

ПЛАЗМЕННЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ИСТОЧНИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2019 г. П. С. Стрелков^{a, *}, В. П. Тараканов^{b, c}, Д. Е. Диас Михайлова^a,
И. Е. Иванов^a, Д. В. Шумейко^a

^a Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

^b Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^c Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*e-mail: strelkov@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 29.07.2018 г.

После доработки 08.10.2018 г.

Принята к публикации 25.10.2018 г.

Описан плазменный релятивистский источник сверхширокополосного (СШП) электромагнитного излучения, основанный на усилении собственных шумов релятивистского электронного пучка (РЭП) при инъекции его в плазму. Известны мощные источники сверхширокополосного излучения, принцип действия которых основан на преобразовании мощного высоковольтного электрического видеоимпульса в электромагнитное излучение. Принципиальные физические отличия плазменного сверхширокополосного СВЧ-источника от излучателей видеоимпульса состоят в возможности получения большей энергии в одном импульсе (более 5 Дж). Плазменный СШП источник позволяет управлять средней частотой СВЧ-сигнала от одного импульса к другому, (например, от 2 до 3.5 ГГц). Важно, что при перестройке частоты энергия СВЧ-импульса сохраняется.

DOI: 10.1134/S0367292135030093

1. ВВЕДЕНИЕ

Источник СВЧ-излучения называется сверхширокополосным, если $2(f_2 - f_1)/(f_1 + f_2) > 0.2$, здесь f_1 и f_2 – нижняя и верхняя частоты в спектре СВЧ-импульса, отсчитываемые по уровню 10 дБ. Кроме того, абсолютное значение полосы частот должно быть >0.5 ГГц. Известны мощные источники сверхширокополосного излучения, принцип действия которых основан на преобразовании мощного высоковольтного электрического видеоимпульса в электромагнитное излучение [1]. Созданы СШП-устройства, в которых центральная частота излучения определяется длительностью видеоимпульса и не перестраивается. Энергия СВЧ-импульсов в таких устройствах не превышает 1 Дж при длительности биполярного импульса напряжения на входе одной антенны 2–3 нс и далее уменьшается с уменьшением длительности импульса. В этих устройствах при длительности биполярного импульса 3 нс центральная частота СШП импульса равна 0.3 ГГц, а при 0.25 нс центральная частота равна 4 ГГц. Нам известна только одна работа [2], в которой описан СШП источник, с перестройкой частоты. В этом источнике монополярный высоковольтный импульс напряжения проходит через

нелинейную передающую линию и затем подается на антенну. Использование нелинейной передающей линии приводит к амплитудной модуляции импульса напряжения. Центральная частота спектра излучения изменяется в пределах 0.5–1.3 ГГц за счет изменения амплитуды высоковольтного импульса напряжения в два раза. При этом энергия СШП-импульса на высоких частотах уменьшается в 4 раза.

В плазменном релятивистском источнике сверхширокополосного СВЧ-излучения происходит усиление собственных шумов релятивистского электронного пучка при инъекции его в плазму. Усиление плазменных волн основано на эффекте Черенкова. Теоретические основы явлений в плазменных релятивистских СВЧ-источниках изложены в книге [3] и в статьях [4, 5]. Плазменный СВЧ-источник формирует радиоимпульс. Средняя частота спектра этого импульса определяется плотностью плазмы и не зависит от его длительности. Это позволяет перестраивать среднюю частоту СВЧ-излучения, изменяя плотность плазмы, не уменьшая энергию СВЧ-импульса. Увеличение длительности импульса тока РЭП приводит к увеличению энергии СВЧ-импульса.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И ДИАГНОСТИКИ

Схема сверхширокополосного плазменного релятивистского СВЧ-источника представлена на рис. 1.

Электронный пучок с энергией электронов 500 кэВ и током 2 кА формируется в магнитоизолированном диоде. Отрицательный импульс высокого напряжения подается на катод ускорителя 1. Электронный пучок 2 инжектируется вдоль оси z круглого металлического волновода 3 предварительно заполненного трубчатой плазмой 4. Плазма 4 и металлический волновод 3 образуют плазменный волновод. Пучок и плазма находятся в однородном продольном магнитном поле (0.45 Тл). Трубчатый РЭП распространяется в продольном магнитном поле и попадает на коллектор 5. Ток РЭП и ток плазмы проходят по коллектору и замыкаются на металлический волновод 3. СВЧ-волна возбуждается в плазменном волноводе, затем распространяется по вакуумному коаксиальному волноводу 6 и затем попадает в излучающее устройство, которое состоит из коллектора 5 и рупора 7. Для подавления режима генерации в волновод 3 помещен керамический СВЧ-поглотитель 8. Излучение регистрируется в окружающем пространстве на выходе из рупора. Полная энергия СВЧ-импульса измеряется калориметром 9, а поперечная компонента электрического поля, лежащая в плоскости рисунка, измеряется приемной антенной 10. Как показано, в наших предыдущих работах излучающее устройство, представленное на рис. 1, создает на оси СВЧ-пучка линейно поляризованное излучение [6, 7].

Приведем геометрические параметры схемы эксперимента. Радиус волновода 3 равен 5 см, средний радиус трубчатой плазмы равен 2 см, средний радиус трубчатого РЭП равен 1.3 см, длина плазмы – 70 см, размер области усиления плазменных волн – 40 см, диаметр рупора – 16 см.

Сигнал с приемной штыревой антенны, расположенной на оси калориметра на расстоянии 25 мм от его поверхности, через аттенюатор 63 дБ поступал на вход скоростного осциллографа с полосой частот до 4 ГГц. Полная энергия СВЧ-импульса измерялась калориметром [8] с диаметром 50 см, расположенным на расстоянии z от апертуры рупора. Для получения достоверного спектра широкополосного СВЧ-сигнала была подобрана длина приемной антенны. Подбор антенны осуществлялся на основании результатов модельных измерений, в ходе которых на антенны разной длины подавались СВЧ-сигналы с разными частотами. Оказалось, что приемная антенна длиной 35 мм является наиболее широкополосной в диапазоне частот 2–4 ГГц, диаметр антенны был равен 3 мм. Этот результат был подтвержден чис-

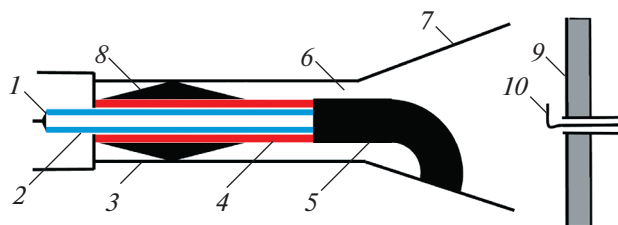


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – катод ускорителя, 2 – РЭП, 3 – металлический волновод, 4 – плазма, 5 – коллектор, 6 – коаксиальный волновод, 7 – рупор, 8 – СВЧ-поглотитель, 9 – калориметр, 10 – приемная антенна.

ленным моделированием, проведенным посредством кода “КАРАТ” [9, 10]. Согласно расчету, электрическое поле плоской волны с поляризацией вдоль антенны с напряженностью 1 кВ/см и частотами 2, 3 и 4 ГГц создает в кабеле приемной антенны (см. рис. 1) напряжение 0.98, 0.75 и 0.72 кВ соответственно. Значения напряжения, регистрируемые осциллографом, с учетом ослабления сигнала аттенюатором 63 дБ, а также с учетом затухания в кабеле длиной 20 м, в этом случае составляют соответственно 0.49, 0.335 и 0.32 В.

Плазма создавалась вспомогательным электронным пучком, энергия электронов в котором составляла 600 эВ [11]. Плазменный источник включался за 100 мкс до импульса тока РЭП. Вспомогательный электронный пучок за время импульса создавал плазму в ксеноне при давлении 10^{-4} Торр. Согласно [11], плотность плазмы, созданной таким образом, оказывается пропорциональна величине тока вспомогательного пучка. Так что значения тока вспомогательного пучка могут быть использованы для относительных измерений плотности плазмы n . Согласно аналитическим расчетам, усиление плазменных волн РЭП в диапазоне частот 2–4 ГГц имеет место при плотности плазмы $(1-1.6) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Следует отметить, что РЭП за время импульса тока 0.5 мкс создает ионы ксенона с плотностью 10^{11} см^{-3} , что меньше плотности плазмы, заготовленной вспомогательным электронным пучком, и даже меньше плотности электронов РЭП.

3. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе [12] при проведении исследований по усилению монохроматического СВЧ-излучения использовалась схема, близкая к представленной на рис. 1. Основное отличие схемы, примененной в [12] от схемы, показанной на рис. 1, заключалось в наличии узла ввода излучения от магнетронов, через который на вход плазменного усилителя подавался внешний монохроматический СВЧ-сигнал. Спектры СВЧ-импульсов, полученных

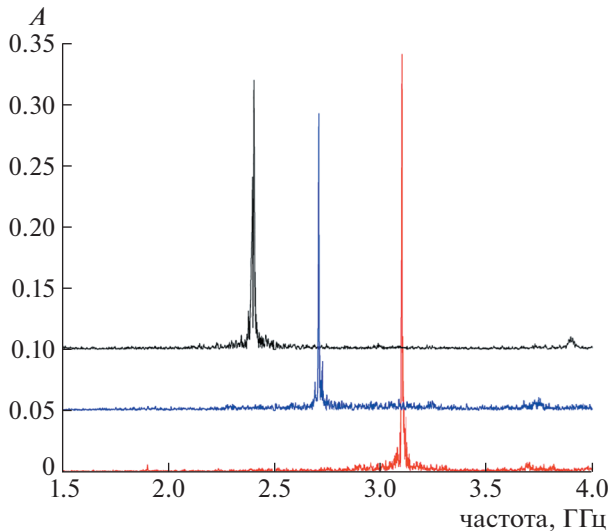


Рис. 2. Спектры сигналов, полученных на плазменном релятивистском СВЧ-усилителе монохроматических сигналов. Спектры излучения на частотах 2.7 и 2.4 ГГц смещены вверх на 0.05 и на 0.1 отн. ед. соответственно.

при подаче на вход устройства сигналов с тремя различными частотами, представлены на рис. 2. Частота выходных сигналов равна частоте входных сигналов. Мощность выходных сигналов 100–150 МВт, длительность СВЧ-импульсов не менее 300 нс.

В настоящем эксперименте электромагнитное поле в плазме, создаваемое внешним источником, отсутствует. Начальный уровень электромагнитного поля в плазме создается самим РЭП. Наличие такого поля доказывает факт регистрации СВЧ-излучения при распространении РЭП в волноводе в отсутствие плазмы [13]. На рис. 3 приведен интегральный спектр СВЧ-излучения РЭП в вакууме (давление остаточного газа 2×10^{-5} Торр). При регистрации излучения в вакууме, сигнал с антенны перед входом осциллографа ослаблялся на 23 дБ. В левом верхнем углу рис. 3 также приведены осциллограммы $U(t)$ СВЧ-излучения и импульса напряжения на катоде ускорителя.

Почти сплошной спектр наблюдается на частотах выше 1.4 ГГц. Следует обратить внимание на то, что электромагнитные волны с частотой меньше 1.8 ГГц не могут распространяться в пустом волноводе с радиусом 4.9 см. В то время как распространение в таком волноводе волн, связанных с колебаниями пространственного заряда пучка, возможно и на более низких частотах. Наблюдаемый спектр излучения определяется спектром колебаний тока пучка и частотными характеристиками коллекторной части усилителя. Колебания тока РЭП связаны с его нестабильностью, которая возникает при эмиссии электронов из взрывоэмиссионного катода [14, 15].

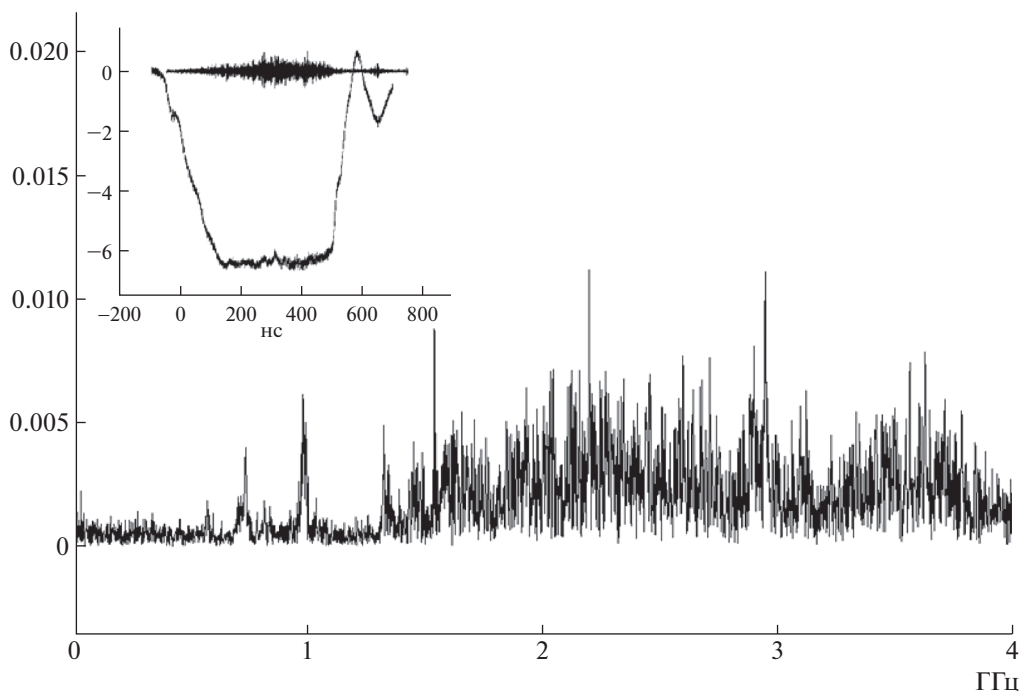


Рис. 3. Спектр излучения при $n = 0$ – внизу, осциллограммы импульса напряжения на катоде ускорителя и сигнала с приемной антенны – слева сверху.

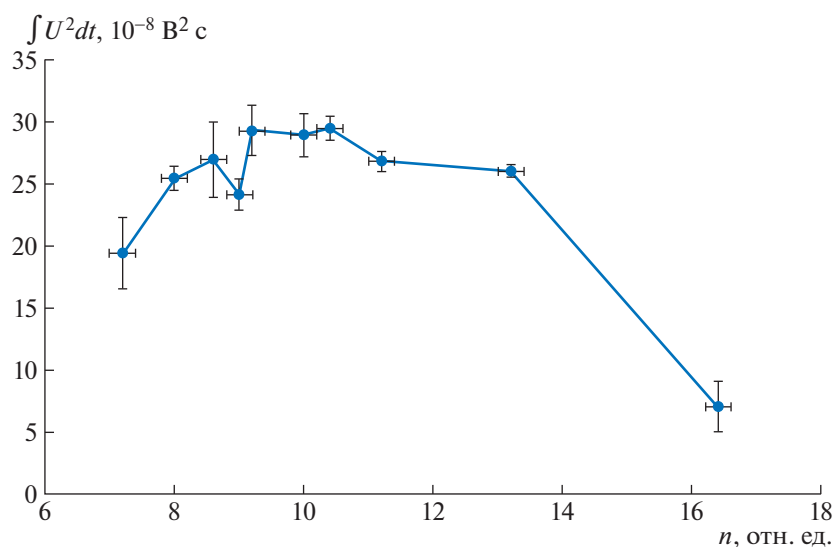


Рис. 4. Зависимость величины $\int U^2 dt$ от плотности плазмы.

При инъекции РЭП в плазму интенсивность СВЧ-излучения возрастает примерно на 40 дБ по сравнению с интенсивностью излучения в вакууме, поэтому при приеме СВЧ-сигналов, полученных в плазме, на вход осциллографа устанавливался аттенуатор 63 дБ.

Мощное излучение из плазмы наблюдалось в определенном диапазоне значений плотности плазмы. Зависимость величины $\int U^2 dt$, пропорциональной плотности энергии СВЧ-излучения на оси калориметра, от плотности плазмы показана на рис. 4. Каждая точка на рис. 4 соответствует среднему значению величины $\int U^2 dt$ за десять СВЧ-импульсов. Видно, что в диапазоне значений плотности плазмы от 9 до 14 отн. ед. значение $\int U^2 dt$ почти постоянно.

СВЧ-импульсы и их спектры, полученные при различных значениях плотности плазмы n , измеренной в относительных единицах, приведены на рис. 5. Из представленных на рис. 5 спектров можно заключить, что регистрируемое СВЧ-излучение является сверхширокополосным. Так спектры, представленные на рис. 5а и 5б удовлетворяют определению СШП сигнала $2(f_2 - f_1)/(f_1 + f_2) = 0.5 - 0.6 > 0.2$ при абсолютном значении полосы частот 1.1–1.3 ГГц. На рис. 5в ограничение на высоких частотах связано с наличием у осциллографа верхней границы полосы частот. Спектры рис. 5 возникают в результате усиления шумов РЭП, и не связаны с переходом устройства в режим генерации. Для доказательства этого утверждения из плазменного волново-

да (рис. 1) был удален СВЧ-поглотитель, т.е. был увеличен коэффициент обратной связи. Это привело к резкому сокращению ширины спектра, стал наблюдаться режим генерации на частотах оптимальных для данной длины плазменного волновода, рис. 6.

Как следует из рис. 5, средняя частота излучения плазменного СВЧ-усилителя шумов РЭП растет с увеличением плотности плазмы. Средней частотой СВЧ-импульса будем называть частоту f_0 , при которой энергия излучения на частотах менее f_0 равна энергии на частотах более f_0 . Экспериментальная зависимость средней частоты излучения усилителя от плотности плазмы показана на рис. 7.

Сравним представленные на рис. 7 экспериментальные результаты с результатами расчетов, полученных на основе линейной теории [3]. Расчетная зависимость линейного коэффициента усиления электрического поля E от частоты монохроматического входного сигнала для трех значений плотности плазмы на длине взаимодействия электронного пучка с плазмой 50 см показана на рис. 8.

Линейная теория предсказывает, что максимальные значения коэффициента усиления в диапазоне изменения плотности плазмы $(1 - 1.6) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ на длине 50 см в геометрии, представленной на рис. 1, при энергии электронов 500 кэВ и токе пучка 2 кА, изменяются в диапазоне от 35 дБ до 42 дБ. Эти значения близки к экспериментальной оценке коэффициента усиления шумов РЭП — 40 дБ. Согласно расчету, при увеличении плотности плазмы в 1.6 раза напряженность электрического поля должна возрастать в 2.5 ра-

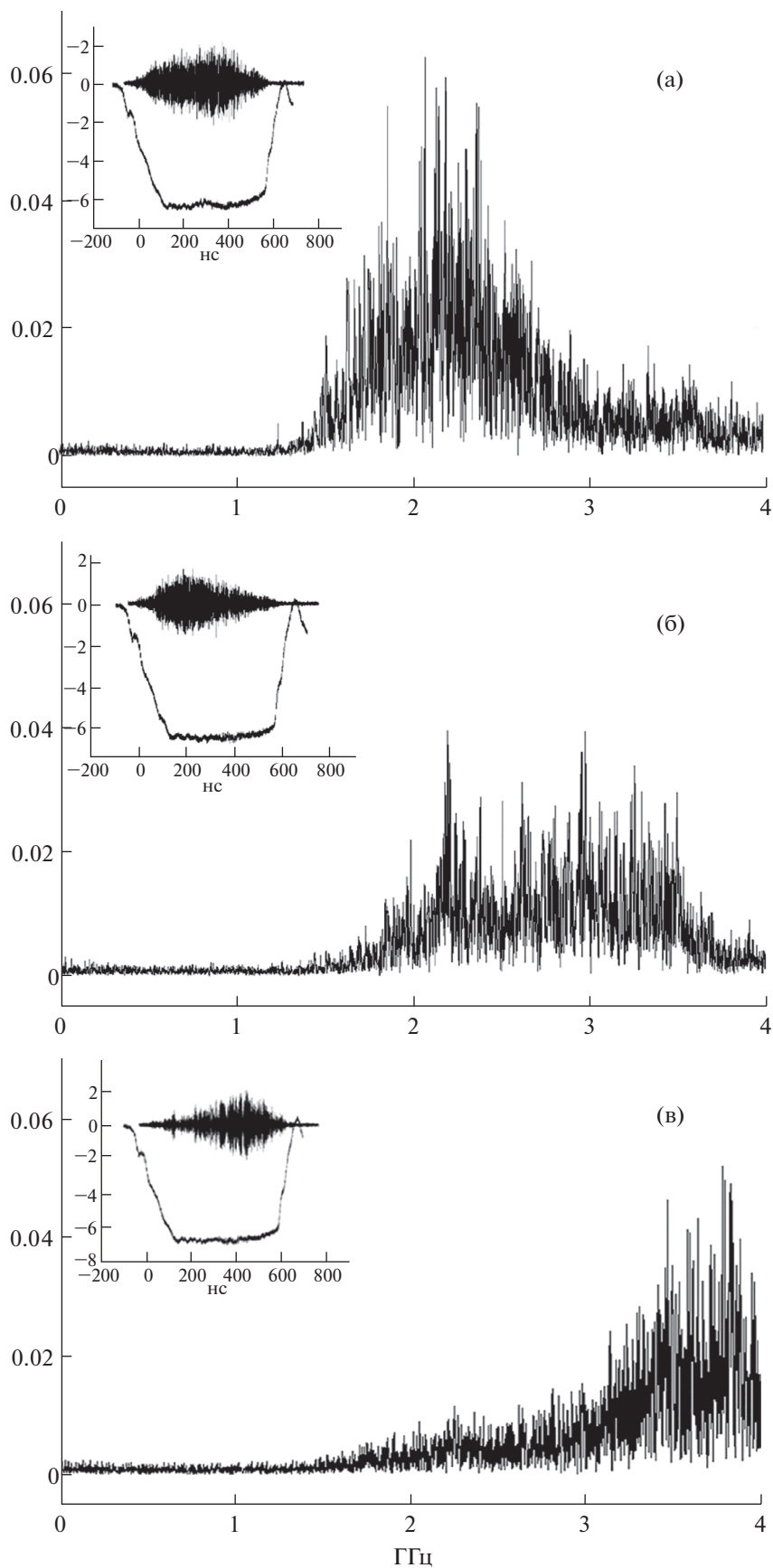


Рис. 5. Спектры сигналов плазменного СВЧ-усилителя шумов РЭП при различных значениях плотности плазмы: а) $n = 8$, б) $n = 11.4$, в) $n = 16$ отн. ед.

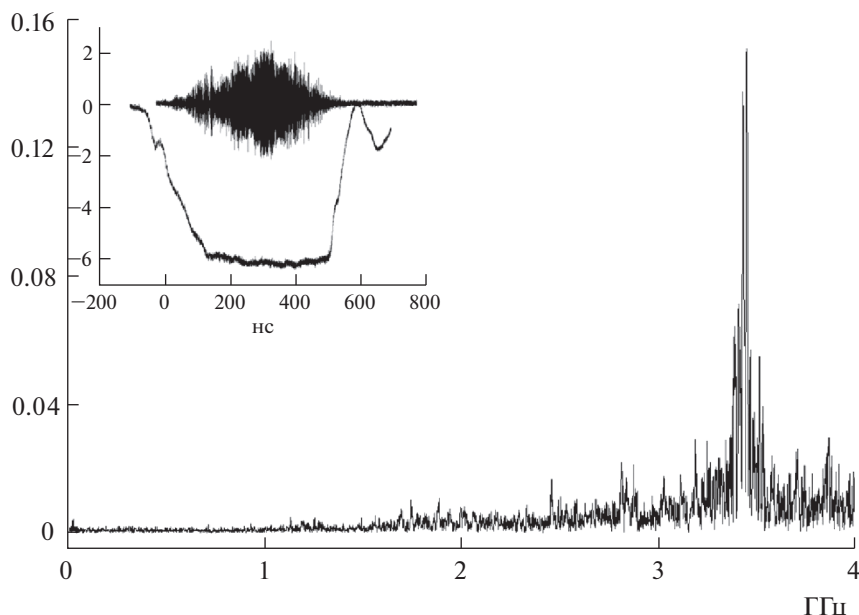


Рис. 6. Спектр излучения плазменного СВЧ-генератора. Спектр получен на установке рис. 1 без СВЧ-поглотителей.

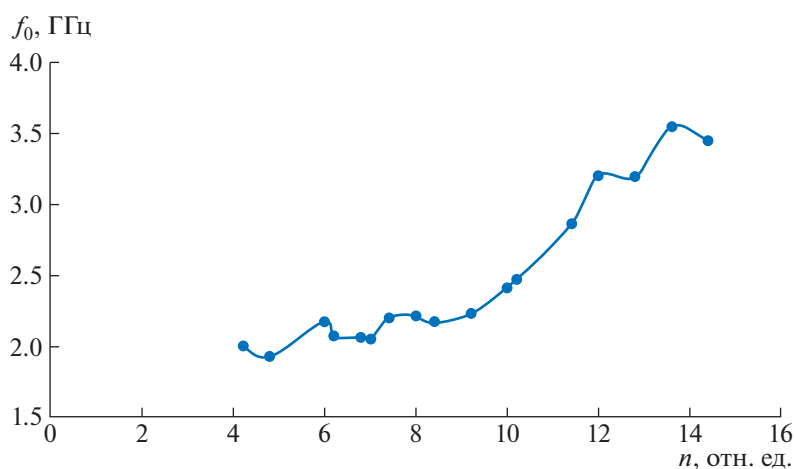


Рис. 7. Зависимость средней частоты излучения усилителя шумов РЭП от плотности плазмы.

за, тогда как в эксперименте при изменении плотности плазмы в 2 раза (от 8 до 14 отн. ед.) амплитуда СВЧ-сигнала не изменяется. Это означает, что в эксперименте реализуется нелинейный режим усиления и применение линейной теории некорректно. Тем не менее, закон изменения средней частоты от плотности плазмы в эксперименте примерно совпадает с расчетной зависимостью частоты, которой соответствует максимальное значение коэффициента усиления, от плотности плазмы. А именно, в обоих случаях для перестройки частоты от 2.4 до 3.5 ГГц необходимо увеличить плотность плазмы примерно в 1.5 раза, рис. 7 и 8.

4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСРЕДСТВОМ КОДА “КАРАТ”

В ходе численного моделирования определялись значения мощности излучения P в круге диаметром 50 см, что совпадает с диаметром калориметра в эксперименте, и электрического поля E на оси рупора. Целью моделирования было сравнение результатов расчета с измеряемыми величинами: энергией в калориметре W и электрическим полем E на приемной антенне. Моделирование с помощью кода “Карат” сводится к

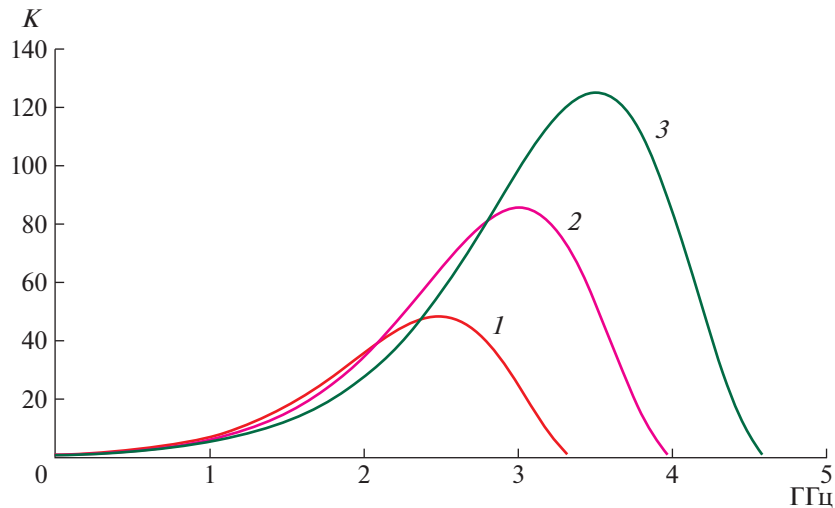


Рис. 8. Расчетная зависимость линейного коэффициента усиления электрического поля E от частоты монохроматического входного сигнала для значений плотности плазмы: 1 — $n = 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, 2 — $n = 1.3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, 3 — $n = 1.6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

численному решению системы уравнений Максвелла при выбранных граничных и начальных условиях в 3D счетной области, геометрические размеры которой совпадают с размерами экспериментального устройства. В данном случае моделировалась лишь часть экспериментальной установки, а именно, коаксиальный волновод 6, коллектор 5, рупор 7 и часть свободного пространства за ним, см. рис. 1. Поверхности элементов считались идеально проводящими. Внешняя граница свободной зоны при моделировании рассматривалась как идеальный поглотитель. Граничные условия на входе в коаксиальный волновод слева соответствовали запуску ТЕМ волны, моделирующей волну на выходе плазменно-пучкового СВЧ-усилителя. В данных расчетах ТЕМ волна состоит из суммы нескольких гармонических колебаний в диапазоне частот от 1.8 до 3.5 ГГц. Этот диапазон был выбран для сравнения результатов расчета и эксперимента при $n = 11.4$ отн. ед., рис. 4. Фазы гармоник равномерно распределены от 0 до 360° , амплитуды гармоник лежат в интервале от 90 до 110% задаваемой амплитуды. Перечисленные выше параметры в совокупности позволяют получить электромагнитное поле в точке $z = 80$ см с почти сплошным спектром в диапазоне частот от 1.8 до 3.5 ГГц с амплитудой изменяющейся не более, чем в 2 раза.

На рис. 9 показана расчетная зависимость $E^2(t)$ (рис. 9а) и экспериментальная зависимость $U^2(t)$ (рис. 9б). На обоих графиках мгновенные максимальные значения E^2 и U^2 сильно отличаются от средних значений, $E^2 / \langle E^2 \rangle = 10$, $U^2 / \langle U^2 \rangle = 4.4$. В

расчете входная мощность постоянна и поэтому среднее значение на выходе за 40 нс оказывается константой. Другими словами, увеличение интервала усреднения на временах более 40 нс не приводит к изменению величины $\langle E^2 \rangle$. Для сравнения с расчетом измерялось среднее значение $\langle U^2 \rangle$ на участке осциллограммы длительностью 40 нс в области максимальных значений $U(t)$, где можно считать, что выходная мощность постоянна.

На рис. 10а приведены расчетная и экспериментальная зависимости величины $\langle U^2 \rangle$ от z . Отметим, что при получении расчетной зависимости сначала определялось электрическое поле, а затем, в соответствии с результатами численного моделирования, (см. раздел 2) значения E пересчитывались в значения U . При расчете зависимости $\langle U^2 \rangle$ от z предполагалось, что полная мощность излучения составляет 75 МВт. При этом значении мощности экспериментальная и расчетная зависимости $\langle U^2 \rangle$ от z в области $z = 40$ – 80 см совпадают. На рис. 10б приведены экспериментальная зависимость энергии (z) и расчетная зависимость мощности $P(z)$ в круге диаметром 50 см. Величины W являются значениями поглощенной в калориметре энергии, усредненными по 10 импульсам для значений плотности плазмы от 8 до 14 отн. ед. Расчетные значения $P(z)$ резко уменьшаются при увеличении z . Это объясняется широкой диаграммой направленности рупора, поскольку $D \sim \lambda$. В предположении, что вся мощность СВЧ-излучения поглощается калоримет-

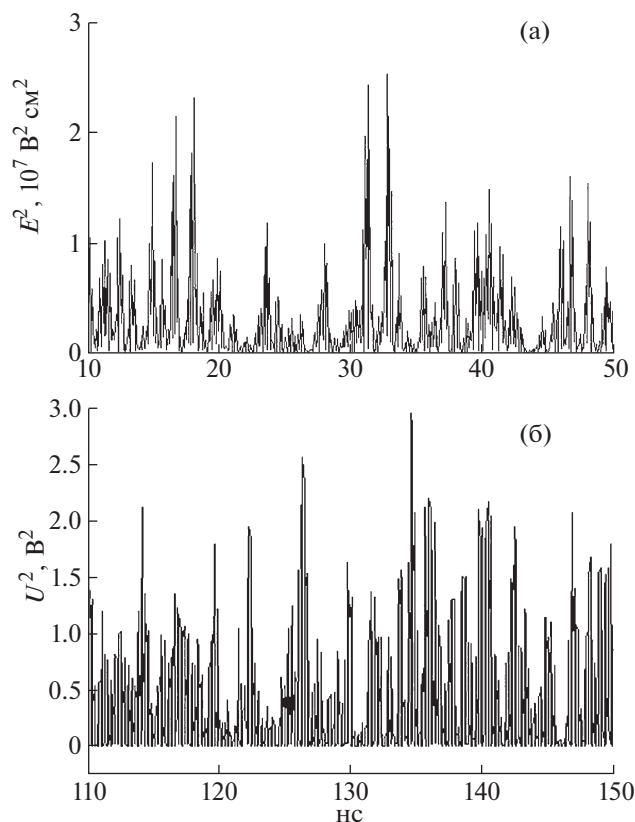


Рис. 9. Расчетная зависимость $E^2(t)$ (а) и экспериментальная зависимость $U^2(t)$ (б). Обе зависимости построены для $z = 80$ см.

ром, экспериментальная зависимость энергии $W(z)$ и расчетная зависимость мощности $P(z)$ в круге диаметром 50 см должны быть пропорциональны друг другу. Однако, как видно из рис. 10б, значения $W(z)$ и $P(z)$ не пропорциональны. Это расхождение объясняется тем, что часть мощности отражается от калориметра. При нормальном

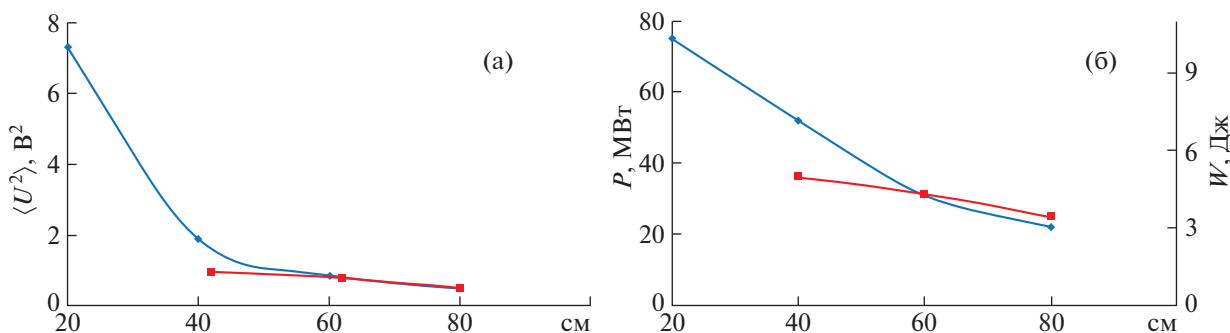


Рис. 10. Расчетная (ромбы) и экспериментальная (квадраты) зависимости величин $\langle U^2 \rangle$, W , P от z : расчетная и экспериментальная зависимости величины $\langle U^2 \rangle(z)$ (а); экспериментальная зависимость энергии $W(z)$ и расчетная зависимость мощности $P(z)$ в круге диаметром 50 см (б).

падении плоской волны на поверхность калориметра коэффициент отражения составляет 10%. Как показывает расчет, при $z = 80$ см поле на оси СВЧ-пучка не имеет компоненты E_z , тогда как при сокращении расстояния до $z = 40$ см компонента E_z даже на оси СВЧ-луча пучка перестает быть равной нулю. Волну нельзя считать плоской. Сильное отражение излучения от поверхности калориметра при малых z приводит к сильному расхождению результатов эксперимента и расчета. Для проверки приведенного выше утверждения о причине расхождения результатов эксперимента и расчета был проведен следующий эксперимент. Между рупором и калориметром, который располагался на расстоянии 70 см от вакуумного окна рупора с диаметром 16 см, был вставлен дополнительный рупор. Этот рупор имел длину 65 см, входной диаметр 20 см и выходной диаметр 44 см. Дополнительный рупор создавал на поверхности калориметра СВЧ-пучок с диаметром меньшим диаметра калориметра и уменьшал угол падения излучения на поверхность калориметра. В диапазоне изменения плотности плазмы от 8 до 14 отн. ед. была зарегистрирована средняя энергия СВЧ-импульсов 7 Дж (5–9 Дж). Согласно расчету, измеренная величина энергии в калориметре $W(z = 80 \text{ см}) = 3$ Дж должна регистрироваться при полной энергии СВЧ-импульса 15 Дж. Таким образом, дополнительный рупор позволил увеличить долю излучения, поглощенную калориметром. Таким образом, можно утверждать, что полная энергия СВЧ-импульса превышает 5 Дж, зарегистрированные на расстоянии $z = 40$ см.

5. АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ

О качестве шумового излучения можно судить по виду автокорреляционных функций СВЧ-сигналов, рис. 11.

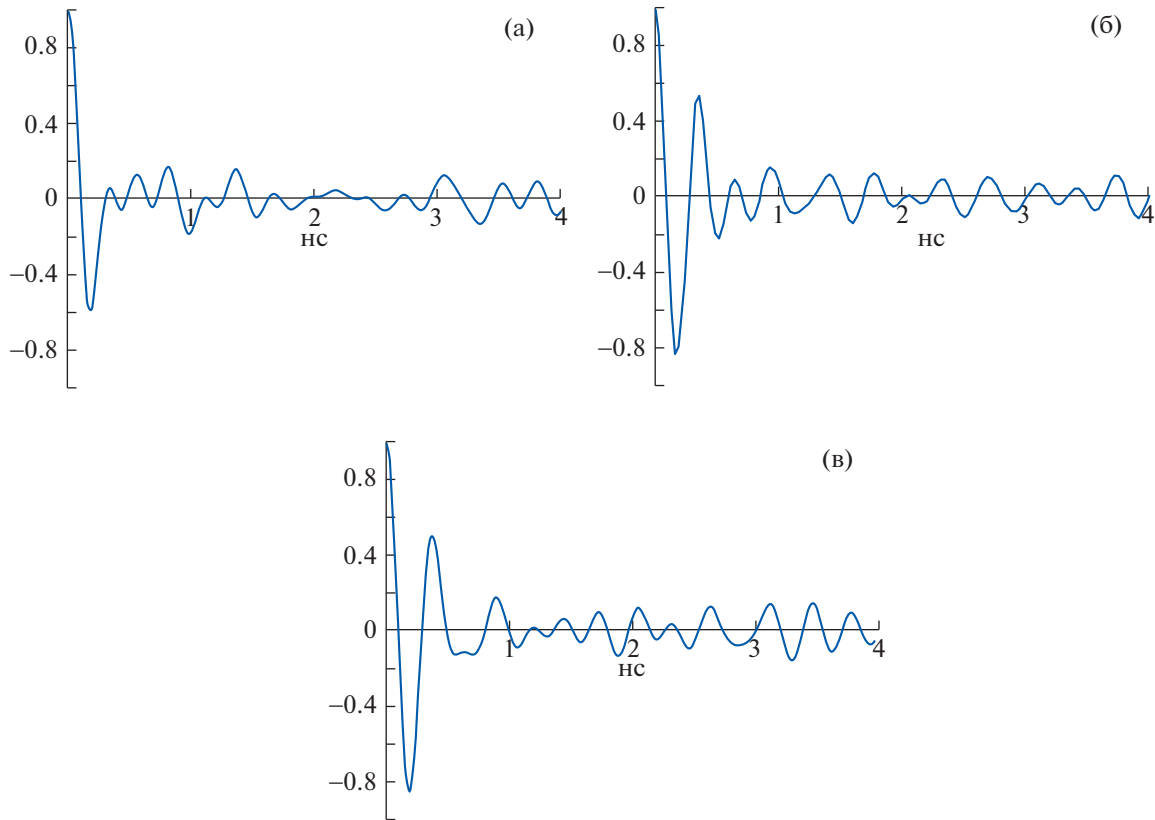


Рис. 11. Автокорреляционные функции: $n = 0$ (а), 11.4 отн. ед (б), $n = 0$, использован полосовой фильтр 1.8 ГГц $< f < 3.5$ ГГц (в).

На рис. 11а и б приведены автокорреляционные функции для значений плотности плазмы $n = 0$ и 11.4. Видно, что время корреляции при инжекции РЭП в плазму резко возрастает, т.е. сигнал становится более регулярным. На рис. 11в построена автокорреляционная функция СВЧ-сигнала для $n = 0$, пропущенного через полосовой фильтр 1.8 ГГц $< f < 3.5$ ГГц. Полоса частот фильтра совпадает с наблюдаемым диапазоном частот излучения при $n = 11.4$ отн. ед. Время корреляции на рис. 11б и в совпадает. Таким образом, различие функций корреляции при $n = 0$ и 11.4 отн. ед. объясняется тем, что полоса частот плазменного СВЧ-усилителя ограничена, и усиливается только часть спектра шумов РЭП. Автокорреляционный анализ СВЧ-сигналов подтверждает, что наблюдаемые сигналы представляют собой именно усиленные шумы РЭП, причем спектр этих шумов одинаков как при инжекции РЭП в вакуум, так и в плазму. Это еще раз приводит нас к выводу, что источником шумов РЭП являются процессы на взрывоэмиссионном катоде.

Отметим, что время автокорреляции не равно нулю и при $n = 0$. Это связано не только с ограниченностью полосы частот осциллографа. Оба сигнала при $n = 0$ и 11.4 имеют модуляцию по ампли-

туде с характерным периодом 2–4 нс, она свидетельствует о наличии регулярных процессов на катоде взрывоэмиссионного катода, см. рис. 9, 12. Масштаб периода модуляции сигнала $U(t)$ определяется длительностью существования эмиссионных центров на катоде ускорителя и характерным временем возникновения новых эмиссионных центров [13, 14].

6. СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО СВЧ-ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ПАРАМЕТРАМИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВИДЕОИМПУЛЬСОВ КОРОТКОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Одним из основных параметров сверхширокополосных СВЧ-источников является эффективный потенциал излучателя $U_{eff} = Ez$. Он измеряется в дальней зоне антенны. Дальняя зона монохроматического излучения находится на расстоянии z от рупора

$$z > \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (1)$$

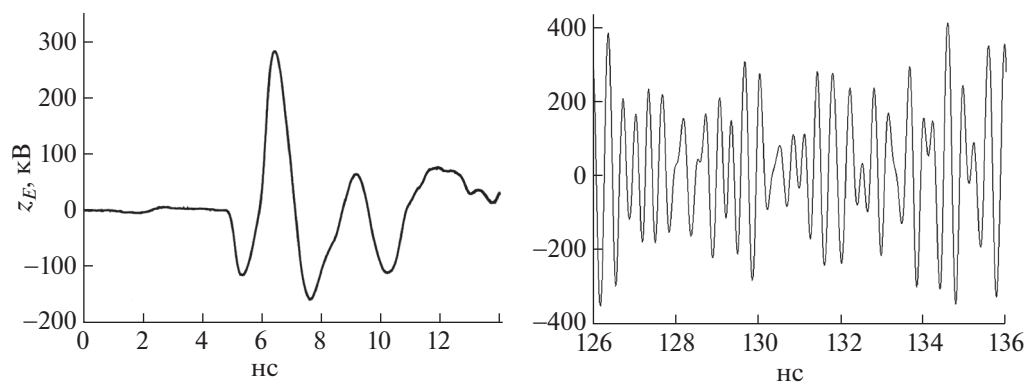


Рис. 12. Зависимости $U_{eff}(t)$: слева – излучатель видеоимпульса короткой длительности с одной антенной, справа – плазменный релятивистский сверхширокополосный источник.

Из формулы (1) следует, что для частоты 3 ГГц и рупора с диаметром 16 см дальняя зона начинается на расстоянии $z = 50$ см. Сокращение расстояния между рупором и антенной от 80 до 40 см приводит к увеличению значения измеренного электрического поля в 1.8 раза. Это означает, что область $z = 60–80$ см находится в дальней зоне. При установке антенны на расстоянии $z = 80$ см амплитуда U сигнала со средней частотой 3 ГГц на осциллографе равна 1.7 В. Принимая во внимание, что ослабление сигнала в кабеле между антенной и осциллографом на частоте 3 ГГц составляет 4 дБ, а также то, что перед входом осциллографа сигнал дополнительно ослабляется аттенуатором на 63 дБ, получим, что амплитуда $U = 1.7$ В на осциллографе соответствует напряжению на антенне 3.8 кВ. Согласно результатам численного моделирования (см. разд. 2), напряжение 3.8 кВ на антенне должно возникать при приеме сигналов с частотой 3 ГГц и напряженности поля $E = 5$ кВ/см. Окончательно получаем, что эффективный потенциал равен $U_{eff} = 400$ кВ. Это значение сравнимо с эффективным потенциалом известных сверхширокополосных СВЧ-источников видеоимпульсов, использующих одиночную излучающую антенну [1].

Сравнение типичных зависимостей $U_{eff}(t)$ этих двух сверхширокополосных СВЧ-источников приведено на рис. 12. Один импульс напряжения на катоде ускорителя (500 кВ) плазменного СВЧ-излучателя создает СВЧ-импульс длительностью ~ 300 нс с амплитудной модуляцией с периодом примерно 2 нс с постоянной максимальной амплитудой в течение ~ 100 нс, тогда как один импульс напряжения модулятора видеоимпульса (200 кВ) дает один СВЧ-импульс длительностью ~ 2 нс [1]. Очевидно, что плазменный СВЧ-источник может создать в дальней зоне значительно больший эффективный потенциал при использовании излучающей антенны с поперечным разме-

ром $D \gg \lambda$. В настоящем эксперименте $D \geq \lambda$. Провести эксперимент с рупором $D \gg \lambda$ в помещении, где расположен ускоритель, нам не удалось. Увеличение диаметра рупора привело бы к увеличению расстояния до дальней зоны, а проведение измерений при $z > 80$ см невозможно. Выше мы обсуждали принципиальные физические различия двух источников. Следует отметить, что излучатель видеоимпульса имеет ряд технических преимуществ. Во-первых, он более прост, не содержит вакуумных камер. Во-вторых, один модулятор может запитывать антенну, состоящую из нескольких малых антенн, что позволяет создать антенну с малым углом расходимости СВЧ-луча.

Итак, принципиальные физические отличия плазменного сверхширокополосного СВЧ-источника от излучателей видеоимпульса состоят в возможности получения большей энергии в одном импульсе (более 5 Дж), в возможности управления средней частотой СВЧ-сигнала от одного импульса к другому, а также в том, что с увеличением средней частоты энергия СВЧ-импульса не уменьшается.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-08-00439.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Новосибирск: Наука, 2015.
2. Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Романченко И.В., Ростов В.В., Сухушин К.Н. // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. С. 337.
3. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника, М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
4. Биро М., Красильников М.А., Кузелев М.В., Рухадзе А.А. // УФН. 1995. Т. 167(10). С. 1025.

5. Кузелев М.В., Лоза О.Т., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. // Физика плазмы. 2001. Т. 27 (8). С. 669.
6. Иванов И.Е., Стрелков П.С., Шумейко Д.В. // Радиотехника электроника. 2009. Т. 54(9). С. 1091.
7. Алексеев И.С., Иванов И.Е., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2017. Т. 43 (3). С. 277.
8. Шкварунец А.Г. // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 4. С. 72.
9. Тараканов В.П. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003.
10. Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkley Research Associates, 1992.
11. Лоза О.Т., Пономарев А.В., Ульянов Д.К., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. // Физика плазмы. 1997. Т. 23 (3). С. 222.
12. Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2012. Т. 38 (6). С. 536.
13. Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2016. Т. 42 (7). С. 644.
14. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
15. Абубакиров Э.Б., Конюшков А.П., Сергеев А.С. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54 (8). С. 1009.