

## Разработка и тестирование электродинамической системы для мощного длинноимпульсного ЛСЭ суб-ТГц/ТГц диапазона на основе ускорителя «ЛИУ»

Н.Ю. Песков<sup>1,2</sup>, А.В. Аржанников<sup>2</sup>, В.И. Белоусов<sup>1</sup>, Н.С. Гинзбург<sup>1,2</sup>, В.Ю. Заславский<sup>1</sup>,  
Д.А. Никифоров<sup>2</sup>, Ю.С. Опарина<sup>1,2</sup>, А.В. Савилов<sup>1</sup>, Е.С. Сандалов<sup>2</sup>, С.Л. Синицкий<sup>2</sup>,  
Д.И. Соболев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН

<sup>2</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

**Аннотация:** Проект ЛСЭ-генератора суб-ТГц/ТГц диапазона разрабатывается в настоящее время в сотрудничестве ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород) на базе линейного индукционного ускорителя «ЛИУ» 5 - 20 МэВ / 2 кА / 200 нс. Целью проводимых исследований является достижение суб-ГВт уровня мощности и рекордного энергосодержания в импульсе ~ 10 - 100 Дж в указанном диапазоне частот. Для обеспечения стабильного режима узкополосной генерации в условиях существенной сверхразмерности пространства взаимодействия в проекте предлагается использование двух альтернативных типов электродинамических систем: (1) модифицированных брэгговских резонаторов, основанных на связи бегущих и квазикритических волн, и (2) квазиоптических резонаторов с эффектом Тальбота. В докладе представлена конструкция резонаторов, результаты их моделирования и “холодных” тестов в диапазонах 0.3 ТГц (квазиоптические резонаторы с эффектом Тальбота) и 0.7 ТГц (модифицированные брэгговские резонаторы). Обсуждается состояние проекта.

**Ключевые слова:** линейный индукционный ускоритель, лазер на свободных электронах, мощное терагерцовое излучение, высокоселективные сверхразмерные резонаторы

### 1. Введение

Создание мощного длинноимпульсного ЛСЭ, работающего от субтерагерцового до терагерцового диапазона, инициировано в сотрудничестве ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород) [1]. Экспериментальной основой проекта служит новое поколение линейных индукционных ускорителей «ЛИУ» 5 - 20 МэВ / 2 кА / 200 нс, реализованных в настоящее время в ИЯФ СО РАН [2]. Целью проекта является достижение в указанных диапазонах рекордного субгигаваттного уровня мощности и энергосодержания в импульсах излучения до 10 - 100 Дж. Одной из ключевых проблем при реализации данного ЛСЭ является разработка электродинамической системы, способной обеспечить стабильную узкополосную генерацию в условиях существенной сверхразмерности.

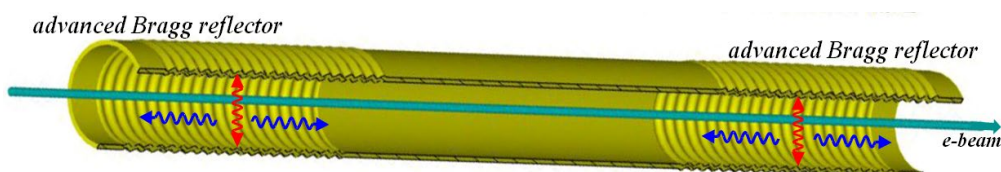
Для проводки интенсивного релятивистского электронного пучка (РЭП), формируемого ЛИУ, через пространство взаимодействия ЛСЭ диаметр системы должен быть  $\varnothing \geq 20$  мм, что на порядки превышает длину волны излучения в обсуждаемых диапазонах. Таким образом, одной из “ключевых” проблем при реализации этого генератора является разработка электродинамической системы, способной обеспечить стабильный режим узкополосных колебаний 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 и (2) квазиоптические резонаторы, основанные на эффекте Тальбота.

## 2. Модифицированные брэгговские резонаторы, основанные на связи бегущих и квазикритических волн

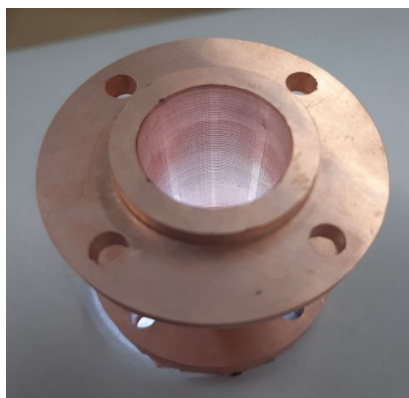
К настоящему времени широкое применение в качестве электродинамических систем мощных релятивистских мазеров получили предложенные в [3] брэгговские резонаторы в виде отрезков волноводов с неглубокой гофрировкой боковых стенок. Однако увеличение поперечных размеров (диаметра  $\varnothing$ ) брэгговских резонаторов «традиционного» типа (основанных на связи двух бегущих параксиальных волн) сопряжено с потерей селективности по поперечным индексам мод (т.е. мод, обладающих различной поперечной структурой). Вместе с тем, продвижение мощных ЛСЭ-генераторов в субмиллиметровый диапазон неизбежно требует увеличения сверхразмерности пространства взаимодействия. Это необходимо, с одной стороны, для формирования канала транспортировки интенсивного электронного пучка, а с другой - для снижения омических потерь.

Перспективным подходом к решению указанной задачи может рассматриваться использование так называемых модифицированных брэгговских структур, отличительной особенностью которых является связь бегущих и квазикритических волн [4, 5]. Для реализации указанного механизма обратной связи период гофрировки должен быть примерно в два раза больше, чем в «традиционных» структурах. Включение в цепь обратной связи квазикритических волн в модифицированных брэгговских структурах приводит к существенному разряжению спектра собственных мод и, таким образом, улучшению их селективных свойств по сравнению с «традиционными» аналогами. Согласно моделированию, проведенному как на базе усредненных моделей, так и трехмерных РС-кодов, модифицированные брэгговские структуры позволяют обеспечить селективное возбуждение рабочей моды при поперечных размерах пространства взаимодействия до  $\varnothing/\lambda \sim 50$  длин волн, что представляется достаточным для формирования канала транспортировки интенсивных РЭП вплоть до ТГц-диапазона [6].

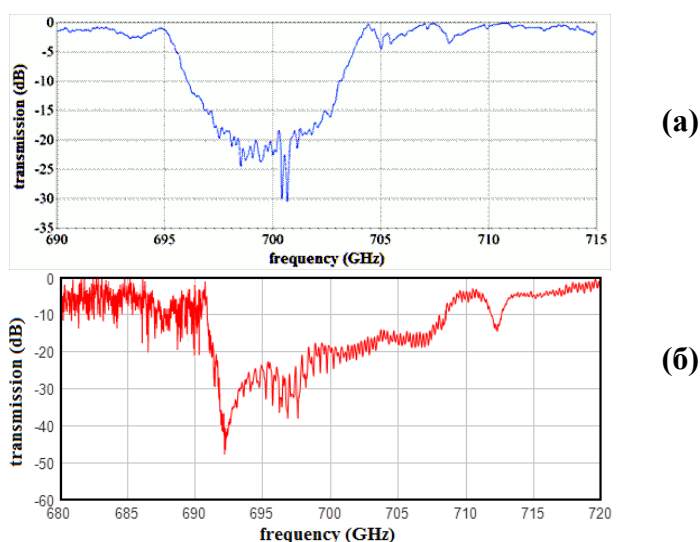
При умеренной сверхразмерности ( $\varnothing/\lambda \sim 5 - 7$ ) оптимальной представляется комбинированная двухзеркальная схема, в которой модифицированное брэгговское зеркало, обеспечивающее селективное возбуждение рабочей моды, расположено на входе пространства взаимодействия, а на выходе используется «традиционная» брэгговская структура с относительно невысоким коэффициентом отражения. Согласно проведенному моделированию секционирование пространства взаимодействия позволяет редуцировать омические потери, связанные с возбуждением квазикритической волны, а также снизить пробойные ограничения. При дальнейшем увеличении сверхразмерности ( $\varnothing/\lambda \geq 10$ ) 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 брэгговские структуры (рис. 1). Подобные резонаторы также позволяют уменьшить уровень омических потерь по сравнению с односекционными резонаторами данного типа.



**Рисунок 1.** Схема двухзеркального резонатора с модифицированными брэгговскими отражателями цилиндрической геометрии (парциальные волновые потоки в отражателях показаны синими и красными стрелками).



**Рисунок 2.** Фотография макета модифицированной брэгговской структуры диапазона 0.7 ТГц, изготовленной с использованием фотополимерной компьютерной печати и последующим химическим нанесением медного слоя.

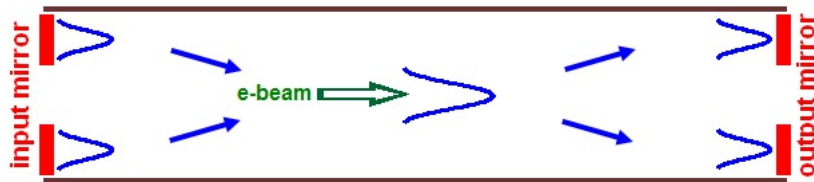


**Рисунок 3.** Результаты (а) 3D моделирования и (б) «холодного» тестирования модифицированной брэгговской структуры диапазона 0.7 ТГц: частотные зависимости коэффициента прохождения.

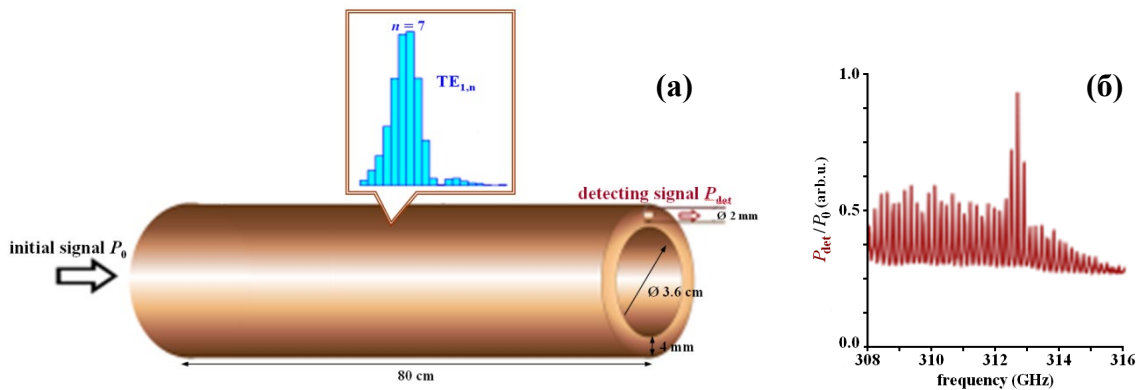
На данном этапе были разработаны модифицированные брэгговские структуры для работы ЛСЭ в диапазоне 0.7 ТГц (рис. 2). Эти структуры имели диаметр  $\varnothing \approx 20$  мм ( $\varnothing/\lambda \sim 45$ ) и длину около 5 см, гофрировка с периодом 0.43 мм и глубиной 0.15 мм обеспечивала цикл обратной 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 (рис. 3а). Проведенные «холодные» электродинамические тесты подтверждают результаты моделирования и демонстрируют наличие эффективного узкополосного отражения в расчетной области частот (рис. 3б).

### 3. Квазиоптические резонаторы с использованием эффекта Тальбота

Идея подобного резонатора основана на отказе от возбуждения фиксированной поперечной моды и переходе к возбуждению так называемой супермоды, образованной фиксированным набором нескольких поперечных мод сверхразмерного волновода, имеющих одинаковую частоту. Такая высокодобротная супермода может быть сформирована внутри простейшего (с технологической точки зрения) резонатора, представляющего собой гладкий квазиоптический волновод с двумя



**Рисунок 4.** Схема квазиоптического резонатора, основанного на эффекте Тальбота.



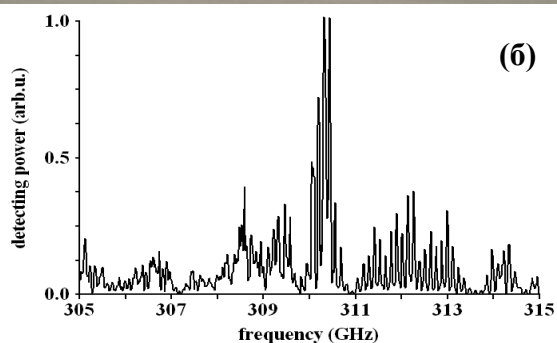
**Рисунок 5.** Результаты моделирования макета резонатора, основанного на эффекте Тальбота с рабочей частотой около 0.3 ТГц для проведения «холодных» тестов: (а) схема измерений (приведены геометрические размеры резонатора, показан модовый состав рабочей супермоды) и (б) частотная зависимость мощности сигнала, проходящего в отверстие связи.

зеркалами на краях, в результате эффекта Тальбота, т.е. периодического воспроизведения поперечной структуры волнового пучка [7] (рис. 4).

Для проведения «холодных» тестов макет резонатора, основанного на эффекте Тальбота, был разработан с диаметром 36 мм ( $\text{Ø}/\lambda \sim 40$ ) и длиной около 80 см для работы в диапазоне частот около 0.3 ТГц (рис. 5). 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  $\text{TE}_{1,1}$ -типа. Согласно проведенному моделированию, эта волна эффективно трансформируется в волну  $\text{TE}_{1,7}$ , максимально представленную в супермоды на 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. 6).

#### 4. Заключение

Проведенные «холодные» электродинамические тесты продемонстрировали реализуемость и работоспособность резонаторов новых типов в условиях существенной сверхразмерности. Моделирование показывает высокий потенциал их использования в мощных суб-ТГц / ТГц ЛСЭ для обеспечения стабильного режима узкополосной генерации с суб-ГВт уровнем мощности. В настоящее время ключевые компоненты электродинамической системы изготовлены, макет ЛСЭ-генератора находится в стадии сборки базе ускорителя «ЛИУ». Проведены электронно-оптические эксперименты по формированию РЭП с требуемыми параметрами, его инжекции и транспортировке через пространство взаимодействия.



**Рисунок 6. (а)** Фотография макета резонатора, основанного на эффекте Тальбота, диапазона 0.3 ТГц и **(б)** результаты его «холодных» измерений: частотная зависимость мощности сигнала, детектируемого в отверстии связи.

Первоначальные эксперименты по тестированию работы ЛСЭ на расчетном уровне мощности планируется начать в диапазоне частот 0.3 ТГц, с перспективами перехода в диапазон 0.6 - 0.7 ТГц и далее по мере получения позитивных результатов.

Работа выполняется при частичной поддержке **Российского научного фонда (грант № 19-12-00212)**.

#### Список литературы

1. Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Malkin A.M., Peskov N.Yu., Sandalov E.S., Savilov A.V., Sinitzky S.L., Skovorodin D.I., Starostenko A.A., Zaslavsky V.Yu. Powerful long-pulse THz-band Bragg FEL based on linear induction accelerator // Proc. of the 44th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019), Paris, France, Sept. 1 - 6, 2019. P.5864231.
2. Никифоров Д.А., Блинов М.Ф., Федоров В.В., Петренко А.В., Логачев П.В., Бак П.А., Живанков К.И., Иванов А.В., Старostenko А.А., Павлов О.А., Кузнецов Г.И., Батазова М.А., Старostenko Д.А., Петров Д.В., Никитин О.А., Ахметов А.Р. Транспортировка сильноточного электронного пучка в линейном индукционном ускорителе ЛИУ-5 // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. - 2020. - Т.17 (2/227). - С.158-167.
3. Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S., Petelin M.I. FEL's with Bragg reflection resonators: cyclotron autoresonance masers versus ubitrons // IEEE J. of Quant. Electron. - 1983. - V.QE-19 (3). - P.282-296.
4. Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. О механизме самовозбуждения МСЭ-генераторов в условиях связи распространяющихся и запертых волн // Письма в ЖТФ. - 2006. - Т.32 (20). - С.60-69.
5. Peskov N.Yu., Ginzburg N.S., Golubev I.I., Golubykh S.M., Kaminsky A.K., Kozlov A.P., Malkin A.M., Sedykh S.N., Sergeev A.S., Sidorov A.I., Zaslavsky V.Yu. Powerful oversized W-band free-electron maser with advanced Bragg resonator based on coupling of propagating and cutoff waves // Appl. Phys. Lett. - 2020. - V.116. - P.0006047.
6. Песков Н.Ю., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Корнишин С.Ю. Сверхразмерные модифицированные брэгговские резонаторы для мощных длинноимпульсных лазеров на свободных электронах субтерагерцового диапазона // Изв. ВУЗов: Радиофизика. - 2020. - Т.63(5-6). - С.488-498.
7. Oparina Yu.S., Peskov N. Yu., Savilov A.V. Electron RF oscillator based on self-excitation of a Talbot-type supermode in an oversized cavity // Phys. Rev. Applied. - 2019. - V.12. - P.044070.