

Научная статья

УДК 537.533.7

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29

**Исследование инкремента поперечной неустойчивости
килоамперного электронного пучка в ЛИУ для его применения
в терагерцовом ЛСЭ**

**Евгений Сергеевич Сандалов¹, Станислав Леонидович Синицкий¹,
Дмитрий Иванович Сквородин¹, Андрей Васильевич Аржанников¹,
Павел Владимир Логачев¹, Петр Алексеевич Бак¹,
Кирилл Игоревич Живанков¹, Данила Алексеевич Никифоров¹,
Алексей Васильевич Петренко¹, Наум Самуилович Гинзбург¹,
Николай Юрьевич Песков¹, Роман Викторович Протас²**

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
Снежинск, Россия

¹E.S.Sandalov@inp.nsk.su; ¹S.L.Sinitsky@inp.nsk.su;
¹Skovorodin@inp.nsk.su; ¹A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su;
¹P.V.Logatchov@inp.nsk.su; ¹P.A.Bak@inp.nsk.su;
¹K.I.Zhivankov@inp.nsk.su; ¹D.A.Nikiforov@inp.nsk.su;
¹A.V.Petrenko@inp.nsk.su; ¹ginzburg@appl.sci-nnov.ru;
¹peskov@appl.sci-nnov.ru; ²vniitf@vniitf.ru

Аннотация

В ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ ВНИИТФ ведутся исследования, направленные на получение в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ) пучка релятивистских электронов с энергией до 20 МэВ, током до 2 кА и длительностью до 200 нс при нормализованном эмиттансе около 1000 п-мм-мрад. Генерация электронных пучков с такими параметрами требует тщательного исследования всех основных источников возмущений траекторий электронов пучка, создаваемых различного рода неустойчивостями, возникающими при транспортировке и ускорении сильноточного пучка в ускорительной структуре ЛИУ. Для проведения экспериментальной серии по измерению динамики поперечных колебаний пучка был использован набор быстрых трансформаторов тока, применяемых для регистрации тока пучка и полей мод, возбуждаемых этим пучком в структуре. Данные измерения проведены при прохождении в структуре пучка электронов с энергией 8,5 МэВ и током 1 кА в различных режимах по величине фокусирующих магнитных полей в ЛИУ. В результате проведенных измерений были зарегистрированы колебания электромагнитного поля собственных мод в ускорительных модулях ЛИУ, и была установлена зависимость амплитуды колебаний ЭМ-поля этих мод от номера ускорительного модуля. Эта зависимость была сопоставлена с результатом моделирования динамики развития поперечной неустойчивости в ЛИУ, которое проведено с использованием созданного программного комплекса, что в итоге позволило определить величину инкремента поперечной неустойчивости релятивистского электронного пучка в данных экспериментальных условиях. Исходя из полученных результатов проведен анализ возможности использования пучка, генерируемого ЛИУ, в качестве драйвера ЛСЭ-генератора когерентных импульсов ТГц-излучения в диапазоне частот 0,3–1,2 ТГц с субгигаваттным уровнем мощности.

Ключевые слова

линейный индукционный ускоритель, сильноточный релятивистский электронный пучок, поперечная неустойчивость пучка, ускорительный модуль, дипольные колебания, терагерцовый ЛСЭ

© Сандалов Е. С., Синицкий С. Л., Сквородин Д. И., Аржанников А. В., Логачев П. В.,
Бак П. А., Живанков К. И., Никифоров Д. А., Петренко А. В., Гинзбург Н. С., Песков Н. Ю.,
Протас Р. В., 2022

Для цитирования

Сандалов Е. С., Сеницкий С. Л., Сквородин Д. И., Аржанников А. В., Логачев П. В., Бак П. А., Живанков К. И., Никифоров Д. А., Петренко А. В., Гинзбург Н. С., Песков Н. Ю., Протас Р. В. Исследование инкремента поперечной неустойчивости килоамперного электронного пучка в ЛИУ для его применения в терагерцовом ЛСЭ // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 16–29. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29

Investigation of the Increment of Transverse Instability of a Kiloampere Electron Beam in a Linear Induction Accelerator for Its Use in a Terahertz FEL

**Evgeniy S. Sandalov¹, Stanislav L. Sinitsky¹,
Dmitrii I. Skovorodin¹, Andrey V. Arzhannikov¹,
Pavel V. Logachev¹, Petr A. Bak¹,
Kirill I. Zhivankov¹, Danila A. Nikiforov¹,
Alexey V. Petrenko¹, Naum S. Ginzburg¹,
Nikolai Yu. Peskov¹, Roman V. Protas²**

¹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russia

²Russian Federal Nuclear Centre — The All-Russian Research Institute
of Technical Physics named after E. I. Zababakhin
Snezhinsk, Russia

¹E.S.Sandalov@inp.nsk.su; ¹S.L.Sinitsky@inp.nsk.su;
¹Skovorodin@inp.nsk.su; ¹A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su;
¹P.V.Logatchov@inp.nsk.su; ¹P.A.Bak@inp.nsk.su;
¹K.I.Zhivankov@inp.nsk.su; ¹D.A.Nikiforov@inp.nsk.su;
¹A.V.Petrenko@inp.nsk.su; ¹ginzburg@appl.sci-nnov.ru;
¹peskov@appl.sci-nnov.ru; ²vniitf@vniitf.ru;

Abstract

The Institute of Nuclear Physics SB RAS in cooperation with the Russian Federal Nuclear Center VNIITF performs a series of researches aimed at acquiring a relative electron beam with energy up to 20 MeV, current up to 2 kA, and duration up to 200 ns at normalized emittance ca. 1000 π -mm-rad in a linear induction accelerator (LIA). In order to generate electron beams with such parameters we require thorough investigation of all main sources of perturbation of electron beam trajectory caused by different instabilities that occur during the transport and acceleration of a high current beam in the accelerating structure of LIA. For the experimental series on measuring the dynamics of transverse oscillation of a beam, we applied a set of fast current transformers which are used for registration of beam current and mode fields caused by this beam in the structure. These measurements were performed for the electron beam with the energy of 8.5 MeV and current of 1 kA going through the structure at different modes of focusing magnetic fields size in LIA. As a result, we registered oscillation of the electromagnetic field of normal modes in the accelerating modules of LIA, as well as we determined the dependence of the oscillation amplitude of these modes' EM field on the number of accelerating module. This dependence was compared with the result of modeling of development dynamics of transverse instability in LIA that was performed using the created program system. This allowed us to determine the size of the increment of transverse instability of a relativistic electron beam under the given experimental conditions. Based on the acquired results, we made the analysis of possibility to use the beam generated in ILA as a driver for the FEL generator of coherent impulses of THz radiation within the frequency range of 0.3–1.2 THz with a sub-gigawatt level of power.

Keywords

linear induction accelerator, high-current relativistic electron beam, transverse beam instability, accelerating module, dipole oscillation, terahertz FEL

For citation

Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I., Arzhannikov A. V., Logachev P. V., Bak P. A., Zhivankov K. I., Nikiforov D. A., Petrenko A. V., Ginzburg N. S., Nikolai Yu. Peskov N. Yu., Protas R. V. Investigation of the Increment of Transverse Instability of a Kiloampere Electron Beam in a Linear Induction Accelerator for Its Use in a Terahertz FEL. Siberian Journal of Physics. 2022. Vol. 17, no. 2, pp. 16–29. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29

Введение

В настоящее время в ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ ВНИИТФ ведутся интенсивные работы по созданию уникального ускорительного комплекса для генерации сильноточного электронного пучка с параметрами: энергией электронов E_e до 20 МэВ, током I_b до 2 кА, длительностью импульса τ_b до 200 нс и нормализованным эмиттансом на уровне $\sim 1000 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$ [1; 2]. Такие параметры пучка в полной мере сопоставимы с параметрами пучков, генерируемых лучшими зарубежными линейными индукционными ускорителями [3; 4]. Основным отличием нашего ускорительного комплекса от его зарубежных аналогов является использование дискретной магнитной фокусировки пучка посредством коротких линз в отличие от применения непрерывного магнитного поля в абсолютном большинстве других ЛИУ с подобными параметрами. С одной стороны, такой тип фокусировки заметно понижает устойчивость пучка к различным возмущениям, характерным для ЛИУ, но с другой стороны – наряду с простотой конструкции и экономичностью, существенно облегчает процессы настройки орбиты пучка и компенсации несоосностей магнитных полей линз. В этой связи для формирования килоамперных электронных пучков с низким эмиттансом в ЛИУ с дискретной магнитной фокусировкой требуется тщательное исследование различных источников возмущения траектории электронов пучка. В большинстве работ, посвященных проблемам устойчивости пучка в ускорительной структуре ЛИУ, выделяют пять основных источников этих возмущений:

- 1) штопорное движение пучка (corkscrew motion), обусловленное изменением энергии электронов в течение его импульса [5],
- 2) неустойчивость электронного пучка, обусловленная смещением зарядов изображения (Image Displacement Instability) [6],
- 3) ионно-шланговая неустойчивость, обусловленная ионизацией остаточного газа в вакуумной камере при прохождении электронного пучка (Ion-Hose Instability) [7],
- 4) резистивная неустойчивость (Resistive Wall Instability), возникающая в результате воздействия на электронный пучок силы Лоренца со стороны зарядов и токов, индуцируемых пучком в стенках вакуумного канала транспортировки [8],
- 5) поперечная неустойчивость электронного пучка (Beam-Breakup Instability), связанная с возбуждением дипольных мод в полостях ускорительных модулей и приводящая к экспоненциальному росту амплитуды его поперечных колебаний по мере движения пучка в ускорительной структуре ЛИУ [9–12].

Известно, что в режиме работы ЛИУ с большой длительностью импульса тока пучка (более 100 нс) наиболее опасной является именно поперечная неустойчивость, поскольку ее развитие приводит к быстрому росту поперечных колебаний пучка вдоль ускорителя и даже к его частичной потере на стенках канала [12]. Развитие этой неустойчивости имеет резонансный характер и происходит по следующему типичному сценарию [10]. Электронный пучок при движении в ЛИУ, возбуждает собственные дипольные моды в ускорительных модулях ЛИУ, расположенных последовательно друг за другом. В свою очередь, электромагнитные поля этих мод приводят к развитию поперечных колебаний пучка как целого. Амплитуды полей дипольных мод в каждом отдельном ускорительном модуле вначале нарастают по времени, а затем спадают. В то же время, амплитуда поперечных колебаний пучка нарастает приблизительно экспоненциальным образом с увеличением номера ускорительного модуля.

В статье мы рассмотрим основные результаты экспериментальных исследований поперечной неустойчивости длинноимпульсного килоамперного электронного пучка в различных режимах по величине фокусирующих магнитных полей в ЛИУ. Актуальность этих исследований мотивирована тем, что такие электронные пучки могут быть использованы в качестве драйвера для лазера на свободных электронах (ЛСЭ), способного генерировать когерентные импульсы электромагнитного излучения с рекордными значениями импульсной мощности и энергосодержания [13–17]. Проект ЛСЭ на основе электронных пучков, формируемых в ЛИУ, активно развивается в ИЯФ СО РАН в коллаборации с ИПФ РАН. В рамках этого проекта предполагается

реализовать схему ЛСЭ-генератора импульсов когерентного терагерцового излучения в диапазоне частот 0,3–1,2 ТГц с суб-гигаватным уровнем мощности и энергосодержанием ~ 10–100 Дж [13; 14], в котором будет использован пучок с приемлемыми для этого параметрами [18].

При дальнейшем изложении материала статьи мы будем придерживаться следующей последовательности. В разделе 1 приведены общая схема ускорительного комплекса ЛИУ и описание системы формирования интенсивного электронного пучка. Раздел 2 посвящен результатам экспериментов по регистрации амплитуды колебаний электромагнитного поля мод в ЛИУ. Здесь также приведено обсуждение измеренных значений инкрементов поперечной неустойчивости пучка в сопоставлении с их расчетными величинами для различных режимов генерации пучка в ускорительной структуре ЛИУ. В разделе 3 описаны основные элементы ЛСЭ-генератора и их параметры.

1. Общая схема ЛИУ на энергию электронов до 20 МэВ

Общая схема создаваемого ускорительного комплекса ЛИУ представлена на рис. 1. Первичное формирование сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) с энергией до 2 МэВ и током до 2 кА осуществляется в инжекторе, который описан в работе [19] под названием ЛИУ-2. Фотография инжектора представлена на рис. 2.

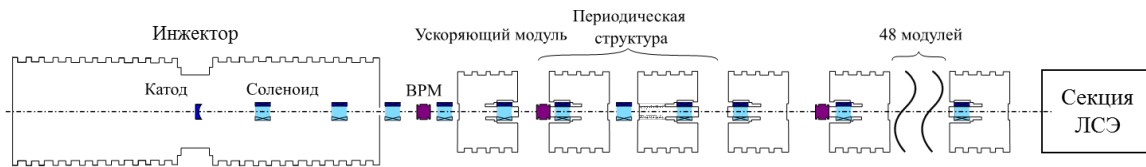


Рис. 1. Схема ЛИУ на энергию 20 МэВ. Черным цветом показаны корпуса ускорительных модулей и инжектора, голубым – фокусирующие магнитные линзы, темно-розовым – датчики положения пучка в канале транспортировки (пикапы). На выходе из ускорительного комплекса схематически показано одно из возможных мест расположения секции ЛСЭ-генератора

Fig. 1. Scheme of the LIA for an energy of 20 MeV. The shells of the accelerator modules and the injector are shown in black, the focusing magnetic lenses are shown in blue, and the beam position monitors (BPM) in the transport channel (pickups) are shown in magenta. One of the possible locations of the FEL generator section is schematically shown at the exit from the accelerator complex

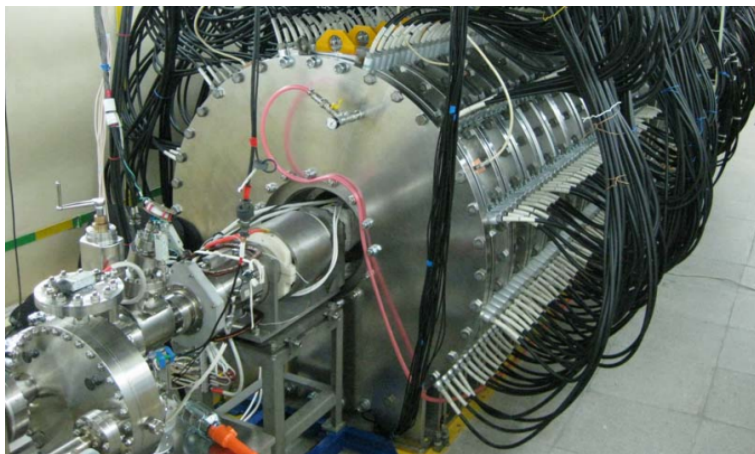


Рис. 2. Фотография инжектора ЛИУ-2, формирующего электронный пучок с током до 2 кА и энергией до 2 МэВ

Fig. 2. Photo of the LIA-2 injector, which forms an electron beam with a current of up to 2 kA and an energy of up to 2 MeV

Формирование РЭП в этом инжекторе осуществляется по следующей схеме. Исходный электронный пучок эмитируется накаливаемым металлопористым катодом диаметром 180 мм. В дальнейшем пучок проходит сквозь анодное отверстие и далее доускоряется внутри ускорительной трубки до энергии 2 МэВ. Прохождение пучка в вакуумной полости инжектора обеспечивается с помощью трех аксиально-симметричных магнитных линз, которые позволяют также согласовать прохождение пучка в инжекторе с последующим его распространением в ускоряющей структуре ЛИУ. Эта ускоряющая структура общей длиной 72 м включает в себя 54 ускорительных модуля, расположенных последовательно друг за другом, и 72 фокусирующих магнитных линзы с максимальной амплитудой индукции поля на оси около ~ 0.25 Тл. Каждый ускорительный модуль способен генерировать на своей оси индукционную ЭДС с амплитудой до 400 кВ, которая обеспечивает ускорение электронов пучка до соответствующей энергии. Подробная геометрия ускорительных модулей и результаты проведенных исследований по улучшению их электродинамических характеристик представлены в работе [20].

Таким образом, ускоряющая структура вместе с инжектором позволяет формировать пучок с энергией электронов до 20 МэВ (в зависимости от числа используемых модулей) и током до 2 кА. Необходимо отметить, что для получения в ЛИУ пучка с низким значением (~ 1000 п·мм·мрад) нормализованного эмиттанса, был осуществлен тщательный подбор полей фокусирующих линз, призванный обеспечить малую величину отношения амплитуды колебаний огибающей пучка к его текущему радиусу, которая не должна превышать 0,1. Полученная таким способом конфигурация фокусирующего магнитного поля задавала плавное уменьшение диаметра электронного пучка с 7 см на входе в ускоряющую структуру до 4 см на ее выходе. После прохождения ускоряющей структуры ЛИУ электронный пучок с помощью системы разводки (см. [21]) направляется в один из двух каналов: прямой или боковой, в которых он может быть использован для различных приложений, в частности, в ЛСЭ-генераторе ТГц излучения.

2. Измерение инкремента поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ с дискретной фокусировкой

Как уже упоминалось, эффективность применения пучка, генерируемого в ЛИУ, во многих перспективных приложениях существенно зависит от его значений углового и энергетического разбросов электронов. Так, например, при использовании пучка ЛИУ в качестве драйвера для ЛСЭ-генератора эти параметры не должны превышать 50 мрад и $0.01-0.02 E_e$ для пучка, сжатого до диаметра в несколько миллиметров внутри резонатора ЛСЭ [14; 23]. Очевидно, что развитие поперечной неустойчивости приводит к раскочке поперечных колебаний электронов пучка при движении в ЛИУ и тем самым увеличивает поперечную скорость их паразитного циклотронного вращения в сильном магнитном поле, создаваемом системой компрессии пучка в секции ЛСЭ-генератора. Это паразитное вращение может существенно уменьшить эффективность генерации ТГц излучения, поэтому необходимо подавить или замедлить развитие этой неустойчивости. Различные способы ее подавления уже ранее исследовались во многих зарубежных теоретических и экспериментальных работах, так как эта неустойчивость является одним из самых критических факторов, препятствующих получению длинноимпульсных пучков с токами 1–3 кА и с энергиями электронов от 5 до 20 МэВ [4; 12; 24]. Подобного рода исследования имеют большую актуальность и в настоящее время, в особенности при создании нашего ускорительного комплекса, поскольку характер развития поперечной неустойчивости существенным образом определяется набором индивидуальных факторов: конструкцией ускорительных модулей и ускоряющей системы в целом, конструкцией и настройкой фокусирующей магнитной системы, а также условиями инжекции пучка.

Согласно теоретическим работам, амплитуда колебаний пучка в ЛИУ в результате развития поперечной неустойчивости описывается приближенным выражением, обобщающим теорию Нила-Купера-Холла [10]:

$$\xi_N = \xi_0 \cdot \left[\frac{\gamma_0}{\gamma_N} \right]^{1/2} \exp \left(\frac{I[kA]NZ_{\perp} \left[\frac{\Omega}{m} \right]}{3 \cdot 10^4 \langle B[kG] \rangle} \right), \quad (1)$$

$$Z_{\perp} = c \cdot k \cdot Q, \quad (2)$$

$$k = \frac{(\int B_{\perp} dz)^2}{2U} \quad (3)$$

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, I – ток пучка, $\langle B \rangle$ – среднее магнитное поле фокусирующей системы, Z_{\perp} – поперечный импеданс ускорительного модуля по отношению к наиболее неустойчивой его дипольной моде, k – коэффициент связи этой моды с пучком, U и Q усредненная по времени энергия этой моды и ее добротность.

Исходя из зависимости показателя экспоненты в выражении (1) от параметров ускорительной структуры ЛИУ, нами были разработаны и исследованы различные модификации конструкции ускорительного модуля ЛИУ для уменьшения добротностей и коэффициентов связи с пучком нескольких дипольных мод, наиболее опасных с точки зрения развития поперечной неустойчивости. Результаты этих исследований, а также модификация конструкции ускорительных модулей путем применения экранирующих электродов, существенно снизивших коэффициент связи с пучком наиболее опасных мод [20], позволили осуществить проводку в 8-ми модульном ЛИУ электронного пучка с током 2 кА и энергией 5 МэВ при уровне поперечных колебаний пучка ~ 0.1 мм.

На следующем этапе развития ЛИУ его ускорительная структура была дополнена до 20 модулей. В отличие от предыдущей 8-ми модульной конфигурации оценки амплитуды колебаний пучка из (1–3) для новой версии ЛИУ показали, что без дополнительных мер по уменьшению инкремента поперечной неустойчивости их уровень будет неприемлем для проводки пучка на всю длину ускорителя. Для получения более точного значения инкремента этой неустойчивости с помощью программного комплекса, описанного в [25], мы осуществили моделирование транспортировки пучка в ЛИУ с учетом его взаимодействия с полями дипольных мод с различными значениями добротностей, задаваемых искусственно в выражении (8) из работы [25] в диапазоне от 10 до 100. Уровень добротности мод $Q \sim 80$ –100 соответствует ускорительному модулю практически без ВЧ-поглотителей за исключением резистивного делителя напряжения, смонтированного на ускорительной трубке, общим сопротивлением ~ 1 кОм. В моделировании использовались заранее рассчитанные пространственные распределения электрических и магнитных полей наиболее опасных дипольных мод в отсутствие поглощения. Транспортировка пучка моделировалась в условиях внешних ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полей с максимальной индукцией на оси магнитных линз 0,04 и 0,08 Тл. Пример расчета полей представлен на рис. 3. Детальное исследование свойств фокусирующей магнитной системы ЛИУ вместе с характерными распределениями ее полей, а также расчетные кривые огибающей пучка в различных случаях представлены в [1].

Помимо моделирования нами была проведена серия экспериментов по транспортировке и ускорению в 20-ти модульном ЛИУ электронного пучка с током 1 кА и энергией 8,5 МэВ на выходе из ускорителя. Для уменьшения инкремента поперечной неустойчивости пучка все модули ЛИУ были оснащены ВЧ-поглотителями в виде вставок из ферритосодержащего материала, расположенных в зазорах между всеми индукторами каждого модуля. По результатам расчетов спектральных свойств таких модулей, а также из холодных измерений добротность наиболее опасных «вакуумных» мод применением указанных ВЧ-поглотителей была снижена до уровня 10–15 для всех мод диапазона 700–850 МГц, описанных в работе [25], кроме моды с частотой 450 МГц, добротность которой составила примерно 30–35. Это обу-

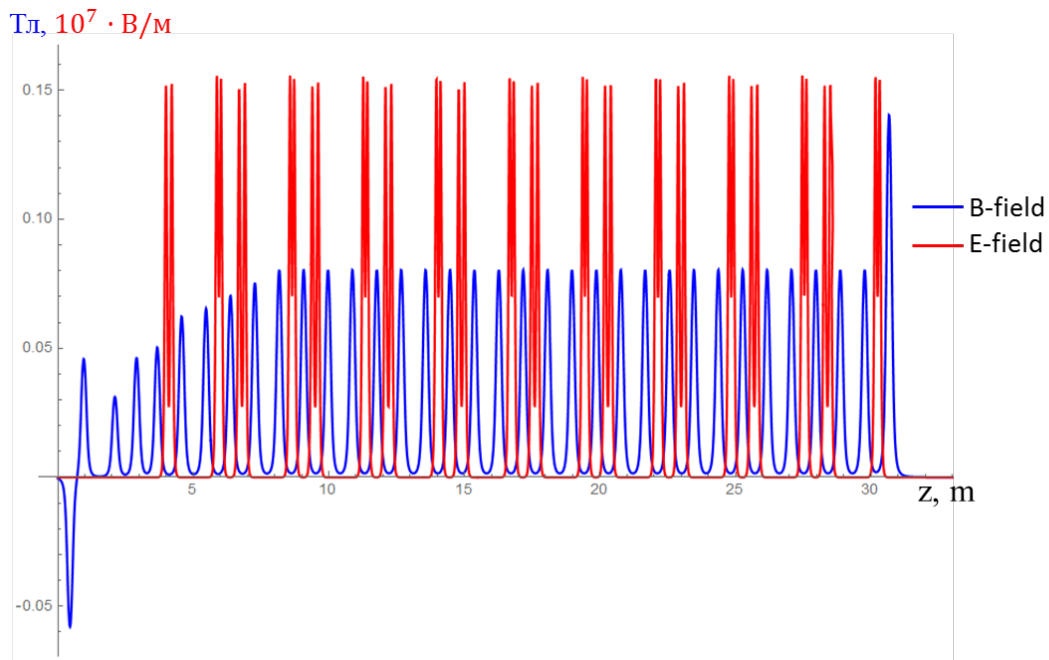


Рис. 3. Пример распределений ускоряющего электрического (красная линия) и фокусирующего магнитного (синяя линия) полей на оси ЛИУ в случае, когда максимальная индукция магнитного поля в линзах средней части ускорителя составляла $B_m = 0.08$ Тл. Старт электронного пучка производился с координаты $Z_0 = 0,7$ м

Fig. 3. The example of the of the accelerating electric (red line) and focusing magnetic (blue line) fields distributions on the LIA axis in the case when the maximum magnetic field induction in the lenses of the middle part of the accelerator was $B_m = 0.08$ T. The start of the electron beam was made from the coordinate $Z_0 = 0.7$ m

словлено тем, что данная мода находилась в технологическом зазоре, в котором ВЧ-поглотители отсутствовали. В проведенной серии экспериментов были зарегистрированы сигналы с быстрых трансформаторов тока в 10 последних модулях, сигналы с которых заметно превышали шумы, определяемые электромагнитными наводками. Как уже упоминалось в [25], осцилляции этих сигналов за вычетом медленной составляющей, обусловленной изменением тока пучка в течение его импульса, пропорциональны полям возбуждаемых пучком дипольных мод ускорительного модуля. Пример одного из таких сигналов, а также его фурье-спектр приведены на рис. 4.

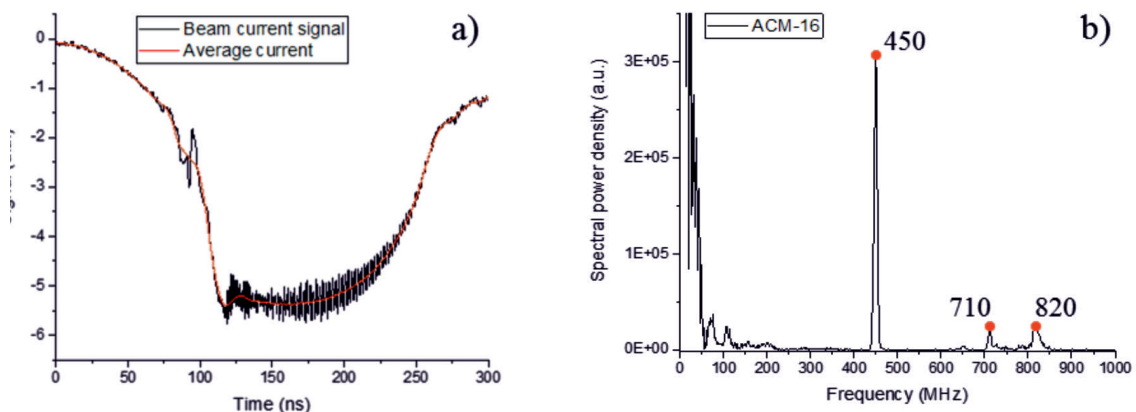


Рис. 4. Сигнал тока пучка с быстрого трансформатора тока, размещенного в 16-м ускорительном модуле ЛИУ (a) и его частотный спектр в линейном масштабе (b)

Fig. 4. Beam current signal from a fast current transformer located in the 16th LIA accelerator module (a) and its frequency spectrum on a linear scale (b)

Как видно из рис. 4, в спектре колебаний преобладает мода с частотой 450 МГц и добротностью $Q \sim 30$, в то время как «вакуумные» моды из диапазона 700–800 МГц оказались существенно подавлены применением ВЧ-поглотителей. Как и в экспериментах с 8-ми модульным ЛИУ [25], добротность вакуумных мод в диапазоне 700–800 МГц ($Q = 15–20$) во время импульса пучка оказалась систематически выше значений, зарегистрированных в холодных экспериментах и моделировании. Для сопоставления экспериментальных и расчетных значений скорости роста амплитуды колебаний на частоте основной дипольной моды 450 МГц был применен следующий алгоритм обработки данных. Поскольку спектр сигнала с трансформатора тока содержал практически одну частоту, то для определения инкремента усиления колебаний полей моды от модуля к модулю мы выбирали максимальную амплитуду колебания сигнала в пределах полочки импульса тока длиной около 100 нс и затем строили зависимость ее логарифма от номера ускорительного модуля. Инкремент усиления колебаний определялся из тангенса угла наклона линейной аппроксимации зависимости этого логарифма от номера ускорительного модуля. Указанные зависимости для разных режимов работы ускорителя приведены на рис. 5 вместе с расчетными Γ_{th} и экспериментальными Γ_{exp} значениями инкремента для двух режимов работы ЛИУ.

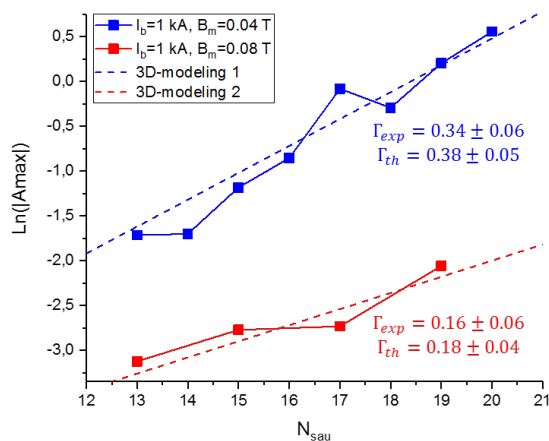


Рис. 5. Зависимости логарифма максимальной амплитуды колебаний полей моды от номера ускорительного модуля в двух режимах работы ЛИУ, в которых ток пучка был одинаковым – 1 кА, а максимальные поля фокусирующих линз различались в два раза: $B_m = 0,04$ и $0,08$ Тл

Fig. 5. The logarithm dependences of the maximum amplitude oscillations of the mode fields on the accelerator module number in two LIA operating modes, in which the beam current was the same – 1 kA, and the maximum fields of the focusing lenses differed by a factor of two: $B_m = 0.04$ and 0.08 T

Как видно из рис. 5, в режиме транспортировки и ускорения пучка с током 1 кА в магнитном поле $B_m = 0,04$ Тл экспериментальное значение инкремента имеет величину $\Gamma_{exp} = 0,34 \pm 0,06$, а теоретическое – $\Gamma_{th} = 0,38 \pm 0,05$, в то время как для режима транспортировки пучка с тем же током в повышенном магнитном поле $B_m = 0,08$ Тл – $\Gamma_{exp} = 0,16 \pm 0,06$ и $\Gamma_{th} = 0,18 \pm 0,04$. Таким образом, двукратное увеличение максимального магнитного поля в линзах средней части ускорителя приводит к уменьшению инкремента усиления колебаний полей основной моды приблизительно в два раза. Помимо этого, в эксперименте и моделировании было зарегистрировано двукратное увеличение инкремента усиления колебаний с ростом тока пучка от 0,5 до 1 кА. Из сопоставления экспериментальных данных и результатов моделирования для всех указанных режимов работы ускорителя наблюдается совпадение экспериментальных и расчетных значений инкрементов в пределах погрешности определения этой величины (15–20%). Таким образом, мы показали, что обобщенное выражение (1), описывающее рост амплитуды колебаний пучка от модуля к модулю в ЛИУ с непрерывным магнитным полем, имеет аналогичную функциональную зависимость от номера ускорительного модуля, величины фокусирующего поля линз и значения тока пучка в случае ЛИУ с дискретной магнитной фокусировкой, что прежде нигде не было продемонстрировано. Полученные зависимости инкремента поперечной неустойчивости от параметров пучка и ускорителя, а также характерное значение начальной амплитуды колебаний пучка $\xi_0 \sim 1$ мкм [25] дают возможность прогнозировать необходимое значение инкремента на уровне $\Gamma \approx 0.15$ для осуществления устойчивой транспортировки пучка на всю длину полномасштабного ЛИУ

из 54 ускорительных модулей, что позволит обеспечить требуемые характеристики пучка в резонаторе проектируемого ЛСЭ-генератора.

3. Общая схема ЛСЭ-генератора ТГц излучения основе пучка, генерируемого в ЛИУ

При разработке и проектировании ЛСЭ систем на базе электронных пучков одной из принципиальных задач является формирование электронного пучка с малыми угловым и энергетическим разбросами электронов, приемлемыми для использования в ЛСЭ ТГц диапазона [23; 26]. Помимо этих требований возникает еще одна задача – осуществление сжатия пучка по сечению от диаметра 4 см до 5–10 мм, который необходим для транспортировки пучка в сверхразмерных электродинамических системах с применением рефлекторов на основе одномерных брэгговских структур [13; 14]. Диаметр таких структур для обеспечения требуемой селекции мод не может превышать 40λ , что в нашем случае соответствует диаметрам 10–40 мм для частот 1.2–0.3 ТГц. Для решения этой задачи мы провели эксперименты по магнитной компрессии килоамперного пучка из ЛИУ с исходного диаметра 40 мм до 10 мм с последующей транспортировкой сжатого пучка в тестовом вакуумном канале секции ЛСЭ длиной 600 мм и диаметром 20 мм [18; 23; 26]. Этот эксперимент продемонстрировал принципиальную возможность реализации проекта ТГц ЛСЭ-генератора на основе пучка ЛИУ с током 1 кА.

После успешной демонстрационной серии экспериментов по компрессии пучка, нами было принято решение о разработке технического проекта ЛСЭ-генератора импульсов когерентного терагерцового излучения в области частот 0.3–1.2 ТГц, длиной импульса ~ 100 нс, электронным КПД $\sim 5\%$ (для 0,3 ТГц), уровнем мощности излучения $\sim 0,1$ – $0,5$ ГВт и энергосодержанием в импульсе ~ 10 – 100 Дж [13; 14]. В качестве первого шага реализации проекта нами была спроектирована секция ЛСЭ, общий вид которой представлен на рис. 6.

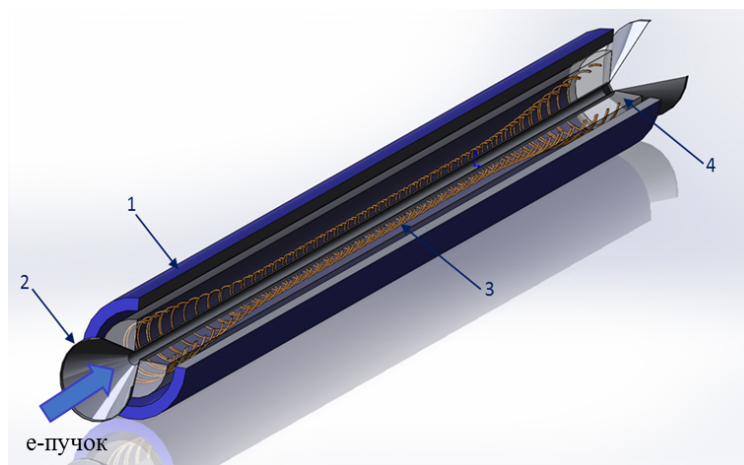


Рис. 6. Схема секции ЛСЭ-генератора с системой магнитной компрессии сечения пучка, ондулятором и вакуумным каналом для прохождения сжатого пучка: 1 – импульсный соленоид для магнитного сжатия сечения пучка, 2 – вакуумный канал для прохождения пучка в ондуляторном поле, 3 – обмотки ондулятора в виде бифилярной спирали, 4 – диэлектрическая основа для фиксации положения обмоток ондулятора. Синей стрелкой показано направление распространения электронного пучка

Fig. 6. FEL-generator scheme with a system of magnetic beam section compression, an undulator and a vacuum channel for the compressed beam transportation: 1 – pulsed solenoid for magnetic compression of the beam cross-section, 2 – vacuum channel, 3- undulator windings in the form of a bifilar spiral, 4 – dielectric base for fixing the undulator windings position. The blue arrow shows the direction of an electron beam propagation.

Секция ЛСЭ включает следующие основные функциональные узлы:

- система магнитной компрессии пучка, состоящая из импульсного магнитного соленоида (1) с длиной 2 м и нескольких согласующих магнитных линз со встроенными дипольными корректорами, расположенными между выходом из ЛИУ и соленоидом (не показаны на рис. 6);
- вакуумный канал (2) из нержавеющей стали с внутренним диаметром регулярной секции 26 мм и длиной ~ 2 м, внутри которого размещается электродинамическая система ЛСЭ-генератора и проходит электронный пучок;
- ондуляторная обмотка (3), создающая винтовое поле для накачки поперечных колебаний электронов пучка.

На выходе пучка из секции ЛСЭ будет установлен узел вывода ТГц излучения в атмосферу, а также размещена система сброса пучка на мишень с последующим эффективным поглощением возникающего при этом потока рентгеновского излучения. Существенное подавление этого потока является необходимым условием возможности регистрации параметров пучка и импульсов ТГц излучения.

Как уже упоминалось ранее, внутри вакуумного канала будет размещена электродинамическая система ЛСЭ-генератора, представляющая собой цилиндрический резонатор, состоящий из двух брэгговских рефлекторов, соединенных регулярным волноводом круглого сечения. Конструктивно каждый рефлектор выполнен из отрезка такого же волновода, но с одномерной гофрировкой внутренней поверхности глубиной от десятков до сотен микрон. Такие структуры получили широкое применение в качестве электродинамических систем мощных релятивистских генераторов микроволнового излучения [27; 28]. В случае использования резонаторов на основе «традиционных» одномерных брэгговских отражателей, осуществляющих отражение бегущей волны непосредственно в волну с противоположным направлением, селективная способность таких резонаторов существенно ухудшается при диаметре волновода, превышающем несколько длин волн (типичный параметр сверхразмерности $\varnothing/\lambda \sim 2-3$). Поэтому для обеспечения селективного возбуждения рабочей волны в ЛСЭ-генераторе в условиях высокой сверхразмерности $\varnothing/\lambda \sim 40$ мы предлагаем использовать в резонаторе так называемые модифицированные брэгговские рефлекторы, отличительной особенностью которых является связь бегущих и квазикритических волн [29; 30] (см. рис. 7). Работоспособность последних резонаторов в диапазоне частот 0.3–0.6 ТГц была продемонстрирована в [31].

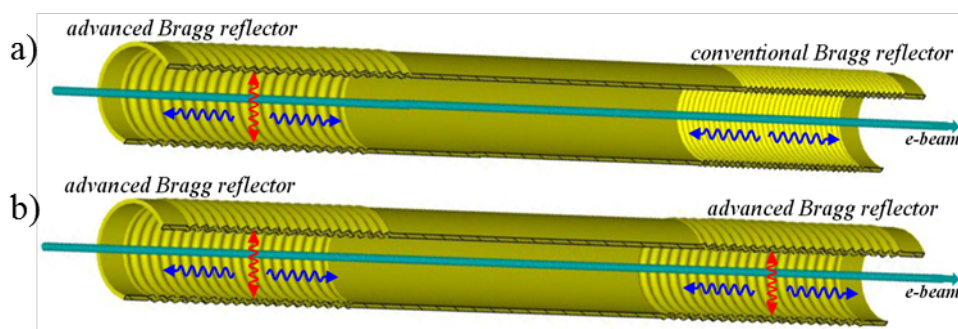


Рис. 7. Схемы цилиндрических резонаторов двух различных типов: (а) комбинированный резонатор на основе модифицированного (входного) и «традиционного» (выходного) брэгговских рефлекторов и (б) резонатор с двумя модифицированными брэгговскими рефлекторами. Зеленными стрелками показано направление распространения электронного пучка, синими и красными стрелками – парциальных продольных и поперечных волновых потоков, соответственно. Параметры «традиционного» брэгговского рефлектора для частоты рабочей волны 0.6 ТГц: отношение его диаметра к длине волны излучения (сверхразмерность) $\varnothing/\lambda \sim 5-7$, длина структуры $l_{ad} = 5$ см, период гофрировки $d_{ad} = 0,25$ мм и глубина гофрировки $r_{ad} = 0,15$ мм. Для модифицированного рефлектора на ту же частоту волны: сверхразмерность $\varnothing/\lambda \sim 40$, $l_{ad} = 7,5$ см, $d_{ad} = 0,5$ мм и $r_{ad} = 0,3$ мм

Fig. 7. The scheme of the cylindrical resonators of two different types: (a) a combined resonator based on an advanced (input) and «traditional» (output) Bragg reflectors and (b) a resonator with two advanced Bragg reflectors. Green arrows show the direction of the electron beam propagation, blue and red arrows – partial longitudinal and transverse wave flows, respectively. The parameters of a «traditional» Bragg reflector for an operating wave frequency of 0.6 THz: the ratio of its diameter to the radiation wavelength $\varnothing/\lambda \sim 5-7$, structure length $l_{ad} = 5$ cm, corrugation period $d_{ad} = 0.25$ mm, and corrugation depth $r_{ad} = 0.15$ mm. For the advanced reflector operated at the same wave frequency: $\varnothing/\lambda \sim 40$, $l_{ad} = 7.5$ cm, $d_{ad} = 0.5$ mm and $r_{ad} = 0.3$ mm

Таким образом, анализ структуры магнитного поля и электродинамической системы ЛСЭ генератора на основе использования сжатого по сечению пучка, генерируемого в ЛИУ, показал соответствие параметров сильноточного РЭП задаче генерации потока ТГц-излучения.

Заключение

В ходе проделанной работы проведены экспериментальные исследования поперечной неустойчивости электронного пучка с током 1 кА и энергией 8,5 МэВ в различных режимах работы 20-ти модульного ЛИУ, в результате которых получены количественные значения инкремента этой неустойчивости. Было продемонстрировано, что разработанный программный комплекс позволяет надежно моделировать динамику возбуждения и развития поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ, а также рассчитывать значение инкремента усиления колебаний центроида пучка от модуля к модулю. Продemonстрировано, что расчетное и экспериментальное значения инкремента совпадают в пределах его ошибки измерения, которая имеет величину 20%. Кроме того, в экспериментальной серии было установлено и подтверждено моделированием, что инкремент поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ с дискретной фокусировкой приближенно пропорционален току пучка и обратно пропорционален характерному магнитному полю линз в ускорителе. Результаты проведенных исследований показали, что 20-ти модульная конфигурация ЛИУ позволяет получить параметры пучка, приемлемые для генерации потока терагерцового излучения с субгигаваттным уровнем мощности.

Благодарности

Основная доля исследований проведена в ИЯФ СО РАН: работы, описанные в разделе 3, частично выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда (грант № 19-12-00212). Эксперименты по генерации в ЛИУ пучка электронов с током 1 кА энергией 8,5 МэВ проводились в коллаборации с РФЯЦ ВНИИТФ.

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

Список литературы / References

1. **Nikiforov D. A., Blinov M. F., Fedorov V. V. et al.** High-Current Electron-Beam Transport in the LIA-5 Linear Induction Accelerator. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 17, 2020, p. 197–203. DOI 10.1134/S1547477120020156.
2. **Sinitsky S. L., Sandalov E. S., Skovorodin D. I. et al.** High Current Electron Beam Transport and Focusing at the Linear Induction Accelerator. *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, 2020, p. 191. DOI 10.1109/ICOPS37625.2020.9717608.
3. **Ekdahl C.** Modern electron accelerators for radiography, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2002, vol. 30, no. 1, p. 254–261.
4. **Takayama K., Briggs R.** Induction accelerators. *Berlin Heidelberg: Springer*, 2011.

5. **Ekdahl C.** Electron-Beam Corkscrew Motion in an Advanced Linear Induction Accelerator. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, vol. 49, no. 11, p. 3548–3553. DOI 10.1109/TPS.2021.3120877.
6. **Godfrey B. B., Hughes T. P.** Beam-breakup and image-displacement instability coupling impedances in high-current electron-beam induction accelerators. *Proceedings of the 1989 IEEE Particle Accelerator Conference. Accelerator Science and Technology*, 1989, vol. 2, p. 1023–1025. DOI 10.1109/PAC.1989.73341.
7. **Ekdahl C.** The Ion-Hose Instability in a High-Current Multipulse Linear Induction Accelerator. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, p. 300–306. DOI 10.1109/TPS.2018.2872472.
8. **Ekdahl C.** The Resistive-Wall Instability in Multipulse Linear Induction Accelerators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, no. 5, p. 811–818. DOI 10.1109/TPS.2017.2681040.
9. **Panofsky W. K. H., Bander M.** Asymptotic theory of beam breakup in linear accelerators. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, vol. 39, p. 206–212.
10. **Neil V. K., Hall L. S., Cooper R. K.** Further theoretical studies of the beam breakup instability. *Particle Accel.*, 1979, vol. 9, no. 4, p. 213–222.
11. **Лебедев А. Н., Шальнов А. В.** Основы физики и техники ускорителей, 2-е изд., перераб. и доп. Энергоатомиздат, 1991. 528 с.
12. **Ekdahl C., Coleman J. E., McCuistian B. T.** Beam breakup in an advanced linear induction accelerator. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2016, vol. 44, no. 7, p. 1094–1102. DOI 10.1109/TPS.2016.2571123.
13. **Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Malkin A. M. et al.** Powerful Long-Pulse THz-Band Bragg FEL Based On Linear Induction Accelerator. *44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2019, p. 1–2. DOI 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874573.
14. **Peskov N. Yu., Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S. et al.** Project of powerful long-pulse Bragg FEL of sub-THz to THz band: design, simulations and components testing. *Proc. SPIE 11582, Fourth International Conference on Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection, and Applications, 2020*. DOI 10.1117/12.2579554.
15. **Tan P., Huang J., Liu K. et al.** Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications. *Science China Information Sciences*, 2012, p. 1–15. DOI 10.1007/s11432-011-4515-1.
16. **Shevchenko O. A., Arbuzov V. S., Vinokurov N. A. et al.** The Novosibirsk Free Electron Laser – Unique Source of Terahertz and Infrared Coherent Radiation. *Phys. Procedia*, 2016, p. 13–18. DOI 10.1016/j.phpro.2016.11.004.
17. **Gallerano G. P. et al.** The physics of and prospects for THz-compact FELs. *Terahertz Science and Technology*, 2014, vol. 7, no. 4, p.160.
18. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I. et al.** Studies on Electron Beam Transport in a Linear Induction Accelerator for Free Electron Laser Application. *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, 2021 p. 1–1. DOI 10.1109/ICOPS36761.2021.9588436.
19. **Logachev P., Kuznetsov G., Korepanov A. et al.** LIU–2 linear induction accelerator. *Instrum. Experim. Techn.*, 2013, vol. 56, no. 6, p. 672–679. DOI 10.1134/S0020441213060195.
20. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I. et al.** Electrodynamical System of the Linear Induction Accelerator Module. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, vol. 49, no. 2, p. 718–728. DOI 10.1109/TPS.2020.3045345.
21. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I. et al.** Emittance Variation of a High-Current Relativistic Electron Beam in a Bend Magnet. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, vol. 49, no. 9, p. 2737–2749. DOI 10.1109/TPS.2021.3105661.
22. **Lee E. P.** Cancellation of the centrifugal space charge force. *Part. Accel.*, 1990, vol. 25, p. 241.

23. **Nikiforov D. A., Petrenko A. V., Sinitsky S. L. et al.** Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source. *Journal of Instrumentation*, 2021, vol.16, P. 11024. DOI 10.1088/1748-0221/16/11/P11024.
24. **Ekdahl C. et al.** Long-pulse beam stability experiments on the DARHT-II linear induction accelerator, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 34, 2006, p. 460–466.
25. **Сандалов Е. С., Сеницкий С. Л., Сквородин Д. И. и др.** Исследование поперечной неустойчивости сильнотоочного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 5–22. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22.
26. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Nikiforov D. A. et al.** Theoretical and Experimental Studies on Compression and Transport of an Intense Electron Beam in the Channel of sub-mm FEL. 46th *International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMWTHz)*, 2022, p. 1–2. DOI 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567073.
27. **Ковалев Н. Ф., Орлова И. М., Петелин М. И.** // Изв. ВУЗов: Радиофизика. 1968. Т. 11, № 5. С.783–786.
28. **Bratman V. L., Denisov G. G., Ginzburg N. S., Petelin M. I.** // *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983. V. QE-19, no. 3, p. 282–296. DOI 10.1109/JQE.1983.1071840.
29. **Гинзбург Н. С., Малкин А. М., Песков Н. Ю., Сергеев А. С.** // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 20. С. 60–69. DOI 10.1134/S1063785006100245.
30. **Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Kalinin P. V. et al** // *Appl. Phys. Lett.*, 2012. V. 101, P. 083507. DOI 10.1063/1.4747149.
31. **Песков Н. Ю., Гинзбург Н. С., Заславский В. Ю. и др.** Мощный длинноимпульсный брегговский ЛСЭ суб-ТГц/ТГцдиапазона: разработка и тестирование электродинамической системы // VII Всероссийская микроволновая конференция: сборник трудов, 2020. С. 72 – 76.

Сведения об авторах

- Сандалов Евгений Сергеевич**, аспирант, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Сеницкий Станислав Леонидович**, кандидат физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Сквородин Дмитрий Иванович**, кандидат физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Аржанников Андрей Васильевич**, доктор физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Логачев Павел Владимир**, доктор физико-математических наук, академик РАН, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Бак Петр Алексеевич**, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Живанков Кирилл Игоревич**, научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Никифоров Данила Алексеевич**, научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Петренко Алексей Васильевич**, кандидат физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Гинзбург Наум Самуилович**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Песков Николай Юрьевич**, доктор физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Протас Роман Викторович, кандидат физико-математических наук, Российский Федеральный Ядерный Центр-Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е. И. Забабахина (Снежинск, Россия)

Information about the Authors

Evgeniy S. Sandalov, postgraduate student, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Stanislav L. Sinitsky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Dmitrii I. Skovorodin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Andrey V. Arzhannikov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Pavel V. Logachev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Petr A. Bak, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Kirill I. Zhivankov, researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Danila A. Nikiforov, researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Alexey V. Petrenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Naum S. Ginzburg, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Nikolai Yu. Peskov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Roman V. Protas, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Russian Federal Center-All-Russian Research Institute of Technical Physics named E.I. Zababakhin (Snezhinsk, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию 29.05.2022;

одобрена после рецензирования 20.06.2022; принята к публикации 22.06.2022

The article was submitted 29.05.2022;

approved after reviewing 20.06.2022; accepted for publication 22.06.2022