

# Планарный черенковский генератор W-диапазона ГВт-уровня мощности с двумерной распределенной обратной связью: текущая стадия разработки

Н.Ю. Песков<sup>1,2</sup>, А.В. Аржанников<sup>1</sup>, А.А. Вихарев<sup>2</sup>, Н.С. Гинзбург<sup>1,2</sup>, В.Ю. Заславский<sup>1,2</sup>,  
П.В. Калинин<sup>1</sup>, Д.А. Самцов<sup>1</sup>, Е.С. Сандалов<sup>1</sup>, С.Л. Синицкий<sup>1</sup>, В.Д. Степанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера РАН

<sup>2</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

**Аннотация:** Проект мощного пространственно-развитого черенковского лазера W-диапазона разрабатывается в настоящее время в сотрудничестве между ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород). Для запитки генератора используется ускоритель «ЭЛМИ» 1 МэВ / 5 - 10 кА / 3 мкс, формирующий электронные пучки ленточной конфигурации с шириной до 18 см. Основой его электродинамической системы служит двумерно-периодическая замедляющая структура, которая одновременно реализует эффективное черенковское взаимодействие с сильноточным прямолинейным ленточным пучком и механизм двумерной распределенной обратной связи, обеспечивающий стабильный узкополосный режим генерации в условиях существенной сверхразмерности пространства взаимодействия. В статье обсуждаются расчетные параметры и конструктивные элементы, представлены результаты моделирования и начальных экспериментов по созданию данного генератора.

**Ключевые слова:** мощное миллиметровое излучение, релятивистские черенковские лазеры, двумерная распределенная обратная связь, двумерно-периодические замедляющие структуры

## 1. Введение

Концепция импульсных пространственно-развитых генераторов сверхвысокой мощности развивается на протяжении ряда лет в сотрудничестве между ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород). Отличительной особенностью этой концепции является переход к ленточной конфигурации сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) и планарной геометрии пространства взаимодействия, что позволяет повышать интегральную выходную мощность излучения за счет увеличения одного из поперечных размеров генератора при сохранении умеренных значений плотностей тока и электромагнитных потоков [1]. При этом пространственная когерентность излучения в условиях существенной сверхразмерности системы достигается путем использования механизма двумерной распределенной обратной связи (РОС), который реализуется в двумерно-периодических брэгговских структурах при возникновении дополнительных поперечных потоков электромагнитной энергии [2].

Проведенные теоретические исследования показали высокие потенциальные возможности механизма двумерной РОС для получения мощного когерентного излучения в релятивистских лазерах различных типов на базе сильноточных РЭП, поперечные размеры которых на порядок и более превышают длину волны. Работоспособность нового механизма обратной связи экспериментально продемонстрирована в лазере на свободных электронах (МСЭ) W-диапазона, в котором получено излучение с выходной мощностью на уровне  $\sim 50 - 100$  МВт при поперечном размере пространства взаимодействия (ширине) около 50 длин волн [3, 4].

Перспективным развитием концепции двумерной РОС является разработка релятивистских генераторов, основанных на черенковском механизме электронно-

волнового взаимодействия [5, 6]. В отличие от МСЭ, эти генераторы основаны на излучении прямолинейно движущихся электронных пучков, что принципиально упрощает электронно-оптическую систему их формирования и снижает чувствительность к разбросу параметров частиц. В результате, релятивистские мазеры черенковского типа позволяют использовать более интенсивные РЭП по сравнению с МСЭ и, тем самым, достигнуть увеличения выходной мощности излучения.

В данной статье обсуждается текущая стадия разработки планарного черенковского мазера W-диапазона в рамках сотрудничества ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН. Представлены конструктивные параметры генератора и результаты его моделирования, а также результаты электронно-оптических экспериментов по формированию широких ленточных РЭП на ускорителе «ЭЛМИ».

## **2. Формирование широких релятивистских электронных пучков ленточной конфигурации на ускорителе «ЭЛМИ»**

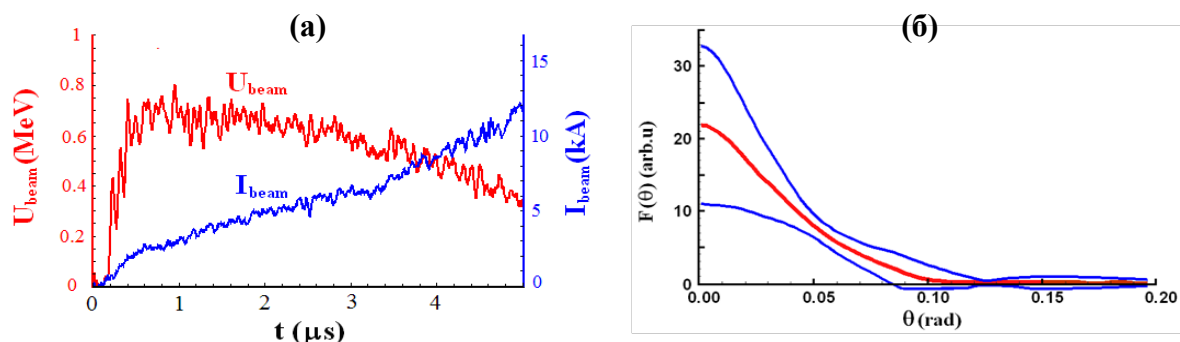
Экспериментальной основой проекта является ускорительный комплекс «ЭЛМИ» (ИЯФ СО РАН) [7] 1 МэВ / 5-10 кА / 3 мкс, который позволяет формировать электронные пучки ленточной геометрии шириной до 18 см. Пучки генерируются в магнитно-изолированном диоде с катодом, изготовленным из углеродных микроволокон, и транспортируются далее в вакуумном канале с поперечным сечением 0.9 см × 20 см при фокусировке ведущим магнитным полем ~ 1.2 Тл.

Одним из основных требований, предъявляемым к РЭП, которые используются для генерации мощного когерентного излучения в коротковолновых диапазонах, является малый разброс их параметров, среди которых наиболее «критичным» является разброс по продольным скоростям. В рамках развитых теоретических моделей [7] можно сделать некие оценки на разброс параметров РЭП, приобретаемый в ленточном диоде в условиях экспериментов на «ЭЛМИ». Однако для корректного определения параметров РЭП в условиях реальной геометрии ускорительного диода проводилось моделирование с использованием программного пакета CST Particle Studio. Это моделирование было направлено на оптимизацию геометрии диода и ускорительного тракта с целью уменьшения углового разброса ленточного РЭП в пространстве взаимодействия черенковского генератора.

Для сравнения с результатами моделирования была проведена серия экспериментов по измерению углового разброса скоростей ленточного РЭП, формируемого на ускорительном стенде «ЭЛМИ». В этих экспериментах перед входом в канал генератора использовался формирователь сечения пучка на основе графитовой диафрагмы, который вырезал из всего сечения ленточного пучка центральную часть толщиной около 3 мм, которая имела наименьший разброс по поперечным скоростям электронов.

В результате проведенных на ускорительном стенде «ЭЛМИ» электронно-оптических экспериментов достигнуто формирование широких ленточных РЭП и их устойчивая транспортировка в вакуумном канале. Типичные осциллограммы напряжения на диоде  $U_{\text{beam}}$ , тока пучка  $I_{\text{beam}}$ , генерируемого в ускорительном диоде представлены на рис. 1а. Описанная серия экспериментов проводилась при характерном напряжении на диоде ~ 0.7 МВ и полном токе диода около 10 кА, индукция ведущего магнитного поля в канале составляла около 1 Тл.

Для измерения скоростного разброса пучка был разработан оригинальный датчик, представляющий собой совокупность соосных графитовых цилиндрических коллекторов (см. подробнее [8]). Измерения токов, поглотившихся в коллекторах разных каналов, и полного тока фракции пучка, вырезанной датчиком, позволяют восстановить функцию распределения электронов по углу. На рис. 1б представлена функция распределения электронов по углам, восстановленная по разработанной



**Рисунок 1.** Результаты экспериментов по формированию широких ленточных РЭП на ускорителе «ЭЛМИ»: (а) типичные осциллограммы напряжения  $U_{\text{beam}}$  и тока пучка  $I_{\text{beam}}$ , а также (б) оценка скоростного разброса пучка (синие кривые соответствуют полосе событий, красная кривая - восстановленному угловому распределению скоростей электронов).

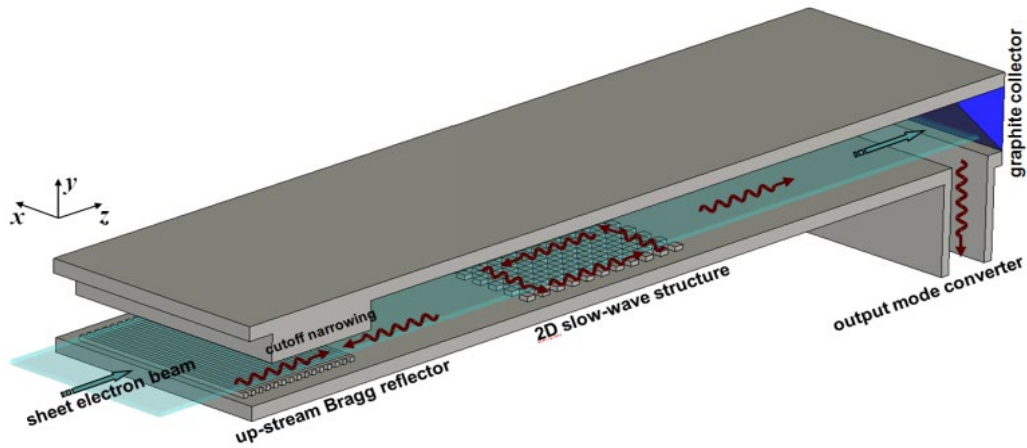
методике на основании сигналов с детектора углового разброса вместе со своей полосой событий. Среднеквадратичный угловой разброс электронов, вычисленный по восстановленной функции распределения, составил  $0.077 \pm 0.01$  рад.

### 3. Результаты моделирования планарного черенковского мазера W-диапазона

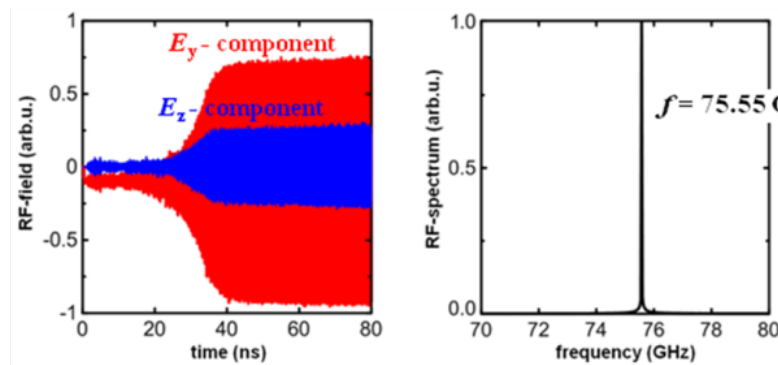
Схема планарного черенковского мазера, разрабатываемого на основе ускорителя «ЭЛМИ», приведена на рис. 2. «Ключевым» элементом его электродинамической системы является двумерно-периодическая замедляющая структура, призванная обеспечить когерентность излучения в пространственно-развитом генераторе [9]. Аналогично МСЭ, данная структура выполняет роль двумерного брэгговского резонатора, в котором возникают дополнительные поперечные по отношению к движению частиц волновые потоки (направленные по координате  $x$  в выбранной геометрии), приводящие к синхронизации излучения широкого ленточного РЭП - механизм так называемой двумерной РОС. Одновременно в этой структуре формируются замедленные поверхностные волны, осуществляющие электронно-волновое взаимодействие и эффективно возбуждаемые сильноточным прямолинейным РЭП. Поверхностные волны определяют пространственную структуру поля вдоль нормали к замедляющей системе (вдоль координаты  $y$ ), что позволяет развивать систему также и вдоль второго поперечного направления.

Для работы генератора был выбран так называемый режим « $\pi$ -вида» (генераторы данного типа принято также называть генераторами поверхностной волны), в котором имеет место замедление основной гармоники поля, что существенно повышает импеданс связи с электронным потоком. Моделирование проводилось на основе коммерческого PIC-кода CST Studio Suite и было направлено на оптимизацию геометрии генератора с целью достижения высокой эффективности и выходной мощности в сочетании со стабильностью и пространственно-временной когерентностью излучения. По результатам проведенного анализа для реализации генератора в W-диапазоне частот (рабочая частота около 75 ГГц) спроектирована «двумерная» замедляющая система с длиной  $l_z = 20$  см и шириной  $l_x = 20$  см, гофрированная с периодами  $d_{x,z} = 4$  мм по  $x$  и  $z$  - координатам и глубиной около 1 мм. Гофрировку предполагается выполнить на одной из пластин планарного волновода. Для эффективного электронно-волнового взаимодействия транспортировку РЭП предполагается осуществить на расстоянии  $\sim 0.5 - 1$  мм от замедляющей структуры.

Результаты моделирования в условиях планируемых экспериментов с использованием указанной замедляющей структуры представлены на рис. 3 и демонстрируют установление стационарного режима генерации при оптимальных параметрах РЭП. Согласно моделированию, электронный КПД генератора составляет



**Рисунок 2.** Схема планарного черенковского мазера W-диапазона с двумерной РОС, разрабатываемого на базе ускорителя «ЭЛМИ» (показано направление движения ленточного РЭП, стрелки иллюстрируют направления распространения парциальных волновых потоков в различных элементах электродинамической системы).



**Рисунок 3.** Результаты CST-моделирования планарного черенковского мазера W-диапазона с двумерной РОС на базе ускорителя «ЭЛМИ». Установление узкополосного режима генерации при оптимальных параметрах.

~ 15 - 20%, и при полном токе пучка  $I_{\text{beam}} \sim 5$  кА мощность излучения может достигать ГВт-уровня. Продольная и поперечная структура поля по  $x$  и  $z$  координатам в установившемся режиме близка к структуре основной моды (см. подробнее [9]). Структура возбуждаемого электронным потоком ВЧ-поля по поперечной  $y$ -координате, направленной вдоль зазора между пластинами, подтверждает формирование поверхностной волны, прижатой к замедляющей структуре. Разложение рабочей волны по собственным волнам планарного волновода (отличающимся числом вариаций поля  $n$  по указанной координате) показывает, что основная мощность излучения сосредоточена в нижней ТЕМ-волне, а также в волнах ТМ-типа с относительно невысокими индексами  $n \leq 2 - 3$ .

Следует отметить, что при использовании «традиционных» одномерно-периодических замедляющих структур в канонической схеме черенковских генераторов поверхностной волны с однопериодической замедляющей системой уже при ширине системы  $l_x \sim 10 - 12$  см моделирование предсказывает возбуждение большого числа мод с различными поперечными (по  $x$ -координате) индексами  $i$ , соответственно, потерю когерентности излучения. В то же время, при использовании двумерно-периодических структур вплоть до максимальной ширины пучков  $l_x \sim 20$  см, которую позволяет реализовать ускоритель «ЭЛМИ», возможна синхронизация излучения. Согласно проведенному моделированию, такой режим устойчив к изменениям параметров пучка.

Особенностью черенковского генератора поверхностной волны с двумерной РОС является наличие четырех волновых потоков, распространяющихся в  $\pm z$  и  $\pm x$  направлениях. В разрабатываемом проекте основная часть излученной электронным пучком энергии сосредоточена в попутном и встречном парциальных волновых потоках, мощность в поперечных «волнах синхронизации» относительно мала. В начальных демонстрационных экспериментах на ускорителе «ЭЛМИ» эти поперечные волновые потоки предполагается рассеивать путем установки на боковых торцах планарной системы специальных рассеивателей с нерегулярным («случайным») профилем поверхности (подобная схема была использована на «ЭЛМИ» в предшествующих экспериментальных реализациях МСЭ-генераторов с двумерной РОС [3, 4]). Для обеспечения вывода излучения, сосредоточенного во встречном по отношению к движению РЭП волновом потоке, разработан дополнительный рефлектор брэгговского типа (см. рис. 2) [9].

#### 4. Заключение

Таким образом, в рамках теоретических исследований и компьютерного моделирования проведен анализ мощного пространственно-развитого черенковского генератора с двумерной РОС на основе сильноточного ленточного РЭП. Разработан проект планарного генератора в  $W$ -диапазоне частот на базе ускорителя «ЭЛМИ». Показано, что использование двумерно-периодической замедляющей системы, реализующей механизм двумерной РОС, позволяет получить при сверхразмерности области взаимодействия  $\sim 2.5 \times 50$  длин волн стабильный узкополосный режим генерации с ГВт-уровнем выходной мощности.

В электронно-оптических экспериментах на ускорителе «ЭЛМИ» продемонстрировано формирование ленточного РЭП с приемлемым для дальнейшего использования в макете разрабатываемого генератора параметрами. В настоящее время завершено изготовление всех компонентов электродинамической системы, проводится их «холодное» тестирование. Начата сборка экспериментального макета генератора и подготовка к его полномасштабному тестированию на высоком уровне мощности.

Работа выполняется при частичной поддержке **Российского научного фонда (грант № 23-19-00370)**.

#### Список литературы

1. Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Nikolaev V.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., et al. // Technical Digest of the 14th Int. Conf. on Free-Electron Lasers (FEL-1992), Kobe, Japan, Aug. 1992. - P.214.
2. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. // Письма в ЖТФ. - 1992. - Т.18. - №9. - С.23-28.
3. Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Калинин П.В., Песков Н.Ю. и др. // Письма в ЖТФ. - 2013. - Т.39. - №18. - С.8-16.
4. Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Kalinin P.V., Kuznetsov S.A., Peskov N.Yu., et al. // Phys. Rev. Lett. - 2016. - V.117. - Art.no.114801.
5. Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Малкин А.М., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. // Письма в ЖТФ. - 2010. - Т.36. - №2. - С.77-86.
6. Ginzburg N.S., Pyakov E.V., Kulagin I.S., Malkin A.M., Peskov N.Yu., et al. // Phys. Rev. Accel. and Beams. - 2018. - V.21. - Art.no.080701.
7. Аржанников А.В., Сеницкий С.Л. Килоамперные электронные пучки для накачки колебаний в вакууме и плазме // Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2016.
8. Аржанников А.В., Самцов Д.А., Сеницкий С.Л., Степанов В.Д. // Сибирский физический журнал. - 2020. - Т. 15. - № 1. - С.24-41.
9. Песков Н.Ю., Вихарев А.А., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Малкин А.М. и др. // Известия ВУЗов: Радиофизика. - 2020. - Т.63. - № 5-6. - С.499-508.