАН [3]. Выбор оптимальной геометрии 3-электродной ИОС (радиусов вытягивающего (2 мм) и ускоряющего (2 мм) электродов и длин вытягивающего (3.3 мм) и ускоряющего (7.5 мм) промежутков) проводился на основе серии детальных расчетов из условия получения минимального эмиттанса на входе в согласующий канал. После ускоряющего промежутка предусмотрено

дрейфовое пространство (около 140 мм) до входа в согласующий канал, Оно предназначено для откачки газа, размещения магнитного корректора и индукционного датчика измерения тока ионов.

3D моделирование и оптимизация ИОС проводились с помощью программы IBSimu с учетом рассеянного поперечного магнитного поля пеннинговского разряда для тока вытягиваемых ионов Н-минус 50 мА при сопутствующем токе электронов 150 мА. Магнитное поле ионного источника с индукцией на оси около 0.1-0.15 Т проникает в область извлечения и ускорения пучка и отклоняет от оси отрицательные ионы в вытягивающем и ускоряющем промежутках. Электронная компонента будет отклоняться магнитным полем источника из ионного пучка на извлекающий электрод. Для выведения пучка на ось с нулевым угловым отклонением используется пара корректирующих диполей с противоположно направленными полями. Каждый диполь состоит из двух SmCo магнитов ($10 \times 20 \times 10 \text{ мм}^3$) с остаточным полем 0.7 Т. Магнитный поток замыкается железным ярмом, на которое намотана дополнительная подстроечная обмотка. Настройка бесшумового режима генерации ионного пучка в источнике Н-минус будет проводиться за счет оптимизации подачи водорода, цезия и величины магнитного поля в разряде. Точное значение величины магнитного поля источника неизвестно. Поэтому диполи должны иметь дополнительные подстроечные обмотки, предназначенные для компенсации отклонения пучка при разных значениях магнитного поля источника. Диполи размещаются в дрейфовом промежутке между ускоряющим электродом и каналом согласования (их координаты по оси z: 28–38 мм и 48–58 мм).

При моделировании поперечная температура ионов и электронов бралась равной 2 эВ, плазменный потенциал -10 эВ, начальная энергия частиц -5 эВ, число частиц каждого знака 25000. Магнитные поля источника, диполей, соленоидов и квадрупольей вычислялись с помощью программы ANSYS и данные магнитных полей вставлялись в IBSimu. Траектории ионов (красные) и электронов (желтые) с учетом магнитных полей источника и корректоров в трехэлектродной ИОС показаны на рис. 1. Из рисунка видно, что рассеянное магнитное поле источника (при максимальном значении на оси 0.1 Т) надежно отклоняет электроны в вытягивающем промежутке на извлекающий электрод. На рис. 2 показаны фазовые портреты пучка в плоскостях xx' и yy' при $z = 90 \text{ мм}$.

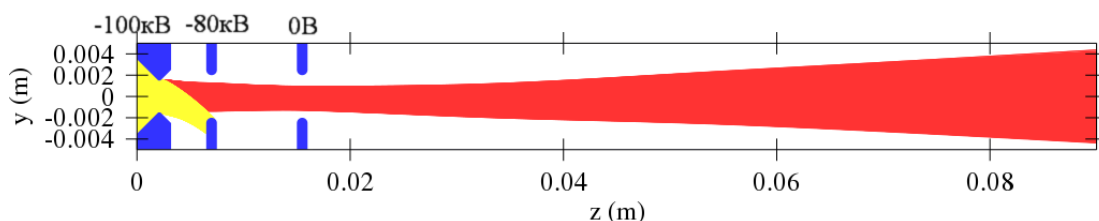


Рис. 1. Траектории ионов (красные) и электронов (желтые) для 3-электродной ИОС.

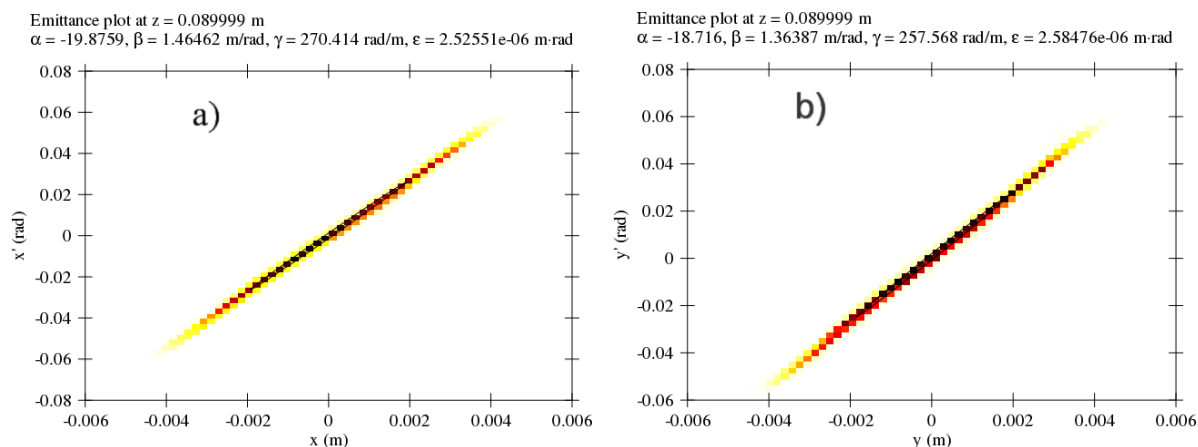


Рис. 2. Расчетный фазовый портрет пучка в плоскостях $x x'$ (a) и $y y'$ (b) при $z=90$ мм для трехмерного моделирования системы, показанного на рис. 1.

Для уменьшения радиуса и угла расходимости пучка на входе в согласующий канал и с целью расширения фокусирующих возможностей ИОС были рассмотрены варианты ИОС с дополнительными электродами, на которые подавался ускоряющий или замедляющий потенциал. Оптимальный вариант, обеспечивающий минимальный рост эмиттанса в такой системе, состоящий из пяти электродов, имеющих потенциал (по ходу пучка) 0 кВ - 20 кВ - 100 кВ - 50 кВ – 100 кВ. показан на рис. 3. Первые три электрода имеют такие же размеры, что и для 3-электродной ИОС. Радиус четвертого электрода 2.5 мм, а расстояние от него до третьего и пятого электродов 40 мм. Координаты диполь-антидипольной магнитной системы $z=35 - 45$ мм и $z = 55 - 65$ мм.

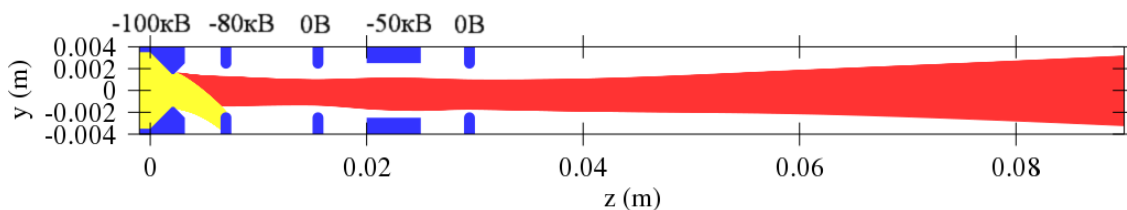


Рис. 3. Траектории ионов (красные) и электронов (желтые) для 5-электродной ИОС.

Одиночная линза, образованная электродами с потенциалами (0 -50 0) кВ, уменьшает радиус и угол расходимости пучка на входе в согласующий канал (см. ниже значения Твисс-параметров в табл. 1 и табл. 2) и, кроме того, позволяет производить регулировку и настройку этих параметров. На рис. 4 показаны фазовые портреты пучка в плоскостях xx' и yy' при $z = 90$ мм.

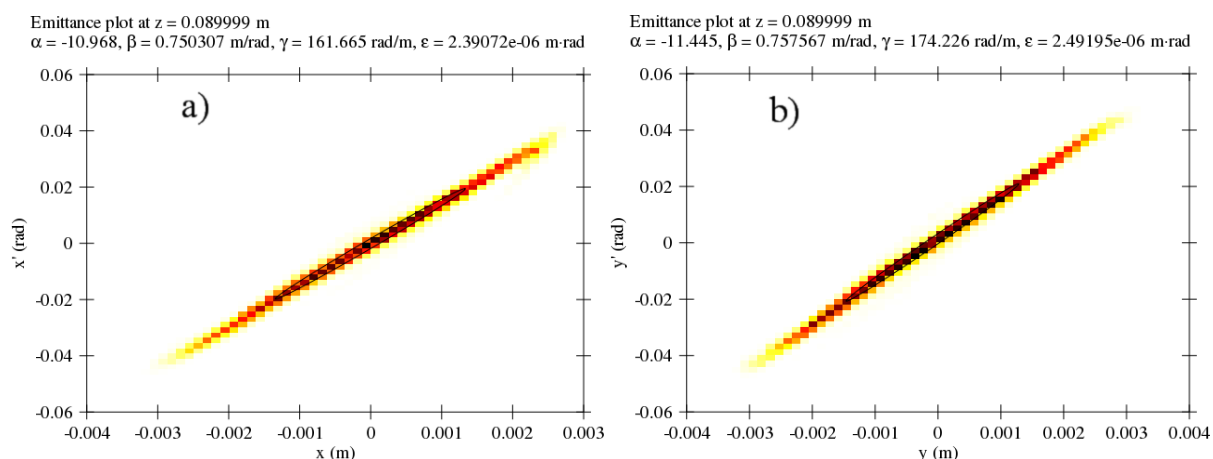


Рис. 4. Расчетный фазовый портрет пучка в плоскостях xx' (a) и yy' (b) при $z=90$ мм для трехмерного моделирования системы, показанного на рис. 3.

Моделирование пучка для LEBT из двух соленоидов

В программе IBSimu для вычислений используется сетка с постоянным шагом. Поэтому 3D моделирование ИОС и LEBT производилось в два этапа. ИОС рассчитывалась с малым шагом сетки ($5 \cdot 10^{-2}$ мм), необходимым для моделирования процессов извлечения ионов из плазмы в области эмиссионного электрода. Моделирование LEBT проводилось на сетке с более крупным шагом. Фазовые координаты пучка на входе в LEBT были взяты из расчета 3-электродной ИОС. Согласующий канал состоял из двух соленоидов. Длина каждого соленоида с железным экраном 255 мм (z координаты которых 0.08-0.335 и 0.805-1.06 м), радиус апертуры 60 мм, расстояние между ними 470 мм выбрано для размещения вакуумного оборудования и диагностического устройства. Общая длина канала согласования 1250 мм. В результате оптимизации для получения на выходе LEBT пучка с требуемыми Твисс-параметрами максимальная величина магнитного поля первого соленоида составила 0.524 Т, второго – 0.496 Т.

На рис. 5 приведены траектории ионов в канале согласования для пучка с током 50 мА. Фазовые портреты в плоскостях xx' и yy' на выходе LEBT показаны на рис. 6.

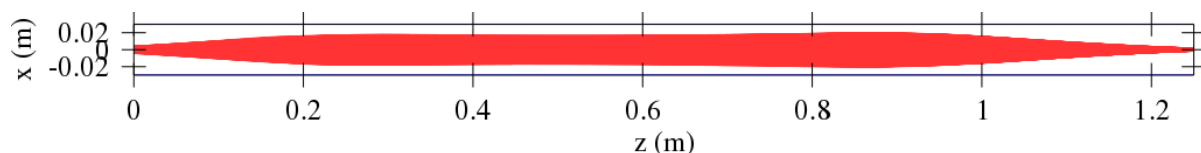


Рис. 5. Траектории ионов Н-минус в канале согласования из 2-х соленоидов для пучка с током 50 мА.

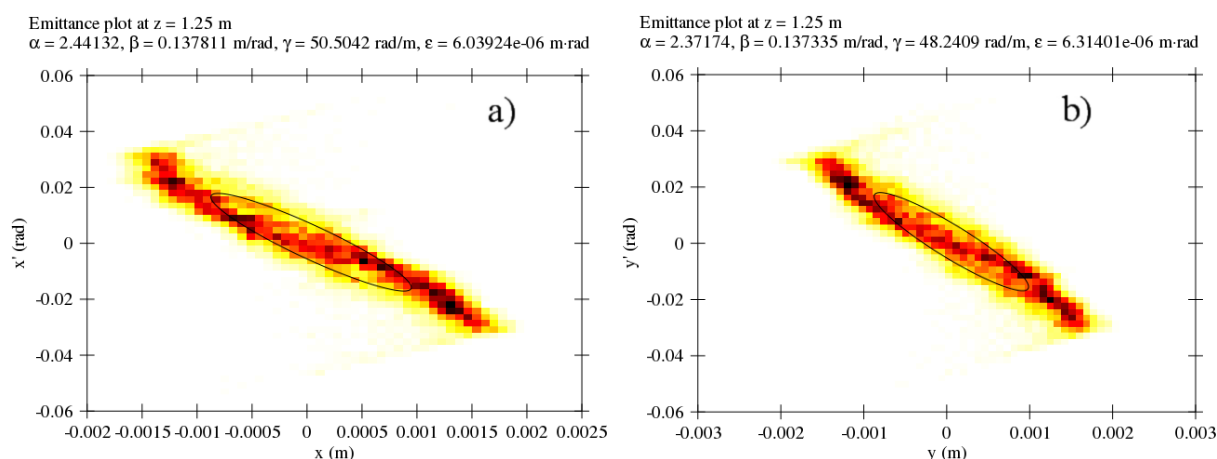


Рис. 6. Расчетный фазовый портрет пучка в плоскостях xx' (a) и yy' (b) на выходе LEBT из 2-х соленоидов.

В табл. 1 приведены значения твист-параметров и величины эмиттансов на входе и выходе согласующего канала из 2-х соленоидов. Твист-параметры на выходе канала согласования близки к требуемым на входе в RFQ. Точного согласования для обеих плоскостей достичь невозможно из-за отклонений пучка от x -симметрии на входе в LEBT. На выходе LEBT эмиттанс увеличился в 2.4 раза в обеих плоскостях, нормализованный 4σ эмиттанс равен 0.35π мм·мрад в плоскости xx' и 0.37π мм·мрад в плоскости yy' .

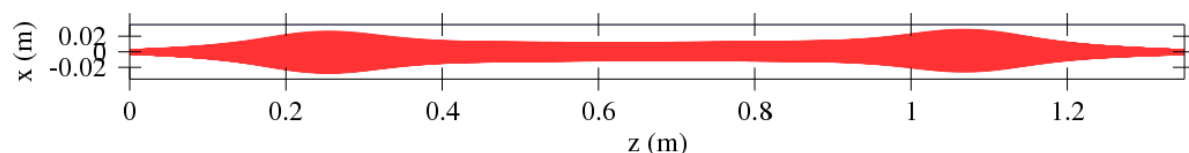
Таблица 1. Твист-параметры и σ эмиттанс на входе и выходе LEBT из 2-х соленоидов.

LEBT	α_x	β_x м/рад	$E_{rms} \cdot 10^{-6}$ м·рад	α_y	β_y м/рад	$E_{rms} \cdot 10^{-6}$ м·рад
Вход	-19.9	1.46	2.53	-18.7	1.36	2.58
Выход	2.42	0.136	6.04	2.35	0.136	6.31

Моделирование пучка для LEBT из квадрупольных линз

Недостатком канала согласования пучка Н-минус со входом RFQ, состоящего из двух соленоидов, является высокая стоимость оборудования и эксплуатации. ИОС из пяти электродов дает возможность использовать для согласования пучка с RFQ систему из 6 магнитных квадрупольных линз, сгруппированных в 2 триплета. Применение LEBT из квадрупольных линз вместо 2-х соленоидов существенно снижает стоимость оборудования и эксплуатации. Фазовые координаты пучка на входе в LEBT соответствовали параметрам, полученным из расчета 5-электродной ИОС. Было рассмотрено несколько вариантов LEBT из квадрупольных линз с разной геометрией (длиной и диаметром) и разными расстояниями между ними. Геометрические размеры квадрупольных линз выбирались с учетом компромисса между требованием умеренных градиентов и необходимостью транспортировки интенсивного пучка. В результате оптимизации магнитных полей линз удастся получить лишь приближенные значения Твисс-параметров на выходе LEBT. На рис. 7 приведены траектории ионов для одного из наиболее оптимальных вариантов канала согласования в плоскостях xz и yz для пучка ионов Н-минус с током 50 мА.

a)



b)

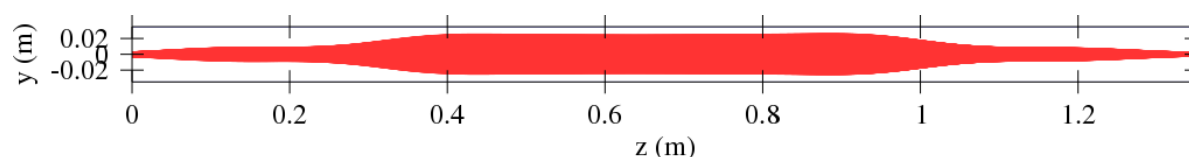


Рис. 7. Траектории ионов Н-минус в канале согласования из квадрупольных линз для пучка с током 50 мА в плоскостях xz (a) и yz (b).

Диаметр апертуры канала 80 мм, длина полюсов 90 мм. Общая длина канала согласования 1350 мм. Координаты линз по оси z : 0.07-0.16, 0.2-0.29, 0.33-0.42, 0.9-0.99, 1.03-1.12, 1.16-1.25 м. Соответствующие величины градиентов магнитных

полей линз равны ∓ 4.156 Т/м, ± 5.226 Т/м, ∓ 2.731 Т/м, ∓ 2.797 Т/м, ± 5.062 Т/м, ∓ 3.559 Т/м (верхний знак для плоскости xz , нижний для плоскости yz). Фазовые портреты в плоскостях xx' и yy' на выходе LEBT показаны на рис. 8.

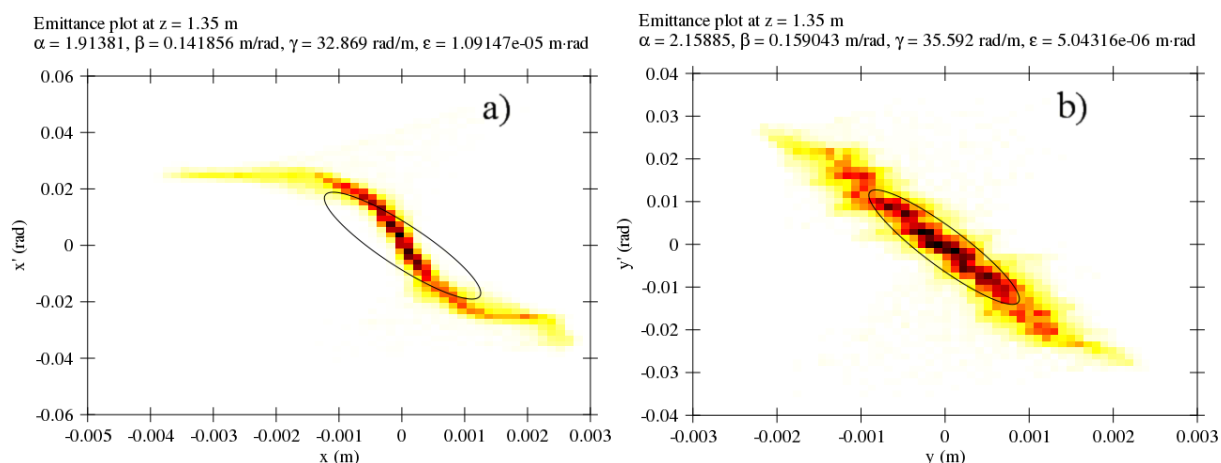


Рис. 8. Расчетный фазовый портрет пучка в плоскости xx' (a) и yy' (b) на выходе LEBT из квадрупольных линз.

В табл. 2 приведены значения Твисс-параметров и величины эмиттансов на входе и выходе согласующего канала, составленного из 6 квадрупольных линз. Результаты расчетов свидетельствуют о заметном искажении фазового портрета и существенно более значительном росте эмиттанса в плоскости xx' (в 4.6 раза) на выходе согласующего канала по сравнению с плоскостью yy' (в плоскости yy' эмиттанс увеличивается в 2 раза).

Таблица 2. Твисс-параметры и rms эмиттанс на входе и выходе LEBT из квадрупольных линз.

LEBT	α_x	β_x м/рад	$E_{rms} \cdot 10^{-6}$ м•рад	α_y	β_y м/рад	$E_{rms} \cdot 10^{-6}$ м•рад
Вход	-10.97	0.75	2.39	-11.45	0.758	2.49
Выход	1.91	0.142	10.9	2.16	0.159	5.04

Выводы

LEBT из двух соленоидов позволяет получить на входе в RFQ Твисс-параметры близкие к оптимальным при росте эмиттанса пучка в 2.4 раза, что вполне приемлемо. LEBT из квадрупольных линз позволяет достичь гораздо менее удовлетворительного согласования параметров пучка при более существенном росте эмиттанса в одной из плоскостей. Следует также заметить, что канал согласования пучка, состоящий из двух соленоидов, в отличие от системы из двух триплетов, составленных из квадрупольных линз, отличается простотой регулировки (всего две ручки настройки), хорошая управляемость (позволяет согласовывать пучок в диапазоне от малых токов до 50 мА при неизменной геометрии).

Список литературы

- [1] A.S. Belov, O.T. Frolov, V.S. Klenov, V.P. Yakushev, Rev. of Sci. Instrum., 63 (4), pp. 2622-2624, (1992).
- [2] Yu.I. Belchenko, A.I. Gorbovsky, A.A. Ivanov et.al., “Upgrade of CW Negative Hydrogen Ion Source”, AIP Conf. Proc., 1515, 448-455 (2013).
- [3] J. G. Alessi, “Performance of the Magnetron H^- Source on the BNL 200 MeV Linac”, AIP Conf. Proc., **642**, pp. 279-281, (2002).
- [4] J. Lettry, J. Alessi, D. Faircloth, A. Gerardin, T. Kalvas, H. Pereira and S. Sgobba, “Investigation of ISIS and Brookhaven National Laboratory ion source electrodes after extended operation”, Rev. of Sci. Instrum., **83**, 02A728 (2012).
- [5] C.Y. Tan, D.S. Bollinger, K.L. Duel, J.R. Lackey, W.A. Pellico, “The FNAL injector upgrade”, Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference, New York, NY, USA WEP115, pp. 1701 – 1703, (2011).
- [6] J. Lettry et. al., “Status and operation of the Linac ion source prototypes”, Rev. of Sci. Instrum., **85**, 02B122, (2014).

- [7] B.A.Frolov, V.S.Klenov, V.N.Mihailov, O.M. Volodkevich « Simulation and of Ion Optical Extraction, Acceleration and H⁺ Ion Beam Matching Systems”, RuPAC2014, THPSC46, Obninsk, Russia, pp.429-431, (2014).
- [8] T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, O. Steczkiewicz, J. Ärje et. al., “IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle Optics”, Rev. Sci. Instrum., **81**, 02B703 (2010).
- [9] T. Kalvas, R.F. Welton, O. Tarvainen, B.X. Han and M.P. Stockli, “Simulation of H⁺ ion source extraction system for the Spallation Neutron Source with Ion Beam Simulator”, Rev. Sci. Instrum., **83**, 02A705 (2012).
- [10] K.R. Crandall, D.P. Rusthoi, “TRACE 3-D Documentation”, **LA-UR-97-886**, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico.

Рукопись поступила 7 декабря 2016 г.

В.С. Кленов, Б.А. Фролов

Сравнительное исследование систем транспортировки низкоэнергетичного пучка для ионов Н-минус.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	31.10.2016.	Формат	$60 \times 84/16$.	Цифровая печать.
Печ.л.	0,75.	Уч.– изд.л.	1,15.	Тираж 80.
			Заказ 14.	Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

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

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2016-11,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2016
