

На правах рукописи



Булейко Алла Борисовна

**Плазменные релятивистские СВЧ-усилители шума**

Специальность 1.3.9 Физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2021

Работа выполнена в Институте физических исследований и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН)

**Научный руководитель:** доктор физ.-мат. наук, профессор Лоза Олег Тимофеевич

**Официальные оппоненты:**

Кузелев Михаил Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет;

Вдовин Владимир Александрович, кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ РАН).

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

Защита состоится 06.12.21г.

на заседании диссертационного совета 24.1.223.02 при ИОФ РАН по адресу:  
г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН  
<https://www.gpi.ru/news/dissertation-defences/>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь

Диссертационного совета 24.1.223.02

канд. физ.-мат. наук



Воляк Т.Б.

тел. +7 499 503-8777 доб.1-47

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В последние годы наблюдается растущий интерес к созданию мощных источников широкополосного СВЧ-излучения, ярким представителем которых является плазменный мазер, обладающий уникальными характеристиками излучения. Ни один другой прибор не имеет возможности эффективно генерировать микроволновые импульсы на субгигаваттном уровне мощности и при этом изменять частоту излучения каждого импульса в диапазоне 2...3 октавы.

Несмотря на долгую историю исследований, ранее в экспериментальных работах не удавалось реализовать плазменный СВЧ-генератор с инверсной конфигурацией, мегаваттным уровнем мощности и полосой перестройки частоты СВЧ-излучения от импульса к импульсу, границы которой отличаются в несколько раз. С переходом к импульсно-периодическим плазменным мазерам данная тема стала актуальной.

Плазменный мазер как усилитель шума на основе взаимодействия релятивистского электронного пучка (РЭП) с плазмой начал рассматриваться в качестве эффективного источника излучения с 2013 года [1], вначале с помощью численного моделирования [2]. В 2019 г. практически одновременно были опубликованы первые результаты экспериментальных исследований плазменного мазера-усилителя шума, независимо проведенных двумя группами исследователей [3, 4].

Очевидной трудностью в теоретических расчетах микроволновых источников на основе усилителей шума являлось незнание точного уровня начального шума. Именно этот уровень определяет длину плазменно-пучкового взаимодействия, на которой усиленный сигнал достигает максимального значения, т.е. оптимальный размер будущего прибора. В связи с этим актуальным является вопрос о мощности волн с шумоподобным спектром на входе плазменного мазера, которые впоследствии усиливаются в процессе плазменно-пучкового взаимодействия.

Другим вопросом, не имеющим точного ответа, является вопрос об отражениях и трансформациях плазменных волн на границах, которые обеспечивают обратную связь в усилителе и при достаточном их уровне превращают усилитель в автогенератор. Попытки определить коэффициенты отражения предпринимались с помощью аналитических и численных расчетов [5], в модельном численном эксперименте [6], но не в натурном эксперименте.

При исследовании шумового излучения плазменного мазера актуальной является задача по изучению возможности и особенностей процессов смены режима работы мазера от автогенератора к усилителю шума и наоборот с измерением мощности, эффективности и других параметров излучения, которые зависят, в частности, от степени подавления обратной связи. Для устранения обратной связи в плазменном лазере при проведении подобных исследований можно использовать СВЧ-поглотители. Однако, если СВЧ-поглотитель недостаточно эффективен, то и усиление до перехода в режим автогенерации будет не очень большим. А создание СВЧ-поглотителей, одинаково эффективных в широкой полосе частот, является серьезной проблемой.

Существует другой, абсолютный способ устранения обратной связи и снятия, таким образом, ограничений на коэффициент усиления шумов в лазере, связанных с поглотителями. В случае достаточно короткого импульса РЭП длительность процесса замыкания петли обратной связи превышает длительность электронного пучка. Этот способ построения плазменного усилителя СВЧ-шума не зависит от СВЧ-поглотителей, а режим автогенерации вообще невозможен. Еще никогда плазменные мазеры не работали с импульсами РЭП с длительностью тока менее 20 нс, при которой [7] была достигнута рекордная для плазменных мазеров-автогенераторов эффективность СВЧ-генерации 14% при мощности почти 0.5 ГВт. Кратное снижение длительности импульса до единиц наносекунд представляется поэтому особенно актуальным.

**Объектом исследования** являются плазменные мазеры – автогенератор и усилитель шума.

**Предметом исследования** являются параметры выходного СВЧ-излучения плазменных мазеров – автогенератора и усилителя шума.

### **Цели диссертационной работы**

1. Экспериментальное доказательство возможности генерации СВЧ-излучения с перестройкой частот в широкой полосе плазменным мазером с инверсной конфигурацией, т.е. с плазмой внутри электронного пучка.

2. Измерения погонного коэффициента усиления плазменной волны электронным пучком и мощности усиливаемых начальных шумов.

3. Экспериментальная демонстрация усиления шума при плазменно-пучковом взаимодействии с подавлением обратной связи СВЧ-поглотителями и смены режима работы плазменного мазера между усилителем шума и автогенератором.

4. Экспериментальная демонстрация усиления шума при плазменно-пучковом взаимодействии с подавлением обратной связи за счет малой длительности импульса РЭП.

### **Научная новизна**

1. Впервые экспериментально продемонстрировано излучение плазменного мазера с инверсной конфигурацией, т.е. с плазмой внутри электронного пучка, в полосе частот от 3 до 9 ГГц в режиме автогенерации и в полосе от 3 до 15 ГГц в режиме усиления шумов.

2. Впервые экспериментально измерен погонный коэффициент усиления плазменной волны релятивистским электронным пучком, равный  $0.1...0.2 \text{ см}^{-1}$ . Впервые предложена методика и корректно измерен уровень начального шума, усиливаемого электронным пучком в плазме мазера. Впервые продемонстрирована смена режима работы плазменного мазера от

усиления СВЧ-шума к автогенерации при превышении длиной плазменно-пучкового резонатора порогового значения.

3. Впервые экспериментально продемонстрировано эффективное усиление СВЧ-шума при плазменно-пучковом взаимодействии без применения СВЧ-поглотителей за счет малой длительности импульса тока.

4. Впервые достигнуто и экспериментально продемонстрировано СВЧ-излучение при плазменно-пучковом взаимодействии с электронным КПД 26% по энергии импульса и почти 100% по пиковой мощности, чтократно превышает все ранее достигнутые показатели.

### **Теоретическая значимость**

Экспериментально подтверждены результаты теоретических расчетов погонного коэффициента усиления плазменной волны релятивистским электронным потоком:  $0,1 \dots 0,2 \text{ см}^{-1}$ .

### **Практическая значимость**

Результаты диссертационной работы могут быть непосредственно использованы для создания источников СВЧ-импульсов суб- и гигаваттного уровня мощности с длительностью до нескольких наносекунд и частотой, перестраиваемой в полосе 2...3 октавы до десятков ГГц и электронным КПД по энергии импульса 25% и выше.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Плазменный мазер с инверсной конфигурацией, т.е. с плазмой внутри электронного пучка, может работать в полосе частот СВЧ-излучения с трехкратным отличием верхней и нижней границ на примерно одинаковом мегаваттном уровне мощности и в режиме автогенерации, и в режиме усиления шумов.

2. Экспериментально измеренный погонный коэффициент усиления плазменной волны электронным потоком, равный  $0,1 \dots 0,2 \text{ см}^{-1}$ , хорошо согласуется с результатами расчета по линейной теории.

3. Измеренная мощность начального шума, усиливаемого в медленной плазменной волне электронным пучком с мощностью 450 МВт и длительностью 2 нс, превышает 1 МВт, что существенно больше результатов других авторов, полученных с более мощными электронными потоками большей длительности.

4. Экспериментально достигнутый электронный КПД по энергии импульса излучения плазменного усилителя шума, равный 26% при средней за импульс мощности порядка 100 МВт, соответствует результатам расчетов по нелинейной теории плазменных СВЧ-усилителей и кратно превышает все предыдущие экспериментальные достижения.

### **Апробация результатов работы**

По материалам диссертации опубликовано 6 статей [А1–А6] в рецензируемых научных журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук или индексируемых международными базами данных Web of Sciences и Scopus.

Материалы диссертационной работы докладывались и опубликованы в трудах всероссийских и международных конференций [А7–А14]:

1. XLIV Международная (Звенигородская) конференции по физике плазмы и УТС, 13—17 февраля 2017 года, г. Звенигород;
2. 27-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». г. Севастополь, 10-16 сентября 2017 г.;
3. XV молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии». г. Москва, 7 декабря 2017 г.;
4. IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования

и технологии» ЛАПЛАЗ-2018 г. Москва, 30 января-1 февраля 2018 г.;

5. VI Всероссийская Микроволновая конференция. Доклады, г. Москва, 28-30 ноября 2018 г.;

6. XLVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, март 18-22, 2019 г.;

7. 29-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Крымико-2019. Севастополь, сентябрь 2019 г.;

8. XLVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, март 16-20, 2020 г.;

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цели работы, актуальность, новизна, практическая ценность результатов и защищаемые положения, описана структура и объем работы.

Диссертационная работа демонстрирует результаты экспериментального исследования плазменных мазеров – автогенератора с инверсной конфигурацией и двух усилителей шума: первого – с длинным импульсом релятивистского электронного пучка и подавлением обратной связи СВЧ-поглотителями и второго – с коротким импульсом и полным отсутствием обратной связи.

Глава 1 посвящена излучению плазменного мазера с инверсной конфигурацией, т.е. транспортировкой электронного потока снаружи от плазмы, а не внутри, как в большинстве плазменных мазеров. Такая конфигурация мазера, во-первых, оптимальна при более высоких токах электронного пучка и мощностях излучения и, во-вторых, ориентирована на импульсно-периодический режим работы, поскольку значительно облегчает охлаждение коллектора электронов, в качестве которого выступает внешний электрод коаксиального волновода.

Плазменные мазеры с инверсной конфигурацией существовали и ранее, крайне редко как автогенераторы излучения, а в основном, как усилители внешнего сигнала [8, 9]. В этих плазменных СВЧ-усилителях осаждение электронного потока осуществлялось на внутренний электрод коаксиального волновода, как показано на Рис.1. Плазменные мазеры-автогенераторы излучения с инверсной конфигурацией (см. например, [10]) ранее демонстрировали весьма скромные показатели по широкополосности.

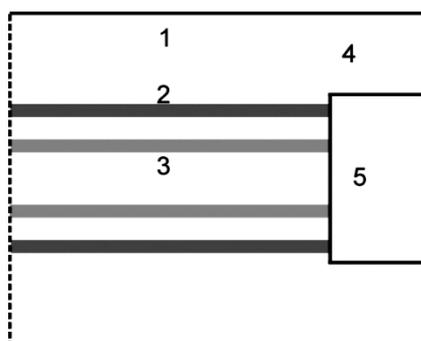


Рис. 1. Упрощенная схема одного из возможных вариантов плазменного мазера. 1 – волновод, 2 и 3 – релятивистский электронный пучок и плазма, или наоборот, 4 – коаксиальный волновод, 5 – его центральный электрод

Плазменные мазеры-усилители шума как основной объект исследования в диссертации предполагалось создавать с прицелом на дальнейшее использование в импульсно-периодическом режиме работы. Именно поэтому оценка возможности использования инверсной конфигурации для построения плазменного мазера с широкой полосой излучаемых частот была логичной предпосылкой проведения основной части работы, связанной с усилением шумов.

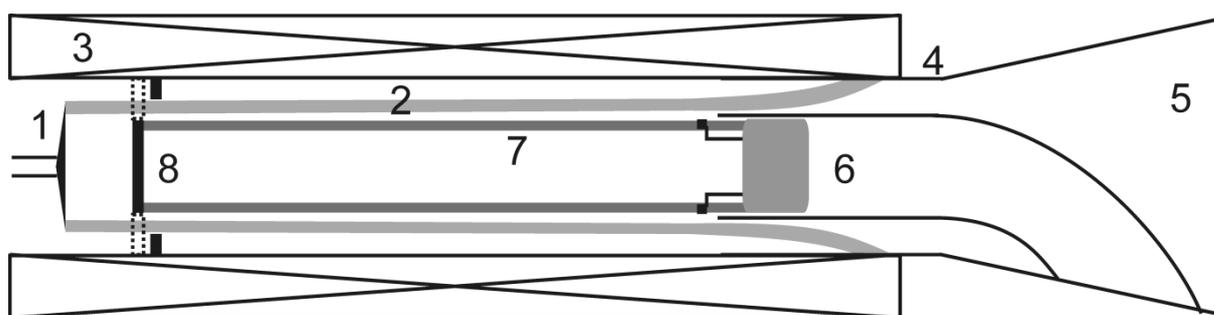


Рис. 2. Плазменный автогенератор СВЧ-излучения с инверсной конфигурацией и осаждением РЭП на стенки внешнего электрода коаксиального волновода: 1 – взрывоэмиссионный катод, 2 – РЭП, 3 – соленоид, 4 – коаксиальный волновод, 5 – рупор, 6 – источник плазмы, 7 – плазма, 8 – ограничитель плазмы

В этой части диссертационной работы был впервые экспериментально продемонстрирован плазменный мазер с полосой электронной перестройки частоты излучения от импульса к импульсу в несколько раз в диапазоне от 3 до 9 ГГц (Рис. 3) при мощности 20 МВт. Коллектором электронного пучка в этом мазере служил не внутренний, а внешний, легко охлаждаемый снаружи электрод коаксиального волновода, как показано на Рис. 2. Проведенная работа позволила создать конструкцию плазменного мазера, продемонстрировавшего широкополосность СВЧ-излучения и пригодного для работы с большой средней мощностью периодических импульсов, и на этой основе перейти к постепенному решению задач усиления шумов, описанных в Главе 2 и Главе 3.

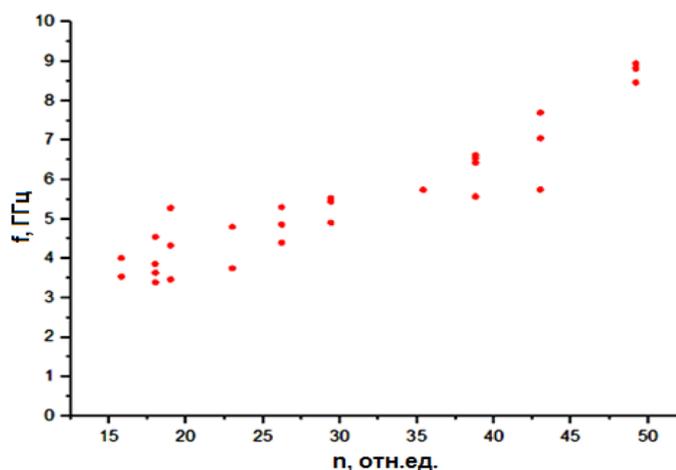


Рис. 3. Зависимость частоты излучения  $f$  плазменного мазера-автогенератора от концентрации плазмы  $n$  на уровне мощности 20 МВт. Точками обозначены частоты излучения с наибольшей спектральной плотностью мощности

В исследованиях, описанных в Главе 2, экспериментально проверялись возможность и условия смены режима работы плазменного мазера от автогенератора к усилителю шума и обратно. Эта часть диссертационной работы проводилась с плазменным мазером на базе того же ускорителя с длительностью импульса 45 нс, который применялся в экспериментах, описанных в Главе 1. Подавление обратной связи и работу плазменного

мазера в режиме усиления шума обеспечивали СВЧ-поглотители, как это обычно делается при построении СВЧ-усилителей. В диссертационной работе впервые была экспериментально решена задача измерения погонного коэффициента усиления электронным пучком плазменной волны, который ранее только рассчитывался.

Полученные зависимости среднеквадратичного значения (RMS) напряженности электрического поля выходного СВЧ-излучения  $E$  от длины  $L$  для двух концентраций плазмы, более низкой  $N_{p1}$  и более высокой  $N_{p2}$ , представлены на Рис. 4 и Рис. 5.

Зависимость  $E(L)$  для низкой концентрации плазмы  $N_{p1}$  на Рис. 4, состоит из области экспоненциального роста усиленного шума с ростом длины  $L$  до порогового значения длины  $L_{th} \approx 28$  см, скачкообразного перехода и области автогенерации при  $L > L_{th}$ . Наклон линейного тренда точек, обозначенных как шум при  $L < L_{th}$ , позволяет оценить линейный инкремент  $\delta k \approx 0,2$  см<sup>-1</sup> (с учетом всех точек этой области  $\approx 0,25$  см<sup>-1</sup>). После скачкообразного перехода в режим автогенерации с обратной связью наклон линии при  $L > L_{th}$  становится менее крутым, т.е. процесс передачи энергии РЭП плазменной волне переходит в нелинейное насыщение.

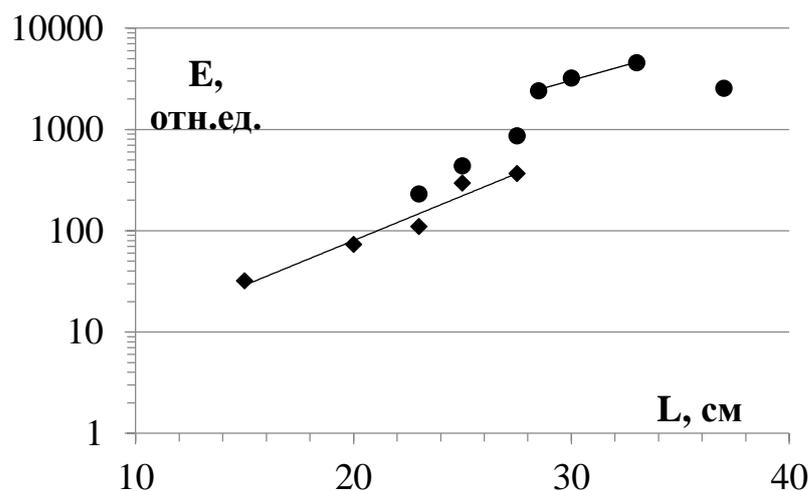


Рис. 1. Зависимость среднеквадратичной напряженности поля  $E$  от длины  $L$  для низкой концентрации плазмы  $N_{p1}$ : (♦) шум; (•) шум с выделенными частотами, характерными для режима автогенерации

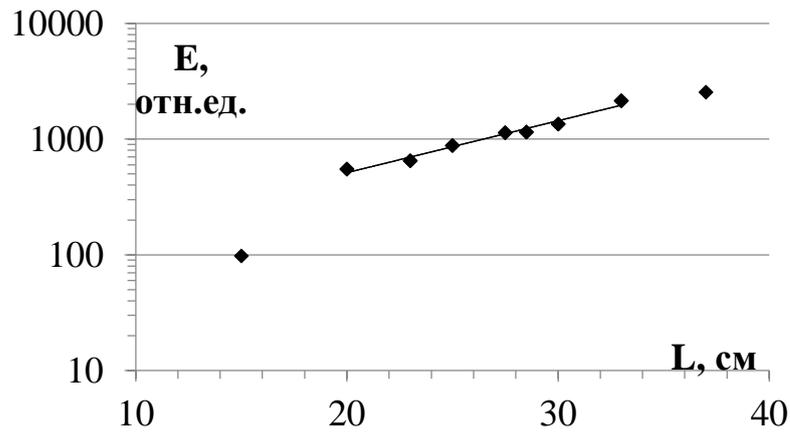


Рис. 5. Зависимость среднего поля СВЧ-излучения  $E$  от длины  $L$  для высокой концентрации плазмы  $N_{p2}$

Для более высокой концентрации плазмы  $N_{p2}$  однозначное отнесение спектров к усилению шума или к автогенератору было не так очевидно. При усилении шума погонный коэффициент равен  $\delta k \approx 0,1 \text{ см}^{-1}$  (Рис. 5), что в два раза ниже, чем для низкой концентрации плазмы. Это снижение  $\delta k$  с ростом концентрации плазмы находится в достаточно хорошем согласии с расчетами, описанными в [11].

Наибольшая ширина спектра была достигнута для высокой концентрации плазмы при сохранении нижней границы на уровне частоты отсечки выходного волновода 2,9 ГГц верхняя частота спектра возросла с  $\sim 9$  ГГц для концентрации  $N_{p1}$  до  $\sim 15$  ГГц для концентрации  $N_{p2}$ , Рис. 6.

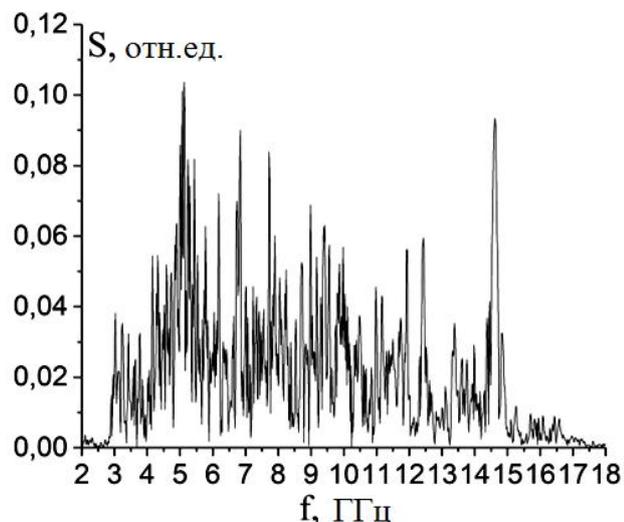


Рис. 5. Спектр выходного поля СВЧ-излучения для высокой концентрации плазмы  $N_{p2}$

Результаты исследований, описанных в Главе 2, позволили провести оценку длины плазменно-пучкового взаимодействия мазера, необходимой для работы в качестве усилителя шума с мощностью, близкой к уровню насыщения: 35...40 см. Этот результат хорошо совпадает с результатами численных расчетов, которые ранее проводились другими исследователями, напр., [12]. Кроме того, интервал между частотами продольных мод в спектре излучения плазменного мазера, работавшего в режиме автогенератора, позволили оценить групповую скорость плазменной волны ( $1,2 \cdot 10^8$  м/с или  $0,4c$ ) и время замыкания петли обратной связи в мазере с фиксированной длиной.

В Главе 3 описаны исследования плазменного мазера, позволившие впервые экспериментально продемонстрировать эффективное усиление СВЧ-шума при плазменно-пучковом взаимодействии без применения СВЧ-поглотителей только за счет достаточно короткого импульса тока. В этой серии экспериментов использовался источник электронов с длительностью импульсов тока РЭП 2,5 нс и мощностью 450 МВт (270 кэВ, 1,7 кА). Средняя мощность СВЧ-импульса на выходе построенного усилителя шума составила 117 МВт, а пиковая мощность достигала почти 0,5 ГВт, Рис. 6. Импульсная энергоэффективность, т.е. отношение энергий импульсов излучения и электронного потока, превысила 25% и кратно превзошла показатели всех известных плазменных мазеров.

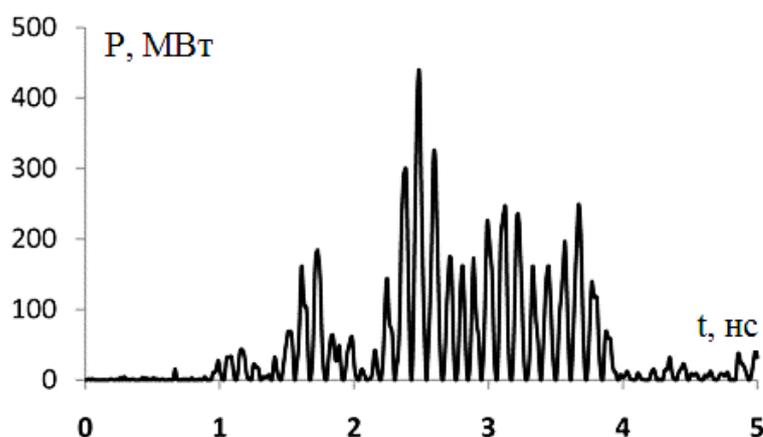


Рис. 6. Зависимость СВЧ мощности от времени при минимальной концентрации плазмы  $n_p = 5$  отн. ед. и длине  $L = 32,5$  см

На Рис. 7 показаны зависимости средней мощности импульса СВЧ-излучения от длины плазменно-пучкового взаимодействия  $L$  для двух значений концентрации плазмы. Точка {5 отн. ед.; 32,5 см; 117 МВт} соответствует импульсу, представленному на Рис. 6.

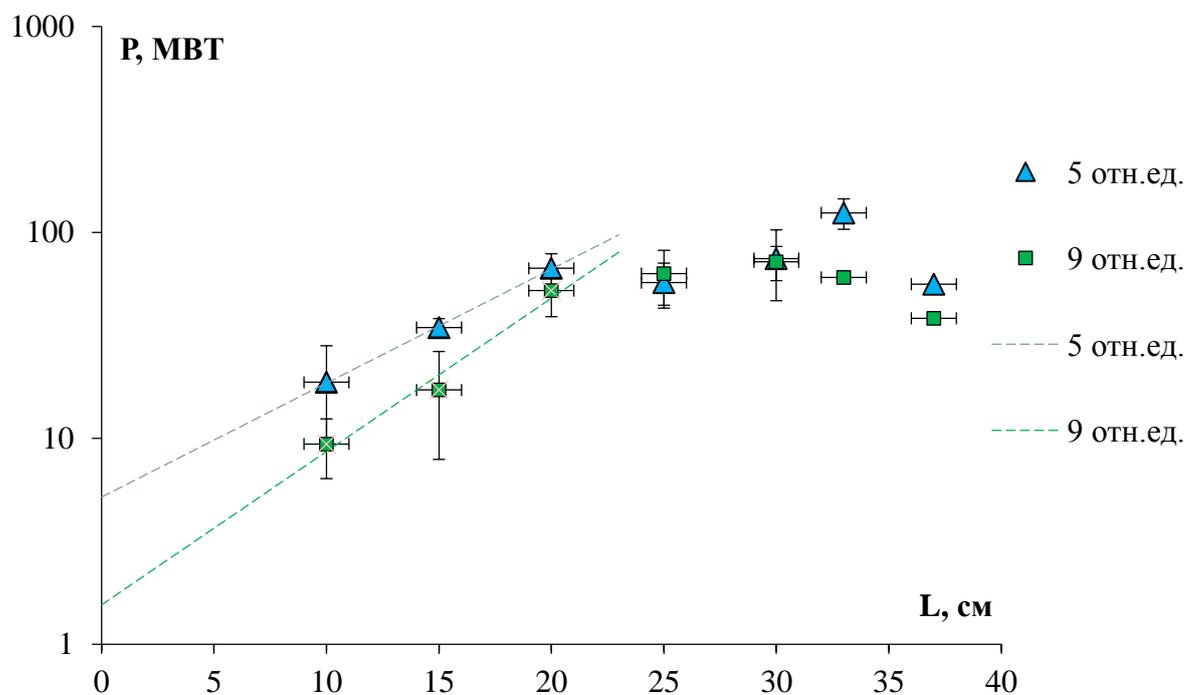
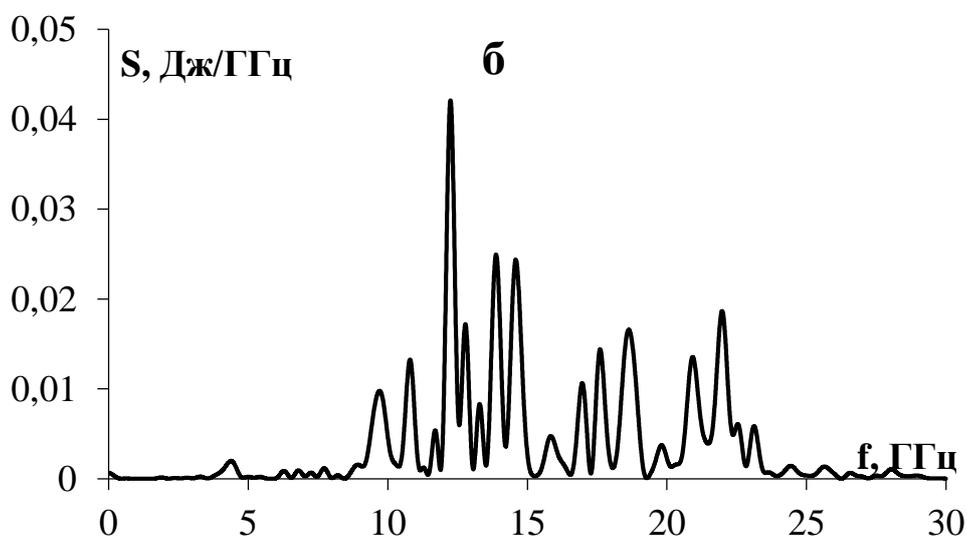
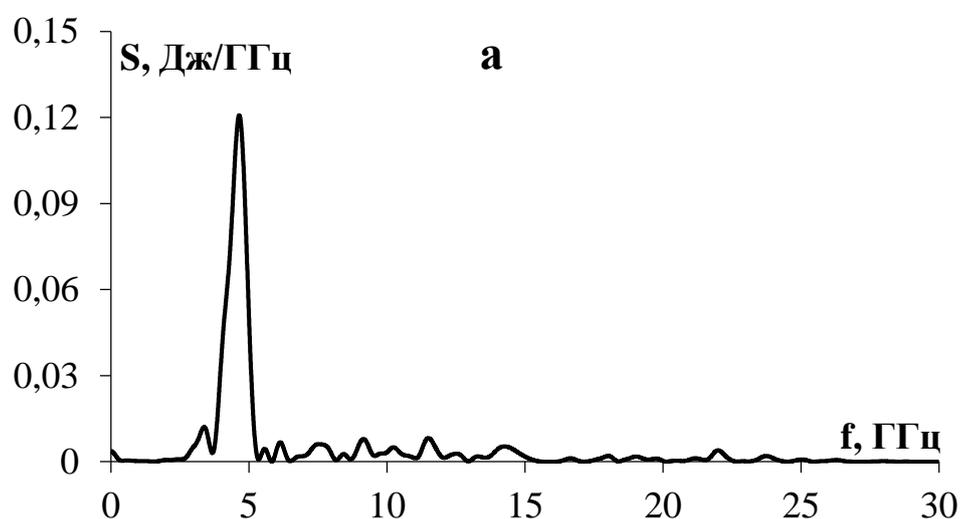


Рис. 7. Мощность СВЧ-излучения  $P$  усилителя шума в зависимости от длины  $L$  для двух значений концентрации плазмы в относительных единицах измерения

Логарифмическая шкала на Рис. 7 позволяет провести количественные оценки погонного коэффициента усиления плазменной волны. Линейная фаза усиления плазменной волны электронным пучком с экспоненциальным ростом амплитуды поля волны по длине заканчивается примерно на длине  $L = 20$  см, нелинейные процессы увеличивают амплитуду волны еще дальше до уровня насыщения на оптимальной длине 30...32 см, а с дальнейшим ростом длины плазменно-пучкового взаимодействия амплитуда падает. Погонный коэффициент усиления волны (инкремент)  $\sim 0,1 \text{ см}^{-1}$  соответствует ранее известным теоретическим значениям. Начальная мощность шума,

определяемая пересечением прямой  $P(L)$  с осью ординат при  $L = 0$ , имеет порядок 1 МВт.

Спектры СВЧ-излучения плазменного мазера зависят от концентрации плазмы, для более плотной плазмы частоты выше. Рис. 8 иллюстрирует эту зависимость для оптимальной длины  $L = 30$  см, при которой энергии СВЧ-импульсов и мощности излучения близки к максимальным для всех концентраций плазмы. Все спектры имели фоновый шум на уровне  $\sim 5$  мДж/ГГц во всем измеряемом диапазоне. Зафиксирована перестройка частоты в диапазоне от 3 до 25 ГГц.



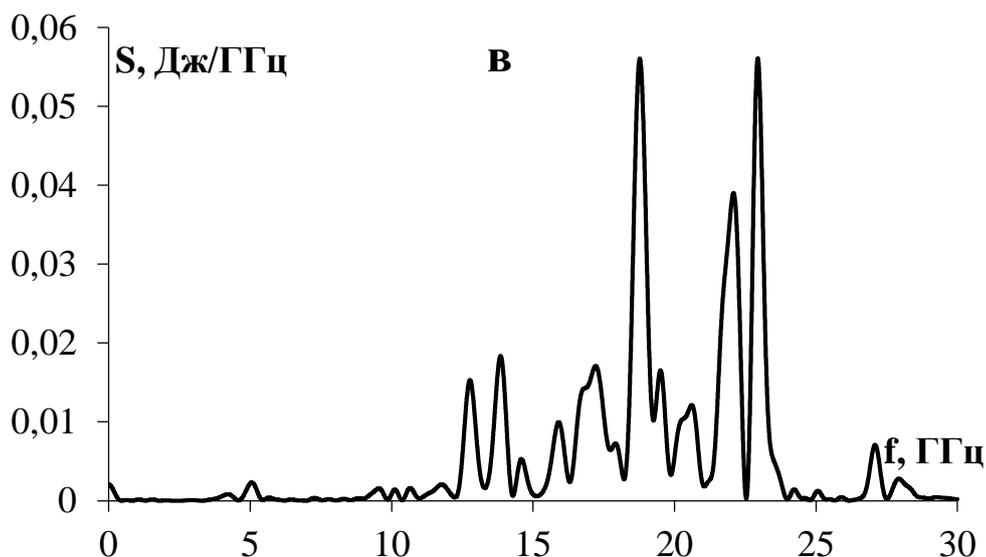


Рис. 8. Спектры СВЧ-излучения для различных концентраций плазмы: 2.5 отн. ед. (а), 26 отн. ед. (б) и 44 отн. ед. (в). Длина плазменно-пучкового взаимодействия 30 см, средняя импульсная мощность СВЧ-излучения  $\sim 100$  МВт

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе проведены экспериментальные исследования работы широкополосных источников импульсов излучения мультимегаваттной мощности - пламенных мазеров: автогенератора с инверсной конфигурацией, длинноимпульсного усилителя шума с подавлением обратной связи СВЧ-поглотителями и высокоэффективного усилителя шума с отсутствием обратной связи.

Создан широкополосный плазменный релятивистский СВЧ-генератор на основе полого волновода с плазмой внутри электронного потока, который осаждается на легко охлаждаемые стенки волновода. Впервые продемонстрирована способность плазменного мазера с такой инверсной конфигурацией к электронной перестройке частоты излучения в несколько раз от импульса к импульсу: от 3 до 9 ГГц при мощности 23 МВт. Тем самым показана принципиальная возможность построения мощного

широкополосного плазменного мазера с инверсной конфигурацией, решающей проблему охлаждения коллектора электронов при работе с большой частотой формирования импульсов.

Проведены эксперименты с плазменным мазером, работающим в режиме усиления шума, когда отсутствие обратной связи обеспечивалось СВЧ-поглотителями. Впервые продемонстрирован переход от режима усиления шума к режиму автоколебаний путем изменения длины плазменно-пучкового резонатора вблизи порогового значения. Впервые в эксперименте измерены погонные коэффициенты усиления плазменной волны электронным пучком для различных концентраций плазмы, их величины  $0,1 \dots 0,2 \text{ см}^{-1}$  хорошо согласуются с результатами линейной теории. Впервые продемонстрировано одновременное излучение частот в полосе 12 ГГц (от 3 до 15 ГГц) в течение десятков наносекунд на мультимегаваттном уровне мощности. Ранее столь широкий спектр излучения регистрировался только интегрально по времени.

В диссертационной работе впервые предложен и создан экспериментальный плазменный мазер, принципиально не имеющий обратной связи вследствие отражений и работающий только как усилитель шума. В результате измерений впервые корректно были получены значения мощности начальных шумов, которые в дальнейшем усиливаются в процессе плазменно-пучкового взаимодействия. Созданный мазер использовал сильноточный электронный пучок с малой длительностью импульса 2,5 нс и поэтому был практически не подвержен эффекту укорочения импульса. Благодаря этому впервые удалось в эксперименте достичь давно предсказанной нелинейной теорией энергоэффективности излучения 26% (отношения полных энергий импульсов излучения и электронного пучка), что кратно превосходит все предыдущие достижения в экспериментах с плазменными мазерами всех типов. Построенный плазменный мазер излучал усиленный шум в зависимости от концентрации плазмы в диапазоне от 3 до

25 ГГц со средней мощностью  $\sim 100$  МВт и импульсной мощностью, достигающей до мощности электронного потока.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Ернылева С.Е., Булейко А.Б., Ульянов Д.К., Лоза О.Т. Плазменный релятивистский СВЧ-генератор с инверсной конфигурацией // Прикладная физика, 2017 г., №2, с. 9
- A2. **В. Buleyko**, N. G. Gusein-zade, and O. T. Loza. Plasma Masers: Status Quo and Development Prospects // Physics of Wave Phenomena, 2018, V. 26, №. 4, p. 317
- A3. Пономарев А. В., Булейко А. Б., Ульянов Д. К. Подавление обратной связи в плазменном релятивистском усилителе шума с инверсной геометрией // Прикладная физика, 2019 г., №6, с. 24
- A4. **А.В. Buleyko**, A.V. Ponomarev, O.T. Loza, and D.K. Ul'yanov. Feedback in Plasma Maser // Physics of Wave Phenomena, 2019, V. 27, № 4, p.257
- A5. **Alla B. Buleyko**, Anatoly V. Ponomarev, Oleg T. Loza, Denis K. Ulyanov, and Sergey E. Andreev. Experimental plasma maser as a broadband noise amplifier. I. Long pulse // Phys. Plasmas, 2021, 28, 023303
- A6. **Alla B. Buleyko**, Anatoly V. Ponomarev, Oleg T. Loza, Denis K. Ulyanov, Konstantin A. Sharypov, Sergey A. Shunailov, and Michael I. Yalandin. Experimental plasma maser as a broadband noise amplifier. II. Short pulse // Phys. Plasmas, 2021, 28, 023304
- A7. Ернылева С.Е., Булейко А.Б., Ульянов Д.К., Лоза О.Т. Плазменный релятивистский СВЧ-генератор с инверсной конфигурацией // XLIV Международная (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 13—17 февраля 2017 года, г. Звенигород
- A8. Ернылева С.Е., Булейко А.Б., Ульянов Д.К., Лоза О.Т. Сверхширокополосный плазменный релятивистский СВЧ-генератор // 27-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 10—16 сентября 2017 г., г. Севастополь, Крым, Россия, с. 1149
- A9. Булейко А.Б. Сверхширокополосная система локации на основе плазменного СВЧ-генератора для беспилотного летательного аппарата // XV молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии». Материалы конференции, 7 декабря 2017 г., с. 70
- A10. Булейко А.Б., Лоза О.Т. Ульянов Д.К. Широкополосный плазменный релятивистский СВЧ-генератор // IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2018 г., 30 января- 1 февраля 2018 г., Москва, с. 202

- A11. **Булейко А.Б.** Сверхширокополосные плазменные мазеры // VI Всероссийская Микроволновая конференция. Доклады, 28-30 ноября 2018 г., г. Москва, с. 170
- A12. **Булейко А.Б.**, Лоза О.Т. Плазменные мазеры: актуальное состояние и перспективы развития // Тезисы докладов XLVI Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 18 – 22 марта 2019 г., г. Звенигород
- A13. **Булейко А.Б.**, Пономарев А.В., Ульянов Д.К., Лоза О.Т. Сверхширокополосный плазменный релятивистский СВЧ-усилитель шума // Труды 29-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Крымико-2019, сентябрь 2019 г., г. Севастополь,
- A14. **Булейко А.Б.**, Пономарев А.В., Лоза О.Т., Ульянов Д.К. Экспериментальный плазменный мазер в режиме широкополосного усилителя шума // Тезисы докладов XLVII Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 16 – 20 марта 2020г., г. Звенигород

## Литература

1. S.E. Ernyleva, V.O. Litvin, O.T. Loza, I.L. Bogdankevich Novel plasma relativistic broadband source of high-power microwaves// Problems of atomic science and technology, 2013, N 4, p. 3
2. Ернылева С.Е., Литвин В. О., Лоза О.Т., Богданкевич И.Л. Перспективный источник мощных широкополосных СВЧ-импульсов с изменяемой до двух октав частотой излучения // ЖТФ, 2014 г., т.84, №8, с. 127
3. Стрелков, П.С., Тараканов, В.П., Диас Михайлова, Д.Е., Иванов, И.Е., Шумейко, Д.В. Плазменный релятивистский источник сверхширокополосного СВЧ-излучения // Физика плазмы, 2019 г. № 4, с.335
4. A.V. Buleyko, A.V. Ponomarev, O.T. Loza, and D.K. Ul'yanov. Feedback in Plasma Maser // Physics of Wave Phenomena, 2019, V. 27, № 4, p.257
5. Карташов И.Н., Красильников М.А., Кузелев М.В. Отражение электромагнитных волн от перехода волновода с трубчатой плазмой в вакуумный коаксиальный волновод // РиЭ, 1999 г., т. 44, № 12, с. 1502
6. Богданкевич И. Л., Лоза О. Т., Павлов Д. А. Управление спектром излучения плазменных релятивистских СВЧ-генераторов // Физика плазмы, 2009 г., т.35, № 3, с. 211
7. M.Birau, J-M.Buzzi, Y.Caillez, R.Wiolland, C.Saulle, M.A.Krasilnikov, M.V.Kuzelev, O.T.Loza, A.A.Rukhadze, P.S.Strelkov, A.G.Shkvarunets, D.K.Ulyanov. Generation of High-Power Microwave due to propagation of a relativistic electron beam in plasma// Proc. 23-th Int. Conf. On Phenomena in ionized gases. (ICPIG'97), July 17-22, 1997, Toulouse, v. III, p.46

8. Пономарёв А.В., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. Перестраиваемый плазменный релятивистский СВЧ-усилитель // Физика плазмы, 2000 г., т. 26, № 7, с. 633

9. Пономарёв А.В., Стрелков П.С. 50-мегаватный широкополосный плазменный СВЧ-усилитель.// Физика плазмы, 2004 г., т. 30, № 1, с. 66

10. Селиванов И.А., Стрелков П.С., Федотов А.В., Шкварунец А.Г. // Одномодовый релятивистский плазменный СВЧ-генератор // Физика плазмы, 1989 г., том 15, вып.11, с. 1283

11. Стрелков П. С. Экспериментальная плазменная релятивистская сверхвысокочастотная электроника// УФН, 2019 г., т. 189, с. 494

12. Ernyleva S. E. and Loza O. T. Plasma Relativistic Microwave Noise Amplifier with the Inverse Configuration // Physics of Wave Phenomena, 2017, V. 25, № 1, p. 56