

Методика изготовления замедляющих структур со сложным профилем гофрировки на основе аддитивной технологии для релятивистских генераторов поверхностной волны субтерагерцового диапазона частот

А.А. Орловский^{1,2}, В.Ю. Заславский¹, Н.Ю. Песков¹, М.Д. Проявин¹, Д.И. Соболев¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

²Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация: в настоящей работе развивается методика изготовления замедляющих структур со сложным мелкомасштабным профилем гофрированной поверхности на основе технологии 3D печати для использования в субтерагерцовых релятивистских черенковских генераторах поверхностной волны цилиндрической конфигурации. Указанная технология позволяет реализовывать электродинамические системы для такого класса приборов с достаточно высокой точностью (~ 10 мкм). В качестве примера в работе разработаны и изготовлены замедляющие структуры с профилированной двумерно-периодической гофрировкой цилиндрической геометрии для генераторов поверхностной волны субтерагерцового диапазона частот. В проведенных экспериментальных исследованиях указанных генераторов продемонстрирована устойчивая узкополосная генерация на рабочих модах с уровнем выходной мощности порядка нескольких десятков МВт. Предварительная оценка потенциальных возможностей предложенного метода изготовления показывает перспективность использования данной технологии для создания подобных электродинамических систем в терагерцовом диапазоне частот.

Ключевые слова: поверхностная волна, аддитивные технологии, электровакуумные приборы, субтерагерцовый диапазон

1. Введение

Создание мощных источников когерентного электромагнитного излучения, работающих в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, является одной из ключевых задач современной вакуумной электроники. Потребность в таких источниках обусловлена широким кругом фундаментальных задач (диагностики плазмы в установках УТС нового поколения, фотохимия, биофизика, новые методы высокоградиентного ускорения, создание компактных рентгеновских ЛСЭ комптоновского типа и др.) и инженерных приложений (создание новых технологий, современных радиотехнических систем и др.).

К настоящему времени в режиме длинных импульсов (от микросекунд до непрерывного режима) наибольшая мощность излучения в указанных диапазонах (от единиц мегаватт в миллиметровом диапазоне до десятков киловатт в субмиллиметровом диапазоне) получена с помощью гиротронов [1, 2]. Дальнейший рост выходной мощности в этих диапазонах может быть достигнут в черенковских генераторах поверхностной волны (ГПВ) на основе релятивистских электронных пучков (РЭП) [3 – 5]. ГПВ представляют собой одну из разновидностей черенковских генераторов, в которых прямолинейный электронный пучок возбуждает медленную волну, распространяющуюся вдоль периодически-гофрированной поверхности. Отличительной особенностью указанного класса генераторов является достаточно высокий импеданс связи с электронным потоком и, соответственно, эффективность

электронно-волнового взаимодействия. Кроме того, очевидным достоинством ГПВ является простота и компактность, поскольку снижаются требования к электронно-оптическим системам, формирующим прямолинейные РЭП.

В работе представлена методика изготовления профилированных двумерно-периодических замедляющих структур на основе технологии 3D печати для субтерагерцовых релятивистских черенковских ГПВ цилиндрической конфигурации. Приведены основные результаты экспериментальных исследований указанных типов генераторов, подтверждающие их работоспособность с замедляющими структурами, изготовленными по предложенной методике.

2. Методика изготовления замедляющих структур для ГПВ

Традиционное производство электровакуумных приборов (ЭВП) является достаточно сложным и трудоемким процессом. Основные ограничения при создании ЭВП в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах в основном связаны с необходимостью изготовления компонентов сложной геометрии. В частности, применительно к ГПВ, возникают трудности при изготовлении замедляющих структур с мелкомасштабными гофрированными поверхностями, которые должны удовлетворять жестким требованиям к точности. Традиционные методы обработки, такие как фрезерование и токарная обработка, не могут обеспечить нужную точность, особенно для внутренних поверхностей, например в цилиндрических конфигурациях.

В данной работе указанные проблемы предлагается преодолеть с помощью применения аддитивных технологий позволяющих создавать высокоточные изделия сложной формы. В качестве примера были разработаны и изготовлены электродинамические системы ГПВ субтерагерцового диапазона цилиндрической геометрии. Методику изготовления можно разделить на несколько основных этапов.

Изготовление компонентов ЭВП начинается с производства фотополимерной оправки изготовленной с помощью технологии SLA/DLP или более точной разновидностью MJP/MJM. Высококачественные макеты получается изготовить благодаря достаточно маленьким размером пикселя (единицы микрон) и высоте слоя (порядка десяти микрон). В качестве материала для изготовления макетов замедляющих структур использовалась фотополимерная смола Gorky Liquid Castable.

Следующим этапом создания электродинамических структур на основе рассматриваемой технологии является покрытие 3D-печатной заготовки тонким слоем меди (около 10 мкм) [6]. Этот этап не является завершающим, так как разрабатываемая структура может испытывать существенные тепловые нагрузки в режимах большой мощности. В рабочем режиме мощность излучения может достигать десятки МВт. В этом случае толщина медного слоя должна быть не менее 1 мм.

Таким образом, на третьем этапе требуется дальнейшее наращивание медного слоя (увеличение толщины рабочей структуры) электрохимическим методом. Данный процесс является достаточно сложным с точки зрения качества рабочей поверхности, например, из-за появления дендритов, связанных с неоднородностью наращивания меди на структуры сложной формы. Поэтому для создания таких изделий печатается инвертированная модель, на которой в дальнейшем создается медный слой. Это позволяет обеспечить высокое качество рабочей поверхности и при этом гальванически наращивать достаточно толстый медный слой. На завершающем этапе изготовления полимерная оправка извлекается.

3. Результаты экспериментальных исследований ГПВ

В настоящее время ГПВ являются одними из наиболее перспективных источников мощного коротковолнового импульсного излучения. В таких приборах прямолинейно движущийся релятивистский электронный пучок взаимодействует с медленной

основной пространственной гармоникой волны, распространяющейся в периодической замедляющей системе и представляющую собой поверхностную волну, прижатую к замедляющей системе. Излучение представляет собой супермоду, экспоненциально прижатую к периодической структуре, и, в случае волноведущих систем, может быть интерпретировано как комбинация нескольких волноводных мод с коррелированными фазами. Таким образом, в ГПВ решается проблема селекции мод в направлении нормали к поверхности [5].

В то же время, продвижение указанного класса источников в коротковолновые диапазоны (в том числе терагерцовый) неизбежно требует использования существенно сверхразмерных электродинамических систем. В этом случае на первый план выступает проблема селекции рабочего типа колебаний по второй поперечной координате для обеспечения режима одномодовой одночастотной генерации с высоким уровнем КПД и выходной мощности. Использование двумерной распределенной обратной связи (РОС) [3, 5], реализуемой с помощью двумерных брэгговских структур, позволяет обеспечить селекцию мод по второй поперечной координате. Указанные структуры (высокоселективные электродинамические системы) представляют собой пластины с двоякопериодической гофрировкой боковых поверхностей. Поле над такой гофрировкой формируется четырьмя квазиоптическими волновыми пучками, два из которых распространяются в продольном, а два других – в поперечном направлениях (по отношению к направлению поступательного движения частиц), призванные в дальнейшем синхронизировать излучение сверхразмерного трубчатого электронного потока.

На основе квазиоптической теории [5] был разработан проект цилиндрического 145 ГГц ГПВ с двумерно-периодической замедляющей структурой на базе ускорителя «СИНУС» (ИПФ РАН) [7]. Генератор запитывался сильноточным магнитонаправляемым трубчатым РЭП. Ведущее магнитное поле составляло 2 Тл, ускоряющее напряжение до 500 кВ, рабочий ток 4 кА. Параметры электродинамической системы были оптимизированы для эффективной генерации: длина 90 мм, отношение диаметра к длине волны 20, глубина гофра 0.5 мм, период гофрировки 1.8 мм. Для обеспечения однонаправленного вывода излучения на катодном конце пространства взаимодействия располагался отражатель брэгговского типа с однопериодической гофрировкой с периодом 0.9 мм и глубиной гофра 0.5 мм.

Более детальный теоретический анализ проводился на основе 3D PIC-моделирования с помощью программного обеспечения CST STUDIO SUITE. Такое моделирование дает более подробное описание нелинейной динамики, которое включает такие факторы, как скоростной и позиционный разбросы, влияние сил пространственного заряда и т.д. В целом, полученные результаты достаточно хорошо согласуются с предсказанными в рамках квазиоптической модели. Устойчивый узкополосный стационарный режим устанавливался на частоте близкой к 145 ГГц при уровне выходной мощности ~ 70 МВт. Омические потери составляли менее 20 % для изготовленного медного резонатора. Структура генерируемого излучения соответствовала рабочей моде.

Экспериментальные исследования ГПВ проводились в ИПФ РАН на базе ускорителя «СИНУС» с лезвийным катодом, работающим в режиме взрывной эмиссии, который обеспечивает формирование сильноточных электронных пучков с энергией электронов до 500 кэВ и длительностью импульса напряжения до 25 нс. Результаты экспериментальных исследований по наблюдению режимов генерации цилиндрического ГПВ с 2D замедляющей структурой в G – диапазоне приведены на Рис. 1. При оптимальном взаимном положении пучка и электродинамической системы получена стабильная генерация СВЧ импульсов. На Рис. 1в показаны осциллограммы импульса ускоряющего напряжения U_{beam} (кривая красного цвета), тока I_{beam}

(кривая зеленого цвета) и сигнала с детектора без фильтра (кривая синего цвета) и с запредельным фильтром (кривая розового цвета). Длительность импульса составляла ~ 5 нс. Значение центральной частоты выходного излучения генератора определялось с помощью набора запредельных фильтров и достаточно хорошо соответствовало расчетному значению. Выходная мощность измерялась калориметром и оценивалась на уровне не менее 70 МВт. Полученные режимы являлись достаточно устойчивыми к вариациям параметров трубчатого РЭП.

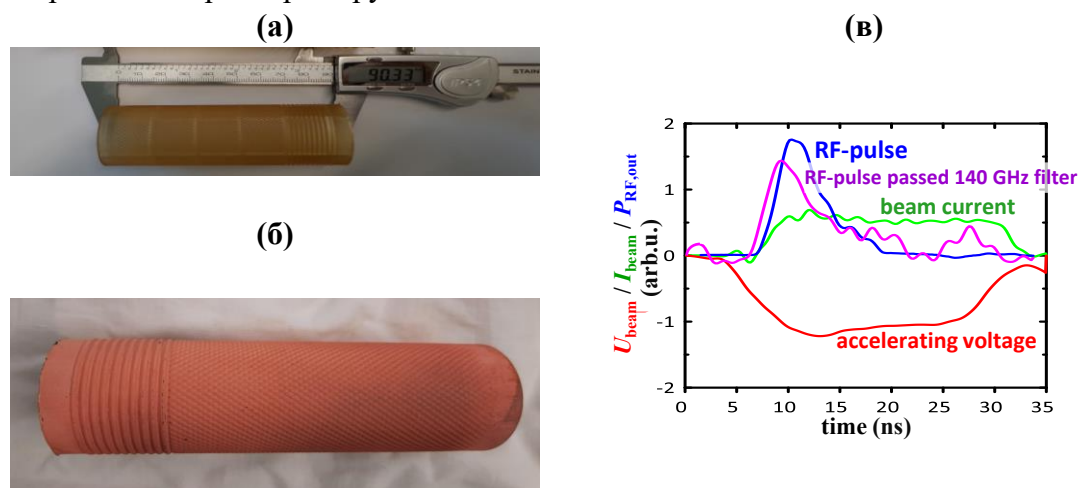


Рисунок 1. Результаты экспериментальных исследований цилиндрического ГПВ G-диапазона. (а), (б) Фотографии электродинамической системы, изготовленной с использованием аддитивной технологии. (в) Типичные осциллограммы ускоряющего напряжения (красная кривая), тока пучка (зеленая кривая) и выходного ВЧ-импульса (синяя кривая – без фильтра, фиолетовая кривая – после прохождения ВЧ фильтра).

4. Заключение

В рамках теоретического анализа и трехмерного PIC моделирования разработан проект цилиндрического релятивистского генератора поверхностной волны G – диапазона на базе трубчатого электронного пучка, формируемого взрывоэмиссионным ускорителем «СИНУС» (ИПФ РАН, 500 кэВ / 5 кА / 25 нс). Электродинамическая система генератора основана на двумерно-периодической замедляющей структуре, реализующей механизм двумерной РОС и обеспечивающей селекцию мод по поперечным пространственным координатам. Указанная структура изготовлена с помощью комплексной технологии 3D печати с последующим омеднением и электрохимическим наращиванием. В эксперименте продемонстрирован стабильный режим одномодовой генерации на частоте 145 ГГц с длительностью импульса до 5 нс и выходной мощностью ~ 70 МВт при факторе сверхразмерности (отношении диаметра системы к длине волны) ~ 20 . Продемонстрирована перспективность использования разработанной технологии для изготовления компонентов ЭВП субтерагерцового и терагерцового диапазонов частот.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-72-10094).

Список литературы

1. Litvak A.G., et al. Russian gyrotrons: Achievements and trends. // IEEE J. Microw. -2021. -V. 1. - P. 260.
2. Ananichev A.A., Fokin A.P., Kuftin A.N., Manuilov V.N., Popov L.G., Chirkov A.V., Tai E.M., Morozkin M.V., Glyavin M.Y., Denisov G.G. Experimental Study of a Short-Pulse Prototype Megawatt-Power 230-GHz Gyrotron for the TRT Tokamak. // IEEE Electron Dev. Lett. -2025. V.46. - No.11. - P.2142-2144.

3. Zaslavsky V.Yu., Palitsin A.V., Rodin Yu.V., Goykhman M.B., Gromov A.V., Panin A.N., Zheleznov I.V., Savilova A.A., Parshin V.V., Gulyovsky D.R., Leshcheva K.A., Peskov N.Yu., Ginzburg N.S. High-Power G-Band Relativistic Surface-Wave Oscillator With 2D-Periodic Slow-Wave Structure of Planar Geometry. // IEEE Electron Dev. Lett. -2025. -V.46. -No.5. -P.848-851
4. Palitsin A.V., Rodin Yu.V., Goykhman M.B., Gromov A.V., Guznov Yu.M., Panin A.N., Parshin V.V., Zaslavsky V.Yu., Malkin A.M., Ginzburg N.S. 75 GHz Relativistic Surface-Wave Oscillator of Planar Geometry. // IEEE Electron Device Letters. -2023. -V. 44. -No. 2. -P. 317 – 320.
5. Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zaslavsky V.Yu. Powerful surface-wave oscillators with two-dimensional periodic structures. // Appl. Phys. Lett. -2012. -V.100. -No.14. -Art.no.143510.
6. Проявин М. Д., Котомина В.Е. Способ изготовления СВЧ-компонентов сложной формы, имеющих развитую металлическую рабочую. // Патент № 2795771. -2022.
7. Peskov N.Y., Zaslavsky V.Yu., Denisenko A.N., Abubakirov E.B., Malkin A.M., Proyavin M.D., Sergeev A.S., Ginzburg N.S. Sub-Gigawatt W-band Oversized Surface-Wave Oscillator with 2D-periodical Slow-Wave Structure of Cylindrical Geometry. // IEEE Electron Dev. Lett. -2023. -V.44. - No.10. -P. 1766-1759.