

СПЕКТРЫ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

© 2021 г. П. С. Стрелков^{а,*}, И. Е. Иванов^{а,**}, Е. Д. Диас Михайлова^{а,***}, Д. В. Шумейко^{а,****}

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

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

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

***e-mail: tomasrulit@mail.ru

****e-mail: admin@neooffline.ru

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

После доработки 14.09.2020 г.

Принята к публикации 06.10.2020 г.

Измерено отношение энергии излучения плазменного релятивистского СВЧ-усилителя на частоте входного сигнала к энергии шумов. В отсутствие входного сигнала регистрируется шумовое излучение. Показано, что при некоторых условиях энергия шумов усилителя резко уменьшается по сравнению с уровнем энергии шумов, наблюдаемых в отсутствие входного сигнала.

Ключевые слова: релятивистский электронный пучок, взрывоэмиссионный катод, плотность плазмы, спектры СВЧ-излучения, линейный коэффициент усиления

DOI: 10.31857/S0367292121030112

1. ВВЕДЕНИЕ

В вакуумной релятивистской СВЧ-электронике главным образом проводились экспериментальные исследования СВЧ-генераторов. Исследования усилителей внешнего СВЧ-сигнала велись не столь широко и были направлены в основном на создание СВЧ-источников большой мощности [1–4].

В работах [1, 2, 4] описаны трехсекционные усилители с электродинамической системой, выполненной в виде гофрированного волновода. Первая секция каждого из этих устройств являлась предусилителем, предназначенным для модуляции тока пучка на частоте входного СВЧ-сигнала. Далее релятивистский электронный пучок (РЭП) попадал во вторую секцию – пространство дрейфа, не пропускающее СВЧ-волны. Наличие второй секции позволяло предотвратить самовозбуждение усилителя и получить высокую выходную мощность. В третьей секции, представляющей собой лампу бегущей волны (ЛБВ), модулированный пучок усиливался. В качестве предусилителя первой секции использовалась либо также лампа бегущей волны, либо лампа обратной волны. В устройствах, описанных в работах [1, 2], могла усиливаться только одна низшая мода. В работе [4] для получения высокой мощности использовался сверхразмерный волновод. Он позволял уменьшить риск возник-

новения СВЧ-пробоя на стенке гофрированного волновода, но приводил к возможности усиления нескольких мод. Входной сигнал в усилителе [4] использовался для селекции мод.

Впервые высокий уровень шумов релятивистского усилителя был обнаружен в работе [1], мощность излучения на частоте входного сигнала была равна мощности шумов. Поэтому описанные в работах [2, 4] усилители имели узкую полосу усиления, например, 1% по уровню 3 дБ в [4]. Эти усилители работали в режиме регенерации на частоте близкой к частоте самовозбуждения первой секции. Незначительное увеличение диаметра пучка, которое происходило в течение импульса тока РЭП, приводило к возникновению режима генерации.

Эти устройства являлись источниками монохроматического излучения на одной фиксированной частоте. В работе [4] была отмечена возможность получения СВЧ-импульсов длительностью 250 нс и мощностью 270 МВт, а также импульсов длительностью 70 нс и мощностью 1.1 ГВт. Мощность входного сигнала составляла 20 кВт. Частота излучения в обоих случаях была равна 9 ГГц, ширина спектра при этом была близка к естественной ширине. Эксперименты проводились на электронном пучке со следующими параметрами: энергия электронов составляла 850 кэВ, ток пучка равнялся 6 кА, а длительность плато импульса напряжения на катоде была равна

250 нс. Эти параметры СВЧ-излучения близки к рекордным значениям, но не превосходят параметры релятивистских СВЧ-генераторов. Увеличение мощности входного сигнала до 100 кВт не привело к положительному результату.

В работе [3] описан СВЧ-усилитель другого типа – клистронный усилитель. На клистронном усилителе было получено излучение частотой 1.3 ГГц и мощностью 3 ГВт. Энергия электронов при этом составляла 500 кэВ, а ток пучка равнялся 16 кА. В статье [3], однако, отмечено, что реализации больших потенциальных возможностей устройства препятствует ряд проблем, а результаты более поздних исследований опубликованы не были. Исследования релятивистских клистронных усилителей были возобновлены китайскими учеными в 2010 г., обзор этих работ можно найти в [5]. Исследования проводились в X диапазоне частот. В работе [6] говорится о получении СВЧ-импульса с частотой 9.4 ГГц и длительностью 160 нс, мощность которого достигала 1 ГВт. продемонстрирована стабильность фазы выходного СВЧ-импульса относительно фазы входного сигнала ± 25 град. Использовался РЭП со следующими параметрами: энергия электронов 600 кэВ, ток пучка 4.6 кА. Еще раз отметим, что исследования, описанные в [3, 5, 6], были направлены на получение максимальной мощности излучения на фиксированной частоте.

Одним из важных параметров СВЧ-усилителей является ширина диапазона перестройки частоты выходного сигнала. Данная статья посвящена исследованиям плазменного релятивистского СВЧ-усилителя внешнего сигнала, целью которых было создание мощного источника монохроматического излучения с возможностью электронной перестройки частоты. На электронном пучке (500 кэВ, 2 кА, 500 нс) было получено излучение, мощность которого достигала значений 100–150 МВт при подаче на вход усилителя сигналов с частотами 2.4, 2.7 и 3.1 ГГц [7–10]. Таким образом, ширина диапазона перестройки частоты составила 25%. Длительность СВЧ-импульсов при этом была равна 250–300 нс. Излучение на частотах входного сигнала сопровождалось широкополосным шумовым излучением, однако мощность шумов при этом не превышала 10–15% от полной мощности излучения. Оптимальный режим плазменного релятивистского усилителя при фиксированной частоте входного сигнала осуществлялся в некотором диапазоне значений плотности плазмы. Эти диапазоны для частот 2.7 и 3.1 ГГц перекрывают друг друга. Поэтому излучение с высоким уровнем мощности на частотах 2.7 и 3.1 ГГц можно было получать, не изменяя плотность плазмы. Для реализации режима с высоким уровнем мощности на частоте 2.4 ГГц необходимо было уменьшать плотность плазмы. Величина внешнего магнит-

ного поля в ходе всех экспериментов была постоянной. Как было отмечено выше, в спектре излучения усилителя присутствуют шумы, что обусловлено широкой полосой усиления $>14\%$ устройства. В [11] было показано, что мощное широкополосное излучение наблюдается и в отсутствие входного сигнала из-за усиления собственных шумов РЭП. Получить относительно высокий уровень отношения сигнал/шум в режиме усиления монохроматического сигнала удалось благодаря обнаруженному эффекту подавления шумов [8]. Он заключается в том, что включение входного сигнала приводит к уменьшению уровня шумов, наблюдаемых в его отсутствие. Экспериментальное исследование этого эффекта составляет основное содержание данной работы.

Прежде чем перейти к следующему разделу, заметим, что последний абзац разд. 1 написан на основе результатов работ [7–10]. Быстро ознакомиться с этими работами можно в обзорной статье [10] в журнале УФН, доступной на сайте указанного издания. Далее в ссылках в круглых скобках указывается номер раздела статьи 10, например, [10(11)].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УСИЛИТЕЛЯ

Схема плазменного релятивистского СВЧ-усилителя монохроматического входного сигнала и его параметры были неоднократно описаны, в частности, они приведены в статьях [8, 9, 10(11)], рис. 1. Импульсный РЭП длительностью 500 нс, энергией электронов 500 кэВ и током 2 кА инжектируется в металлическую трубу диаметром 10 см, частично заполненную плазмой. Установка работает в режиме одиночных импульсов. Плазма заготавливается заранее, до момента инжекции РЭП, за счет ионизации газа дополнительным электронным пучком. Эксперименты по измерению абсолютных значений плотности плазмы были описаны в [10(4), 12]. Было показано, что плотность плазмы n пропорциональна току дополнительного электронного пучка, поэтому величина этого тока используется для измерения плотности заготовленной плазмы в относительных единицах. Плазма и РЭП имеют вид трубок. Постоянство поперечных размеров плазмы и РЭП вдоль волновода поддерживается с помощью продольного магнитного поля 4.5 кГс. Диаметр трубчатой плазмы равен 4 см, а толщина 2 мм. Плотность плазмы изменялась от 0.5 до 3×10^{12} см $^{-3}$. В плазму вводилась электромагнитная энергия от магнетрона на частоте $f_0 = 2.74$ ГГц. Мощность входного импульса усиливалась электронным пучком при выполнении условия черенковского резонанса, когда скорость

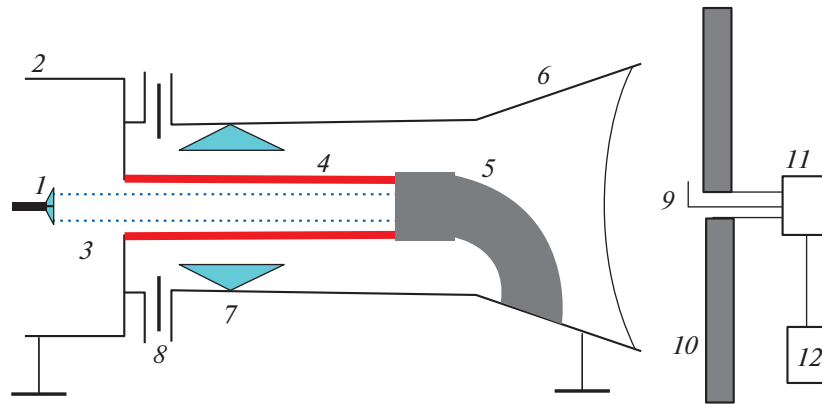


Рис. 1. Схема плазменного релятивистского СВЧ-усилителя. 1 – взрывоэмиссионный катод, 2 – анод, 3 – РЭП, 4 – плазма, 5 – коллектор, 6 – рупор, 7 – СВЧ-поглотитель, 8 – коаксиальный вход усилителя, 9 – приемная антенна, 10 – калориметр, 11 – СВЧ-аттенюатор, 12 – осциллограф.

электронов РЭП примерно равна фазовой скорости плазменной волны.

Регистрация усиленного сигнала осуществляется следующим образом. Излучение возбуждает ток в приемной антенне, расположенной на расстоянии 75 см от апертуры рупора плазменного релятивистского СВЧ-усилителя. Сигнал с антенны $U(t)$ по кабелю поступает на аттенюатор 60 дБ и далее регистрируется осциллографом с полосой частот до 4 ГГц.

Перечислим параметры эксперимента, которые были неизменны: это индукция внешнего магнитного поля, энергия электронов РЭП, давление газа, размеры пучка, плазмы и деталей конструкции плазменного СВЧ-усилителя. Изменялись мощность входного сигнала от магнетрона и плотность плазмы. Отметим, что зависимости параметров излучения от плотности плазмы и от мощности входного сигнала были получены на основе анализа двух разных импульсов РЭП. Строго говоря, это можно делать только при наличии полной воспроизводимости параметров РЭП и плазмы от одного импульса ускорителя к другому. Обработка осциллограмм $U(t)$ производилась так же, как в [13]. Спектральный анализ осуществлялся методом быстрого преобразования Фурье. Передний фронт и амплитуда импульса напряжения воспроизводятся с высокой точностью от одного импульса к другому, а задний фронт имеет значительный джиттер. Поэтому полная длительность импульса напряжения была увеличена до ≈ 700 нс, а для определения спектра импульса использовалась только часть осциллограммы длительностью 262.144 нс. Интервал между точками на осциллограмме был равен 16 пс. Начало этого отрезка времени соответствовало выходу импульса напряжения, подаваемого на катод ускорителя, на плато. Таким образом, изучались параметры излучения при постоянной

энергии электронов. Кроме того, отсекалось шумовое излучение, наблюдаемое на заднем фронте импульса напряжения. При анализе узкополосного спектра в малой окрестности частоты входного сигнала обрабатывался отрезок времени длительностью $t_2 - t_1 \approx 262$ нс. Первая и последняя точки отрезка t_1 и t_2 выбирались так, чтобы $U(t_1) \approx U(t_2) \approx 0$, а также чтобы знаки $U(t)$ и производной dU/dt в моменты времени t_1 и t_2 совпадали.

Основным измеряемым параметром излучения являлась энергия СВЧ-импульса $W = \int_{t_1}^{t_2} U^2(t) dt$. Эта величина имеет размерность $V^2 \cdot c$. Учитывая коэффициент ослабления СВЧ-сигнала перед входным сопротивлением осциллографа равным 50 Ом, получаем равенство $1 V^2 \cdot c \Leftrightarrow 2 \times 10^{-3}$ Дж. Энергия W пропорциональна плотности энергии излучения на оси СВЧ-пучка. Ранее было показано, что величина W пропорциональна полной энергии СВЧ-импульса, измеренной калориметром [10(5)], во всем диапазоне изменения плотности плазмы [8, 9, 10(11)]. Это свидетельствует о постоянстве поперечной структуры СВЧ-пучка. Постоянство структуры СВЧ-пучка было также подтверждено прямыми измерениями [10(11), 14]. Таким образом, мы считаем, что величина W , измеряемая в одной точке, пропорциональна энергии излучения в полном сечении СВЧ-пучка, и в дальнейшем для краткости называем эту величину энергией излучения. Задача данной работы состояла в определении значений энергии излучения на разных участках спектра сигнала $U(t)$.

Известно, что

$$\int_0^T U^2(t) dt = 2 \int_0^\infty |A(f)|^2 df, \quad (1)$$

где A – амплитуда спектра сигнала $U(t)$. Поэтому сначала определялся спектр СВЧ-излучения $A(f)$

в интервале 262 нс и вычислялась величина W в этом временном интервале. Затем по формуле (2) определялась доля энергии СВЧ-импульса, $f_0 \pm \delta f_1$. Мы называем эту величину энергией усиленного сигнала магнетрона – W_{f_0} ,

$$W_{f_0} = 2 \int_{f_0 - \delta f_1}^{f_0 + \delta f_1} |A|^2 df. \quad (2)$$

Здесь $\delta f_1 \ll f_0$, конкретное значение δf_1 будет указано в тексте при изложении результатов эксперимента. Энергию шума от 0 до 4 ГГц вне диапазона частот $2.74 \text{ ГГц} \pm \delta f_1$ при наличии входного сигнала обозначаем W_1 . Она вычислялась как разность между полной энергией W и энергией W_{f_0} . Наконец, энергия СВЧ-излучения в диапазоне частот от 0 до 4 ГГц в отсутствие входного сигнала обозначается W_2 . Как показано в работах [7, 8, 11], излучение плазменного усилителя в отсутствие входного сигнала связано с усилением собственных шумов РЭП. Шумы РЭП регистрируются в отсутствие плазмы, и нижняя граница их спектра составляет примерно 1 ГГц, а верхняя превышает 4 ГГц. Ширина полосы усиления плазменного СВЧ-усилителя примерно равна 2 ГГц, поэтому спектр выходного сигнала плазменного усилителя всегда уже спектра шумов РЭП в вакууме. Средняя частота усиленных шумов РЭП возрастает с ростом плотности плазмы [15]. Как показано в [16], структура напряженности электрического поля СВЧ-пучка шумового сигнала на выходе из рупора почти не отличается от структуры СВЧ-пучка, которая регистрируется при включении входного сигнала на частотах 2.7 ГГц и 3.1 ГГц. Это дает нам основание полагать, что энергия, измеренная на оси СВЧ-пучка пропорциональна полной энергии шумового сигнала.

В данной работе измерялись зависимости W_{f_0} , W_1 и W_2 от плотности плазмы n . Зависимости $W_{f_0}(n)$ и $W_2(n)$ были измерены для двух значений мощности входного сигнала $P = P_0$ и $0.4 P_0$. Мощность входного сигнала изменялась за счет изменения числа поглотителей в выходном волноводном тракте магнетрона. Для определения мощности входного сигнала в конце волноводного тракта магнетрона был установлен зонд, измеряющий напряженность электрического поля. Амплитуда СВЧ-импульса зонда постоянна в течение 6 мкс, поэтому для определения мощности входного сигнала в относительных единицах было достаточно измерить амплитуду этого сигнала.

3. ЗАВИСИМОСТИ ВЕЛИЧИН W_{f_0} , W_1 , W_2 ОТ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

В плазменном релятивистском усилителе монохроматического входного сигнала основная до-

ля энергии излучается на частоте входного сигнала, и часть энергии излучения находится в шумах [8–10 (11)]. Характерный спектр сигнала усилителя представлен на рис. 2а, б, в. На рис. 2а видно, что ширина спектра шумов составляет около 2 ГГц. Отношение сигнал-шум равно примерно 25 (28 дБ), рис. 2а, 2в.

Эффект подавления шумов при включении входного сигнала демонстрируют рисунки 2в и 2г. Масштабы на осях рис. 2в и рис. 2г одинаковы.

Прежде чем перейти к описанию зависимостей $W(n)$, необходимо определить значение δf_1 , для которого будет осуществляться расчет интеграла W_{f_0} по формуле (2). Рассмотрим зависимость $W^*(\delta f) = \int_{f_0 - \delta f}^{f_0 + \delta f} |A|^2 df$ для сигнала, спектр которого представлен на рис. 2а. Как видно из рис. 3, в точке $\delta f = 30 \text{ МГц}$ величина $W^* \approx 0.9W$. Плавное увеличение интеграла W^* при $\delta f \approx 30 \text{ МГц}$ вызвано наличием шумов в спектре сигнала, см. рис. 2б. В дальнейшем при вычислении величин W_{f_0} используется $\delta f_1 = 30 \text{ МГц}$.

Как было отмечено выше, при подаче на вход устройства сигнала от магнетрона наблюдается эффект подавления шумов. Данный эффект для конкретного значения плотности плазмы показан на рис. 2в, г. На рис. 4 приведена зависимость энергии усиленного сигнала W_{f_0} от плотности плазмы n . А также показано, как с изменением плотности плазмы меняется энергия в шумах при подаче на вход устройства монохроматического сигнала – $W_1(n)$, и как меняется энергия шумового излучения в отсутствие входного сигнала – $W_2(n)$.

Линии на рис. 4 получены в результате аппроксимации экспериментальных точек полиномом. Величина R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации экспериментальных точек кривыми. При расчете этой величины использовалась стандартная функция программы *Excel*, основанная на методе наименьших квадратов. Степень полинома от 3 до 6 для каждой кривой выбиралась так, чтобы получить максимальное значение R^2 . Также учитывалось, что аппроксимирующая кривая должна лежать выше нуля во всем диапазоне значений n . Напомним, что единица измерения энергии СВЧ-импульса на осциллографе $10^{-7} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$ соответствует энергии $2 \times 10^{-3} \text{ Дж}$, поступающей на антенну. Таким образом, на антенну поступает малая доля от полной энергии излучения плазменного усилителя, которая согласно калориметрическим измерениям достигает 25 Дж, [10(11)]. На графике рис. 4 видно, что максимальные значения усиленного сигнала $W_{f_0} = (8-9) \times 10^{-8} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$ наблюдаются в диапазоне значений плотности плазмы $6.5 < n < 9$ отн. ед. В этом

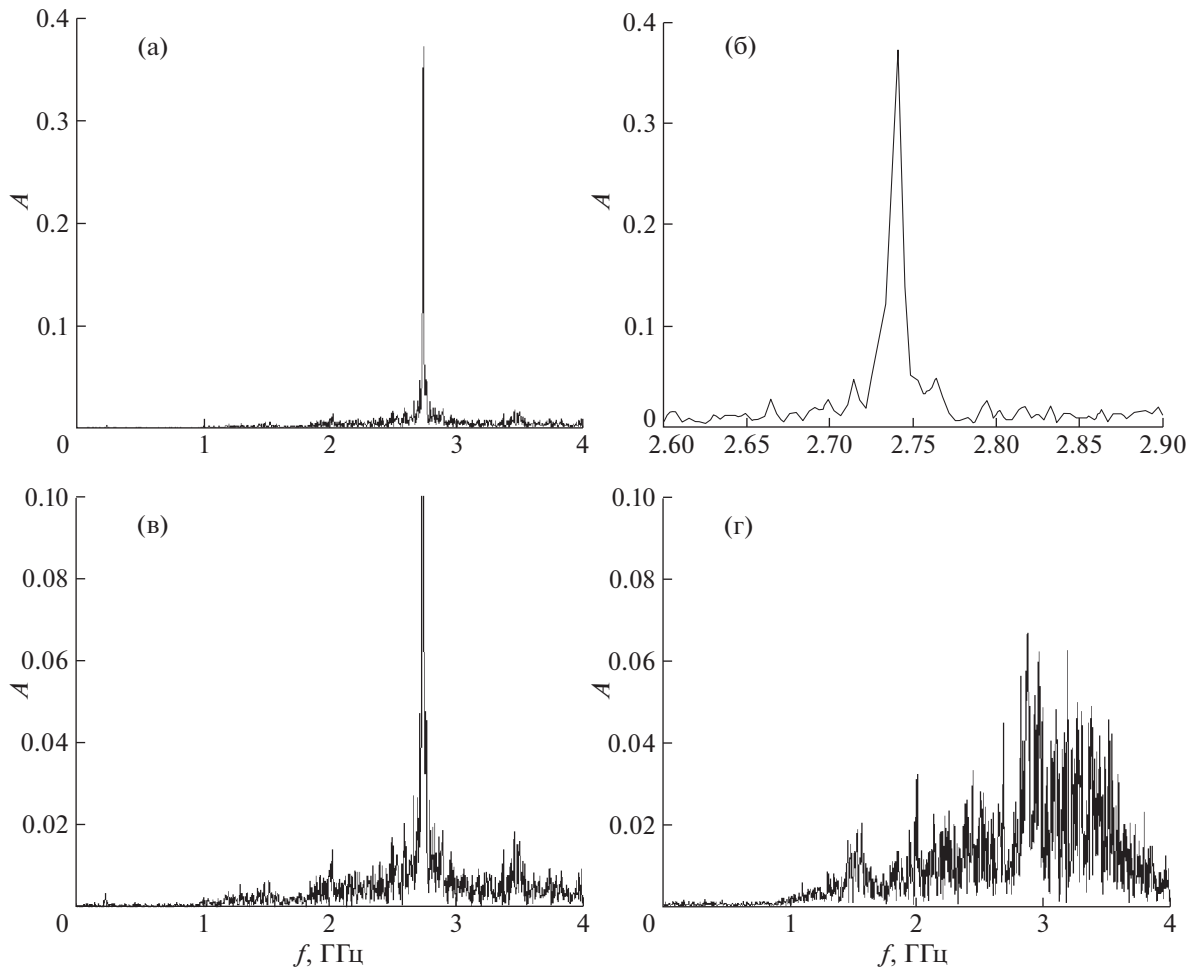


Рис. 2. а) — спектр сигнала плазменного релятивистского СВЧ-усилителя; б) — участок спектра того же сигнала в интервале частот от 2.6 до 2.9 ГГц; в) — спектр шумов, сопровождающих усиленный монохроматический сигнал 2а (масштаб по оси ординат увеличен); г) — спектр шумов в отсутствие входного сигнала. Плотность плазмы постоянна и равна 6.72 отн. ед.

же диапазоне наблюдается эффект подавления шумов: $W_1 < W_2$. В диапазоне значений плотности плазмы $8 < n < 9$ отн. ед. наблюдается обратный эффект: включение входного СВЧ-сигнала приводит к увеличению энергии шумов, $W_1 > W_2$. Эффект подавления шумов нестабилен: в отдельных импульсах энергия шумов при $P = 0$ превышает энергию шумов при $P = P_0$ в 4 раза, в то время как в других это отношение равно $1 - 0.8$. Нестабильность эффекта подавления шумов связана в основном с плохой повторяемостью импульсов при $P = 0$ и, как следствие, с большим разбросом значений энергии шумов W_2 . Это, в частности, следует из сравнения параметров R^2 для двух кривых $W_1(n)$ и $W_2(n)$ на рис. 4.

Увеличение энергии шумов W_1 с ростом плотности плазмы в диапазоне $6.5 < n < 9$ отн. ед. приводит к уменьшению отношения сигнал-шум W_{f_0}/W_1 от 6 до 2 при больших значениях n , что

равносильно увеличению доли энергии шумов в полной энергии излучения от 14% до 33%.

Приведем теперь зависимости энергий СВЧ-излучения от плотности плазмы аналогичные зависимостям, показанным на рис. 4, при меньшей мощности входного сигнала $P = 0.4P_0$, рис. 5. Здесь максимальное усиление на частоте входного сигнала имеет место примерно в том же диапазоне значений плотности плазмы $7 < n < 9$ отн. ед., но усиление в этом диапазоне стало менее стабильным. Среднее значение W_{f_0} в диапазоне $7 < n < 9$ отн. ед. равно $(4 \pm 1.74) \times 10^{-8} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$, тогда как среднее значение W_{f_0} при $P = P_0$ в диапазоне $6.5 < n < 9$ отн. ед. равно $(7.46 \pm 1.27) \times 10^{-8} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$. Максимальный уровень энергии усиленного сигнала примерно сохранился, но он наблюдается в очень узком диапазоне значений плотности плазмы. Малый разброс значений энергии W_{f_0} и более

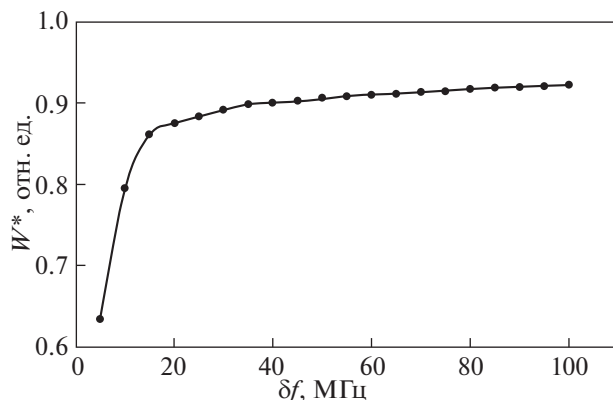


Рис. 3. Зависимость энергии СВЧ-импульса на участке спектра $f_0 \pm \delta f$ от параметра δf .

высокое значение R^2 для кривой $W_{f_0}(n)$ при мощности P_0 позволяет предположить, что при значении $W_{f_0} = 9 \times 10^{-8} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$ наступает насыщение сигнала усилителя. По-прежнему при малых значениях плотности $n < 7.5$ отн. ед. уровень шумов в отсутствие входного сигнала превышает уровень шумов при наличии входного сигнала, но эффект подавления шумов при мощности входного сигнала $0.4 P_0$ проявляется значительно слабее, чем при P_0 .

Таким образом, область значений плотности плазмы, в которой наблюдается значительное усиление входного сигнала, делится на два диапазона. В одном из них $6.5 < n < 8$ отн. ед. (диапазон А) наблюдается подавление шумов $W_1 < W_2$, тогда

как в другом $8 < n < 9$ отн. ед. (диапазон В), наоборот, наблюдается их усиление $W_1 > W_2$.

4. ЗАВИСИМОСТЬ ШИРИНЫ СПЕКТРОВ УСИЛЕННОГО СИГНАЛА ОТ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

При изменении плотности плазмы изменяется ширина спектра усиленного сигнала $U(t)$, рис. 6.

Ширина спектра определялась по уровню $A_{\text{max}}/2$, и для спектра магнетрона она была равна 3.8 МГц. Видно, что ширина спектра усиленного сигнала не всегда совпадает с шириной спектра сигнала магнетрона, рис. 6а. Зависимость ширины спектра импульса усилителя от плотности плазмы показана на рис. 7. В области максимального усиления при $6.5 < n < 9$ отн. ед. на рис. 7 можно выделить два диапазона значений плотности плазмы, характеризующиеся разной шириной спектра. В диапазоне А ($6.5 < n < 7.6$ отн. ед.) спектр имеет большую ширину, в диапазоне В ($7.9 < n < 9$ отн. ед.) – малую.

Таким образом, в диапазоне А, в котором наблюдалось подавление шумов, спектр усиленного сигнала широкий, в диапазоне В ширина спектра усиленного сигнала примерно равна ширине спектра входного сигнала.

5. ЗАВИСИМОСТЬ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ ШУМОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОТСУТСТВИЕ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Назовем средней частотой шумового СВЧ-сигнала при $P = 0$ частоту f_1 , для которой энергия шумов при $f < f_1$ равна энергии при $f > f_1$.

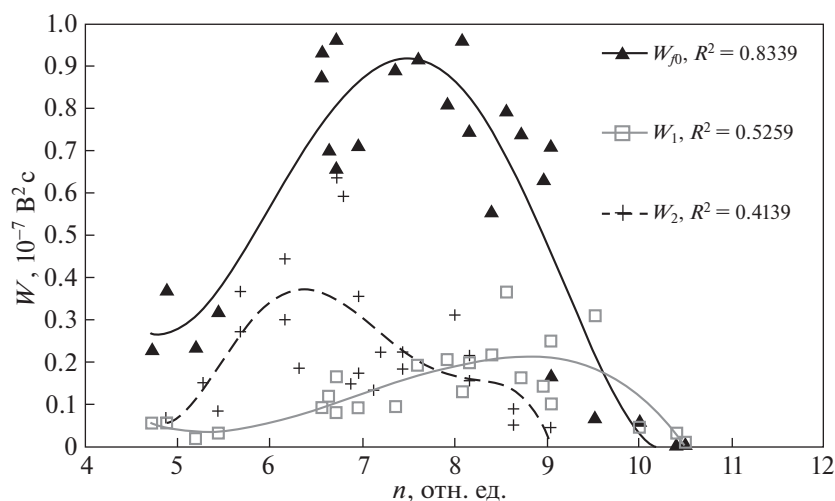


Рис. 4. Зависимости $W_{f_0}(n)$ и $W_1(n)$ для значения мощности входного сигнала от магнетрона P_0 (≈ 25 кВт), а также зависимость $W_2(n)$ для $P = 0$. Величина R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации экспериментальных точек кривыми.

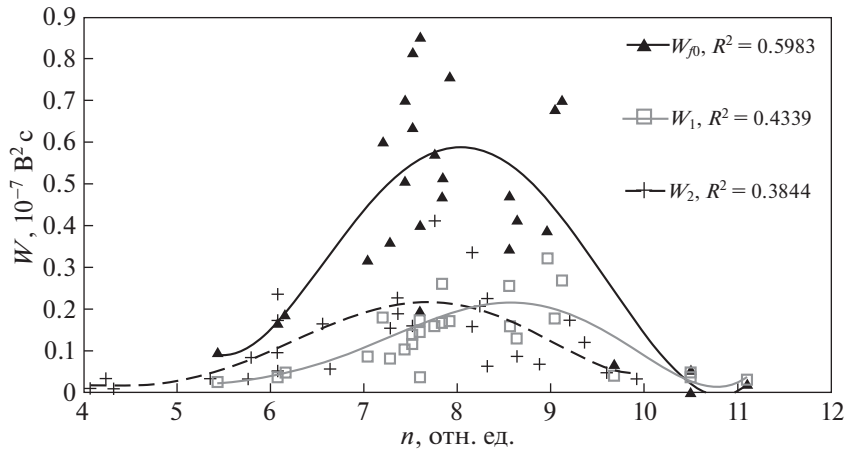


Рис. 5. Зависимость энергии усиленного сигнала $W_{f_0}(n)$, зависимость энергии шумов при наличии сигнала от магнетрона $W_1(n)$ при мощности входного сигнала $P = 0.4P_0$, а также зависимость энергии шумового излучения $W_2(n)$ от плотности плазмы в отсутствие входного сигнала, $P = 0$.

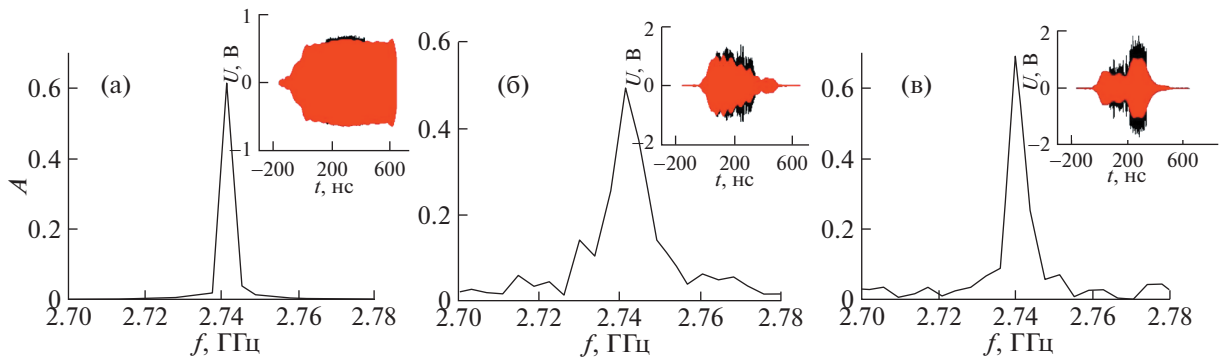


Рис. 6. Спектры импульсов $U(t)$ магнетрона (а) и плазменного усилителя (б, в) при $n = 6.64$ и 8.72 отн. ед. соответственно. Мощность входного сигнала $P = P_0$. На вставках показаны осциллограммы $U(t)$. Черным цветом показан полный сигнал, а серым – часть сигнала, прошедшая через фильтр $f_0 \pm 15$ МГц.

В соответствии с теорией максимальное усиление с ростом плотности плазмы должно наблюдаться на более высоких частотах, что и демонстрирует рис. 8.

6. СВОДКА ОСНОВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Средние значения измеренных величин в двух диапазонах *A* и *B* сведены в таблице 1 ($P = P_0$).

Из таблицы следует:

1. В диапазоне *A* регистрируется максимальное значение $\langle W_{f_0} \rangle$ при относительно высоком уровне стабильности. В диапазоне *B* величина W_{f_0} значительно уменьшается, и ухудшается стабильность.
2. В диапазоне *A* регистрируется минимальное значение шумов $\langle W_1 \rangle$, их энергия примерно в 2 раза меньше, чем в диапазоне *B*. Это приводит к то-

Таблица 1.

n , отн.ед	$\langle W_{f_0} \rangle, 10^{-8} \text{ B}^2 \text{ c}$	$\langle W_1 \rangle, 10^{-8} \text{ B}^2 \text{ c}$	$\langle W_2 \rangle, 10^{-8} \text{ B}^2 \text{ c}$	$\langle \Delta f \rangle$, МГц	$\langle W_1 \rangle / \langle W \rangle$, %
Диапазон <i>A</i> 6.5–7.8	7.95 ± 1.05	1.53 ± 0.39	2.9 ± 1.83	10.2 ± 2.3	16 ± 2.5
Диапазон <i>B</i> 8–9	7.16 ± 1.24	3.39 ± 1.12	1.37 ± 0.96	6 ± 0.9 Гц	36 ± 6.6

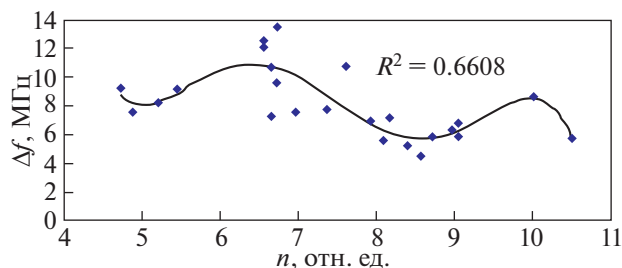


Рис. 7. Зависимость ширины спектра импульса усилителя от плотности плазмы, $P = P_0$.

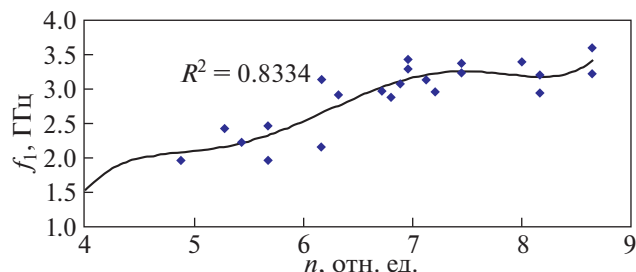


Рис. 8. Зависимость средней частоты шума от плотности плазмы для $P = 0$.

му, что доля энергии шумов в СВЧ-импульсе в диапазоне A равна 16%, а в диапазоне B — 36%, и это происходит несмотря на то, что уровень шумов в отсутствие входного сигнала $\langle W_2 \rangle$ в диапазоне A больше.

3. В диапазоне B ширина спектра усиленного сигнала примерно равна ширине линии магнетрона. В диапазоне A ширина спектра усиленного сигнала превышает ширину линии магнетрона более чем в 2 раза.

4. Включение магнетрона приводит к стабилизации энергии шумов. При этом в диапазоне A энергия $\langle W_1 \rangle$ становится меньше $\langle W_2 \rangle$, то есть наблюдается подавление шумов. В диапазоне B напротив, включение магнетрона приводит к тому, что $\langle W_1 \rangle$ начинает превышать $\langle W_2 \rangle$.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

На основании линейной теории были проведены расчеты зависимости мощности излучения от плотности плазмы [9]. Расчет выполнялся в приближении бесконечно тонкой трубчатой плазмы и бесконечно большого магнитного поля. Вычислялся коэффициент усиления мощности излучения на частоте 2.74 ГГц. Он равен $K = \exp(2L\delta K)$, здесь δK — пространственный инкремент роста амплитуды электрического поля волны в плазме, L — длина системы плазма-пучок. Геометрия расчета совпадала с геометрией эксперимента: радиус металлического волновода 5 см, радиусы трубчатой плазмы 2.1–1.9 см, радиусы трубчатого пучка 1.7–1.3 см.

Результат расчета приведен на рис. 9. Из этого рисунка следует, что максимальное значение коэффициента усиления равно 42 дБ. Расчет проводился для пространства взаимодействия длиной $L = 55$ см. В реальной установке $L = 75$ см, однако в эксперименте в пространстве взаимодействия расположен поглотитель длиной 30 см, поэтому сравнить расчетные значения K с экспериментальными значениями невозможно. Если счи-

тать, что эффективная длина взаимодействия в эксперименте равна 55 см, то линейная теория позволяет объяснить наблюдаемый коэффициент усиления равный 39 дБ (от 25 кВт до 150 МВт). Из линейной теории также следует, что ширина полосы усиления по плотности плазмы равна 60% (по уровню 3 дБ), что превышает результат эксперимента в 1.3–1.4 раза, рис. 4.

На рис. 10 показаны расчетные зависимости K от частоты входного сигнала для различных значений плотности плазмы. Из рисунка следует, что максимальное значение коэффициента K с ростом плотности плазмы увеличивается и достигается на более высоких частотах. Ширина полосы усиления по частоте при фиксированном значении плотности плазмы равна 32% (по уровню 3 дБ).

На рис. 11 представлено сравнение экспериментальных зависимостей энергии излучения $W_{f_0}(n)$ при разных значениях мощности входного сигнала рис. 4, 5 с расчетной кривой линейного коэффициента усиления $K(n)$ рис. 9.

Плотность плазмы измерялась в относительных единицах. Для наложения экспериментальных кривых на график расчетной кривой было сделано предположение, что расчетная кривая

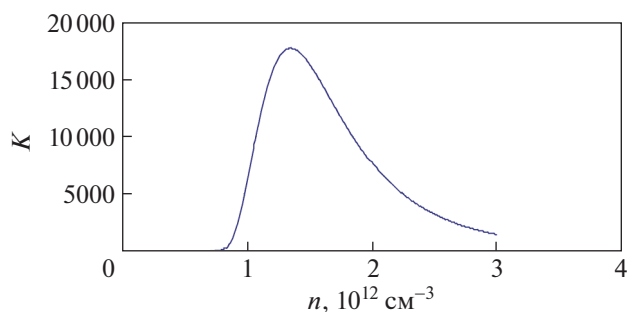


Рис. 9. Расчетная зависимость линейного коэффициента усиления мощности входного сигнала на частоте 2.74 ГГц от плотности плазмы, $K(n)$, для $L = 55$ см.

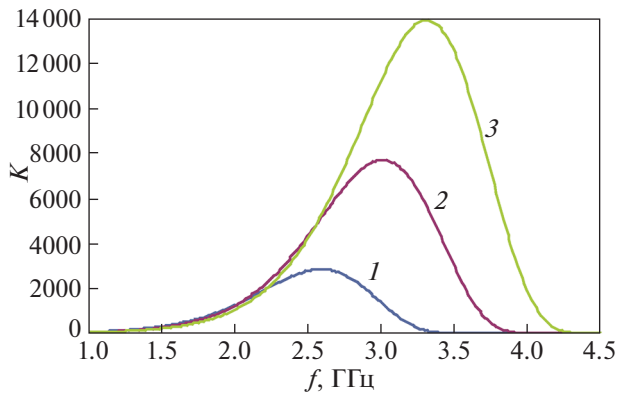


Рис. 10. Расчетная зависимость линейного коэффициента усиления мощности входного сигнала от частоты входного сигнала, $K(f)$. Кривые 1–3 соответствуют значениям плотности плазмы $n = 1; 1.2; 1.36 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

должна отражать экспериментальную зависимость энергии излучения для входного сигнала с малым уровнем мощности. При этом оказалось, что экспериментальное значение $n = 6$ отн. ед. соответствует $n = 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Если приведенные выше предположения верны, то мы получаем соотношение экспериментальных значений n в отн. ед. и абсолютных значений n . Другой способ перевода экспериментальных значений n в отн. ед. в абсолютные значения n основан на сравнении результатов эксперимента рис. 8 и расчета рис. 10. Предположим, что средняя частота шумового излучения в отсутствие входного сигнала f_1 для

данного значения плотности плазмы совпадает с частотой, при которой коэффициент усиления достигает максимального значения. Тогда, согласно рис. 10, значения частот 2.57, 3, 3.3 ГГц должны достигаться при значениях плотности плазмы $n = 1; 1.2; 1.36 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Из рис. 8 следует, что такие значения средних частот шумового излучения, 2.57, 3, 3.3 ГГц, наблюдаются при $n = 6.2, 6.7, 7.2$ отн. ед. соответственно. Это означает, что $n = 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ соответствуют $n = 6.2, 5.6, 5.3$ отн. ед. Таким образом, два независимых способа сравнения результатов эксперимента с расчетом приводят к примерно одинаковому результату калибровки значений плотности плазмы $n = 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3} \approx 6$ отн. ед.

Резкое расхождение результатов эксперимента и расчета возникает при $n > 1.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (9 отн. ед.). В эксперименте в этом диапазоне значений плотности плазмы наблюдается резкое падение как энергии усиленного сигнала при разных значениях мощности входного сигнала, так и энергии шума в отсутствие входного сигнала. Тогда как по линейной теории такого срыва мощности быть не должно. Напомним, что приведенные выше расчеты были проведены в приближении бесконечно большого магнитного поля $\omega_H \gg \omega_p$. В эксперименте, согласно используемой абсолютной калибровке значений плотности, $\omega_H > \omega_p$, а при значении плотности $n = 1.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ выполняется соотношение $\omega_H \approx \omega_p$ ($\omega_H = 8 \times 10^{10} \text{ рад/с}$, $\omega_p = 7 \times 10^{10} \text{ рад/с}$).

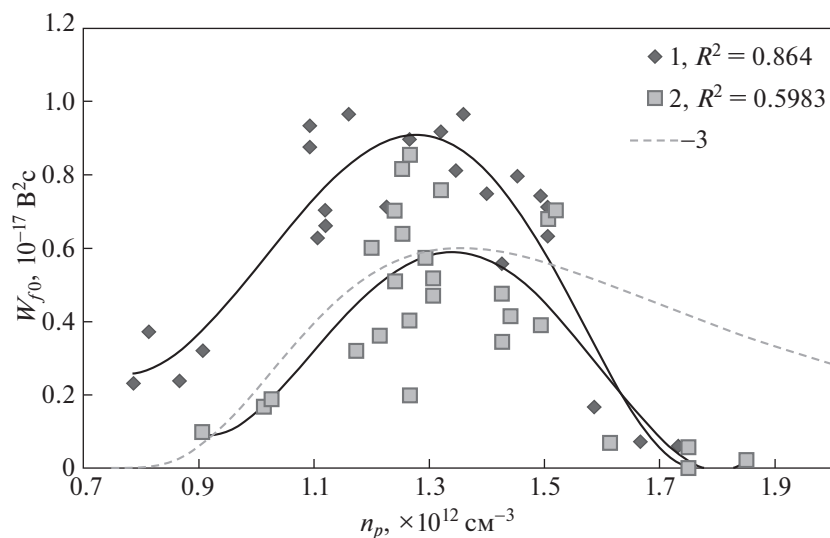


Рис. 11. Сравнение результатов расчета и эксперимента. Кривые 1 и 2 – экспериментальные зависимости $W_{f_0}(n)$, построенные для случаев $P = P_0$ и $P = 0.4P_0$ соответственно. Кривая 3 – расчетная зависимость $K(n)$.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы два режима плазменного СВЧ-усилителя: при подаче на вход монохроматического сигнала и без входного сигнала.

Плазменный СВЧ-усилитель в отсутствие входного сигнала усиливает собственные шумы РЭП. В результате возникает мощное шумовое излучение в полосе частот около 2 ГГц. Средняя частота этого излучения, в соответствии с линейной теорией, возрастает с увеличением плотности плазмы.

При включении входного сигнала имеют место два процесса: усиление входного сигнала и усиление шумов РЭП. При этом параметры шумов, которые были измерены в отсутствие входного сигнала, изменяются. Энергия шумов при подаче сигнала на вход устройства становится более стабильной, то есть хорошо воспроизводится от одного СВЧ-импульса к другому. В области малых значений плотности плазмы наблюдается эффект подавления шумов. Он состоит в том, что включение входного сигнала уменьшает усиление шумов РЭП. В более плотной плазме наблюдается обратный эффект – включение входного сигнала увеличивает усиление шумов РЭП. Таким образом, в редкой плазме достигается максимальное отношение энергии сигнала на частоте внешнего источника к энергии шумов. При изменении плотности плазмы происходит изменение ширины спектра излучения на частоте входного сигнала. При малых значениях плотности плазмы ширина спектра усиленного сигнала более чем в 2 раза превышает ширину спектра входного сигнала. При больших значениях плотности плазмы ширина спектра усиленного сигнала примерно совпадает с шириной спектра входного сигнала.

Некоторые экспериментальные закономерности удается качественно объяснить на основе линейной теории. Максимальное усиление входного сигнала в эксперименте и в расчете, проведенном в соответствии с линейной теорией, имеет место в одном и том же диапазоне значений плотности плазмы. Расчетные значения ширины полосы усиления по частоте и по плотности плазмы не противоречат экспериментальным значениям. Линейная теория позволяет качественно описать зависимость средней частоты шумов от плотности плазмы плазменного усилителя в отсутствие входного сигнала. Другие закономерности, обнаруженные в этой работе, на данный момент объяснения не имеют и будут исследованы в дальнейшем. В настоящее время проводится численное моделирование процесса усиления монохро-

матического СВЧ-сигнала при наличии шумовой модуляции тока РЭП с помощью программы “КАРАТ”.

Авторы выражают благодарность И.Н. Карташову, М.В. Кузелеву, А.В. Пономарёву, Д.К. Ульянову и Н.И. Карбушеву за полезное обсуждение текста статьи и сделанные замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-08-00625А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shiffner D., Ivers J.D., Kerslick G.S., Nation J.A., Schächter L.A.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. P. 899.
2. *Волков А.Б., Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Ковалев Н.Ф., Кольчугин Б.Д., Кораблев Г.С., Кулагин И.С.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. С. 6.
3. *Lau Y.Y., Friedman M., Krall J., Serlin V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. V. 18. P. 546.
4. *Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Kolganov N.G., Kovalev N.F., Petelin M.I., Savelyev A.V., Soluyanov E.I., Yastrebov V.V., Fuks M.I., Schamiloglu E.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30 (3). P. 1041.
5. *Jun Zhang, Dian Zhang, Yuwei Fan, Juntao He, Xingjun Ge, Xiaoping Zhang, Jinchuan Ju, Tao Xun* // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. 010501. <https://doi.org/10.1063/1.5126271>
6. *Zhenbang Liu, Hua Huang, Xiao Jin, Lurong Lei, Lei Zhu, Lele Li, Shifeng Li, Wenkang Yan, Hu He* // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. 093110. <https://doi.org/10.1063/1.4962760>
7. *Иванов И.Е., Стрелков П.С., Шумейко Д.В.* // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54 (9). С. 1091.
8. *Strelkov P.S., Ivanov I.E., Tarakanov V.P.* // 10th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”, Nyzhny Novgorod–Moscow, 2017. P. 208.
9. *Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С.* Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: ЛЕ-НАНД, 2018.
10. *Стрелков П.С.* // УФН. 2019. Т. 189 (5). С. 494.
11. *Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В.* // Физика плазмы. 2016. Т. 42. С. 644.
12. *Лоза О.Т., Пономарев А.В., Стрелков П.С., Ульянов Д.К., Шкварунец А.Г.* // Физика плазмы. 1997. Т. 23. С. 222.
13. *Карташов И.Н., Кузелев М.В., Стрелков П.С., Тараканов В.П.* // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 250.
14. *Алексеев И.С., Иванов И.Е., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Ульянов Д.К.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 277.
15. *Стрелков П.С., Тараканов В.П., Диас Михайлова Д.Е., Иванов И.Е., Шумейко Д.В.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 335.
16. *Иванов И.Е.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 633.