

УДК 533.9

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ФОТОННОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ МОЩНЫХ ПУЧКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ИЯФ СО РАН

© 2024 г. С. С. Попов^{a,b,*}, М. Г. Атлуханов^{a,b}, А. В. Бурдаков^{a,c}, А. А. Иванов^a,
В. В. Куркуचेков^{a,b}, А. Л. Санин^{a,b}, Д. И. Сковородин^{a,b}, Ю. А. Трунев^{a,b}, И. В. Шиховцев^{a,b}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

^b Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^c Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

* e-mail: s.s.popov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 06.02.2024 г.

Принята к публикации 10.02.2024 г.

Представлен краткий обзор исследований, проводимых в ИЯФ СО РАН по теме фотонной нейтрализации пучков отрицательных ионов. Принципиальное отличие представленного подхода в нерезонансном накоплении фотонов в ограниченном пространстве. Удержание основано на адиабатическом движении фотонов в системе вогнутых зеркал, которое нечувствительно к качеству инжектируемого излучения. Проведен анализ перспектив нейтрализатора на основе нерезонансной фотонной ловушки в крупномасштабных установках типа ИТЭР и ТРТ, а также описан подготавливаемый эксперимент по фотонной нейтрализации на пучке отрицательных ионов водорода с энергией до 130 кэВ, током около 10 мА.

Ключевые слова: фотонейтрализация, нерезонансный фотонный накопитель, адиабатические инварианты, волоконный лазер, ИТЭР, ТРТ

DOI: 10.31857/S0367292124040091, **EDN:** QDDEGY

1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционным подходом к нейтрализации пучков отрицательных ионов в такой задаче, как нагрев плазмы или ее диагностика нейтральными пучками, является использование газовой или плазменной мишени для отрыва избыточных электронов. Однако эти подходы имеют существенное ограничение по эффективности. К примеру, для проектируемых в настоящее время систем нейтральной инжекции с энергией атомов 1 МэВ [1] эффективность нейтрализации для газовой и плазменной мишени составит соответственно 60 и 85% [2], что существенно влияет на полный КПД проектируемых термоядерных реакторов. Кроме того, эти подходы сопряжены с осложнениями, существенными в некоторых приложениях: ухудшение вакуумных условий из-за подвода газа, появление посторонних примесей в пучке, усиление пробойных явлений в ускорителе. Конверсионной мишенью для преобразования пучка отрицательных ионов изотопов водорода в атомарный, лишенной этих недостатков, является фотонная мишень (см. рис. 1.).

Если энергия фотона превышает энергию сродства электрона атому водорода (0.754 эВ), но меньше

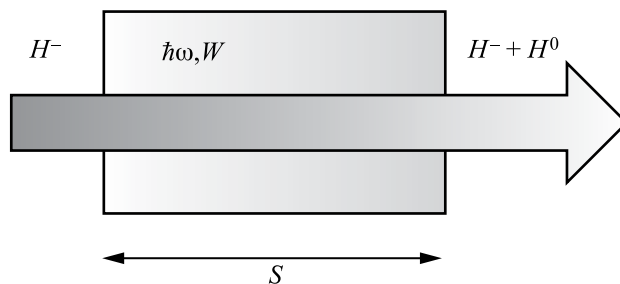


Рис. 1. Сечение фотоотрыва.

его потенциала ионизации (13.6 эВ), основной процесс взаимодействия пучка с мишенью заключается в фотоотрыве электрона от отрицательного иона. Это делает принципиально возможным достижение выхода атомов в такой мишени, близкого к единице, поскольку обратный процесс маловероятен, а полная фотонейтрализация невозможна.

На выходе из ловушки будем иметь плотность тока нейтралов

$$j(s) = j_-(0) \left(1 - \exp \left(-\frac{\sigma c}{V \hbar \omega} \int_0^s W dz \right) \right), \quad (1)$$

где j, j_- — плотности токов нейтралов и отрицательных ионов, W — плотность лучистой энергии, σ — сечение фотоотрыва, V — скорость ионов, z — координата вдоль пучка, s — путь пучка в мишени.

Сечение фотоотрыва электрона от отрицательного иона водорода в зависимости от длины волны излучения представлено на рис. 2 [3–5]. Теоретически сечение фотоотрыва вычислено в работе [5]. Оценки показывают, что с учетом уменьшения энергии фотона с увеличением длины волны энергетическая цена одного акта фотонейтрализации оказывается минимальной при длине волны излучения, равной 1 мкм.

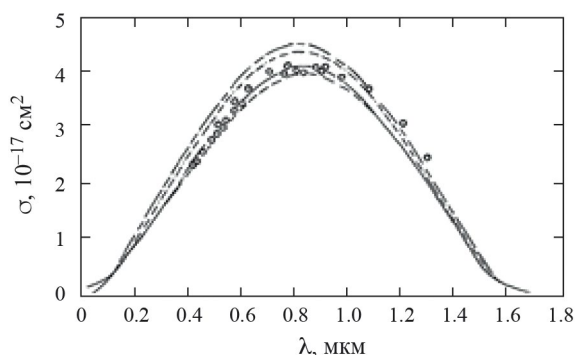


Рис. 2. Принципиальная схема фотонного нейтрализатора.

Это в значительной степени определяет выбор источника излучения для фотонейтрализатора. Для нейтрализатора длины масштаба 1 м, требуется плотность энергии $W \sim 10^{-5}$ Дж/см³ или интенсивность $I \sim Wc \sim 3 \cdot 10^5$ Вт/см². Это требует большой мощности накачки с одной стороны, а с другой высокоэффективного накопления фотонов. Несмотря на очевидные технические сложности, проблему фотонного нейтрализатора придется решать, поскольку построение экономически оправданных термоядерных электростанций без повышения эффективности нейтрализации пучков отрицательных ионов с помощью фотонной нейтрализации представляется невозможным [6].

2. ВОЗМОЖНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ФОТОННОГО НАКОПИТЕЛЯ

К настоящему времени предложено множество схем фотонных нейтрализаторов. Начиная с первой работы [7], они, как правило, предполагают создание оптического резонатора, внутри которого происходит обдирка пучка отрицательных ионов, и мощной системы лазерной накачки. За редким исключением они представляют твердотельные лазерные системы (см., например, [8–10] и приведенную в них библиографию) с экстремальными потоками

лучистой энергии на стенку резонатора. Несмотря на существенные отличия оптических схем в этих работах, все они основаны на накоплении фотонов в резонаторе Фабри–Перо, в простом варианте, представленном на рис. 3. В таких схемах есть ряд существенных ограничений. Действительно, коэффициент накопления излучения в такой схеме равен

$$I / I_0 = \zeta = \frac{t_1^2 (r_2^2 + 1)}{1 - 2r_1 r_2 \cos(\delta) + (r_1 r_2)^2}, \quad (2)$$

где I_0, I — инжектируемая и накопленная интенсивности; t_1, t_2, r_1, r_2 — амплитудные коэффициенты пропускания и отражения на входном и выходном зеркалах; δ — набег фазы за два прохода между зеркалами. С учетом потерь из (2) получим

$$\zeta \approx \frac{t_1^2 (r_2^2 + 1)}{1 - 2r_1 r_2 \sqrt{(1-A)} \cos(\delta) + (r_1 r_2)^2 (1-A)}, \quad (3)$$

где A — общие диссипативные потери интенсивности излучения за два прохода. В резонансе при $r_2^2 \approx 1$ усиление излучения составит величину

$$\zeta = \frac{2t_1^2}{(1 - r_1 \sqrt{1-A})^2} \approx \frac{8t_1^2}{(1 - r_1^2 + A)^2}. \quad (4)$$

Современные технологии позволяют изготавливать зеркала с отражательной способностью свыше 0.999, что приводит к накоплению излучения в несколько тысяч раз. Так, в работе [10] заложена отражательная способность в 0.9996. Однако кроме эффективного отражения в таких концептах необходимо выполнить весьма жесткие требования на качество вводимого лазерного излучения, чтобы удовлетворились условия резонанса на большом числе проходов. Резонансная расстройка в уравнении (3), определяемая длиной резонатора L , ее нестабильностью ΔL и шириной спектра $\Delta\lambda$, при эффективном накоплении фотонов ограничивается

$$\begin{aligned} 1 - \cos(\delta) &\approx \left| \frac{4\pi\Delta L}{\lambda} \right| + \left| \frac{4\pi L\Delta\lambda}{\lambda^2} \right| \ll \\ &\ll 1 - r_1 r_2 \sqrt{1-A} \approx 5 \cdot 10^{-4}. \end{aligned} \quad (5)$$

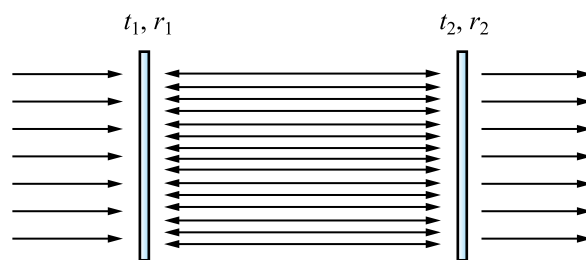


Рис. 3. Схема эталона Фабри–Перо.

При параметрах инжекторов, аналогичных разрабатываемому для ИТЕР или ДЕМО [1], когда длина резонатора закладывается не менее 100 м [11], ширина линии излучения не должна превосходить величины порядка $\nu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} c \approx \frac{1-r_1r_2}{4\pi L} c \sim 100$ Гц. Иначе «резонансная» малость знаменателя не выполнится для всего спектра накачки. Создание мощного источника излучения (1 кВт) с такой тонкой линией очень сложная задача в настоящее время [11]. Кроме этого, из-за жестких условий резонанса не менее технически сложна проблема пространственной и температурной стабилизации [12].

Создание фотонной мишени на базе современных технологий кажется возможным и требует проработки деталей конструкции резонатора (зеркал и окон для излучения) и разработки стационарной излучающей системы с достаточной мощностью и экономичностью. Современное состояние дел по данной проблематике можно найти в обзоре [13].

Альтернативой резонансным накопителям может служить система зеркальных поверхностей, обеспечивающая многократное отражением лучей и их адиабатическое удержание в некоторой области. Так же, как и в резонансных накопителях фотонов, интегральное накопление энергии излучения будет определяться потерями на отражении и временем ухода луча за пределы системы. Принципиальное отличие от резонансных накопителей в том, что нет строгого условия на фазовые соотношения между большим количеством лучей внутри ловушки. В этом случае мы приходим к системам типа математического бильярда с открытыми участками, который не чувствителен к частотному и пространственному спектру вводимого излучения. Последнее обстоятельство существенно облегчает поиск или разработку источника излучения достаточной мощности. Им может быть набор мощных промышленных волоконных [14] или диодных лазеров.

Такой подход к накоплению излучения был предложен и экспериментально реализован в ИЯФ СО РАН [15, 16]. Позднее в эксперименте была осуществлена фотонная нейтрализация пучков отрицательных ионов водорода и дейтерия с рекордными показателями степени нейтрализации свыше 95% [17]. Энергия частиц была до 12 кэВ. Ширина области нейтрализации при этом была около 2 мм. Эффективность накопления излучения — около 400. Зеркала были составлены из плавно сопряженных цилиндрических и сферических сегментов.

3. СХЕМА НЕРЕЗОНАНСНОЙ ФОТОННОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ В КРУПНОМАСШТАБНЫХ УСТАНОВКАХ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ОБЩУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АТОМАРНОГО ИНЖЕКТОРА

Принципиальная схема нейтрализатора в геометрии близкой к ионным пучкам в ИТЕР представлена на рис. 4 [18]. Каждое зеркало состоит из цилиндрической центральной части, плавно сопряженной с тороидальными законцовками. Длина такого накопителя может достигать 10 м, что вызвано необходимостью съема лучистой тепловой нагрузки и условиями продольного удержания при значительной величине в 6 м расстояния между зеркалами. Для системы нейтральной инжекции, подобной заложенной в ТРТ [19], энергетика, параметры и масштабы фотонного накопителя остаются почти столь же внушительными (см. табл. 1). Результаты численного моделирования освещенности в накопителе и достижимый профиль нейтрализации показаны на рис. 5.

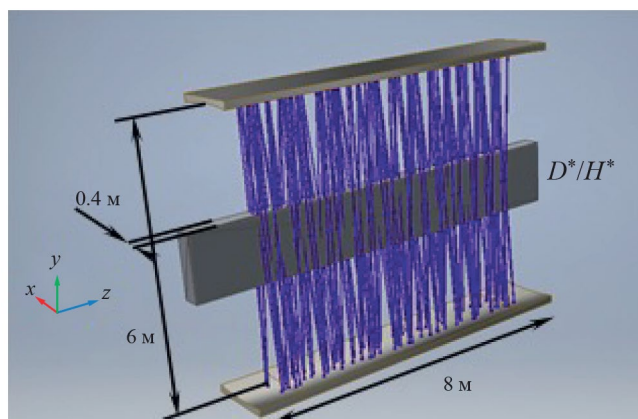


Рис. 4. Схема нерезонансного фотонного нейтрализатора для ИТЭР.

Таблица 1. Параметры фотонных нейтрализаторов в ИТЭР и ТРТ

	ИТЕР	ТРТ
Мощность пучков H^-/D^- , МВт	40	5
Энергия частиц пучков, МэВ	<1	<0.5
Отражение зеркал	0.9995	0.9995
Сечение области нейтрализации, см ²	40×100	20×20
Длина накопителя, м	8	2
Межзеркальная дистанция, м	6	1
Мощность лазерной инжекции, кВт	300	150
Длина волны, мкм	1.07	1.07
Степень нейтрализации H^-/D^- , %	>90/>95	>90/>95
КПД инжекции, %	>50	—

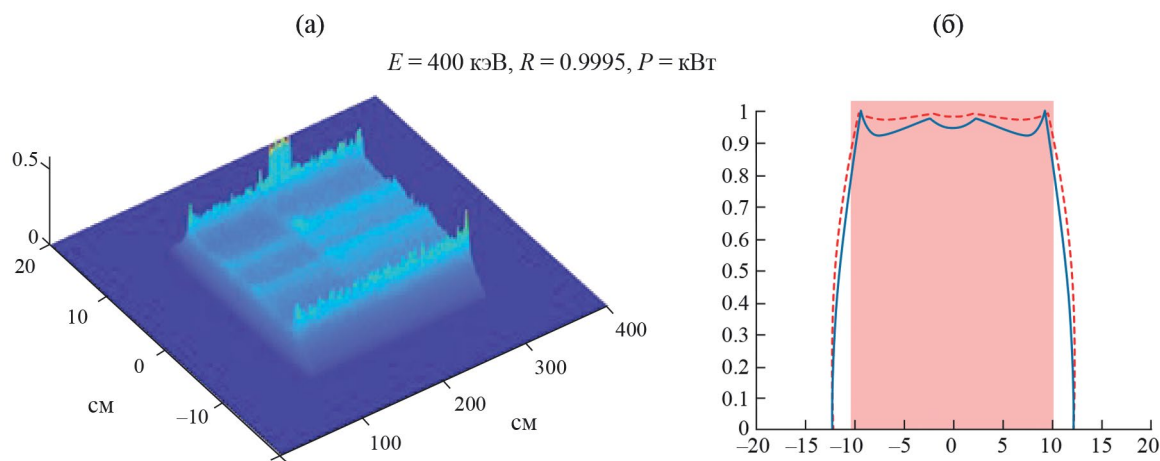


Рис. 5. Численное моделирование фотонного нейтрализатора для системы нейтральной инжекции подобной ТРТ: (а) распределение интенсивности лазерного излучения в центре фотонного накопителя; (б) поперечный профиль нейтрализации (сплошная линия — для пучка H^- , штриховая — для пучка D^- , прямоугольный фон — поперечный размер пучка).

Оценим эффективность инжекции при предлагаемой концепции нейтрализации. Представим степень нейтрализации виде (1)

$$K(P) = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma P}{E_0 d V}\right), \quad (6)$$

где d — ширина области нейтрализации, E_0 — энергия фотона, V — скорость ионов. Интегральная P мощность излучения внутри ловушки равна $P = P_0 / (1 - r^2)$, где P_0 — мощность оптической накачки ловушки, r — амплитудный коэффициент отражения. Тогда КПД системы нейтральной инжекции с потоком отрицательных ионов мощностью P (при полных энергозатратах на ускоритель и сопутствующие системы P_{ac}), лазером с КПД η_l определяется выражением

$$\eta(P_0) = \frac{K(P_0) P_-}{P_{ac} + P_0 / \eta_l}. \quad (7)$$

Принимая оценку для P_{ac} из работы [6] около 67 МВт, получим примерную зависимость КПД атомарного инжектора от мощности накачки фотонов в ловушку, представленную на рис. 6. Там же показана степень нейтрализации. Поскольку (6) не учитывает затрат на охлаждение зеркал, других элементов лазерной системы и их амортизацию, то за оптимум накачки разумно принять уровень накачки около 300 кВт. Дальнейший рост КПД уже не существенный.

С традиционным газовым нейтрализатором КПД инжекции оказывается ограничен величиной 26% [6], и это при эквивалентном атомарном токе на выходе 17 А против 36 А при фотонной нейтрализации. Отметим важное значение поперечного профиля нейтрализуемого пучка. Как видно из профиля нейтрализации

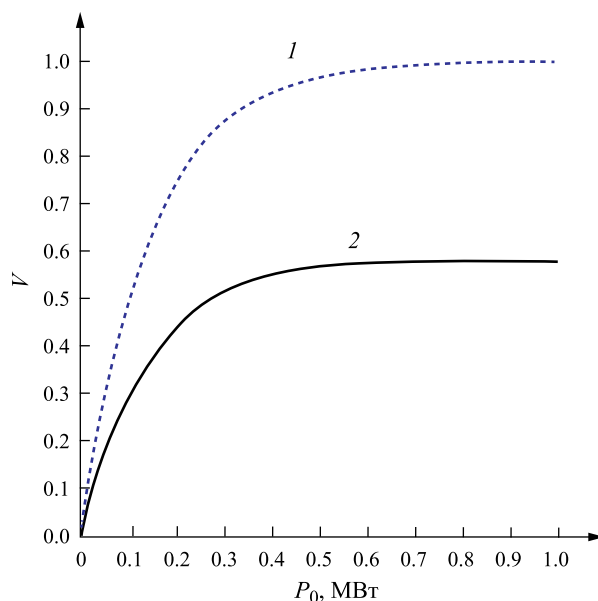


Рис. 6. Зависимости степени нейтрализации от мощности накачки фотонов в мишень — 1, КПД инжектора ITER при мощности пучка отрицательных ионов 40 МВт — 2.

(см. рис. 5b) и формулы (6), поперечный размер пучка d нужно иметь максимально «компактным».

4. СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА ПО НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПУЧКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Первая экспериментальная демонстрация адиабатического удержания представлена в работе [15].

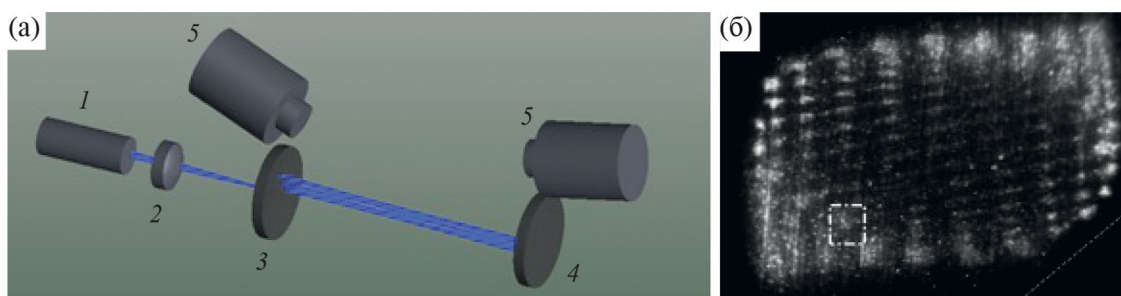


Рис. 7. Схема эксперимента: (а) 1 — источник излучения; 2 — линза; 3 — зеркало с входным отверстием; 4 — глухое зеркало; 5 — фотокамеры; фотометрический профиль интенсивности накопленного излучения на зеркале 4 (б); квадратом выделена область первого падения пучка света на зеркало.

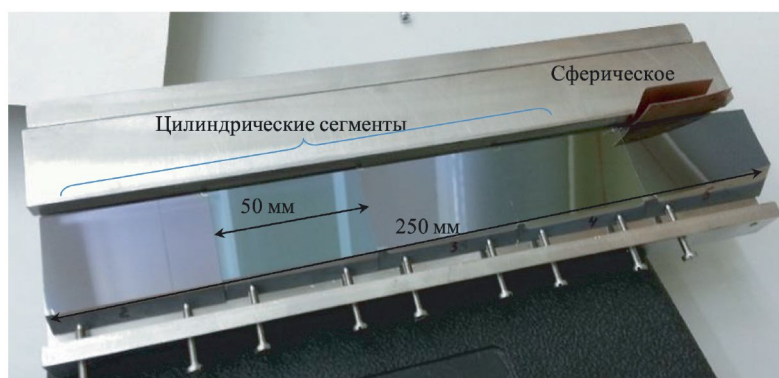


Рис. 8. Вариант компоновки зеркала фотонного накопителя из цилиндрических и сферических сегментов.

В ней применена простая схема нерезонансного накопления на сферических зеркалах. Эффективность накопления определялась по фотометрии рассеянного от поверхности зеркал излучению (см рис. 7).

В результате эффективность накопления составила свыше 300 при порядка 1000 значимых отражений, составляющих около 99% от накопленной мощности. На основании этого опыта был разработан накопитель с формой зеркал аналогичной рис. 4, применимый для фотонейтрализации пучков отрицательных ионов. Зеркала собирались из отдельных сегментов цилиндрической и сферической формы (см. рис. 8.).

Накопление излучения в ловушке из пары таких зеркал исследовано в работе [16]. Эффективность накопления, определенная по прямой регистрации зависимости времени жизни излучения от привнесенных поглотителей, составила около 430. С этим накопителем был поставлен эксперимент по нейтрализации пучков H^- и D^- [17]. Его схема приведена на рис. 9.

Оптическое излучение из лазерного коллиматора 1 проводилось через светодетектор 2 и затем линзой 3 фокусировалось на входное отверстие оптического накопителя 4. Угловой разброс при этом составлял

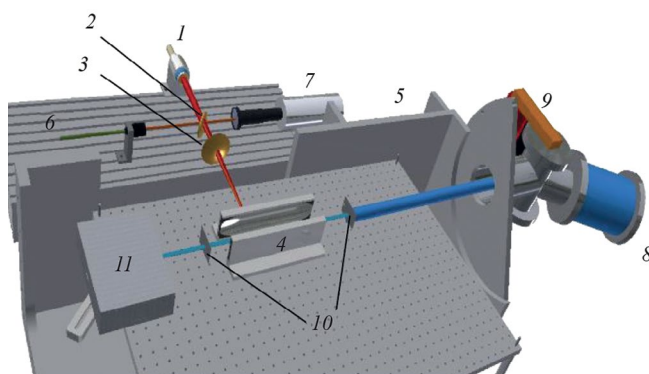


Рис. 9. Схема эксперимента по нейтрализации пучков H^- и D^- , взятая из работы [17]: 1 — лазерный коллиматор; 2 — светодетектор; 3 — линза; 4 — фотонный накопитель; 5 — вакуумная камера; 6 — монитор излучения накачки; 7 — фотокамера для контроля попадания излучения в отверстие ввода; 8 — генератор пучков положительных ионов; 9 — поворотный магнит; 10 — формирующие диафрагмы; 11 — магнитный анализатор.

около 3° . Сама фотонная ловушка располагалась в вакуумной камере 5. Светодетектор 2 малую долю инжектируемого излучения направлял в монитор 6. Камера 7 позволяла через этот же светодетектор

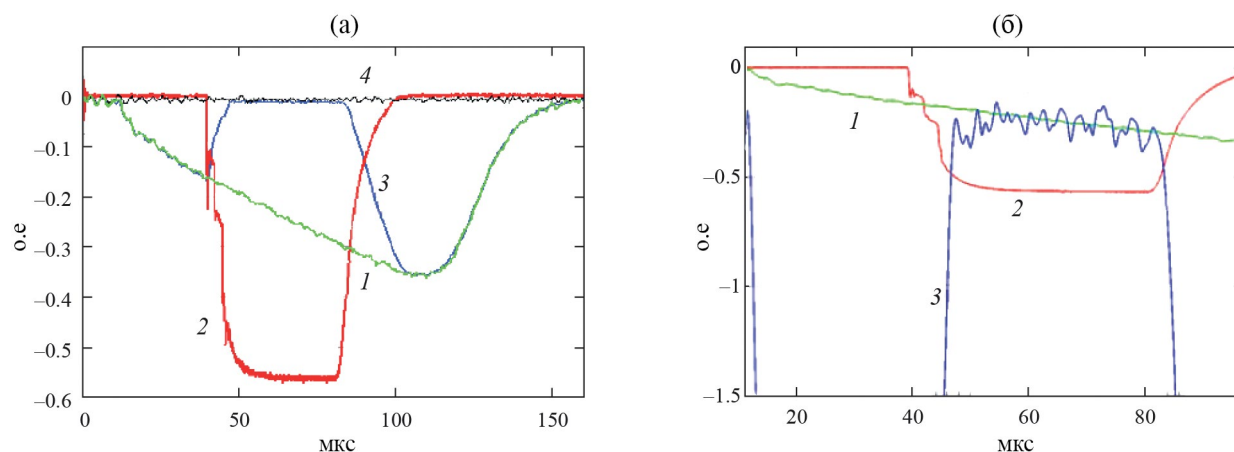


Рис. 10. Осциллограммы в экспериментах по нейтрализации пучка D^- при энергии частиц 6.5 кэВ (а), они же после фильтрации помех и масштабирования (б): 1 — ток отрицательных ионов без нейтрализации; 2 — монитор лазерной накачки; 3 — ток отрицательных ионов под воздействием нейтрализатора, 4 — шум и смещение нулевой линии (только в а)).

контролировать нацеливание фокусного пятна на входное отверстие. Дистанция между зеркалами была около 50 мм. Пучки ионов H^+ и D^+ с энергией частиц от 6 до 12 кэВ генерировались источником ДИНА 4А [20]. Газовая мишень на выходном патрубке источника порождала фракцию отрицательных ионов. Поворотный магнит 9 отделял ее от нейтральной и положительной компоненты, направляя в камеру 5 и в нейтрализатор 4. Диафрагмы 10 формировали сечение пучка, согласованное с областью нейтрализации в фотонной ловушке. Состав пучка после прохождения нейтрализатора определялся магнитным анализатором 11. В эксперименте по этой схеме была получена рекордная на настоящий момент степень нейтрализации, продемонстрированная на рис. 10. Здесь линии 1 и 3 — осциллограммы тока отрицательных ионов без накачки фотонной ловушки и с ней соответственно. Осциллограмма 2 — монитор лазерной накачки. Справа на рисунке показаны осциллограммы, очищенные от шумов и смещения. Сигнал 3 масштабирован по вертикали по сигналу 1 для наилучшего их совпадения. Разница единицы и обратный масштабный коэффициент дает степень нейтрализации около 98%. Полученные результаты существенно опередили прогресс, достигнутый в резонансном подходе (см. обзор [13]).

При переходе от фотонных нейтрализаторов малого размера (типа [17]) к масштабам, требуемым для ИТЭР или ТРТ возникает ряд трудностей. В их основе изготовление зеркал или их элементов существенно большей площади и лучшей отражательной способности. Помимо этого, возникает вопрос стоимости такого производства и долговечности зеркальной поверхности в условиях термоядерного эксперимента, и связанных с ним потоков высо-

коэнергичными частицами. Решать эти проблемы целесообразно поэтапно, увеличивая размер зеркал и накапливаемую мощность, с отработкой технологии производства и контролем времени их жизни, отрабатывая попутно вспомогательные системы (юстировка, охлаждение, и др.). Следующим таким шагом планируется осуществление фотонной нейтрализации пучка отрицательных ионов водорода с энергией до 130 кэВ, током до 14 мА с длительностью вплоть до непрерывного режима работы. Схема подготавливаемого эксперимента представлена на рис. 11. Источником ионов послужит созданный в ИЯФ СО РАН инжектор для тандемного ускорителя [21]. Основные его части — это источник 1 отрицательных ионов с цезиевой поверхностно-плазменной генерацией и ускорительная трубка 2, разделенные поворотным магнитом. Последний позволяет эффективно сепарировать отрицательные ионы от электронной компоненты в вытягиваемом потоке. В непрерывном режиме работы инжектор может стабильно производить пучок с током до 14 мА. Диапазон энергии может варьироваться от 25 кэВ до 130 кэВ. Вакуумная камера фотонного нейтрализатора 3 будет использоваться та же самая, что и в работе [17]. Для ограничения поперечного размера пучка на входе в нейтрализатор предусмотрена система из двух юстируемых диафрагм 4. Кроме согласования сечения пучка с областью нейтрализации диафрагмы обеспечат защиту зеркал от частиц, вылетающих из трубки с большими углами или рассеянных на большой угол на пути в нейтрализатор 5. Для обсуждаемого эксперимента были изготовлены зеркала с отражающей поверхностью сложной формы. Чертеж подложки зеркала показан на рис. 12. Цилиндрическая часть зеркала длиной

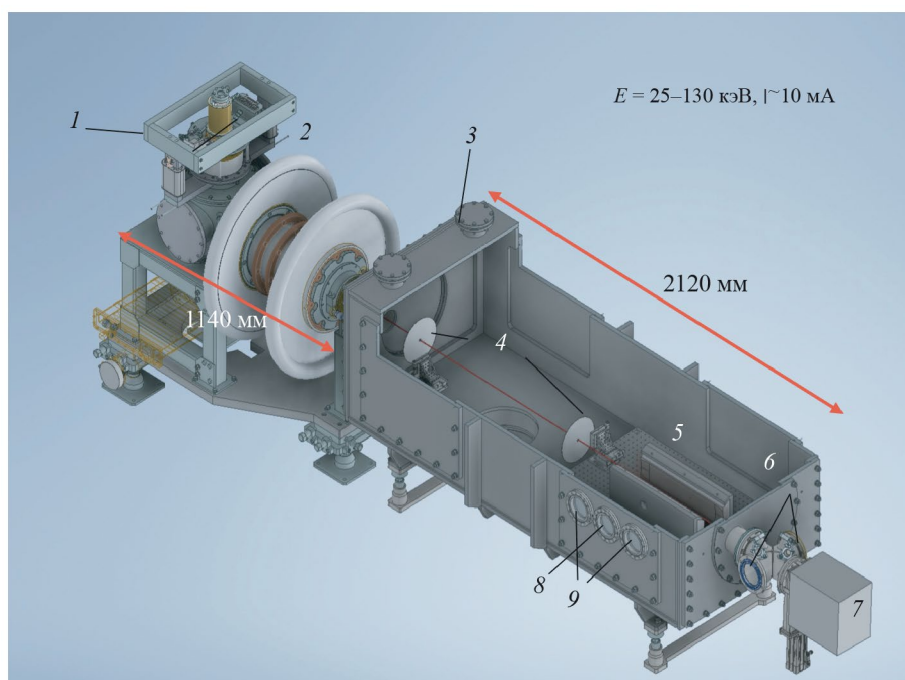


Рис. 11. Модель экспериментальной установки по нейтрализации пучка отрицательных ионов водорода: 1 — источник ионов, 2 — ускорительная трубка, 3 — вакуумная камера нейтрализатора, 4 — формирующие диафрагмы, 5 — фотонный накопитель, 6 — порты оптических диагностик нейтрализованного пучка, 7 — магнитный анализатор пучка, 8 — порт ввода лазерного излучения в камеру, 9 — вспомогательные порты системы ввода излучения в фотонный накопитель.

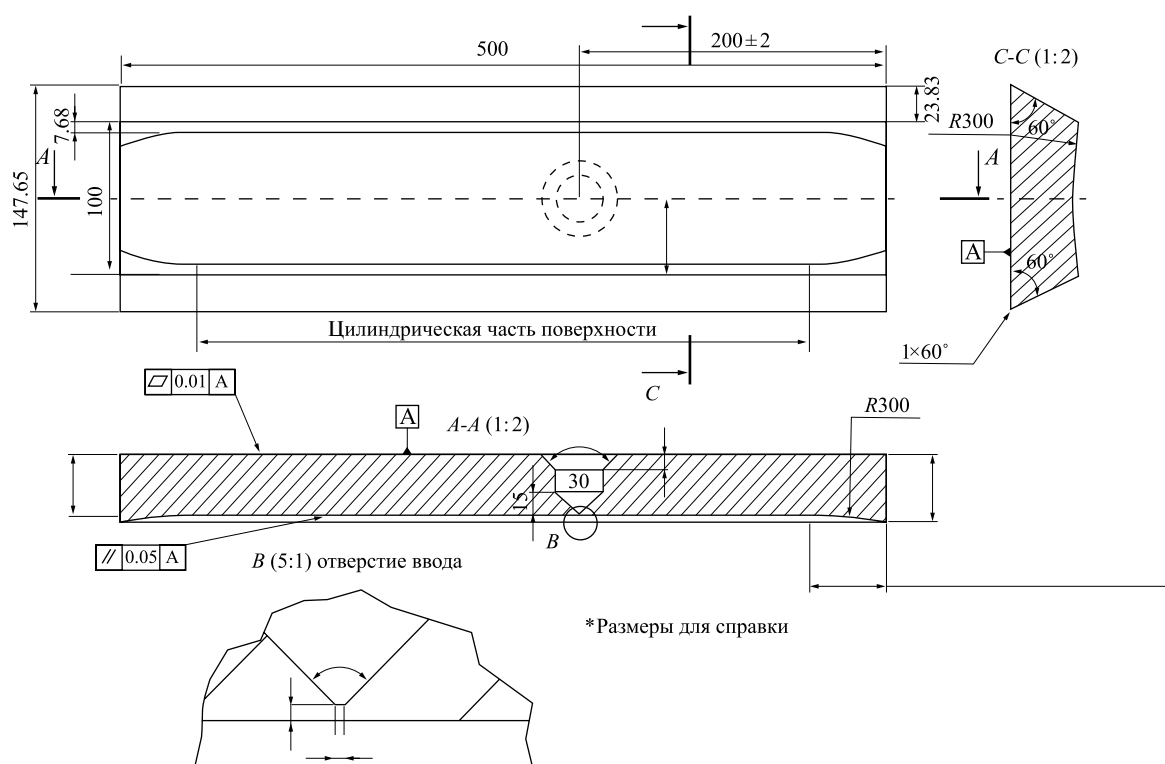


Рис. 12. Чертеж подложки зеркала фотонного накопителя.

400 мм плавно переходит в тороидальную. Радиус цилиндра и малый радиус тора составляют 300 мм, внешний радиус тора — 1000 мм. Поперечный размер светоотражающей поверхности около 100 мм, продольный 500 мм, отверстие ввода также имеет сложную форму для обеспечения ввода сходящегося пучка света и достаточно эффективного съема тепла из окрестности узкой горловины диаметром 0.5 мм. Материалом подложки выбран монокристаллический кремний. Последний обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным кварцем: высокая теплопроводность, облегчающая охлаждение, большая проводимость для снятия заряда и напряжения с диэлектрического напыления, приемлемая технологичность при шлифовке и полировке.

Влияние потоков частиц на время жизни зеркал накопителя с многослойным диэлектрическим покрытием, а следовательно, и оптимизация диафрагм с расположением зеркал заслуживают отдельного исследования. Пока в разрабатываемом проекте расстояние между зеркалами выбрано около 10 см. Это позволит создать с одной стороны эффективно занятую лучами область нейтрализации с шириной около 1 см (см. рис. 13), а с другой достаточно надежно предотвратить бомбардировку зеркальной поверхности высокоэнергичными частицами. После нейтрализатора пучок проводится через узел с окнами для оптического зондирования пучка в магнитный анализатор зарядового состава.

5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

Результаты моделирования накопителя на основе таких зеркал приведены на рис. 13. В отличие от крупномасштабных схем ИТЕРовского типа [18], здесь заложена только одна точка инъекции, что приводит к относительно менее однородному профилю освещенности и нейтрализации, а также к более размытым границам (см. рис. 5а). Отдельные пики интенсивности связаны с расположением точки ввода излучения, а средняя пикированность в поперечном профиле вызвана сгущением лучей вблизи точек поворота при адиабатическом движении. При достаточно мощной накачке (4 кВт) накопителя возможно получить среднюю нейтрализацию по ширине 10 мм до 80%. Имеющийся волоконный лазер производства IPG обеспечивает такую мощность. Качество лазерного пучка позволяет с необходимым углом фокусировки вводить излучение через отверстие в зеркале. На настоящий момент зеркала изготовлены на НПО ЛУЧ. Собранный на них накопитель (см. рис. 14) исследуется на предмет эффективности удержания лучистой энергии. По первым результатам коэффициент накопления составляет около 2000. Это согласуется с отражательной

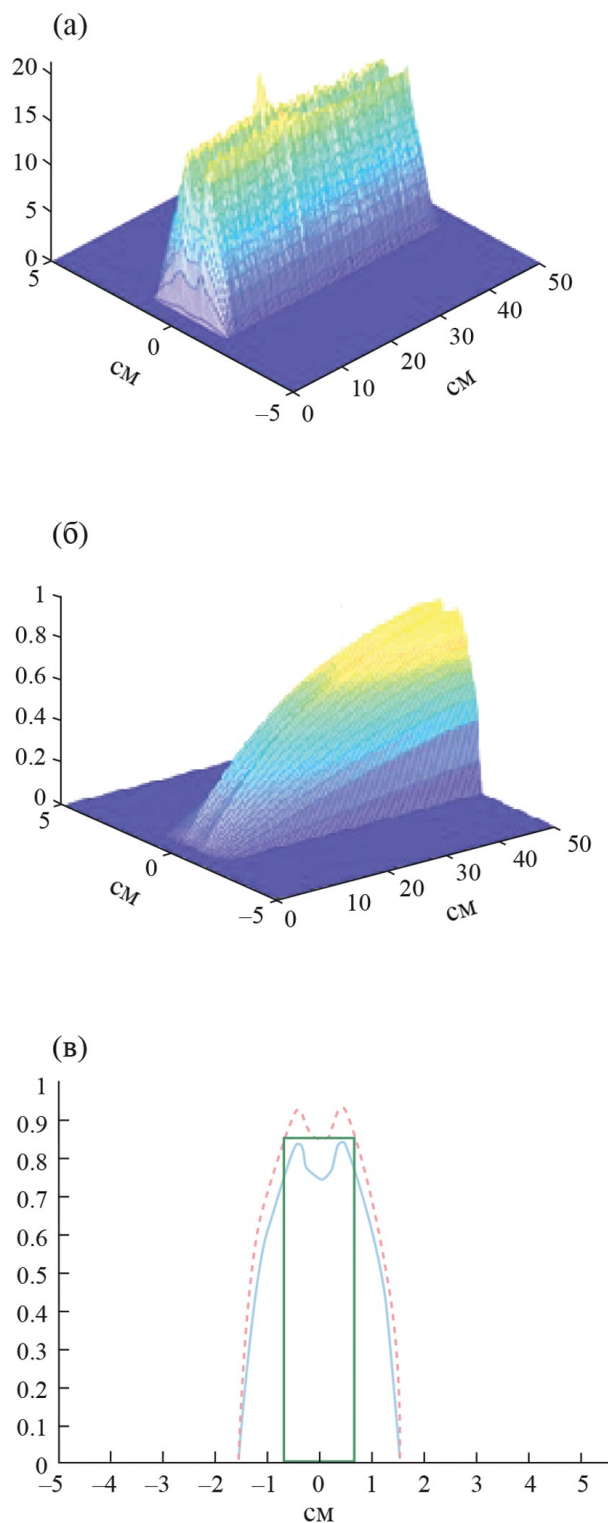


Рис. 13. Численное моделирование эксперимента по нейтрализации: (а) распределение освещенности в области нейтрализации; (б) зависимость степени нейтрализации от координат в области нейтрализации; (в) итоговый профиль нейтрализации сплошная линия соответствует водородному пучку, штриховая — дейтериевому.

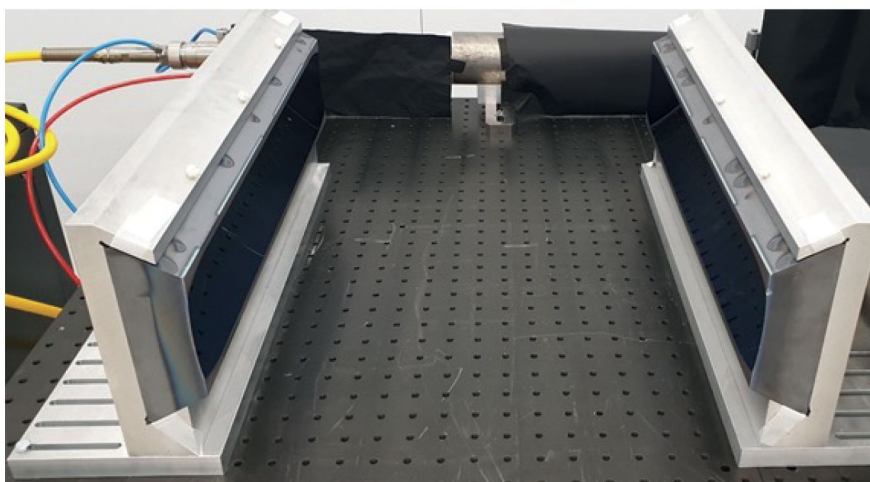


Рис. 14. Фотонный накопитель в исследовании эффективности накопления лучистой энергии.

способностью поверхности 0.9995, заложенной в техническом задании. Исследования (подробности будут опубликованы отдельно) проводятся по схеме и математической ее модели, близкой к [16]. Предварительные результаты доказывают техническую возможность выпуска таких сложных зеркал.

6. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ПО НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПУЧКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

В экспериментальной программе необходимо выделить следующие основные пункты:

- 1) измерение тока отрицательных ионов при модуляции лазерного излучения;
- 2) снятие зависимости степени нейтрализации от энергии частиц пучка и от мощности накачки;
- 3) получение максимально-достижимой нейтрализации в квазистационарном режиме;
- 4) создание системы охлаждения зеркал и переход к *стационарному режиму* работы;
- 5) наработка на отказ.

Первые два пункта ввиду простой зависимости (1) позволят еще раз проверить работоспособность и правильность концепции нерезонансного накопления. Третий, если результат будет соответствовать расчетному (свыше 70% при энергии 100 кэВ), продемонстрирует возможность создания зеркал сложной формы и высокой отражательной способности, с достаточной стойкостью к высоким потокам лучистой энергии на единицу поверхности. Реализация четвертого позволит понять наиболее оптимальные пути к эффективному охлаждению зеркал — проблеме, очевидно, весьма существенной

для больших систем. Пятый пункт определит ориентировочное время жизни нейтрализатора. Оно, вероятно, ограничивается разрушением напыления под действием рассеянных высокоэнергичных частиц. Поскольку физика такого рассеяния основана на парных столкновениях, то полученный результат можно пересчитать на большие установки типа ТРТ и ITER.

Успех предлагаемой концепции фотонной нейтрализации согласно [6] позволит улучшить экономическую привлекательность термоядерной энергетики.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нерезонансное накопление излучения для фотонейтрализации отрицательных ионов в системах нейтральной инжекции имеет неоспоримое преимущество по сравнению с резонансным накоплением из-за коммерческой доступности высокоэффективных источников излучения. Таковые имеют достаточное качество излучения и высокий КПД, до 45% [14]. Несмотря на значительную мощность и затраты на генерацию излучения (см. табл. 1), можно ожидать повышения полного КПД нагревных систем, по крайней мере, в 2 раза. При снижении выходного тока атомов КПД может вырасти еще существеннее из-за упрощения ускорительной части инжектора и повышения из-за этого его эффективности. Для лучшего и более оптимального согласования ширины области, занятой фотонами и сечением пучка, наиболее удобна вытянутая в одном направлении форма.

Главное препятствие на пути к эффективной нейтрализации — производство больших зеркал с высокой общей эффективностью зеркальной поверхности. При этом принципиально важен вопрос о долговечности зеркальной поверхности.

Таким образом, предпринимаемый в ИЯФ СО РАН эксперимент призван дать ответ на вопрос о перспективности нерезонансной фотонной мишени для нейтрализации

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hemsworth R., Decamps H., Graceffa J., Schunke B., Tanaka M., Dremel M., Tanga A., De Esch H.P.L., Geli F., Milnes J., Inoue T., Marcuzzi D., Sonato P. and Zaccaria P. // Nucl. Fusion. 2009. V. 49. P. 045006. DOI: 10.1088/0029-5515/49/4/045006
2. Dimov G. I., Roslyakov G. V. // Nucl. Fusion. 1975. V. 15 P. 551. DOI: 10.1088/0029-5515/15/3/021.
3. Branscomb L. M., Smith S. J. // Phys. Rev. Lett. 1955. V. 98. P. 1028.
4. Smith S. J., Burch D. S. // Phys. Rev. Lett. 1959. V. 2. P. 165.
5. Frolov A. M. // J. Phys. B: Atomic Mol. Opt. Phys. 2004. V. 37. P. 853.
6. Hemsworth R. S., Boilson D. // AIP Conference Proceed. 2017. V. 1869. P. 060001. DOI: 10.1063/1.4995788.
7. Fink J. H., Frank A. M. Photodetachment of electrons from negative ions in a 200 keV deuterium beam source. Lawrence Livermore Natl. Lab., 1975. UCRL-16844.
8. Vanek V., Hursman T., Copeland D., Goebel D. // Proc. 3rd Int. Symp. Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, Brookhaven, 1983. P. 568.
9. Chaibi W., Blondel C., Cabaret L., Delsart C., Drag C., Simonin A. // AIP Confer. Proceed. 2009. V. 1097. P. 385.
10. Kovari M., Crowley B. // Fusion Engineer. Design. 2010. V. 85. P. 745.
11. Simonin A. Jocelyn Achard, Achkasov K., Bechu S., Baudouin C., Baulaigue O., Blondel C., Boeuf J. P., Bresteau D., Cartry G., Chaibi W., Drag C., H.P.L. de Esch, Fiorucci D., Fubiani G., Furno I., Futtersack R., Garibaldi P., Gicquel A., Grand C., Guittienne Ph., Hagelaar G., Howling A., Jacquier R., Kirkpatrick M. J., Lemoine D., Lepetit B., Minea T., Odic E., Revel A., Soliman B. A. and Teste I P. // Nucl. Fusion 2015. V. 55. P. 123020. DOI: 10.1088/0029-5515/55/12/123020.
12. Fiorucci D., Feng J., Pichot M., Chaibi W. // AIP Confer. Proc. 2015. V. 1655. P. 050010. DOI: 10.1063/1.4916467.
13. Fiorucci D., Fassina A. // European Phys. J. D. 2022. V. 76. P. 141. DOI: 10.1140/epjd/s10053-022-00457-9.
14. [https://www.ipgphotonics.com/ru/products/lasers/nepreryvnye-lazery-vysokoy-moshchnosti \[seriya-yls\]](https://www.ipgphotonics.com/ru/products/lasers/nepreryvnye-lazery-vysokoy-moshchnosti [seriya-yls]).
15. Popov S. S., Atlukhanov M. G., Burdakov A. V. & Ushkova M. Yu. // Opt. Spectrosc. 2016. V. 121. P. 160. DOI: 10.1134/S0030400X16070183.
16. Оптика и спектроскопия, 2016. Т. 121. № 1. С. 172—176.
17. Popov S. S., Atlukhanov M. Yu., Burdakov A. V. and Ushkova M. Yu. // Laser Phys. 2018. V. 28. P. 096201. DOI: 10.1088/1555-6611/aac654.
18. Popov S. S., Atlukhanov M. G., Burdakov A. V., Ivanov A. A., Kasatov A. A., Kolmogorov A. V., Vakhrushev R. V., Ushkova M. Yu., Smirnov A. and Dunaevsky A. // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. P. 096016. DOI: 10.1088/1741-4326/aac602.
19. Popov S. S., Atlukhanov M. G., Burdakov A. V., Ivanov A. A., Kolmogorov A. V., Ushkova M. Yu., Vakhrushev R. V. // AIP Confer. Proc. 21. 2018. P. 2011. P. 060005. DOI: 10.1063/1.5053334.
20. Бельченко Ю. И., Бурдаков А. В., Давыденко В. И., Горбовский А. И., Емелев И. С., Иванов А. А., Санин А. Л., Сотников О. З. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 1031. DOI: 10.31857/S0367292121110135.
21. Belchenko Y. I., Davydenko V. I., Derevyankin G. E., Dimov G. I., Dudnikov V. G., Morosov I. I., Roslyakov G. V., Schabalin A. L. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. P. 378.
22. Sanin A., Belchenko Yu., Ivanov A., Gmyrya A. // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. P. 123314. DOI: 10.1063/1.5128590.

Study of the Method of Photon Neutralization of Powerful Beams of Negative Ions at the Budker Institute of Nuclear Physics

S. S. Popov^{a,b,*}, M. G. Atlukhanov^{a,b}, A. V. Burdakov^{a,c}, A. A. Ivanov^a,
V. V. Kurkuchekov^{a,b}, A. L. Sanin^{a,b}, D. I. Skovorodin^{a,b}, Yu. A. Trunev^{a,b},
I. V. Shikhovtsev^{a,b}

^a *Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090, Russia*

^b *Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russia*

^c *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russia*

* *e-mail: s.s.popov@inp.nsk.su*

A short review of the studies carried out at the Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) on the photon neutralization of the beams of negative ions is presented. The principal distinctive feature of the presented approach consists in the nonresonant accumulation of photons in a limited space. Their confinement is based on the adiabatic motion of photons in a system of concave mirrors, which is insensitive to the quality of the injected radiation. An analysis is carried out of the possibility of using the neutralizer based on such a nonresonant photon trap in large-scale installations such as ITER and TRT, and a future experiment is described on the photon neutralization using a beam of negative hydrogen ions with energy up to 130 keV and a current of about 10 mA.

Keywords: photoneutralization, nonresonant photon trap, adiabatic invariants, optical fiber laser, ITER, TRT