

УДК 537.862

КИЛОАМПЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ – КАК ДРАЙВЕР ДЛЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

© 2023 г. Е. С. Сандалов¹, *, С. Л. Сеницкий¹, А. В. Аржанников¹, Д. А. Никифоров¹,
Д. И. Сковородин¹, В. А. Павлюченко¹, Н. С. Гинзбург^{1,2}, Н. Ю. Песков^{1,2},
Р. В. Протас³, Д. Ю. Карасев³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук”,
Нижний Новгород, Россия

³Федеральное государственное унитарное предприятие
“Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е.И. Забабахина”, Снежинск, Россия

*E-mail: E.S.Sandalov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

В Институте ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук совместно с Институтом прикладной физики Российской академии наук был предложен проект субмиллиметрового лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на базе релятивистского электронного пучка, генерируемого в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ). Согласно нашему теоретическому анализу, электронный пучок, создаваемый в ЛИУ (энергия $E_e = 5$ МэВ, ток $I_b = 1-2$ кА, нормализованный эмиттанс $\epsilon_n \sim 1100 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$), является подходящим драйвером для генерации субгигаваттных импульсов когерентного электромагнитного излучения в субмиллиметровом диапазоне (0.3–1 ТГц). Представлены основные предложения по созданию ЛСЭ-генератора на базе электронного пучка линейного индукционного ускорителя, изложены основные задачи проекта и описаны предлагаемые методы их решения. Обсуждаются результаты электронно-оптических экспериментов по формированию пучка, предназначенного для использования в лазере на свободных электронах.

DOI: 10.31857/S0367676522701228, EDN: AAEXFF

ВВЕДЕНИЕ

Проект мощного лазера на свободных электронах, способного генерировать импульсы когерентного электромагнитного излучения в диапазоне частот 0.3–1 ТГц, развивается в настоящее время в сотрудничестве ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород) [1, 2]. Основой этого проекта стал новый линейный индукционный ускоритель (ЛИУ), построенный недавно ИЯФ СО РАН совместно с ВНИИТФ-РФЯЦ [3–5]. Этот ЛИУ позволяет формировать релятивистские электронные пучки (РЭП) с энергией до 10 МэВ, током до 2 кА, длительностью до 100 нс и нормализованным эмиттансом $\sim 1100 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ [4, 5]. Отличительной особенностью нового ЛИУ от зарубежных аналогичных установок [6–13] является применение дискретной фокусирующей магнитной системы. Эта магнитная система упрощает настройку ЛИУ при

выведении его в оптимальный режим работы и позволяет реализовать условия прохождения пучка, препятствующие развитию его штопорного движения, известного под термином corkscrew motion [14]. Вместе с тем такая магнитная система обеспечивает достаточную устойчивость пучка по отношению к поперечной неустойчивости (VBU-instability) [15–17]. Применение электронного пучка с указанными выше параметрами в сочетании с высокоселективной электродинамической системой ЛСЭ диаметром $\sim 40-50$, где – длина волны генерируемого излучения, позволяет реализовать длинноимпульсные ЛСЭ-генераторы в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах с субгигаваттным уровнем мощности и рекордными значениями энергосодержания в импульсе излучения $\sim 10-100$ Дж [1].

Создание такого источника ТГц-излучения представляет несомненный интерес со стороны

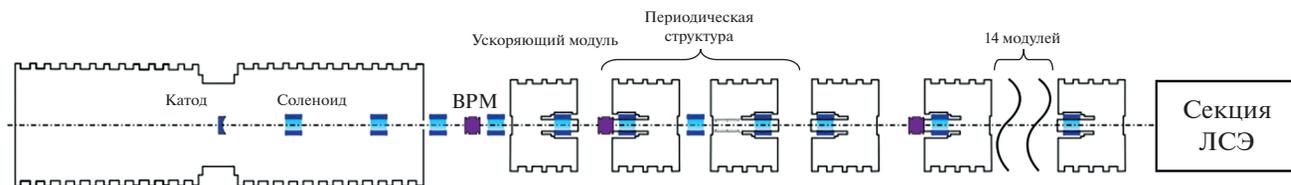


Рис. 1. Общая схема ускорительного комплекса ЛИУ для получения пучка с энергией электронов до 10 МэВ. Ускорятельные модули и инжектор показаны черным цветом, датчики положения пучка изображены фиолетовым, голубым цветом показана дискретная система импульсных магнитных линз.

исследователей в различных научных областях: физике, химии, биологии и медицине, в которых изучают воздействие потоков такого излучения на органические и неорганические вещества, а также на биологические объекты. Высокая спектральная плотность мощности излучения при возможности варьирования его частоты позволит использовать этот генератор для проведения исследований новых явлений и важных закономерностей в суб-ТГц и ТГц диапазонах [18, 19].

Следует отметить, что исследования, направленные на создание мощных ЛСЭ-генераторов ТГц-диапазона, проводятся в научных лабораториях и центрах в значительном числе стран: Германии, Великобритании, США, Кореи, Китая, Японии и России [20–26]. Несмотря на жесткую конкуренцию в области достижения рекордных значений пиковой и средней мощностей излучения в исследуемом диапазоне частот мировым лидером сегодня является Новосибирский ЛСЭ (Novo-FEL), разработанный и созданный в ИЯФ СО РАН [27, 28]. При энергии электронов пучка до 12 МэВ этот ЛСЭ генерирует излучение в частотном интервале 1.2–2.5 ТГц в форме последовательности импульсов с длительностью 30–100 пс при пиковой мощности до 1 МВт с интервалом между импульсами около 180 нс.

Принципиальным отличием предлагаемой нами схемы ЛСЭ от реализованных ранее является использование интенсивных РЭП, формируемых в ЛИУ с большей длительностью импульса тока пучка, достигающей сотен наносекунд. Сочетание такой длительности импульса с килоамперным уровнем тока пучка открывает возможность создания длинноимпульсных ЛСЭ-генераторов когерентного ТГц излучения с относительно узкой спектральной линией при субгигаваттном уровне мощности с энергозапасом в импульсе масштаба 10–100 Дж [2, 29].

Настоящая статья посвящена текущей стадии разработки и создания ЛСЭ-генератора. Представлены результаты тестовых электронно-оптических экспериментов по формированию интенсивного РЭП для применения его в ЛСЭ. Описаны основные составляющие магнитной системы ЛСЭ, которая включает магнитные линзы и соленоид ведущего магнитного поля. Эти составляю-

щие должны обеспечить магнитную компрессию сечения пучка и последующее его прохождение в сжатом состоянии через электродинамическую систему, где пучком накачивается электромагнитная волна в условиях его движения в ондуляторном магнитном поле.

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В КОМПЛЕКСЕ ЛИУ

Схема линейного индукционного ускорителя с дискретной фокусирующей системой (см. [4, 5, 30, 31]), который обеспечивает формирование килоамперного электронного пучка, подходящего для генерации терагерцового излучения в ЛСЭ, представлена на рис. 1. Система формирования пучка включает в себя три основных элемента: инжектор электронов, ускорительная структура и магнитная фокусирующая система. Эмиссия электронов с максимальным током 2 кА происходит с поверхности накаливаемого металлопористого оксидного катода диаметром 180 мм, установленного в инжекторе в условиях экранирования внешних магнитных полей. Электрическое поле, создаваемое ускоряющей системой инжектора, доводит энергию электронов на выходе из инжектора до уровня 2 МэВ. Сформированный в инжекторе электронный пучок далее попадает в ускоряющую структуру ЛИУ, состоящую из периодической последовательности 20 ускорительных модулей. Фокусировка пучка в этой структуре обеспечивается набором из 34 импульсных магнитных линз, длиной около 200 мм каждая. Максимальное магнитное поле в линзах может достигать значений 0.08 Тл. Ускоряющее напряжение в модулях может варьироваться в зависимости от потребностей эксперимента в пределах от 100 до 400 кВ. Таким образом, данный ЛИУ позволяет получать на его выходе сильнооточный РЭП с энергией до 10 МэВ, и током до 2 кА. При этом важно отметить, что в процессе транспортировки и ускорения РЭП в ускорительной структуре ЛИУ диаметр электронного пучка в соответствии с выбранными при настройке ускорителя параметрами фокусирующей системы плавно изменяется от 8 см на ее входе до 4 см на ее выходе.

В рамках этой статьи мы опишем режимы работы ЛИУ при получении пучка электронов с энергией 5 МэВ и током около 1 кА, поскольку именно эти параметры оказались наиболее подходящими для проведения первой серии экспериментов при использовании пучка из ЛИУ в качестве драйвера ЛСЭ-генератора.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ЛИУ И ЕГО КОМПРЕССИИ В СИСТЕМЕ ЛСЭ

Необходимым условием достижения максимальной эффективности генерации ТГц-излучения в ЛСЭ является обеспечение минимальной величины разброса в продольной скорости электронов пучка при его прохождении в электродинамической системе. Согласно нашим оценкам, величина допустимого разброса в продольной скорости электронов определяется выражением [31]:

$$\Delta\beta_z < \Gamma_{rad}\lambda \approx \frac{\sqrt{3}}{2} \left[4\pi \frac{I_b}{I_A} \left(\frac{\lambda}{r_t} \right)^2 \frac{1}{\gamma_0^5} \right]^{1/3}, \quad (1)$$

где Γ_{rad} – пространственный инкремент нарастания неустойчивости, обуславливающей генерацию излучения с длиной волны λ в ЛСЭ, I_b – ток пучка, $I_A = \frac{mc^3}{e}$ – ток Альфвена, r_t – радиус трубы

дрейфа, $\gamma_0 = \gamma_z \left(1 + \left(\frac{eA_u}{mc^2} \right)^2 \right)^{1/2}$ – гамма-фактор в секции ЛСЭ, A_u – амплитуда векторного потенциала ондуляторного магнитного поля, m – масса электрона, c – скорость света, $\gamma_z = 1/\sqrt{1-\beta_z^2}$.

При наличии энергетического и углового разбросов скоростей электронов их вклады в разброс по продольным скоростям оцениваются следующим образом:

$$\Delta\beta_z^{(1)} \approx \frac{\Delta E}{\gamma_0 (E_0 + mc^2)}, \quad (2)$$

$$\Delta\beta_z^{(2)} \approx \frac{\varepsilon_n^2}{2r_b^2 \gamma_0^2}, \quad (3)$$

где ΔE – разброс по энергиям электронов в пучке, ε_n – нормализованный эмиттанс пучка, r_b – радиус пучка в секции ЛСЭ. Оценивая значения этих вкладов для пучка с током 1 кА, энергией 5–7 МэВ,

чей энергетический разброс $\frac{\Delta\gamma}{\gamma_0}$ не превышает 1–2%, а нормализованный эмиттанс около $\sim 1000 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, при $r_t \sim 10 \text{ мм}$ и $\lambda \sim 0.5\text{--}1 \text{ мм}$ легко убедиться, что условие (1) выполняется в полной мере. Следовательно, при уже достигнутых

параметрах электронного пучка, генерируемого в ЛИУ, такой пучок может быть использован в качестве драйвера ЛСЭ с максимальной эффективностью генерации излучения на уровне 2–3% [1, 29]. Необходимо отметить, что для уменьшения энергетического и углового разбросов электронов пучка в ЛИУ была проделана большая работа [31] по настройке режимов работы ускорителя, обеспечивающих необходимое качество транспортировки пучка. Рассмотрим один из аспектов этой работы, касающийся обеспечения устойчивости пучка при его транспортировке и ускорении в ЛИУ. Известен целый ряд неустойчивостей сильноточных электронных пучков в ЛИУ, которые влияют на процесс его транспортировки и ускорения: поперечная неустойчивость электронного пучка (BBU-instability) [15–17]; штопорное движение пучка (corkscrew motion) [14], ионно-шланговая неустойчивость (ion-hose instability) [32]; неустойчивость электронного пучка, обусловленная смещением зарядов изображения (image displacement instability) [33]. Среди указанных неустойчивостей наиболее опасной для проводки пучка в нашем ЛИУ является поперечная неустойчивость. В результате развития именно этой неустойчивости не только наблюдается ухудшение микроскопических характеристик пучка, но более того, при значительной величине ее инкремента может происходить потеря пучка на стенках камеры дрейфа. Механизм возбуждения этой неустойчивости определяется взаимодействием сильноточного РЭП с полями дипольных мод, возбуждаемых им в полостях ускорительных модулей [15, 16, 30]. Вследствие этого взаимодействия электронный пучок начинает колебаться в поперечном сечении вакуумной камеры с амплитудой, экспоненциально растущей по мере его продвижения по структуре ускорителя. В случае ЛИУ с непрерывным фокусирующим магнитным полем обобщенное выражение для амплитуды колебаний центроида пучка (центроид – это центр распределения плотности заряда в поперечном сечении пучка), основанное на результатах теории Нила–Купера–Холла, описывается следующим выражением [16]:

$$\xi_N = \xi_0 \left[\frac{\gamma_0}{\gamma_N} \right]^{1/2} \exp(\Gamma N), \quad (4)$$

$$\Gamma \propto \frac{I_b Q k}{B}, \quad (5)$$

$$k = \frac{\left(\int B_{\perp} dz \right)^2}{2U}, \quad (6)$$

где ξ_0 – это начальная амплитуда колебаний центроида пучка, N – номер ускорительного модуля, γ_0 и γ_N – гамма-факторы пучка на выходе из инжектора и после N -го ускорительного модуля, Γ – инкремент поперечной неустойчивости, I_b – ток пучка, B – среднее магнитное поле фокусирующей

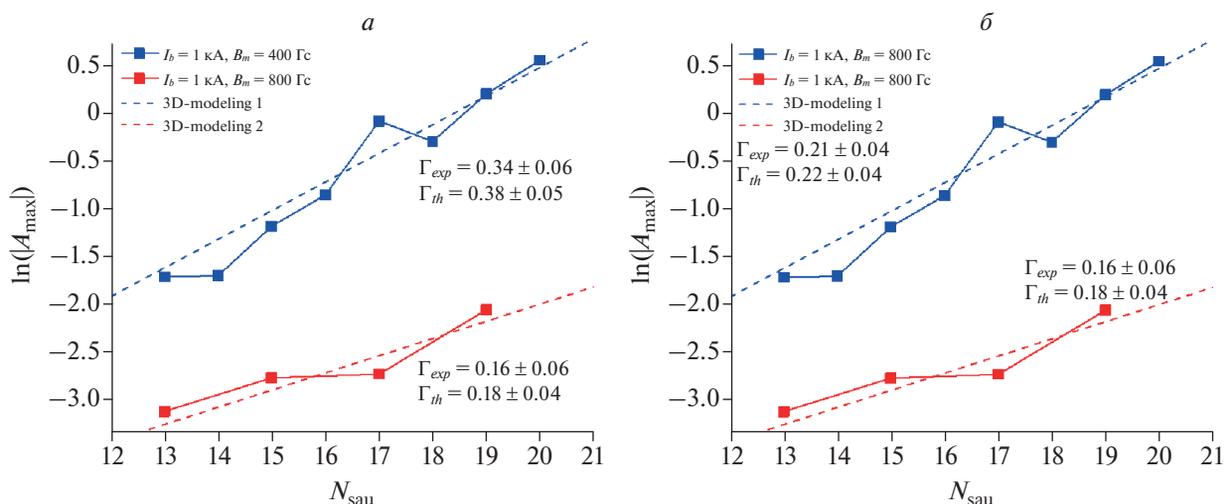


Рис. 2. Зависимости логарифма максимальной амплитуды колебаний полей моды от номера модуля ЛИУ в трех режимах его работы. Режимы с одинаковым током пучка 1 кА и разными полями в фокусирующей системе ЛИУ (а): $B_m = 0.04$ Тл и $B_m = 0.08$ Тл; режимы в одинаковом поле $B_m = 0.08$ Тл и разными величинами тока пучка: 1 и 1.4 кА (б). Пунктиром показаны линейные аппроксимации экспериментальных точек.

шей системы, k – коэффициент связи этой моды с пучком, U и Q – усредненная по времени энергия этой моды и ее добротность, B_{\perp} – поперечная компонента магнитного поля дипольной моды по отношению к оси ускорителя.

Поскольку выражения (4)–(6) дают только приближенную оценку амплитуды колебаний пучка в зависимости от основных параметров ЛИУ, нами был разработан вычислительный комплекс программ IRBIS (Investigation of the relativistic beam instability) для моделирования поперечной неустойчивости в ЛИУ с дискретной фокусировкой [34], позволяющий моделировать ее развитие для каждого режима работы ускорителя. С помощью этого комплекса программ были поэтапно рассчитаны, а затем реализованы в экспериментах несколько модификаций геометрии ускорительных модулей, позволившие существенно уменьшить инкремент поперечной неустойчивости [30]. Эти меры позволили нам на первом этапе строительства ЛИУ, состоящем из 8 ускорительных модулей, уменьшить этот инкремент на порядок величины. В результате этого удалось осуществить устойчивую транспортировку электронного пучка с током 2 кА и энергией 5 МэВ при амплитуде поперечных колебаний пучка, не превышающей 0.1 мм на выходе из ускорителя [4, 34].

На следующем этапе ускорительная структура ЛИУ была увеличена с 8 до 20 модулей, а магнитная фокусирующая система – до 34 магнитных линз с максимальным полем на оси 0.08 Тл, при этом общая длина ускорителя достигла 30 м. Для дополнительного уменьшения инкремента поперечной неустойчивости, который пропорционален добротности мод (см. (5)), нами был рассчи-

тан и применен в ускорительных модулях набор поглотителей энергии мод на основе радиопоглощающего материала. При этом оказалось, что добротности всех наиболее неустойчивых дипольных мод, лежащих в частотном диапазоне 700–850 МГц и обладающих наибольшими коэффициентами связи с пучком, были понижены до уровня 15–20, кроме одной моды с частотой 450 МГц, добротность которой была около 30–35. Для сопоставления результатов моделирования и экспериментальных данных нами была проведена регистрация сигналов с быстрых трансформаторов тока каждого ускорительного модуля, которые пропорциональны полям пучка и возбуждаемых им дипольных мод [34]. Поскольку в спектрах этих сигналов превалировала гармоника с частотой 450 МГц, то для получения экспериментального значения инкремента мы проанализировали зависимость максимальной амплитуды колебаний сигнала с трансформатора тока с этой частотой в течение полочки импульса тока длительностью ~ 100 нс от номера ускорительного модуля. Сравнительный анализ полученных в расчетах и экспериментах инкрементов неустойчивости представлен на рис. 2. На этом рисунке точками показана логарифмическая зависимость максимальной амплитуды колебаний сигнала, зарегистрированная с помощью быстрых трансформаторов тока, а сам инкремент Γ_{exp} был определен по тангенсу угла наклона линейной аппроксимации зарегистрированных данных. Цифрами на данном рисунке подписаны значения расчетного Γ_{th} и экспериментального Γ_{exp} значений инкремента поперечной неустойчивости для различных режимов работы ЛИУ.

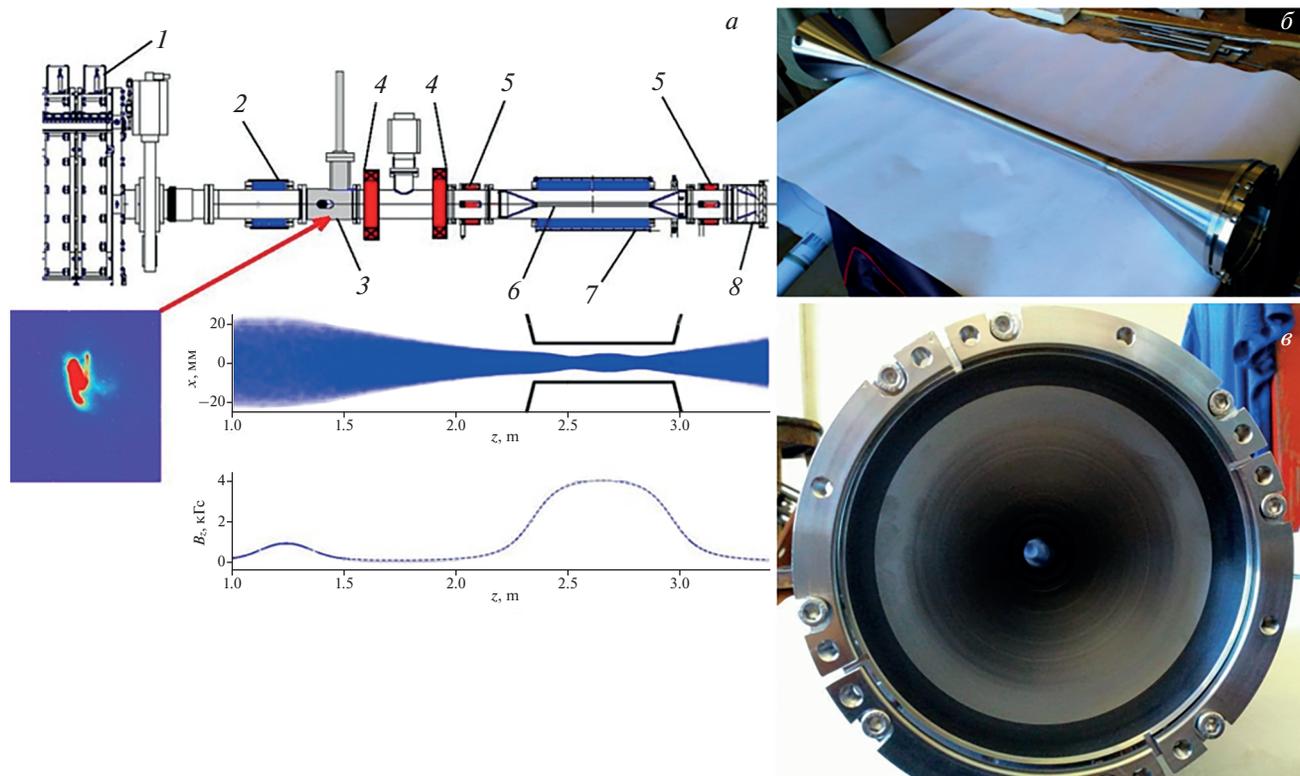


Рис. 3. Схема эксперимента по компрессии пучка (*a*): 1 – выходной ускоряющий модуль, 2 – согласующая магнитная линза, 3 – датчик переходного излучения, 4 – дипольные корректоры, 5 – датчики положения пучка, 6 – вакуумный канал для транспортировки сжатого пучка, 7 – импульсный соленоид, 8 – коллектор пучка. Синим цветом показана расчетная огибающая электронного пучка при его инжекции в секцию ЛСЭ; фотографии вакуумного канала (*b*) и (*c*).

Как можно увидеть из рис. 2, полученные в расчетах и в экспериментальных измерениях величины инкрементов поперечной неустойчивости пучка с током 1–1.4 кА согласуются с точностью измерения этой величины, которая составляет около 20%. Таким образом мы показали, что инкремент поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ с дискретной магнитной конфигурацией уменьшается по мере повышения магнитного поля в линзах и увеличивается с ростом тока, что аналогично результатам, зарегистрированным в случае ЛИУ с фокусировкой непрерывным магнитным полем (см. [17]). В ходе наших экспериментов по прохождению пучка в ЛИУ установлена величина параметра $\xi_0 \sim 1$ мкм. В то же время для применения пучка в качестве драйвера ЛСЭ-генератора необходимо удовлетворить требованию по ограничению амплитуды колебаний пучка на выходе из ЛИУ, которое имеет вид $\xi_N < 1$ мм. Исходя из этих значений параметров и формулы (4), можно указать границу для максимальной величины инкремента поперечной неустойчивости Γ , при которой амплитуда колебаний центроида пучка не превысит 1 мм на его выходе из ЛИУ, состоящего из 20 ускорительных модулей. Эта граница дается выражением $\Gamma \leq 0.38$.

Помимо исследования устойчивости пучка в ЛИУ, мы также провели тестовые эксперименты по компрессии и прохождению электронного пучка в сжатом состоянии через секцию ЛСЭ при ее длине 0.6 м. Эти эксперименты важны для оценки перспективы реализации предлагаемой схемы генератора терагерцового излучения. Как уже упоминалось во Введении, диаметр электродинамической системы ЛСЭ на основе модифицированных брэгговских отражателей [35], при котором она сохраняет свои высокоселективные свойства и обеспечивает устойчивую одномодовую генерацию излучения, не должен превышать $\sim 40\lambda$. При характерной длине волны излучения $\lambda = 0.5$ мм, которая лежит в рабочей области ЛСЭ, диаметр электродинамической системы должен быть не более 20 мм. Таким образом, для осуществления эффективной транспортировки пучка в трубе дрейфа с таким диаметром на расстояние 1–2 м в условиях поперечных колебаний в ондуляторном магнитном поле, пучок необходимо сжать от его исходного диаметра на выходе ЛИУ $d_1 = 4$ см до диаметра в резонаторе ЛСЭ $d_2 = 5$ –10 мм.

Для проведения тестового эксперимента по сжатию сечения пучка (см. схему на рис. 3), электронно-оптическая система ЛИУ была дополне-

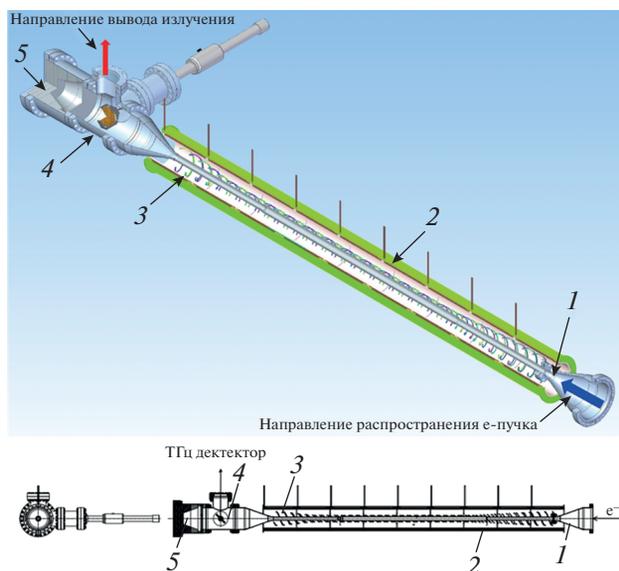


Рис. 4. Трехмерный вид секции ЛСЭ, включая систему компрессии сечения пучка, систему сброса пучка на коллектор и систему вывода излучения (а). Общий чертеж секции ЛСЭ (б). Цифрами указаны: 1 – вакуумная камера с коническими расширениями на концах, 2 – магнитные линзы, 3 – спиральная намотка ондулятора, 4 – система вывода излучения под углом 90 градусов к движению пучка, 5 – могильник для сброса пучка. Синей стрелкой показано направление распространения электронного пучка, красной – направление вывода излучения.

на импульсным соленоидом (7) длиной 0.65 м с магнитным полем на оси 0.4 Тл, осуществляющим транспортировку сжатого пучка, и магнитной линзой (2), согласующей размеры пучка на выходе из ЛИУ с требуемым размером на входе в соленоид (7) [5, 31]. Необходимо отметить, что выбранный нами профиль магнитного поля на оси системы обеспечивает минимальную амплитуду пульсаций радиуса пучка < 1 мм в вакуумном канале (б). Подробное описание результатов экспериментов приведено в [31].

В ходе проведения экспериментов установлено, что токопрохождение пучка с энергией 5 МэВ и током 900 А через вакуумный канал системы компрессии сечения пучка в течение времени удержания тока на неизменном уровне в условиях, когда энергия электронов изменяется незначительно, составило около 85–90%. Однако на переднем и заднем фронтах импульса пучка наблюдалось заметное снижение этого параметра, что связано с существенным изменением энергии электронов.

ОБЩАЯ СХЕМА ЛСЭ

После успешной демонстрационной серии экспериментов по компрессии пучка, описанной ранее, в качестве первого этапа реализации проекта ЛСЭ-генератора на основе пучка ЛИУ нами спроектирована секция ЛСЭ, общий вид и чертеж которой представлены на рис. 4. Видно, что секция ЛСЭ состоит из следующих элементов:

а) вакуумная камера (1) длиной 2 м, внутри которой смонтирована электродинамическая система с внутренним диаметром 20 мм;

б) система магнитной компрессии пучка (2), состоящая из девяти импульсных магнитных линз со встроенными дипольными корректорами. Каждая линза представляет собой импульсный аксиально-симметричный соленоид, отстоящий от соседней линзы на расстоянии 5 мм и имеющий следующие параметры: длина 0.22 м, диаметр 0.15 м, количество витков 120, максимальное магнитное поле на оси 0.6 Тл;

в) спиральная обмотка ондулятора (3), создающая винтовое поле, необходимое для накачки поперечных колебаний электронов пучка [33];

г) система вывода излучения (4), внутри которой расположено поворотное зеркало в виде тонкой фольги, наклоненной под углом 45° к направлению движения пучка;

д) система сброса пучка (5), необходимая для существенного уменьшения мощности потока рентгеновского излучения, затрудняющего регистрацию параметров пучка и потока ТГц излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны и реализованы меры для обеспечения устойчивой транспортировки электронного пучка в ЛИУ. Доказано, что модификация ускорительных модулей совместно с увеличением магнитного поля в фокусирующей системе ЛИУ позволяют по-

давить развитие поперечной неустойчивости электронного пучка с током до 1 кА и энергией до 10 МэВ путем снижения ее инкремента до уровня $\Gamma < 0.16$.

В ходе тестовых экспериментов продемонстрирована компрессия пучка по диаметру от 40 до 10 мм при энергии электронов 5 МэВ и токе 1 кА с последующей его транспортировкой в сжатом состоянии на расстояниях 0.6 м внутри вакуумного канала ЛСЭ с диаметром 20 мм в условиях ведущего магнитного поля.

Создана конструкция секции ЛСЭ, включающая магнитную и вакуумную системы для осуществления компрессии и транспортировки пучка, а также систему для вывода излучения. Проработаны детали конструкции винтового ондулятора. В настоящее время создается техническая документация и идет изготовление основных компонентов ЛСЭ-генератора. Достигнутые результаты подтверждают возможность реализации проекта мощного ЛСЭ-генератора в диапазоне частот 0.3–1 ТГц на основе пучка, генерируемого ускорителем ЛИУ.

Основная доля исследований проведена в ИЯФ СО РАН. Результаты исследований, представленные в разделах III, IV, достигнуты благодаря частичной финансовой поддержке со стороны Российского научного фонда (проект № 19-12-00212). Эксперименты по генерации в ЛИУ пучка электронов с током 1 кА и энергией 5–8.5 МэВ проводились в коллаборации с РФЯЦ ВНИИТФ.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.В. Бурдакову, Н.А. Винокурову и Е.К. Кенжебулатову за полезные замечания и обсуждения в ходе проведения исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Malkin A.M. et al.* // Proc. 44th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (Paris, 2019). Art. No. 5864231.
2. *Peskov N.Yu., Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S. et al.* // Proc. SPIE. 2020. V. 11582. Art. No. 1158207.
3. *Логачев П.В., Кузнецов Г.И., Корепанов А.А. и др.* // ПТЭ. 2013. № 6. С. 42.
4. *Nikiforov D.A., Blinov M.F., Fedorov V.V. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. P. 197.
5. *Sandalov E.S., Sinitsky S.L., Skovorodin D.I. et al.* // 2021 IEEE International Conf. on Plasma Science (Lake Tahoe, 2021). Art. No. 21360392
6. *Ekdahl C.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2022. V. 30. No. 1. P. 254.
7. *Ekdahl C., Sinitsky S.L., Skovorodin D.I. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34. P. 460.
8. *Merle E., Anthouard Ph., Bardy J. et al.* // Proc. 5th European Conference EPAC 96 (Sitges, 1996). Report EPAC-1996-THP014G.
9. *Ekdahl C.* // Beam dynamics for ARIA. Tech. Rep. LA-UR-14-274454. Los Alamos: Los Alamos Nat. Lab., 2014.
10. *Ekdahl C.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43. No. 12. P. 4123.
11. *Ekdahl C.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2021. V. 49. No. 10. P. 3092.
12. *Crawford M., Barraza J.* // Proc. 2017 IEEE 21st Int. Conf. Pulsed Power (Brighton, 2017). P. 1.
13. *Ekdahl C.* Beam dynamics for the Scorpius conceptual design report. Tech. Rep. LA-UR-17-29176. Santa Fe: Los Alamos Nat. Lab., 2017.
14. *Ekdahl C.* // IEEE Tran. Plasma Sci. 2021. V. 49. No. 11. P. 3548.
15. *Panofsky W.K.H., Bander M.* // Rev. Sci. Instrum. 1968. V. 39. P. 206.
16. *Neil V.K., Hall L.S., Cooper R.K.* // Particle Accel. 1979. V. 9. No. 4. P. 213.
17. *Ekdahl C., Coleman J.E., McCuistian B.T.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44. No. 7. P. 1094.
18. *Faries W., Gehring K.A., Richards P.L. et al.* // Phys. Rev. 1969. V. 180. No. 2. P. 363.
19. *Morris J.R., Shen Y.R.* // Opt. Commun. 1971. V. 3. No. 2. P. 81.
20. *Gallerano G.P., Doria A., Giovenale E.* // Terahertz Sci. Technol. 2014. V. 7. No. 4. P. 160.
21. *Jeong Y.U., Lee B.C., Kim S.K. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2001. V. 475. P. 47.
22. *Byrd J.M., Leemans W. P., Loftsdottir A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. Art. No. 224801.
23. *Carr G.L., Martin M.C., McKinney W.R. et al.* // Nature. 2002. V. 420. P. 153.
24. *Gover A., Faingersha A., Eliran A. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2004. V. 528. P. 23.
25. *Van Der Meer A.F.G.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2004. V. 528. P. 8.
26. *Prazeres R., Glotin F., Ortega J.M. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2004. V. 528. P. 83.
27. *Shevchenko O.A., Arbutov V.S., Vinokurov N.A. et al.* // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 13.
28. *Kulipanov G.N., Bagryanskaya E.G., Chesnokov E.N.* IEEE Trans. THz Sci. Technol. 2015. V. 5. No. 5. P. 798.
29. *Sandalov E.S., Sinitsky S.L., Nikiforov D.A. et al.* // 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz, 2021). P. 1.
30. *Sandalov E.S., Sinitsky S.L., Skovorodin D.I. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2021. V. 49. No. 2. P. 718.
31. *Nikiforov D.A., Petrenko A.V., Sinitsky S.L. et al.* // J. Instrum. 2021. V. 16. Art. No. 11024.
32. *Ekdahl C.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2019. V. 47. No. 1. P. 300.
33. *Godfrey B.B., Hughes T.P.* // 1989 IEEE Particle Accelerator Conference "Accelerator Science and Technology". V. 2. P. 1023.
34. *Сандалов Е.С., Синицкий С.Л., Сковородин Д.И. и др.* // Сибир. физ. журн. 2022. Т. 17. № 1. С. 5.
35. *Ginzburg N.S., Zaslavskii V.Y., Zotova I.V. et al.* // JETP Lett. 2010. V. 91. P. 266.

The electron beam of the linear induction accelerator with kiloampere current as a driver for the submillimeter free electron laser

E. S. Sandalov^{a, *}, S. L. Sinitsky^a, A. V. Arzhannikov^a, D. A. Nikiforov^a, D. I. Skovorodin^a, V. A. Pavlyuchenko^a, N. S. Ginzburg^{a, b}, N. Yu. Peskov^{a, b}, R. V. Protas^c, D. Yu. Karasev^c

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

^b*Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^c*Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, 456770 Russia*

**e-mail: E.S.Sandalov@inp.nsk.su*

The project of a submillimeter free electron laser (FEL) based on a relativistic electron beam (REB) generated in a linear induction accelerator (LIA) was proposed at the BINP SB RAS together with the IAP RAS. According to our theoretical analysis, the electron beam generated in the LIA (energy $E_e = 5\text{--}10$ MeV, current $I_b = 1\text{--}2$ kA, normalized emittance $\epsilon_n \sim 1100 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$) is a suitable driver for generating sub-GW pulses of coherent EM radiation in submm range (0.3–1 THz). The main proposals for the creation of the FEL based on the electron beam generated in the LIA are presented, the main project tasks are outlined, and the proposed methods for their solution are described. The results of electron-optical experiments on the formation of an electron beam intended for FEL applications are presented.