

УДК 537.87;537.533

ПЛАНАРНЫЕ ЛСЭ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ И ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОГО РАССЕЙЯНИЯ ВОЛН

© 2019 г. А. В. Аржанников¹, Н. С. Гинзбург², В. Ю. Заславский², П. В. Калинин¹,
Н. Ю. Песков², *, Е. С. Сандалов¹, А. С. Сергеев², С. Л. Синицкий¹, В. Д. Степанов¹

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

²Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: peskov@appl.sci-nnov.ru

Проект планарного ЛСЭ, работающего в терагерцевом диапазоне на мультимегаваттном уровне мощности, развивается в настоящее время на базе ускорителя ЭЛМИ в сотрудничестве ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН. Генератор запитывается интенсивными параллельными ленточными электронными пучками умеренно-релятивистской энергии, а продвижение в указанный диапазон достигается путем использования двухстадийной каскадной схемы: первый пучок генерирует мощную миллиметровую волну накачки, которая затем передается по каналам связи в параллельный канал и рассеивается на втором пучке в волну излучения терагерцевого диапазона. В статье обсуждаются различные возможные компоновки данной схемы ЛСЭ, приведены результаты их моделирования. Представлены результаты “холодных” тестов электродинамической системы генератора.

DOI: 10.1134/S0367676519020030

ВВЕДЕНИЕ

Оригинальная концепция создания сверхмощных импульсных генераторов планарной геометрии на основе сильноточных ленточных релятивистских электронных пучков (РЭП) развивается в течение ряда лет в сотрудничестве ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород). Основой данной концепции является идея увеличения интегральной выходной мощности путем развития пространства взаимодействия вдоль одной из поперечных координат при сохранении неизменными локальных величин плотности тока пучка и плотности потоков электромагнитной энергии. Для обеспечения пространственной когерентности излучения в условиях существенной сверхразмерности пространства взаимодействия предложено использование двумерной распределенной обратной связи (РОС) [1]. Проведенные к настоящему времени теоретические исследования показали, что использование двумерной РОС в релятивистских мазерах, основанных на различных механизмах индуцированного излучения, позволяет получить устойчивый режим одномодовой генерации при поперечных размерах систем, достигающих до $\sim 10^2 - 10^3$ длин волн [2, 3]. Работоспособность нового механизма обратной связи продемонстрирована в планарном 75 ГГц-мазере на свободных

электронах (МСЭ), реализованном на ускорителе “ЭЛМИ”. В этих экспериментах получена стабильная узкополосная генерация с рекордными для данного класса генераторов поперечными размерами системы $\sim 50 \times 2.5$ длин волн и мощностью $\sim 50 - 100$ МВт [4, 5].

Дальнейшим развитием концепции использования двумерной РОС может служить создание многоканальных генераторов на основе параллельных ленточных РЭП. Подобные схемы представляются перспективными как с точки зрения дальнейшего увеличения полной мощности излучения [6, 7], так и для продвижения в коротковолновые диапазоны [8, 9]. В данной статье представлены текущие результаты разработки двухстадийного планарного ЛСЭ терагерцевого диапазона на основе параллельных ленточных РЭП, формируемых ускорителем “ЭЛМИ” (ИЯФ СО РАН).

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ВОЗМОЖНЫЕ КОМПОНОВКИ ДВУХСТАДИЙНОГО ЛСЭ

Двухстадийный ЛСЭ на основе ускорителя “ЭЛМИ” (рис. 1) представляет собой каскадный генератор, состоящий из двух связанных секций (каналов). В низкочастотной (НЧ) МСЭ-секции генерация мощной волны мм-диапазона осу-

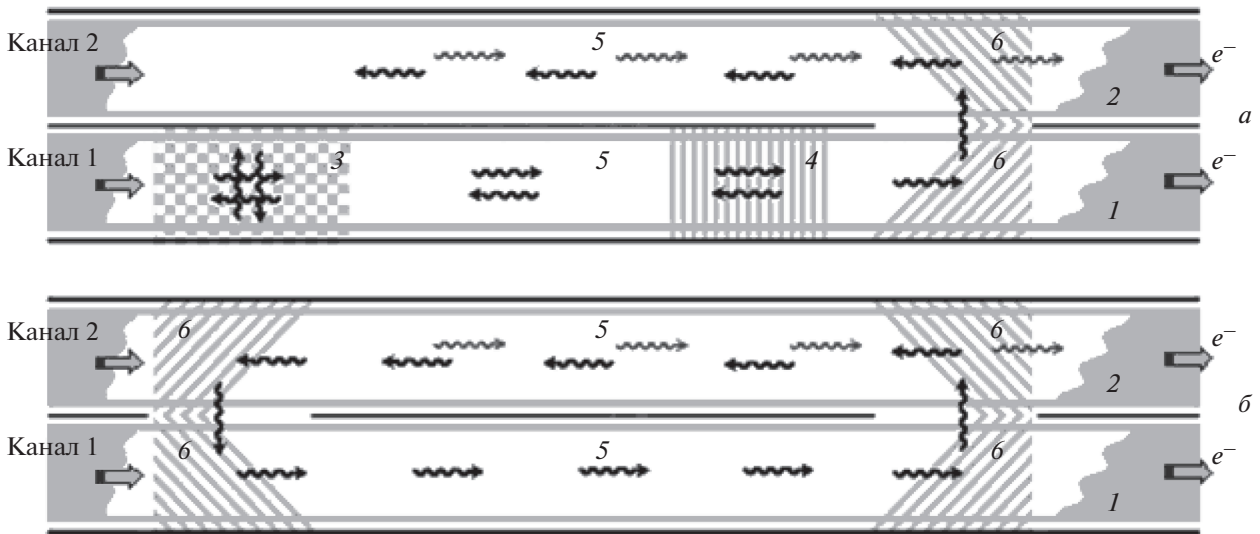


Рис. 1. Схемы электродинамических систем для различных реализаций двухстадийного ЛСЭ на основе ускорителя “ЭЛМИ”: *a* — каскадный ТГц-генератор, для накачки которого используется секция 75 ГГц МСЭ с двумерной РОС; *б* — ТГц-ЛСЭ на основе кольцевого резонатора бегущей волны. На рисунках показаны: 1 и 2 — ленточные РЭП, запитающиеся НЧ- и ВЧ-секции; 3 — двумерный и 4 — одномерный брэгговские рефлекторы; 5 — секции регулярного волновода; 6 — поворотные дефлекторы. Волнистые стрелки иллюстрируют направления потоков энергии парциальных волн (черный цвет соответствует мм волне накачки, серый цвет — рассеянному ТГц-излучению).

ществляется одним из параллельных ленточных РЭП, движущимся в поле планарного магнитостатического ондулятора. Это излучение передается по волноводам связи в другую, относительно более высокочастотную (ВЧ) секцию, которая представляет собой ЛСЭ-скаттрон. В этой секции мм-излучение используется в качестве волны накачки, рассеиваемой на втором параллельном пучке в излучение ТГц-диапазона (магнитостатический ондулятор в ВЧ-секции отсутствует).

Преимуществом электромагнитной накачки [10–13] (так называемый СВЧ-ондулятор) по сравнению с традиционно применяемыми в ЛСЭ магнитостатическими ондуляторами является более короткий пространственный период колебаний, а также удвоенный фактор доплеровского преобразования частоты при встречном рассеянии волны на пучке. Это позволяет продвинуть ЛСЭ на основе длинноимпульсных умеренно релятивистских электронных пучков в терагерцевый диапазон частот при высоком, вплоть до мультимегаваттного, уровне мощности и большом энергосодержании в импульсе. Подобные терагерцевые генераторы имеют несомненную перспективу с точки зрения ряда потенциальных приложений. Использование внутррезонаторного рассеяния, когда генерируемая относительно низкочастотная волна используется в качестве волны накачки в процессе встречного комптоновского рассеяния на этом же или параллельном электронном пучке, позволяет обеспечить необходимую интенсивность поля накачки и упростить электродинамическую систему

генератора. Проведенные ранее экспериментальные исследования [14–17] продемонстрировали высокие потенциальные возможности подобных схем.

Для начальных демонстрационных экспериментов была выбрана относительно более простая схема (рис. 1*a*), в которой в качестве генератора волны накачки (т.е. НЧ-секции) используется одна из реализованных секций 75 ГГц-МСЭ, в котором на предшествующем этапе исследования продемонстрирована эффективная узкополосная генерация [5]. Электродинамическая система этой секции представляет собой комбинированный двухзеркальный резонатор, в котором установленное на входе (с катодной стороны) так называемое “двумерное” зеркало с двумерно-периодической гофрировкой за счет возникающих на ней поперечных (по отношению к движению электронов) потоков электромагнитной энергии осуществляет пространственную когерентность излучения широкого ленточного РЭП. В свою очередь, выходное (коллекторное) одномерно-периодическое, “традиционное”, зеркало служит для замыкания цепи обратной связи и обеспечивает самовозбуждение генератора. Достигнутые в данном МСЭ стабильность режима узкополосной генерации и уровень мощности выходного излучения [5] представляются достаточно высокими, согласно проведенному моделированию, для использования этого излучения в качестве волны накачки в двухстадийных схемах. Для передачи волны накачки в ВЧ-секцию на выходе

75 ГГц-МСЭ используются два поворотных брэгговских дефлектора, каждый из которых изменяет направление распространения потока энергии на угол 90° (см. рис. 1а).

В то же время более оптимальной с точки зрения передачи волны накачки в секцию ТГц-рассеяния представляется схема двухстадийного ЛСЭ, основанная на использовании кольцевого резонатора бегущей волны [9]. Предложенный резонатор (рис. 1б) состоит из четырех брэгговских дефлекторов, формирующих цикл обратной связи для НЧ-генератора накачки и, одновременно, осуществляющих эффективную передачу этой волны накачки в ВЧ-секцию для рассеяния на втором пучке. Согласно проведенному моделированию [9], данная схема позволяет увеличить интенсивность волны накачки путем ее “накопления” в кольцевом брэгговском резонаторе и, таким образом, повысить мощность выходного ТГц-излучения. Однако сложность ее экспериментальной реализации состоит в необходимости одновременной оптимизации электронно-волнового взаимодействия в обеих (НЧ и ВЧ) секциях.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕКЦИИ ТГЦ-РАССЕЯНИЯ

Моделирование работы секции ТГц-рассеяния проводилось на основе оригинальных нестационарных моделей электронно-волнового взаимодействия (см. подробнее [8]). В рамках этих моделей (в настоящее время развит как двумерный, так и трехмерный подход) для описания нелинейной пространственно-временной динамики генераторов используется метод связанных волн, в котором эволюция квазикритических волн с учетом законов дисперсии описывается уравнением параболического типа, а распространяющихся волн – уравнениями переноса; для описания движения электронов используются усредненные уравнения. Трехмерное моделирование электродинамических систем генераторов осуществляется в рамках коммерческих кодов HFSS и CST Microwave Studio.

Для начальной экспериментальной реализации двухстадийного ЛСЭ на ускорителе “ЭЛМИ” был выбран так называемый режим однопроходного усиления собственных шумов SASE (self-amplified spontaneous emission). Результаты моделирования процесса вынужденного рассеяния в ТГц-диапазоне при параметрах, близких к условиям проводимых экспериментов (параметр Пирса составляет $C \approx 10^{-4}$), представлены на рис. 2а. Длина пространства взаимодействия была выбрана около 1 м. Моделирование показывает, что процесс излучения в этом случае типичен для режима SASE, в котором рассеянное излучение имеет характер случайной последовательности импульсов

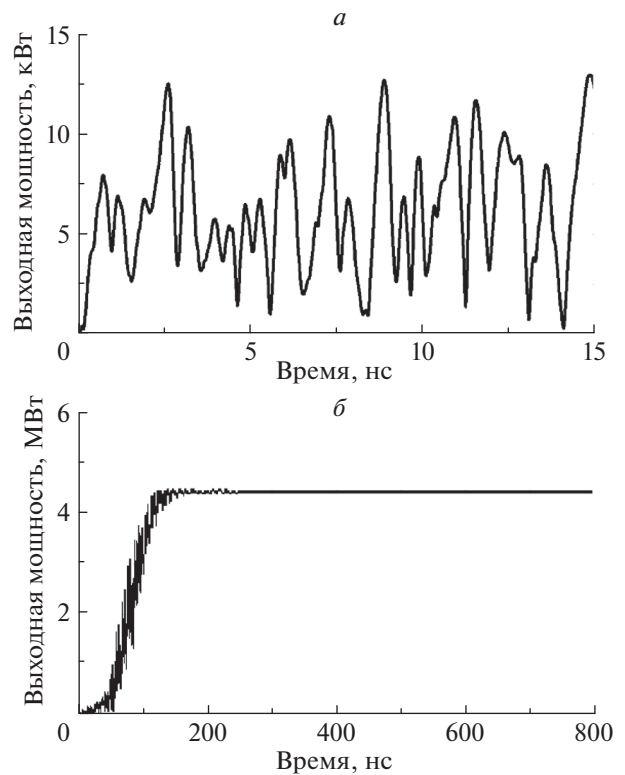


Рис. 2. Моделирование различных режимов работы секции ТГц-рассеяния в двухстадийном ЛСЭ в условиях экспериментов на ускорителе “ЭЛМИ”: а – режим усиления собственных шумов SASE; б – стационарный узкополосный режим генерации при использовании в данной секции двухзеркального модифицированного брэгговского резонатора для рассеянного излучения.

нс-длительности с пиковой мощностью на уровне ~ 10 кВт. Увеличение мощности импульсов SASE до 20–30 кВт может быть получено при увеличении длины пространства взаимодействия до 1.5–2 м, что, однако, требует удлинения вакуумной и магнитной системы, в которых осуществляется транспортировка пучка на ускорителе “ЭЛМИ”.

Кардинальное увеличение выходной мощности излучения в исследуемой схеме двухстадийного ЛСЭ может быть достигнуто при переходе к генераторному режиму путем установки в ВЧ-секции высокодобротного резонатора для рассеянного ТГц-излучения. В качестве такого резонатора было предложено использование модифицированного брэгговского резонатора планарной геометрии, основанного на связи бегущих и квазикритических волн [18, 19]. Достоинством резонаторов данного типа является хорошая совместимость с системой транспортировки сильного точного ленточного РЭП, прозрачность для волны накачки мм-диапазона, а также улучшенные селективные свойства в коротковолновой области вплоть до ТГц-диапазона в условиях су-

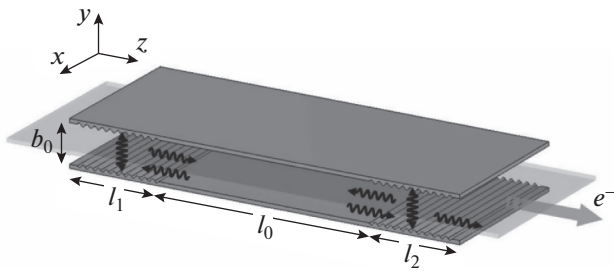


Рис. 3. Схема резонатора ВЧ-секции планарного ТГц-ЛСЭ на основе модифицированных брэгговских зеркал со связью параксиальных и квазикритических волновых пучков (стрелками показаны направления распространения парциальных волновых потоков).

ственной сверхразмерности пространства взаимодействия (по сравнению со своими “традиционными” аналогами, основанными на рассеянии двух встречных параксиальных волн). Модифицированные брэгговские резонаторы позволяют объединить в коротковолновом генераторе ряд достоинств: включение в цепь обратной связи квазикритических (квазипоперечных) волновых потоков реализует механизм селекции, аналогичный используемому в гиротронах и оротронах, а наличие параксиальных волновых потоков, с одним из которых синхронно взаимодействует электронный поток, позволяет обеспечить доплеровское смещение частоты в ЛСЭ.

Для анализа перспективы реализации генераторного режима работы в ТГц-ЛСЭ на ускорителе ЭЛМИ, в рамках трехмерного моделирования была проведена оценка возможности создания модифицированного брэгговского резонатора. Для моделирования была выбрана двухзеркальная конфигурация резонатора на основе двух модифицированных брэгговских отражателей (рис. 3). Параметры резонатора были выбраны применительно к работе на частоте 1 ТГц, его геометрия представляет собой две модифицированные брэгговские структуры с периодом 0.3 мм и глубиной гофрировки 4 мкм, имеющие длины $l_1 = 15$ см и $l_2 = 6.5$ см, между которыми размещена регулярная секция планарного волновода длиной $l_0 = 86$ см. Плоскости планарного резонатора выполнены из меди, зазор между плоскостями имеет величину $b_0 = 6$ мм (т.е. ~ 20 длин волн), что необходимо для транспортировки ленточных РЭП, формируемых ускорителем ЭЛМИ. В модифицированных структурах указанной геометрии цикл обратной связи реализуется обратными и встречными параксиальными волнами ТЕМ-типа через возбуждение квазикритической волны TM_{40} .

Моделирование генераторного режима работы двухстадийного ТГц-ЛСЭ с резонатором описанной выше геометрии в условиях планируемых экс-

периментов на ускорителе “ЭЛМИ” демонстрирует установление стационарного одночастного режима при оптимальных параметрах (рис. 2б). Анализ пространственного распределения выходного излучения демонстрирует формирование когерентной структуры с детерминированной фазой, в которой наиболее сильно представлена основная ТЕМ-мода. Важно отметить, что в результате секционирования пространства взаимодействия основное усиление излучения электронным потоком происходит в пространстве между брэгговскими отражателями. По этой причине амплитуды квазикритических волн обратной связи в основной части пространства взаимодействия имеют относительно небольшую величину, и, соответственно, оказываются невелики омические потери, связанные с возбуждением этих волн. Таким образом, в разработанном проекте около 75% мощности, излученной электронным потоком, выносится из пространства в попутном направлении. При используемой в текущей конфигурации на ускорителе ЭЛМИ ширине электронного пучка 7 см и полном токе 1.5–2 кА, согласно результатам моделирования, мощность рассеянного ТГц-излучения может достигать до 3–5 МВт (электронный КПД около 0.3%). Время установления автоколебаний порядка 150–200 нс. При этом в отличие от рассмотренного выше режима SASE, спектр излучения близок к монохроматическому.

КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДВУХСТАДИЙНОГО ЛСЭ И РЕЗУЛЬТАТЫ “ХОЛОДНЫХ” ТЕСТОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Базой для проведения экспериментальных исследований данной направленности служит высокоточный микросекундный ускорительный комплекс “ЭЛМИ” (ИЯФ СО РАН). В настоящее время данный ускоритель формирует одновременно два параллельных ленточных РЭП, каждый из которых имеет следующие параметры 0.8 МэВ/2 кА/5 мкс при поперечном сечении 7×0.3 см² [20]. Транспортировка пучков осуществляется в вакуумных каналах сечением 10×1 см², величина ведущего магнитного поля в которых для рабочего режима может варьироваться в пределах 1–1.7 Тл. При этом в одном из каналов (в НЧ-секции) присутствует ондуляторная составляющая магнитного поля с индукцией, варьируемой в пределах 0–0.7 Тл.

Основу электродинамической системы двухсекционного каскадного генератора, выбранного, как уже отмечалось выше, для начальной экспериментальной реализации на ускорителе “ЭЛМИ”, составляют поворотные дефлекторы (рис. 4) и брэгговский трансформатор мод (рис. 5). В настоящее время изготовлены макеты указанных элект-

тродинамических элементов и проведены “холодные” электродинамические тесты, в которых показано хорошее соответствие измеренных и расчетных параметров.

Брэгговский дефлектор представляет собой секцию планарного волновода с гофрировкой, трансляционный вектор которой направлен под углом 45° к направлению распространения волнового пучка и отклоняет падающее излучение на угол 90° в полосе брэгговского резонанса. Следует, однако, отметить, что наиболее простые с технологической точки зрения дефлекторы с полным заполнением гофрировкой внутри прямоугольной области обладают относительно большими дифракционными потерями и приводят к существенному искажению поперечной структуры волнового пучка в процессе рассеяния. Очевидно, это снижает эффективность передачи ВЧ-энергии между секциями и в итоге уменьшает амплитуду волны накачки в рабочем пространстве секции ТГц-рассеяния. Согласно проведенному моделированию, оптимизация геометрии области, занятой гофрировкой, позволяет увеличить интегральный коэффициент поперечного рассеяния дефлектора и обеспечить формирование оптимального поперечного профиля волнового пучка. В результате 3D-моделирования определена оптимальная геометрия дефлекторов, которые использованы в “текущей” экспериментальной реализации (рис. 4а). Ширина каждого из дефлекторов составила $l_x = 10$ см, длина $l_z = 13$ см и глубина гофрировки 0.37 мм. “Холодные” тесты структур, изготовленных в соответствии с 3D-расчетом (рис. 4б), продемонстрировали высокий (до 85–90%) коэффициент трансформации волны накачки между секциями в полосе частот 74–76 ГГц (рис. 4в). Дальнейшее увеличение глубины гофрировки ведет к ухудшению модового состава, т.е. появлению в процессе рассеяния на дефлекторе “паразитных” волн с высокими поперечными индексами.

Вторым электродинамическим элементом двухстадийного каскадного ЛСЭ является брэгговский трансформатор мод, преобразующий падающую параксиальную волну накачки в квазикритическую волну (для условий эксперимента ТЕМ-волна преобразуется в TM_3 – моду планарного волновода). Данный трансформатор призван, во-первых, редуцировать в экспериментах частотный диапазон рассеянного излучения до 0.6–1 ТГц, а во-вторых, увеличить связь волны накачки с электронным пучком (в итоге, повысить коэффициент усиления). Как показывает проведенный теоретический анализ и компьютерное моделирование, использование указанной трансформации мод позволяет в условиях экспериментов на ускорителе ЭЛМИ увеличить коэффициент усиления почти на порядок.

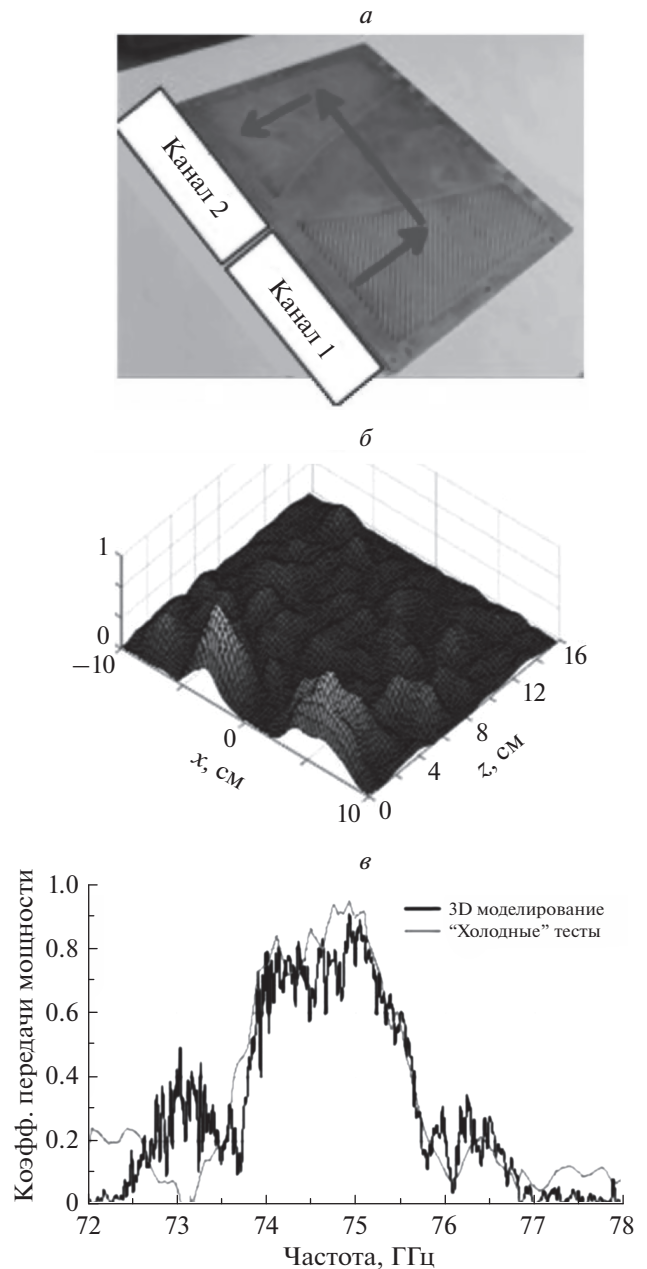


Рис. 4. а – фотография системы двух дефлекторов с оптимизированной геометрией гофрированной области; б – результаты 3D-моделирования процесса трансформации волны накачки в этих дефлекторах на частоте 75 ГГц; в – частотная зависимость коэффициента передачи мощности волнового пучка между двумя каналами, осуществляемого данной системой (кривая черного цвета – моделирование, серого – результаты “холодных” тестов).

На основе проведенного моделирования (результат представлен на рис. 5) был спроектирован брэгговский трансформатор длиной $l_z = 25$ см и зазором $b_0 = 6.15$ см, гофрированный с периодом 5.1 мм и глубиной 0.04 мм. Моделирование показывает, что отражения от трансформатора состав-

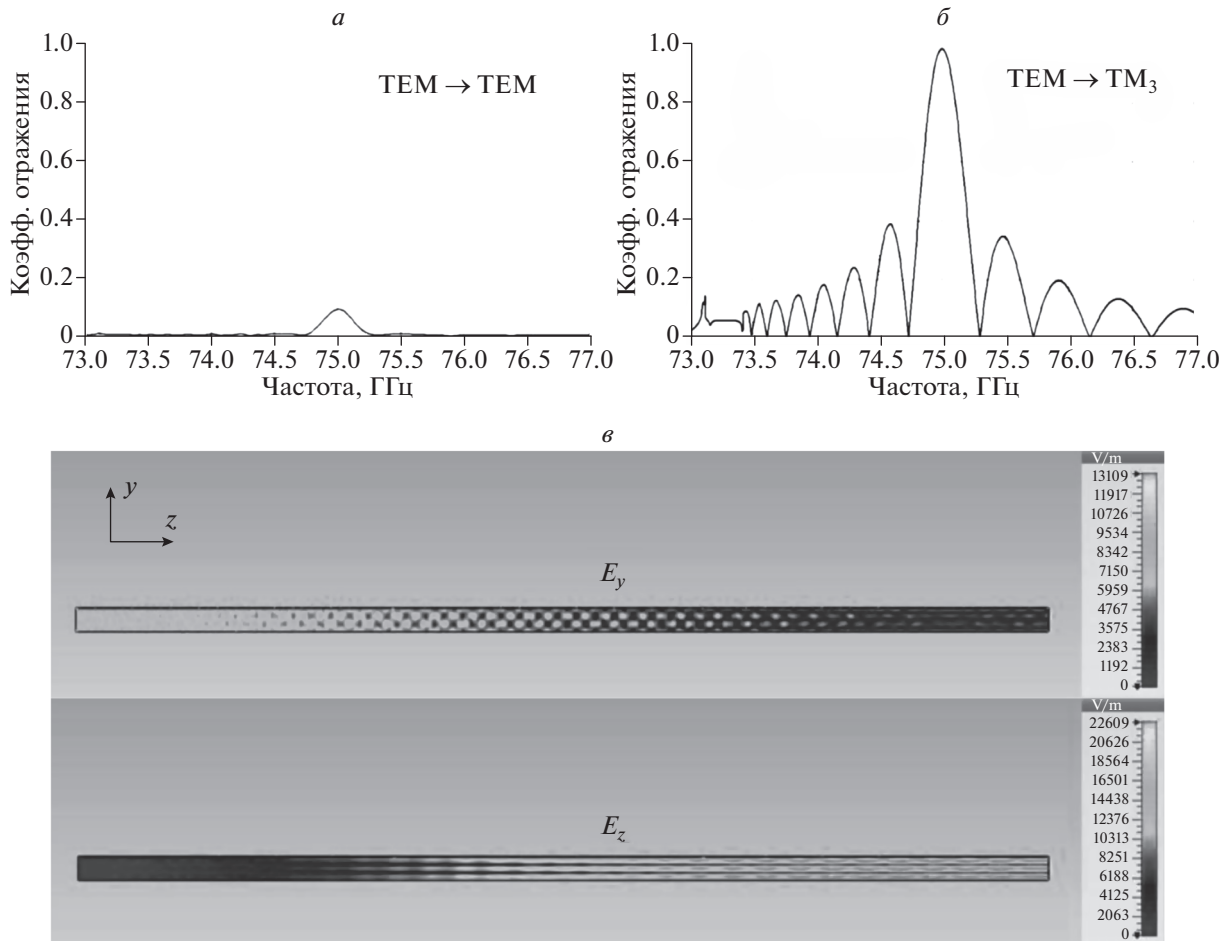


Рис. 5. Результаты 3D-моделирования брэгговского трансформатора мод. Частотные зависимости *a* – коэффициента отражения в TEM-волну; *b* – коэффициента прохождения (рассеяния) в волну TM₃-типа; *в* – Структура компоненты электрического поля E_y , максимально представленной в TEM-волне, и компоненты E_z , присутствующей только в волне TM₃, на частоте 75 ГГц (волна TEM падает на левую границу волновода, волны распространяются по направлению оси z).

ляют не более 1% по мощности (рис. 5*a*), и из этого следует, что 99% по мощности рассеивается в волну TM₃-типа (рис. 5*б*). Максимум рассеяния имеет место на частоте 75 ГГц (частоте генерации задающего каскада двухстадийного ЛСЭ), полоса достигает ~300–500 МГц. Структура полей показывает (рис. 5*в*), что выбранная длина структуры близка к оптимальной, и на данной длине падающая TEM-волна максимально рассеивается в волну TM₃-типа. При указанных параметрах структуры бриллюэновский угол распространения волны TM₃ в волноводе составляет около 80°. Увеличение угла распространения TM₃ – волны вплоть до 90° можно достичь путем уменьшения зазора между пластинами волновода до 6 мм. Однако при этом растут отражения от структуры (в волну TEM-типа) с одновременным сужением полосы брэгговского рассеяния.

ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Таким образом, проведенный теоретический анализ подтвердил перспективность создания двухстадийных каскадных ЛСЭ в терагерцевом диапазоне частот. Рассмотрены различные схемы подобных генераторов, проведено моделирование их работы в режиме однопроходного усиления собственных шумов SASE, а также узкополосной генерации при использовании модифицированных брэгговских резонаторов на рассеянную волну. Продемонстрирована работоспособность ключевых элементов электродинамической системы терагерцевого двухстадийного ЛСЭ в “холодных” тестах.

В настоящее время завершена сборка макета двухстадийного каскадного ЛСЭ на ускорителе “ЭЛМИ”. Проведены работы по модернизации электронно-оптической системы двухстадийного

генератора и эксперименты по формированию двух параллельных ленточных РЭП. В первом канале данного ЛСЭ для раскачки рабочих баунс-колебаний в пучке используется импульсный токовый ондулятор планарной геометрии, обеспечивающий генерацию мощного излучения 4-мм диапазона, во втором канале осуществляется рассеяние этого излучения на распространяющемся прямолинейно ленточном РЭП в ТГц-диапазоне частот. Начато экспериментальное исследование работы двухстадийного ЛСЭ.

В заключение следует отметить, что особенностью развиваемой концепции от уже реализованных ТГц-ЛСЭ на базе линейных высокочастотных ускорителей и микротронов, пучки которых представляют собой последовательность коротких (пикосекундных) импульсов (несомненный лидер среди которых Novo-FEL [21]), является возможность использования длинноимпульсных (микросекундных) электронных пучков и соответственно достижения мульти-МВт мощности ТГц-излучения при энергии импульса до 1–10 Дж. Таким образом, разработанные проекты демонстрируют перспективность создания мощных ТГц-генераторов на основе параллельных ленточных РЭП с умеренно-релятивистской энергией.

Работа проводится при частичной поддержке РФФИ (грант № 16-08-00811). Часть работ проводилась с использованием инфраструктуры ЦКП “СЦСТИ” на базе НЛСЭ ИЯФ СО РАН, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. № 9. С. 23.
2. *Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1995. V. A358. P. 189.
3. *Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S. et al.* // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. № 1. P. 935.
4. *Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87. № 11. С. 715.
5. *Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Kalinin P.V. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. P. 114801.
6. *Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. и др.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. № 6. С. 50.
7. *Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Bobylev V.B. et al.* // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A. 2003. V. A507. P. 129.
8. *Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю. и др.* // Вестн. НГУ. Сер.: Физика. 2012. Т. 1. № 7. С. 5.
9. *Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г. и др.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 17. С. 11.
10. *Pantell R.H., Soncini G., Puthoff H.E.* // IEEE J. of Quant. Electr. 1968. V. QE-4. № 11. P. 905.
11. *McDermott D.B., Marshall T.C., Sclesinger S.E. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 41. № 5. P. 1368.
12. *Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Петелин М.И.* // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28. № 4. С. 207.
13. *Gover A., Sprangle P.* // IEEE J. of Quant. Electr. 1981. V. QE-17. № 8. P. 1196.
14. *Жуков П.Г., Иванов В.С., Рабинович М.С. и др.* // ЖЭТФ. 1979. Т. 76. № 6. С. 2065.
15. *Carmel J., Granatstein V.L., Gover A.* // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 51. № 7. P. 566.
16. *Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S. et al.* // Int. J. of Electron. 1985. V. 59. № 3. P. 247.
17. *Peskov N.Yu., Kaminsky A.K., Kalynov Yu.K. et al.* // Digest of Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics. Cardiff, UK, 2007. V. 2. P. 837.
18. *Ginzburg N.S., Malkin A.M., Peskov N.Yu. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 043504.
19. *Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Зотова И.В. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. С. 286.
20. *Аржанников А.В., Астрелин В.Т., Калинин П.В. и др.* // Вестник НГУ, Сер.: Физика. 2007. Т. 2. Вып. 4. С. 125.
21. Novo-FEL home website: <http://www.inp.nsk.su/nauka/.../novosibirskij-lse>.