

Лазерный источник высокозарядных ионов для ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН

А.Н. Балабаев, В.Н. Балануца, С.А. Кондрашев, К.В. Конюков, Н.Д. Мещеряков, В.И. Николаев,
С.М. Савин, Р.Г. Сыдыков, Б.Ю. Шарков, А.В. Шумшуров
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

Введение

В настоящее время в ИТЭФ осуществляется модернизация существующих ускорителей с целью создания ускорительно-накопительного комплекса, позволяющего получать мощные пучки тераваттной мощности (100 кДж/100 нс).

Конечная цель проекта по созданию Тераваттного накопителя (ТВН) состоит в накоплении ядер возможно более тяжелого элемента, используя нелиувилевскую инжекцию в накопительное кольцо [1]. В качестве мишени для “обдирки” ионов в ядра при инжекции частиц из ускорительного в накопительное кольцо будет использована фольга. Для минимизации потерь ионов в процессе “обдирки” и нелиувилевской инжекции в накопительное кольцо ионы с очень высокими зарядовыми состояниями (в диапазоне от углеродо-подобных до гелие-подобных ионов различных элементов) должны инжектироваться в бустерный синхротрон. Поскольку время накопления ионного пучка ограничено, ток пучка на выходе источника ионов должен быть, по крайней мере не ниже 10 мА для накопления требуемого количества ионов. Однооборотная инжекция ионов в бустерный синхротрон позволяет минимизировать эмиттанс накопленного пучка.

В настоящее время Лазерный источник ионов (ЛИИ) является наиболее интенсивным среди всех других для заполнения синхротронов в режиме однооборотной инжекции столь высокозарядными ионами [2]. Этим обусловлен тот факт, что разработка и создание интенсивного источника высокозарядных ионов является ключевым моментом проекта ИТЭФ-ТВН.

Требования к ЛИИ в рамках проекта ИТЭФ-ТВН состоят в следующем:

- используемый элемент должен быть с максимально возможной массой;
- зарядность ионов от углеродоподобных до гелиеподобных ионов;
- длительность ионного импульса (для 95% ионов с требуемым зарядовым состоянием) 10-15 мкс;
- количество ионов с требуемым зарядовым состоянием $\approx 5 \cdot 10^{10}$ за импульс,
- эмиттанс ионного пучка не более 500 пмм·мрад;
- частота повторения импульсов 1 Гц,
- число ионных импульсов без профилактического вмешательства не менее 10^4 .

ЛИИ для установки ИТЭФ-ТВН планируется использовать в два этапа.

На первом этапе существующий CO₂-лазер с выходной энергией 5 Дж и частотой повторения импульсов 0.5 Гц используется для апробации и подтверждения всех физических и технических принципов, заложенных в проект. На втором этапе будет создан и использован для ЛИИ CO₂-лазер с выходной энергией 100 Дж и частотой повторения импульсов 1 Гц.

1. Генерация ионов различных элементов при воздействии CO₂-лазеров с выходной энергией 5 и 75 Дж

В настоящее время CO₂-лазер представляется наилучшим кандидатом для ЛИИ, поскольку реально создать CO₂-лазер с выходной энергией 100 Дж при частоте повторения импульсов 1 Гц, что, как будет видно ниже, достаточно для генерации существенного количества ионов, например Ti¹⁶⁺. При этом важно, что предполагается достигнуть количества срабатываний CO₂-лазера без вмешательства оператора более 10^6 . С другой стороны, такой лазер близок к техническому пределу при указанных выходной энергии и частоте повторения импульсов.

С целью спецификации параметров ЛИИ для ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН был изучен выход ионов различных элементов из лазерной плазмы, создаваемой CO₂-лазерами с выходной энергией 5 и 75 Дж. Во втором случае использовался CO₂-лазер с частотой повторения 0.02 Гц, созданный в ТРИНИТИ и работающий по схеме задающий генератор-усилитель [3]. Полученные количества ионов раз-

личных зарядностей для различных элементов представлены в табл. 1 и 2 [2]. В табл. 2 представлены также длительности импульсов ионного тока различных зарядностей для различных элементов.

Таблица 1. Количества ионов углерода (N_C) и алюминия (N_{Al}) с различными зарядами (Z) (выходная энергия CO_2 -лазера 3.6 Дж, длительность импульса 1-го пика лазерного излучения 70 нс, диаметр фокального пятна 40 мкм, плотность потока лазерного излучения на мишени $2 \cdot 10^{11}$ Вт/см², расстояние от линии до системы экстракции 125 см, апертура системы экстракции 3 см).

Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$N_C, 10^{10}$	15	10	12	18	0.76	-					
$N_{Al}, 10^{10}$	4.3	3.2	5.3	2.9	2.2	2.0	1.6	1.7	1.0	0.6	0.01

Таблица 2. Количества и длительности импульса ионов ^{10}F (мишень CaF_2), ^{24}Mg , ^{27}Al , ^{40}Ca (мишень CaF_2) и ^{48}Ti с различными зарядами (выходная энергия CO_2 -лазера 75 Дж, длительность лазерного импульса по полувысоте 16 нс, диаметр фокального пятна 65 мкм, плотность потока лазерного излучения на поверхности мишени до 10^{14} Вт/см², расстояние от мишени до цилиндра Фарадея 308 см, апертура цилиндра Фарадея 3.4 см) [2].

Z	F (CaF ₂ -target)		Mg		Al		Ca (CaF ₂ -targ.)		Ti	
	N, 10 ¹⁰	Δt, μs	N, 10 ¹⁰	Δt, μs	N, 10 ¹⁰	μs	N, 10 ¹⁰	Δt, μs	N, 10 ¹⁰	Δt, μs
4	0.1	5	0.2	3.6	-	-	-	-	-	-
5	0.3	5	0.4	4	-	-	-	-	0.15	23
6	1.1	4.5	1.4	4.8	-	-	-	-	0.25	12
7	3.7	4	3.5	6.7	0.15	6.5	-	-	0.3	19
8	-	-	7.0	6.6	0.8	8.5	0.05	4	0.75	16
9	-	-	14.	6.2	2.6	8	0.15	6	0.6	18
10	-	-	18	5.7	6.3	7.5	0.6	5.5	1.0	17
11	-	-	0.6	4.5	12	7	1.0	5	1.8	16
12	-	-	-	-	0.1	5	2.0	4.5	3.8	15
13	-	-	-	-	-	-	3.4	4	4.7	12
14	-	-	-	-	-	-	3.0	4	5.5	7.5
15	-	-	-	-	-	-	1.4	3.5	4.0	5.5
16	-	-	-	-	-	-	0.3	3	1.3	5
17	-	-	-	-	-	-	0.2	3	0.2	5.5

Из табл. 1 видно, что пучки ионов C^{+4} и $Al^{+7..+9}$ с количеством ионов одной зарядности больше чем 10^{10} ионов/импульс получены при использовании CO_2 -лазера с энергией 5 Дж. Из табл. 2 следует, что из лазерной плазмы, создаваемой CO_2 -лазером с энергией 75 Дж, могут быть получены пучки ионов $F^{+7..+9}$, $Mg^{+7..+10}$, $Al^{+9..+11}$, $Ca^{+12..+15}$ и $Ti^{+14..+16}$ с количеством ионов одной зарядности в диапазоне $10^{10} \div 10^{11}$ ионов/импульс.

2. Лазерный источник ионов C^{+4} в линии с инжектором И-3

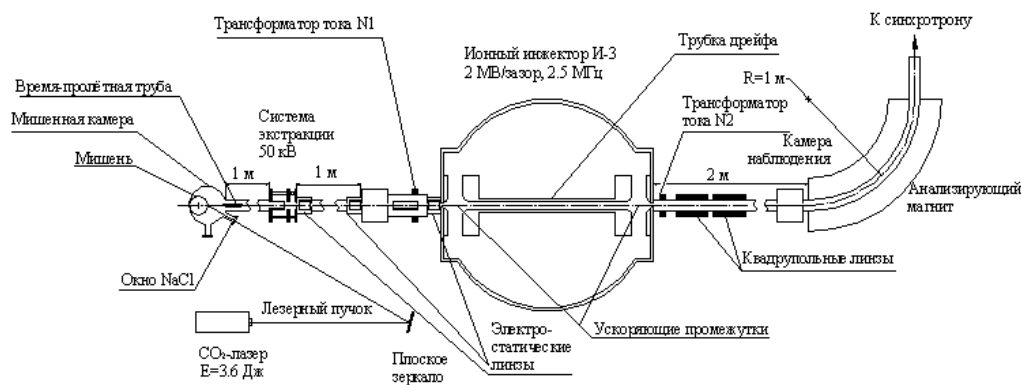


Рис. 1. Схема лазерного источника ионов в линии с тяжелоионным инжектором И-3.

Для согласования ЛИИ с двухзазорным инжектором И-3 (2.5 МГц, 2 МВ/зазор) (рис.1) был использован канал, состоящий из трёх электростатических линз и банчера (2.5МГц, 10 кВ). Пучок ионов углерода C^{+4} был выбран в качестве рабочего, как наиболее интенсивный и стабильный генерируемый ЛИИ при использовании CO_2 -лазера с энергией 5 Дж. Для экстракции пучка ионов из лазерной плазмы использовалась трёхэлектродная система при напряжении экстракции 50 кВ. Для фиксации границы плазмы в первом электроде устанавливалась сетка с прозрачностью около 95%. Аналогичные сетки устанавливались в среднем электроде всех электростатических линз для уменьшения aberrаций.

Банчер состоит из двух заземлённых диафрагм и трубки дрейфа, расположенной между ними и находящейся под потенциалом, изменяющимся с той же частотой, что и потенциал инжектора И-3. Полная длина системы согласования пучка составляет 225 см. Ясно, что столь длинная система согласования не является оптимальной при полных токах пучка ионов в диапазоне 50-100 мА. Однако, поскольку главной целью на этом этапе является прежде всего проверка работоспособности всего ускорительно-накопительного комплекса, было решено использовать уже существующую систему согласования.

Подробное описание двухзазорного инжектора И-3 содержится в работе [4]. Четыре трансформатора тока (ТТ) были установлены вдоль всего канала транспортировки ионного пучка от источника до синхротрона: ТТ №1 и 2 – на входе и выходе инжектора И-3, ТТ №3 – за поворотным магнитом и ТТ №4 – на входе в бустерный синхротрон.

ЛИИ эксплуатировался с частотой 0,25 Гц. Усредненные по 50 “выстрелам” лазера зависимости тока пучка ионов углерода и от времени, измеренные ТТ №1–4 представлены на рис. 2а, б, в, г (сплошные линии). Пунктирными линиями на этих рисунках показаны среднестатистические флуктуации ионного тока от “выстрела” к “выстрелу” лазера.

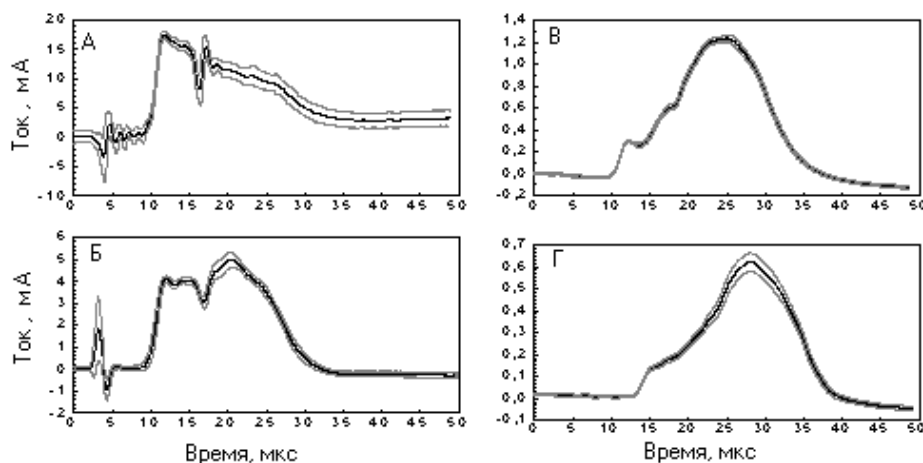


Рис. 2а, б, в, г. Зависимости усредненного тока пучка ионов углерода от времени (сплошные линии) и среднестатистические флуктуации (пунктирные линии), измеренные вдоль канала транспортировки от ЛИИ до бустерного синхротрона.

Как обычно, величины токов, измеренные трансформаторами тока, следует рассматривать с некоторой осторожностью, принимая во внимание возможность влияния вторичных электронов на результаты измерений. Получены следующие амплитуды тока ионов углерода вдоль канала транспортировки: амплитуда полного тока ионов углерода всех зарядностей составляет 17 мА на входе и 5 мА на выходе инжектора И-3, амплитуда тока ионов C^{+4} после поворотного магнита равна 1,2 мА, амплитуда тока ионов C^{+4} на входе в бустерный синхротрон равна 0,6 мА. Среднестатистические флуктуации тока ионов вдоль всего канала от ЛИИ до бустерного синхротрона лежат в диапазоне $\pm 7\%$.

Следует отметить, что длительность импульса ионного тока возрастает вдоль канала транспортировки и ускорения от ЛИИ до бустерного синхротрона. Этот факт является следствием того, что пучок ионов с током 50÷100 мА испытывает сильное влияние объемного заряда, приводящее к уменьшению пропускания канала с ростом ионного тока. При этом амплитуда тока уменьшается сильнее по сравнению с “крыльями” ионного импульса, несущими меньший ток.

ЛИИ стабильно эксплуатируется в течение 6 месяцев с частотой повторения 0,25 Гц. В течение этого периода потребовалась только профилактическая замена фокусирующего зеркала с фокусным расстоянием 130 мм вследствие напыления углерода на его поверхность, что приводило к деградации оптических свойств зеркала.

3. Будущие шаги по модернизации ЛИИ

Как уже отмечалось выше, на первом этапе проекта ИТЭФ – ТВН будет использован CO_2 -лазер с выходной энергией 5 Дж. Предполагается осуществить следующие шаги по стабилизации работы указанного лазера:

- установить отдельную раму для крепления зеркал резонатора лазера, имеющую сильфонные “развязки” от разрядной камеры;
- установить регенератор газовой смеси.

Для согласования ЛИИ с инжектором И-3 планируется использовать компактную электростатическую линзу, хорошо зарекомендовавшую себя на лазерном источнике ионов в ЦЕРН [5].

На втором этапе предполагается использовать CO_2 -лазер с выходной энергией 100 Дж и частотой повторения импульсов 1 Гц. Аналогичный лазер разрабатывается и производится в настоящее время в России для ЛИИ в ЦЕРН. Одновременно будет изготовлена и установлена новая камера облучения. Эта установка позволит получать пучки высокозарядных ионов различных элементов от Al до Ti с параметрами, удовлетворяющими требованиям проекта ИТЭФ-ТВН.

Выводы

Лазерный источник ионов C^{+4} установлен и в течение 6 месяцев эксплуатируется для инжекции ионов в бустерный синхротрон ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН. Для согласования ЛИИ с инжектором И-3 использован канал, состоящий из трёх электростатических линз и банчера. Амплитуда тока ионов C^{+4} , ускоренных в инжекторе И-3, измеренная трансформатором тока за поворотным магнитом, составляет величину 1.2 мА. При этом длительность ионного импульса по основанию составляет 25 мкс, а полное число ускоренных ионов C^{+4} составляет величину $3 \cdot 10^{10}$ ионов за импульс. Флуктуации ионного тока от “выстрела” к “выстрелу” лазера лежат в диапазоне $\pm 7\%$ вдоль всего канала транспортировки от ЛИИ до бустерного синхротрона.

На втором этапе проекта ИТЭФ-ТВН для ЛИИ планируется использование CO_2 -лазера с выходной энергией 100 Дж и частотой повторения импульсов 1 Гц.

Авторы благодарны операторам инжектора И-3 за управление ускорителем, а также И.В. Рудскому за автоматизацию измерений.

Работа была частично поддержана в рамках проекта ИНТАС № 96-299.

Литература

- [1] B. Sharkov et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res, A 415, 20 (1998).
- [2] S. Kondrashev et al. Rev. Sci. Instr., 71(3), 2000, pp 1409-1412.
- [3] S.V. Khomenko et al. Master-Oscillator-Power Amplifier Laser System for Laser Ion Source, Preprint TRINITY 045-A, 1998.
- [4] Н.Н. Алексеев и др. Сборник трудов совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино 1999.
- [5] P. Fournier et al. Rev. Sci. Instr., February, 2000.