

DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.11 УДК: 621.385

ПЛАНАРНЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ МАЗЕР W-ДИАПАЗОНА С ДВУМЕРНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ «ЭЛМИ»: РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

А.В. Аржанников¹, Н.С. Гинзбург², В.Ю. Заславский^{1,2}, П.В. Калинин¹, Н.Ю. Песков^{1,2}, Е.С. Сандалов¹, А.С. Сергеев², С.Л. Синицкий¹, В.Д. Степанов¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН), 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 11

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН (ИПФ РАН), 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Статья поступила в редакцию 23 мая 2025 г.

Аннотация. Проект мощного пространственно-развитого черенковского мазера планарной геометрии W-диапазона развивается в настоящее время в сотрудничестве ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН. Экспериментальной основой проекта служит ускорительный комплекс «ЭЛМИ», в котором формируются электронные пучки с параметрами 1 МэВ / 3 - 5 кА / 3 мкс при поперечном сечении 0.4 см × 17 см (ленточная конфигурация). Ключевым компонентом электродинамической системы генератора является замедляющая структура с двумерно-периодической гофрировкой, реализующая механизм двумерной представлены распределенной обратной связи. В статье результаты моделирования разрабатываемого генератора и данные первой серии экспериментов по его реализации, в которой зарегистрировано возбуждение мод оротронного типа. Обсуждаются подходы к подавлению этих паразитных мод и переходу в режим генерации поверхностной волны с перспективой увеличения мощности генерируемого излучения.

Ключевые слова: мощное микроволновое излучение, релятивистские черенковские мазеры, двумерная распределенная обратная связь, селекция мод в сверхразмерных генераторах.

Финансирование: Работа поддержана грантом РНФ № 23-19-00370 Автор для переписки: Песков Николай Юрьевич, peskov@ipfran.ru

Введение

Создание мощных узкополосных релятивистских мазеров различных типов успешно ведется в сотрудничестве между ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород) на протяжении уже более трех десятилетий [1]. Принципиальная особенность этих генераторов состоит в использовании пространства взаимодействия планарной геометрии и релятивистского электронного пучка (РЭП) ленточной конфигурации. Подобная схема позволяет наращивать полную (интегральную) мощность излучения за счет увеличения одного ИЗ поперечных размеров пространства электронно-волнового взаимодействия при сохранении плотности тока пучка и напряженности ВЧ-поля на умеренном уровне. При этом когерентность излучения достигается за счет использования двумерной распределенной обратной связи (РОС) [1,2], которая реализуется в двумерно-периодических структурах брэгговского типа за счет возникновения дополнительных поперечных волновых потоков. Эти волновые потоки приводят к синхронизации излучения пространственно-развитого РЭП и обеспечивают установление одномодового режима генерации в условиях, когда поперечный размер (ширина) системы *l_x* превышает длину волны излучения λ на порядок величины и более. Высокий потенциал нового механизма обратной связи был успешно продемонстрирован в предшествующих совместных экспериментах ИЯФ СО РАН и ИПФ РАН, выполненных на базе ускорительного комплекса «ЭЛМИ» [3,4]. В этих экспериментах реализован свободных (МСЭ) W-диапазона мазер электронах фактором на с

сверхразмерности $l_x/\lambda \sim 50$ и выходной мощностью на уровне ~ 100 MBт, рекордной для МСЭ-генераторов в указанном диапазоне частот.

Перспективным развитием концепции двумерной РОС является разработка релятивистских мазеров, основанных на черенковском электронно-волновом взаимодействии [5,6]. Генераторы черенковского типа на базе сильноточных РЭП в настоящее время являются наиболее мощными источниками импульсного излучения в сантиметровом диапазоне и длинноволновой части миллиметрового диапазона [7-14]. Механизм двумерной РОС в черенковских генераторах реализуется за счет использования двумерно-периодических (2D) замедляющих которые сочетают в себе свойства замедляющей системы, структур, обеспечивающей условия для эффективного взаимодействия с интенсивным прямолинейным РЭП, и высокодобротного резонатора, обеспечивающего возбуждение рабочей селективное моды В условиях существенной сверхразмерности. Использование подобных замедляющих структур позволяет обеспечить продвижение релятивистских черенковских генераторов в суб-ТГц и ТГц диапазоны частот [15-17].

В настоящее время в рамках сотрудничества ИЯФ-ИПФ инициировано создание мощного планарного черенковского мазера W-диапазона, основанного на использовании двумерной РОС. В статье представлены расчетные параметры и результаты моделирования разрабатываемого генератора. Обсуждаются данные, полученные в ходе первой серии экспериментов по исследованию режимов его работы, включая паразитные механизмы электронно-волнового взаимодействия.

1. Расчетные параметры и схема проведения экспериментов

Экспериментальной базой развиваемого проекта генератора служит сильноточный ускорительный комплекс «ЭЛМИ» (ИЯФ СО РАН), в котором формируются релятивистские электронные пучки с энергией до 1 МэВ, током 3-5 кА и длительностью импульса около 3 мкс. В области электронно-волнового взаимодействия эти пучки имеют сечение 0.4 × 17 см и транспортируются

в вакуумном канале с поперечным сечением 0.95 × 18 см в присутствии ведущего магнитного поля с индукцией до 1.5 Тл.

Схема разрабатываемого планарного черенковского мазера W-диапазона приведена на рис. 1. Ключевым компонентом генератора является 2D замедляющая система, имеющая гофрировку вида:

$$a = a_{2D} \cos(h_{2D} z) \cos(h_{2D} x), \tag{1}$$

где $h_{2D} = 2\pi/d_{2D}$, d_{2D} – период гофрировки вдоль *x* и *z* координат, a_{2D} – ее амплитуда. В рамках квазиоптического подхода [6] излучаемое ВЧ-поле в генераторе может быть представлено в виде четырех парциальных волновых потоков:

$$\vec{E} = \vec{E}_A \operatorname{Re} \Big[(A_{+z} e^{-ihz} + A_{-z} e^{ihz} + A_{+x} e^{-ihx} + A_{-x} e^{ihx}) e^{i\omega t} \Big],$$
(2)

где $A_{\pm z;\pm x}(x, y, z, t)$ – медленно изменяющиеся амплитуды волн, зависящие от пространственных координат и времени. Два из указанных волновых потоков A_{\pm} распространяются в попутном и встречном относительно движения электронного пучка $\pm z$ направлениях (аналогично «традиционным» схемам генераторов на основе одномерно-периодических замедляющих структур), а два других B_{\pm} распространяются в поперечных $\pm x$ направлениях, синхронизируя излучение широкого ленточного электронного пучка. Эти волновые потоки связаны на двумерной гофрировке (1) в условиях брэгговского резонанса:

$$h \approx h_{2D}$$
. (3)

Для начальных экспериментов в W-диапазоне была сконструирована 2D замедляющая структура длиной $l_z = 20$ см и шириной $l_x = 18$ см, которая имела гофрировку синусоидального профиля с равными периодами по x и z координатам $d_{x,z} \approx 3.8$ мм и глубиной $2a_{2D} \approx 1.3$ мм, выполненную на поверхности одной из пластин планарного волновода.

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №5, 2025



Рис. 1. Схема планарного черенковского мазера W-диапазона с 2D замедляющей структурой на основе ускорительного комплекса «ЭЛМИ» (показано направление движения ленточного РЭП, запитывающего генератор; стрелки иллюстрируют направления распространения парциальных волновых потоков в его различных секциях).

В качестве расчетного режим работы разрабатываемого черенковского мазеры был выбран так называемый режим π-типа, в котором прямолинейный электронный пучок взаимодействует с замедленной основной гармоникой ВЧ-поля замедляющей системы в условиях электронно-волнового синхронизма:

$$\omega \approx h v_{z}, \tag{4}$$

где v_z – продольная скорость электронов пучка. Приборы данного вида носят название генераторы поверхностной волны. При указанных выше параметрах гофрировки данный режим работы реализуется на частотах вблизи 73 ГГц. Следует отметить, что в этом случае процесс генерации поверхностной волны, формируемой парциальными волновыми потоками (2), практически не зависит от ширины зазора между пластинами волновода a_0 .

В то же время, из-за наличия второй, регулярной пластины в планарной системе на гофрировке (1) может возникать дополнительный («паразитный») механизм электронно-волнового взаимодействия оротронного типа. В этом режиме имеет место возбуждение квазикритической волны:

$$\vec{E} = \vec{E}_B \operatorname{Re}[Be^{i\omega t}], \tag{5}$$

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, elSSN 1684-1719, №5, 2025

запертой между пластин волновода, при взаимодействии ленточного РЭП с е пространственной гармоникой указанной волны в условиях синхронизма:

$$\omega \approx \omega_{\rm cut} \approx h_{\rm 2D} v_z \,. \tag{6}$$

Очевидно, что в соответствии с соотношением (3) частотные области, в которых реализуются резонансы (4) и (6), близки между собой. Основное отличие от режима π -типа заключается в том, что рабочая частота в режиме оротронного возбуждения определяется частотой отсечки ω_{cut} волны (5), зависящей от размера зазора a_0 между пластинами, а также ширины системы l_x . В условиях текущих экспериментов на ускорительном комплексе «ЭЛМИ» этот режим имеет место в области частот около 68-69 ГГц. При этом резонансная волна (5) является волной ТМ-типа планарного волновода с относительно низким индексом *m* по «широкой» поперечной координате *x* (направленной вдоль пластин волновода) и фиксированным поперечным индексом *p* = 4 по координате *y* (направленной между пластинами), который в условиях описанных экспериментов.

2. Возбуждение мод оротронного типа

Анализ различных режимов генерации в планарном черенковском мазере W-диапазона с двумерно-периодической замедляющей системой проводился с использованием трехмерного PIC-кода CST Studio Suite. Параметры моделирования соответствовали условиям экспериментов на ускорительном комплексе «ЭЛМИ». Моделирование показывает (см. рис. 2), что при реализованных параметрах, указанных в Разделе 1, в черенковском мазере имеет место установление режима генерации оротронного типа (6). Структура ВЧ-поля в этом режиме соответствует возбуждению «объемной» квазикритической волны (5) с расчетным числом вариаций между пластинами p = 4 (рис. 26). При высокой добротности запертой квазикритической волны в условиях существенной сверхразмерности системы по x и z координатам, режим оротронного типа имеет относительно низкий стартовый ток и, как следствие,

<u>ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №5, 2025</u>

подавляет работу генератора в рабочем режиме возбуждения поверхностных волн (3), (4). При этом высокая спектральная плотность квазикритических $\bigwedge (3)$ с различным числом вариаций поля по широкой координате *x* (характеризуемых индексом *m*) способствует возбуждению совокупности нескольких подобных мод, что при нестабильности параметров запитывающего пучка приводит к перескокам частоты излучения, как в течение одного единичного импульса, так и от импульса к импульсу. При полном токе пучка 3-5 кА максимальная мощность излучения в указанном режиме, согласно моделированию, составляет около 100 МВт.



Рис. 2. Результаты CST-моделирования планарного черенковского мазера W-диапазона с двумерно-периодической замедляющей системой на базе ускорителя «ЭЛМИ» в режиме оротронного возбуждения: (а) зависимость от времени амплитуды электрического поля на выходе (слева) и спектра излучения (справа), (б) мгновенная структура ВЧ-поля в генераторе в плоскостях *y-z* (слева) и *x-z* (справа) в определенный момент времени.

В соответствии с результатами моделирования, на текущем этапе экспериментов по созданию черенковского генератора реализовался оротронный режим работы, в котором наблюдались мощные импульсы излучения длительностью ~ 100 нс в диапазоне частот 68-69 ГГц. Осциллограммы

<u>ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №5, 2025</u>

импульсов ускоряющего напряжения на диоде ускорителя, тока пучка, прошедшего через электродинамическую структуру, и мощности генерируемого потока излучения, регистрируемых частотно-селективной диагностикой, представлены на рис. 3. Сигналы, обозначенном RF-signal на рис. 3а, поступают осциллограф от смесителя, установленного в частотно-селективной на гетеродинной диагностике потока излучения, выходящего из вакуумного объёма генератора в атмосферу через фторопластовое окно. На осциллограмме (рис. 3а) приведена последовательность трех кратковременных всплесков мощного излучения (показаны различными цветами), которые отражают процесс генерации излучения В течение одного импульса работы ускорителя. Спектральный анализ показал (рис. 36), что в каждом отдельном импульсе излучения ширина его спектральной линии близка к теоретическому пределу, определяемому длительностью.



Рис. 3. Осциллограммы сигналов в типичном выстреле в черенковском мазере W-диапазона на базе ускорителя «ЭЛМИ» в режиме оротронного возбуждения: (а) ускоряющее напряжение U_{diod} , ток пучка на коллекторе I_{beam} и сигналы с гетеродинного смесителя, (б) частотные спектры ВЧ-импульсов (ведущее магнитное поле $B_0 \approx 1.4$ Тл).

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №5, 2025



Рис. 4. Интегральные частотные спектры в сериях выстрелов при различной индукции ведущего магнитного поля в черенковском мазере W-диапазона в режиме оротронного возбуждения.

В проведенных экспериментах по генерации излучения выявлено наличие нескольких спектральных линий, расположенных квазиэквидистантно с интервалом 0.25 / 0.5 ГГц. Эти интервалы соответствует частотному расстоянию между собственными модами замедляющей электродинамической системы с различными индексами *m*. В течение импульса электронного пучка наблюдается перескок частоты излучения по этим квазиэквидистатным спектральным линиям. При этом, в большинстве импульсов генерируемого излучения доминировало значение частоты 68.25 ГГц.

Следует отметить, что варьирование величины индукции ведущего магнитного поля несколько изменяет спектральный состав генерируемых импульсов излучения, что демонстрирует результат экспериментов, представленный на рис. 4. На этом рисунке приведены спектры выходящего в атмосферу потока излучения суммарно по всей совокупности нескольких всплесков излучения в импульса работы течении одного ускорителя при различной величине индукции ведущего магнитного поля. При этом зарегистрировано понижение мощности выходящего излучения до 3 раз при увеличении ведущего поля от 1.2 Тл до 1.7 Тл. В то же время,

<u>ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №5, 2025</u>

при повышении индукции магнитного поля суммарный спектр генерируемых частот становится заметно уже, количество генерируемых мод сокращается, и вероятность перескоков между ними уменьшается.

Следует отметить, что В проведенных экспериментах также регистрировался выход оптического излучения из различных участков вакуумного канала транспортировки РЭП. Регистрация светового излучения осуществлялась через узконаправленные коллиматоры, установленные в узких планарной электродинамической системы, И световой стенках поток, проникающий через эти коллиматоры, направлялся по оптоволоконным световодам на фотоэлектронные умножители. В экспериментах наблюдалось нарастание сигналов с фотоумножителей вслед за появлением мощных импульсов излучения. Таким образом, сокращение длительности генерируемых импульсов излучения может быть объяснено возникновением плазменных образований в вакуумном пространстве генератора.

3. Переход к расчетному режиму генерации поверхностной волны

Для подавления возбуждения паразитных мод оротронного типа, препятствующих реализации расчетного режима работы, требуются конструктивные решения по модификации электродинамической системы генератора. Проведенное моделирование показывает (рис. 5), что переход расчетный режим возбуждения рабочей поверхностной волны [17,18] В в реализованном черенковском мазере на основе двумерно-периодической замедляющей структуры быть осуществлен, например, с использованием поглотителя, установленного на противоположной относительно гофрировки волновода. Это позволяет пластине планарного значительно снизить добротность квазикритических волн, запертых между пластинами, и повысить стартовые токи «паразитного» оротронного возбуждения генератора. Согласно переход к проектному режиму работы проведенному моделированию, с генерацией поверхностной волны на частоте около 73 ГГц может быть достигнут применением поглотителя, обеспечивающего коэффициент отражения

ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №5, 2025

от пластины до 80% (по мощности) и, соответственно, поглощение 20% мощности квазикритической волны. Поскольку поле поверхностной волны прижато к гофрированной пластине (рис. 5б), данный поглотитель практически не влияет на процесс генерации рабочей волны. Режим генерации поверхностной волны также малочувствителен к нестабильности параметров РЭП. При этом высокий импеданс электронно-волновой связи в режиме *π*-типа обеспечивает значительно больший по сравнению с режимом оротронного типа электронный КПД, а выходная мощность может достигать до 400 МВт.



Рис. 5. Результаты СЅТ-моделирования планарного черенковского мазера W-диапазона с двумерно-периодической замедляющей системой на базе ускорителя «ЭЛМИ» в расчетном режиме генерации поверхностной волны:
(а) зависимость от времени амплитуды электрического поля на выходе (слева) и спектра излучения (справа), а также (б) мгновенная структура ВЧ-поля в генераторе в плоскостях *y-z* (слева) и *x-z* (справа).

Заключение

Таким образом, в первой серии экспериментов ПО реализации черенковского мазера W-диапазона с двумерно-периодической замедляющей структурой на базе ускорительного комплекса «ЭЛМИ» получено мощное излучение в интервале частот 68-69 ГГц, соответствующее возбуждению мод оротронного типа. Как показали проведенные исследования, возбуждение данного режима колебаний, которое обусловлено наличием высокодобротных квазикритических условиях существенной сверхразмерности волн В электродинамической используемой системы, препятствует реализации расчетного режима генерации поверхностной волны. Полученная «оротронная» генерация является мультистабильной и характеризуется перескоками частоты излучения между собственными модами двумерно-периодической замедляющей системы при изменении параметров РЭП как во время разового импульса, так и от импульса к импульсу.

В настоящее время ведутся работы по оптимизации параметров генератора с целью реализации расчетного режима работы с возбуждением поверхностной волны на частоте около 73 ГГц с выходом на расчетный субгигаваттный уровень выходной мощности. Согласно моделированию, данный режим работы обладает высокой стабильностью по отношению к изменению параметров запитывающего электронного пучка.

Финансирование: Работа выполняется при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-19-00370)

Литература

- Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Nikolaev V.S., et al. FEL driven by high current ribbon REB and operated with two dimensional feedback // Technical Digest of the 14th International FEL Conference, Kobe, Japan. – 1992. – P. 214.
- Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. и др. Двумерная распределенная обратная связь как метод генерации мощного когерентного излучения от пространственно-развитых релятивистских электронных пучков // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2020. Т. 28. № 6. С. 575-632; https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-6-575-632.
- Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю. и др. Генерация мощного узкополосного излучения 75 GHz в мазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – № 18. – С. 8-16; https://doi.org/10.1134/S1063785013090149.
- Arzhannikov A.V., Thumm M.K.A., Burdakov A.V., et al. Two ways for high-power generation of subterahertz radiation by usage of strong relativistic electron beams // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015. V. 5. No. 3. P. 478-485; https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2405255.
- Гинзбург Н. С., Заславский В.Ю., Малкин А.М. и др. Черенковские мазеры с двумерной распределенной обратной связью // Письма в ЖТФ. – 2010.
 – Т. 36. – № 2. – С. 77-86; https://doi.org/10.1134/S1063785010010268.
- Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zaslavsky V.Yu. Powerful surfacewave oscillators with two-dimensional periodic structures // Applied Physics Letters. – 2012. – V. 100. – Art. no. 143510; https://doi.org/10.1063/1.3701580.
- Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов // Письма в ЖЭТФ. – 1973. – Т. 18. – № 4. – С. 232-235.
- B. Granatstein V.L., Herndon M., Sprangle P., et al. Gigawatt microwave from an intense relativistic electron beam // Plasma Physics. – 1975. – V. 17. – No.1.

– P.23-28; https://doi.org/10.1088/0032-1028/17/1/003.

- Bugaev S.P., Cherepenin V.A., Kanavets V.I., et al. Relativistic multiwave Cerenkov generators // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1990. – V. 18. – P.525-536; https://doi.org/10.1109/27.55924.
- Abe D.K., Carmel Y., Miller S.M., et al. Experimental studies of overmoded relativistic backward-wave oscillators // IEEE Transactions on Plasma Science.
 – 1998. – V. 26. – No. 3. – P. 591-604; https://doi.org/10.1109/27.700796.
- 11. Gunin A.V., Klimov A.I., Korovin S.D., et al. Relativistic X-band BWO with 3-GW output power // IEEE Transactions on Plasma Science. 1998. V. 26. No.3. P.326-331; https://doi.org/10.1109/27.700761.
- 12. Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. О возможности снижения магнитного поля в релятивистской ЛОВ // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 10. С. 43-47; https://doi.org/10.1134/1.1262101.
- Vlasov A.N., Shkvarunets A.G., Rodgers J.C., et al. Overmoded GW-class surface-wave microwave oscillator // IEEE Transactions on Plasma Science. - 2000. – V. 28. – No. 3. – P.550-560; https://doi.org/10.1109/27.887671.
- 14. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High power microwaves, 3rd Edition.
 CRC Press, 2015; https://doi.org/10.1201/9781420012064.
- 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; https://doi.org/10.1109/LED.2023.3307201.
- Peskov N.Yu., Zaslavsky V.Yu., Denisenko A.N., et al. Powerful oversized surface-wave oscillators of sub-THz/THz band based on 2D slow-wave structures of cylindrical configuration // IEEE Conference Proceedings: The IEEE IX All-Russian Microwave Conference (RMC-2024), Moscow, Russia. – 2024.– P. 435-438; https://doi.org/10.1109/RMC62880.2024.10846821.

- 17. Peskov N.Yu., Zaslavsky V.Yu., Ginzburg N.S., et al. Projects of sub-GW power sub-THz band planar Cherenkov masers with two-dimensional distributed feedback // IEEE Conference Proceedings: The 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2024), Chengdu, China. 2024. Art.no. 10618772; https://doi.org/10.1109/PIERS62282.2024.10618772.
- Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Kalinin P.V., et al. Development of powerful spatially extended W-band Cherenkov maser of planar geometry with two-dimensional distributed feedback // IEEE Transactions on Electron Devices, 2022. V. 69. P.2662-2667; https://doi.org/10.1109/TED.2022.3161899.

Для цитирования:

Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Калинин П.В., Песков Н.Ю., Сандалов Е.С., Сергеев А.С., Синицкий С.Л., Степанов В.Д. Планарный черенковский мазер W-диапазона с двумерно-периодической замедляющей системой на базе ускорителя «ЭЛМИ»: расчетные параметры и первые эксперименты. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 5. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.11