

ВЛИЯНИЕ ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРА НА РАБОТУ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА

© 2021 г. С. Е. Андреев^а, И. Л. Богданкевич^{а, б, *}, Н. Г. Гусейн-заде^а, О. Т. Лоза^с

^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

^б Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

^с Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

*e-mail: ira.bogdankevich@mail.ru

Поступила в редакцию 20.08.2020 г.

После доработки 26.09.2020 г.

Принята к публикации 06.10.2020 г.

Рассмотрен импульсно-периодический режим работы плазменного релятивистского СВЧ-генератора. Анализируются причины увеличения средней частоты выходного СВЧ-излучения в серии последовательных импульсов при одинаковых условиях создания плазмы. Исследовано влияние эрозии твердого тела, возникающей при взаимодействии релятивистского электронного пучка с поверхностью коллектора, на выходное СВЧ-излучение. Анализ экспериментальных данных сопровождался численным моделированием в электромагнитном PIC-коде KARAT. Показано, что увеличение количества вещества, удаляемого с поверхности коллектора при эрозии, приводит не только к росту концентрации плазмы, но и может приводить к качественным изменениям параметров выходного излучения, связанным с изменением режима СВЧ-генерации. В частности, образование неоднородного в радиальном направлении ионного фона стало причиной смены условий плазменно-пучкового взаимодействия во второй половине импульса и изменению спектральной плотности излучения на основной частоте. С помощью численного моделирования это продемонстрировано для различных составов примесей — железа и графита.

Ключевые слова: плазменный релятивистский СВЧ-генератор, импульсно-периодический режим, СВЧ-излучение, воздействие мощными импульсными пучками заряженных частиц, эрозия поверхности твердого тела

DOI: 10.31857/S0367292121030021

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое внимание уделяется разработке и созданию мощных СВЧ-генераторов с широким диапазоном частот излучения. Одно из решений данной задачи — использование плазменных релятивистских источников СВЧ-излучения. В 2008 году в ИОФ РАН на базе ускорителя Sinus 550-80 со спиральной формирующей линией был создан первый импульсно-периодический плазменный релятивистский СВЧ-генератор (ПРГ Sinus 550-80) с уровнем мощности 10^8 Вт и возможностью электронной перестройки частоты излучения от импульса к импульсу в пределах октавы произвольно по любому заранее заданному закону [1].

Работа плазменного СВЧ-генератора основана на черенковском взаимодействии сильноточного релятивистского электронного пучка с плазмой, сформированной заранее перед каждым импульсом. В отличие от вакуумных релятивистских

источников СВЧ-излучения, в которых диапазон перестройки частоты не превышает 9% и осуществляется, как правило, механическим изменением геометрии соответствующего волновода, в плазменных релятивистских СВЧ-генераторах электронное управление свойствами плазмы позволяет произвольно менять частоту и ширину спектра СВЧ-излучения от импульса к импульсу в более широких пределах.

ПРГ Sinus 550-80 способен генерировать импульсы СВЧ-излучения длительностью до 80 нс с частотами от 2 до 20 ГГц, как монохроматического, так и широкополосного. Особенностью генератора являлась возможность генерации как одиночного импульса релятивистского электронного пучка (РЭП), так и работа в частотно-периодическом режиме, до 50 импульсов в пачке с длительностью 1 с [1]. Задавая начальную концентрацию плазмы, можно было индивидуально регулиро-

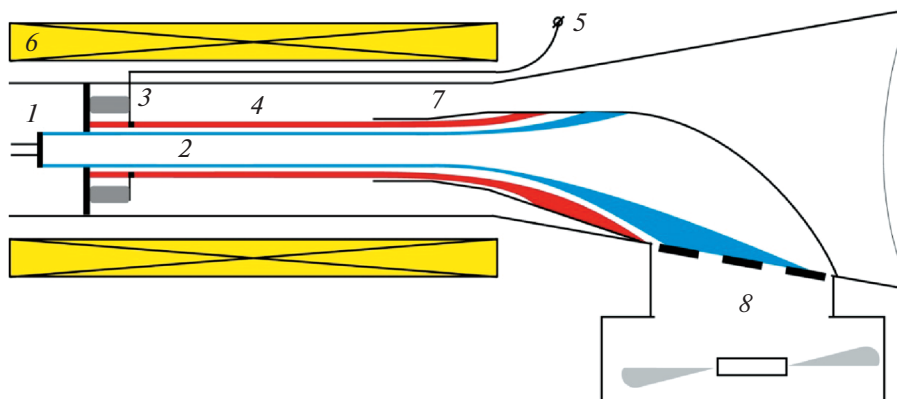


Рис. 1. Схема импульсно-периодического плазменного релятивистского СВЧ-генератора: 1 – катод РЭП; 2 – трубчатый РЭП; 3 – кольцевой термокатод; 4 – трубчатая плазма; 5 – блок управления плазменным источником; 6 – соленоид; 7 – коллектор; 8 – система откачки вакуумной камеры.

вать характеристики излучения в каждом импульсе: центральную частоту, ширину спектра и т.д.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Принцип действия и устройство ПРГ многократно описаны в литературе, см. [2], его схематичное изображение приведено на рис. 1. Физические и геометрические параметры рассмотренного ПРГ приведены в табл. 1. Внешнее магнитное поле (0.1 Тл) создавалось соленоидом 6 с системой стабилизации тока. Накопитель соленоида позволял удерживать ток на заданном уровне в течение 2 с, что и определяло длительность пачки импульсов.

Измерения выходного СВЧ-излучения проводились с использованием регистрации электрической компоненты поля в течение импульса в заданной точке сечения выходного рупора. Они осуществлялись с помощью штыревой вибраторной антенны (длина антенны 20 мм, толщина 5 мм).

Особенности работы ПРГ в режиме генерации одиночного импульса подробно рассмотрены в

работах [3–6]. В настоящей работе рассмотрены особенности импульсно-периодического режима генерации СВЧ-импульсов в ПРГ.

Плазма трубчатой формы создавалась в результате ионизации газа с давлением $\sim 10^{-3}$ Торр специальным электронным пучком с кольцевого вольфрамового термоэмиссионного катода 3 [7]. Электроны, эмитированные с термокатада с потенциалом -600 В и удерживаемые магнитным полем соленоида, устремлялись к коллектору 7, ионизируя на своем пути нейтральные атомы газа, обычно воздуха. Длительность импульса тока этого пучка равна 50 мкс, энергия электронов 500 эВ и ток пучка 30 А [7]. Концентрация плазмы измерялась зондом Ленгмюра, сигнал с которого растет с ростом концентрации. Измерения проводились при отсутствии релятивистского электронного пучка и СВЧ-излучения. На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов тока с зонда Ленгмюра, полученные в последних 10 импульсах пачки, состоящей из 100 импульсов. Осциллограммы совпали друг с другом, что свидетельствовало о примерной идентичности процессов нарастания концентрации плазмы в каждом импульсе пачки.

Частота выходного излучения ПРГ определялась концентрацией плазмы, которая при ее создании постепенно нарастает в течение ~ 100 мкс до максимального значения $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$. Когда концентрация плазмы в очередном импульсе достигала требуемого значения, в область плазменно-пучкового взаимодействия (рис. 1) инжектировался РЭП с энергией электронов 500 кэВ, током 2 кА и длительностью 80 нс. С помощью электронного управления моментом срабатывания ускорителя достигалась синхронизация с моментом возникновения плазмы в трубе дрейфа с разбросом не более 0.5 мкс. Этот разброс являлся

Таблица 1

№		
1	Радиус металлического волновода (R)	30 мм
2	Средний радиус плазмы (r_p)	18.5 мм
3	Средний радиус РЭП (r_b)	15 мм
4	Длительность импульса РЭП	80 нс
5	Ток РЭП	2 кА
6	Энергия электронов РЭП	500 кэВ
7	Длина плазменно-пучкового взаимодействия	290 мм

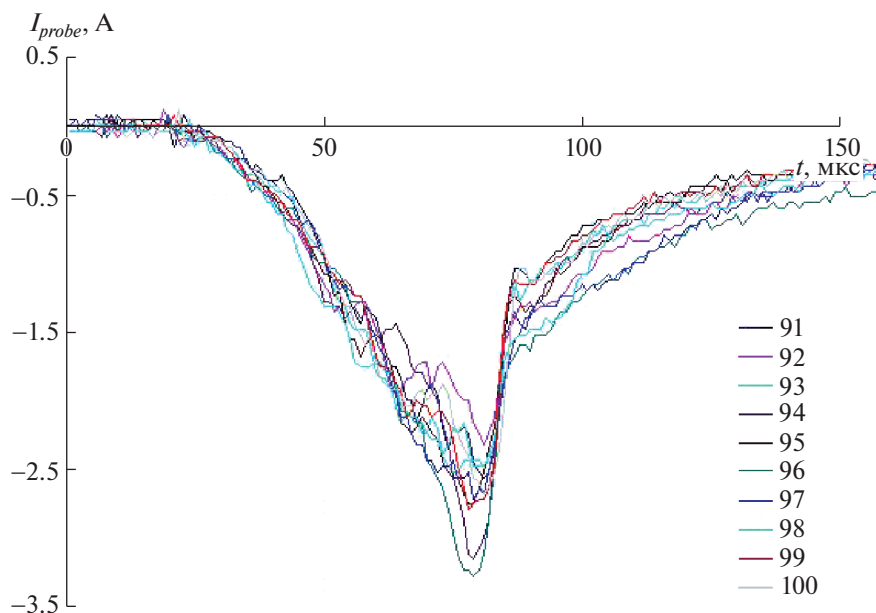


Рис. 2. Осциллограммы с зонда Ленгмюра в 10 из 100 последовательных импульсов источника плазмы.

достаточно малым по сравнению с длительностью накопления плазмы (до 50 мкс) и позволял инжектировать релятивистский электронный пучок в плазму с заданной концентрацией. При черенковском взаимодействии между РЭП (2, рис. 1) и медленной волной плазменного волновода, созданного трубчатой плазмой 4, возникало СВЧ-излучение, которое через рупор выводилось в открытое пространство. Коллектор 7, как и в [1], не обладал аксиальной симметрией и одновременно являлся преобразователем ТЕМ-волны коаксиального волновода в TE_{11} -волну круглого волновода, которая далее излучалась.

После выключения плазменного источника плазма полностью распалась за время порядка 150–200 мкс, а перед следующим импульсом РЭП снова создавалась. При работе ПРГ в импульсно-периодическом режиме к моменту следующего импульса в пачке через 20 мс начальная концентрация плазмы равна нулю. Процесс повторялся снова: создавалась плазма, в нее инжектировался РЭП, генерировалось СВЧ-излучение. Задержка инжекции РЭП относительно момента включения плазменного источника позволяла организовать взаимодействие релятивистских электронов с плазмой требуемой концентрации для каждого из импульсов, следующих в периодическом режиме. В свою очередь, концентрация плазмы определяла частоту СВЧ-излучения [2], которая может быть изменена от импульса к импульсу по любому заранее заданному закону. Эта возможность быстрого и произвольного в широком диапазоне выбора частоты СВЧ-излучения в каждом из импульсов определяет уникальные свойства

импульсно-периодического плазменного релятивистского СВЧ-генератора.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с принципами формирования плазмы для достижения стабильности частоты выходного излучения при работе ПРГ инжекция РЭП должна была начинаться в каждом импульсе серии при одной и той же концентрации плазмы, т.е. при одном значении задержки между началом формирования плазмы и инжекцией РЭП. Эксперименты по генерации СВЧ-импульсов в импульсно-периодическом режиме показали, что для сохранения стабильности частоты выходного СВЧ-излучения ПРГ при работе в импульсно-периодическом режиме необходимо подстраивать задержку инжекции РЭП относительно момента включения плазменного источника от импульса к импульсу [8]. При одинаковом времени задержки средняя частота выходного СВЧ-излучения ПРГ росла от импульса к импульсу (см. рис. 3). Для анализа были выбраны 4 экспериментальные серии с одинаковыми задержками РЭП. Для каждого одиночного импульса была определена средняя частота в спектре выходного СВЧ-излучения. Эти зависимости отражены на рис. 3 для ансамбля экспериментальных данных. Из графиков видно, что характер изменения средней частоты носит нелинейный характер.

На рис. 4 можно видеть зависимость средней мощности СВЧ-излучения одиночного импульса в зависимости от номера выстрела (импульса). На

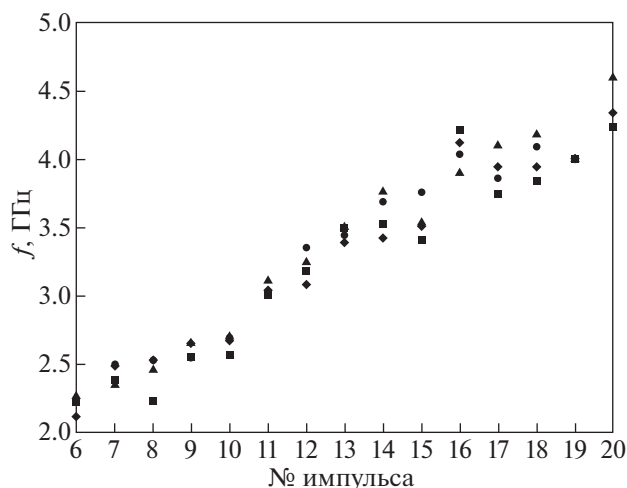


Рис. 3. Средняя частота для ансамбля экспериментальных данных в зависимости от номера импульса.

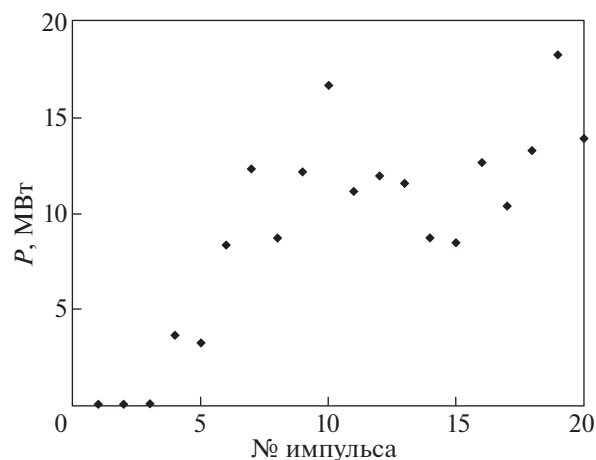


Рис. 4. Средняя мощность в импульсе для ансамбля экспериментальных данных в зависимости от номера импульса.

этом графике сначала происходит рост мощности, а затем намечается тенденция уменьшения разброса значений при переходе от импульса к импульсу. Это вполне согласуется с предположением, что концентрация плазмы увеличивается в течение 10–20 импульсов, а потом возможен эффект насыщения.

На рис. 5 показаны экспериментальные фурье-спектры выходного СВЧ-излучения ПРГ для первого и последнего импульса РЭП в серии.

На рис. 6 приведены огибающие амплитуды поля в течение импульса РЭП.

На рис. 7 представлены экспериментальные данные об эволюции спектров одиночных импульсов во времени.

Результаты, показанные на рис. 3–7, демонстрируют нам не только разные центральные частоты и среднюю мощность выходного СВЧ-излучения ПРГ в отдельных импульсах в зависимости от номера импульса в серии, но и разные режимы генерации. Параметры генерации последнего импульса (более высокая средняя частота выходного СВЧ-излучения ПРГ) характеризуются более высокой концентрацией плазмы, чем первый.

Концентрация создаваемой плазмы зависит от концентрации газа, находившегося в корпусе генератора, от тока дополнительного пучка и длительности формирования плазмы. Экспериментальная зависимость средней частоты выходного

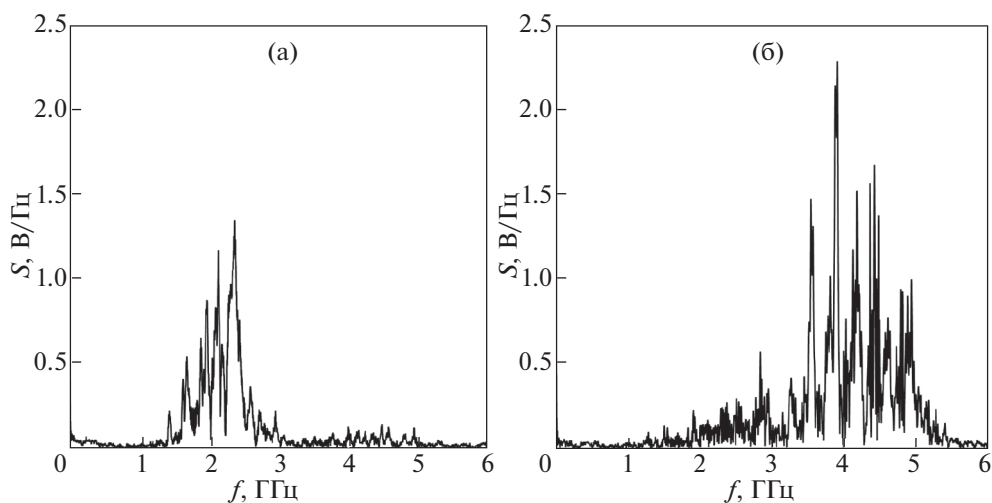


Рис. 5. Экспериментальные фурье-спектры выходного СВЧ-излучения ПРГ первого (а) и последнего (б) импульса в серии.

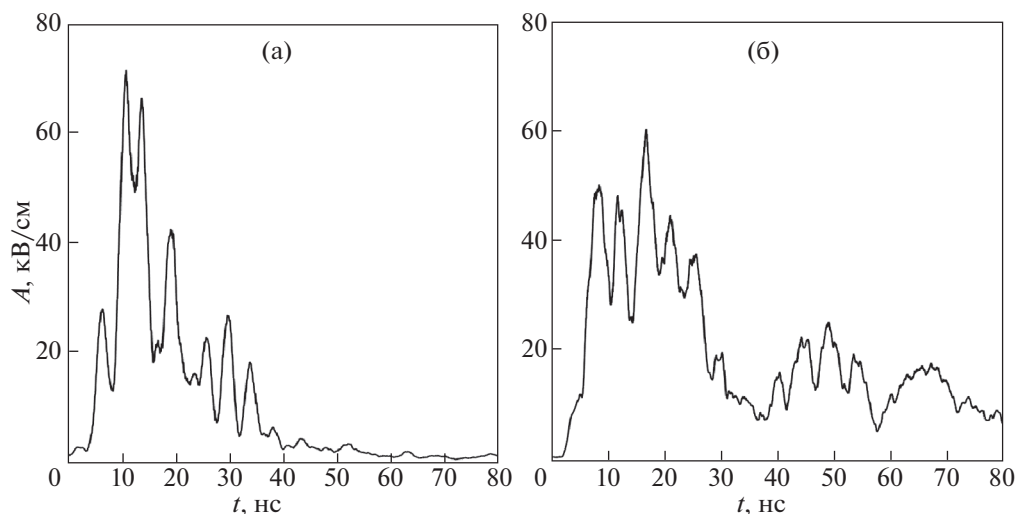


Рис. 6. Экспериментальные графики огибающих амплитуды поля в течение импульса РЭП. Первый импульс – частота 2 ГГц (рисунок а). Последний импульс в периодической серии – 4 ГГц (б).

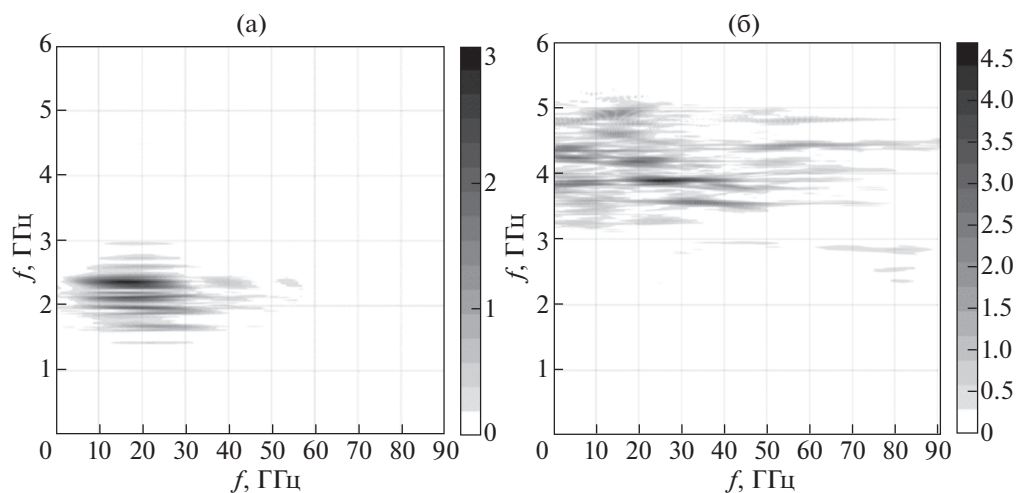


Рис. 7. Эволюции спектров одиночных импульсов из одной серии во времени: а – первый импульс, а б – последний импульс периодической серии.

СВЧ-излучения ПРГ от концентрации плазмы совпадает с расчетной зависимостью [9]. Это позволяет, при невозможности измерения концентрации плазмы во время экспериментов с релятивистским электронным пучком, оценить значение концентрации плазмы в процессе возбуждения электромагнитных волн по экспериментально измеренной частоте выходного СВЧ-излучения ПРГ. В табл. 2 приведены номер импульса, средняя частота выходного СВЧ-излучения в данном импульсе (в ГГц) и концентрация плазмы ($10^{12}/\text{см}^3$), соответствующая данной частоте, рассчитанная по линейной теории [2].

График изменения максимального инкремента в рассмотренном диапазоне концентраций

плазмы приведен на рис. 8. Значение инкремента возрастает в два раза при переходе от первого выстрела к последнему, и ширина полосы усиления увеличивается от 0–3 ГГц (для 2.25 ГГц средней частоты) до 0–6 ГГц (для 4.1 ГГц). На рис. 7 (спектр экспериментальных реализаций с частотным разрешением) видно уширение спектральной полосы в первой половине импульса при переходе от первого импульса к последнему. В области частот вблизи нуля коэффициент усиления слишком мал, чтобы на заданной длине (табл. 1) выполнялось условие генерации. Во второй половине импульса наблюдается или отсутствие генерации (рис. 7а), или смена режима генерации

Таблица 2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f , ГГц	2.2	2.5	2.5	2.6	2.7	3.1	3.2	3.5	3.6	3.6	4.1	4.0	4.1	4.0
n_p , 10^{12} см $^{-3}$	3.2	3.3	3.3	3.38	3.5	3.85	3.96	4.2	4.3	4.3	4.88	4.8	4.88	4.8

(рис. 7б). Причины таких изменений были рассмотрены в [5, 6].

Следует отметить, что как огибающие (рис. 6), так и спектры с частотным разрешением (рис. 7) демонстрируют динамику, несколько отличную от предсказаний линейной теории и экспериментальных результатов при других параметрах эксперимента [5, 6]. В данном случае (см. табл. 1) радиус металлического волновода 30 мм, в то время как в работах [5, 6] радиус волновода был 18 мм, и соответственно были рассмотрены другие поперечные размеры всей электродинамической структуры (средние радиусы пучка и плазмы).

Из сравнения рис. 7 и рис. 9 видно, что в условиях рассматриваемого эксперимента ярче проявляются переходные процессы (до 10 нс). Генерация начинается практически сразу уже на фронте РЭП (рис. 6 и 7), в то время как обычно она начинается после 8 нс, т.е. на плато РЭП. Это может быть связано с разными пороговыми условиями возникновения плазменно-пучковой неустойчивости (см. рис. 9). Но возможно, что некоторые экспериментальные условия (изменение коэффициентов отражения волны и др.) не учитываются как в линейной модели, так и численном эксперименте. Поэтому и в моделировании может отсутствовать генерация на фронте РЭП, т.е. временах, меньших 8 нс.

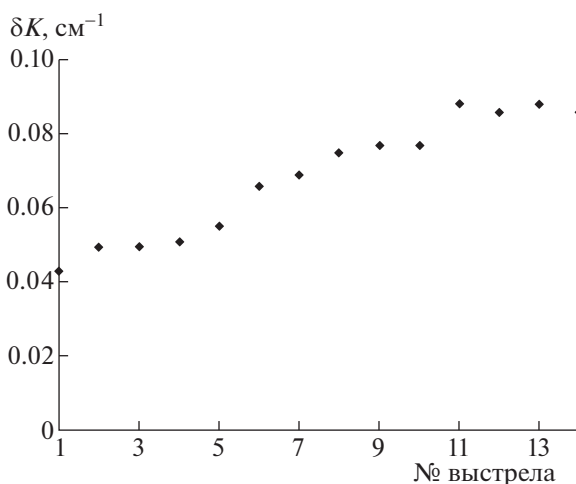


Рис. 8. Максимальный инкремент для каждого выстрела, рассчитанный по линейной теории.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПОВЕРХНОСТЬЮ КОЛЛЕКТОРА

Рассмотрим причины, которые могут привести к увеличению концентрации плазмы и различным режимам генерации плазменного релятивистского СВЧ-генератора. Так как плазма создавалась благодаря столкновениям электронного пучка (с термокатода) с молекулами и атомами газа, то увеличение концентрации плазмы при одинаковом значении тока плазменного источника возможно, только если увеличивалось давление газа.

Конструктивной особенностью реализованной схемы ПРГ (рис. 1) являлось то, что в ней происходит взаимодействие мощного импульсного электронного пучка с поверхностью коллектора. Один из результатов этого взаимодействия – интенсивная эрозия коллектора. Она зависит от энергии и плотности тока РЭП, материала и формы коллектора, а также от индукции и конфигурации магнитного поля.

Взаимодействие РЭП с коллектором вызывает различные физические эффекты, которые неоднократно обсуждались в литературе. Так, например, в работе [10] было показано, что при взаимодействии РЭП с коллектором в течение каждого импульса возникает поток ионов, ускоряемых собственным полем электронного пучка, в сторону источника РЭП. Скорость такого движения

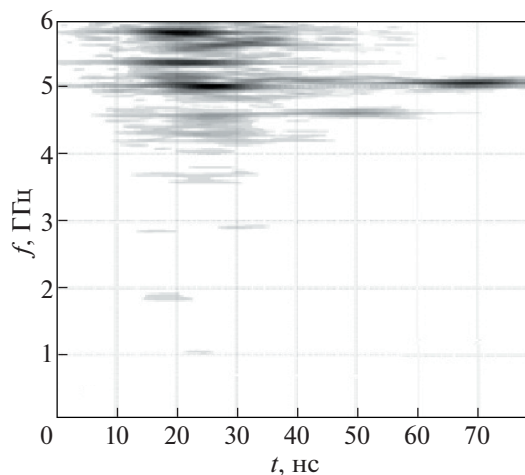


Рис. 9. Спектр с частотным разрешением из [6].

превышает среднюю скорость разлета плазмы и, по оценкам [10], имеет порядок 10^8 см/с. Применительно к нашей задаче это означает, что к концу первого импульса в области плазменно-пучкового взаимодействия может существовать дополнительная плазма материала коллектора, что должно проявляться в изменении режима излучения.

Возникновение вторичной электронной эмиссии и влияние отраженных от коллектора электронов на условия транспортировки РЭП рассмотрены в [11]. Возникновение коллекторной плазмы и проблемы непосредственно для ПРГ на ускорителе Sinus 550-80 обсуждались в [12]. Для минимизации влияния коллекторной плазмы в [12] была предложена новая конструкция коллекторного узла. Влияние эрозии рабочих элементов характерно не только для плазменной электроники, но и для вакуумных приборов с замедляющими структурами в виде металлических периодических волноводов [13].

Количество примесей материала коллектора в плазмообразующем газе, вызванное эрозией при взаимодействии с интенсивными пучками, связано со многими факторами. При облучении поверхности твердого тела слаботочными электронными пучками удаление атомов и молекул с поверхности мишени происходит в результате парных столкновений быстрых электронов с атомами вещества, т.е. так называемого столкновительного распыления. При воздействии на твердое тело мощных импульсных (субмикросекундных) пучков заряженных частиц интенсивность эрозии, создаваемой испарением, может оказаться на 3–5 порядков выше, чем интенсивность столкновительного распыления. Коллективное действие таких мощных пучков электронов создает эффект нелинейного роста скорости эрозии (т.е. количества вещества, удаляемого с единицы площади поверхности в единицу времени) с увеличением плотности тока [14].

В работе [14] было показано, что тепловая эрозия является доминирующим механизмом удаления атомов с поверхности под действием мощных электронных пучков с энергией 10–1000 кэВ и длительностью импульса 10^{-8} – 10^{-6} с. Сначала происходит быстрый разогрев поверхностных слоев. При энергии электронов пучка больше 100 кэВ имеет место поверхностное испарение и гидродинамический разлет вещества. Согласно [14], при осаждении электронов РЭП с энергией, характерной для рассматриваемых экспериментов (500 кэВ), испарение вещества происходит и во время импульса РЭП, и после его окончания. Как следствие, в импульсно-периодическом режиме работы ПРГ потери энергии пучка при взаимодействии с коллектором увеличиваются, и коэффициент эрозии уменьшается.

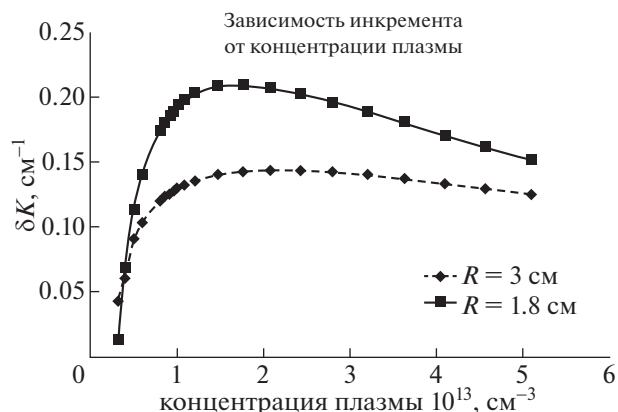


Рис. 10. Зависимость инкремента от концентрации плазмы.

Оценки в [14] показали, что под действием мощного электронного пучка с начальной энергией частиц 10–1000 кэВ, плотностью мощности 10^9 – 10^{10} Вт/см² длительностью импульса тока в 100 нс толщина удаленного слоя с медной поверхности составляет 10^{-5} – 10^{-4} м. Этот факт может объяснить рост частоты излучения ПРГ при работе в импульсно-периодическом режиме. Грубая оценка “сверху”, сделанная по тепловому испарению вещества, дает увеличение концентрации ($\sim 10^{16}$ – 10^{17} см⁻³).

С одной стороны, экспериментально было установлено, что в паузах между включениями плазменного источника ток в плазме отсутствовал, т.е. за время между импульсами все частицы плазмы рекомбинировали. С другой стороны, выделение дополнительного вещества с коллектора в камеру ПРГ регистрировалось показанием вакуумметра при импульсе РЭП. Таким образом, следующее включение плазменного источника через небольшой интервал времени происходило при большей концентрации нейтральных атомов и молекул в камере, что связано с появлением примесей материала коллектора [14].

Для объяснения описанных выше экспериментов с импульсно-периодическим режимом работы ПРГ с использованием расчетов по линейной теории (см. табл. 2), необходимо объяснить появление дополнительного количества заряженных частиц с концентрацией порядка $\sim 10^{14}$ см⁻³. Это вполне может быть объяснено эрозией поверхности коллектора при взаимодействии с РЭП. Резкое увеличение примесей в объеме ПРГ приводило к скачку давления в системе. А так как производительность турбомолекулярного насоса (ТМН), работающего в ПРГ, при давлениях больше 10^{-3} Торр снижалась, то он не успевал среагировать на этот скачок, что и регистрировалось вакуумметром.

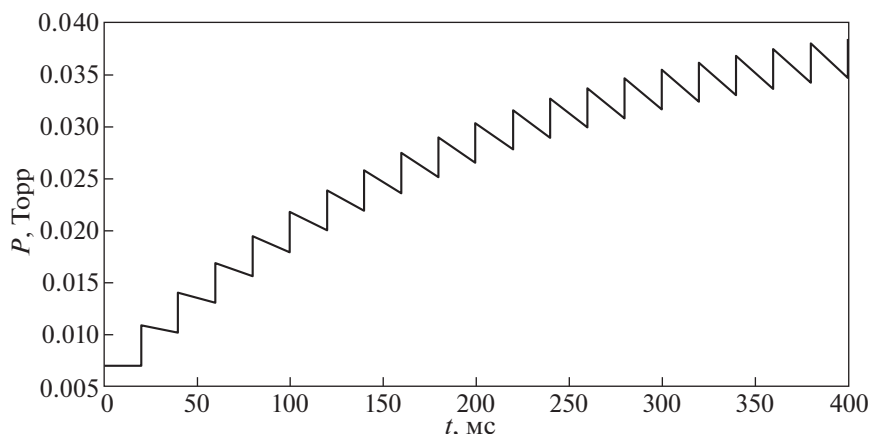


Рис. 11. Зависимость значения давления в камере ПРГ от времени в импульсно-периодическом режиме.

Необходимо заметить, что разница между числом заряженных частиц, объясняющих эксперимент с ПРГ, и грубой оценкой “сверху” максимального количества атомов примесей достаточно большая. Это может быть связано со сложным механизмом взаимодействия пучков с твердым телом. При воздействии на твердое тело мощных импульсных (субмикросекундных) пучков заряженных частиц с энергией 100–1000 кэВ при достаточно высокой плотности мощности глубина проникновения электронов очень высока, и максимум энерговыделения находится на некотором расстоянии от поверхности. Это полностью согласуется с результатами исследований [10]. При взаимодействии низкоэнергетичных электронов пучка с твердым телом испарившиеся частицы разлетаются от поверхности, практически не взаимодействуя друг с другом, т.е. в режиме молекулярного потока. В случае мощных импульсных пучков интенсивное испарение атомов приводит к тому, что переходящие в пар частицы взаимодействуют между собой, и испарившееся вещество удаляется от поверхности в режиме течения сплошной среды (происходит гидродинамический разлет вещества).

5. СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ

Для поддержания постоянного давления и реализации стабильности работы ПРГ в системе используется турбомолекулярный насос (ТМН) и система напуска газа. С учетом дегазации стенок камеры ПРГ (постоянная эмиссия нейтралов со стенок) эти устройства устойчиво поддерживают заданное давление выше 0.3 мТорр. Проведем расчет давления ПРГ с учетом быстрого (80 нс) выброса вещества коллектора в момент взаимодействия с ним РЭП.

Из дифференциального уравнения для идеального насоса (производительность насоса S_n не зависит от давления) следует

$$\frac{dP}{P} = -\frac{S_n}{V} dt.$$

На рис. 11 изображена временная зависимость давления в рабочей камере ПРГ для 20 импульсов РЭП. Расчет зависимости давления был сделан для скорости откачки насоса $S_n = 200$ л/с и добавочного давления при импульсе РЭП 1.4 мТорр, соответствующего количеству добавочных нейтралов $\sim 10^{18}$. Радиус рабочей камеры принимался равным 7 см. При расчете данной кривой считалось, что за импульс РЭП выбивает $\sim 10^{18}$ частиц из материала коллектора. Производительность реальных насосов является функцией давления, однако в диапазоне рабочих давлений ~ 0.1 мТорр откачная характеристика ТМН почти постоянна и, следовательно, зависимость (рис. 11) качественно не поменяется.

Постоянная откачка системы при регулярном впрыске новых частиц приводит к замедлению роста давления с числом импульсов, т.е. с течением времени наступает насыщение. Это качественно согласуется с результатами нашего эксперимента (рис. 3). Частота нелинейно растет с каждым импульсом, ее рост замедляется от импульса к импульсу (зависимость близка к логарифмическому закону). Следовательно, при больших сериях (100 импульсов) уже после 15–20 импульсов будут наблюдаться незначительные изменения средней частоты ПРГ, что, в целом, соответствует результатам экспериментов.

6. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для физического анализа проблемы было проведено численное моделирование с использованием электродинамического кода КАРАТ [15].

Трубчатый электронный пучок и плазма моделировались РС-методом (крупных частиц) с фиксированным зарядом. Уравнения Максвелла решались на сдвинутых сетках. Разностная схема — явная, с перешагиванием на сетках. Движение макрочастиц РЭП описывалось трехмерным релятивистским уравнением Лоренца. Схема ПРГ, используемая в расчетах, приведена на рис. 12. Геометрия модели соответствовала данным табл. 1. Расчет проводился в 2.5-мерной осесимметричной RZ-версии кода КАРАТ, при котором концентрация плазмы, РЭП и электромагнитные поля не зависели от азимутальной координаты.

Задача решалась в рамках гипотезы о наличии некоторого количества примесей материала коллектора в рабочем газе, что способствовало установлению возможных качественных эффектов в спектрах выходного СВЧ-излучения.

В соответствии с устройством плазменного источника ионизация происходит в узком трубчатом канале. Концентрация “чистой” газовой плазмы соответствовала значениям концентрации плазмы для первого импульса из табл. 2, и она оставалась постоянной для всей серии. В расчетах в плазменный волновод добавлялось от импульса к импульсу некоторое количество (см. табл. 2) “коллекторной” (примесной) плазмы. Примесная плазма в численной модели задавалась другим типом больших частиц с соответствующим весом ионов. Для простоты считалось, что обе плазмы распределены равномерно в заданном начальном объеме плазменного волновода. Моделировалась серия импульсов ПРГ. Из линейной теории (кривая рис. 3 и табл. 2) вычислялись среднее увеличение частоты от импульса к импульсу в серии и соответственно добавка примесной плазмы.

В экспериментах с ПРГ в качестве материала для коллектора использовался графит. При каждом импульсе в численную модель в соответствии с проведенными оценками добавлялось определенное число частиц примесной углеродной плазмы. Доля добавочной концентрации примесной плазмы на каждом шаге составляет примерно 7–8% от первоначальной концентрации газовой плазмы. Результаты моделирования демонстрируют последовательный рост частоты выходного СВЧ-излучения ПРГ. На рис. 13 приведены фурье-спектры для первого (без примеси) и последнего (соответствует уровню примеси 70%) импульса в табл. 2. Средние частоты спектров излучения, полученных в результате численного моделирования соответствуют экспериментальным спектрам на рис. 4. Правда, при низкой концентрации в первом импульсе модельный генератор работает в квазилинейном режиме, спектр практически не зашумлен по сравнению с экспериментальным (рис. 4). Спектр последнего мо-

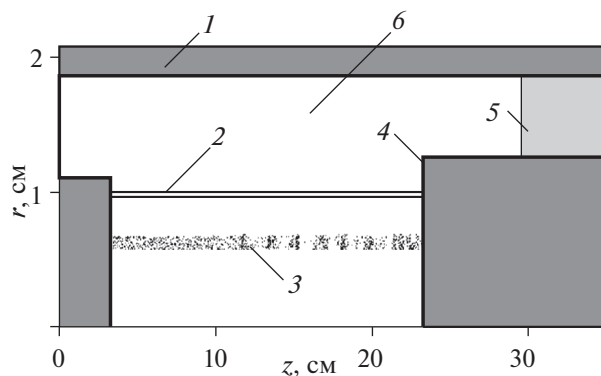


Рис. 12. Схема моделирования плазменного релятивистского СВЧ-генератора. OZ — ось симметрии, 1 — металлический волновод, 2 — плазма, 3 — РЭП, 4 — коллектор РЭП, 5 — внешний СВЧ-поглотитель, 6 — область плазменно-пучкового взаимодействия.

дельного импульса на частоте 4 ГГц обнаруживает более богатый гармонический набор, качественно близкий к экспериментальному (рис. 4б).

На частоте 4 ГГц качественно близка динамика функционирования генератора в эксперименте и в численном моделировании. На рис. 14 показаны огибающие поля, характерные для экспериментальных и модельных импульсов со средней частотой излучения 4 ГГц. Последний импульс серии характеризовался наибольшей средней частотой, когда концентрация примесной коллекторной плазмы составляла 60–70% от основной газовой плазмы.

При концентрации плазмы, соответствующей средней частоте выходного излучения 4 ГГц, СВЧ-генерация не срывается на 40 нс, что характерно для низкой частоты (рис. 6а), а наблюдается смена режима — генерация с меньшей мощностью и более узким спектром. На рис. 15 видно различие в динамике развития генератора в эксперименте и моделировании. Как уже отмечалось выше, в данном эксперименте генерация начинается уже на переднем фронте РЭП (до 10 нс), что наблюдается не при всех геометрических параметрах эксперимента. В моделировании генерация начинается после 10 нс, уже на плато тока РЭП. В работе [16] отмечается, что эффективность генерации сильно зависит не только от инкремента (рис. 8), но и от коэффициента отражения плазменной волны, то есть обратной связи генератора. Влияние сильной обратной связи хорошо заметно на рис. 15, где представлены эволюции спектров во времени для импульса в конце серии — эксперимент и моделирование.

В экспериментальных графиках эволюции спектра излучения на фронте РЭП видна группа частот ниже средней, что объясняется сильной обратной связью. Далее наблюдается сравнитель-

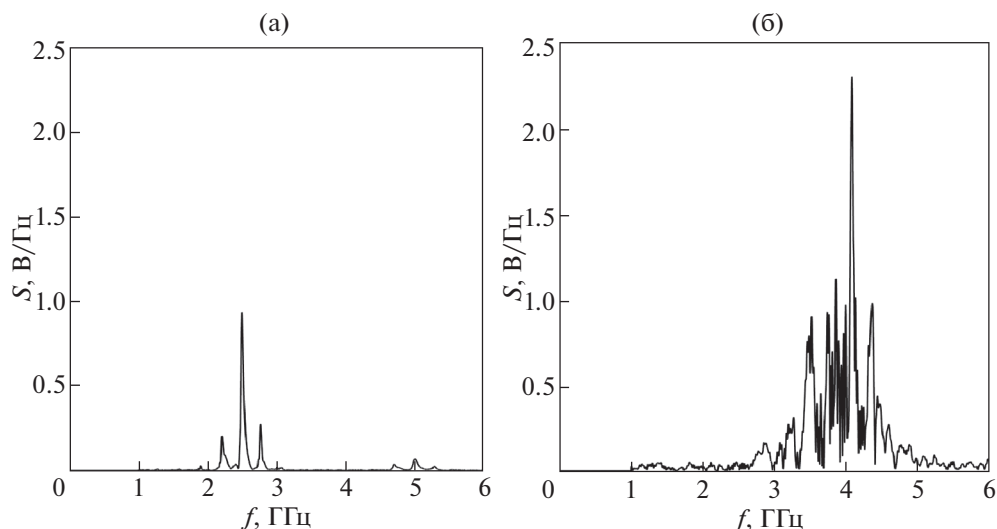


Рис. 13. Модельные спектры первого (а) и последнего импульса (б, примеси 70%) серии работы ПРГ с коллектором из графита.

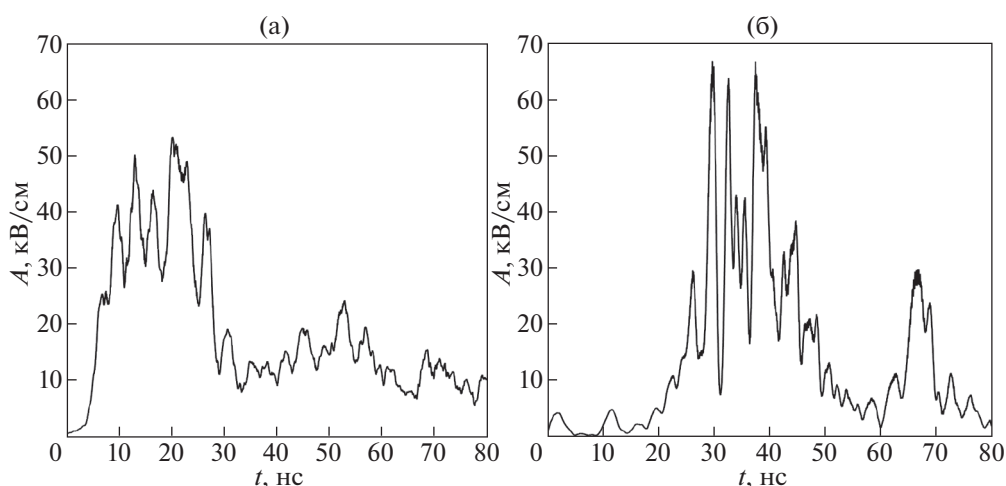


Рис. 14. Графики огибающих амплитуды поля для последнего импульса серии ПРГ с коллектором из графита. Эксперимент (а) и моделирование (б).

но широкая полоса частот усиления, предсказываемая линейной теорией и аналогичная модельному спектру. Вторая половина импульса характеризуется сменой режима генерации: одностичный эффект Черенкова (комптоновский режим) переходит в коллективный эффект Черенкова (рамановский режим), который характеризуется узкой полосой генерации, как описано в [5].

7. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПРИМЕСЯМИ ЖЕЛЕЗА

В экспериментах с ПРГ в качестве материала для коллектора РЭП используется как графит, так

и нержавеющая сталь. При распылении графита, как в описанных выше экспериментах, образовывались ионы, по массе не сильно отличающиеся от ионов газа камеры ПРГ. Однако, если распыляется металлический коллектор, то, как показано в работе [17], добавление небольшого количества металла (<1%) к благородным газам сильно меняет как сам процесс ионизации, так и характеристики газоразрядной плазмы. Использование металлического коллектора в ПРГ может привести:

- к другому количеству примесей – молекул и атомов, которые удаляются с поверхности коллектора под действием мощного электронного

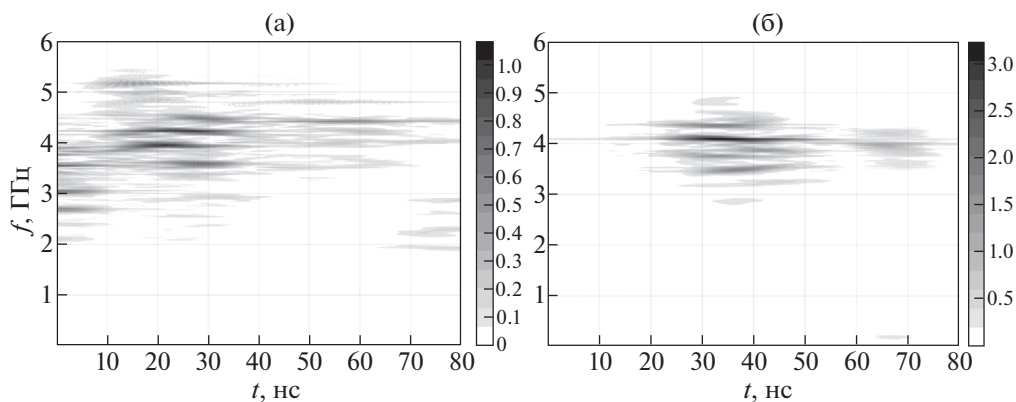


Рис. 15. Эволюции спектров последнего импульса серии ПРГ с коллектором из графита: эксперимент (а) и моделирование (б).

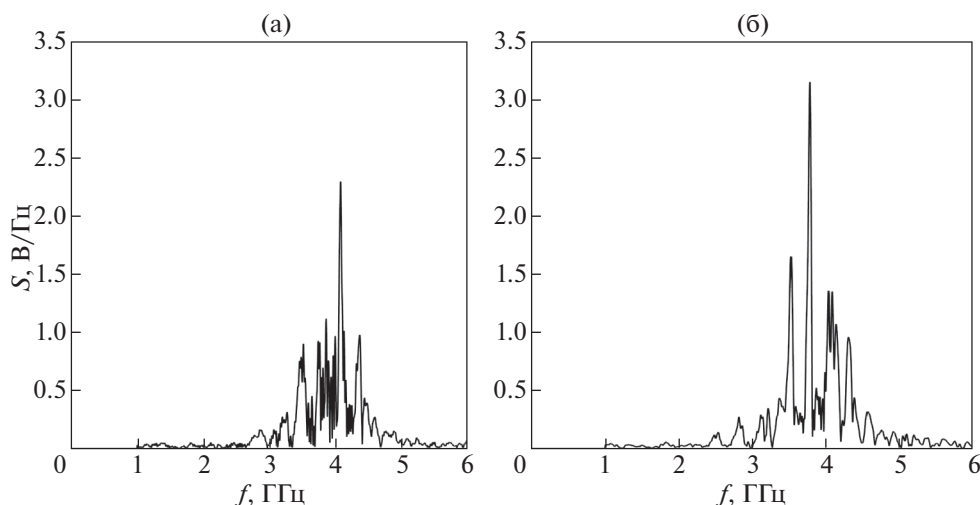


Рис. 16. Модельные спектры последнего импульса серии ПРГ (70% примеси) с коллектором из графита (а) и железа (б).

пучка, а соответственно, концентрации плазмы и средней частоты выходного излучения ПРГ;

- изменению состава плазмы — добавление тяжелых ионов металла может привести к изменению динамики плазмы при взаимодействии с РЭП и, соответственно, изменению режима генерации. Спектры ПРГ для первого и последнего выстрелов должны различаться так же, как при использовании различных буферных газов в камере ПРГ — воздуха и ксенона.

Чтобы выявить влияние состава плазмы при одинаковой концентрации (хотя при различных материалах коллектора концентрация плазмы тоже меняется), было проведено численное моделирование, результаты которого приведены на рис. 16. Модельные фурье-спектры выходного СВЧ-излучения импульсно-периодического режима ПРГ, выполненные для одинакового процентного количества примеси графита и железа

показывают, что полоса и основная частота спектров в обоих случаях близки. Основное различие в случае примесей железа проявляется лишь в увеличении спектральной плотности в основной частоте и чуть меньшего полигармонизма по сравнению со случаем графита.

При работе ПРГ в каждом отдельном импульсе могут проявляться эффекты, описанные в работах [5, 6], в частности, появление ионного фона. Этот эффект будет заметен при использовании разных материалов коллектора. В случае графитового коллектора ионы первоначального газа и примеси близки по весу, и по мере уменьшения числа электронов в системе, одинаково вытесняются из трубчатой плазмы, образуя “однородный” ионный фон из частиц азота (воздуха) и углерода (графита коллектора). В случае железного коллектора ионный фон состоит преимущественно из ионов азота (воздуха), так как ионы железа,

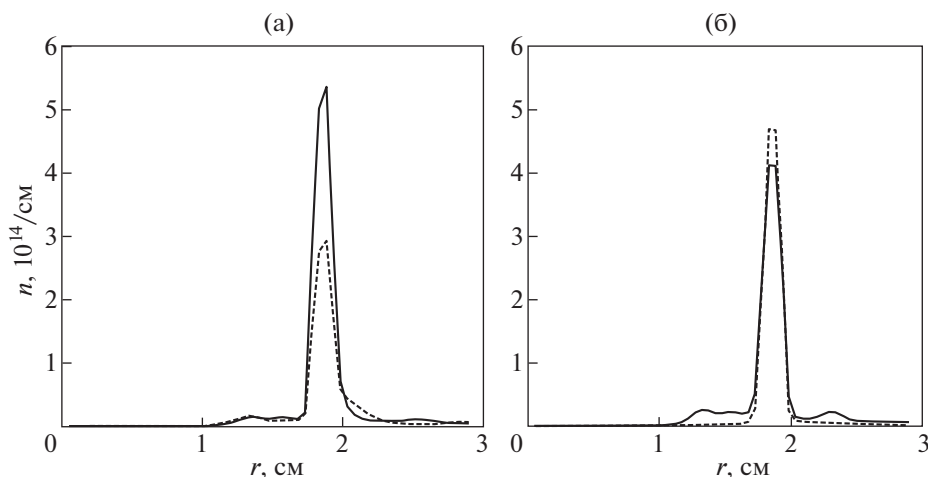


Рис. 17. Радиальные профили ионов основной (сплошная линия) и примесной (пунктир) плазмы для графита (а) и железа (б).

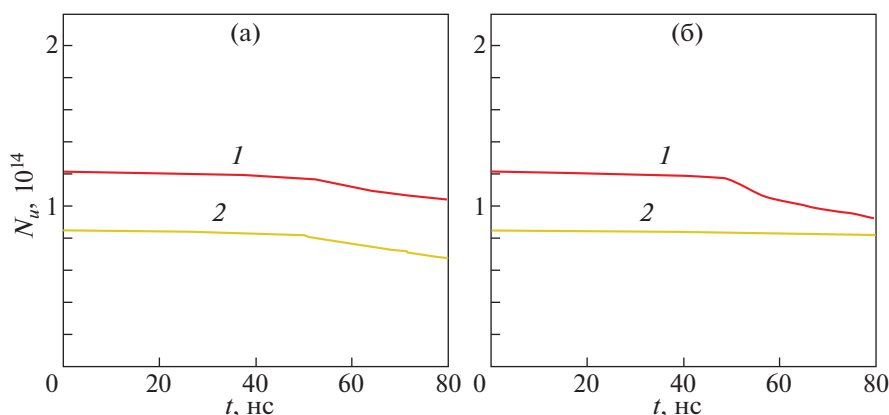


Рис. 18. Динамика частиц в импульсе. а – графит, б – стальной (железный) коллектор. 1 – ионы газа, 2 – ионы примеси.

как более тяжелые, медленнее движутся поперек силовых линий внешнего магнитного поля и сохраняются в границах первоначальной трубчатой плазмы. Это ярко проявляется на графиках радиального распределения частиц (ионов) плазмы в случае двух материалов коллектора.

Графики на рис. 17 соответствуют моменту окончания импульса РЭП, когда деградация профиля ионного остова максимальна по сравнению с первоначальными резкими границами трубчатой плазмы. Из рисунков видно, что в случае графитовой примеси как ионный фон, так и трубчатая плазма представляет собой почти равномерную смесь близких по весу ионов. При использовании коллектора из железа ионный фон образован в основном ионами газа, в то время как в канале первоначально созданной плазмы соотношение ионов Fe к С примерно 3 к 2. На рис. 18 представлена динамика полного числа ча-

стиц для разных материалов коллектора. Видно, что уменьшение количества частиц вследствие ухода ионов графитовой примеси за границы счетной области происходит так же, как основного газа, рис. 18а (1 – ионы газа, 2 – ионы примеси). В случае примесей железа ионы Fe практически не движутся к границам счетной области: количество ионов (линия 2 рис. 18б) не уменьшается за время импульса РЭП.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ выходного СВЧ-излучения плазменного релятивистского СВЧ-генератора, работающего в импульсно-периодическом режиме на базе ускорителя Sinus 550-80. Для объяснения причины постепенного увеличения от импульса к импульсу средней частоты выходного СВЧ-излучения ПРГ при одинаковых усло-

виях создания плазмы необходимо объяснить на-
растание концентрации, а возможно, и измене-
ние состава трубчатой плазмы.

Из литературы известно, что при взаимодей-
ствии релятивистского электронного пучка
(РЭП) с поверхностью коллектора возникает эро-
зия приповерхностных слоев твердого тела – кол-
лектора РЭП.

Анализ экспериментальных данных сопро-
вождался численным моделированием в электро-
магнитном PIC-коде KARAT. Увеличение кон-
центрации плазмы в области плазменно-пучко-
вого взаимодействия позволяет не только
объяснить рост средней частоты выходного
СВЧ-излучения ПРГ в экспериментах в импульс-
но-периодическом режиме работы ПРГ, но и
предсказать влияние материала коллектора на ха-
рактеристики излучения ПРГ. Наличие в ПРГ по-
стоянно работающих систем откачки и напуска
газа приводят к замедлению роста давления с чис-
лом импульсов, т.е. с течением времени наступает
насыщение. Частота СВЧ-излучения нелинейно
растет с каждым импульсом (рис. 3), ее рост за-
медляется от импульса к импульсу. При сериях из
большого числа импульсов средняя частота вы-
ходного СВЧ-излучения ПРГ стабилизируется, в
этом результаты моделирования хорошо согласо-
уются с экспериментальными данными. Приве-
денные расчеты позволяют получить значения за-
держки инъекции РЭП относительно момента
включения плазменного источника для каждого
импульса периодической последовательности,
чтобы обеспечить стабильность частоты СВЧ-из-
лучения ПРГ при работе в импульсно-периодиче-
ском режиме или любой заданный закон ее изме-
нения от импульса к импульсу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданкевич И.Л., Гришин Д.М., Гунин А.В., Иванов И.Е., Коровин С.Д., Лоза О.Т., Месяц Г.А., Павлов Д.А., Ростов В.В., Стрелков П.С., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. С. 926.
2. Кузелев М.В., Лоза О.Т., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Шваркунец А.Г. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. С. 710.
3. Лоза О.Т., Ульянов Д.К., Баранов Р.В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 3. С. 98.
4. Ульянов Д.К., Баранов Р.В., Лоза О.Т., Ернылева С.Е., Богданкевич И.Л. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 10. С. 113.
5. Андреев С.Е., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 645.
6. Bogdankevich L.I., Andreev S.E., Gusein-zade N.G., Ulyanov D.K. // J. Russian Laser Research. 2019. V. 40 (5). P. 435.
7. Лоза О.Т., Пономарев А.В., Стрелков П.С., Улья-
нов Д.К., Шваркунец А.Г. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. С. 222.
8. Андреев С.Е., Ульянов Д.К. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 26.
9. Стрелков П.С., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. С. 329.
10. Зайцев Н.И., Кулагин И.С., Нечаев В.Е. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. С. 779.
11. Богданкевич И.Л., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. С. 412.
12. Лоза О.Т., Ульянов Д.К., Стрелков П.С., Иванов И.Е., Баранов Р.В. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2011. № 4. С. 47.
13. Gaponenko A.M., Karlik K.V., Kitsanov S.A., Klimov A.I., Konovalov I.N., Korovin S.D., Mesyats G.A., Pegel I.N., Polevin S.D., Proskurovsky D.I., Sukhov M.Yu. // Proc. 13th Int. Conf. BEAMS 2000, Nagaoka, Japan.
14. Блейхер Г.А., Кривобокоев В.П. Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 2014.
15. Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkley Research Associates Inc., 1992.
16. Карташев Н.Н., Красильников М.А., Кузелев М.В., Рухадзе А.А. // Прикладная физика. 2002. № 4. С. 66.
17. Maiorov S.A., Kodanova S.K., Golyatina R.I., Ratazanov T.S. // Phys. Plasmas. 2017. V. 24. 063502. <https://doi.org/10.1063/1.4984784>