

Мощные пространственно-развитые черенковские генераторы суб-ТГц диапазона с двумерно-периодическими замедляющими структурами

Н.Ю. Песков, В.Ю. Заславский, Э.Б. Абубакиров, А.Н. Денисенко, Н.С. Гинзбург,
А.М. Малкин, М.Д. Проявин, А.С. Сергеев

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

Аннотация: В докладе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования мощных коротковолновых черенковских мазеров, разрабатываемых в ИПФ РАН на базе сильноточного ускорителя «Синус-6» 0.5 МэВ / 5 кА / 25 нс. На текущем этапе реализованы генераторы W-диапазона (частота ~ 73 ГГц) и G-диапазона (частота ~ 150 ГГц) с фактором сверхразмерности (диаметром), составляющим 10 и 20 длин волн соответственно. Ключевым компонентом этих приборов является двумерно-периодическая замедляющая структура, которая реализует механизм двумерной распределенной обратной связи и обеспечивает селективное возбуждение рабочей моды в условиях высокой сверхразмерности. В соответствии с результатами моделирования при проектных параметрах получена стабильная узкополосная генерация с азимутально-симметричной структурой выходного излучения и рекордным уровнем мощности до 150 МВт в W-диапазоне и ~ 50 МВт в G-диапазоне частот.

Ключевые слова: мощное излучение суб-ТГц диапазона, релятивистские черенковские мазеры, двумерная распределенная обратная связь, селекция мод в сверхразмерных генераторах

1. Введение

Генераторы, основанные на черенковском механизме индуцированного излучения сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП), обладают в настоящее время рекордным уровнем импульсной мощности от сантиметрового до длинноволновой части миллиметрового диапазона [1 - 6]. Однако дальнейшее повышение их мощности, как и укорочение длины волны излучения неизбежно сопряжено с проблемой увеличения сверхразмерности пространства взаимодействия. В этой связи одной из ключевых проблем при создании подобных коротковолновых генераторов становится обеспечение селективного возбуждения рабочей моды.

Перспективным путем решения указанной проблемы может служить использование механизма двумерной распределенной обратной связи (РОС) [7]. Для реализации этого механизма используются так называемые двумерные брэгговские структуры, в которых возникают поперечные волновые потоки, синхронизирующие излучение интенсивных РЭП и обеспечивающие высокую когерентность излучения в пространственно-развитом генераторе. Проведенные к настоящему времени теоретические и экспериментальные исследования продемонстрировали высокие потенциальные возможности двумерной РОС для получения мощного узкополосного излучения в различных типах релятивистских мазеров при использовании РЭП ленточной и трубчатой геометрии, поперечные размеры которых на порядок и более превосходят длину волны [8 - 11].

Проекты мощных сверхразмерных черенковских генераторов с двумерной РОС разрабатываются в настоящее время в ИПФ РАН на базе ускорительного комплекса «Синус-6». В докладе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования этих генераторов в W и G диапазонах частот.

2. Реализация генератора поверхностной волны с двумерной РОС W-диапазона

Механизм двумерной РОС в генераторах черенковского типа реализуется за счет использования двумерно-периодической замедляющей структуры (рис. 1)

$$r = r_0 + r_{2D} \cos(h_{2D}z) \cos(M_{2D}\varphi), \quad (1)$$

где $D = 2r_0$ - диаметр структуры, $h_{2D} = 2\pi/d_{2D}$, d_{2D} - период гофрировки, M_{2D} - ее азимутальное число вариаций, r_{2D} - амплитуда. В разрабатываемых генераторах структуры данного типа сочетают в себе свойства замедляющей системы, реализующей условия для эффективного взаимодействия с интенсивным прямолинейным РЭП, и высокодобротного резонатора, обеспечивающего селективное возбуждение рабочей моды в условиях существенной сверхразмерности [12].

Для работы генератора выбран так называемый режим «л-вида» (данные генераторы принято также называть генераторами поверхностной волны), в котором имеет место замедление основной гармоники поля, что существенно повышает импеданс связи с электронным потоком. В рамках развитой для генераторов указанного типа квазиоптической модели [13] излучаемое поле может быть представлено в виде 4-х парциальных волновых потоков

$$\vec{E} = [\vec{E}_A(A_+ e^{ihz+im\varphi} + A_- e^{-ihz+im\varphi}) + \vec{E}_B(B_+ e^{i(M_{2D}+m)\varphi} + B_- e^{-i(M_{2D}-m)\varphi})]e^{-i\omega t}, \quad (2)$$

где A_{\pm} , B_{\pm} - медленные функции координат и времени, $E_{A,B}$ - структурные факторы, характеризующие поляризацию волн, m - азимутальный индекс волн. Два из указанных волновых потоков A_{\pm} распространяются в попутном и встречном по отношению к поступательной скорости электронов $\pm z$ направлениях, а два других B_{\pm} - в азимутальных $\pm\varphi$ направлениях, синхронизуя излучение пространственно-развитого трубчатого РЭП. Волновые потоки (2) связаны на двумерно-периодической брэгговской структуре (1) в условиях брэгговского резонанса

$$h \approx h_{2D}, \quad M \approx M_{2D}, \quad (3)$$

и формируют рабочую поверхностную волну.

Для работы в W-диапазоне была разработана замедляющая структура цилиндрической геометрии со средним диаметром $D = 41.8$ мм, имеющая двумерную гофрировку с периодом $d_{2D} = 3.6$ мм, азимутальным числом вариаций $M_{2D} = 32$ и амплитудой $r_{2D} \approx 0.5$ мм. Полная длина структуры составляла около 11 см. Для обеспечения однонаправленного вывода излучения в коллекторном направлении, с катодной стороны генератора был спроектирован отражатель брэгговского типа (см. рис. 1). Этот рефлектор имел «традиционную» одномерную гофрировку с периодом $d_{1D} = 1.75$ мм и относительно большой глубиной около 1 мм, в результате при малой длине структуры $l_{1D} \sim 10d_{1D}$ ее полоса непрозрачности перекрывала расчетную полосу излучения генератора и обеспечивала, таким образом, практически полное отражение для рабочей поверхностной волны.

Результаты моделирования черенковского генератора с двумерной РОС W-диапазона на основе ускорителя «Синус-6» представлены на рис. 2 (код CST Studio Suite), геометрия принимались близкой к описанному экспериментальному макету,

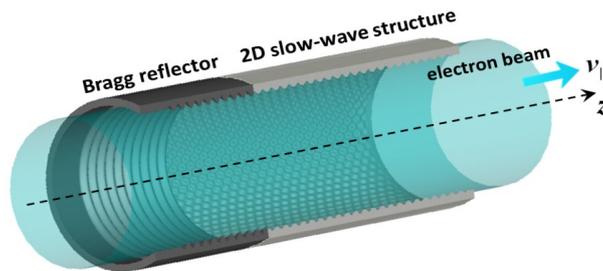


Рисунок 1. Схема электродинамической системы черенковского генератора на основе двумерно-периодической замедляющей системы и входного отражателя брэгговского типа.

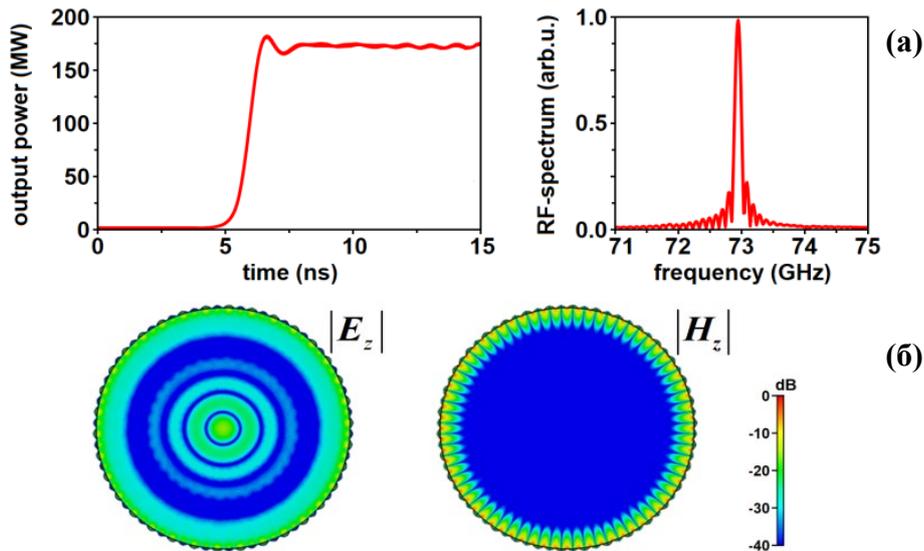


Рисунок 2. Результаты CST-моделирования мощного черенковского генератора с двумерной РОС W -диапазона на основе ускорителя «Синус-6» ($D/\lambda \sim 10$): (а) зависимость выходной мощности от времени (слева) и спектр излучения в стационарном режиме (справа), а также (б) мгновенные поперечные структуры компонент ВЧ-поля E_z и H_z в среднем сечении.

параметры пучка соответствовали условиям проведенных экспериментов. Результаты моделирования демонстрируют установление узкополосного режима генерации при оптимальных расчетных параметрах (рис. 2а). Мощность выходного излучения достигает 175 МВт при электронном КПД $\sim 10\%$. Для структуры, изготовленной из меди, омические потери составляют $\sim 15 - 20\%$ выходной мощности.

Поперечная структура различных компонент ВЧ-поля внутри пространства взаимодействия генератора представлена на рис. 2б, поле E_z соответствует интерференции продольно-распространяющихся парциальных волн A_{\pm} , взаимодействующих с прямолинейным трубчатый РЭП, а поле H_z - азимутально-распространяющихся «волн синхронизации» B_{\pm} . Моделирование показывает, что структура этих полей соответствует возбуждение основной моды двумерно-периодической структуры $m = 0$. При этом пространственное распределение поля синхронной электронному пучку парциальной волны, излучаемой из генератора, имеет азимутально-симметричную структуру и при разложении по собственным волнам цилиндрического волновода представляет собой набор волноводных мод $TM_{0,N}$ - типа, прижатый к поверхности гофрировки.

Эксперименты по реализации черенковских генераторов проводятся в ИПФ РАН на базе ускорителя «Синус-6» 0.5 МэВ / 5 кА / 25 нс, формирующего РЭП трубчатой

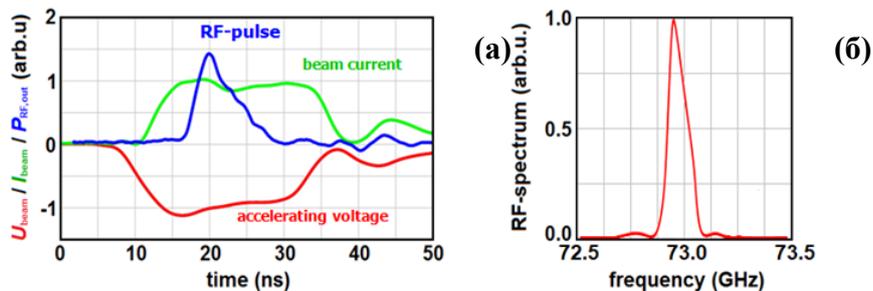


Рисунок 3. Результаты экспериментального исследования черенковского генератора с двумерной РОС W -диапазона: (а) типичные осциллограммы ускоряющего напряжения, тока пучка и выходного СВЧ-импульса, а также (б) гетеродинные измерения частоты излучения.

конфигурации с диаметром около 40 мм. Транспортировка и фокусировка пучков канале осуществляется ведущим магнитным полем с напряженностью $\sim 1 - 1.5$ Тл.

В результате проведенных экспериментов (см. подробнее [14]) в расчетной области параметров получено устойчивое узкополосное излучение. Типичные осциллограммы импульсов напряжения, тока пучка и выходного СВЧ-импульса представлены на рис. 3а. Мощность излучения по калориметрическим измерениям достигала $\sim 120 - 150$ МВт, что находится в хорошем соответствии с расчетом. Частота излучения, согласно гетеродинным измерениям (см. рис. 3б), соответствовала возбуждению рабочей волны двумерно-периодической замедляющей структуры с частотой около 73 ГГц, ширина спектра излучения близка к теоретическому пределу для реализованной длительности импульсов. Анализ диаграммы направленности выходного излучения (которая восстанавливалась по показаниям СВЧ-детекторов, а также визуально по свечению табло из неоновых ламп на разных расстояния от выходного окна генератора) демонстрировал структуру выходного излучения с отчетливым минимумом поля на оси, что соответствовало возбуждению расчетного набора волноводных мод $TM_{0,N}$ - типа, формирующих рабочую поверхностную волну.

3. Продвижение реализованных генераторов в G - диапазон частот

Перспективным развитием описанных работ является продвижение черенковских генераторов с двумерной РОС в суб-ТГц диапазон частот. В настоящее время для работы в G-диапазоне (рабочая частота ~ 150 ГГц) разработана двумерно-периодическая замедляющая структура цилиндрической геометрии со средним диаметром $D \approx 41$ мм, периодом гофрировки $d_{2D} = 1.87$ мм, азимутальным числом вариаций $M_{2D} = 64$, амплитудой гофрировки $r_{2D} \approx 0.3$ мм и полной длиной около 7.5 см. Входной брэгговский рефлектор сконструирован длиной около 1.5 см и гофрировкой «традиционного» типа с периодом $d_{1D} = 0.9$ мм и глубиной ~ 0.5 мм. Параметр сверхразмерности данного генератора достигает $D/\lambda \sim 20$, периметр системы $\sim 64\lambda$, для его запитки предполагается использовать тот же трубчатый электронный пучок с диаметром $D_{beam} \approx 40$ мм, реализованный в описанных выше экспериментах на ускорителе «Синус-6».

Моделирование данного генератора также демонстрирует устойчивое селективное возбуждение рабочей моды с азимутально-симметричной структурой выходного излучения при проектных параметрах двумерно-периодической замедляющей структуры и оптимальных параметрах РЭП в условиях планируемых экспериментов. При полном токе пучка до 4 - 5 кА мощность излучения может достигать $\sim 70 - 90$ МВт (электронный КПД $\sim 4 - 5\%$).

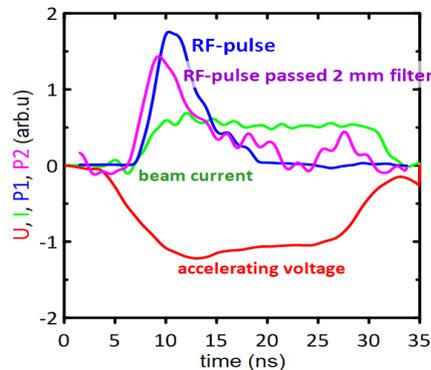


Рисунок 4. Результаты экспериментального исследования черенковского генератора с двумерной РОС G-диапазона: типичные осциллограммы ускоряющего напряжения, тока пучка и выходного СВЧ-импульса, а также импульса излучения, прошедшего через фильтр нижних частот 2-мм диапазона.

Следует отметить, что для сравнения в указанных диапазонах частот в рамках моделирования также была исследована «каноническая» схема черенковских генераторов поверхностной волны с однопериодическими замедляющими системами. В этом случае уже при диаметрах системы $D/\lambda \sim 5$ наблюдалось возбуждение большого числа мод с различными азимутальными индексами и произвольными фазами, что приводило к потере когерентности излучения. В то же время, в генераторах с двумерной РОС моделирование демонстрирует возможность получения стабильной узкополосной генерации в обоих частотных диапазонах при чрезвычайно больших факторах сверхразмерности.

В настоящее время на ускорителе «Синус-6» начаты эксперименты по реализации черенковских мазеров с двумерной РОС в G-диапазоне частот. В ходе начальных экспериментов в расчетной области параметров получена мощная узкополосная генерация (рис. 4). Гетеродинные измерения продемонстрировали возбуждение рабочей поверхностной волны двумерно-периодической замедляющей системы, имеющей азимутально-симметричную структуру выходного излучения. Мощность излучения, измеренная калориметром, составила до 50 МВт. Проводится оптимизация параметров с целью повышения электронного КПД и выходной мощности генератора.

Работа выполняется при поддержке Госзадания ИПФ РАН № FFUF-2022-0007.

Список литературы

1. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. Генерация мощных электромагнитных импульсов потоком релятивистских электронов // Письма в ЖЭТФ. - 1973. - Т.18. - №4. - С.232-235.
2. Granatstein V.L., Herndon M., Sprangle P., e.a. Gigawatt microwave from an intense relativistic electron beam // Plasma Physics. - 1975. - V.17. - №1. - P.23-28.
3. Gunin A.V., A.I.Klimov, S.D.Korovin, e.a. Relativistic X-band BWO with 3-GW output power // IEEE Trans. on Plasma Science. - 1998. - V.26. - №3. - P.326-331.
4. Abe D.K., Carmel Y., Miller S.M., e.a. Experimental studies of overmoded relativistic backward-wave oscillators // IEEE Trans. on Plasma Science. - 1998. - V.26. - №3. - P.591-604.
5. Vlasov A.N., Shkvarunets A.G., Rodgers J.C., e.a. Overmoded GW-class surface-wave microwave oscillator // IEEE Trans. on Plasma Science. - 2000. - V.28. - №3. - P.550-560.
6. Benford J., Swegle J.A, Schamiloglu E. High Power Microwaves, Third Edition, CRC Press (Taylor & Francis Group), 2015.
7. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. Электродинамические свойства двумерных брэгговских резонаторов // Радиотехника и электроника. - 1995. - Т.40. - №3. - С.401-415.
8. Cross A.W., He W., Konoplev I.V., e.a. Experimental and theoretical study of 2D Bragg structures for a coaxial FEM // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A. - 2001. - V.475. - №1-3. - P.164-172.
9. Arzhannikov A.V., Cross A.W., Ginzburg N.S., e.a. Production of powerful spatially coherent radiation in planar and coaxial FEM exploiting two-dimensional distributed feedback // IEEE Trans. on Plasma Science. - 2009. - V.37. - №9. - P.1792-1800.
10. Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю. и др. Генерация мощного узкополосного излучения 75 GHz в лазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью // Письма в ЖТФ. - 2013. - Т.39. - №18. - С.8-16.
11. Arzhannikov A.V., Thumm M.K.A., Burdakov A.V., e.a. Two ways for high-power generation of subterahertz radiation by usage of strong relativistic electron beams // IEEE Trans. on Terahertz Science and Technol. - 2015. - V.5. - №3. - P.478-485.
12. Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zaslavsky V.Yu. Powerful surface-wave oscillators with two-dimensional periodic structures // App. Phys. Lett. - 2012. - V.100. - №14. - Art.no.143510.
13. 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.
14. Peskov N.Yu., Zaslavsky V.Yu., Denisenko A.N., e.a. Sub-gigawatt W-band oversized Surface-Wave Oscillator with 2D-periodical slow-wave structure of cylindrical geometry // IEEE Electr. Device Lett. - 2023. - V.44. - №10. - P.1756-1759.