

УДК 537.862:621.385

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОЩНОГО ТГц ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ “ЛИУ”: МОДЕЛИРОВАНИЕ И “ХОЛОДНЫЕ” ТЕСТЫ

© 2023 г. Н. Ю. Песков^{1, 2, *}, А. В. Аржанников², В. И. Белоусов¹, Н. С. Гинзбург^{1, 2},
В. Ю. Заславский¹, Д. А. Никифоров², Ю. С. Опарина^{1, 2}, А. В. Савилов¹,
Е. С. Сандалов², С. Л. Синицкий², Д. И. Соболев¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук”,
Нижний Новгород, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

*E-mail: peskov@ipfran.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Описана текущая стадия разработки мощного длинноимпульсного лазера на свободных электронах (ЛСЭ) терагерцового диапазона, создание которого ведется в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук в сотрудничестве с Институтом прикладной физики Российской академии наук на основе линейного индукционного ускорителя “ЛИУ” с энергией 5–10 МэВ, током до 2 кА и длительностью импульсов до 200 нс. Для обеспечения режима стабильной узкополосной генерации в проекте предлагается использование двух альтернативных типов электродинамических систем: модифицированных брегговских резонаторов и квазиоптических резонаторов Тальбота – типа. Представлены расчетные параметры ЛСЭ на основе данных резонаторов и результаты их моделирования в условиях существенной сверхразмерности. Работоспособность резонаторов нового типа подтверждена в “холодных” электродинамических тестах.

DOI: 10.31857/S0367676522701290, EDN: ACAGLI

ВВЕДЕНИЕ

Семейство линейных индукционных ускорителей “ЛИУ”, реализованное в ИЯФ СО РАН (Новосибирск) [1, 2], способно формировать релятивистские электронные пучки (РЭП) с энергией 5–10 МэВ, током 1–2 кА и длительностью импульса до 200 нс. Использование подобных пучков в ЛСЭ позволяет генерировать излучение в субтерагерцовой (суб-ТГц) и терагерцовой (ТГц) области частот с мощностью на уровне 0.1–1 ГВт и рекордным энергосодержанием в импульсах до 10–100 Дж [3, 4].

Проект по созданию мощного длинноимпульсного ЛСЭ суб-ТГц/ТГц диапазона на основе ускорителя “ЛИУ” разрабатывается в настоящее время в ИЯФ СО РАН (Новосибирск) в сотрудничестве с ИПФ РАН (Нижний Новгород). В серии проведенных электронно-оптических экспериментов обеспечено формирование РЭП с

параметрами, необходимыми для эффективной работы генератора в указанных диапазонах, и их транспортировка через вакуумную систему генератора [5]. При этом реализованный поперечный размер (диаметр) пучка в рабочей области ЛСЭ составляет $D_{\text{beam}} \sim 7\text{--}10$ мм.

Для проводки интенсивного РЭП, формируемого “ЛИУ” (с учетом амплитуды баунс-осцилляций электронов в ондуляторе), через пространство взаимодействия ЛСЭ диаметр системы должен быть $D \geq 15\text{--}20$ мм. Это на порядки превышает длину волны излучения в обсуждаемых диапазонах. Таким образом, одной из “ключевых” проблем в реализации ЛСЭ является разработка электродинамической системы, способной обеспечить стабильный режим узкополосной генерации в условиях существенной сверхразмерности пространства взаимодействия. Для решения проблемы селекции мод в подобных условиях в рамках развиваемого проекта исследуются

два основных типа электродинамических систем: (1) модифицированные брэгговские резонаторы, реализующие связь бегущих и квазикритических волн и (2) квазиоптические резонаторы, основанные на эффекте Тальбота. В статье обсуждаются конструктивные особенности этих резонаторов, их электродинамические свойства и результаты “холодных” тестов в суб-ТГц области частот. Представлены результаты моделирования ЛСЭ с использованием данных резонаторов в условиях существенной сверхразмерности пространства взаимодействия.

ЛСЭ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Отличительной особенностью модифицированных брэгговских резонаторов является включение в цепь обратной связи квазикритических волн [6]. Достоинством подобных структур является существенно большая селективность по сравнению с “традиционными” аналогами, основанными на связи двух бегущих параксиальных волн [7, 8]. В отличие от “традиционных” аналогов в модифицированной брэгговской структуре непосредственная связь попутной и встречной волн отсутствует и возникает только через возбуждение квазикритической волны. Вовлечение в цепь обратной связи критической волны, подобно гиротронам [9], позволяет значительно разредить спектр мод резонатора: в условиях большой сверхразмерности $D/\lambda \gg 1$ плотность спектра критических волн существенно меньше плотности спектра параксиальных волн, определяющих цикл обратной связи в брэгговских резонаторах “традиционного” типа. Это приводит к существенному улучшению селективных свойств модифицированных брэгговских структур по сравнению с “традиционными” аналогами. В то же время, в ЛСЭ взаимодействие с интенсивным РЭП обеспечивается попутной синхронной волной в условиях большого доплеровского преобразования частоты. Таким образом, ЛСЭ на основе модифицированных брэгговских резонаторов позволяет объединить достоинства, присущие гиротронам (высокая селективность по поперечному индексу мод) и релятивистским генераторам (возможность освоения коротковолновых диапазонов на высоком уровне импульсной мощности). Согласно моделированию, проведенному как на базе усредненных моделей, так и трехмерных PIC-кодов, модифицированные брэгговские структуры позволяют обеспечить селективное возбуждение рабочей моды при поперечных размерах пространства взаимодействия до $D/\lambda \sim 50$ длин волн, что представляется достаточным для формирования канала транспортировки интенсивных РЭП вплоть до ТГц-диапазона [10, 11].

Работоспособность модифицированных брэгговских резонаторов подтверждена экспериментально в макетах МСЭ, реализованных в сотрудничестве ИПФ РАН и ОИЯИ на основе ускорителя “ЛИУ-3000” 0.8 МэВ/200 А/200 нс (ОИЯИ, Дубна). Использование высокоселективных брэгговских резонаторов нового типа позволило получить в этих экспериментах стабильную узкополосную генерацию вплоть до W-диапазона частот при сверхразмерности $D/\lambda \sim 5$ и мультимагваттном уровне мощности [12]. Важно отметить, что в реализованных МСЭ на основе модифицированных брэгговских резонаторов при изменении амплитуды ондуляторного поля (соответственно, расстройки синхронизма электронов с рабочей волной) узкополосная генерация на основной моде имела место во всей полосе зоны самовозбуждения, что демонстрирует стабильность рабочего режима к изменению параметров пучка. В МСЭ с “традиционными” брэгговскими резонаторами при подобном изменении ондуляторного поля в предшествующих экспериментах уже при сверхразмерности системы $D/\lambda \sim 2$ наблюдались перескоки частоты генерации, соответствующие возбуждению различных пар волноводных мод (см., например, [13]).

Дальнейшее увеличение частоты излучения в ОИЯИ–ИПФ МСЭ было ограничено реализуемыми периодами ондуляторов и энергией электронного пучка, формируемого ускорителем “ЛИУ-3000”. В то же время, продвижение данного типа генераторов в область терагерцовых частоты может быть достигнуто на базе семейства более мощных ускорителей “ЛИУ”, созданных в ИЯФ СО РАН [1, 2]. Однако работа мощных ЛСЭ-генераторов в высокочастотных диапазонах неизбежно требует увеличения сверхразмерности пространства взаимодействия. Это необходимо, с одной стороны, для формирования канала транспортировки интенсивного РЭП, а с другой – для снижения омических потерь.

Для решения указанной проблемы была исследована возможность реализации в суб-ТГц/ТГц диапазоне резонаторов на основе модифицированных брэгговских структур с фактором сверхразмерности, на порядок и более превосходящем длину волны. На данном этапе были разработаны модифицированные брэгговские структуры для работы ЛСЭ в диапазоне 0.7 ТГц (рис. 1а). Эти структуры имели диаметр $D \approx 20$ мм ($D/\lambda \sim 45$) и длину около 5 см, гофрировка с периодом 0.43 мм и глубиной 0.15 мм обеспечивала цикл обратной связи $TE_{1,1} \leftrightarrow TE_{1,45} \leftrightarrow TE_{1,1}$. Трехмерное моделирование с использованием кода CST Microwave Studio показывает, что даже при таких больших поперечных размерах модифицированные брэгговские структуры позволяют осуществить селективное отражение рабочей волны с эффективностью $\sim 90\%$ по мощности. Проведенные “холодные”

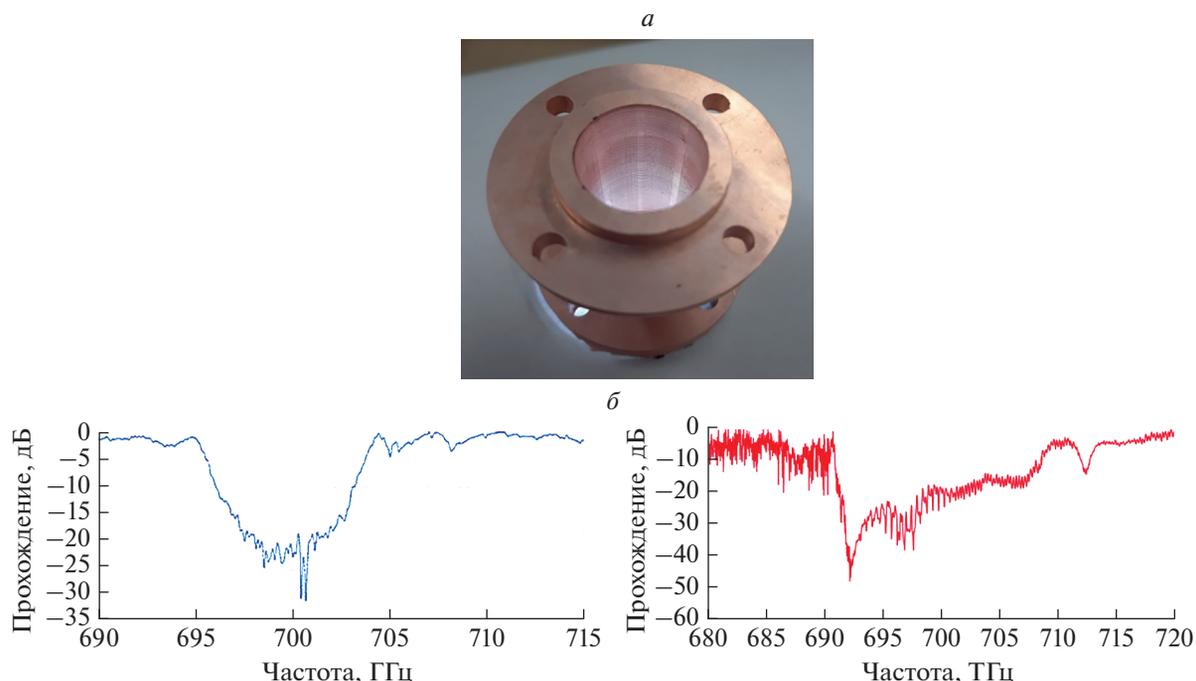


Рис. 1. Фотография макета модифицированной брэгговской структуры диапазона 0.7 ТГц (а), результаты его 3D моделирования (слева) и “холодного” тестирования (справа): частотная зависимость коэффициента прохождения (б).

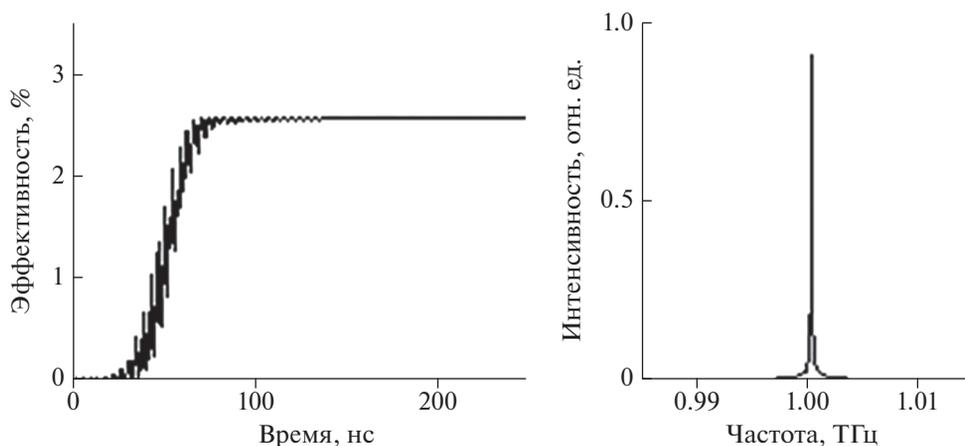


Рис. 2. Результаты моделирования ЛСЭ с двухзеркальным резонатором на основе модифицированных брэгговских структур, запитываемого ускорителем “ЛИУ”, в диапазоне 1 ТГц: зависимость электронного КПД от времени (слева) и частотный спектр излучения (справа).

электродинамические тесты подтверждают результаты моделирования и демонстрируют наличие эффективного узкополосного отражения в расчетной области частот (рис. 1б). Следует отметить, что при изготовлении описанного макета брэгговских структур использовалась развиваемая в ИПФ РАН новая аддитивная технология фотополимерной 3D печати с последующим химическим нанесением медного слоя [14].

Результаты моделирования брэгговского ЛСЭ-генератора в ТГц-диапазоне на основе ускорителя “ЛИУ” с параметрами 5 МэВ/2 кА

представлены на рис. 2. Моделирование проводилось в рамках развитых усредненных трехмерных квазиоптических моделей электронно-волнового взаимодействия на основе метода связанных волн при параметрах, близких к условиям планируемых экспериментов. Разработанная магнитная система данного ЛСЭ включает в себя импульсный винтовой ондулятор с периодом 4 см для раскачки рабочих баунс-осцилляций электронов и соленоиды, создающие ведущее продольное магнитное поле ~0.4 Тл (в так называемой обратной конфигурации), для фокусировки и транспорти-

а

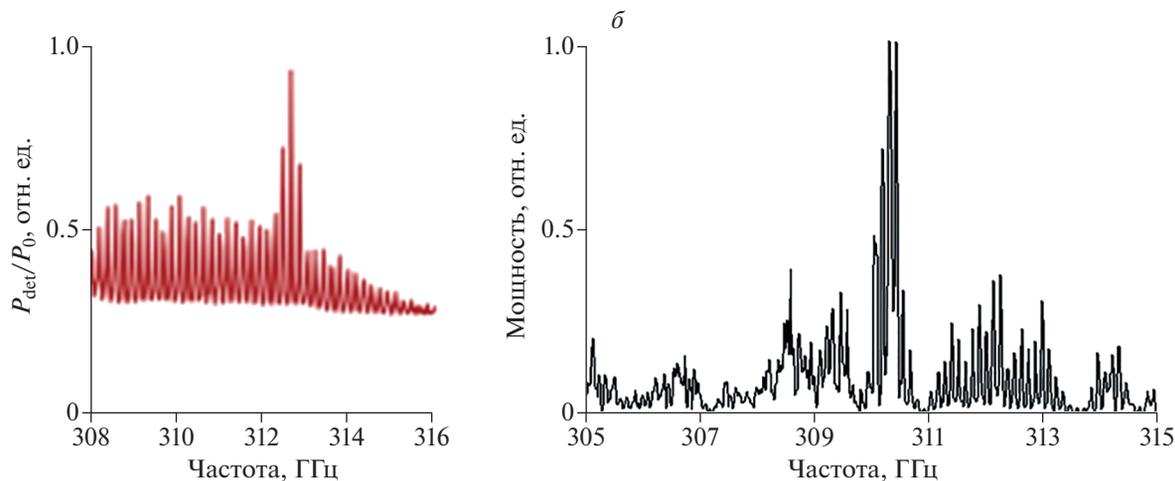


Рис. 3. Фотография макета резонатора, основанного на эффекте Тальбота, диапазона 0.3 ТГц (а), результаты его моделирования (слева) и “холодного” тестирования (справа): частотная зависимость мощности сигнала, детектируемого в отверстии связи (б).

ровки интенсивного РЭП (см. подробнее [5]). В качестве электродинамической системы ЛСЭ предполагается использовать двухзеркальный резонатор, в котором модифицированные брэгговские структуры выступают в роли эффективных селективных отражателей. Согласно результатам проведенного моделирования секционирование пространства взаимодействия, которое позволяет осуществить двухзеркальная схема резонатора, привлекательно как с точки зрения снижения омических потерь на высоких частотах, так и с точки зрения увеличения эффективности генератора.

Для работы ЛСЭ на частоте около 1 ТГц был сконструирован двухзеркальный резонатор с диаметром $D \approx 12$ мм (сверхразмерность $D/\lambda \sim 40$), регулярным участком длиной около 50 см и брэгговскими структурами (рефлекторами) длиной 20 см (входная) и 12 см (выходная), имеющими гофрировку с периодом 0.3 мм и глубиной ~ 20 –30 мкм. Согласно моделированию (рис. 2), при расчетных параметрах электронный КПД может достигать 2–3%, а выходная мощность 0.2–0.3 ГВт. Омические потери в этом случае не превышают 25–30% от излучаемой мощности. Следует отметить, что для работы в высокочастотных диапазонах перспективным представляется пере-

ход открытым в поперечном направлении схемам резонаторов (планарным системам, волноводам с боковыми разрезами и др.), которые, как показывает проведенный теоретический анализ, позволяют еще более разредить плотность спектра поперечных мод и, таким образом, обеспечить дальнейшее увеличение селективных свойств.

ЛСЭ С РЕЗОНАТОРАМИ ТАЛЬБОТА-ТИПА

В качестве альтернативного типа электродинамической системы перспективными представляются квазиоптические резонаторы, основанные на эффекте Тальбота [15, 16]. В качестве развития данной идеи в разрабатываемом проекте ЛСЭ исследуется возможность использования простейшего (с технологической точки зрения) резонатора, образованного отрезком гладкого сверхразмерного цилиндрического волновода с двумя шайбами на краях, выполняющими роль зеркал, на которых в результате эффекта Тальбота имеет место периодическое воспроизведение поперечной структуры волнового пучка [17, 18]. Идея подобного резонатора основана на отказе от возбуждения фиксированной поперечной моды и переходе к возбуждению так называемой супер-

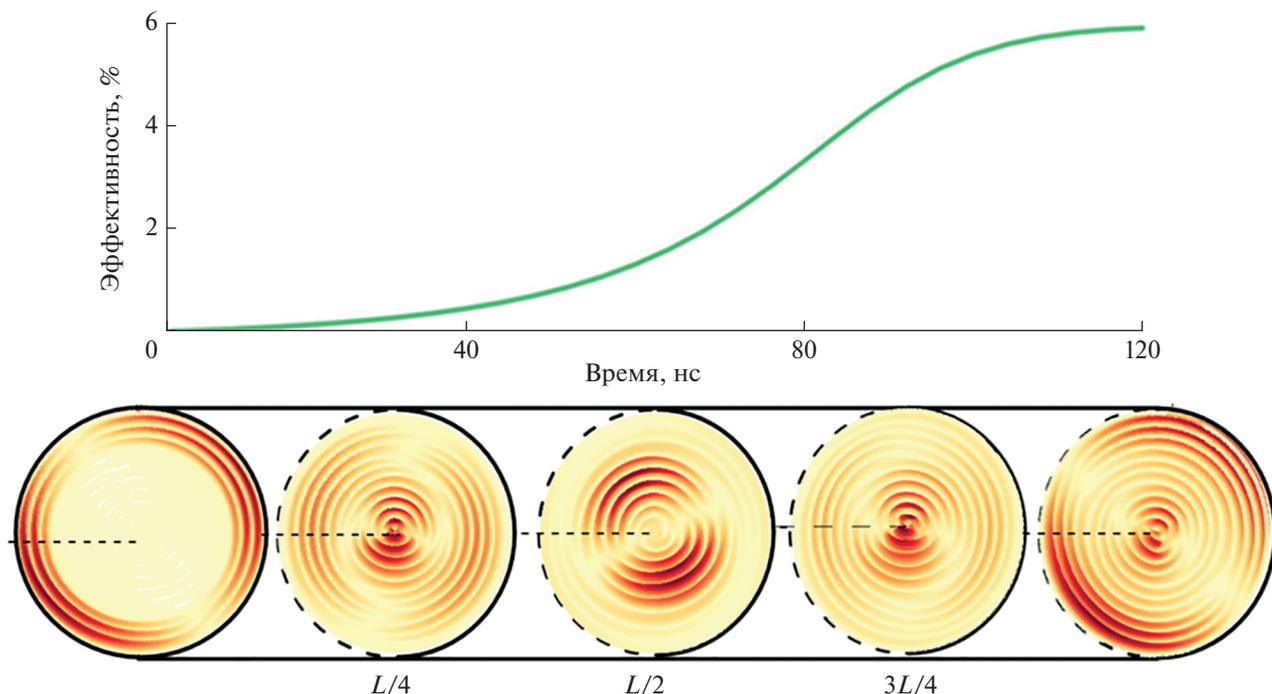


Рис. 4. Результаты моделирования ЛСЭ с резонатором Тальбота-типа на основе ускорителя “ЛИУ” в диапазоне 2 ТГц: зависимость электронного КПД от времени (вверху) и поперечная структура возбужденного волнового пучка в различных поперечных сечениях резонатора в установившемся режиме (внизу).

моды, образованной фиксированным набором нескольких поперечных мод сверхразмерного волновода, имеющих одинаковую частоту.

Для проведения “холодных” тестов макет резонатора, основанного на эффекте Тальбота, был разработан с диаметром 36 мм ($D/\lambda \sim 40$) и длиной около 80 см для работы в диапазоне частот около 0.3 ТГц (рис. 3а). Расположенные по краям зеркала (шайбы) имели ширину 4 мм, на выходном зеркале было выполнено отверстие связи диаметром 2 мм (положение отверстия соответствовало положению расчетного максимума поля). Возбуждение резонатора осуществлялось с входной стороны резонатора волной $TE_{1,1}$ -типа. Согласно проведенному моделированию, эта волна эффективно трансформируется в волну $TE_{1,7}$, максимально представленную в супермоды в рабочей частоте. Детектирование выходного сигнала проводилось через указанное отверстие связи. Моделирование показывает, что на частоте, соответствующей искомой супермоды, должен наблюдаться пик мощности в отверстии связи. В соответствии с результатами моделирования в проведенных “холодных” тестах наблюдался хорошо различимый пик детектируемой выходной мощности на расчетных частотах, что, таким образом, подтверждало работоспособность резонатора данного типа (рис. 3б).

В рамках моделирования была исследована возможность реализации ЛСЭ в области частот в районе 2 ТГц на основе пучка 7 МэВ/1.5 кА, формируемого ускорителем “ЛИУ”. В качестве электродинамической системы данного ЛСЭ рассмотрен резонатор Тальбота-типа с диаметром $D \approx 10.5$ мм ($D/\lambda \sim 70$) и длиной около 60 см. Согласно результатам моделирования (рис. 4) при расчетных параметрах электронный КПД составляет около 5%, что соответствует выходной мощности излучения на уровне 0.5 ГВт. Время переходного процесса при этом достигает ~ 80 – 100 нс (т.е. около 20 пробегов волны по резонатору).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили перспективность создания мощного длинноимпульсного ЛСЭ-генератора, работающего в суб-ТГц/ТГц диапазоне, на основе линейного индукционного ускорителя “ЛИУ” (ИЯФ СО РАН). Для данного ЛСЭ предложены новые высокоселективные схемы резонаторов: модифицированные брэгговские резонаторы и квазиоптические резонаторы, основанные на эффекте Тальбота. Проведенные “холодные” электродинамические тесты продемонстрировали реализуемость и работоспособность указанных резонаторов в условиях существенной сверхразмерности. В рамках

моделирования показана эффективность их использования для обеспечения устойчивого узкополосного режима генерации в ЛСЭ на основе ускорителя “ЛИУ”: модифицированных брэгговских резонаторов от суб-ТГц до ТГц диапазона при сверхразмерности до 40–50 длин волн и резонаторов Тальбота-типа на частотах вплоть до 2–5 ТГц при $D/\lambda \geq 100$. При этом мощность излучения может достигать суб-ГВт уровня, а энергосодержание в импульсах излучения ~ 10 –100 Дж.

В настоящее время ключевые компоненты электродинамической системы изготовлены, макет ЛСЭ-генератора находится в стадии сборки на ускорителе “ЛИУ”. Проведены электронно-оптические эксперименты по формированию РЭП с требуемыми параметрами, его инжекции и транспортировке через пространство взаимодействия. Первоначальные эксперименты по тестированию работы ЛСЭ на расчетном уровне мощности планируется начать в диапазоне 0.6–0.7 ТГц с перспективой перехода в более высокочастотные диапазоны по мере получения позитивных результатов.

Исследование выполнено при частичной поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00212).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Логачев П.В., Кузнецов Г.И., Корепанов А.А. и др. // ПТЭ. 2013. № 6. С. 42; Logachev P.V., Kuznetsov G.I., Korepanov A.A. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2013. V. 56. No. 6. P. 672.*
2. *Никифоров Д.А., Блинов М.Ф., Федоров В.В. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 2(227). С. 158; Nikiforov D.A., Blinov M.F., Fedorov V.V. et al. // Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. No. 2. P. 197.*
3. *Peskov N. Yu., Ginzburg N.S., Malkin A.M. et al. // EPJ Web Conf. 2018. V. 195. Art. No. 01010.*
4. *Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Peskov N. Yu. et al. // IEEE Conf. Proc. The 44th Int. Conf. IRMMW-THz 2019 (Paris, 2019). Art. No. 8874573.*
5. *Аржанников А.В., Бак П.А., Белоусов В.И. и др. // Изв. вузов. Радиофиз. 2021. Т. 64. № 11. С. 905.*
6. *Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. № 20. С. 60; Ginzburg N.S., Malkin A.M., Peskov N. Yu., Sergeev A.S. // Tech. Phys. Lett. 2006. V. 32. No. 10. P. 896.*
7. *Ковалев Н.Ф., Орлова И.М., Петелин М.И. // Изв. вузов. Радиофиз. 1968. Т. 11. № 5. С. 783.*
8. *Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S., Petelin M.I. // IEEE J. Quant. Electron. 1983. V. QE-19. No. 3. P. 282.*
9. *Гапонов А.В., Гольденберг А.Л., Григорьев Д.П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 2. № 9. С. 430.*
10. *Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Зотова И.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. № 6. С. 286; Ginzburg N.S., Zaslavskii V. Yu., Zotova I.V. et al. // JETP Lett. 2010. V. 91. No. 6. P. 266.*
11. *Песков Н.Ю., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Корнишин С.Ю. // Изв. вузов. Радиофиз. 2020. Т. 63. № 5–6. С. 488.*
12. *Peskov N. Yu., Ginzburg N.S., Golubev I.I. et al. // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 116. Art. No. 0006047.*
13. *Ginzburg N.S., Kaminsky A.A., Kaminsky A.K. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. No. 3. P. 542.*
14. *Проявин М.Д., Вихарев А.А., Федотов А.Э. и др. // Изв. вузов. Радиофиз. 2020. Т. 63. № 5–6. С. 521.*
15. *Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Shmelyov M. Yu. // Proc. IRMMW-1993. (Colchester, 1993). P. 485.*
16. *Urbanus W.H., Bongers W.A., Van Der Geer C.A.J. et al. // Phys. Rev. E. 1999. V. 59. No. 5. P. 6058.*
17. *Oparina Yu.S., Peskov N. Yu., Savilov A.V. // Phys. Rev. Appl. 2019. V. 12. Art. No. 044070.*
18. *Oparina Yu.S., Savilov A.V., Shchegolkov D. Yu. // J. Appl. Phys. 2020. V. 128. No. 11. Art. No. 114502.*

Electrodynamic system for powerful THz-band free-electron laser based on linear induction accelerator “LIU”: simulations and “cold” tests

N. Yu. Peskov^{a, b, *}, A. V. Arzhannikov^b, V. I. Belousov^a, N. S. Ginzburg^{a, b}, V. Yu. Zaslavsky^a, D. A. Nikiforov^b, Yu. S. Oparina^{a, b}, A. V. Savilov^a, E. S. Sandalov^b, S. L. Sinitsky^b, D. I. Sobolev^a

^a*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^b*Budker Institute of Nuclear Physics of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

*e-mail: peskov@ipfran.ru

The current stage of development of powerful long-pulse free-electron laser (FEL) of the terahertz band carried out in the BINP RAS in collaboration with the IAP RAS based on the linear induction accelerator “LIU” with an energy of 5–10 MeV, a kA-level current, and a pulse duration of up to 200 ns is described. To ensure a stable narrow-band generation regime, the project proposes the use of two alternative types of the electrodynamic system: advanced Bragg resonators and quasi-optical Talbot-type resonators. We discussed design parameters of the FEL based on these resonators and results of their simulations under conditions of substantial oversize. Operability of resonators of the novel types was demonstrated in the “cold” electrodynamic tests.