

# Разработка суб-ТГц черенковских мазеров суб-МВт уровня мощности на основе умеренно-релятивистских электронных пучков для системы диагностики плазмы проекта ТРТ

Н.Ю. Песков, В.Ю. Заславский, Н.С. Гинзбург, А.А. Савилова

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

**Аннотация:** Исследована возможность создания мощных пространственно-развитых генераторов черенковского типа, ориентированных на системы диагностики плазмы. Проведено моделирование черенковского генератора поверхностной волны W-диапазона на основе электронного пучка «гиротронного типа» с параметрами 100 кВ / 30 А. Показано, что при использовании двумерно-периодической замедляющей системы в данной схеме генератора может быть получен устойчивый узкополосный режим генерации с мощностью на уровне 0.6 МВт при длительности импульса излучения 30 - 50 нс и частоте следования импульсов до 10 Гц. При электронном КПД ~ 15 - 20% использование одноступенчатой рекуперации позволяет достичь полного КПД генератора более 50 - 60%. Разрабатываемый источник представляет интерес для систем диагностики ионов, основанных на регистрации спектров коллективного рассеяния микроволнового излучения в рамках проекта токамака ТРТ.

**Ключевые слова:** мощное микроволновое излучение, умеренно-релятивистские электронные пучки, черенковские генераторы поверхностной волны, двумерно-периодические замедляющие структуры, системы диагностики плазмы термоядерных реакторов

## 1. Введение

Разработка источников мощного импульсного излучения, работающих в суб-ТГц и ТГц диапазоне частот, активно ведется в настоящее время в ИПФ РАН [1 - 4]. Основой развиваемой концепции является использование электронных пучков ленточной или трубчатой конфигурации, что позволяет обеспечить высокую полную мощность генераторов за счет увеличения их поперечных размеров при сохранении умеренных плотностей тока и напряженности электромагнитных полей. При этом когерентность излучения в условиях существенной сверхразмерности пространства взаимодействия достигается путем использования двумерной распределенной обратной связи (РОС), которая реализуется в двумерно-периодических (2D-периодических) брэгговских структурах за счет возникающих дополнительных поперечных волновых потоков.

В результате проведенных исследований в настоящее время реализованы генераторы поверхностной волны черенковского типа с 2D-периодическими замедляющими структурами цилиндрической геометрии, обеспечивающими механизм двумерной РОС, в W - диапазоне с частотой излучения около 75 ГГц и выходной мощностью ~ 150 МВт при сверхразмерности (диаметре) системы D, составляющей около 10 длин волн излучения  $\lambda$  (периметр системы  $L\phi = \pi D \approx 32\lambda$ ) [1], и в G - диапазоне с частотой 140 - 150 ГГц и мощностью до 70 МВт при  $D \approx 20\lambda$  ( $L\phi \approx 64\lambda$ ) [2]. В черенковских мазерах с 2D-периодическими замедляющими структурами планарной геометрии в G - диапазоне (рабочая частота около 160 ГГц) получена выходная мощность излучения до 30 МВт при поперечном размере  $Lx \approx 15\lambda$  [3] и в J - диапазоне (частота ~ 310 ГГц) с мощностью на уровне 10 МВт при  $Lx \approx 30\lambda$

[4]. Для запитки этих генераторов используются взрывоэмиссионные ускорители, формирующие сильноточные релятивистские электронные пучки (РЭП) ленточной и трубчатой конфигурации с энергией  $\sim 500 - 600$  кэВ, токами килоамперного уровня и длительностью импульса до 30 нс. Ширина спектра излучения во всех реализованных генераторах близка к теоретическому пределу, определяемому длительностью излучаемого импульса. Достигнутые поперечные размеры генераторов превосходят известные аналоги как для релятивистских мазеров, так и для мощных гиротронов.

На данном этапе с учетом опыта создания релятивистских генераторов инициирована разработка источника, работающего в W - диапазоне (рабочая частота  $\sim 75 - 85$  ГГц) в квазинепрерывном режиме с суб-МВт уровнем мощности, который ориентирован на задачи диагностики плазмы в установках УТС нового поколения. Для запитки данного источника предполагается использовать умеренно-релятивистский электронный пучок «гиротронного типа» ленточной конфигурации с параметрами 100 кэВ / 30 А, который реализован в настоящее время в ИПФ РАН [5].

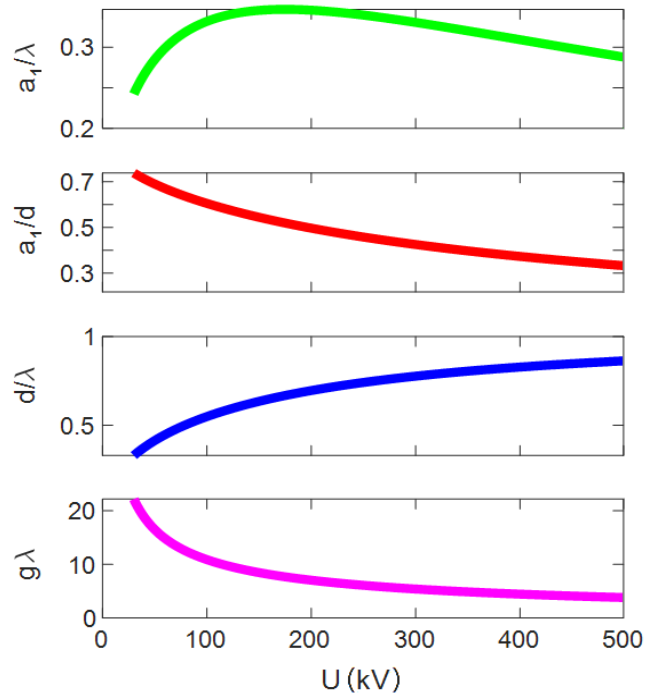
## 2. Принцип работы и оценка параметров низковольтного черенковского генератора поверхностной волны

Схема пространства взаимодействия разрабатываемого низковольтного черенковского генератора поверхностной волны (ГПВ) приведена на рис. 1. Использование 2D-периодической замедляющей структуры в рамках развиваемой концепции позволяет снизить напряженности ВЧ-полей и, таким образом, обеспечить электропрочность генератора, а также редуцировать плотность омических потерь и, соответственно, тепловые нагрузки. Предлагаемая планарная конфигурация представляется привлекательной для упрощения конструкции системы охлаждения генератора, необходимой для его работы в режиме длинных (квазинепрерывных) импульсов.



**Рисунок 1.** Схема 2D-периодической замедляющей системы разрабатываемого черенковского генератора поверхностной волны W-диапазона.

Теоретический анализ новой схемы ГПВ проводился с использованием оригинального квазиоптического подхода (квазиоптического приближения метода связанных волн). В рамках данного подхода проведена оценка параметров разрабатываемого генератора. На рис. 2 проведены зависимости оптимальных параметров 2D-периодической замедляющей системы от величины ускоряющего напряжения  $U$  электронного пучка: (а) относительной (в длинах волн  $\lambda$ ) глубины гофрировки  $a_1/\lambda$ , (б) отношения глубины и периода гофрировки  $a_1/d$ , (в) относительного периода гофрировки  $d/\lambda$  и (г) относительного поперечного волнового числа  $g\lambda$  (поперечного декремента) рабочей поверхностной волны. Видно, что в рабочей области параметров (при расчетном напряжении 100 кВ) в разрабатываемом ГПВ может быть обеспечен импеданс электро-волновой связи, достаточный для получения эффективной генерации.



**Рисунок 2.** Оценка параметров 2D-периодической замедляющей системы для разрабатываемого низковольтного генератора поверхностной волны в рамках квазиоптической модели. Зависимость от ускоряющего напряжения электронного пучка  $U$ : (а) относительной глубины гофрировки  $a_1/\lambda$ , (б) отношения глубины и периода гофрировки  $a_1/d$ , (в) относительного периода гофрировки  $d/\lambda$  и (г) относительного поперечного волнового числа  $g\lambda$ .

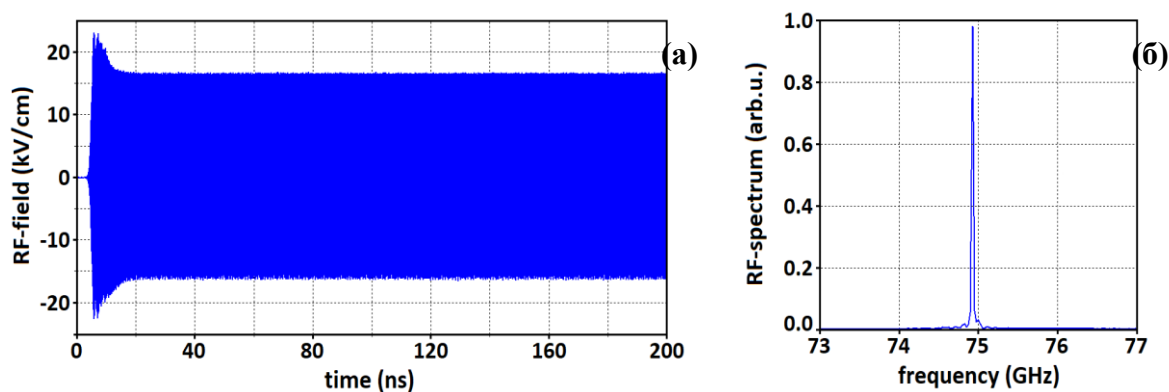
По результатам проведенного теоретического анализа разработана 2D-периодическая замедляющая система для работы ГПВ в W - диапазоне: период гофрировки по  $x$  и  $z$  координатам составил  $d_x \approx d_z (= d) = 2$  мм, глубина гофрировки  $a_1 = 0.7$  мм, рабочая частота в районе 75 ГГц. Ширина системы составила около 4 см, линейная плотность тока 7.5 А/см при энергии пучка 100 кэВ. Фокусировку и транспортировку электронного пучка предполагается осуществить ведущим магнитным полем  $\sim 1$  Тл, что около 2.5 раз меньше, чем соответствующая величина поля, требуемая для работы гиротрона в указанном диапазоне частот.

### 3. Результаты моделирования

Моделирование новой схемы низковольтного ГПВ проводилось с использованием трехмерного PIC - кода CST Microwave Studio, параметры моделирования соответствовали параметрам электронного пучка, реализованного на гиротронном стенде в ИПФ РАН [5]. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и подтверждают выводы теоретического анализа, представленного выше. Моделирование показывает, что при расчетных параметрах 2D-периодической замедляющей системы в разрабатываемом генераторе может быть получен режим одномодовой генерации, устойчивый к разбросу и вариациям параметров запитывающего РЭП. Анализ пространственного распределения ВЧ-поля в генераторе демонстрирует возбуждение рабочей поверхностной волны, структура которой близка к структуре основной моды 2D-периодической замедляющей системы.

При оптимальных параметрах РЭП мощность выходного излучения, согласно проведенному моделированию, может достигать уровня 0.6 МВт. При этом оптимальная длина области взаимодействия ГПВ (2D-периодической замедляющей

системы) составляет около 8 см. Оценки тепловых нагрузок в генераторе показывают, что при указанной мощности может быть реализована длительность излучения  $\sim 30 - 50$  мс при частоте повторения импульсов до 10 Гц, что необходимо для использования источника в рамках обсуждаемых приложений диагностики плазмы [6, 7]. Расчетный электронный КПД генератора составляет до 15 - 20%, однако полная эффективность установки может быть обеспечена на уровне более 50 - 60% при использовании одноступенчатой рекуперации. Дополнительным достоинством разрабатываемого генератора является возможность плавной перестройки частоты в полосе 5 - 10%, которая, как показывает моделирование, может быть обеспечена при относительно небольшом изменении энергии запитывающего электронного пучка.



**Рисунок 3.** Результаты трехмерного PIC-моделирования разрабатываемого низковольтного генератора поверхностной волны W-диапазона. Установление стационарного режима при оптимальных параметрах: (а) зависимость амплитуды ВЧ-поля ( $E_y$  компонента) от времени на выходе генератора и (б) спектр излучения в стационарном режиме генерации.

#### 4. Заключение

Таким образом, в рамках проведенного теоретического анализа продемонстрирована перспективность создания черенковских мазеров суб-ТГц диапазона частот на основе умеренно-релятивистских электронных пучков «гиротронного типа». Моделирование показывает, что в данных генераторах может быть обеспечен суб-МВт/МВт уровень мощности вплоть до квазинепрерывного режима работы при высокой когерентности выходного излучения.

В настоящее время ведется конструкторская разработка компонентов генератора, начато изготовление прототипа для проведения начальных экспериментов по демонстрации его работоспособности. Разрабатываемый источник представляет интерес для диагностики ионов, основанной на регистрации спектров коллективного рассеяния микроволнового излучения (collective Thomson scattering), в рамках проекта токамака ТРТ [8, 9]. При этом предлагаемые черенковские генераторы обладают рядом существенных преимуществ перед гиротронами (которые являются основными претендентами для использования в рамках указанных приложений), включая работу при низких магнитных полях, а также возможность плавной перестройки частоты излучения.

Работа выполняется при поддержке Государственного задания ИФ РАН № FFUF-2022-0007 в рамках национального проекта «Новые атомные и энергетические технологии».

### Список литературы

1. Peskov N.Yu., Zaslavsky V.Yu., Denisenko A.N., et al. Sub-gigawatt W-band oversized Surface-Wave Oscillator with 2D-periodical slow-wave structure of cylindrical geometry // IEEE Electron Device Letters. - 2023. - V.44. - No.10. - P.1756-1759.
2. Peskov N.Yu., Zaslavsky V.Yu., Abubakirov E.B., et al. Powerful oversized surface-wave oscillators with 2D-periodical slow-wave structures of cylindrical geometry operating in W and G bands // IEEE Conference Proceedings: The 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2024), Chengdu, China, April 21-25, 2024. - Art.no.10618067.
3. Zaslavsky V.Yu., Palitsin A.V., Rodin Yu.V., et al. High-power G-band relativistic Surface-Wave Oscillator with 2D-periodic slow-wave structure of planar geometry // IEEE Electron Device Letters. - 2025. - Vol.46. - No.5. - P.848-851.
4. Zaslavsky V.Yu., Rodin Yu.V., Goykhman M.B., et al. High-power THz-band relativistic Surface-Wave Oscillator with two-dimensional periodic planar grating energized by explosive emission sheet electron beams // IEEE Conference Proceedings: The 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2025), Abu Dhabi, UAE, May 4-8, 2025. - Art.no.241115135554.
5. Kufitin A.N., Manuilov V.N., Zaslavsky V.Yu., et al. Formation of sheet helical electron beams for high-power planar gyrotrons // IEEE Electron Device Letters. - 2022. - V.43. - No.7. - P.1121-1124.
6. Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Курский Г.С. и др. Объединенная диагностика томсоновского рассеяния и лазерно-индуцированной флуоресценции для исследования плазмы дивертора и Х-точки в токамаке с реакторными технологиями // Физика плазмы. - 2022. - Т.48. - №8. - С.722-730.
7. Rasmussen J., Korsholm S.B. Core ion measurements with collective Thomson scattering for DEMO burn control // Nuclear Fusion. - 2024. - V.64. - No.4. - Art.no.046003.
8. Шалашов А.Г., Балакин А.А., Белоусов В.И. и др. Диагностика ионов методом коллективного рассеяния микроволнового излучения для токамака ТРТ // В книге: Диагностика высокотемпературной плазмы. Тезисы докладов XXI Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» (ДВП - 2025), 29 сентября - 03 октября 2025 г. Сочи. - С.235-236.
9. Песков Н.Ю., Заславский В.Ю., Гинзбург Н.С. Разработка пространственно-развитых черенковских генераторов W - диапазона на основе умеренно-релятивистских электронных пучков для диагностики плазмы // В книге: Диагностика высокотемпературной плазмы. Тезисы докладов XXI Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» (ДВП - 2025), 29 сентября - 03 октября 2025 г., Сочи. - С.472-474.