

УДК 621.385

## СВЕРХРАЗМЕРНЫЕ МОДИФИЦИРОВАННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ МОЩНЫХ ДЛИННОИМУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

*Н. Ю. Песков<sup>1,2\*</sup>, Н. С. Гинзбург<sup>1,2</sup>, В. Ю. Заславский<sup>1,3</sup>, С. Ю. Корнишин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

<sup>2</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск;

<sup>3</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Исследована новая модификация брэгговских структур, основанных на связи бегущих и квази-критических волн, а также возможность её использования в качестве электродинамической системы мазеров и лазеров на свободных электронах (МСЭ, ЛСЭ). Показано, что включение в цикл обратной связи квазикритических волн позволяет существенно улучшить селективные характеристики брэгговских структур и обеспечить стабильный режим одночастотной генерации при значительном (по сравнению с длиной волны) поперечном размере пространства взаимодействия. Моделирование и «холодные» электродинамические тесты, подтверждающие высокую эффективность использования структур данного типа, выполнены в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Работоспособность нового механизма обратной связи подтверждена в серии экспериментов с генераторами на основе ЛСЭ (МСЭ), которые проведены совместно в Объединённом институте ядерных исследований (г. Дубна) и ИПФ РАН в диапазонах частот от Ка до W при поперечном размере резонаторов, составляющем до 5 длин волн. Обсуждается проект мощного длинноимпульсного ЛСЭ субтерагерцового и терагерцового диапазонов, разрабатываемого в сотрудничестве ИПФ РАН и ИЯФ СО РАН. Приведены результаты моделирования электродинамической системы на основе модифицированных брэгговских отражателей с диаметром 20 и 40 длин волн для реализации ЛСЭ в диапазонах 300 и 600 ГГц соответственно.

### ВВЕДЕНИЕ

Проект сверхмощного лазера на свободных электронах (ЛСЭ), работающего в диапазонах частот от субтерагерцового до терагерцового, развивается в настоящее время в сотрудничестве ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН [1, 2]. Основой проекта служит новое поколение линейных индукционных ускорителей (ЛИУ), реализованных в последние годы в ИЯФ СО РАН [3], которые способны формировать релятивистские электронные пучки (РЭП) с энергией частиц 5÷20 МэВ, током 1÷2 кА и длительностью до 200 нс. Использование подобных РЭП позволяет реализовать в указанных диапазонах длинноимпульсные ЛСЭ с субгигаваттным уровнем мощности и энергозапасом в импульсе порядка 10÷100 Дж. При создании подобных коротковолновых генераторов на первый план выступает проблема разработки электродинамической системы, способной обеспечить устойчивый узкополосный режим работы при существенном (по сравнению с длиной волны) поперечном размере пространства взаимодействия.

К настоящему времени широкое применение в качестве электродинамических систем мощных релятивистских микроволновых генераторов получили предложенные в [4, 5] брэгговские резонаторы в виде отрезков волноводов с неглубокой гофрировкой боковых стенок. В традиционном варианте такие структуры, как и их оптические аналоги [6], в условиях брэгговского резонанса реализуют связь и взаимное рассеяние двух встречно-распространяющихся волн: попутной, синхронно взаимодействующей с РЭП, и встречной, формирующей цикл обратной связи.

\* peskov@appl.sci-nnov.ru

Использование брэгговских резонаторов позволило успешно реализовать узкополосные мазеры на свободных электронах (МСЭ) [5, 7–10] в длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн. Однако во всех упомянутых экспериментах поперечные размеры (диаметры)  $D$  электродинамических систем на основе «традиционных» одномерных брэгговских резонаторов не превышали нескольких длин волн излучения:  $D/\lambda \sim 2 \div 3$ . Дальнейшее увеличение их размеров сопряжено с потерей селективности по поперечным индексам мод, обладающих различной поперечной структурой. Вместе с тем продвижение мощных ЛСЭ-генераторов в коротковолновую часть миллиметрового диапазона и далее в субмиллиметровый диапазон неизбежно требует увеличения параметра сверхразмерности пространства взаимодействия. Это необходимо, с одной стороны, для формирования канала транспортировки интенсивного электронного пучка, а с другой — для снижения омических потерь. В этих условиях существенно возрастают требования к селективным характеристикам брэгговских резонаторов.

В качестве перспективного подхода к решению указанной задачи может рассматриваться использование так называемых модифицированных брэгговских структур, отличительной особенностью которых является связь бегущих и квазикритических волн [11, 12]. Достоинством таких структур является существенно бóльшая селективность по сравнению с «традиционными» аналогами. Согласно проведённому теоретическому анализу как на базе усреднённых моделей, так и трёхмерных РС-кодов [13, 14] модифицированные брэгговские структуры позволяют обеспечить селективное возбуждение рабочей моды при поперечных размерах пространства взаимодействия до  $20 \div 40$  длин волн, что представляется достаточным для формирования канала транспортировки интенсивных РЭП в диапазонах вплоть до терагерцового.

В данной статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований модифицированных брэгговских резонаторов цилиндрической геометрии. Работоспособность резонаторов нового типа подтверждена экспериментально в макетах МСЭ, реализованных на ускорителе ЛИУ-3000 (Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна) вплоть до W-диапазона при диаметре до 5 длин волн и мультимегаваттном уровне мощности. Приводятся результаты «холодных» электродинамических тестов для частот около 250 ГГц, выполненных при параметре сверхразмерности  $D/\lambda \sim 7$ . Обсуждаются проекты электродинамических систем с диаметром порядка 20 и 40 длин волн, ориентированные на создание ЛСЭ с рабочими частотами 300 и 600 ГГц соответственно на основе нового поколения ЛИУ.

## 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР

Модифицированная брэгговская структура может быть выполнена в виде отрезка цилиндрического волновода с неглубокой осесимметричной гофрировкой

$$r = r_0 + r_{\text{ad}} \cos(\bar{h}_{\text{ad}} z), \quad (1)$$

где  $\bar{h}_{\text{ad}} = 2\pi/d_{\text{ad}}$ ,  $d_{\text{ad}}$  и  $r_{\text{ad}}$  — период и амплитуда гофрировки соответственно,  $r_0 = D/2$  — средний радиус волновода,  $z$  — продольная координата. Данная гофрировка при выполнении условия брэгговского резонанса (см. рис. 1а)

$$\bar{h}_{\text{ad}} \approx h \quad (2)$$

обеспечивает связь и взаимное рассеяние квазикритической волны

$$\mathbf{E} = \text{Re}[B(z, t)\mathbf{E}_B(r_{\perp}) \exp(i\omega t)] \quad (3a)$$

и двух бегущих во встречном направлении волн

$$\mathbf{E} = \operatorname{Re}\left\{[A_+(z, t) \exp(-ihz) + A_-(z, t) \exp(ihz)] \mathbf{E}_A(r_\perp) \exp(i\omega t)\right\}, \quad (36)$$

где  $\mathbf{E}_B(r_\perp)$  и  $\mathbf{E}_A(r_\perp)$  — функции, описывающие поперечную структуру волн, совпадающую с модами регулярного цилиндрического волновода,  $\omega$  — круговая частота,  $t$  — время. Важно подчеркнуть, что, в отличие от «традиционных» аналогов, в модифицированной брэгговской структуре непосредственная связь попутной и встречной волн (36) отсутствует и возникает только через возбуждение квазикритической волны (3а) (ср. рис. 1а и б). Вовлечение в цепь обратной связи критической волны, подобно тому, как это имеет место в гиротронах [15], позволяет значительно разредить спектр мод резонатора: при большом параметре сверхразмерности  $D/\lambda \gg 1$  плотность спектра критических волн  $(\Delta\omega/\omega)_c$  существенно меньше плотности спектра параксиальных волн  $(\Delta\omega/\omega)_{\text{par}}$ , определяющих цикл обратной связи в брэгговских резонаторах «традиционного» типа:

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)_c \sim \frac{\lambda}{D} \gg \left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)_{\text{par}} \sim \frac{\lambda^2}{D^2}. \quad (4)$$

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  $A_+$  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).

При умеренном параметре сверхразмерности  $D/\lambda \sim 5 \div 7$  оптимальной представляется комбинированная двухзеркальная схема (см. рис. 1в), в которой модифицированное брэгговское зеркало, обеспечивающее селективное возбуждение рабочей моды, расположено на входе (с катодной стороны) пространства взаимодействия. Запитка ЛСЭ сильноточными РЭП позволяет обеспечить высокий коэффициент усиления в регулярной части резонатора, при этом на выходе (с коллекторной стороны) может быть использована «традиционная» брэгговская структура, обеспечивающая в условиях брэгговского резонанса

$$\bar{h}_{\text{tr}} \approx 2h \quad (5)$$

отражение относительно небольшой части мощности рабочей волны  $A_+$  во встречную волну  $A_-$  и, таким образом, замыкание цепи обратной связи генератора. Согласно проведённому моделированию [16] секционирование пространства взаимодействия обеспечивает относительно невысокий уровень амплитуды квазикритической волны, что позволяет контролировать омические потери, связанные с возбуждением этой моды, а также снизить пробойные ограничения. При дальнейшем увеличении параметра сверхразмерности ( $D/\lambda \geq 10$ ) коэффициент отражения брэгговских зеркал «традиционного» типа существенно падает. В этих условиях могут быть использованы двухзеркальные резонаторы, в которых в качестве обоих (входного и выходного) отражателей выступают модифицированные структуры. Подобные резонаторы также позволяют уменьшить уровень омических потерь по сравнению с резонаторами в виде одной волноводной секции с модифицированной брэгговской гофрировкой [14].

Сравнение (2) и (5) показывает, что для реализации «модифицированного» брэгговского рассеяния период структур должен в два раза превосходить период «традиционных» аналогов:

$$d_{\text{ad}} = 2d_{\text{tr}}. \quad (6)$$

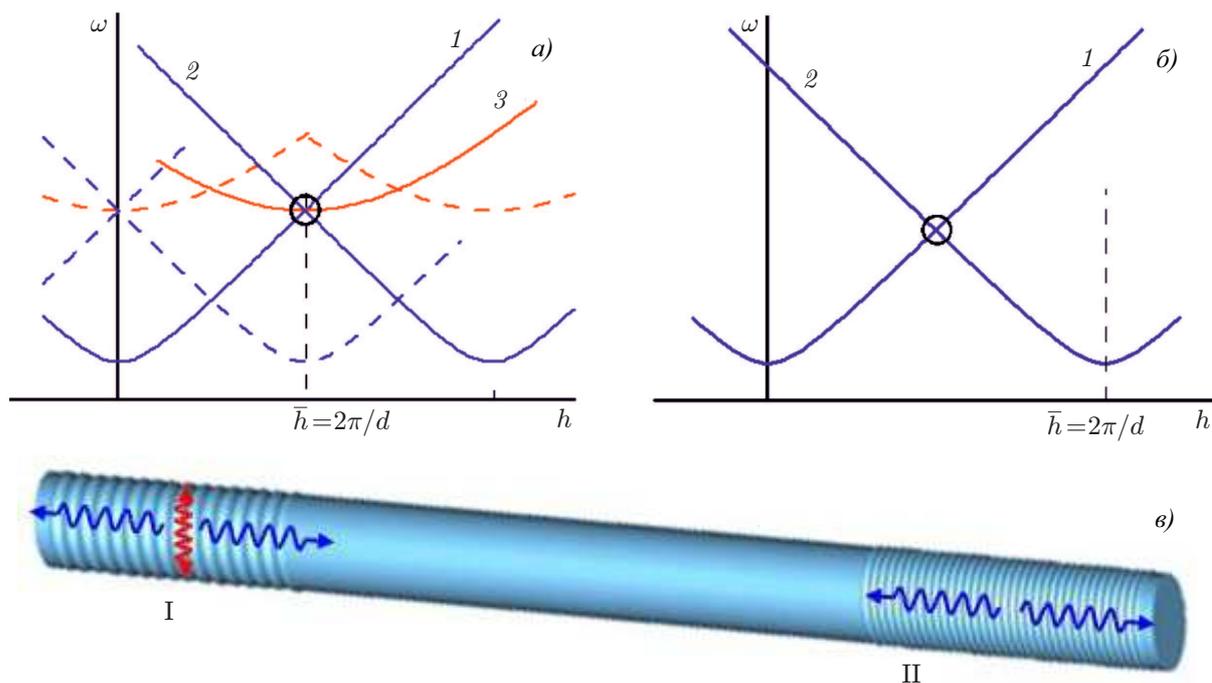


Рис. 1. Дисперсионные диаграммы, иллюстрирующие процесс рассеяния парциальных волн в брэгговских структурах различных типов: (а) модифицированная структура, основанная на связи бегущих волн 1, 2 и квазикритической волны 3, и (б) «традиционная» структура, связывающая бегущие параксиальные волны 1 и 2, а также (в) схема комбинированного двухзеркального резонатора, в котором в качестве рефлекторов используются структуры данного типа (стрелками показаны направления распространения парциальных волновых потоков в соответствующих структурах): I — модифицированная, II — «традиционная» брэгговская структура

Это является дополнительным преимуществом модифицированных структур при продвижении в коротковолновые диапазоны. В условиях волноводной дисперсии соотношение (2) выполняется при следующем соотношении геометрических размеров:

$$2\pi/d_{\text{ад}} \approx \sqrt{\nu_B^2 - \nu_A^2}/r_0, \quad (7)$$

где  $\nu_A$  и  $\nu_B$  — нули производной функций Бесселя для соответствующих волн.

## 2. МОДЕЛИРУЮЩИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Исследование селективных свойств модифицированных брэгговских структур было начато в миллиметровом диапазоне с последовательным увеличением параметра сверхразмерности. В качестве рабочей волны во всех сериях резонаторов использовалась низшая волна  $\text{TE}_{1,1}$ . Эксперименты были начаты в  $K_a$ -диапазоне (рабочая частота около 30 ГГц) [16] при параметре сверхразмерности  $D/\lambda \sim 2$ . В этих условиях модифицированная структура была рассчитана на отражение рабочей волны  $\text{TE}_{1,1}$  в волну того же типа через возбуждение квазикритической волны  $\text{TE}_{1,2}$ . Для работы в  $V$ -диапазоне (около 60 ГГц) была спроектирована структура с параметром сверхразмерности  $D/\lambda \sim 3$  и связью волн<sup>1</sup>  $\text{TE}_{1,1} \leftrightarrow \text{TM}_{1,2}^{\text{cutoff}} \leftrightarrow \text{TE}_{1,1}$ . В  $W$ -диапазоне (около 80 ГГц)

<sup>1</sup> Индекс cutoff означает отсечку.

модифицированная структура работала в цикле обратной связи  $TE_{1,1} \leftrightarrow TE_{1,5}^{\text{cutoff}} \leftrightarrow TE_{1,1}$  при параметре сверхразмерности  $D/\lambda \sim 5$ . Результаты трёхмерного моделирования частотных зависимостей коэффициентов отражения структур V- и W-диапазонов на основе коммерческого кода CST Microwave Studio приведены на рис. 2 и 3 соответственно. На этих же рисунках дано их сравнение с аналогичными характеристиками «традиционных» брэгговских структур с таким же параметром сверхразмерности, рассчитанных на отражение двух встречно распространяющихся волн  $TE_{1,1}$ -типа. Следует отметить, что исследованные структуры использовались в качестве выходных рефлекторов в комбинированных схемах резонаторов при описанных далее экспериментальных реализациях МСЭ на базе ускорителя ЛИУ-3000 (ОИЯИ, г. Дубна).

Результаты проведённых «холодных» тестов брэгговских структур различных типов в соответствующих частотных диапазонах представлены на рис. 2 и 3 в сравнении с расчётными параметрами. Измерения частотных зависимостей коэффициентов отражения модифицированных брэгговских структур показали наличие для рабочей волны  $TE_{1,1}$  относительно узкой (порядка  $200 \div 300$  МГц) полосы отражений на расчётных частотах, определяемых резонансом (2), что хорошо соответствует результатам моделирования. Для традиционных брэгговских зеркал при одинаковой глубине гофрировки зона отражения значительно шире и составляет порядка  $2 \div 3$  ГГц в различных частотных диапазонах. Важно отметить, что увеличение сверхразмерности в традиционных брэгговских структурах приводит к сближению соседних полос брэгговского резонанса (вплоть до их перекрытия при  $D/\lambda \sim 5$ ). В то же время в модифицированных структурах наблюдается уединённая узкая полоса при всех исследованных параметрах сверхразмерности, что подтверждает существенное улучшение селективных свойств этих структур.

Возможности использования новой схемы обратной связи в ЛСЭ (МСЭ) исследовалась в серии демонстрационных экспериментов на базе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 (ОИЯИ, г. Дубна) с энергией электронов пучка 0,8 МэВ, током 200 А и длительностью 200 нс. Эксперименты проводились в диапазонах частот от  $K_a$  до W, в качестве электродинамических систем МСЭ-генераторов применялись комбинированные резонаторы с модифицированными и «традиционными» брэгговскими структурами, параметры которых описаны выше. Результаты экспериментов подтвердили работоспособность резонаторов, основанных на использовании модифицированных брэгговских структур, при большом параметре сверхразмерности [17, 18]. Следует отметить, что в начальных экспериментах в  $K_a$ -диапазоне [16] для измерения частоты использовалась гетеродинная методика, которая подтвердила реализацию узкополосного режима генерации. В указанных экспериментах в расчётной области параметров была зарегистрирована генерация на частоте 30,2 ГГц, соответствующей возбуждению описанной выше комбинации бегущих и критической парциальных волн, при ширине спектра излучения около  $6 \div 7$  МГц, близкой к теоретическому пределу для импульсов с длительностью  $150 \div 180$  нс. При оптимальных параметрах измеренная калориметром мощность излучения составляла до 17 МВт (коэффициент полезного действия около 15 %).

В МСЭ-генераторах, реализованных в V- и W-диапазонах, диагностика частоты излучения осуществлялась путём использования набора калиброванных (в «холодных» измерениях) волноводных фильтров, имеющих шаг по частоте около 1 ГГц. Измерения продемонстрировали, что частота генерации МСЭ в обоих диапазонах лежит в полосе отражений модифицированной брэгговской структуры, найденной при моделировании и в «холодных» тестах. Типичные осциллограммы импульсов тока и сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в МСЭ W-диапазона представлены на рис. 4. При токе пучка около  $120 \div 150$  А мощность излучения достигала 7 МВт (коэффициент полезного действия около 7 %). При полной длительности тока пучка около 200 нс длительность СВЧ-импульса составляла примерно  $100 \div 150$  нс, что находится в хорошем соответствии с результатами моделирования (подробнее см. [18]) с учётом времени установления

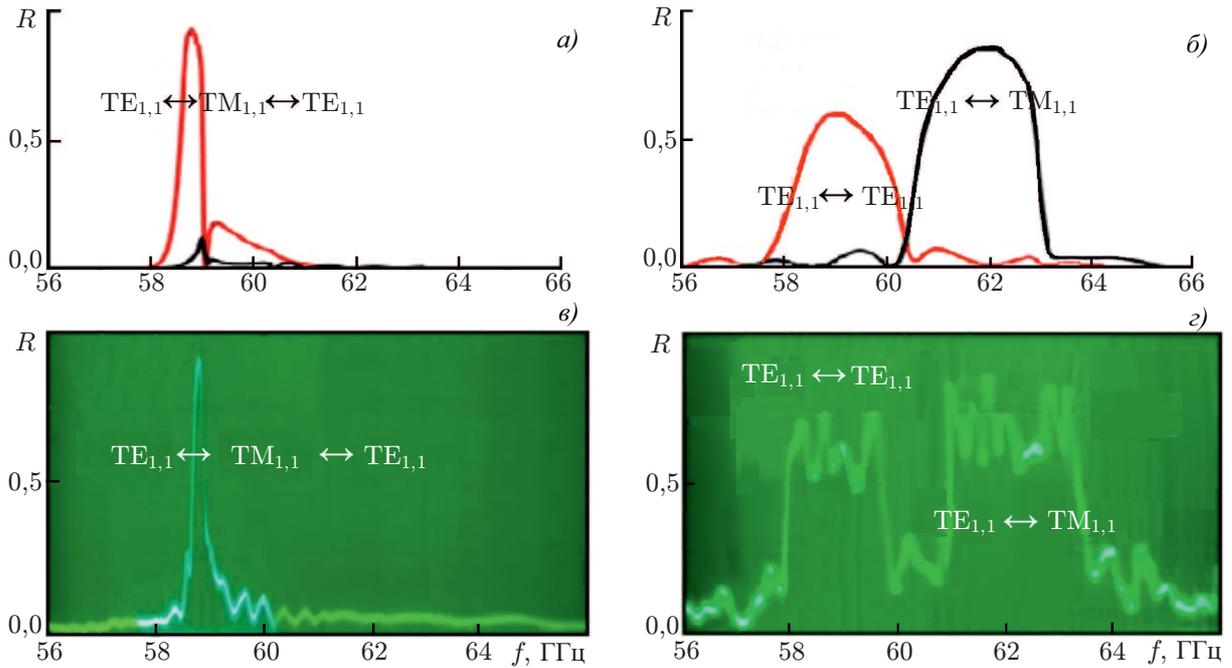


Рис. 2. Результаты трёхмерного моделирования (а, б) и «холодных» электродинамических тестов (в, г) различных типов брэгговских структур в V-диапазоне при  $D/\lambda \sim 3$ : (а, в) модифицированной (длина  $l_{ad} = 12$  см,  $d_{ad} = 5,3$  мм,  $r_{ad} = 0,15$  мм) и (б, г) «традиционной» ( $l_{tr} = 6$  см,  $d_{tr} = 2,6$  мм,  $r_{tr} = 0,2$  мм);  $R$  – коэффициент отражения по мощности

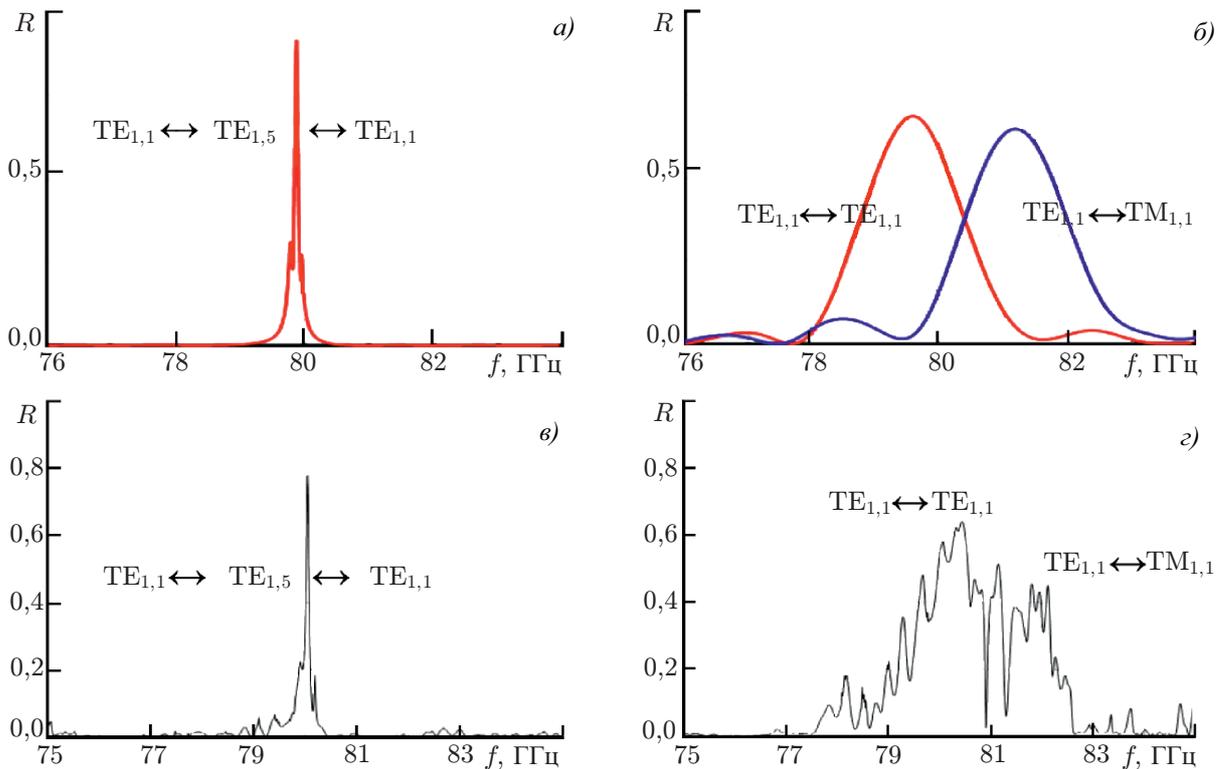


Рис. 3. Результаты трёхмерного моделирования (а, б) и «холодных» электродинамических тестов (в, г) различных типов брэгговских структур в W-диапазоне при  $D/\lambda \sim 5$ : (а, в) модифицированной (длина  $l_{ad} = 12$  см,  $d_{ad} = 3,7$  мм,  $r_{ad} = 0,08$  мм) и (б, г) «традиционной» ( $l_{tr} = 8$  см,  $d_{tr} = 1,8$  мм,  $r_{tr} = 0,1$  мм)

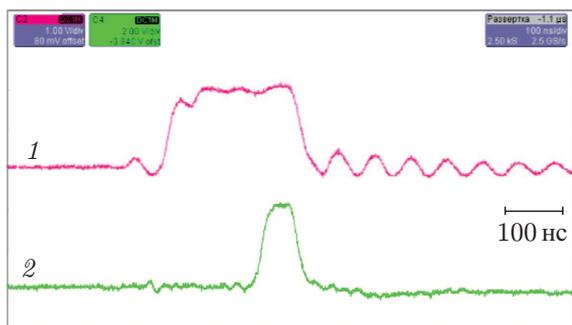


Рис. 4. Результаты экспериментального исследования МСЭ W-диапазона частот. Типичные осциллограммы (1) тока пучка и (2) выходного СВЧ-импульса

автоколебаний в МСЭ-генераторе.

Важно отметить, что во всех упомянутых сериях экспериментов в реализованных МСЭ при изменении амплитуды ондуляторного поля (соответственно, расстройки синхронизма электронов с рабочей волной) генерация на основной моде резонатора имела место во всей полосе зоны самовозбуждения, что демонстрирует стабильность рабочего режима к изменению параметров пучка. В МСЭ с «традиционными» брэгговскими зеркалами при подобном изменении ондуляторного поля в предшествующих экспериментах наблюдались перескоки частоты генерации, соответствующие возбуждению различных пар волноводных мод.

### 3. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛСЭ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Дальнейшее увеличение частоты излучения в МСЭ ограничено достижимыми периодами ондуляторов и энергией электронного пучка, формируемого ускорителем ЛИУ-3 000. В то же время продвижение длиноимпульсных МСЭ/ЛСЭ в субтерагерцовый и терагерцовый диапазоны может быть реализовано на основе вышеупомянутого нового поколения ЛИУ [3], созданных в ИЯФ СО РАН, что неизбежно требует дальнейшего увеличения параметра сверхразмерности используемых электродинамических систем при сохранении их селективных свойств.

В данной работе для решения указанной проблемы была исследована возможность реализации в субмиллиметровом диапазоне резонаторов на основе модифицированных брэгговских структур, поперечный размер которых на порядок и более превосходит длину волны. Результаты моделирования модифицированной брэгговской структуры цилиндрической геометрии с рабочей частотой в районе 250 ГГц и параметром сверхразмерности  $D/\lambda \sim 7$  приведены на рис. 5а. Для сравнения на рис. 5б представлены результаты «холодных» электродинамических тестов макета данной структуры, выполненной из латуни. Измерения находятся в хорошем соответствии с трёхмерным моделированием и подтверждают наличие эффективного узкополосного отражения в расчётной частотной области. Следует отметить, что небольшое отличие расчётной и измеренной резонансной частоты (порядка 2 ГГц) может быть связано как с точностью изготовления гофрировки в макете структуры, так и ограниченным шагом сетки в трёхмерном моделировании.

Результаты CST-моделирования модифицированных структур для частот в районах 300 и 600 ГГц представлены на рис. 6. Данные структуры имеют примерно одинаковый диаметр около 20 мм (параметр сверхразмерности  $D/\lambda$  составляет около 20 и 40 соответственно) и позволяют осуществить транспортировку интенсивных РЭП в пространстве взаимодействия ЛСЭ. Моделирование показывает, что даже при таких больших поперечных размерах модифицированные структуры позволяют обеспечить селективное отражение рабочей волны с эффективностью около 80÷90 % по мощности. Заметим, что в качестве материала структур в представленном моделировании также бралась латунь (удельная проводимость составляет примерно 15,9 МСм/м), однако для уменьшения омических потерь может быть использована медь.

Работы по «холодному» тестированию указанных структур ведутся в настоящее время. Отдельной задачей при проведении экспериментальных исследований является формирование вол-

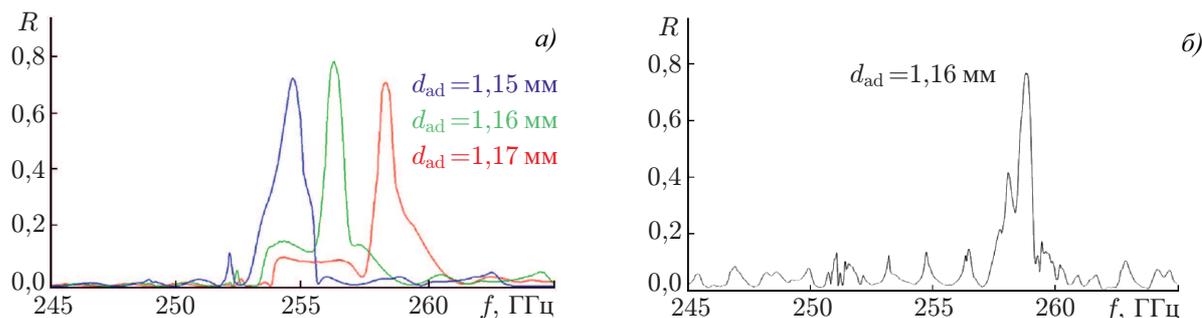


Рис. 5. Результаты (а) трёхмерного моделирования и (б) «холодного» тестирования модифицированной брэгговской структуры для рабочих частот около 250 ГГц ( $D/\lambda \sim 7$ ,  $l_{ad} = 5,5$  см,  $r_{ad} = 0,1$  мм, цикл обратной связи  $TE_{1,1} \leftrightarrow TE_{1,7}^{cutoff} \leftrightarrow TE_{1,1}$ )

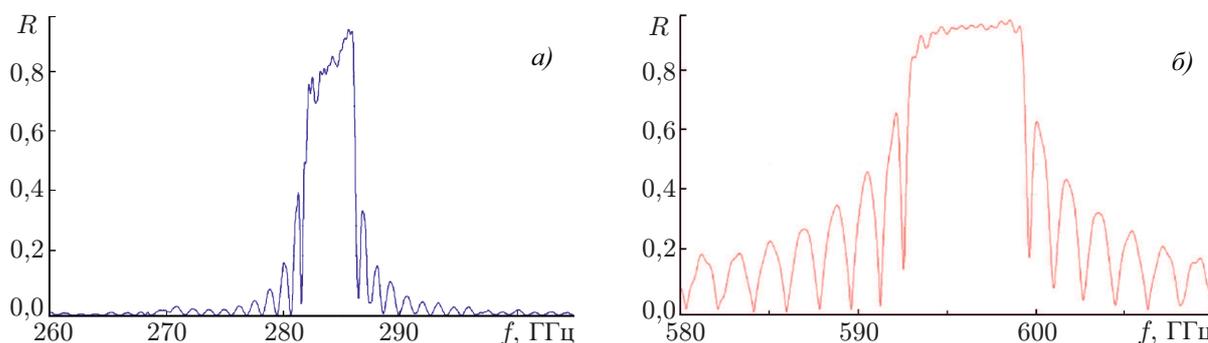


Рис. 6. Результаты трёхмерного моделирования модифицированных брэгговских структур для рабочих частот около (а) 300 ГГц ( $D/\lambda \sim 20$ ,  $l_{ad} = 10$  см,  $d_{ad} = 1,05$  мм,  $r_{ad} = 0,3$  мм, цикл обратной связи  $TE_{1,1} \leftrightarrow TE_{1,20}^{cutoff} \leftrightarrow TE_{1,1}$ ) и (б) 600 ГГц ( $D/\lambda \sim 40$ ,  $l_{ad} = 7,5$  см,  $d_{ad} = 0,5$  мм,  $r_{ad} = 0,3$  мм, цикл обратной связи  $TE_{1,1} \leftrightarrow TE_{1,40}^{cutoff} \leftrightarrow TE_{1,1}$ )

нового пучка с требуемым поперечным профилем для запитки структур при большом поперечном размере волноводных трактов.

Следует отметить, что для дальнейшего увеличения параметра сверхразмерности модифицированных брэгговских резонаторов возможен переход к планарной геометрии [13]. Как следует из проведённого теоретического анализа и трёхмерного моделирования, данные структуры, открытые по одной из поперечных координат, обладают существенно меньшей плотностью спектра поперечных мод и, таким образом, более сильными селективными свойствами по сравнению с рассмотренными в данной работе цилиндрическими аналогами. Это открывает перспективу их использования при разработке мощных длинноимпульсных ЛСЭ вплоть до терагерцового диапазона. Дополнительным достоинством планарных структур является возможность небольшой плавной механической подстройки/перестройки частоты путём изменения зазора между пластинами [12].

#### 4. ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, проведённое моделирование и «холодные» электродинамические тесты демонстрируют реализуемость и работоспособность модифицированных брэгговских структур с большим параметром сверхразмерности. Включение в цепь обратной связи квазикритической волны позволяет радикально улучшить их селективные свойства по сравнению с «традиционными» аналогами.

Использование резонаторов на основе модифицированных брэгговских структур в МСЭ/ЛСЭ позволяет получить устойчивый узкополосный режим генерации. При оптимальном выборе параметров частота излучения оказывается близка к частоте отсечки квазикритической волны, возбуждающейся в модифицированной брэгговской структуре, и малочувствительна к изменениям параметров электронного пучка. Работоспособность новой схемы обратной связи продемонстрирована в МСЭ-генераторах, реализованных в совместных экспериментах ОИЯИ и ИПФ РАН на основе ускорителя ЛИУ-3000 при параметре сверхразмерности  $D/\lambda \sim 5$  вплоть до W-диапазона частот.

Возможность создания мощных длинноимпульсных ЛСЭ в настоящее время исследуется при сотрудничестве ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН [1, 2]. В этой связи реализованная серия генераторов может рассматриваться в качестве прототипа данного класса ЛСЭ. В настоящее время на ускорителе ЛИУ-5 (энергия электронов пучка 5 МэВ, ток 2 кА, длительность 200 нс) проведены электронно-оптические эксперименты, обеспечивающие формирование тонкого «нитевидного» (pencil-like) РЭП с диаметром около 5 мм и приемлемым для работы в коротковолновых диапазонах разбросом параметров [19], а также разработана магнитная система, обеспечивающая инжекцию и транспортировку электронного пучка через пространство взаимодействия ЛСЭ. Экспериментальную реализацию макетов ЛСЭ-генераторов предполагается последовательно осуществить для рабочих частот около 300 и 600 ГГц при использовании ондуляторов с периодами 10 и 6 см соответственно. В качестве электродинамической системы в этих генераторах предлагается использовать двухзеркальные резонаторы на основе модифицированных брэгговских структур. Проведённое в данной работе моделирование демонстрирует эффективность их использования до поперечных размеров, составляющих до  $20 \div 40$  длин волн, что представляется достаточным для транспортировки интенсивных РЭП, формируемых ЛИУ (с учётом раскачки их поперечных осцилляций в ондуляторе).

Следует отметить, что, в отличие от уже реализованных ЛСЭ терагерцового диапазона на базе линейных высокочастотных ускорителей [20, 21] и микротронов [22], пучки которых представляют собой последовательность коротких (пикосекундных) импульсов, достоинством разрабатываемой схемы является возможность использования длинноимпульсных (с длительностью в сотни наносекунд) электронных пучков и, таким образом, достижения в данном диапазоне субгигаваттной мощности излучения и энергии импульса порядка  $10 \div 100$  Дж.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 19-12-00212).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peskov N. Yu., Ginzburg N. S., Malkin A. M., et al. // Proc. 3rd Int. Conf. «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications» (TERA-2018). 22–25 October 2018, Nizhny Novgorod. EPJ Web of Conferences. 2018. V. 195. Art. no. 01010. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819501010>
2. Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Malkin A. M., et al. // Proc. 44th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019). 1–6 September 2019, Paris. Art. no. 5864231. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874573>
3. Логачев П. В., Кузнецов Г. И., Корепанов А. А. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 6. С. 42–49. <https://doi.org/10.7868/S0032816213060220>
4. Ковалев Н. Ф., Орлова И. М., Петелин М. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11, № 5. С. 783–786.

5. 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. <https://doi.org/10.1109/JQE.1983.1071840>
6. Yariv A. Quantum electronics. New York : John Wiley and Sons Inc., 1975. 570 p.
7. Mima K., Akiba T., Imasaki K., et al. // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Research A. 1991. V. A304, No. 1–3. P. 93–98. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(91\)90827-D](https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90827-D)
8. Chu T. S., Hartemann F., Danly B. G., Temkin R. J. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 72. P. 2391–2395. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.2391>
9. Cross A. W., Ginzburg N. S., He W., et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1998. V. A407. P. 181–186. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)01391-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)01391-0)
10. Ginzburg N. S., Kaminsky A. A., Kaminsky A. K., et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 3574–3577. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.3574>
11. Гинзбург Н. С., Малкин А. М., Песков Н. Ю., Сергеев А. С. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 20. С. 60–69. <https://doi.org/10.1134/S1063785006100245>
12. Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Kalinin P. V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. Art. no. 083507. <https://doi.org/10.1063/1.4747149>
13. Ginzburg N. S., Malkin A. M., Peskov N. Yu., et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. Art. no. 043504. <https://doi.org/10.1063/1.3184592>
14. Гинзбург Н. С., Заславский В. Ю., Зотова И. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91, № 6. С. 286–289. <https://doi.org/10.1134/S0021364010060020>
15. Гапонов А. В., Гольденберг А. Л., Григорьев Д. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 2, № 9. P. 430–434.
16. Гинзбург Н. С., Голубев И. И., Голубых С. М. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 20. С. 50–59. <https://doi.org/10.1134/S1063785010100238>
17. Peskov N. Yu., Ginzburg N. S., Kaminsky A. K., et al. // Proc. 41th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016). 25–30 September 2016, Copenhagen. Art. no. F2E.01. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2016.7758360>
18. Peskov N. Yu., Ginzburg N. S., Golubev I. I., et al. // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 116. Art. no. 0006047. <https://doi.org/10.1063/5.0006047>
19. Никифоров Д. А., Блинов М. Ф., Федоров В. В. и др. // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2020. Т. 17, № 2 (227). С. 158–167. <https://doi.org/10.1134/S1547477120020156>
20. Dem'yanenko M. A., Esaev D. G., Knyazev B. A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. Art. no. 131116. <https://doi.org/10.1063/1.2898138>
21. Neil G. R., Bohn C. L., Benson S. V., et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 662–665. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.5238>
22. Kazakevich G. M., Pavlov V. M., Jeong Y. U., Lee B. C. // Phys. Rev. ST. Accel. and Beams. 2009. V. 12. Art. no. 040701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.12.040701>

Поступила в редакцию 26 июня 2020 г.; принята в печать 30 июля 2020 г.

## OVERSIZED MODIFIED BRAGG CAVITIES FOR HIGH-POWER LONG-PULSE FREE-ELECTRON SUBTERAHERTZ LASERS

*N. Yu. Peskov, N. S. Ginzburg, V. Yu. Zaslavskiy, and S. Yu. Kornishin*

We study a new modification of the Bragg structures based on the coupling of traveling and quasicritical waves, as well as the possibility to use it as an electrodynamic system of free-electron

*Н. Ю. Песков, Н. С. Гинзбург, В. Ю. Заславский, С. Ю. Корнишин*

497

masers (FEMs) and lasers (FELs). It is shown that inclusion of quasicritical waves in the feedback cycle allows one to improve significantly the selective characteristics of Bragg structures and ensure the stable regime of single-frequency generation at a rather long (as compared to the wave length) transverse size of the interaction space. Simulation and “cold” electrodynamic tests performed in the millimeter and submillimeter wavelength ranges have confirmed high efficiency of application such structures. Operability of the new feedback mechanism has been confirmed in a series of joint experiments with FEL/FEM-based generators, which were performed by the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia) and the Institute of Applied Physics, RAS (IAP, Nizhny Novgorod, Russia) in frequency ranges from  $K_a$  to W for transverse cavity dimensions of up to five wavelengths. The project of a high-power long-pulse FEL operated in the subterahertz and terahertz frequency ranges, which is developed jointly by IAP and the Budker Institute of Nuclear Physics, is discussed. The results of modeling an electrodynamic system based on modified Bragg reflectors having diameters of 20 and 40 wavelengths for implementation of FELs in the 300 and 600 GHz ranges, respectively, are presented.