

## ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА

© 2019 г. С. Е. Андреев<sup>a, b, \*</sup>, И. Л. Богданкевич<sup>a, b</sup>, Н. Г. Гусейн-заде<sup>a, b</sup>, Д. К. Ульянов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup> Российский национальный исследовательский медицинский университет (РНИМУ) им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

\*e-mail: [funkmonk@rambler.ru](mailto:funkmonk@rambler.ru)

Поступила в редакцию 22.11.2018 г.

После доработки 20.01.2019 г.

Принята к публикации 07.02.2019 г.

Исследована эволюция параметров СВЧ-излучения плазменного релятивистского СВЧ-генератора (ПРГ) на базе ускорителя Sinus 550-80 в течение длительности одного импульса релятивистского электронного пучка (РЭП). Анализ экспериментальных данных сопровождался численным моделированием в условиях приближенных к экспериментальным. Показано, что качественные изменения параметров выходного излучения связано с изменением режима генерации. Первая половина импульса РЭП характеризуется максимальной мощностью выходного излучения и широкополосным спектром, состоящим из множества гармоник. Нелинейное плазменно-пучковое взаимодействие приводит к ограничению роста амплитуды поля, к снижению количества электронов плазмы, возникновению продольной неоднородности плазмы. Возникновение ионного фона в объеме трубы дрейфа и образование неоднородного в радиальном направлении по концентрации плазмы плазменного волновода приводят к изменению условий плазменно-пучкового взаимодействия во второй половине импульса. Вторая половина импульса РЭП характеризуется уменьшением мощности выходного СВЧ-излучения и сужением спектральной полосы. Спектральный анализ демонстрирует сохранение стабильной составляющей с узкой спектральной полосой на всей длительности СВЧ-импульса.

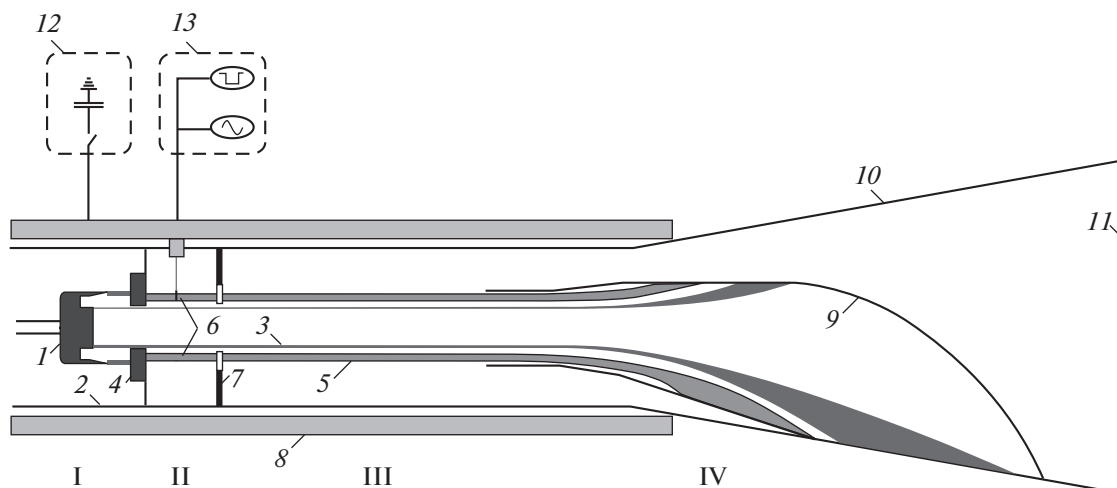
DOI: 10.1134/S0367292119070023

### 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.

Согласно теории и экспериментальным исследованиям [1–3] ПРГ обладает возможностью генерации широкого и узкого спектров излучения и перестройки средней частоты СВЧ-излучения в широком диапазоне. Основной принцип действия этого прибора основан на черенковском механизме возбуждения электромагнитной волны при взаимодействии сильноточного РЭП с собственной медленной волной плазменного волновода в магнитном поле [1–6]. В приборах плазменной релятивистской электроники происходит возбуждение электромагнитных волн с фазовой скоростью близкой к скорости света, что позволяет эффективно излучать эти волны в свободное пространство в широком диапазоне частот. Регулировка средней частоты выходного

сигнала ПРГ происходит за счет изменения плотности плазмы. В частности, в работах [4, 5] удалось добиться перестройки частоты в 7 раз (от 4 до 28 ГГц) на уровне мощности около 50 МВт при длительности импульса излучения 30 нс благодаря изменению плотности плазмы. В реальном генераторе в отличие от сплошного спектра аналитической модели усилителя без обратной связи, возможен только дискретный набор разрешенных частот в спектре выходного излучения, что соответствует условию генерации для данной электродинамической структуры плазменно-пучкового взаимодействия. В работе [6] экспериментально наблюдался дискретный спектр излучения ПРГ. При работе ПРГ происходят изменения характеристик выходного СВЧ-излучения в течение одного импульса (изменение ширины спектра, спектральной плотности амплитуды поля выходного излучения), что является следствием изменения условий плазменно-пучкового взаимодействия. Одной из задач исследования ПРГ является анализ причин изменения характеристик выходного СВЧ-излучения в зависимости от



**Рис. 1.** Схема ПРГ с основными блоками – диод (I), плазменный источник (II), область взаимодействия (III), выходное устройство (IV): 1 – катод РЭП; 2 – вакуумная труба (волновод); 3 – трубчатый РЭП; 4 – анод; 5 – трубчатая плазма; 6 – кольцевой термокатод; 7 – диафрагма; 8 – соленоид; 9 – коллектор; 10 – рупор; 11 – окно; 12 – питание соленоида; 13 – блок управления плазменным источником.

начальных параметров эксперимента, что позволило бы создать как стабильное (широполосное или узкополосное) излучение, так и изменяющееся в течение импульса РЭП.

В ИОФРАНе функционирует экспериментальная установка ПРГ на базе ускорителя Sinus 550-80 [7] (ПРГ Sinus 550-80). Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

ПРГ Sinus 550-80 обладает следующими характеристиками: генерация импульсов СВЧ-излучения длительностью до 80 нс с частотами излучения от 2 до 20 ГГц; генерация как монохроматического излучения (с шириной спектра  $\sim 30$  МГц), так и сверхширокополосного излучения с многочисленными гармониками в спектре. Меняя начальные параметры, в частности плотность плазмы, можно изменять режим работы ПРГ, и таким образом регулировать характеристики излучения: центральные частоты, ширину спектра и т.д. Наряду с этим у Sinus 550-80 в ряде пунктов есть качественное отличие от известных приборов [1–5]: работа в режиме генерации, как одиночного импульса РЭП, так и в частотно-периодическом режиме (до 50 импульсов РЭП в секунду).

На установке ПРГ SINUS 550-80 была проведена серия экспериментов по исследованию выходного излучения плазменного релятивистского СВЧ-генератора, а именно: регистрация электрической компоненты поля в течение импульса в заданной точке перед выходным рупором. В настоящей статье будет рассмотрен случай когда в течение импульса РЭП наблюдаются изменения характеристик выходного СВЧ-излучения и предложено объяснение этого эффекта.

Эксперимент происходил следующим образом. Для генерации СВЧ-излучения в ПРГ необходимо создать трубчатую плазму и трубчатый РЭП в магнитном поле (до 1 Тл), которое создается с помощью соленоида. Трубчатая плазма создается дополнительным электронным пучком, который формируется на вольфрамовом термоэмиссионном катоде. Так как между катодом и заземленной частью генератора существует напряжение  $\sim 600$  В, то электроны, эмитируемые с катода и, удерживаемые магнитным полем, устремляются к коллектору, ионизируя на своем пути нейтральные атомы газа. В качестве газа используется либо остатки воздуха после откачки, либо ксенон. Плотность создаваемой плазмы зависит от концентрации газа, находившегося в корпусе генератора, от длительности и амплитуды импульса тока дополнительного пучка. Как показано в работе [8] абсолютные значения плотности плазмы пропорциональны величине тока дополнительного электронного пучка. Это позволяет по измерению величины тока дополнительного электронного пучка получать сведения о плотности плазмы в относительных единицах. Плотность плазмы определяет частоту излучения. В работе 4 показано, что зависимость частоты излучения от плотности плазмы, измеренной в относительных единицах, совпадает с аналитической зависимостью. Это позволяет перевести относительные единицы в абсолютные.

Когда плотность плазмы достигает требуемого значения в область плазменно-пучкового взаимодействия (рис. 1 III) инжектируется РЭП с энергией электронов 500 кэВ, током 2 кА и длительностью 80 нс. При черенковском взаимодействии между РЭП и медленной волной плазмен-

Таблица 1

№	Радиус металлического волновода (R)	Средний радиус плазмы ( $r_p$ )	Средний радиус РЭП ( $r_b$ )	Длительность импульса РЭП	Ток РЭП	Энергия электронов РЭП	Длина плазменно-пучкового взаимодействия
	1.8 см	1 см	0.6 см	80 нс	2 кА	500 кэВ	22; 29 см

ного волновода, созданной трубчатой плазмой, и выполнения условия генерации возникает СВЧ-излучение. Это излучение через рупор выводится в открытое пространство.

После окончания импульса РЭП выключается питание катода и плазма достаточно быстро распадается за время порядка 100 мкс. В частотно-периодическом режиме процесс повторяется снова – создается плазма, включается РЭП и генерируется СВЧ-излучение.

Физические и геометрические параметры эксперимента, рассмотренные в данной работе, приведены в таблице 1. В настоящей работе рассмотрен только режим одиночных импульсов экспериментальной установки. Значение индукции внешнего магнитного поля 0.1 Тл.

Регистрация СВЧ-излучения плазменного релятивистского генератора (ПРГ) производится широкополосной несимметричной I-образной штыревой вибраторной антенной (длина 20 мм, толщина – 5 мм) [9]. Пространственная структура излучаемого выходным рупором поля слабо зависит от частоты излучения и мало меняется в течение СВЧ-импульса ПРГ [10]. Этот факт позволяет использовать такие антенны для приема выходного излучения ПРГ. Получаемый сигнал после прохождения по передающей коаксиальной линии и ослабления аттенюаторами регистрируется осциллографом Tektronix TDS-7404 (часть ре-

зультатов получена на Tektronix DPO-71604с) и передается на ЭВМ для последующей обработки.

## 2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Для понимания физических процессов, проходящих во время работы ПРГ, физические эксперименты сопровождались численным моделированием с использованием электродинамического кода КАРАТ [12]. Схема ПРГ, используемая в расчетах, приведена на рис. 2.

Внутри расчетной области для электромагнитных полей решаются уравнения Максвелла методом конечных разностей с граничными условиями на поверхностях волновода, соответствующими идеально проводящим стенкам. Разностная схема – явная, с перешагиванием, на сетках.

В связи с цилиндрической симметрией задачи считается, что плотности плазмы и РЭП, причем интенсивность электромагнитных полей не зависят от азимутальной координаты – так называемая 2.5-мерная RZ-версия кода КАРАТ. Геометрия расчетной модели (размеры металлического волновода, включая коллектор РЭП, размеры электронного пучка и плазмы) в целом повторяет эксперимент (см. таблица 1). Трубчатый электронный пучок и плазма моделируется PIC-методом (методом крупных частиц) с фиксированным зарядом. Движение макрочастиц РЭП описыва-

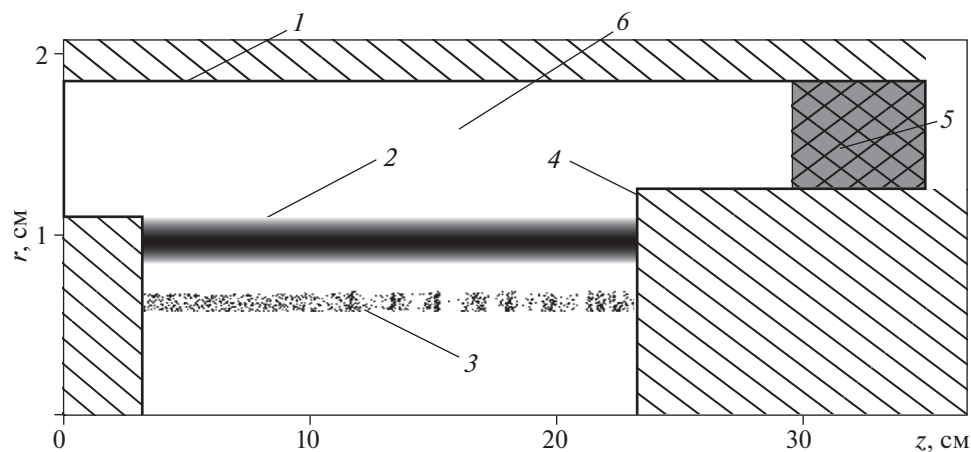
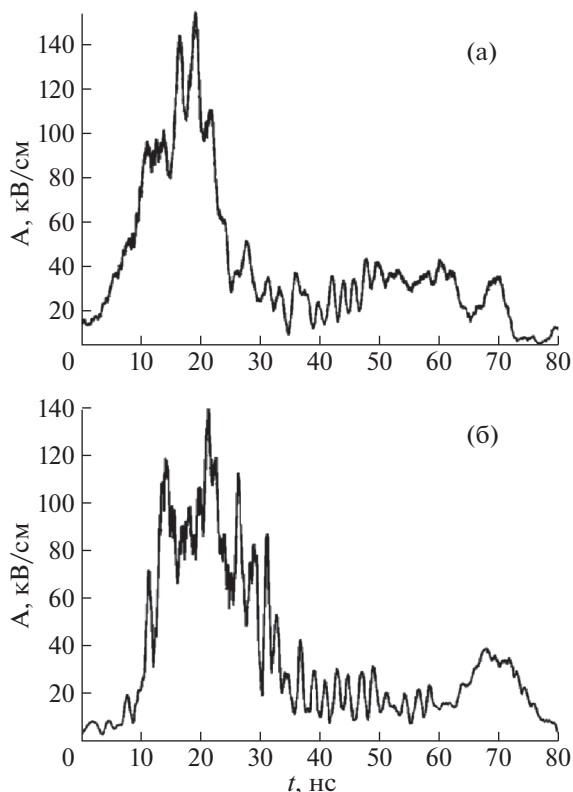
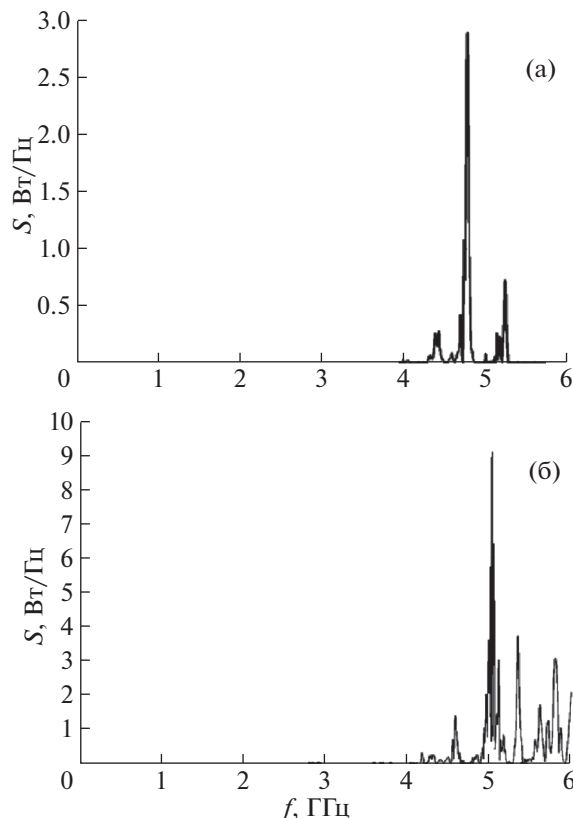


Рис. 2. Схема моделирования плазменного релятивистского СВЧ-генератора. 1 – металлический волновод, 2 – плазма, 3 – РЭП, 4 – коллектор РЭП, 5 – внешний СВЧ-поглотитель, 6 – область плазменно-пучкового взаимодействия.



**Рис. 3.** Огибающая амплитуды поля выходного СВЧ-излучения: а) – экспериментальные данные; б) – результаты моделирования.



**Рис. 4.** Спектральные характеристики выходного СВЧ-излучения: а) – спектральная плотность поля выходного СВЧ-излучения (эксперимент), б) – спектральная плотность поля выходного СВЧ-излучения (моделирование).

ется трехмерным релятивистским уравнением Лоренца.

Полученные в результате моделирования временные ряды электромагнитного поля выходного СВЧ-излучения в заданной точке сечения выходного рупора, совпадающие с результатами экспериментов, позволяют проанализировать физику процессов, происходящих во время импульса РЭП в области плазменно-пучкового взаимодействия, недоступную для экспериментальных измерений.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3а приведена характерная огибающая зависимости электрической напряженности поля СВЧ-импульса от времени в экспериментах на SINUS 550–80. На рис. 3б приведена аналогичная кривая по результатам моделирования. Данные эксперимента соответствуют таблице, т.е. длина плазменно-пучкового взаимодействия была равна 22 см. Как можно видеть из рис. 3а при данных параметрах эксперимента, наблюдаются увеличение поля примерно к 20-й нс, которое сильно спадает к 40-й нс. Результаты численного моде-

лирования на рис. 3б демонстрируют также два режима генерации: большие амплитуды полей примерно к 20-й нс и резкое снижение мощности и изменение характера излучения к 40-й нс как и в эксперименте. Среднее значение мощности в первом режиме составляет 50 МВт, во втором режиме не превышает 5 МВт. На рис. 4 приведены соответствующие спектральные плотности выходного СВЧ-излучения за всю длительность импульса. Спектр на рис. 4а построен по экспериментальным данным, а на рис. 4б – по результатам моделирования. Из рис. 4а и 4б видно, что спектр выходного СВЧ-излучения относительно узкополосный.

Представленный на рис. 3 график сигнала с ПРГ показывает резкое снижение мощности и изменение характера излучения, напоминает известный эффект срыва (укорочения) генерации СВЧ излучения: импульс выходного СВЧ-излучения короче времени прохождения сильноточного потока релятивистских электронов через электродинамическую систему (длительности РЭП) для плазменной релятивистской СВЧ-электроники. Причины возникновения этого эффекта

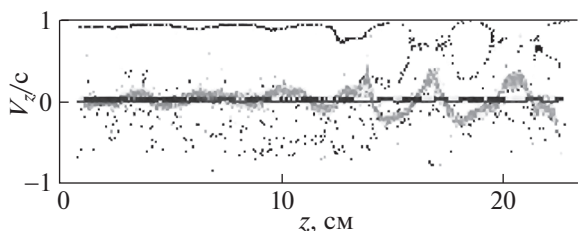


Рис. 5. Фазовый портрет системы частиц на 20-й нс. Черные точки соответствуют электронам РЭП, серые – электронам плазмы.

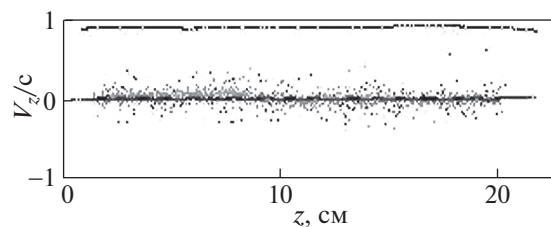


Рис. 6. Фазовый портрет системы частиц на 40-й нс. Черные точки соответствуют электронам РЭП, серые – электронам плазмы.

в релятивистской плазменной СВЧ-электронике исследуются в ряде работ [13–17]. В них определены основные механизмы этого укорочения: протекание обратного потока электронов, эмитированных с коллектора, через плазму; уменьшение концентрации плазмы в течение импульса РЭП; поперечный разлет частиц плазмы; сильная нелинейность характеристик движения РЭП.

В выбранной нами численной модели РЭП и плазма моделируются по методу крупных частиц, что позволяет учесть нелинейные эффекты плазменно-пучкового взаимодействия. Определенным недостатком численной модели является 2,5-мерность расчета (осесимметричная геометрия), что позволяет учитывать только симметричные моды плазменного волновода и упрощенная система вывода СВЧ-излучения. Выполнение граничного условия затухания излучения на бесконечности с приемлемой погрешностью соблюдается применением универсального поглощающего слоя [18]. Как уже указывалось выше, при численном моделировании, значения концентрации плазмы подбираются по сходству частотных характеристик выходного излучения в моделировании и эксперименте.

Для того чтобы проанализировать, как влияют другие механизмы “срыва генерации” помимо эмиссии электронов с коллектора по сравнению с [17] было проведено моделирование, при котором не использовался механизм эмитированных с коллектора электронов. Однако, как можно видеть из результатов моделирования на рис 3б, и в этом случае происходит резкое изменение режима генерации.

Спектр выходного излучения (рис. 4) можно назвать относительно узкополосным (по уровню 30%, например).

Фазовый портрет (рис. 5) системы частиц на 20-й нс демонстрирует, что скорости частиц РЭП сильно промодулированы в этой (нелинейной) стадии плазменно-пучкового взаимодействия, так называемое явление “бунчеровки”. “Захват” электронов РЭП и плазмы полем плазменной волны [19] ведет к ограничению экспоненциального роста колебаний электромагнитной волны,

что реализуется в случае достаточно сильной связи между подсистемами РЭП и плазмы, когда собственная частота пучковых колебаний меньше линейного инкремента неустойчивости. Можно с уверенностью сказать, что для широкополосного режима генерации характерно эффективное плазменно-пучковое взаимодействие. При эффективном взаимодействии большие амплитуды электромагнитной волны выталкивают частицы плазмы на торцы, что приводит к уменьшению общего количества частиц плазмы и неоднородности концентрации по длине плазменного волновода.

Как видно на рис. 3 уже к 40-й нс картина качественно меняется. На графиках огибающих временных реализаций, как экспериментальных, так и модельных приблизительно к этому моменту времени происходит резкое снижение уровня выходного сигнала – второй режим генерации. Явление захвата вызывает ограничение амплитуды электромагнитной волны, что ведет к снижению степени модуляции по скоростям частиц плазмы и РЭП, что в свою очередь снижает амплитуду усиливаемой волны. К 40-й нс промодулированные по скорости частицы покинули трубу дрейфа. Вновь влетающие с левого торца электроны РЭП с одинаковыми скоростями попадают в трубу дрейфа с неоднородной по длине трубчатой плазмой.

Кроме того, имеет место снижение концентрации электронов плазмы и изменение радиальной структуры плазменного волновода – образование ионного фона низкой концентрации. Скорости частиц РЭП слабо промодулированы при сложившейся плазменной среде. В системе сохраняется значительное (до 40% от первоначального) число медленных электронов РЭП (рис. 8).

Из рис. 6 можно видеть, что во втором режиме генерации СВЧ-излучения нет сильного плазменно-пучкового взаимодействия (слабая связь между пучковой и плазменной системой) [20].

Проследить за плазменно-пучковым взаимодействием, и соответственно за изменением режимов генерации можно с помощью распределения плотности частиц по длине системы для

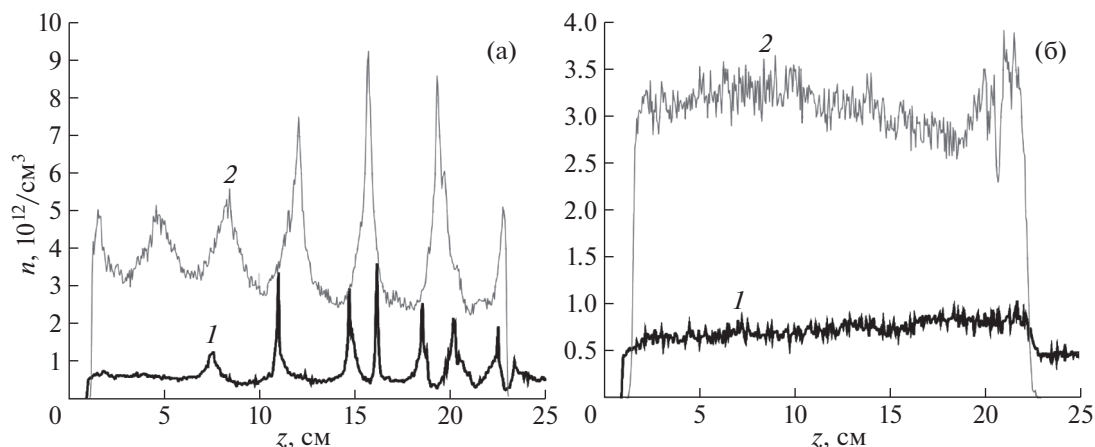


Рис. 7. Концентрация электронов по длине в разные моменты времени: а) – 20 нс, б) – 40 нс. Кривая 1 – плотность электронов РЭП, кривая 2 – плотность электронов плазмы.

электронов РЭП и плазмы в разные моменты времени (рис. 7). Наибольшая эффективность плазменно-пучкового взаимодействия достигается к 20-й нс, что на рис. 7 проявляется в виде максимальной модуляции плотности РЭП (амплитуда меняется в 3 раза). Первоначальная погонная плотность плазмы, как ионов, так и электронов  $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . К 40-й нс видно снижение погонной концентрации электронов плазмы на 25–30% и уменьшение модуляции амплитуды волн плотности. Частицы РЭП к этому моменту имеют слабые колебания плотности в пространстве, что характерно для слабой связи системы волн пучка и плазмы [20], или линейной стадии генерации. Волны зарядовой плотности характерны не только для РЭП, но и для электронов плазмы.

Динамика количества частиц (рис. 8) согласуется с данными, рассмотренными при 20 и 40 нс (рис. 7). Тяжелые ионы ксенона первоначально заданной плазмы (кривая 1), электроны плазмы (кривая 2), электроны РЭП (кривая 3). Все дан-

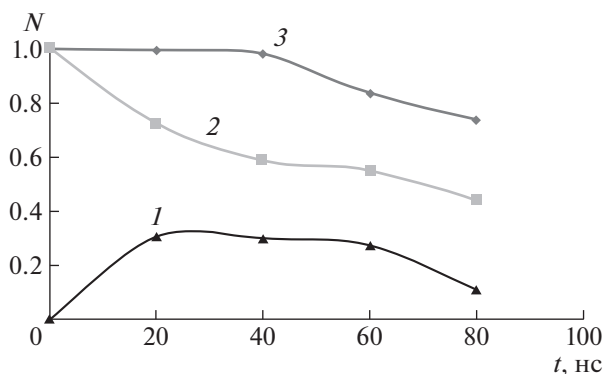


Рис. 8. Динамика количества модельных частиц. Кривая 1 – электроны РЭП, 2 – электроны плазмы, 3 – ионы плазмы.

ные на рис. 8 нормированы на первоначальное количество частиц плазмы для концентрации. Их физическое различие определяется разными уравнениями движения. Как видно из рис. 8, во второй половине импульса РЭП за счет гибели ионов на границе счетной области при движении в радиальном направлении снижается их общее количество, поэтому дисбаланс между ионами и электронами не увеличивается. В данной постановке фронт нарастания и спада тока РЭП 10 нс. Плато значения тока РЭП находится в интервале 10–70 нс.

Из рис. 8 видно, что снижение количества электронов плазмы происходит уже при запуске РЭП. Часть электронов плазмы уходит из системы в точках соприкосновения плазменного столба и металлических стенок из-за переходного периода нарастания тока РЭП. До 10-й нс видно, что количество электронов РЭП и плазмы симметрично изменяется. С 10-й нс по 40-ю нс уменьшение количества электронов происходит в основном за счет плазменно-пучкового взаимодействия. На рис. 9 приведены результаты моделирования крупных частиц вблизи коллектора для двух режимов генерации. К 20-й нс наблюдается сильное падение концентрации вблизи коллектора, образование “дырки” в плазменном столбе (рис. 9а), что соответствует на рис. 3 максимальному значению поля выходного СВЧ-излучения. При этом, количество ионов меняется слабо до 40-й нс. После 40-й нс концентрация электронов плазмы слабо меняется. Одним из существенных факторов укорочения импульса СВЧ, т.е. изменения режима генерации, ведущее к прекращению генерации СВЧ-излучения, в работе [13], считается значительное уменьшение концентрации плазмы вблизи коллектора, что приводит к изменению условий отражения СВЧ-волны и коэффициента обратной связи. Видно,

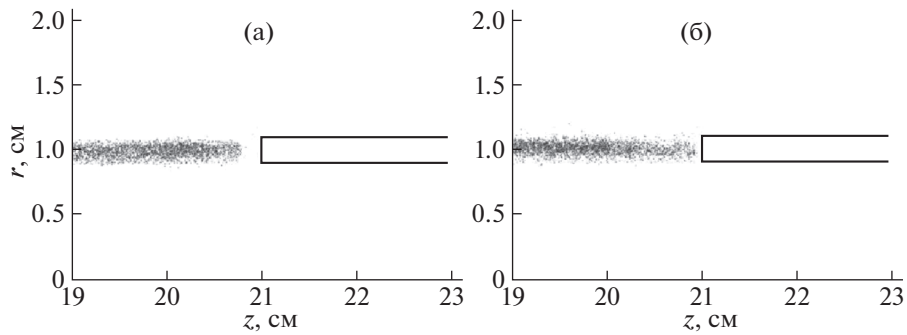


Рис. 9. Структура плазменного столба вблизи коллектора в разные моменты времени: а) – 20 нс; б) – 40 нс.

что к 40-й нс, когда происходит снижение амплитуды выходной волны (см. рис. 3), обедненный плазменный слой у коллектора не увеличивается по длине (рис. 9б), а даже несколько уменьшается. Положение точки отражения волны от коллектора не меняется из-за снижения концентрации плазмы. В связи с этим более значимым, с нашей точки зрения, является общее уменьшение количества частиц плазмы, то есть снижение погонной концентрации плазмы.

На рис. 10 приведены зависимости погонного коэффициента усиления, обусловленного черенковским механизмом, от частоты излучения для разных значений концентрации плазмы. При уменьшении концентрации плазмы наблюдается сужение полосы усиления и уменьшение значения инкремента. Оба этих фактора, учитывая, что в конечной системе, спектр излучения линейчатый [4], могут повлиять на формирование спектра выходного излучения. Кроме того, так как электроны плазмы быстрее покидают счетную область, квазинейтральность плазмы нарушается в рамках первоначально заданного объема, возникает движение тяжелых ионов вдоль и поперек силовых линий магнитного поля. Для данного магнитного поля (1 Тл) тяжелые ионы ксенона имеют ларморовский радиус порядка 1 мм, что позволяет им не только выйти за границы плазмы по радиусу, но и двигаться к границам металлического волновода, за десятки наносекунд. После 40-й нс наиболее быстрые ионы достигают границ системы, и таким образом меняется не только количество частиц плазмы, но и сама плазма теряет свои первоначальные резкие границы. Более медленный процесс амбиполярной диффузии с течением времени увеличивает и растаскивание электронов плазмы поперек магнитного поля, но на сравнительно коротком импульсе 80 нс этот эффект, на фоне рассмотренных выше, проявляется слабо. Полученное в ходе моделирования радиальное распределение частиц плазмы для 20-й и 40-й нс приведено на рис. 11.

Первоначальное распределение частиц плазмы имеет резкие границы. Из рис. 11а видно, что к 20 нс происходит небольшое сглаживание границ основного плазменного волновода. Распределение электронов РЭП также размывается. Концентрация плазмы в плазменном цилиндре снижается к 40-й нс по сравнению с 20-й нс. Снижение концентрации не одинаково для двух типов частиц. Электроны под действием электромагнитной волны большой амплитуды, что характерно для эффективного плазменно-пучкового взаимодействия, подталкиваются к коллектору, частично гибнут и замещаются электронами из других областей, расположенных в разных сечениях по  $z$ . Нарушение квазинейтральности плазмы позволяет двигаться ионам в условиях конечного внешнего поля, как в продольном, так и в поперечном направлении, так как ларморовский радиус ксенона при поле в 1 Тл измерим с толщиной трубчатой плазмы. Скорость ионов в продольном направлении мала. К 40-й нс почти во всем объеме металлического волновода образуется ионный фон с концентрацией примерно в десять раз меньше основного плазменного цилиндра. Эффект деградации ра-

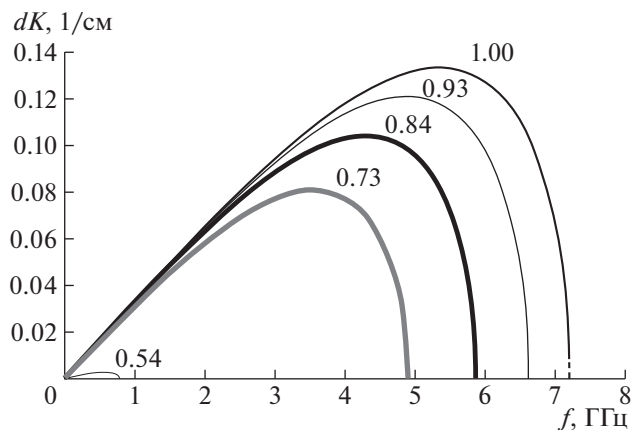
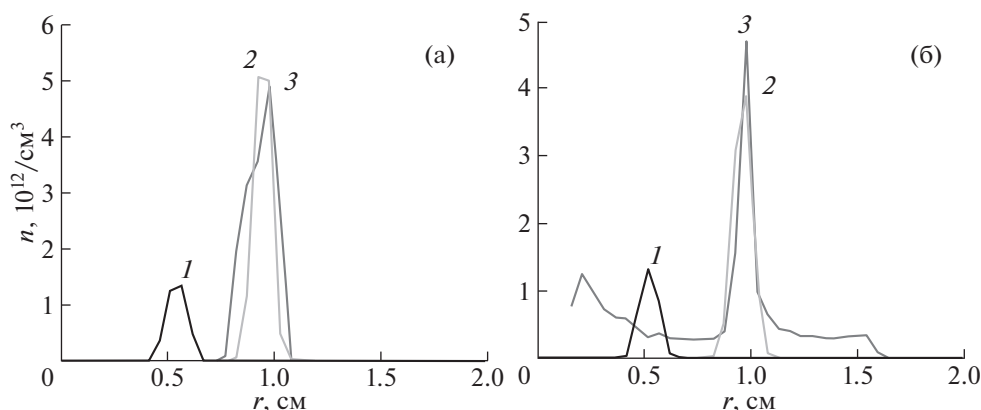


Рис. 10. Зависимость погонного коэффициента усиления от концентрации плазмы.



**Рис. 11.** Распределение плотности частиц РЭП и плазмы по радиусу. а) – 20 нс, б) – 40 нс. 1 – электроны РЭП, 2 – электроны плазмы, 3 – ионы плазмы.

диального профиля плазмы был продемонстрирован еще в работе [14]. В нашем случае длительность импульса РЭП в эксперименте и моделировании больше, чем в [14]. Ксенон как показано в [14] хотя и дает самую медленную скорость нарастания концентрации фона, но как видно на рис. 11б к 40-й нс достигает уже 10% от уровня основной плазмы и наряду с уменьшением количества электронов может играть определенную роль. Влияние наличия плазменного фона на развитие плазменно-пучковой неустойчивости было аналитически рассмотрено в [21], причем геометрия рассмотренной модели по радиальным размерам близка к параметрам нашего эксперимента. В работе [21] был проведен линейный анализ влияния редкой фоновой однородной плазмы на спектры плазменно-пучкового взаимодействия и показано, что в случае черенковского резонанса на основной плазменной частоте, возможно развитие конкурентного плазменно-пучкового взаимодействия с фоновой плазмой. Это дает появление в спектре выходного излучения значительно более низких частот ( $\sim 1$  ГГц). Однако, как можно видеть из рис. 4, как в нашем эксперименте, так и в моделировании, предсказанное в [21] излучение на таких частотах не было обнаружено. Это может быть связано с тем, что в первом режиме генерации наблюдается интенсивное одночастичное (комптоновское) взаимодействие, фона еще нет. За вторую половину импульса РЭП (второй режим генерации) не успевает развиваться плазменно-пучковая неустойчивость на частоте, характерной для концентрации фоновой плазмы.

Для анализа влияния ионного фона низкой концентрации по сравнению с основной трубчатой плазмой было проведено несколько специальных численных экспериментов, в которых сразу (в нулевой момент времени) задается ионный фон во всем объеме трубы дрейфа РЭП и трубчатая плазма. Моделирование, как и прежде

проводилось методом крупных частиц в коде КАРАТ. На рис. 12 представлены результаты моделирования для ионного фона наибольшей концентрации из рассмотренных 15% от концентрации трубчатой плазмы, что примерно соответствует рис. 3.

Из сравнения рисунков 3 и 12 видно, что при наличии ионного фона амплитуда поля меньше, или соизмерима с амплитудой поля во втором режиме генерации. Можно сказать, что при наличии большого ионного фона (15%) плазменно-пучковая неустойчивость развивается очень слабо. При меньшем ионном фоне плазменно-пучковая неустойчивость развивается, но все равно слабее чем в случае без фона.

Факторов, снижающих эффективность генерации может быть несколько. Количество частиц ионного фона и РЭП соизмеримо, что приводит к коллективному механизму взаимодействия плазменной и пучковой подсистем [21]. Наличие двух плазменных замедляющих структур, в виде трубчатой плазмы и плазменного фона, может влиять на синхронизацию черенковского механизма и изменять коэффициент связи. Такой слоистый плазменный волновод (трубчатая плазма на плазменном фоне) мало исследован, как аналитически, так и численно. Следует отметить, что в спектре на рис. 12б, как и на рис. 4б (моделирование без ионного фона) также присутствует характерная частота порядка 5 ГГц и ее спектральная плотность максимальна. Это хорошо видно на спектрах с частотно-временным разрешением, рассмотренных далее.

В целом, можно сказать, что наличие сплошного ионного фона приводит к изменению характера генерации ПРГ и значительному снижению мощности выходного СВЧ-излучения ПРГ.

Выбранная численная модель позволяет нам выделить два основных механизма снижения интенсивности выходного излучения. Это измене-



ние характеристик плазменного образования (количество частиц и геометрия) и сильное нелинейное взаимодействие системы частиц плазма-РЭП.

#### 4. ПОЛУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ С ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Приведенные на рис. 4 графики спектральных плотностей, полученные с помощью преобразования Фурье от всей длины временной реализации, не отвечают на вопрос – сохраняется ли средняя частота выходного излучения на протяжении всего импульса. В [4] в экспериментальных условиях наряду с сужением спектра излучения в течение импульса РЭП, укорочение импульса сопровождалось уширением спектра излучения плазменного генератора. В [14] в моделировании наблюдалось изменение частоты генерации с 10.3 ГГц до 9.2 ГГц, что в основном связывалось с уменьшением погонной концентрации электронов плазмы.

В настоящей работе из результатов моделирования следует, что качественно меняются условия плазменно-пучкового взаимодействия во второй половине импульса. Для анализа изменения спектра выходного СВЧ-излучения по времени были построены спектры с частотно-временным разрешением как для экспериментов, так и численного моделирования. В обоих случаях выходное СВЧ-излучение является суперпозицией нескольких гармоник. Частотный интервал между соседними гармониками спектра СВЧ-излучения определяется скоростью электронов РЭП и длиной взаимодействия РЭП и плазмы, и составляет в данном случае от 100 до 300 МГц. Ожидаемая длительность процессов в плазменном релятивистском генераторе (данный параметр определяет требуемое разрешение по времени) порядка 5 нс. Усреднение экспериментальных временных рядов проводилось по ансамблям из пяти реализаций стохастического процесса изменения напряженности электрического поля в области принимающей антенны при одинаковых начальных условиях функционирования ПРГ. Между рассматриваемыми реализациями в ансамбле наблюдался высокий (~75%) коэффициент взаимной корреляции. Метод вычисления спектров с частотно-временным разрешением построен на использовании набора из фильтров с импульсными характеристиками представляющими собой синусоиду с огибающей в виде функции sinc [22]

$$h(f, t) = \left| \text{sinc}(10^8 t) \right| \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

где  $f$  – центральная частота фильтра (частота сканирования),  $t$  – время.

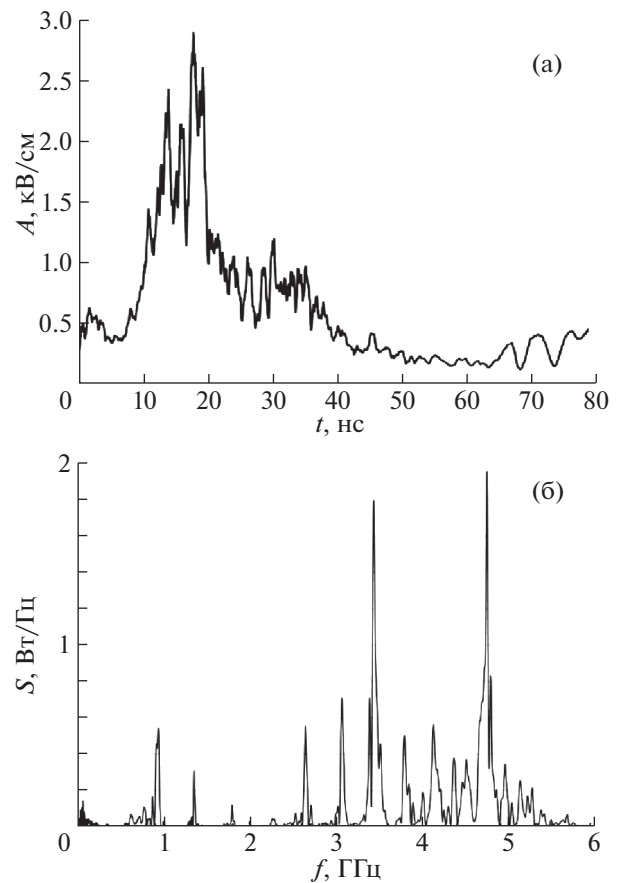


Рис. 12. Характеристики выходного СВЧ-излучения. Моделирование: а) – огибающая амплитуды поля выходного СВЧ-излучения (при наличии ионного фона); б) – спектральная плотность для рис. 12а.

Далее данная импульсная характеристика (1) (с разными частотами заполнения) сворачивается с сигналом.

$$W(f, t) = x(t) * h(f, t), \quad (2)$$

где  $x(t)$  – СВЧ-импульс.

Используемый фильтр хорошо локализован в частотной области, поэтому подобное преобразование позволяет получить хорошее разрешение по частоте. Постоянное значение полосы пропускания во всем диапазоне частот, также как и в оконном преобразовании Фурье, сохраняет разрешающую способность по частоте во всем диапазоне частот. При вейвлет-преобразовании разрешающая способность зависит от масштаба. Кроме того этот метод позволяет выделить наиболее стабильные частоты, время изменения амплитуды которых, превышает разрешающую способность по времени. Более подробно методы получения таких спектров описаны в [22]. Результаты обработки по приведенному выше алгоритму приведены на рис. 13 и 14.

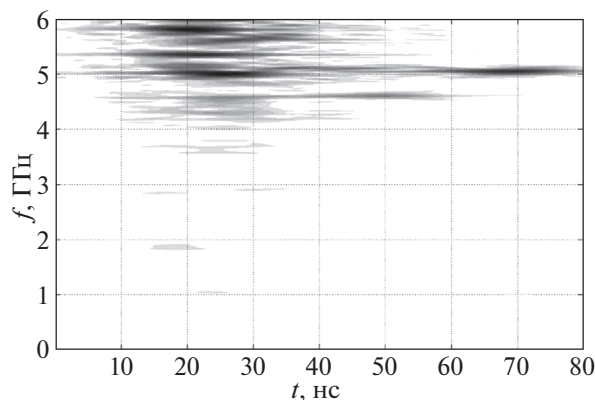


Рис. 13. Спектр с частотно-временным разрешением смоделированного выходного СВЧ-излучения.

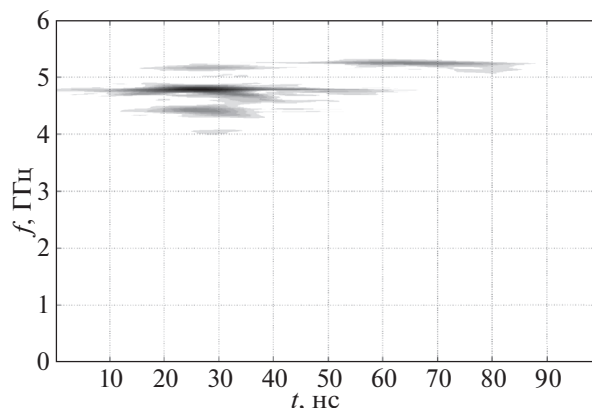


Рис. 14. Спектр с частотно-временным разрешением экспериментального выходного СВЧ-излучения.

Из анализа спектра с частотно-временным разрешением и огибающей поля числовой модели (рис. 4 и 13) видно, что всплеск амплитуды поля выходного излучения в интервале времени 10–40 нс связан с относительно широкой частотной полосой 3.5–6 ГГц. При сравнительно коротких длинах плазменно-пучкового взаимодействия этот режим может возникать при достаточно сильной связи между плазменной и пучковой волной [20]. Частота 5 ГГц, которая доминирует в спектре Фурье (рис. 4б), ярко проявляется в интервале 15–35 нс, затем слабеет и опять набирает интенсивность к концу импульса РЭП. Более высокочастотные компоненты отмирают после 40 нс, что совпадает с уменьшением амплитуды поля на рис. 3. После 40-й нс слабо проявляются и частоты ниже 5 ГГц, то есть наблюдается сужение спектра во второй половине импульса. Эффект сужения спектральной полосы в течение СВЧ-импульса, наблюдаемый в работе [6], сопровождался увеличением амплитуды СВЧ-волны, а срыв генерации сопровождался напротив уширением спектра и уменьшением мощности СВЧ-излучения. Но надо отметить, что параметры плазменно-пучковой системы эксперимента [6] сильно отличались от рассматриваемой нами системы: концентрация плазмы (и соответственно частот СВЧ-генерации) была ниже, чем в наших экспериментах, длиннее импульс РЭП, больше длина взаимодействия. Сужение спектра в [6] в основном объяснялось изменением энергии электронов РЭП на влете в трубу дрейфа. Численное моделирование в [6] проводилось для модели “линейной плазмы” как среды с постоянными свойствами (модель Друде) и не отражало процессов изменения плазменной среды вследствие нелинейного плазменно-пучкового взаимодействия. В данной статье моделирование частиц пучка и плазмы выполнено с помощью метода крупных частиц в самосогласованных электромагнитных полях. И в рамках этой численной мо-

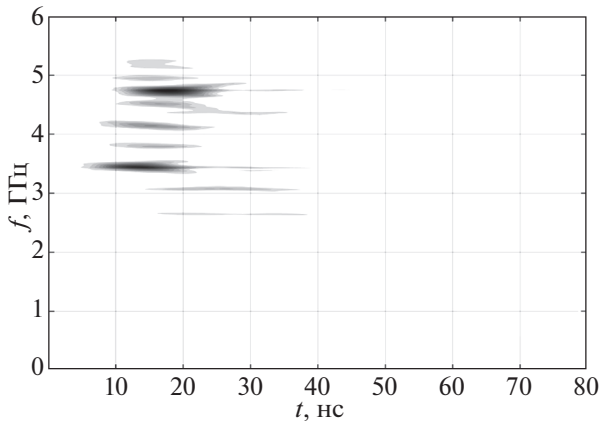
дели сужение спектральной полосы после 40-й нс и уменьшение амплитуды поля можно объяснить несколькими причинами. В результате механизма нелинейного захвата наступает насыщение — прекращается экспоненциальный рост амплитуды поля по длине. Возникающие у коллектора большие СВЧ-поля обедняют приколлекторный слой плазмы (рис. 9). При уменьшении концентрации плазмы наблюдается сужение полосы усиления и уменьшение значения инкремента, спектр излучения может сдвигаться в низкочастотную область (рис. 10). Такие факторы как неоднородность концентрации плазмы по длине (рис. 9) и появление ионного фона также могут приводить к сужению спектра.

Спектр с частотно-временным разрешением экспериментальной реализации, полученной при давлении 0.35 мТорр, представлен на рис. 14.

Качественно он имеет те же тенденции, что и спектр по результатам численного эксперимента. Но следует отметить, что экспериментальный спектр беднее, чем модельный. Это связано с ограничением регистрируемого диапазона частот, накладываемого полосой пропускания используемого в эксперименте осциллографа.

Как видно из рис. 13 и 14, излучение на частоте около 4.8 ГГц имеет наибольшую интенсивность и длительность в спектре с частотно-временным разрешением. Этот факт и проявляется в относительно узкой спектральной составляющей на рис. 4.

В первой половине импульса наиболее ярко выделяются две гармоники — 4.8 ГГц характерная для рассматриваемого процесса, и частота 3.5 ГГц. Для нашего моделирования наиболее важен тот факт, что гармоника около 4.8 ГГц развивается в условиях ионного фона, именно эта частота остается во второй половине импульса на рис. 13 (моделирование) и 14 (эксперимент), где как мы считаем в результате первоначального интенсивного



**Рис. 15.** Спектр с частотно-временным разрешением при наличии первоначального сплошного ионного фона.

взаимодействия плазменной и пучковой подсистем происходит перестройка режима генерации ПРГ

На рис. 15 приведен спектр с частотно-временным разрешением для моделирования с ионным фоном (временный ряд соответствует рис. 12). Так как максимальная спектральная плотность сигнала на рис. 15 в случае ионного фона на несколько порядков ниже, чем на рис. 14., то в спектре присутствуют большое количество шумовых частот во всем диапазоне.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены экспериментальные данные, полученные на установке плазменный релятивистский генератор на базе ускорителя Sinus 550-80. Эксперименты проводились в режиме одного импульса. В экспериментах обнаружено изменение режима генерации плазменного релятивистского СВЧ-генератора. Анализ экспериментальных данных сопровождался численным моделированием в условиях, приближенных к экспериментальным. Характеристики выходного излучения качественно меняются в течение импульса РЭП. По значительным изменениям характера излучения – изменение мощности, сужение частотной полосы генерации, ее можно условно разделить на два режима. Первый режим характеризуется максимальной мощностью выходного излучения и широкополосным спектром, состоящим из множества гармоник. Интенсивное нелинейное взаимодействие плазменно-пучковой системы приводит к изменению структуры плазменного волновода и условий черенковского резонанса. Нелинейное взаимодействие приводит к ограничению роста амплитуды поля, к снижению количества электронов плазмы, возникновению продольной неоднородно-

сти плазмы. Нарушение квазинейтральности плазмы приводит к возникновению ионного фона в объеме трубы дрейфа и образованию плазменного волновода с неоднородной по радиусу концентрацией плазмы. Все это приводит к изменению условий плазменно-пучкового взаимодействия во второй половине импульса. Ко второй половине импульса РЭП происходят сильные изменения параметров выходного излучения: уменьшение мощности выходного СВЧ-излучения, сужение спектральной полосы. При этом при спектральном анализе на всей длительности СВЧ-импульса наблюдается стабильная составляющая с узкой спектральной полосой.

Сдвиг центральной частоты всего спектра СВЧ-излучения в более низкочастотную область можно объяснить уменьшением погонной концентрации плазмы. Специально проведенное численное моделирование ПРГ при наличии плазменного фона также показало значительное снижение мощности выходного СВЧ-излучения в этих условиях.

Основным эффектом, определяющим эволюцию спектра в течение импульса можно считать интенсивное нелинейное взаимодействие плазменно-пучковой системы, и как следствие изменение структуры плазменного волновода, т.е. образование слоистого плазменного волновода, и условий черенковского резонанса.

Работа была выполнена при поддержке программы РАН № 10 “Мощные ультракороткие электромагнитные импульсы, а также их взаимодействие с объектами и средами”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Strelkov P.S., Ulyanov D.K.* // IV Int. Workshop. 29 august, 1999. N. Novgorod. P. 858.
2. *Кузелев М.В., Лоза О.Т., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г.* // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 8. С. 716.
3. *Bogdankevich I.L., Ivanov I.E., Loza O.T., Strelkov P.S., Ulyanov D.K., Garate E.* // Proc. 28th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG'2007), Prague, Czech Republic, July 15–20. 2007. P. 1194.
4. *Стрелков. П.С., Ульянов Д.К.* // Физика плазмы. 2000. № 4. С. 329.
5. *Ульянов Д.К.* // Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИОФ РАН, 2000
6. *Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Лоза О.Т., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Ульянов Д.К.* // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 748.
7. *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. № 10. С. 926.
8. *Лоза О.Т., Пономарев А.В., Стрелков П.С., Ульянов Д.К., Шкварунец А.Г.* // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 3. С. 222.

9. *Ульянов Д.К., Андреев С.Е.* // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 26.
10. *Алексеев И.С., Иванов И.Е., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Ульянов Д.К.* // Физика плазмы. Т. 43. № 3. С. 277.
11. *Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С.* Плазменная релятивистская СВЧ-электроника: Уч. пособ. для вузов / Под ред. А.А. Рухадзе. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
12. *Tarakanov V.P.* "User's Manual for Code KARAT" – Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc., 1992.
13. *Лоза О.Т.* // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 7. С. 887.
14. *Богданкевич И.Л., Лоза О.Т., Павлов Д.А.* // Кр. сообщ. по физике ФИАН. 2010. Вып. 2. С. 16.
15. *Ернылева С.Е., Богданкевич И.Л., Лоза О.Т.* // Кр. сообщ. по физике ФИАН. 2013. Вып. 7. С. 10.
16. *Ернылева С.Е., Лоза О.Т.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2014. Вып. 2. С. 20.
17. *Ернылева С.Е., Лоза О.Т.* // Тр. ИОФРАН. 2016. Т. 72. С. 118–127.
18. *Berenger J.-P.* // J. Comput. Phys. 1994. V. 114. № 2. P. 185.
19. *Кузелев М.В., Рухадзе А.А.* // Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 2000.
20. *Богданкевич И.Л., Гончаров П.Ю., Гусейн-заде Н.Г., Игнатов А.М.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 6. С. 548.
21. *Кузелев М.В., Рухадзе А.А.* // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 5. С. 471.
22. *Андреев С.Е.* // Системы и средства информатики. 2016. Т. 26. № 1. С. 30.