

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Российский университет дружбы народов

На правах рукописи

УДК 533.922

537.533.2

**Булейко Алла Борисовна**

**Плазменные релятивистские СВЧ-усилители шума**

Специальность 1.3.9 – физика плазмы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д. ф.-м. н. О.Т. Лоза

Москва — 2021

## Содержание

Введение.....	4
1. Актуальность работы.....	11
2. Цели диссертационной работы.....	14
3. Научная новизна.....	15
4. Защищаемые положения .....	15
5. Практическая ценность результатов .....	16
6. Публикации и апробация результатов .....	18
7. Структура и объем диссертации.....	19
Глава 1 Плазменный релятивистский автогенератор СВЧ-импульсов с инверсной конфигурацией.....	23
1.1. Экспериментальная схема плазменного релятивистского автогенератора с инверсной конфигурацией .....	25
1.2. Результаты экспериментального исследование плазменного релятивистского автогенератора с инверсной конфигурацией.....	30
Выводы Главы 1 .....	36
Глава 2 Плазменный релятивистский усилитель шума. Длительность импульса тока РЭП 45 нс .....	37
2.1. Устройство плазменного релятивистского усилителя шума .....	38
2.2. Результаты экспериментального исследования плазменного релятивистского усилителя шума .....	40
2.3. Анализ экспериментальных результатов с плазменным релятивистским усилителем шума.....	46
Выводы Главы 2 .....	52
Глава 3 Плазменный релятивистский усилитель шума. Длительность импульса тока РЭП 2нс .....	53
3.1. Принцип действия плазменного релятивистского усилителя шума с коротким импульсом.....	53
3.2. Экспериментальное исследование плазменного релятивистского усилителя шума.....	55
3.3. Результаты экспериментального исследования плазменного релятивистского усилителя шума .....	63

Выводы Главы 3 .....	69
Заключение .....	71

## Введение

Плазменная СВЧ-электроника появилась благодаря теоретическим исследованиям пучковой неустойчивости в плазме в 1949 году [1, 2], а экспериментальная плазменная релятивистская микроволновая электроника берет начало в 1982 году, когда был создан первый плазменный СВЧ-генератор [3]. Симбиоз высокой импульсной мощности релятивистского сильнооточного электронного потока как источника энергии и широкого частотного диапазона колебаний плазмы позволил создать источники микроволнового излучения с уникальным набором параметров. Сочетание мощности излучения на уровне десятков и сотен мегаватт, длительности импульса от единиц до сотен наносекунд и управляемой ширины спектра, достигающей 3 октав независимо от длительности импульса, достижимо только для этих приборов – плазменных сильнооточных релятивистских СВЧ-генераторов и СВЧ-усилителей [4], которые сначала в англоязычных источниках [5, 6], а затем и в русскоязычных получили общее название плазменных мазеров [7].

Плазменный мазер – это источник мощного микроволнового излучения, действие которого основано на черенковском взаимодействии сильнооточного релятивистского электронного пучка (РЭП) с медленными волнами в заранее созданной плазме [8, 9, 10].

На Рис. 1 представлена упрощенная дисперсионная зависимость некоторых волн плазменного волновода. На график нанесены линии дисперсии скорости света  $\omega = k_z c$  и медленной волны пространственного заряда электронного пучка в пределе малого тока  $\omega = k_z u$ , где  $\omega$  – частота,  $k_z$  – проекция волнового вектора на ось волновода,  $u$  – скорость электронов,  $c$  – скорость света. В плазменном волноводе существуют и быстрые волны – кривые выше линии  $\omega = k_z c$  с фазовой скоростью  $v_{ph} = \omega / k_z > c$ , но действие плазменных мазеров основано на возбуждении медленных волн плазменного волновода с фазовой скоростью  $v_{ph} = \omega / k_z < c$ .

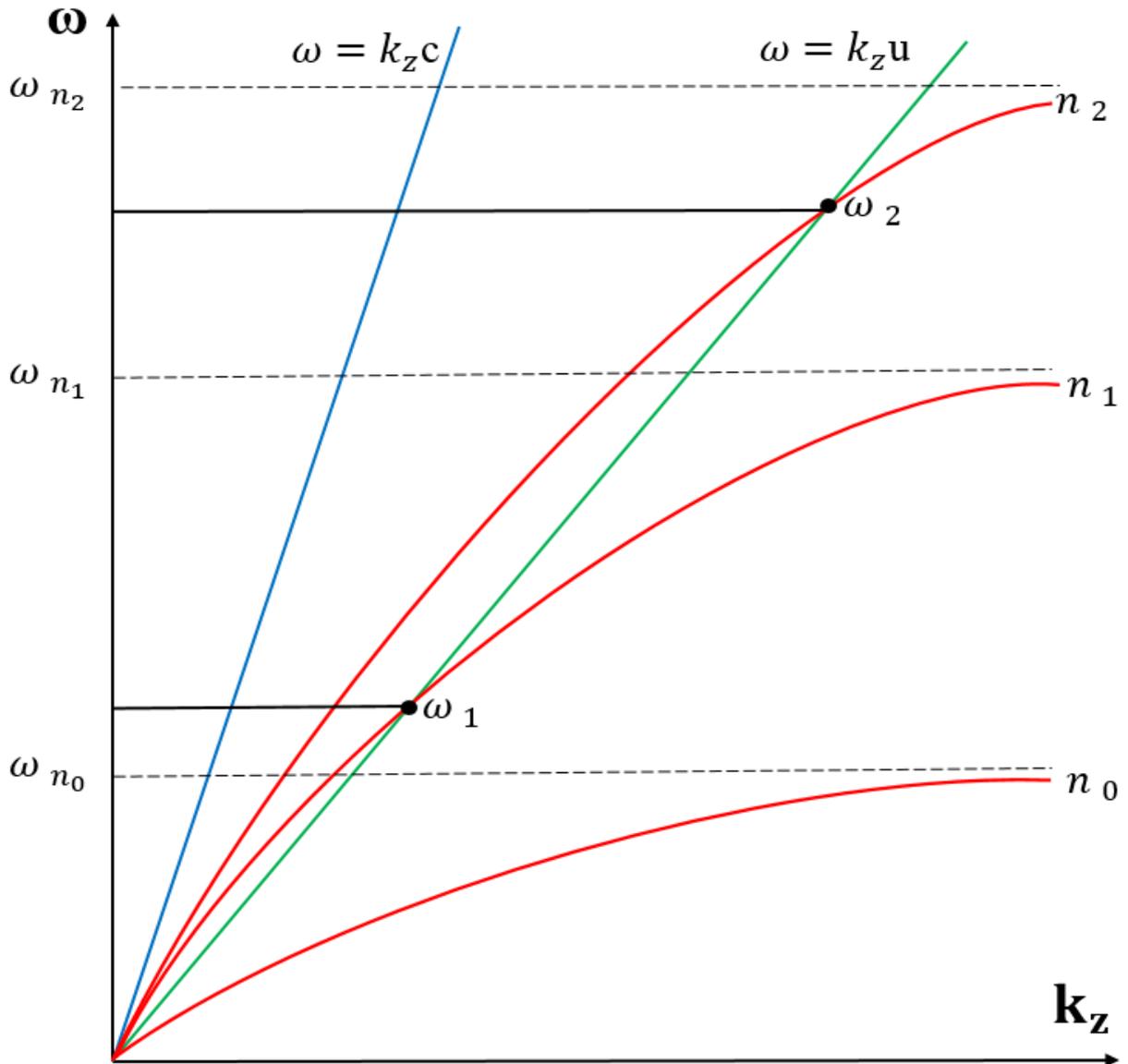


Рис. 1. Дисперсионная зависимость волн плазменного волновода.

Медленные плазменные волны при больших  $k_z$  асимптотически стремятся к плазменной (ленгмюровской) частоте:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}} \quad (1)$$

которая определяется только одним параметром, не являющимся мировой константой – концентрацией плазмы  $n$ . Здесь  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  [Кл]- заряд электрона,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  [кг] - масса электрона,  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  [Ф/м] - диэлектрическая постоянная.

Рассмотрим взаимодействие электронного пучка с медленными волнами плазмы на примере Рис. 1. В точках пересечения кривых дисперсии волны пространственного заряда электронного пучка и дисперсии плазменных волн на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  фазовые скорости волн пучка и плазмы совпадают, и усиливаются плазменные электромагнитные волны на основе черенковского механизма, при котором кинетическая энергия электронного пучка переходит в энергию волн в плазме. С увеличением концентрации плазмы, например, от  $n_1$  к  $n_2$  на Рис. 1, частота усиливаемых плазменных волн возрастает. Это позволяет управлять частотой излучения плазменного мазера за счет изменения концентрации плазмы. При малом значении концентрации плазмы  $n_0$  резонансное условие не выполняется, и возбуждение плазменной волны невозможно. СВЧ-излучение возникает при ленгмюровской частоте плазмы, превышающей пороговое значение  $\omega_{thr}$  [11]:

$$\omega_p^2 > \omega_{thr}^2 = k_{\perp p}^2 u^2 \gamma^2 \quad (2)$$

здесь  $k_{\perp p}$  – поперечное волновое число плазменной волны, определяемое радиальным профилем концентрации плазмы и радиусом волновода [12]. При меньшей концентрации плазмы фазовая скорость медленной плазменной волны меньше скорости электронов для любого  $k_z$ , и черенковское взаимодействие невозможно.

Фазовая и групповая скорости медленных волн в плазме сонаправлены, поэтому плазменный мазер работает как лампа бегущей волны (ЛБВ). Принципиальным отличием плазменного мазера от вакуумной ЛБВ является вид замедляющей структуры, в роли которой используется плазма, а не пространственно-периодический волновод. Благодаря возможности быстро изменять концентрацию плазмы и ее дисперсионные свойства плазменный мазер может работать в диапазоне частот в 3 октавы без механического изменения его узлов [13].

Семейство плазменных мазеров включает в себя несколько отличающихся друг от друга приборов. Исторически первым и наиболее распространенным стал плазменный генератор СВЧ-импульсов [3, 14, 15]. Для работы в режиме генератора необходимо обеспечить обратную связь, в плазменном мазере эта обратная связь возникает за счет отражений усиливаемой плазменной волны на границах области плазменно-пучкового взаимодействия. В упрощенном виде линейное приближение условия генерации выглядит как:

$$\kappa_{in} \cdot \kappa_{out} \cdot e^{\delta k \cdot L} > 1 \quad (3)$$

здесь  $\kappa_{in}$  и  $\kappa_{out}$  — коэффициенты отражения (включая трансформацию) плазменной волны, соответственно, на входе и выходе плазменного мазера,  $L$  — длина плазменно-пучкового взаимодействия,  $\delta k$  — погонный коэффициент усиления плазменной волны электронным пучком. Пространственный коэффициент усиления  $\sim (10 \text{ см})^{-1}$ , как и коэффициенты отражения  $\sim 5...50\%$  достаточно велики, поэтому необходимость многократных отражений плазменной волны для обеспечения положительной обратной связи отсутствует для мазеров с длиной порядка нескольких десятков сантиметров и достаточно длительным током электронов пучка. В течение нескольких десятилетий были созданы плазменные генераторы СВЧ-импульсов с электронной перестройкой частот излучения до 3 октав [13] в диапазоне от 1 ГГц [16] до 40 ГГц [17] и мощностью от 20 МВт до 500 МВт [18], зависящей, в основном, от мощности электронного потока и «электронного» КПД 5...10%.

Спектр излучения плазменного мазера, зависящий от плазмы, может меняться не только от импульса к импульсу. В работах [19, 20] было показано, что спектр излучения можно изменять в течение импульса с длительностью 60 нс. В экспериментах с плазменным автогенератором были продемонстрированы возможности постепенного снижения частоты излучения в течение импульса, ее фиксации на постоянном уровне и даже роста примерно от 10,5 ГГц до 12 ГГц. Все приведенные выше данные были получены в экспериментах с плазменными автогенераторами с мощностью  $\sim 50$  МВт.

Менее многочисленны плазменные мазеры – усилители внешнего сигнала [21, 22]. Конструктивно они отличаются от генераторов наличием узла ввода внешнего СВЧ-сигнала и СВЧ-поглотителя в области плазменно-пучкового взаимодействия для подавления положительной обратной связи. Существующие экспериментальные плазменные СВЧ-усилители внешнего сигнала функционально отличаются от автогенераторов шириной полосы частот усиления менее одной октавы [23, 24], граничные частоты их диапазона усиления отличаются приблизительно в 1.5 раза при усилении  $\sim 30$  дБ [25]. Электронный КПД экспериментальных плазменных СВЧ-усилителей 7...15% [4] несколько выше, чем у генераторов. Теоретические оценки [26] показывают, что эффективность усиления (по мощности) плазменной волны электронным пучком:

$$\text{КПД} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{n_b}{2n_p} \right)^{1/3} (\gamma + 1), \quad (4)$$

где  $n_b$  и  $n_p$  это концентрации электронного пучка и плазмы,  $\gamma$  – релятивистский фактор, а численные расчеты [12] показали, что максимальный КПД может достигать 20–30%.

В последние годы появились работы, посвященные еще одному типу плазменных мазеров, а именно, усилителю собственных шумов [27, 7, 28]. Он не требует входного сигнала и в этом смысле является генератором. Плазменный мазер работает как усилитель шума, если отсутствует внешний сигнал на входе, и не выполнено условие (3). Переход между режимами проще всего осуществить, изменяя длину  $L$ , пороговое значение  $L_{th}$  которой следует непосредственно из (2):

$$L_{th} = \frac{-\ln \kappa_{in} \kappa_{out}}{\delta k} \quad (5)$$

Если при отсутствии входного сигнала длина прибора  $L < L_{th}$ , то реализуется режим усилителя шума, в противном случае мазер работает как автогенератор.

Чтобы подчеркнуть отличие двух типов самостоятельных источников излучения далее будем использовать термины, соответственно, «автогенератор»

для прибора с обратной связью и «усилитель шума», если таковая отсутствует. Настоящая диссертация посвящена экспериментальному исследованию, в основном, релятивистских сильноточных усилителей шума СВЧ-диапазона длин волн, именно им посвящены Главы 2 и 3.

Конструктивно существующие экспериментальные плазменные мазеры во многом похожи на черенковские приборы вакуумной релятивистской сильноточной СВЧ-электроники: их основные узлы обладают аксиальной симметрией, взрывоэмиссионный катод формирует трубчатый электронный поток, который распространяется в сильном магнитном поле через замедляющую структуру до коллектора (Рис. 2). Отличия связаны с особенной замедляющей структурой – плазмой, и типом волновода выходного излучения: в плазменных мазерах он коаксиальный, а не полый.

В плазменных мазерах используется трубчатая плазма. Во всех созданных к настоящему времени плазменных мазерах плазма формируется при ионизации остаточного газа с давлением  $\sim 0.1$  Па специальным электронным пучком (0.5 кэВ, 30...50 А) с кольцевого термокатода [29]. При таком способе формирования плазмы ее концентрация примерно постоянна по всей длине, а ее конкретное значение  $0 \dots 10^{14}$  см<sup>-3</sup> зависит от давления газа, тока электронного пучка и продолжительности формирования плазмы перед инжекцией в нее релятивистского электронного пучка – от 0 до 50 мкс.

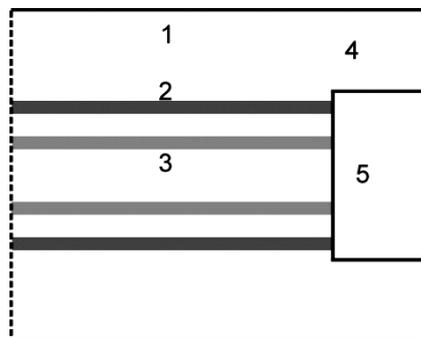


Рис. 2. Упрощенная схема одного из возможных вариантов плазменного мазера: 1 — волновод, 2 и 3 — релятивистский электронный пучок и плазма, или наоборот, 4 — коаксиальный волновод, 5 — его центральный электрод.

Все существующие экспериментальные плазменные мазеры используют релятивистский электронный поток, распространяющийся в сильном магнитном поле, при этом оптимальный ток релятивистских электронов по порядку величины соответствует (а точнее, примерно вдвое меньше) предельному вакуумному току в идентичной конфигурации, т.е. без плазмы [30]. Для типичных геометрических размеров плазменного мазера и энергии релятивистских электронов 500 кэВ оптимальный ток пучка равен 2...4 кА, т.е. ускоритель (инжектор) электронов может иметь достаточно высокий импеданс 100...200 Ом.

Узел вывода излучения плазменного мазера - коаксиальный волновод, внутренний электрод которого «продолжает» плазму, см. Рис. 2. Выход излучения осуществляется в виде ТЕМ-волны коаксиала, не имеющей частоты отсечки. Вывод излучения по коаксиальному волноводу является неотъемлемым свойством плазменных мазеров, в остальном они могут различаться довольно сильно [31]. Плазма трубчатой формы может располагаться коаксиально трубчатому потоку релятивистских электронов как снаружи от него, так и внутри. Более часто встречающийся первый случай можно считать традиционным, а более редкую конфигурацию мазера с плазмой внутри электронного потока [32] стали впоследствии называть инверсной [31]. При разных конфигурациях электроны могут оседать на внутренний электрод коаксиального волновода, как показано на Рис.2, или разлетаться на внешний электрод, при этом плазма всегда ограничена внутренним электродом коаксиала. Магнитное поле может быть однородным по всей длине мазера, но может иметь и более сложную форму силовых линий [31]. Термокатод, формирующий плазму, может располагаться и со стороны инжектора релятивистского электронного пучка, и на центральном электроде коаксиального волновода. Недавно в численной модели [33, 34] была продемонстрирована возможность построения плазменного мазера без соленоида и сильного магнитного поля по аналогии с известным MLO [35, 36, 37, 38] – микроволновым генератором на линии с магнитной самоизоляцией. Магнитная самоизоляция требует сравнительно большого тока, при энергии электронов 600 кэВ

оптимальный общий ток должен быть порядка 20 кА, поэтому для построения такого лазера требуется ускоритель со сравнительно низким импедансом  $\sim 30$  Ом. Рассчитанный в [34] электронный КПД плазменного лазера с магнитной самоизоляцией (PMILO) оказался  $\sim 7\%$ , т.е. не ниже, чем у большинства экспериментальных плазменных лазеров.

## **1. Актуальность работы**

В последние годы наблюдается растущий интерес к созданию мощных источников широкополосного СВЧ-излучения, ярким представителем которых является плазменный лазер, 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. Факторы, определяющие ширину спектра импульса излучения, известны, методы управления спектром описаны в [39].

Выше было упомянуто про две возможности транспортировки сильнооточного релятивистского электронного потока: традиционная - внутри трубчатой плазмы, и инверсная – снаружи. Инверсная конфигурация плазменного лазера по конструкции источника плазмы является более трудной, но она имеет и преимущества. Её техническим преимуществом является возможность осаждения электронного пучка на легко охлаждаемую внешнюю стенку коаксиального волновода, а не на внутренний электрод. Это обстоятельство приобретает бóльшую ценность с ростом частоты формирования импульсов, их длительности и числа импульсов в пачке. Физическим преимуществом инверсной конфигурации является больший диаметр электронного потока и больший предельный вакуумный ток, который определяет больший оптимальный ток лазера и максимальную мощность излучения.

Несмотря на долгую историю исследований, ранее в экспериментальных работах не удавалось реализовать плазменный СВЧ-генератор с инверсной

конфигурацией и широкой - кратной - полосой перестройки частоты СВЧ-излучения от импульса к импульсу на мегаваттном уровне мощности. Поэтому, в частности, инверсная конфигурация не была популярна при построении плазменных мазеров, функционировавших как источники однократных импульсов. С переходом к импульсно-периодическим плазменным лазерам данная тема стала актуальной, и её решению посвящена одна из глав данной диссертационной работы.

Плазменный лазер – усилитель шума начал рассматриваться как эффективный источник излучения с 2013 года [27] и до 2019 г. изучался в разных конфигурациях с помощью численного моделирования [7, 27]. В то же время в ряде экспериментов с плазменным усилителем внешнего сигнала [21, 40] регистрировался шум на выходе устройства, который в отсутствие внешнего сигнала возрастал по амплитуде. Ширина спектров этого шумового излучения была ~ 50% от максимальной регистрировавшейся частоты 4 ГГц. И в численном моделировании, и в экспериментах было показано, что спектры шума более «гладкие», чем спектры излучения автогенераторов, в которых выделяются частоты отдельных продольных мод плазменного резонатора. В результате ставшей понятной актуальности этого направления и возросшего интереса к нему, в 2019 г. практически одновременно были опубликованы первые результаты экспериментальных исследований плазменного лазера-усилителя шума, независимо проведенных двумя группами исследователей [41, 42].

Очевидной трудностью в теоретических расчетах микроволновых источников на основе усилителей шума является 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. Непосредственные измерения шумового сигнала на выходе плазменно-пучковой системы при заведомом отсутствии процесса его усиления мало полезны, поскольку дают информацию лишь о полном шумовом фоне волн, излучаемых из выходного узла,

без учета поглощения, трансформации и отражения начальных шумов при прохождении плазменного волновода и без учета поляризации и пространственной структуры волн, определяющих возможность их усиления электронным потоком. В плазменной волне усиливаются по черенковскому механизму лишь шумы с фазовой скоростью, близкой к скорости электронного потока, и продольным электрическим полем вблизи него. В связи с этим актуальным является вопрос об измерениях мощности только тех 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 [43], в модельном численном эксперименте [39], 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 от степени подавления обратной связи. Для устранения обратной связи в плазменном мазере при проведении подобных исследований можно использовать СВЧ-поглотители, устанавливаемые в плазменный волновод со стороны инъекции РЭП, на Рис. 2 это левая граница. Формула (3), однако, показывает, что если СВЧ-поглотитель недостаточно эффективен (т.е. коэффициент отражения  $k_1$  недостаточно мал), то и усиление будет не очень большим до перехода в режим автогенерации. А создание СВЧ-поглотителей, одинаково эффективных в широкой полосе частот, является серьезной проблемой.

Существует, однако, другой, абсолютный способ устранения обратной связи и снятия, таким образом, отмеченных выше ограничений на коэффициент

усиления шумов в мазере, связанных с поглотителями. В случае достаточно короткого импульса РЭП длительность процесса замыкания петли обратной связи превышает длительность электронного пучка. Импульс РЭП, взаимодействующий с плазменной волной, прекращается до того, как усиленная волна отразится от выходной границы области взаимодействия пучка с плазмой и достигнет входной границы. Этот способ построения плазменного усилителя СВЧ-шума не зависит от СВЧ-поглотителей, а режим автогенерации вообще невозможен. Этот режим интересен еще и тем, что при малой длительности импульса не успевают развиться процессы [44], приводящие к снижению мощности излучения и даже его срыву. Еще никогда плазменные мазеры не работали с импульсами РЭП с длительностью тока менее 20 нс [18], при которой 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.

## **2. Цели диссертационной работы**

- Экспериментальное доказательство возможности генерации СВЧ-излучения с перестройкой частот в широкой полосе плазменным мазером с инверсной конфигурацией, т.е. с плазмой внутри электронного пучка.
- Измерения погонного коэффициента усиления плазменной волны электронным пучком и мощности усиливаемых начальных шумов.
- 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.
- Экспериментальная демонстрация усиления шума при плазменно-пучковом взаимодействии с подавлением обратной связи за счет малой длительности импульса РЭП.

### 3. Научная новизна

- Впервые экспериментально продемонстрировано излучение плазменного лазера с инверсной конфигурацией, т.е. с плазмой внутри электронного пучка, в полосе частот от 3 до 9 ГГц в режимах автогенерации [45] и в полосе от 3 до 15 ГГц в режиме усиления шумов [46].
- Впервые экспериментально измерен погонный коэффициент усиления плазменной волны релятивистским электронным пучком, равный  $0,1 \dots 0,2 \text{ см}^{-1}$ . Впервые предложена методика и корректно измерен уровень начального шума, усиливаемого электронным пучком в плазме лазера. Впервые продемонстрирована смена режима работы плазменного лазера от усиления СВЧ-шума к автогенерации при превышении длиной плазменно-пучкового резонатора порогового значения [42, 47].
- Впервые экспериментально продемонстрировано эффективное усиление СВЧ-шума при плазменно-пучковом взаимодействии без применения СВЧ-поглотителей за счет малой длительности импульса тока [48].
- Впервые достигнуто и экспериментально продемонстрировано СВЧ-излучение при плазменно-пучковом взаимодействии с электронным КПД 26% по энергии импульса и почти 100% по пиковой мощности, что кратно превышает все ранее достигнутые показатели [48].

### 4. Защищаемые положения

- Плазменный лазер 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.
- 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.

- 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.
- 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.

## **5. Практическая ценность результатов**

Результаты диссертационной работы могут быть непосредственно использованы для создания источников СВЧ-импульсов субгигаваттного 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.

Существуют и другие источники мощного,  $\sim 10^8$  Вт и более, излучения в том же спектральном диапазоне — приборы вакуумной сильноточной релятивистской СВЧ-электроники, генераторы сверхширокополосных (СШП) импульсов, лазерные «сверхсветовые» источники СШП электромагнитных помех, однако ни один из них не имеет указанного сочетания параметров излучения.

СВЧ-излучение высокой мощности обычно генерируются релятивистскими сильноточными вакуумными микроволновыми генераторами, такими как лампа обратной волны (ЛОВ). Ширина спектра этих устройств довольно узкая  $<1\%$ , их частоту генерации можно механически перестраивать в диапазоне 14% [49]. Лампы обратной волны [50, 51] развивают импульсную мощность до нескольких гига watt с электронным КПД по мощности до 30%. Мощность импульса излучения твистрона [52] достигает 150 МВт при длительности импульса от 5 нс до 50 нс, энергетический КПД 50%. Длительность импульса излучения таких

СВЧ-генераторов, как и у плазменных мазеров [53], меняется от единиц до сотен наносекунд. Однако полоса частоты излучения даже механическим изменением конструкции не превышает 10...15%, а диапазон электронной перестройки частоты еще меньше.

Таким образом, приборы вакуумной сильноточной релятивистской СВЧ-электроники и плазменные мазеры имеют одинаковые длительности импульсов излучения в одинаковых спектральных диапазонах, однако излучение вакуумных сильноточных релятивистских СВЧ-генераторов имеет практически монохроматический спектр с очень узким диапазоном изменения, что может быть существенным недостатком для ряда практических приложений.

СШП генераторы [54] представляют собой источники коротких импульсов, ширина фурье-спектра которых обратно пропорциональна их длительности. СШП-генераторы относительно просты в устройстве и имеют высокий КПД, зачастую более 50%, но энергия их импульсов, зависящая от их длительности, уменьшается с ростом частоты излучения. Поэтому большинство практически используемых мощных СШП генераторов работает в диапазоне частот не выше 3 ГГц [55]. Для фокусировки излучения на этих длинах волн необходимы антенны большого размера. В частности, поэтому СШП источники электромагнитных помех гигаваттной мощности, такие как [56], имеют сравнительно низкий эффективный потенциал (произведение электрического поля СВЧ-излучения на расстояние от антенны) до нескольких мегавольт.

Более короткие импульсы, длительность которых определяет частоту излучения до 30 ГГц, могут излучать «сверхсветовые» генераторы СШП излучения [57, 58, 59], но их полный КПД (с учетом КПД лазеров) на несколько порядков ниже, чем у традиционных приборов,  $\ll 1\%$ . На высоких частотах в несколько ГГц и более основным недостатком СШП источников является очень низкая энергия коротких (менее  $10^{-9}$  с) импульсов. Кроме того, при излучении в открытое пространство эти короткие микроволновые импульсы быстро

диспергируют («расплываются») в атмосфере с уменьшением амплитуды электрического поля.

Таким образом, возможность смещения спектра излучения в область высоких частот, до десятков ГГц при неизменной длительности импульса излучения, не зависящей от частоты, и неизменной энергии импульса определяют преимущество плазменных мазеров перед СШП генераторами.

Приведенное выше краткое сравнение показывает, что плазменные мазеры, обладающие уникальным сочетанием параметров излучения, имеют очевидные преимущества перед представленными «конкурентами».

## **6. Публикации и апробация результатов**

По материалам диссертации опубликовано 6 статей 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: [42], [45], [46], [47], [48], [60].

Материалы диссертационной работы докладывались и опубликованы в трудах всероссийских и международных конференций [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68]:

- XLIV Международная (Звенигородская) конференции по физике плазмы и УТС, 13—17 февраля 2017 года, г. Звенигород;
- 27-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». г. Севастополь, 10—16 сентября 2017 г.;
- XV молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии». г. Москва, 7 декабря 2017 г.;
- IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2018 г. Москва, 30 января- 1 февраля 2018 г.;

- VI Всероссийская Микроволновая конференция. Доклады, г. Москва, 28-30 ноября 2018 г.;
- XLVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, март 18 – 22, 2019г.;
- 29-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Крымико-2019. Севастополь, сентябрь 2019 г.;
- XLVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, март 16 – 20, 2020 г.;

## **7. Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 82 страницы, включая 25 рисунков и список литературы из 83 наименований.

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 изучению 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 [69, 21]. В усилителях осаждение электронного потока осуществлялось на внутренний электрод коаксиального волновода, как показано на Рис. 2. Плазменные мазеры - автогенераторы излучения с инверсной конфигурацией, например, [32] ранее демонстрировали весьма скромные показатели по широкополосности.

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.

В этой части диссертационной работы был впервые экспериментально продемонстрирован плазменный мазер с широкой полосой электронной перестройки частоты излучения от импульса к импульсу в несколько раз в диапазоне от 3 ГГц до 9 ГГц при мощности 20 МВт. Коллектором электронного пучка в этом мазере служил не внутренний, а внешний, легко охлаждаемый снаружи электрод коаксиального волновода. 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.

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. В разных условиях значение измеренного коэффициента усиления находилось в диапазоне  $0,1 \dots 0,2 \text{ см}^{-1}$ , что хорошо совпадает с результатами расчетов.

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:  $35 \dots 40 \text{ см}$ . Этот результат хорошо совпадает с результатами численных расчетов, которые ранее проводились другими исследователями. Кроме того, частоты продольных мод в спектре излучения мазера, работавшего в режиме автогенератора, позволили оценить групповую скорость плазменной волны ( $1,2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  или  $0,4c$ ) и время замыкания петли обратной связи в мазере с фиксированной длиной.

Полученные в Главе 2 результаты – величина погонного коэффициента усиления и групповая скорость плазменной волны – создали предпосылки для проведения следующих работ, а именно, для построения плазменного мазера-усилителя шума с малой длительностью импульса релятивистского электронного пучка, которая обеспечила полное устранение обратной связи.

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  $2 \text{ нс}$  и мощностью  $450 \text{ МВт}$  ( $270 \text{ кэВ}$ ,  $1,7 \text{ кА}$ ). Средняя мощность СВЧ-импульса на выходе построенного усилителя шума превысила  $100 \text{ МВт}$  в диапазоне частот от  $3 \text{ ГГц}$  до  $25 \text{ ГГц}$ , а пиковая мощность достигала почти  $0,5 \text{ ГВт}$ . Импульсная энергоэффективность, т.е. отношение энергий импульсов излучения и электронного потока, превысила  $25\%$  и кратно превзошла показатели всех известных плазменных мазеров.

Уровень мощности начальных шумов, усиливаемых в медленной плазменной волне электронным пучком с мощностью 450 МВт и длительностью 2 нс, составил  $\sim 1$  МВт, что существенно больше результатов, полученных с более мощными электронными потоками большей длительности.

## **Глава 1 Плазменный релятивистский автогенератор СВЧ-импульсов с инверсной конфигурацией**

Для создания плазменных мазеров, работающих с высокой частотой повторения импульсов, необходимо эффективное охлаждение области осаждения сильноточного потока электронов на поверхность коаксиального волновода. При традиционной, наиболее распространенной конфигурации плазменного мазера релятивистский электронный поток распространяется внутри трубчатой плазмы, см. Рис. 2, и неизбежно осаждается на внутреннем электроде волновода, охлаждение которого крайне затруднено. Именно поэтому актуальной является задача построения плазменного мазера с инверсной конфигурацией, в которой трубчатый РЭП распространяется снаружи плазмы и осаждается на легко охлаждаемую стенку внешнего электрода коаксиального волновода. Другой причиной привлекательности инверсной конфигурации, как указывалось ранее во Введении, является больший диаметр электронного потока и больший предельный вакуумный ток, который определяет больший оптимальный ток и максимальную мощность излучения.

Ранее инверсная схема построения мазера не смогла продемонстрировать перестройки частот излучения в широком диапазоне. Экспериментальная работа [32] показала небольшое изменение полосы генерируемых длин волн в диапазонах от 2,4...2,6 см до 1,8...2,5 см. Численные расчеты [70] предсказали и рост излучаемой мощности при переходе к инверсной конфигурации плазменного мазера, и широкий диапазон перестройки частоты с изменением концентрации плазмы. Тем не менее, эксперименты, проведенные в той же работе, не подтвердили результаты расчетов: зарегистрированная мощность излучения  $\sim 40$  МВт сильно отличалась от расчетной мощности  $> 300$  МВт, а перестройка частоты излучения была в эксперименте зарегистрирована в полосе приблизительно 30 % от 7 ГГц до 9 ГГц. В связи с этими результатами инверсная конфигурация плазменного мазера использовалась в экспериментах значительно реже, чем конфигурация с РЭП внутри плазмы, ставшая традиционной.

Основным недостатком традиционной схемы построения плазменных мазеров является осаждение РЭП на внутренний электрод коаксиального волновода, по которому осуществляется вывод излучения. При работе мазера с данной конфигурацией, как в одиночном, так и в импульсно-периодическом режиме внутренний электрод коаксиального волновода нагревается, что приводит к выделению газа и нарушению процесса формирования плазмы с необходимыми параметрами. Для решения указанной проблемы применяется полый коллектор сложной формы с дополнительным сильным магнитным полем и дополнительной высоковакуумной откачкой [71], что повышает сложность и энергоемкость устройства, снижая надежность и общий КПД. Для мазеров с однократными импульсами, однако, проблема охлаждения не является актуальной, а техническая реализация мазера с традиционной конфигурацией более проста [31]. Вероятно, поэтому первый экспериментальный плазменный мазер [3], на котором была показана кратная перестройка частоты излучения, был построен именно по этой схеме. Различные схемы построения плазменных мазеров подробно описаны в [31].

В данной главе изучена работа релятивистского плазменного автогенератора с инверсной конфигурацией. Целью данного этапа работ было экспериментальное доказательство того факта, что автогенератор с инверсной конфигурацией способен генерировать СВЧ-излучение в полосе частот с трехкратным отличием верхней и нижней границ от импульса к импульсу на высоком уровне мощности.

### 1.1. Экспериментальная схема плазменного релятивистского автогенератора с инверсной конфигурацией

Схема плазменного релятивистского автогенератора с инверсной конфигурацией, который был экспериментально исследован в данной работе, представлена на Рис. 1.1.

Взрывоэмиссионный катод (1) формирует трубчатый РЭП (2) с внутренним радиусом 2,1 см и толщиной 0,15 см, который распространяется в магнитном поле 1 Тл, создаваемом соленоидом (3). В области ослабления магнитного поля электроны осаждаются на стенку камеры (4) с радиусом 3 см, являющейся внешним проводником коаксиального волновода, по которому СВЧ-излучение распространяется в выходной рупор (5). На внутреннем проводнике коаксиального волновода (6) с радиусом 2 см расположен термокатод, формирующий электронный пучок для создания трубчатой плазмы (7). Плазма с внешним радиусом 1,95 см и толщиной 0,2 см образуется путем ионизации газа при давлении  $\sim 0,1$  Па электронным пучком с током 0...50 А и энергией частиц 500 эВ в течение 40 мкс. Плотность плазмы однородна по длине из-за того, что длина свободного пробега электронов с энергией 500 эВ намного превышает длину волновода. Электрод (6), соединенный с внешним электродом (4), служит преобразователем излучения из моды ТЕМ коаксиального волновода в моду Н11 полого выходного рупора. Плазма ограничена по длине заземленным электродом (8), который крепится с помощью нескольких держателей из проводящих пластин. Такой способ крепления был выбран потому, что длительность импульса тока РЭП 45 нс слишком велика для применения метода [72], предназначенного для импульсно-периодического режима работы устройства, а именно, крепления электрода (8) к катоду ускорителя с помощью индуктивной развязки. В режиме генерации однократных импульсов использованная конструкция не препятствовала достижению указанной выше цели работы.

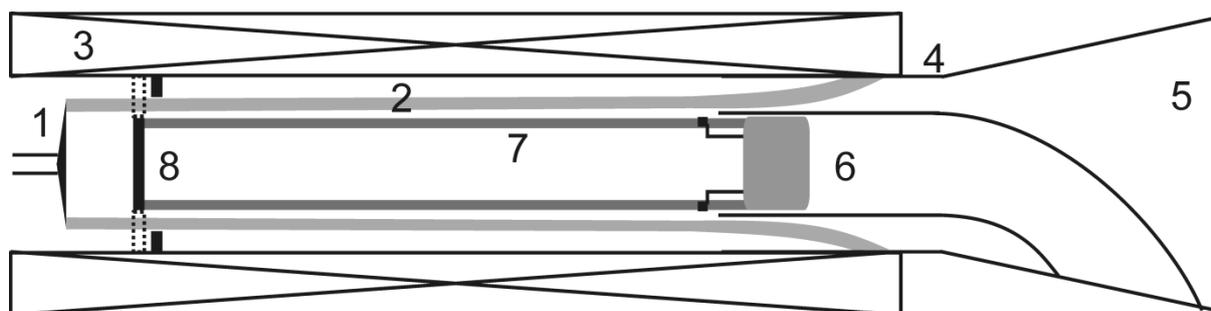


Рис. 1.1. Плазменный автогенератор СВЧ-излучения с инверсной конфигурацией и осаждением РЭП на стенки волновода: 1 — взрывоэмиссионный катод, 2 — РЭП, 3 — соленоид, 4 — коаксиальный волновод, 5 — рупор, 6 — источник плазмы, 7 — плазма, 8 — ограничитель плазмы.

Эксперименты проводились на ускорителе электронов ТЕРЕК-2, использовавшимся в [13], с куполообразной формой однократных импульсов напряжения на катоде до 350 кВ и длительностью импульса по основанию 45 нс, ток электронного пучка достигал 4 кА (Рис. 1.2).

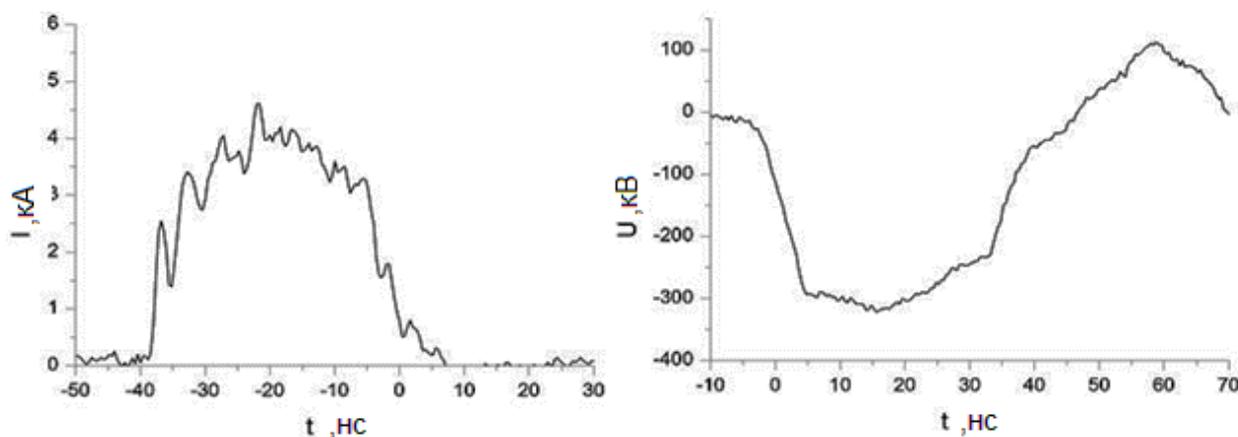


Рис. 1.2. Импульсы тока и напряжения ускорителя электронов Терек-2.

Фотография экспериментальной установки представлена на Рис. 1.3.

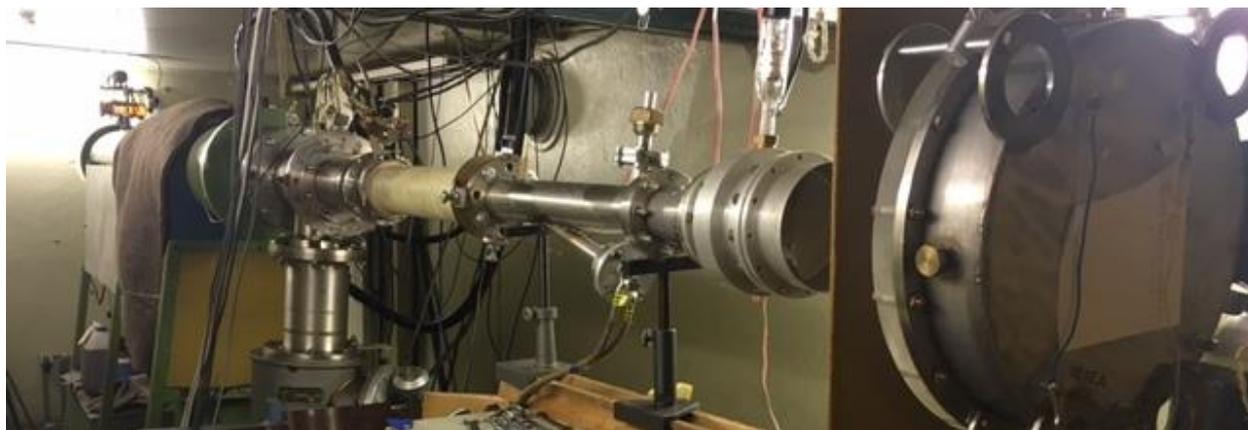


Рис. 1.3. Экспериментальная установка.

Спектральный состав СВЧ-излучения определялся с помощью штыревой антенны (Рис. 1.4), коаксиального кабеля и осциллографа Tektronix DPO71604C с полосой пропускания до 16 ГГц.

Измерительная антенна была расположена на расстоянии 30 см по горизонтали и 12,5 см по вертикали вверх от оси рупора. Для защиты от наводок кабель прикрывали широкополосные СВЧ-поглотители (см. Рис. 1.4). Сигнал с антенны через аттенюаторы поступал на вход осциллографа, где регистрировалась напряженность поля СВЧ-волны, и с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) определялся спектральный состав выходного излучения автогенератора. Полная энергия СВЧ-импульса измерялась с помощью широкоапертурного широкополосного калориметра [73] (Рис. 1.4), который располагался на расстоянии 32 см от рупора.

Эксперименты проводились при фиксированной длине плазменно-пучкового взаимодействия, равной 20 см. Концентрацию плазмы задавал изменяемый от 0 до 50 А ток плазмы. Концентрация плазмы растет с ростом тока [29], поэтому она обозначалась в относительных единицах, соответствующих этому току, напр., 30 отн.ед. для плазмы, созданной при токе 30 А. При наличии мощного СВЧ-излучения, рентгеновского излучения от коллектора РЭП и интенсивного света от взрывоэмиссионного катода не работают традиционные методы диагностики плазмы. Поэтому регистрация спектра мощного СВЧ-

излучения и сравнение его с численными расчетами - единственный способ оценить плотность плазмы в эксперименте.

Плазменный мазер с описанными параметрами, но с более высоким током РЭП 2 кА численно исследовался в [74], там плотность плазмы была равной  $0,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  для частоты излучения 4 ГГц и  $1,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  для частоты 11 ГГц. Тот факт, что частота СВЧ-излучения обычно в 2–4 раза меньше частоты Ленгмюра, хорошо известен [75]. Кроме того, это значение не противоречит данным о концентрации газа при 0,1 Па, равной  $2,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , а максимальная концентрация плазмы может быть даже выше, чем у исходного газа из-за эффекта «ионного насоса» [76].

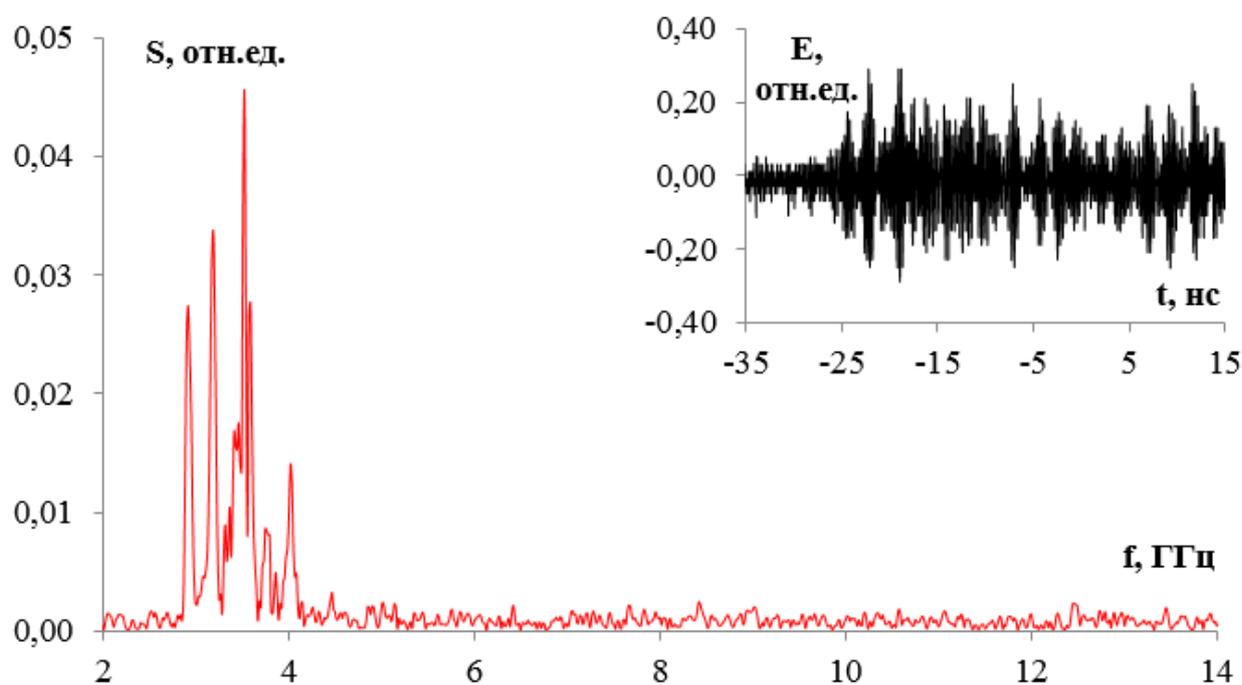


Рис. 1.4. Штыревая антенна и калориметр.

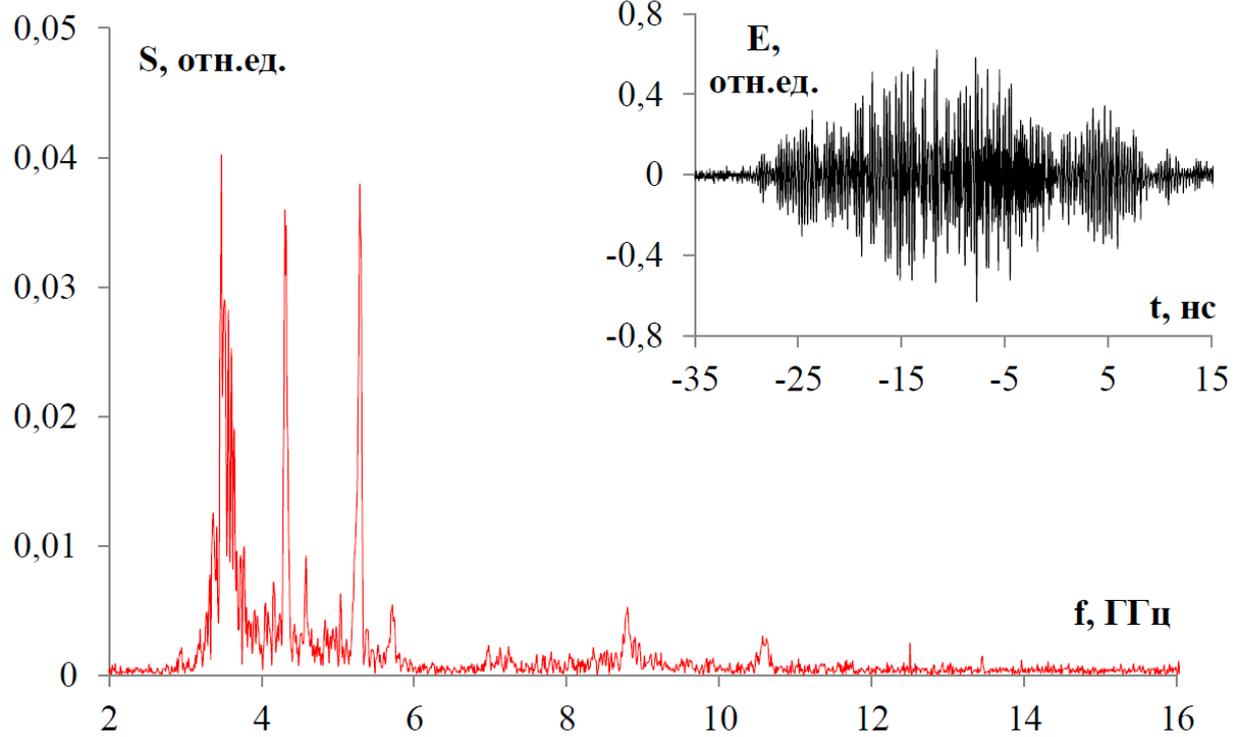
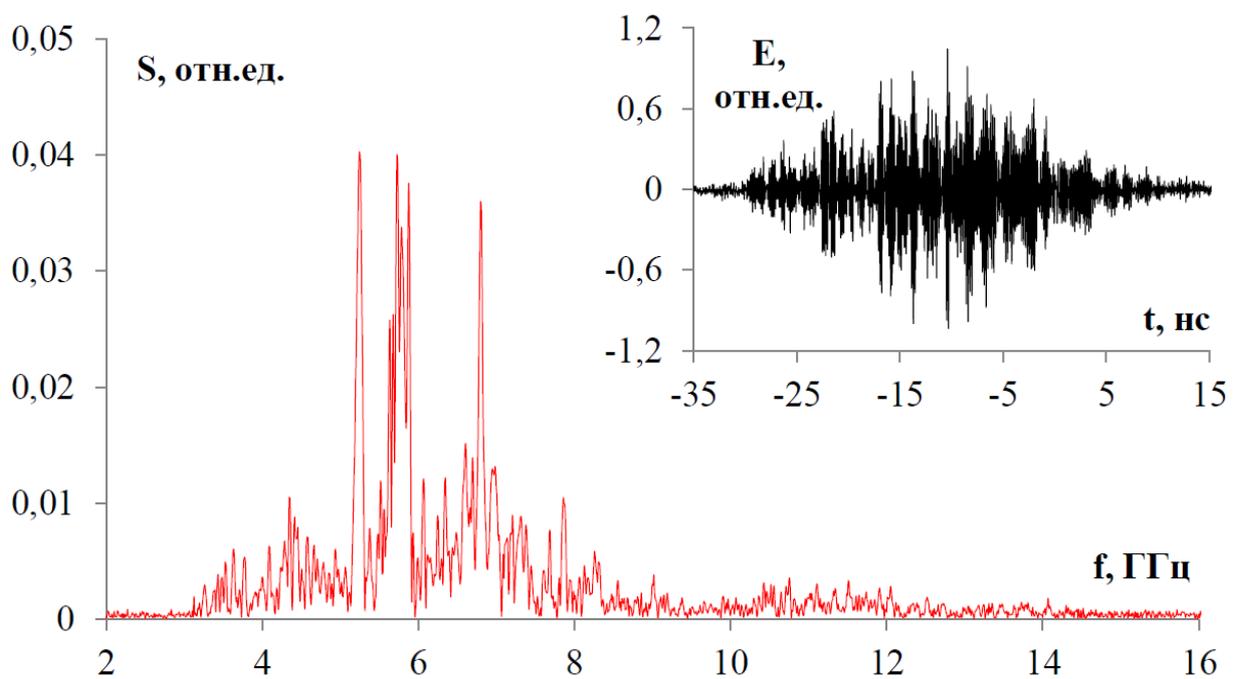
В ходе проводимых экспериментов для достоверности получаемых результатов для каждого значения концентрации плазмы было выполнено не менее трех измерений спектрального состава и энергии СВЧ-излучения.

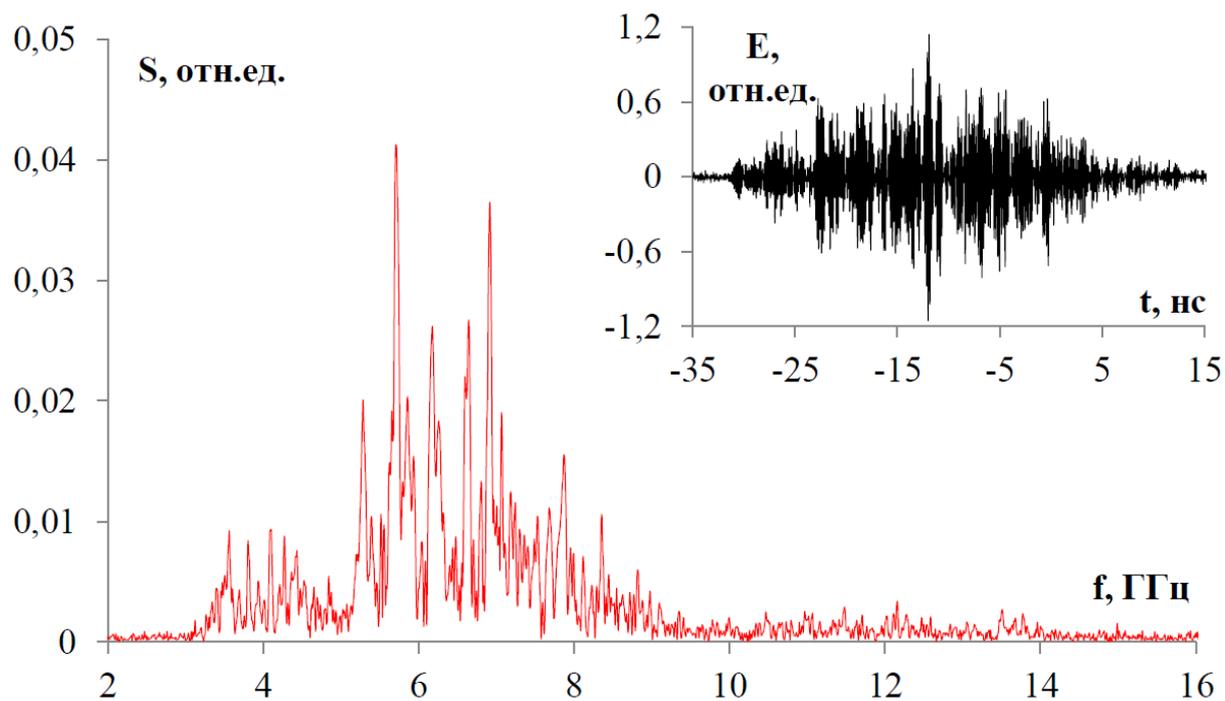
## 1.2. Результаты экспериментального исследование плазменного релятивистского автогенератора с инверсной конфигурацией

Полученные результаты экспериментального исследования демонстрируют возможность перестройки частоты излучения при изменении концентрации плазмы: 15 отн.ед., 20 отн.ед., 30 отн.ед., 40 отн.ед., 50 отн.ед. Представленные на Рис. 1.5 спектры имеют ярко выраженный «автогенераторный» характер: одна-три (иногда больше) спектральные линии, характеризующие продольные моды плазменно-пучкового резонатора, значительно преобладают по амплитуде над остальными. Также хорошо видна перестройка частоты генерации с 3 ГГц до 9 ГГц при увеличении концентрации плазмы.

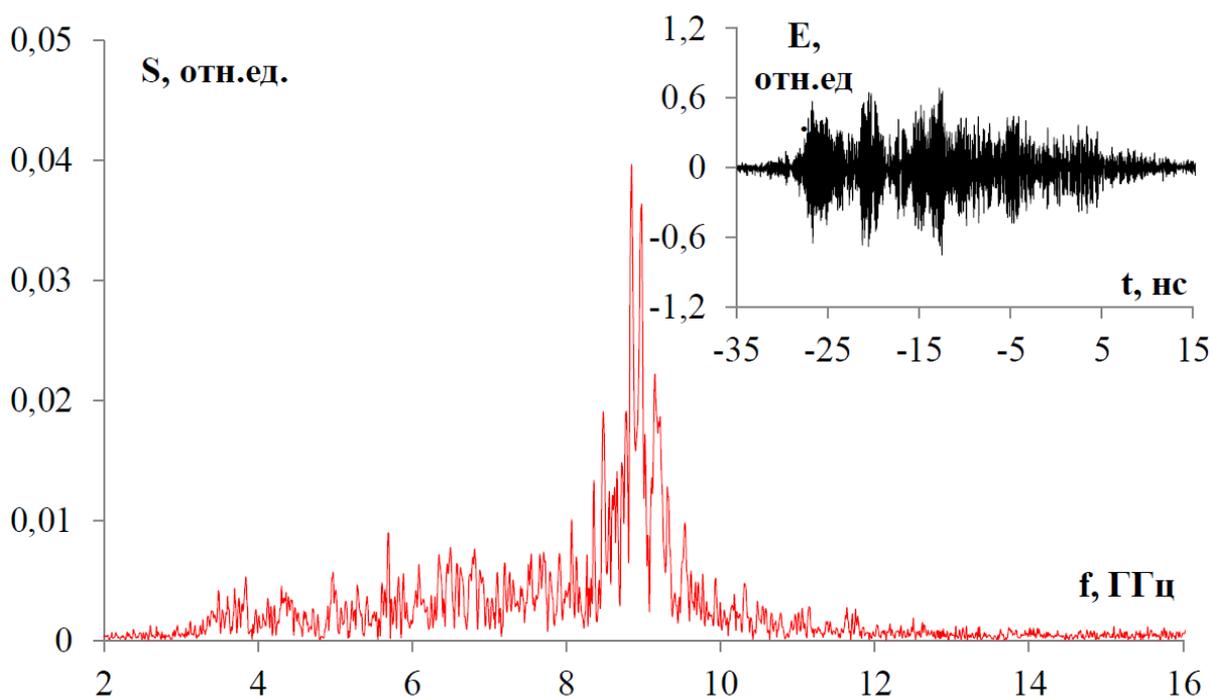


Концентрация плазмы  $n = 15$  отн.ед.

Концентрация плазмы  $n = 20$  отн.ед.Концентрация плазмы  $n = 30$  отн.ед.



Концентрация плазмы  $n = 40$  отн.ед.



Концентрация плазмы  $n = 50$  отн.ед.

Рис. 1.5. Спектры и осциллограммы напряженности электрического поля СВЧ-излучения плазменного автогенератора для пяти различных значений концентрации плазмы:  $n = 15$  отн.ед.,  $n = 20$  отн.ед.,  $n = 30$  отн.ед.,  $n = 40$  отн.ед. и  $n = 50$  отн.ед.

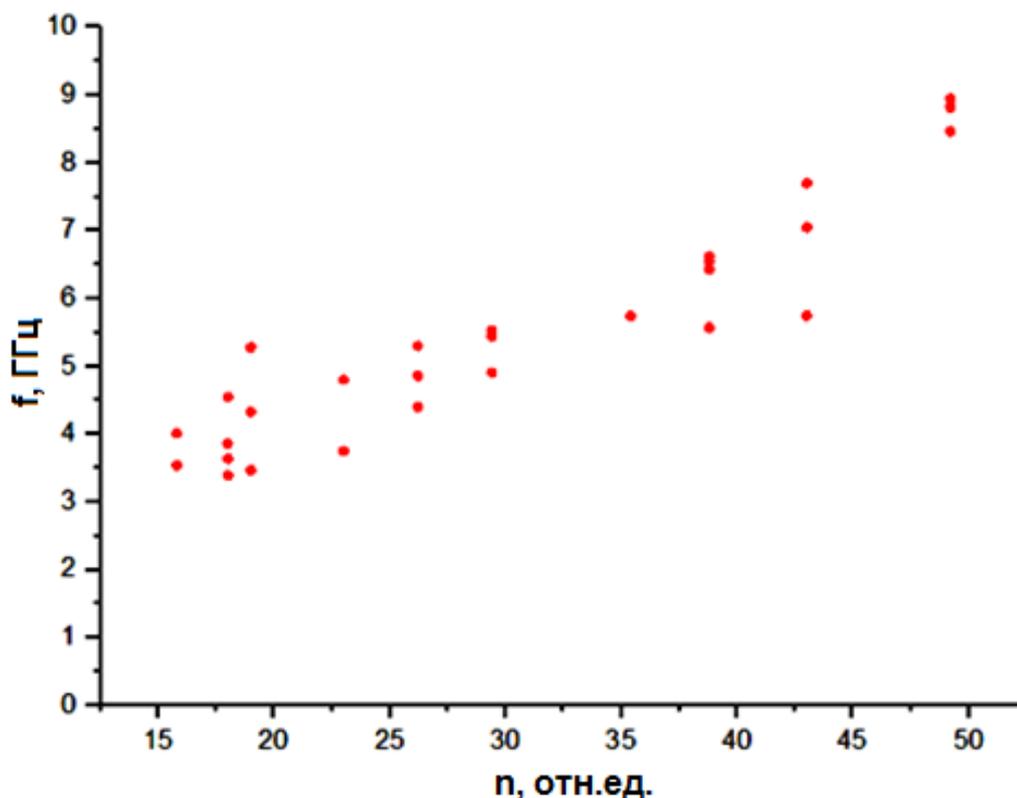


Рис. 1.6. Зависимость частоты излучения  $f$  от концентрации плазмы  $n$  на уровне мощности 20 МВт (точками обозначены частоты излучения с наибольшей спектральной плотностью мощности).

На Рис. 1.6 показан результат всех проведенных измерений - график зависимости частоты СВЧ-излучения от концентрации плазмы в очередном импульсе. Кроме точек, соответствующих уже представленным выше на Рис. 1.5 концентрациям плазмы  $n = 15$  отн.ед.,  $n = 20$  отн.ед.,  $n = 30$  отн.ед.,  $n = 40$  отн.ед. и  $n = 50$  отн.ед., выполнены и измерения на промежуточных значениях для дополнительной проверки достоверности полученных результатов. Точками на графике обозначены частоты излучения с наибольшей плотностью мощности в спектре. Полученные результаты демонстрируют, что при росте концентрации плазмы от 15 отн. ед. до 50 отн. ед. от импульса к импульсу частота СВЧ-излучения меняется приблизительно от 3 ГГц до 9 ГГц.

Для определения мощности СВЧ-излучения были выполнены калориметрические измерения энергии каждого СВЧ-импульса. В качестве

примера на Рис. 1.7 представлены график изменения мощности СВЧ-импульса во времени и спектр излучения при концентрации плазмы 35 отн.ед.

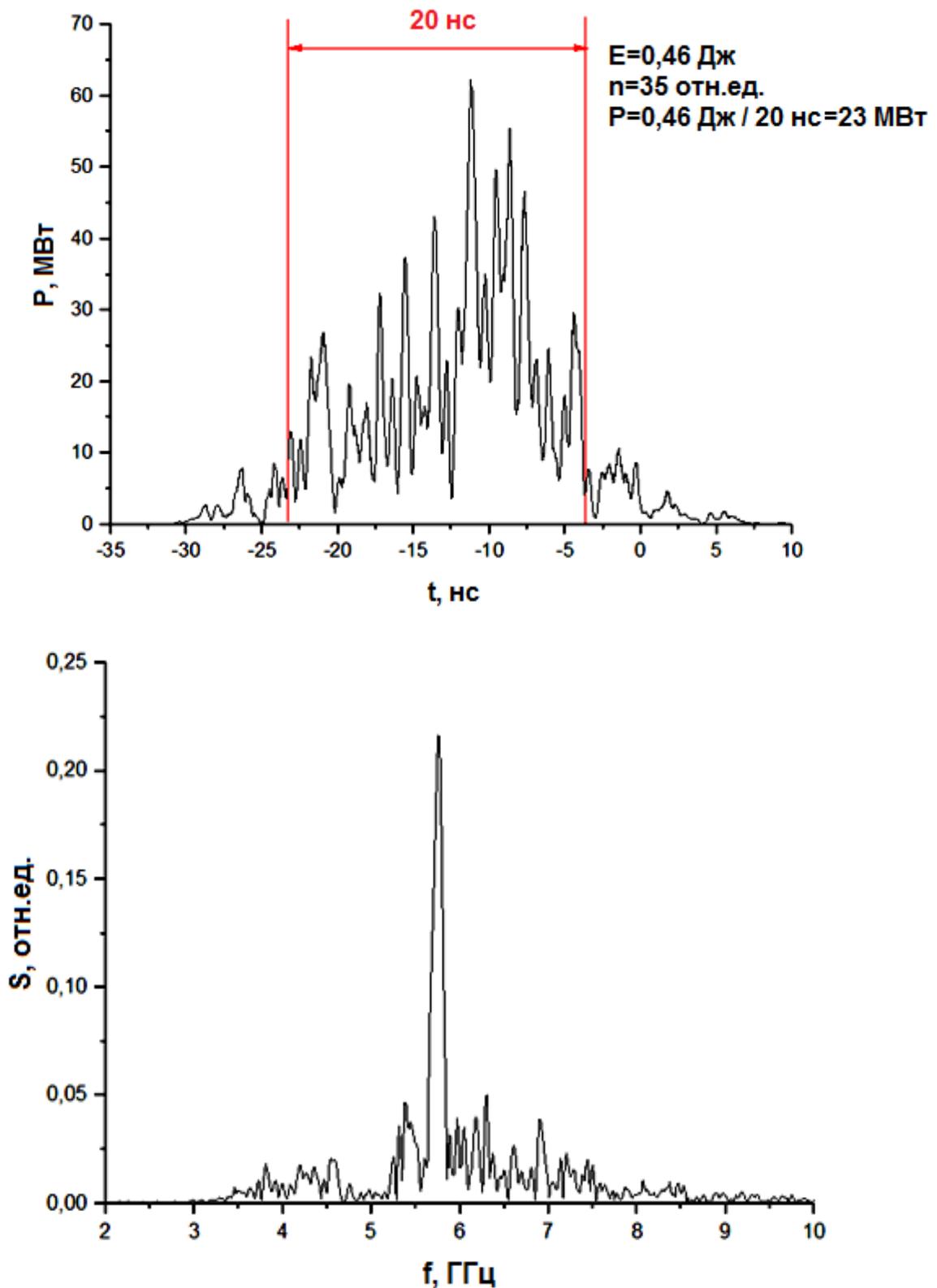


Рис. 1.7. Изменение мощности СВЧ-импульса во времени и спектр сигнала при токе плазмы  $\approx 35$  от.ед.

Измеренная энергия импульсов излучения равнялась 0,46 Дж, что при длительности импульса (по полувысоте) 20 нс позволяет считать среднюю за импульс мощность равной 23 МВт при мощности РЭП ~ 1 ГВт (Рис. 1.7).

Столь скромная величина мощности, вдвое меньше обычной, объясняется тем, что длина плазменно-пучкового взаимодействия не оптимизировалась - в отличие от последующих экспериментов, описанных ниже. Целью данного этапа была демонстрация ранее не доказанной экспериментально способности плазменного мазера с инверсной конфигурацией генерировать СВЧ-излучение в полосе частот СВЧ-излучения с трехкратным отличием верхней и нижней границ на примерно одинаковом мегаваттном уровне мощности. Что и было сделано.

Таким образом, экспериментально продемонстрирован плазменный автогенератор СВЧ-импульсов с инверсной конфигурацией с широкой полосой электронной перестройки частоты излучения от импульса к импульсу от 3 ГГц до 9 ГГц на уровне мощности 20 МВт.

Представленные результаты экспериментального исследования плазменного релятивистского СВЧ-автогенератора с инверсной конфигурацией описаны в работе [45].

## **Выводы Главы 1**

В Главе 1 представлены результаты экспериментального исследования плазменного автогенератора СВЧ-излучения с инверсной конфигурацией, т.е. с плазмой внутри трубчатого пучка релятивистских электронов, предназначенного для импульсно-периодического режима генерации СВЧ-излучения с большой средней мощностью. Впервые экспериментально продемонстрирован плазменный мазер с широкой полосой перестройки частоты излучения от импульса к импульсу от 3 ГГц до 9 ГГц на примерно одинаковом уровне мощности  $\sim 20$  МВт, в котором коллектором электронного пучка служит не внутренний, а внешний, легко охлаждаемый электрод коаксиального волновода.

## **Глава 2 Плазменный релятивистский усилитель шума. Длительность импульса тока РЭП 45 нс**

В данной главе экспериментально исследована возможность смены режима работы плазменного мазера от автогенератора к усилителю шума и обратно. Исследовался мазер, собранный на базе ускорителя с длительностью импульса 45 нс, который уже продемонстрировал успешную работу в режиме автогенератора, описанной в Главе 1. Режим усиления шума стал возможным благодаря подавлению обратной связи с помощью СВЧ-поглотителей – методу, широко известному в СВЧ-электронике.

Кроме измерений мощности и спектров излучения и демонстрации смены режимов работы мазера, на этом этапе исследований решалась задача экспериментального измерения погонного коэффициента усиления электронным пучком плазменной волны, который ранее только рассчитывался.

## 2.1. Устройство плазменного релятивистского усилителя шума

Экспериментальный плазменный мазер был создан на основе сильноточного ускорителя электронов с импульсом напряжения длительностью 45 нс. Пиковое напряжение в экспериментах было равно 270 кВ (Рис. 2.1), пиковый ток составлял 1,2 кА. Ускоритель генерировал единичные импульсы с интервалом в несколько минут.

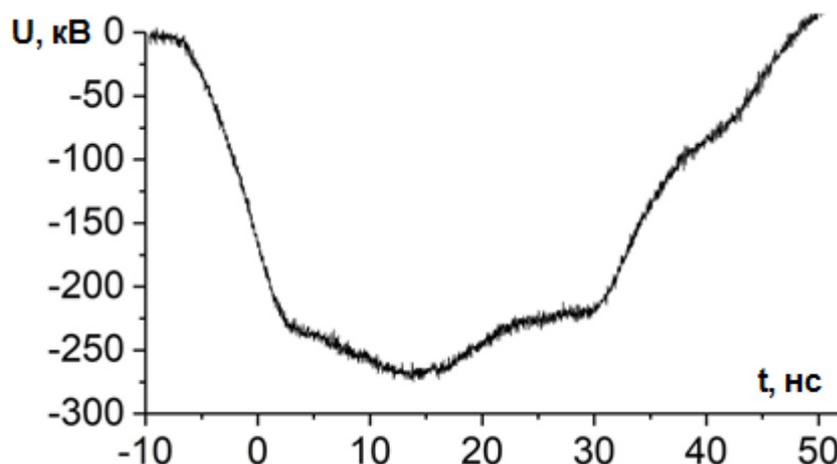


Рис. 2.1. Импульсное напряжение ускорителя электронов 270 кВ.

Существенным отличием схемы плазменного мазера, показанной на Рис. 2.2, в сравнении с мазером, описанным в Главе 1 и показанным на Рис. 1.1, является наличие дополнительного элемента – СВЧ-поглотителей (7), закрепленных на подвижном ограничителе плазмы (8).

СВЧ-поглотитель (7) состоял из четырех треугольных керамических пластин и устанавливался по кругу на металлическую пластину ограничителя плазмы (8). Пластина (8), прикрепленная к цанге (9) с помощью креплений (10), могла перемещаться вдоль оси и изменять длину  $L$  плазменно-пучкового взаимодействия, сохраняя контакт с волноводом (2). Крепления (10) были сделаны из четырех тонких металлических пластин и, как показано далее, не оказывали значительного влияния на трубчатую форму РЭП.

Диаметр волновода (2), равный 6 см, определял нижнюю частоту отсечки излучения 2,9 ГГц. Длина поглотителя (7) была равна 11 см, поэтому длина  $L$  могла изменяться от 11 см до  $\sim 40$  см.

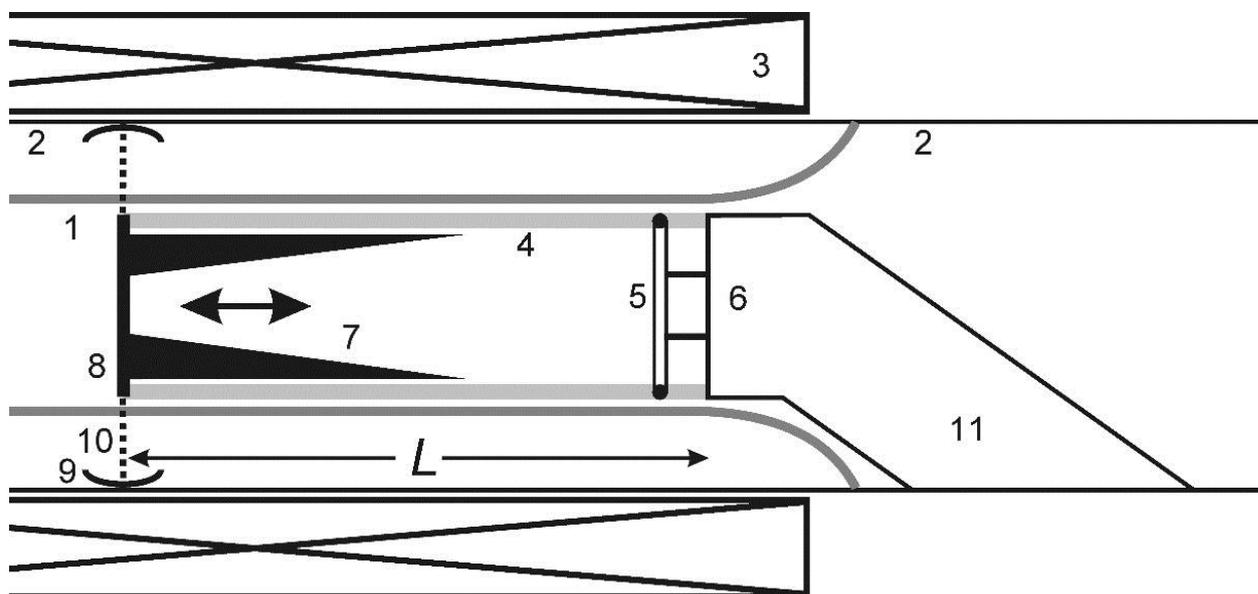


Рис. 2.2. Плазменный релятивистский усилитель шума: 1 - трубчатый РЭП, 2 - волновод, 3 - соленоид, 4 - трубчатая плазма, 5 - термокатод; 6 - внутренний электрод коаксиального волновода, 7 - поглотитель; 8 - металлическая пластина; 9- цанга; 10 - крепления, 11 - преобразователь мод.

Выходное СВЧ-излучение мазера воздействовало на приемную дипольную антенну с размерами меньшими, чем четверть наименьшей регистрируемой длины волны. Через короткий высокочастотный кабель сигнал от антенны направлялся на осциллограф Tektronix DPO71604C с полосой частот 16 ГГц.

Концентрация плазмы в этих экспериментах не измерялась, ее увеличение или уменьшение устанавливалось в относительных единицах, равных току через плазму, как и в экспериментах Главы 1.

## 2.2. Результаты экспериментального исследования плазменного релятивистского усилителя шума

Основным источником информации в этом исследовании было поле СВЧ-излучения мазера, а именно, напряженность электрического поля и его спектр. Полученные сигналы СВЧ-излучения по характеру спектрального состава можно разделить на две группы, типичные примеры представлены на Рис. 2.3. Первый спектр, показанный на Рис. 2.3а представляет шум, спектр на Рис. 2.3б демонстрирует похожий шум, но с несколькими выделенными частотами. Математически строгого критерия наличия или отсутствия пиков на выделенных частотах (напр., связанного с шириной полосы этого пика) создать не удалось, поэтому эти различия определялись, в значительной степени, интуитивно. Ширина полосы излучения и общее спектральное распределение сохранялись в разных импульсах с одинаковой концентрацией в плазмы, но детали спектра на разных частотах были разными.

Поле СВЧ-излучения измерялось в зависимости от длины  $L$  (см. Рис. 2.2) для двух концентраций плазмы: более низкой  $N_{p1}$  и более высокой  $N_{p2}$ , которые создавались, как показано в Главе 1, при более низком или более высоком токе плазменного источника. Зависимости напряженности электрического поля выходного СВЧ-излучения от длины  $L$  для более низкой концентрации плазмы  $N_{p1}$  представлены на Рис. 2.4. Напряженность электрического поля рассчитана как среднеквадратичное значение (RMS). Два графика на Рис. 2.4 относятся к различным типам спектра, показанным на Рис. 2.3, каждая точка представляет среднее значение по нескольким результатам измерений.

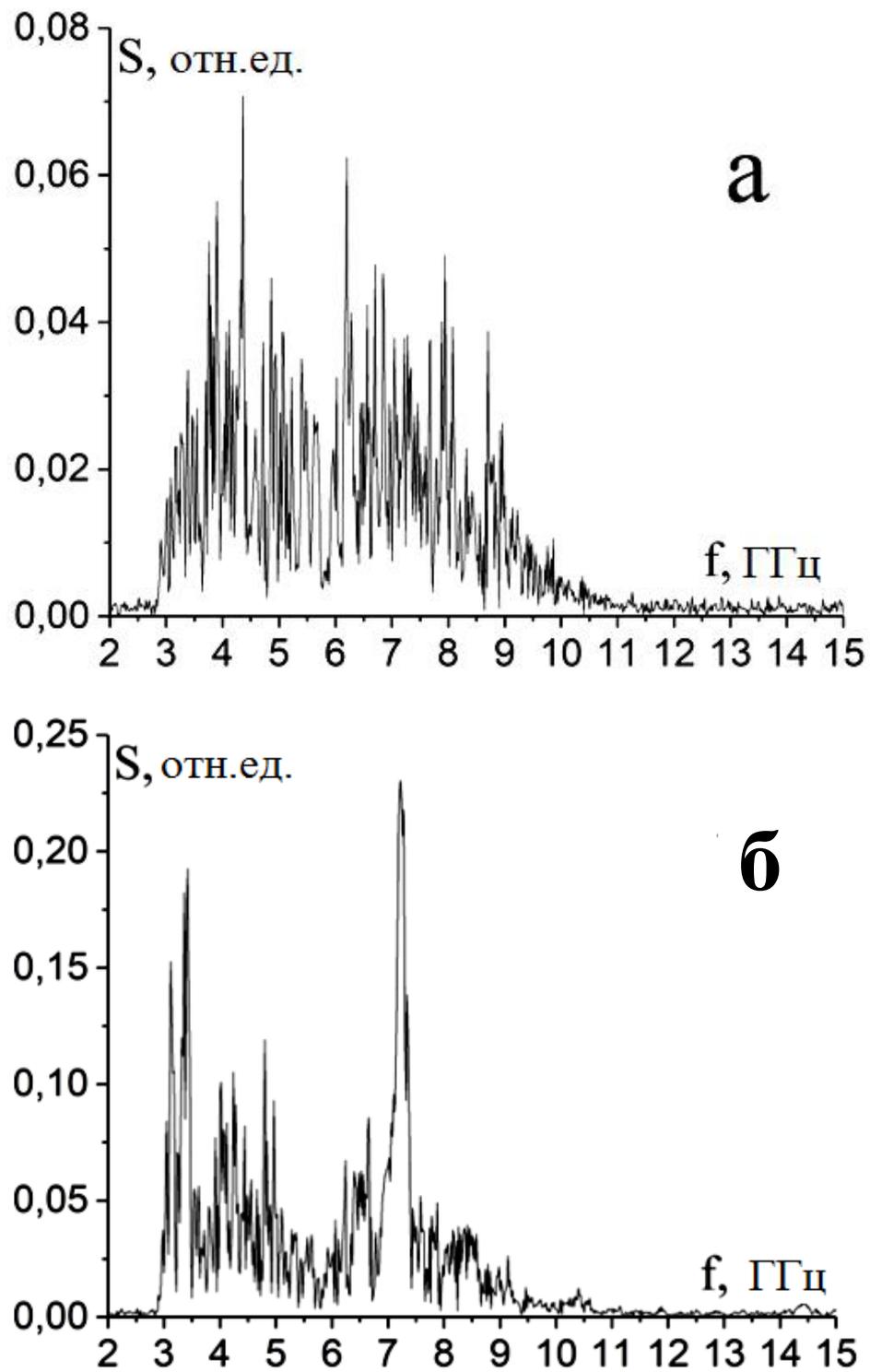


Рис. 2.3

Рис. 2.3. Типичные спектры микроволнового поля в 2 режимах работы с низкой концентрацией плазмы  $N_{p1}$ : (а) шум, (б) шум с выделенными частотами.

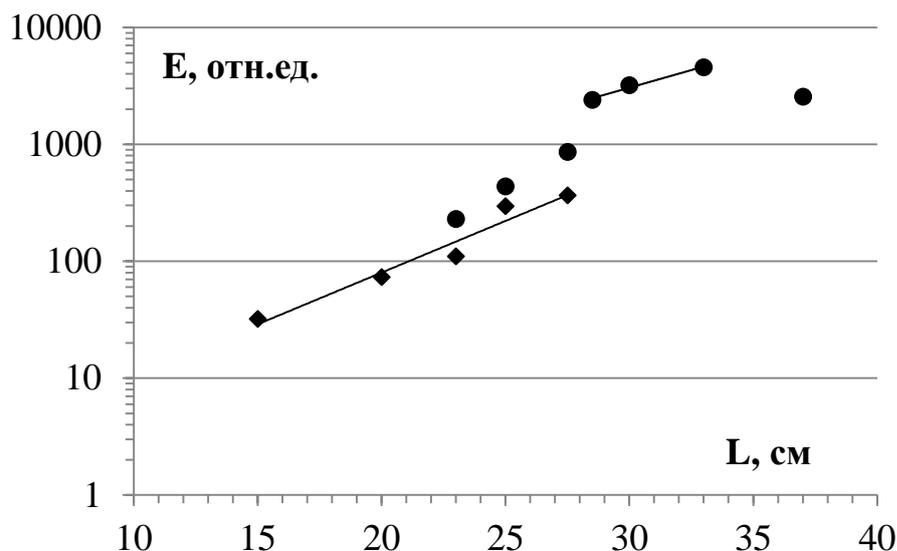


Рис. 2.4. Зависимость среднеквадратичной напряженности поля  $E$  от длины  $L$  для низкой концентрации плазмы  $N_{p1}$ : (♦) шум; (•) шум с выделенными частотами.

Мазер с небольшой длиной  $L < 23$  см излучал шум со спектром, показанным на Рис. 2.3а. При расстояниях от 23 до 27,5 см регистрировались импульсы как шумоподобные, так и с выделенными частотами. При  $L > 27,5$  см регистрировались только спектры, аналогичные показанным на Рис. 2.3б, а пики спектра на выделенных частотах значительно превышали шумоподобный фон. После выхода общей мощности СВЧ-излучения на максимум происходило снижение мощности для  $L > 33$  см.

Сравнение Рис. 2.5а и Рис. 2.3 позволяет заключить, что при росте концентрации плазмы от  $N_{p1}$  до  $N_{p2}$  ширина спектра СВЧ-излучения заметно увеличивается: при сохранении нижней границы на уровне частоты отсечки выходного волновода 2,9 ГГц верхняя частота спектра возросла с  $\sim 9$  ГГц до  $\sim 15$  ГГц. Зависимость спектра от времени, показанная на Рис. 2.5б, демонстрирует его стабильную форму с некоторыми изменениями мощности в соответствии с импульсом напряжения, показанным на Рис. 2.1.

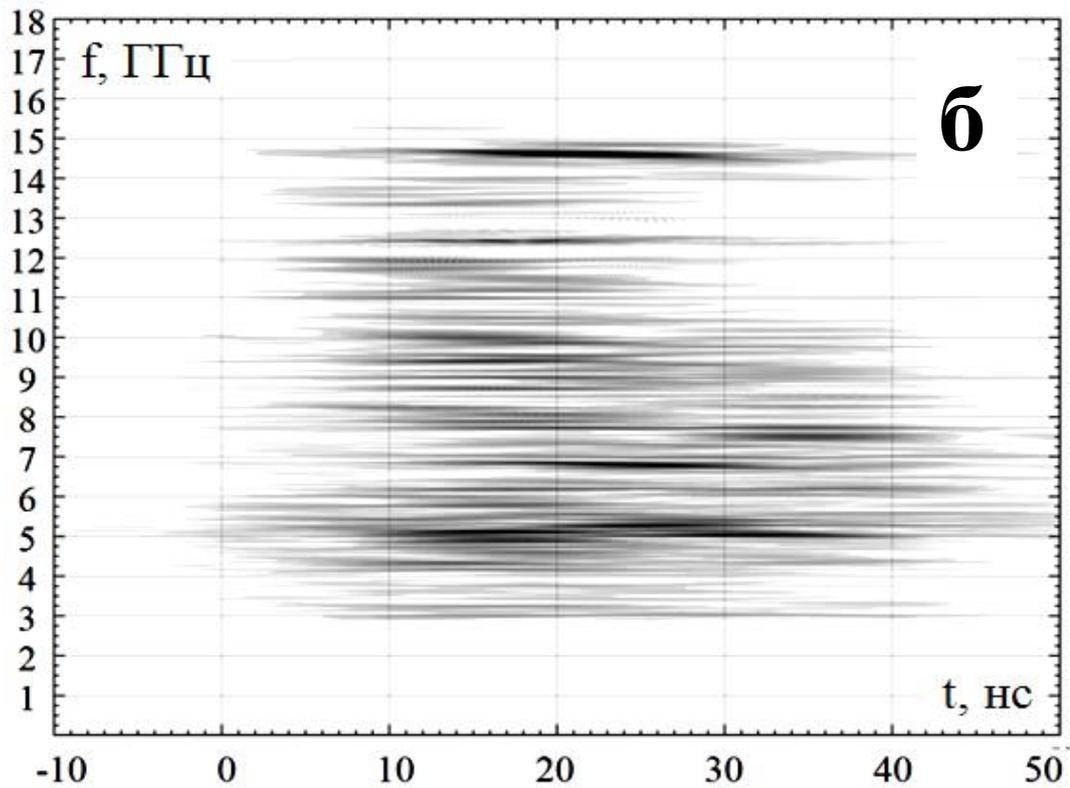
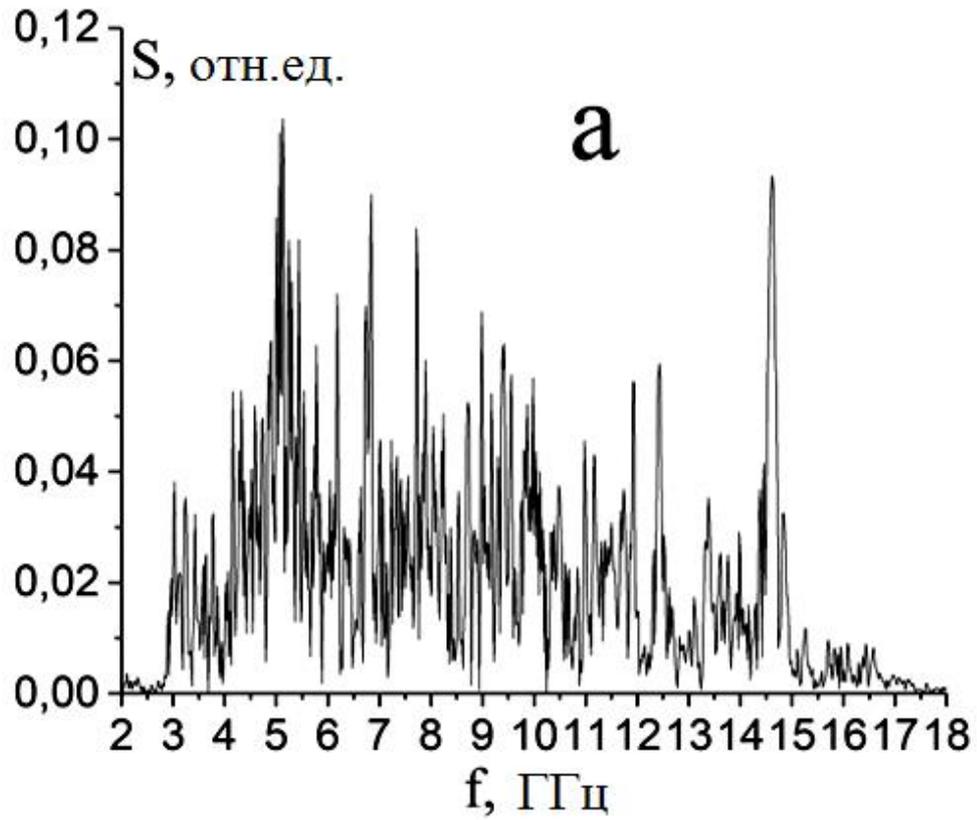


Рис. 2.5. Спектр выходного поля СВЧ-излучения для высокой концентрации плазмы  $N_{p2}$ : (а) интегрально по времени; (б) зависимость от времени.

Зависимость усредненной напряженности поля СВЧ-излучения от длины  $L$  для высокой концентрации плазмы  $N_{p2}$  показана на Рис. 2.6. Все точки соответствуют шумоподобным спектрам, показанным на Рис. 2.5, с учетом субъективности оценки, описанной выше.

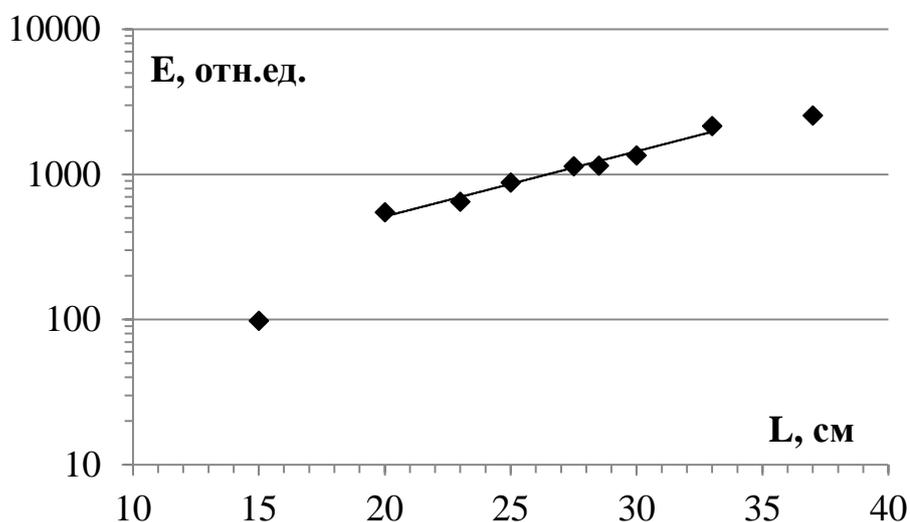


Рис. 2.6. Зависимость среднего поля СВЧ-излучения  $E$  от длины  $L$  для высокой концентрации плазмы  $N_{p2}$ .

Общая энергия СВЧ-импульса измерялась с помощью широкополосного калориметра, который перекрывал выходной излучающий рупор мазера. Согласно калориметрическим данным, максимальная мощность СВЧ-излучения, измеренная в экспериментах, не превышала 10 МВт, поэтому максимальная эффективность составляла  $\sim 3\%$ .

Для сравнения работы мазера в качестве усилителя шума с ранее полученными результатами для мазеров, работающих как автогенераторы, были удалены СВЧ-поглотители ((7) на Рис. 2.2). Спектры излучения получившегося автогенератора с обратной связью показаны на Рис. 2.7. Спектры стали более узкими, и их средняя частота возрастала с увеличением концентрации плазмы.

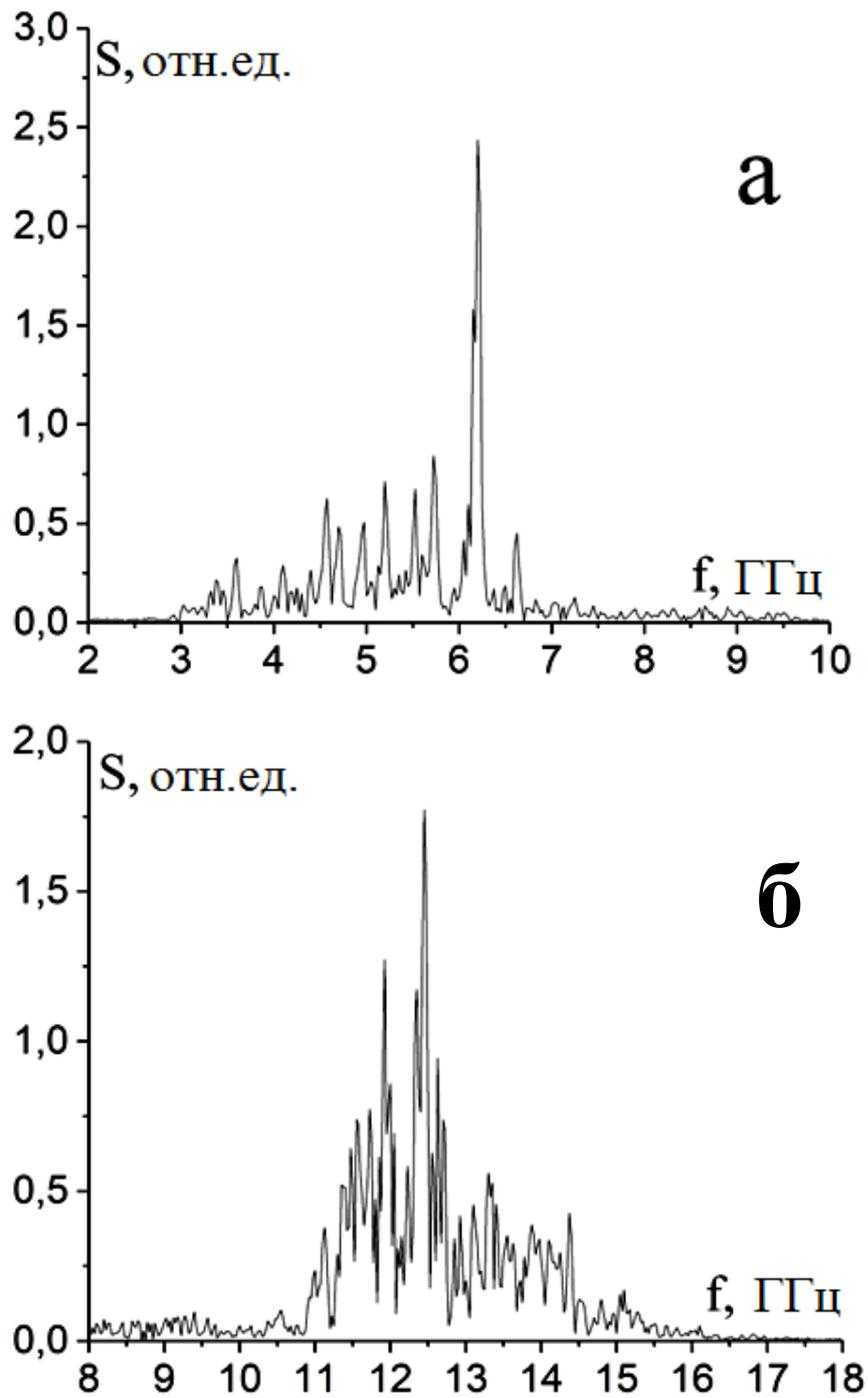


Рис. 2.7. Спектры излучения лазера без СВЧ-поглодителей: (а) низкая концентрация в плазме  $N_{p1}$ ; (б) высокая концентрация в плазме  $N_{p2}$ .

### 2.3. Анализ экспериментальных результатов с плазменным релятивистским усилителем шума

Спектры с широким диапазоном излучения, показанные на Рис. 2.3, подтвердили выводы работы [5] о возможности большой ширины полосы частот погонного коэффициента пространственного усиления для фиксированной концентрации плазмы. В [5] был экспериментально продемонстрирован широкий спектр СВЧ-излучения плазменного мазера, который перекрывал диапазон от 9 ГГц до 39 ГГц за один импульс. Выделенные частоты в спектрах излучения, подобные показанным на Рис. 2.3б (например, на частоте 7,2 ГГц), также имеют очевидное происхождение: такими пиками в спектре проявляют себя продольные моды плазменно-пучкового резонатора в СВЧ-автогенераторе.

Основной особенностью рассматриваемого усилителя шума при сравнении с плазменным СВЧ-автогенератором является подавление обратной связи, обеспечиваемое СВЧ-поглотителями. Поскольку поглотитель являлся ключевым элементом в этой работе, его качество представляло особый интерес. Было трудно проводить измерения отраженной от СВЧ-поглотителей плазменной волны, то есть измерять коэффициент  $\kappa_{in}$  с помощью имеющейся установки. Как указано ниже, преобразование плазменной волны в моду ТЕМ коаксиального волновода и наоборот происходит с коэффициентом отражения около 0,1...0,3 для различных концентраций плазмы, причем это значение ранее рассчитывалось, но никогда не измерялось в экспериментах. Косвенным измерениям  $\kappa_{in}$  с использованием формулы (3) также препятствует разброс по всем другим измеренным параметрам, а именно  $\kappa_{out}$ ,  $\delta k$  и  $L$ , которые будут обсуждаться ниже.

Ранее подчеркивалось, что было трудно установить строгий численный критерий наличия продольных мод для нахождения спектров с выделенными частотами и без них. Если пик был в несколько раз выше шумового фона, то это, скорее всего, было результатом обратной связи, но если разница не была столь отчетливой, то существовала неопределенность в идентификации работы мазера в качестве автогенератора или усилителя шума. Зависимость электрического поля

СВЧ-излучения от длины, изображенная на Рис. 2.4, состоит из двух частей, а именно экспоненциального роста усиленного шума с ростом длины до порога  $L_{th} \approx 28$  см, а затем скачкообразного перехода в режим автогенератора. Наклон линейного тренда точек, обозначенных как шум при  $L < L_{th}$ , позволяет оценить погонный коэффициент усиления  $\delta k \approx 0,2$  см<sup>-1</sup>, но с учетом всех точек этой области, связанных с усилением шума, наклон линейного тренда возрастет до  $\delta k \approx 0,25$  см<sup>-1</sup>. После скачкообразного перехода в режим автогенерации с обратной связью наклон линии при  $L > L_{th}$  становится менее крутым, и процесс усиления волны переходит в нелинейное насыщение.

Для высокой концентрации плазмы  $N_{p2}$  однозначное отнесение спектров к усилению шума или к автогенератору было не так очевидно. При усилении шума погонный коэффициент усиления составляет  $\delta k \approx 0,1$  см<sup>-1</sup> (Рис. 2.6), 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 [4].

Помимо коэффициента усиления  $\delta k$ , для оценки коэффициента отражения  $\kappa_{in}$  по формуле (3) также обязательно знание длины усиления  $L$ . Формально Рис. 2.2 показывает расстояние  $L$ , то есть расстояние, измеренное от пластины (8). На самом деле, в непосредственной близости от СВЧ-поглотителей плазменная волна затухала и не влияла на РЭП так сильно, как в пустом пространстве. Следовательно, эффективная длина усиления шума отличается от  $L$  на величину, меньшую размера СВЧ-поглотителя (11 см), то есть можно считать пороговую длину  $L_{th}$  равной 17 - 28 см. Следует заметить, что именно по причине большой неопределенности эффективной длины усиления шума при наличии СВЧ-поглотителей невозможно было экстраполировать зависимость среднеквадратичной напряженности поля от длины (Рис. 2.4 и Рис. 2.6) до  $L = 0$  с целью определения начального уровня усиливаемых шумов.

При упомянутых выше допущениях относительно длины  $L$  общее усиление должно быть оценено в широких пределах как  $e^{\delta k \cdot L} \approx$  от 30 до 1100 ( $\approx$  от 30 до 60

дБ), а общий коэффициент отражения, рассчитанный по формуле (3), должен составлять  $\kappa_{in} \cdot \kappa_{out} \sim 0,03$  до  $0,9 \cdot 10^{-3}$ . Кроме того, граница  $L$  между двумя режимами размыта, как показано на Рис. 2.4, потому что в разных импульсах РЭП и плазма несколько менялись, и поэтому длина  $L_{th}$  также немного менялась.

Третьим фактором, затрудняющим оценку свойств поглотителя по результатам проведенного эксперимента, является значение коэффициента отражения  $\kappa_{out}$  [43]. В аналогичном устройстве в работе [16] для фиксированной концентрации плазмы расчетное значение  $\kappa_{out}$  росло с  $\sim 0,1$  до  $\sim 0,3$  с ростом частоты в диапазоне усиления от 0 до 5 ГГц (где  $\delta k > 0$ ). Предполагая, что значение  $\kappa_{out}$  изменяется в пределах одного и того же диапазона, коэффициент отражения для применяемого СВЧ-поглотителя может быть оценен как  $\kappa_{in} > 0,003$ , а затухание максимум 50 дБ.

Значение  $\kappa_{in}$ , необходимое для того, чтобы мазер усиливал шум, следует из формулы (3), где  $\delta k \approx 0,2 \text{ см}^{-1}$ ,  $\kappa_{out} \sim 0,2$ , а оптимальная длина взаимодействия плазмы и РЭП  $L$  может быть найдена с использованием Рис. 2.4 и Рис. 2.6. Экстраполяция линий, представляющих режим усиления шума, до уровня насыщения дает примерно одинаковое значение от 35 до 40 см, как для низких, так и для высоких концентраций плазмы. Численные расчеты [7] почти такого же мазера в модели РС для усилителя шума показали оптимальную длину 40 см. Чтобы удовлетворить формуле (3) при  $L = 40$  см, сигналы, отраженные от поглотителя, должны быть снижены, по меньшей мере, на 55 дБ, что несколько противоречит даже приведенному выше расчетному максимуму в 50 дБ для имеющегося поглотителя.

Конечно, оценка  $\kappa_{in}$  с разбросом до 2 порядков может быть сомнительной. Более важным является тот безусловный факт, что используемый поглотитель не обеспечивал усиления шума на высоком уровне мощности без перехода в режим автогенератора даже при низкой плотности плазмы. Возможно, другой поглотитель обеспечил бы меньшее отражение и большую мощность излучения в режиме усиления шума, но существует еще один, подробно описанный в

следующей главе способ полного устранения обратной связи в плазменном лазере. Представленные выше результаты экспериментов помогли в создании такого источника шумоподобного сигнала – плазменного лазера, в котором отсутствие обратной связи обеспечивается достаточно коротким импульсом, а не СВЧ-поглотителем.

Обратная связь в плазменном лазере работает следующим образом: возмущение на левой границе области плазменно-пучкового взаимодействия (пластина 8 на Рис. 2.2) усиливается на пути к правой границе (электрод 6), затем отражается от нее и возвращается к начальной точке, где снова отражается. Очевидно, что, если импульс тока завершится до замыкания этой петли обратной связи, то лазер сможет работать только как усилитель шума. Максимальная длительность импульса  $\tau$ , необходимая для реализации такой концепции устранения обратной связи, зависит от длины  $L$  и групповых скоростей плазменной волны на пути вперед  $v_1$  и назад  $v_2$ , которые определяют длительность замыкания петли обратной связи  $T_0$ :

$$\tau < \frac{L}{v_1} + \frac{L}{v_2} \equiv T_0 \quad (6)$$

Групповые скорости плазменной волны  $v_1$  и  $v_2$  в лазере были оценены в более ранних работах как  $\sim 0,5c$ , где  $c$  – скорость света, но они могут быть получены непосредственно из показанных выше спектров автогенератора. Время замыкания петли обратной связи отвечает за интервал между частотами продольных мод в спектрах резонатора:  $\Delta f = 1/T_0$ . Спектры на Рис. 2.7б, описывающие работу автогенератора с  $L = 15$  см, содержат повторяющиеся пики с  $\Delta f \approx 0.2$  ГГц, что соответствует средней скорости  $1,2 \cdot 10^8$  м/с или  $0,4c$ . При длине насыщения  $L = 40$  см максимальная длительность импульса при отсутствии обратной связи составляет  $\sim 7$  нс. В экспериментах оптимальная длина может составлять менее 40 см, а значение  $\Delta f \approx 0.2$  ГГц на Рис. 2.7б не совсем точно, поэтому для гарантии отсутствия обратной связи лучше использовать вдвое более короткий импульс  $< 4$  нс.

В описанных выше экспериментах выходная мощность в режиме усиления шума, по крайней мере, для низких концентраций плазмы была довольно низкой, далекой от насыщения. Следовательно, результаты экспериментов можно сравнивать с результатами линейной теории плазменных мазеров, которая предсказывает широкую полосу излучения; эксперименты показали именно такие результаты. Согласно нелинейной теории, увеличение мощности в нелинейном режиме приводит к сужению полосы излучения вокруг частот с наибольшим погонным коэффициентом усиления  $\delta k$ . Полоса излучения, показанная на Рис. 2.3а, широкая именно потому, что мощность мала, далека от уровня насыщения, см. Рис. 2.4.

Сужение полосы частот излучения с ростом мощности было продемонстрировано в режиме автогенератора без СВЧ-поглотителя, см. Рис. 2.7 (примерно такой же результат наблюдался и в экспериментах [41]). Автогенератор излучает сравнительно более узкие спектры на более высоких уровнях мощности, спектр смещается от интервала 3...6 ГГц при низкой концентрации плазмы до интервала от 11...14 ГГц при более плотной плазме. Ранее ширина спектра 3 ГГц и сдвиг средней частоты на 8 ГГц с ростом плотности плазмы были показаны в РС моделировании плазменного мазера в режиме усиления шумов [7].

Можно ожидать, что усилитель шума с достаточно коротким импульсом, предотвращающим обратную связь, сможет воспроизводить результаты, показанные на Рис. 2.7, с не меньшей эффективностью, но с более «шумоподобными» спектрами. Более того, уменьшение длительности импульса также может повысить эффективность плазменного мазера. Форма осциллограммы усиленного шума в плазменном мазере [41] с длительностью  $\sim 400$  нс с очевидностью демонстрирует эффект укорочения СВЧ-импульса [77]. Специальные исследования этого эффекта в плазменных мазерах, рассмотренные в статье [44], выявили причины снижения мощности СВЧ-излучения и его полного прекращения в течение нескольких десятков наносекунд. Основная

причина эффекта – поток электронов по плазме, противоположный РЭП, который модулирует плазму, нагревает ее и повышает ее потенциал. Этот поток электронов появляется в двойном слое на поверхности электрода, обозначенного как (6) на Рис. 2.2, в сильном электрическом поле СВЧ-излучения и стимулирует процесс укорочения СВЧ-импульса. Поскольку механизм укорочения импульса сравнительно медленный, при длительности импульса  $< 4$  нс описанные причины снижения мощности могут и не проявляться.

Представленные результаты экспериментального исследования плазменного релятивистского усилителя шума описаны в работах [42], [46] и [47].

## Выводы Главы 2

В описанных выше экспериментах была предпринята попытка усиления СВЧ-шума широкополосным плазменным мазером с использованием сильноточного релятивистского электронного пучка с параметрами: 270 кэВ, 1,2 кА, 45 нс. Плазменные мазеры обычно работали как автогенераторы с обратной связью, обеспечиваемой частичными отражениями и преобразованиями плазменной волны на границах области взаимодействия РЭП с плазмой. В плазменных мазерах, предназначенных для усиления внешнего сигнала с коэффициентом  $\sim 30$  дБ [40], а также в усилителе шума [41], обратная связь подавлялась СВЧ-поглотителями аналогично усилителям традиционной СВЧ-электроники. Для усиления шумов подавление обратной связи должно быть эффективным, оценки показали необходимость подавления сигнала на 55 дБ, а имеющиеся СВЧ-поглотители не обеспечивали этого значения и, следовательно, не обеспечивали усиления шума до высокой мощности излучения. На определенном уровне мощности включалась петля обратной связи, и включался режим автогенератора, спектры излучения приобретали выделенные частоты продольных мод, характерные для режима автогенератора. Максимальная мощность 10 МВт с КПД 3% была достигнута именно в этом режиме.

Проведенные эксперименты позволили впервые измерить погонный коэффициент усиления плазменной волны в мазере:  $0,1 \dots 0,2 \text{ см}^{-1}$ . Оценочная длина мазера, необходимая для работы в качестве усилителя шума с мощностью, близкой к уровню насыщения, составила 35...40 см.

Полное устранение обратной связи возможно за счет сокращения длительности импульса, и проведенные эксперименты предоставили информацию, необходимую для построения мощного широкополосного плазменного мазера для усиления шума. В частности, по полученным данным, длительность импульса такого мазера не должна превышать 4 нс [78].

### **Глава 3 Плазменный релятивистский усилитель шума. Длительность импульса тока РЭП 2 нс**

#### **3.1. Принцип действия плазменного релятивистского усилителя шума с коротким импульсом**

Плазменный мазер, описанный в Главе 2, намного превосходит или не уступает (напр., [58]) всем мощным СШП генераторам по ширине частотного диапазона. Тем не менее, длительный импульс электронного пучка и установленные в этом усилителе СВЧ-поглотители определили его недостаток. Энергоэффективность усиления шума была довольно низкой. Если суммарный коэффициент усиления шума превышал некоторое пороговое значение, устройство превращалось в автогенератор, т.к. СВЧ-поглотители не обеспечивали должного уровня подавления обратной связи. Более того, даже если бы поглотители были идеальными, энергоэффективность вряд ли могла бы превысить 5-10%, как у всех экспериментальных плазменных мазеров, рассмотренных в [4, 60]. Причиной тому являются модуляция и нагрев плазмы обратным килоамперным током электронов с энергиями  $\sim 100$  кэВ, описанные в [44], которые развиваются за пару десятков наносекунд.

Способ преодоления указанного выше ограничения эффективности при усилении шума заключается в использовании достаточно короткого импульса электронного пучка. Контур обратной связи не замыкается, если усиливаемая плазменная волна не успевает пройти путь по плазменно-пучковому резонатору от левой до правой границы и обратно. Импульс РЭП, взаимодействующий с плазменной волной, прекращается до того, как усиленная волна отразится от правой границы резонатора (центральный электрод 5 на Рис. 2.2) и достигнет левой границы области взаимодействия пучка с плазмой.

Целью работ, описанных в Главе 3, было создание плазменного мазера с импульсом, достаточно коротким для режима усиления шума без обратной связи, и измерение его эффективности, перестроения спектра при изменении плотности

плазмы и всего диапазона частот. При малой длительности импульса плазменный мазер может быть свободен от своего главного недостатка - низкого КПД и может конкурировать как с сильноточными вакуумными СВЧ-источниками, так и с мощными СШП-источниками излучения.

### 3.2. Экспериментальное исследование плазменного релятивистского усилителя шума

Эксперименты проводились на ускорителе электронов [79], основанном на импульсном наносекундном генераторе РАДАН-303 [80] и блоке сжатия энергии импульса, аналогичном представленному в [81]. Импульс тока электронного пучка имел короткую длительность  $\sim 2$  нс, максимальную энергию электронов 270 кэВ и максимальный ток 1,7 кА (Рис. 3.1). Метод динамической рефлектометрии временной области [79] позволял регистрировать синхронизированные осциллограммы напряжения на катоде и тока пучка, излучаемого с катода в режиме взрывной электронной эмиссии.

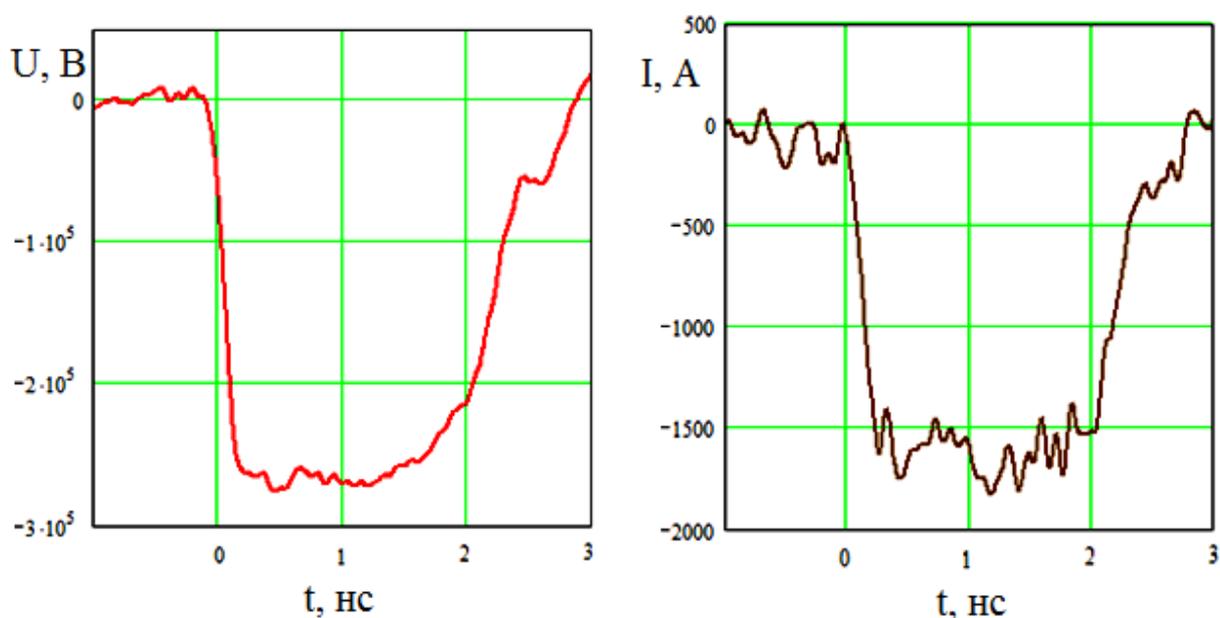


Рис. 3.1. Импульсы тока и напряжения ускорителя электронов РАДАН.

На Рис. 3.2 показано произведение напряжения на катоде и тока РЭП, т.е. мощность РЭП; полная энергия импульса РЭП составила  $\sim 0,85$  Дж. Таким образом, Рис. 3.2 позволяет сравнить мощности и полные энергии импульсов РЭП и СВЧ-излучения, показанного ниже. Групповая скорость плазменной волны, измеренная в Главе 2 (усредненная по формуле (6) для прямой и обратной волн), составила  $0,4 \cdot c = 1,2 \cdot 10^{10}$  см/с, следовательно, длительность импульса 2 нс

обеспечивает полное отсутствие обратной связи при длине плазменно-пучкового резонатора мазера более 12 см.

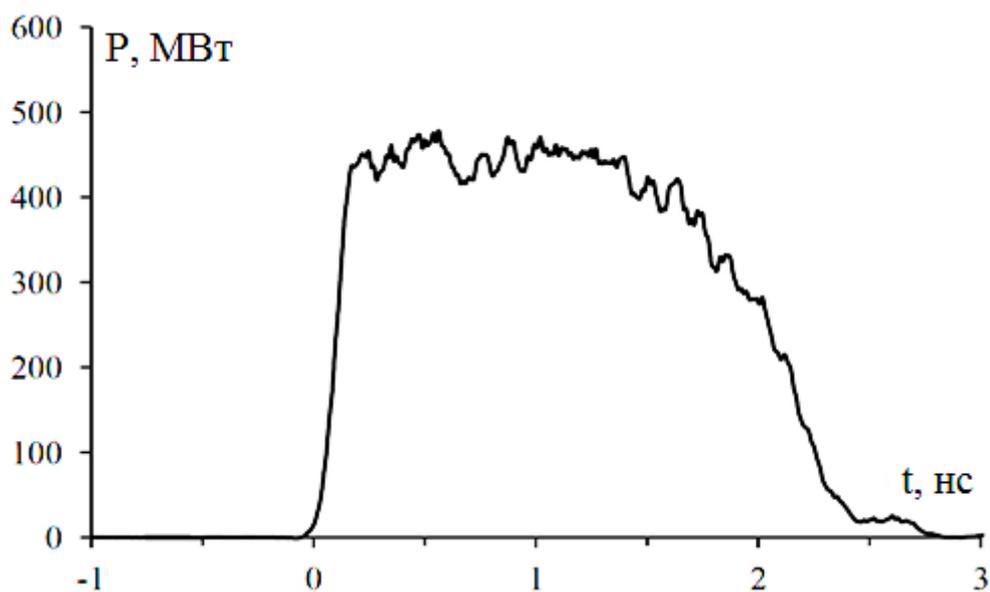


Рис. 3.2. Импульсная мощность электронного пучка.

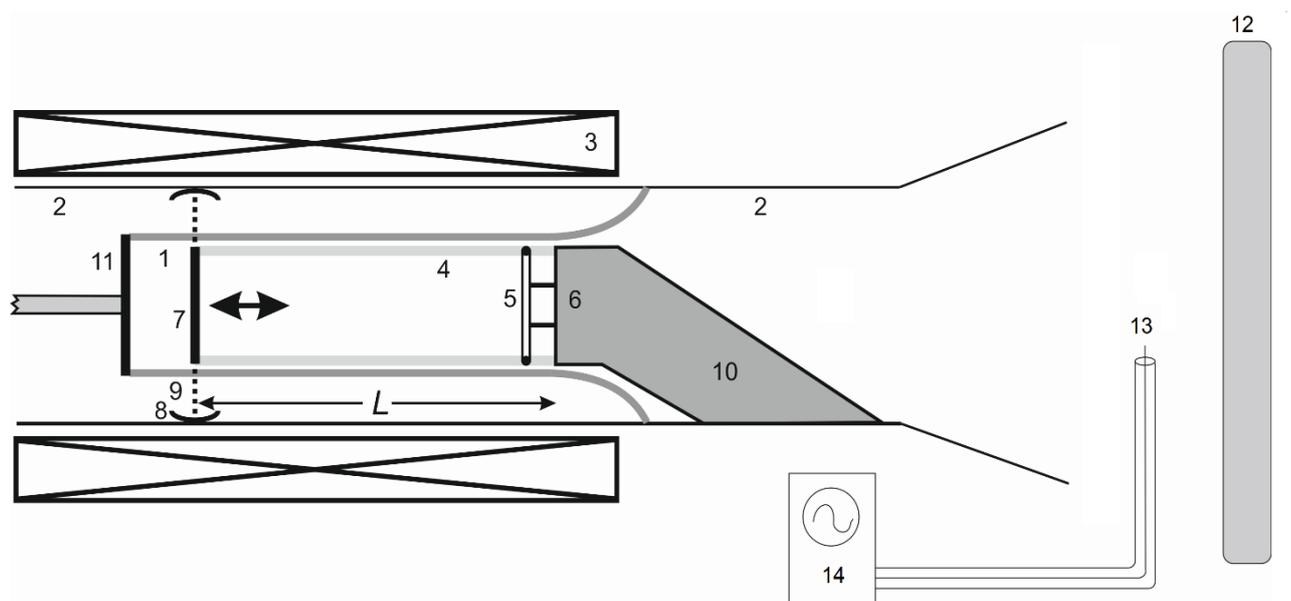


Рис. 3.3. Плазменный релятивистский усилитель шума: 1 - трубчатый РЭП, 2 - волновод, 3 - соленоид, 4 - плазма, 5 - термокатод, 6 - внутренний электрод коаксиального волновода, 7 - металлическая пластина, 8 - цанга, 9 - крепления, 10- преобразователь мод, 11 - катод РЭП, 12 - панель неоновых ламп, 13 - штыревая антенна, 14 - широкополосный осциллограф.

Экспериментальная установка была почти такой же, как и в работе, описанной в Главе 2, с усилителем шума с длинным импульсом РЭП (Рис. 2.2), за исключением СВЧ-поглотителей, которые были удалены за ненадобностью, и ускорителя электронов с коротким импульсом. Схема эксперимента показана на Рис. 3.3.

Трубчатый РЭП (1) (средний диаметр 44 мм, толщина 1 мм) генерировался взрывоэмиссионным катодом (11) и распространялся слева направо в волноводе (2) (диаметр 60 мм) в магнитном поле  $\approx 1$  Тл соленоида (3). Трубчатая плазма (4) (средний диаметр 37 мм, толщина 2 мм) предварительно формировалась перед каждым импульсом специальным электронным пучком (энергия 500 эВ, ток от 0 до 50 А, длительность 50 мкс) с термокатода (5), который ионизировал остаточный газ (воздух) под давлением  $\sim 0,1$  Па. С ростом тока электронного пучка с термокатода, возрастала плотность плазмы. Как и в предыдущих экспериментах, из-за физических ограничений – наличия сильных СВЧ-полей и интенсивного света от взрывоэмиссионного катода – концентрацию плазмы можно было определить лишь по спектру СВЧ-излучения, т.е. сравнением с численным моделированием [74]. Концентрация плазмы  $0,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  соответствовала частоте 4 ГГц, а  $1,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  – частоте 11 ГГц.

Ограничитель плазмы, состоящий из металлической пластины (8), цанги (9) и крепления (10), позволял изменять длину плазменно-пучкового взаимодействия от 10 см до 37 см. СВЧ-излучение распространялось от плазмы к правой границе через коаксиальный волновод с электродами (6) и (2), преобразователь моды ТЕМ в моду ТМ<sub>11</sub> (10) и полый волновод (2) диаметром 60 мм. Как и в установке, описанной ранее в Главе 2, излучаемые и зарегистрированные частоты СВЧ-излучения в этой работе всегда были выше частоты отсечки волновода круглого сечения  $\approx 2,9$  ГГц.

Фотографии экспериментальной установки плазменного мазера - усилителя шума на базе ускорителя РАДАН представлены на Рис. 3.4.

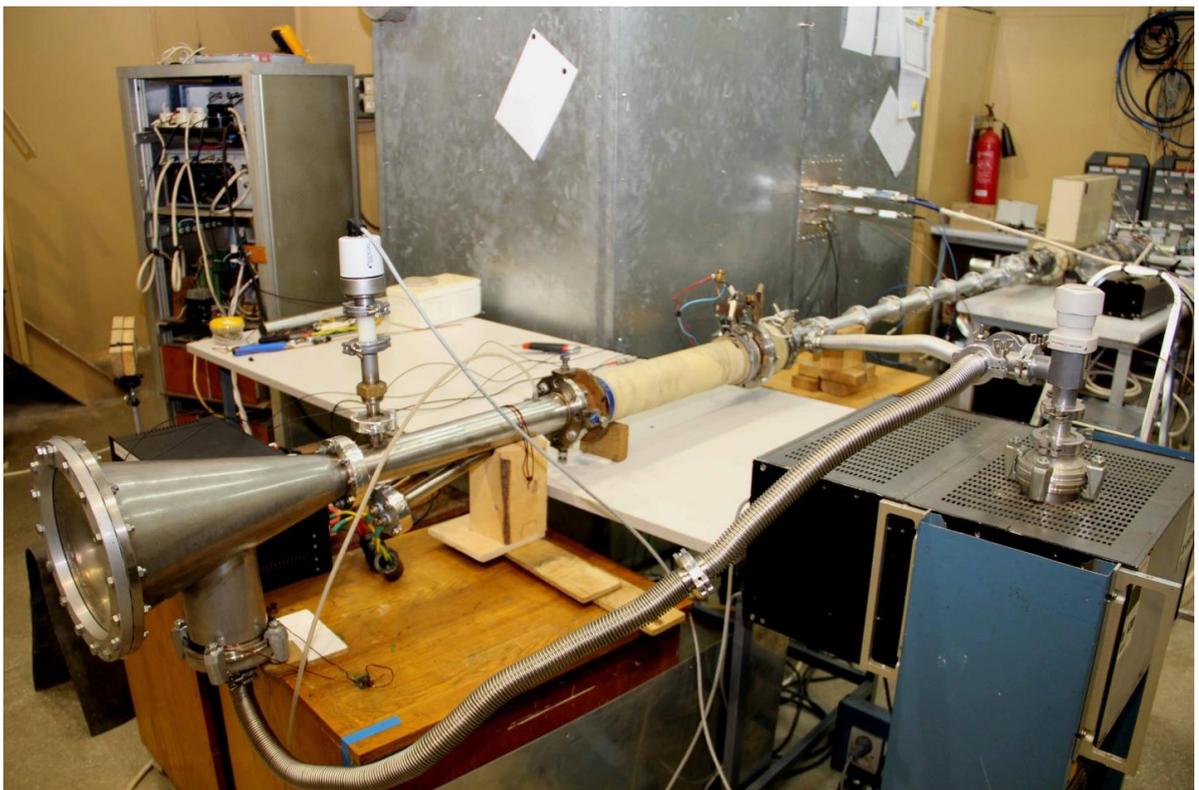


Рис. 3.4. Экспериментальная установка плазменного мазера на базе ускорителя электронов «РАДАН».

В ходе эксперимента была реализована схема диагностики спектрального состава и мощности СВЧ-излучения, представленная на Рис. 3.5. Характеристики

генерируемого мазером широкополосного СВЧ-излучения определялись с помощью измерительного СВЧ-тракта, состоящего из высокочастотного кабеля с миниатюрной измерительной штыревой антенной, аттенюаторов и осциллографа Tektronix DPO 73304D с полосой пропускания до 32 ГГц. Стержневая антенна была расположена на расстоянии  $L=50$  см от оси рупора.

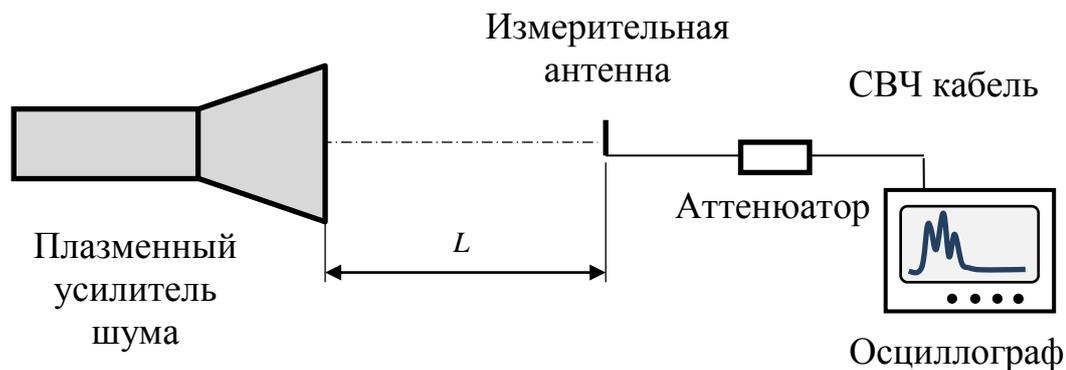


Рис. 3.5. Схема измерений характеристик СВЧ-излучения плазменного релятивистского усилителя шума.

Для защиты от электромагнитных наводок кабель прикрывали широкополосные СВЧ-поглотители, Рис. 3.6. Измерительный СВЧ-тракт и широкополосный осциллограф, как и ранее, регистрировали электрическое поле СВЧ-излучения, спектральный состав которого определялся с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Ранее в Главе 2 отмечалась корреляция в множественных импульсах между данными с антенны и с широкополосного широкоапертурного СВЧ-калориметра, это обстоятельство позволило тогда откалибровать антенну при различных ее положениях относительно рупора и получить зависимости СВЧ-поля и мощности в абсолютных единицах.



Рис. 3.6. Выходной рупор плазменного лазера (слева) и измерительная антенна, окруженная СВЧ-поглотителем (справа).

На этапе настройки и вывода плазменного лазера в рабочий режим методом «автографа» были получены отпечатки РЭП и плазмы (Рис. 3.7).

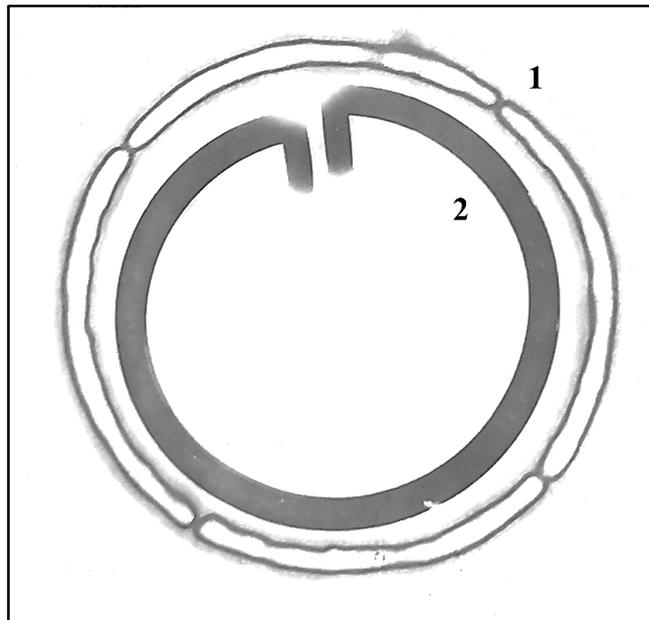


Рис. 3.7. Отпечатки РЭП (1) и плазмы (2) на термобумаге.

РЭП (1) имел средний диаметр 44 мм и толщину  $\sim 1$  мм, соответствующие размеры плазмы (2) составляли 37 мм и 2 мм, соответственно. Отпечатки РЭП и

плазмы на термобумаге, сделанные в разных импульсах (т.е. при заведомом отсутствии взаимодействия между ними), позволяют сделать несколько выводов. Отпечаток РЭП ограничен внешним контуром, поскольку термослой в центральной части «выжжен» избыточной энергией пучка. На отпечатке РЭП видны следы 4 креплений ограничителя плазмы, незначительно искажающих трубчатую структуру пучка, но практически нет следов филаментации. Филаментация РЭП проявляется как следствие диокотронной неустойчивости (но не при столь малых токах 1.5 кА и малых расстояниях от катода  $\sim 10$  см в магнитном поле  $> 1$  Тл [82], как в данном случае), так и вследствие неоднородности взрывной эмиссии с поверхности катода. Видно, что в данном случае острый взрывоэмиссионный катод из графита эмитирует электроны равномерно по азимуту несмотря на то, что длительность импульса составляет всего 2 нс. Напомним, что диаметр ограничителя плазмы больше внешнего диаметра плазмы 2, но меньше внутреннего диаметра РЭП 1, что позволяет сделать вывод о высоком качестве юстировки. Следует отметить также высокую степень однородности затемнения «автографа» плазмы, что свидетельствует об однородности азимутального распределения тока с термокатода и, как следствие, концентрации плазмы.

Для визуализации распределения поля выходного СВЧ-излучения применялась панель неоновых ламп, установленная на выходе рупора на расстоянии 0,5 м. Светящееся пятно с размером  $\sim 30$  см, показанное на Рис. 3.8, сохраняло примерно одинаковую форму во всех импульсах.

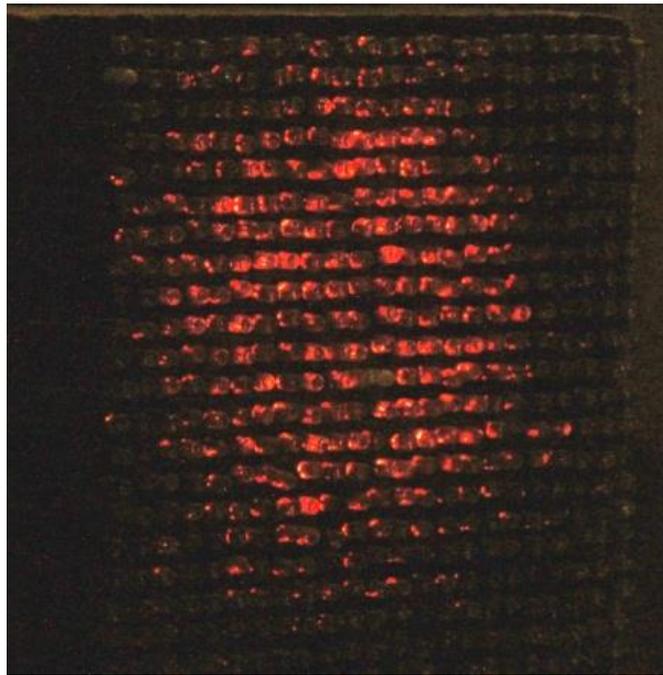


Рис. 3.8. Неоновые лампы, светящиеся в СВЧ-поле. Размер светящегося пятна приблизительно 30 см.

### 3.3. Результаты экспериментального исследования плазменного релятивистского усилителя шума

Рис. 3.9 демонстрирует временную зависимость мощности СВЧ-излучения для минимальной концентрации плазмы 5 отн.ед. (которая создается наименьшим ионизирующим током 5 А с термокатода) и, следовательно, минимальной частоты излучения выше границы отсечки выходного волновода 2,9 ГГц. Полная энергия импульса СВЧ-излучения составляла 0,22 Дж, т.е. энергоэффективность излучения (по отношению к электронному потоку с энергией в импульсе 0.85 Дж, см. выше) составила 26%. Хотя пиковая мощность СВЧ-излучения в этом импульсе превышала 400 МВт, средняя мощность импульса может быть оценена как  $450 \text{ МВт} \cdot 26\% \sim 117 \text{ МВт}$ .

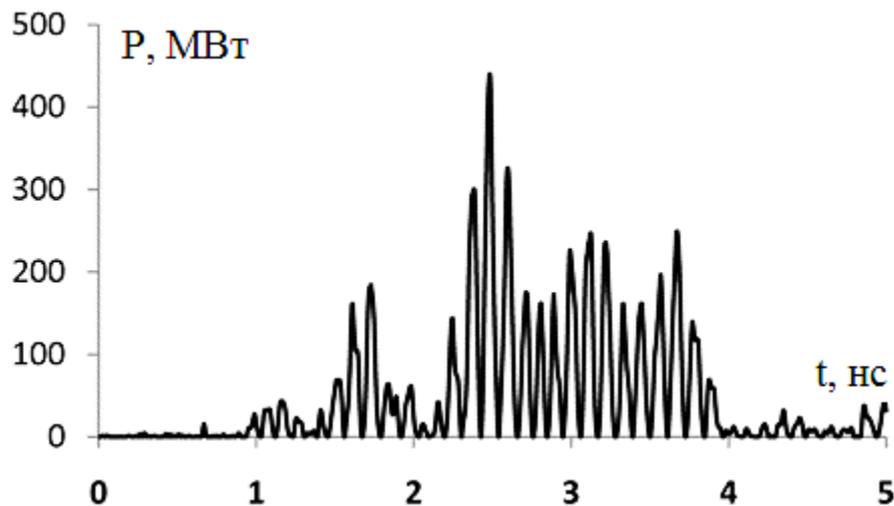


Рис. 3.9. Зависимость СВЧ мощности от времени при минимальной частоте излучения  $n_p = 5$  отн. ед. ( $L = 33$  см).

На Рис. 3.10 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. 3.9. Для длины  $L = 10$  см утверждение об отсутствии обратной связи не вполне корректно, т.к. задний фронт импульса РЭП усиливал дважды отраженную плазменную волну, поэтому изображенные на

графике значения мощности немного выше, чем они должны быть после однократного усиления шума. Для всех остальных длин  $L$  имело место однократное усиление шума.

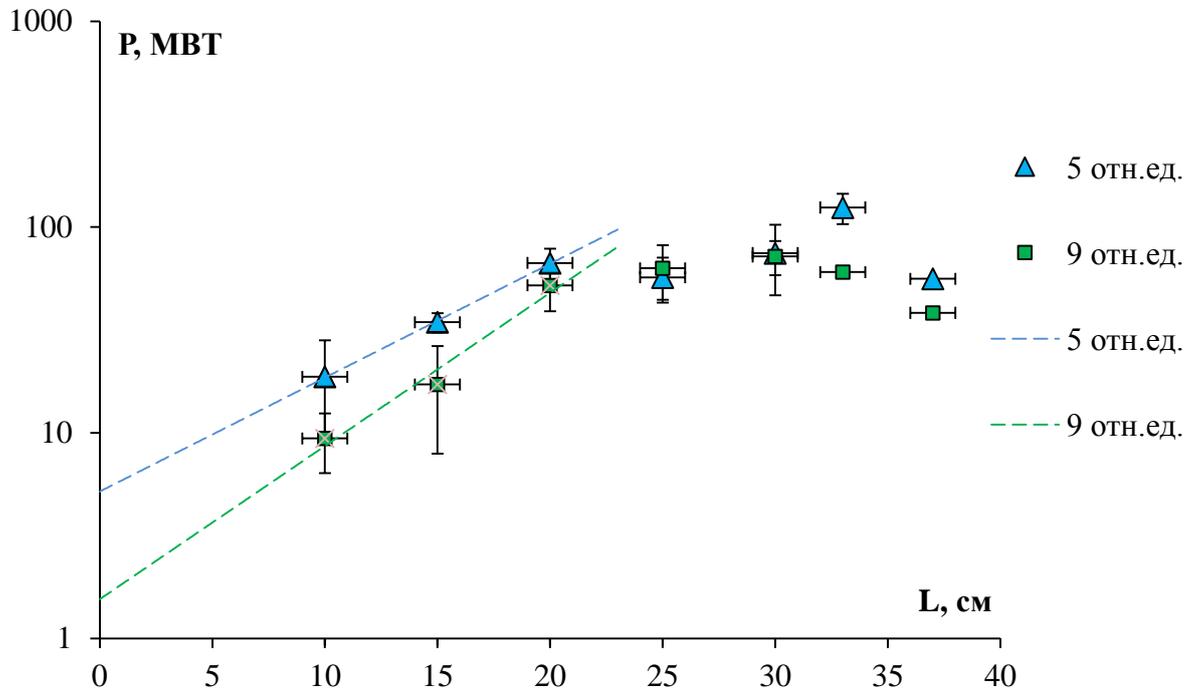


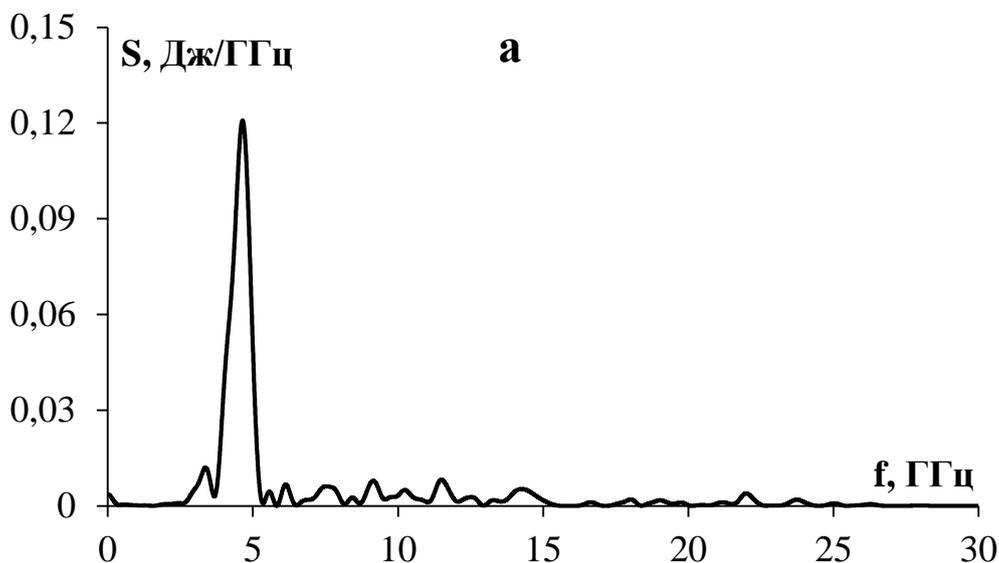
Рис. 3.10. Мощность СВЧ-излучения усилителя шума в зависимости от длины для двух значений концентрации плазмы в относительных единицах измерения.

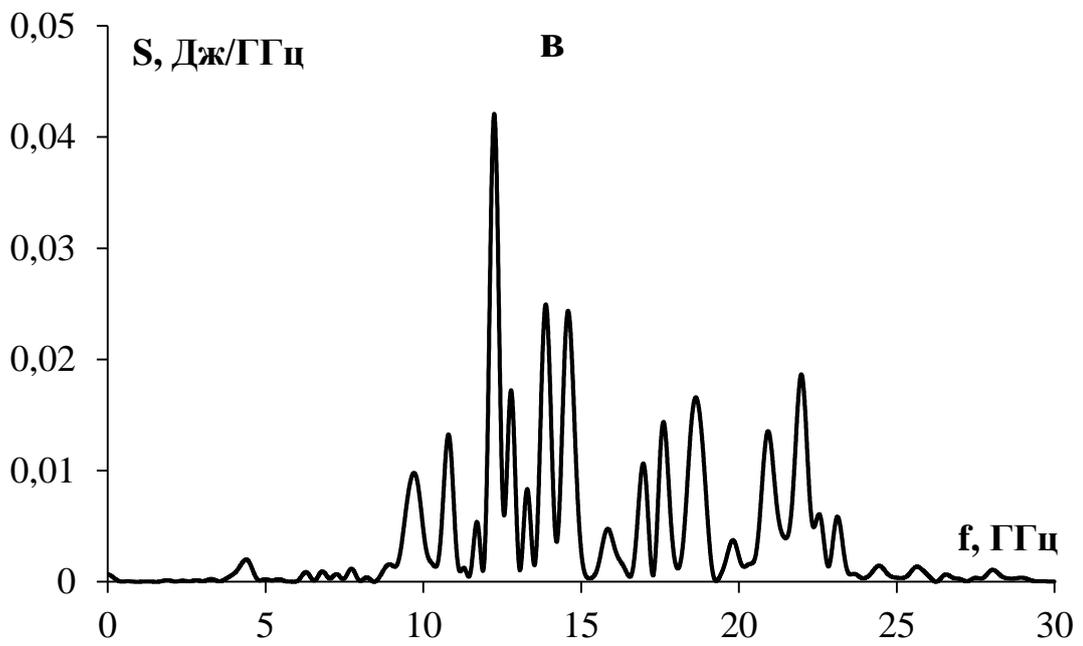
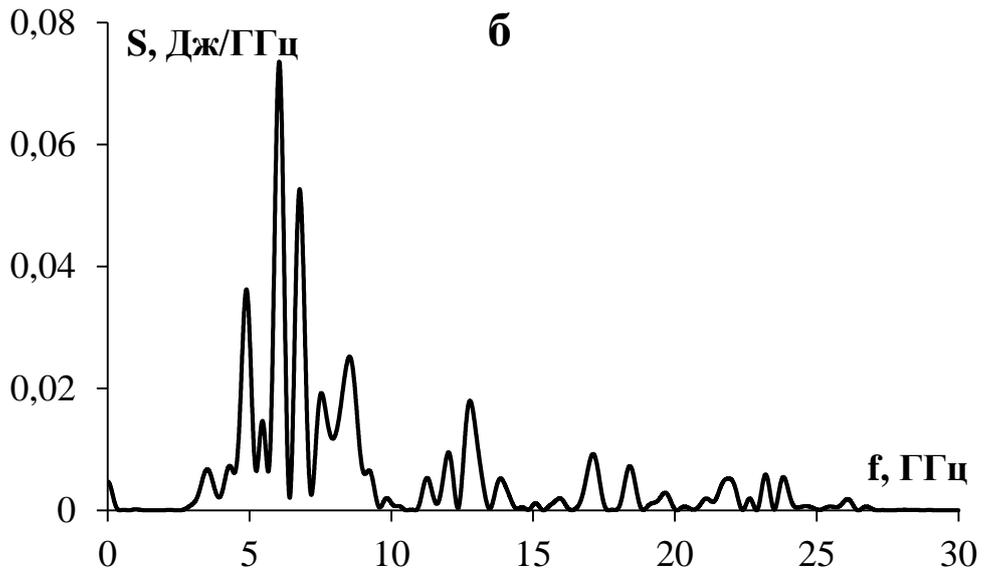
Логарифмическая шкала на Рис. 3.10 позволяет провести количественные оценки коэффициента усиления плазменной волны в зависимости от длины. Линейная фаза усиления плазменной волны электронным пучком с экспоненциальным ростом амплитуды поля волны по длине заканчивается примерно на  $L = 20$  см, нелинейные 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  $\mathcal{K} \sim 0,1 \text{ см}^{-1}$  соответствует теоретическим значениям, полученным в [8]. Начальная мощность шума, определяемая пересечением прямой  $P(L)$  с осью ординат при  $L = 0$ , имеет порядок 1 МВт, измерить его с

большей точностью затруднительно из-за наличия разброса измерений амплитуды волны на различных длинах. Это значение примерно совпадает с мощностью РЭП, показанной на Рис. 3.2, в частотном интервале нескольких ГГц выше границы отсечки 2.9 ГГц, см. спектры ниже.

Как отмечалось во Введении, спектры СВЧ-излучения плазменного мазера зависят от концентрации плазмы, для более плотной плазмы частоты выше. Рис. 3.11 иллюстрирует эту зависимость для оптимальной длины плазмы  $L = 30$  см, где 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.

Все спектры усиленного шума были случайными, уникальными для отдельных импульсов, они никогда не повторялись полностью даже при одних и тех же начальных концентрациях плазмы и других параметрах эксперимента. Концентрация плазмы определяла частотный диапазон для максимального пространственного коэффициента усиления медленной плазменной волны, но не конкретные формы спектров шума.





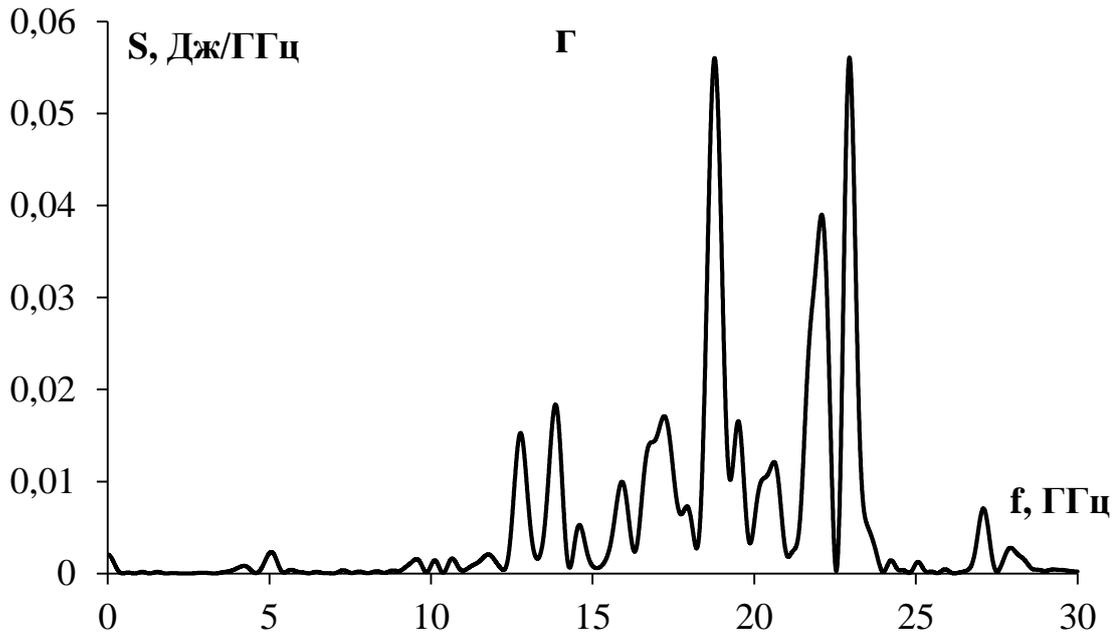


Рис. 3.11. Спектры СВЧ-излучения для различных концентраций плазмы: 2,5 отн. ед. (а), 6 отн. ед. (б), 26 отн. ед. (в) и 44 отн. ед. (г). Длина плазменно-пучкового взаимодействия 30 см, средняя импульсная мощность СВЧ-излучения  $\sim 100$  МВт.

Самая низкая концентрация в плазме 2,5 отн. ед. позволяла усиливать шум ниже  $\sim 5$  ГГц (и выше порогового значения частоты отсечки волновода 2,9 ГГц). Повышение концентрации до 6 отн. ед. передвинуло верхнюю границу до  $\sim 14$  ГГц, но энергия СВЧ-излучения регистрировалась и на более высоких частотах. Наиболее широкий спектр шума  $\sim 15$  ГГц наблюдался при концентрации плазмы 26 отн. ед. Для максимальной концентрации 44 отн. ед. диапазон спектр начинается от 13 ГГц и ограничивается максимумом  $\sim 25$  ГГц.

Это ограничение по излучаемым частотам –  $\sim 25$  ГГц – имеет вполне логичное объяснение. Как упоминалось выше, магнитное поле в области расположения плазмы составляло около 1 Тл, что соответствует гирочастоте электронов плазмы около 28 ГГц. Плазма резонансно поглощала излучение с частотами, близкими к ее гирочастоте, поэтому СВЧ-излучение не могло быть зарегистрировано в диапазоне частот, близком к резонансному значению. А

регистрация частот выше резонанса, т.е. выше  $\sim 30$  ГГц была затруднена в связи с техническими ограничениями средств диагностики.

Для получения более высоких частот СВЧ-излучения требуется не только усиление ведущего магнитного поля в области плазменно-пучкового взаимодействия. В плазменных мазерах плазменная ленгмюровская частота примерно вдвое выше верхней частоты СВЧ-излучения. Максимальная концентрация плазмы в настоящей работе ( $<25$  ГГц) была  $<4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, что соответствует полной ионизации газа под давлением 0,1 Па. Чтобы существенно повысить концентрацию плазмы, необходимо было увеличить давление газа, но в проведенных экспериментах в качестве рабочего газа использовался остаточный воздух. Кислород в воздухе портит термокатоды, снижая его эмиссионную способность, поэтому воздух необходимо заменить инертным газом. Усиление магнитного поля и отдельный напуск газа вместе с осциллографом и кабелями, предназначенными для более высоких частот, выходили за рамки настоящих экспериментов.

Наряду с очевидным прогрессом в повышении мощности и достижении рекордной для плазменных мазеров энергоэффективности появилась новая проблема. Спектр на Рис. 3.11б,г напоминает удвоение (и утроение) частоты излучения. Этот широкий спектр противоречит результатам численных расчетов, проведенных в [74] с использованием 2.5 D модели. В расчетах спектры перестраивались с изменением плотности плазмы, но их ширины были гораздо более узкими, от 2 до 3 ГГц. Нелинейная аналитическая теория [77] также предсказывает сужение спектров с ростом мощности. В настоящий момент не найдено убедительного объяснения этому эффекту, требуются дополнительные исследования, как численные, так и экспериментальные.

### Выводы Главы 3

Описанный в Главе 3 плазменный мазер продемонстрировал уникальный набор свойств, некоторые из которых были хорошо известны, но некоторые обнаружались впервые. Ранее в экспериментах с плазменными мазерами был продемонстрирован частотный диапазон мощного микроволнового излучения, перестраиваемый в пределах 3 октав, а также широкий спектр одиночных импульсов. Со времени создания первого экспериментального образца в 1982 г. все плазменные мазеры использовали электронные пучки с длинными импульсами в несколько десятков или сотен наносекунд. Все эти автогенераторы, усилители внешнего сигнала и недавно разработанные усилители собственных шумов обычно демонстрировали КПД ниже 10% относительно мощности электронного пучка. Энергоэффективность всех этих устройств по отношению к полной энергии импульса электронного пучка была еще меньше из-за эффекта укорочения микроволнового импульса [77]. Как показано в [74], в плазменных мазерах падение мощности и укорочение импульса, т.е. полный срыв излучения, может происходить за пару десятков наносекунд.

Усилитель шума, разработанный в ходе выполнения этого этапа диссертационной работы, намного превзошел все известные плазменные мазеры по энергоэффективности в импульсе с результатом выше 25%. С мощностью электронного потока 450 МВт и длительностью 2 нс средняя мощность СВЧ-импульса превысила 100 МВт в диапазоне частот от 3 ГГц до 25 ГГц, а пиковая мощность достигала почти 0,5 ГВт. Оценка уровня мощности начальных усиливаемых шумов  $\sim 1$  МВт показала его значительное превышение над данными известных источников, полученных при более длинных импульсах тока:  $\sim 5$  кВт [83]. Как следствие, общее усиление до уровня насыщения на максимальной мощности не превышало 20 дБ по сравнению с 40 дБ в указанном источнике.

Созданный плазменный мазер сочетает в себе достоинства упомянутых выше конкурентов, ЛОВ и СШП ЭМИ, и лишен их недостатков. Плазменный

мазер так же эффективен ( $>25\%$  энергоэффективности импульса), как и сильноточные вакуумные СВЧ-генераторы, такие как ЛОВ, с длительностью импульса в несколько наносекунд, однако спектр излучения плазменного лазера широкий и перестраиваемый в широкой, больше октавы полосе частот в сравнении с несколькими процентами для ЛОВ. Подавляющее большинство источников мощного СШП-излучения работает на частотах ниже 3 ГГц, по сравнению с ними плазменный мазер эффективно генерирует мощные СШП волны на высоких частотах 10-20 ГГц, которые можно легко сфокусировать и передать с помощью антенн с относительно небольшими размерами. Сравнение с лазерными «сверхсветовыми» СШП-источниками электромагнитных помех, работающих на частотах  $\sim 20$  ГГц [58], показывает, что плазменный мазер-усилитель шума с достаточно коротким импульсом, обеспечивающим отсутствие обратной связи, излучает не меньшую полосу частот, но в течение значительно более длительного отрезка времени, имеет на порядок бóльшую энергию импульса и на несколько порядков бóльшую общую эффективность.

## Заключение

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 ГГц 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  $\delta k$  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 ГГц до 15 ГГц) в течение десятков наносекунд на мультимегаваттном уровне мощности, ранее столь широкий спектр излучения регистрировался только интегрально по времени [17].

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 результате плазменно-пучкового взаимодействия. Созданный мазер использовал сильноточный электронный пучок с малой длительностью импульса 2 нс и поэтому был практически не подвержен эффекту укорочения импульса. Благодаря этому впервые удалось в эксперименте достичь давно предсказанной нелинейной теорией и численными расчетами [12] энергоэффективности излучения 26% (отношения полных энергий импульсов излучения и электронного пучка), что кратно превосходит все предыдущие достижения в экспериментах с плазменными лазерами всех типов. Построенный плазменный мазер излучал усиленный шум в зависимости от концентрации плазмы в диапазоне от 3 ГГц до 25 ГГц со средней мощностью ~100 МВт и импульсной мощностью, доходящей до мощности электронного потока.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность и признательность научному руководителю – Олегу Тимофеевичу Лозе.

Автор признателен за помощь в проведении экспериментов и предоставленное оборудование руководителю и сотрудникам лаборатории плазменной электроники ИОФ РАН – Ульянову Д.К. и Пономареву А.В., руководителю и сотрудникам лаборатории ИЭФ УрО РАН - Яландину М.И., Шунаилову С.А., Шарыпову К.А.

## Литература

1. Ахиезер А. И., Файнберг Я. Б. О взаимодействии пучка заряженных частиц с электронной плазмой // ДАН СССР, 1949 г., т. 69, с. 551
2. Bohm D., Gross E. Theory of plasma oscillations// Phys. Rev., 1949, v. 75, p. 1851
3. Кузелев М. В., Мухаметзянов Ф. Х., Рабинович М. С., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Шкварунец А. Г. Релятивистский плазменный СВЧ генератор// ЖЭТФ, 1982 г., т. 83, № 4, с. 1358
4. Стрелков П. С. Экспериментальная плазменная релятивистская сверхвысокочастотная электроника // УФН, 2019 г., т. 189, с. 494
5. O.T. Loza, P.S. Strelkov, I.E. Ivanov. Relativistic Cherenkov plasma maser of microsecond pulse duration // IEEE Trans. on plasma science, 1998, v. 26(3), p. 336
- 6 I. L. Bogdankevich, I. E. Ivanov, O. T. Loza, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, D. K. Ulyanov, V. P. Tarakanov, E. Garate. Temporal evolution of the microwave spectrum in the course of a radiation pulse from a relativistic Cherenkov plasma maser // International Power Modulator Conference and High Voltage Workshop, June 30 – July 3, 2002, Hollywood, California, USA
7. 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, вып.8, с.127
8. Кузелев М. В., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Шкварунец А. Г. Релятивистская плазменная СВЧ электроника // УФН, 1985 г., т. 146, с. 709
9. Кузелев М.В., Лоза О.Т., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника // Физика плазмы, 2001 г., т.27, №8, с.710
10. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника // Издательство МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2002 г.

11. Аронов Б.И., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Возбуждение электромагнитных волн в плазменных волноводах электронным пучком // *Plasma Phys*, 1976, v. 16, p. 101
12. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме // М.: Наука, 1990 г.
13. Стрелков П. С., Ульянов Д. К. Спектры излучения плазменного релятивистского черенковского СВЧ-генератора // *Физика плазмы*, 2000 г., т. 26, № 4, с. 329
14. Кузелев М. В., Мухаметзянов Ф. Х., Рабинович М. С. и др. Плазменный СВЧ-генератор на сильноточном РЭП // Сб. “Релятивистская высокочастотная электроника”, 1983 г., в. 3, с. 160
15. Шкварунец А.Г., Рухадзе А. А., Стрелков П.С. Широкополосный релятивистский плазменный СВЧ-генератор // *Физика плазмы*, 1994 г., т.20, №7-8, с. 682
16. Богданкевич И. Л., Иванов И. Е., Лоза О. Т., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Тараканов В. П., Ульянов Д. К. Тонкая структура спектров излучения плазменного релятивистского СВЧ-генератора // *Физика плазмы*, 2002 г., т.28, №8, с.748
17. Loza O.T., Shkvarunets A.G., Strelkov P.S. Experimental Plasma Relativistic Microwave Electronics // *IEEE Trans. on plasma science, Special Issue on high power microwave generation*, June 1998, V. 26, # 3, p. 615
18. 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
19. Лоза О.Т., Ульянов Д.К., Баранов Р.В. Изменение частоты излучения плазменного релятивистского сверхвысокочастотного генератора в течение импульса наносекундной длительности // *ЖТФ*, 2011 г., т. 81, № 3, с.98

20. Ульянов Д.К., Баранов Р.В., Лоза О.Т., Ернылева С. Е., Богданкевич И.Л. Управление частотой излучения плазменного релятивистского СВЧ генератора в течение импульса наносекундной длительности // ЖТФ, 2013 г., т.83, №10, с.113
21. Пономарёв А.В., Стрелков П.С. 50-мегаватный широкополосный плазменный СВЧ-усилитель // Физика плазмы, 2004 г., т. 30, № 1, с. 66
22. Strelkov P.S., Ivanov I.E., Tarakanov V.P. Plasma relativistic microwave amplifier // The European Physical Journal Conferences, January 2017, 149(3):04010
23. Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Лоза О.Т., Стрелков П.С., Ульянов Д.К., Garate E. Плазменный релятивистский СВЧ-усилитель с диапазоном частот от 2 до 3 GHz // Письма в ЖТФ, 2007 г., т. 33, № 11, с. 65
24. Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. Плазменный релятивистский СВЧ-усилитель с плавной перестройкой частоты от 2.4 до 3.2 ГГц // Физика плазмы, 2012 г., т. 38, № 6, с. 536
25. Стрелков П.С., Тараканов В.П., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. Изменение мощности выходного излучения плазменного релятивистского СВЧ-усилителя в течение импульса тока релятивистского электронного пучка длительностью 500 нс // Физика плазмы, 2014 г., том 40, № 8, с. 738
26. Ковтун Р. И., Рухадзе А. А. К теории нелинейного взаимодействия релятивистского пучка электронов с плазмой // ЖЭТФ, 1970 г., т. 58, с. 1219
27. 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
28. Лоза О.Т., Ернылева С.Е., Городничев Е.Б., Богданкевич И.Л., Шульгина Е.А. Способ получения микроволновых импульсов с непрерывным спектром излучения // Патент на изобретение № 2572844 рег. 16.12.2015
29. Лоза О.Т., Пономарев А.В., Стрелков П.С., Ульянов Д.К., Шкварунец А.Г. Источник трубчатой плазмы с управляемым радиусом для плазменного релятивистского СВЧ-генератора // Физика плазмы, 1997 г., т.23, №3, с.222-229

30. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Оптимальные эффективности и спектры излучения черенковских плазменных СВЧ усилителей на сильноточных РЭП // Физика плазмы, 1998 г., т. 24, №6, с. 530
31. Ернылева С.Е., Лоза О.Т. Конфигурации импульсно-периодических плазменных релятивистских СВЧ-генераторов // Прикладная физика, 2014 г., № 1, с. 17
32. 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
33. Litvin V. O., Loza O. T. Plasma high-current generator of wideband high-power microwaves with magnetic self-insulation // Physics of Wave Phenomena, 2017, т. 25, № 1, p. 52
34. Litvin V. O., and Loza O. T. High-power broadband plasma maser with magnetic self-insulation // Physics of plasmas, 2018, 25, 013105
35. Clark M. C., Marder B. M., and Bacon L. D. Magnetically Insulated Transmission Line Oscillator // Appl. Phys., 1988, Lett, 52(1), p. 78
36. Raymond W. Lemke, Miles C. Clark, Steve E. Calico. Four cavity efficiency enhanced magnetically insulated line oscillator // Patent US5742209, 1998
37. Fan Yu-Wei, Shu Ting, Liu Yong-Gui, Zhong Hui-Huang, Li Zhi-Qiang, Wang Yong, Zhao Yan-Song, Luo Ling. A Compact Magnetically Insulated Line Oscillator with New-Type Beam // Chin. Phys. Lett., 2005, 22 (1), p. 164
38. Arjun Kumar, Smrity Dwivedi, P. K. Jain. MILO Performance Improvement Study—An Equivalent Circuit Approach // IEEE Transactions on Plasma Science, September 2019, pp(99):1-8
39. Богданкевич И. Л., Лоза О. Т., Павлов Д. А. Управление спектром излучения плазменных релятивистских СВЧ-генераторов // Физика плазмы, 2009, т.35, № 3, с. 211

40. Иванов И.Е., Стрелков П.С., Шумейко Д.В. Спектр излучения плазменного релятивистского микроволнового усилителя // Радиотехника и электроника, 2009 г., т. 54, № 9, с. 1091
41. 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
42. 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
43. 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
44. Ernyleva S. E. and Loza O.T. Microwave Pulse Shortening in Plasma Relativistic High-Current Microwave Electronics // Physics of Wave Phenomena, 2017, Vol. 25, № 2, p. 130
45. 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
46. Пономарев А. В., Булейко А. Б., Ульянов Д. К. Подавление обратной связи в плазменном релятивистском усилителе шума с инверсной геометрией // Прикладная физика, 2019, №6, с. 24
47. 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
48. Alla B. Buleyko, Anatoly V. Ponomarev, Oleg T. Loza, Denis K. Ulyanov, Konstantin A. Sharyov, Sergey A. Shunailov, and Michael I. Yalandin. Experimental plasma maser as a broadband noise amplifier. II. Short pulse // Phys. Plasmas, 2021, 28, 023304

49. E. M. Tot'meninov, P. V. Vykhodtsev, S. A. Kitsanov, A. I. Klimov, and V. V. Rostov. Relativistic backward-wave tube with mechanically tunable generation frequency over a 14% range // *Technical Physics*, 2011, 56(7):1009 - 1012

50. С. Л. Кицанов, С. Д. Коровин, А. И. Климов, В.В. Ростов, Е.М. Тотменинов. Релятивистская лампа обратной волны с механической перестройкой частоты генерации // *Письма в ЖТФ*, 2004 г., т. 30, вып. 15, с.1

51. A. I. Klimov, I. K. Kurkan, S. D. Polevin, V. V. Rostov and E. M. Tot'meninov. A multigigawatt X-Band relativistic backward wave oscillator with a modulating resonant reflector // *Technical Physics Letters*, 2008, 34(3):235-237

52. E.M. Totmeninov, I.V. Pegel, A.I. Klimov, and V. P. Tarakanov. On energy efficiency of an X-band moderately relativistic microwave generator of twistron type // *Phys. Plasmas* 2019, 26, 083102

53 Loza O.T., Strelkov P.S., Ivanov I.E. Relativistic Cherenkov plasma maser of microsecond pulse duration // *IEEE Trans. on plasma science, Special Issue on high power microwave generation*, June 1998, v. 26, № 3, p. 336

54. Prather W. D., Baum C. E., Lehr J. M., O'Loughlin J. P., Tyo S., Schoenberg J. S. H., Torres R. J., Tran T. C., Scholfield D. W., Gaudet J., & Burger J. W. Ultra-wideband source and antenna research // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, v. 28(5), p. 1624

55. Efremov A.M., Koshelev V.I., Plisko V.V., Sevostyanov E.A. A High-Power Source of Ultrawideband Pulses of Synthesized Radiation // *Instruments and Experimental Techniques*, 2019, v. 62(1), p.33

56. Efremov, A.M., Koshelev, V.I., Kovalchuk, B.M., Plisko, V.V., Sukhushin, K.N. Generation and radiation of ultra-wideband electromagnetic pulses with high stability and effective potential // *Laser and Particle Beams*, 2014, v. 32(3), p. 413

57. Бессараб А.В., Гаранин С.Г., Мартыненко С.П., Прудкой Н.А., Солдатов А.В., Терехин В.А., Трутнев Ю.А. Генератор сверхширокополосного электромагнитного излучения, инициируемый пикосекундным лазером // *Доклады Академии наук*, 2006 г., т. 411, № 5. с. 609

58. А. А. Кондратьев, Ю. Н. Лазарев, А. В. Потапов, А. С. Тищенко, Е. В. Заволоков, И. А. Сорокин. Экспериментальное исследование генератора эми свч-диапазона на основе сверхсветового источника // Доклады Академии наук, 2011 г., т. 438, № 5, с. 615

59. Потапов А.В., Заволоков Е.В., Кондратьев А.А., Пхайко Н.А., Сорокин И.А., Гончаренко Б.Г., Лузанов В.А., Салов В.Д. Генерация сверхширокополосного электромагнитного излучения вакуумным фотодиодом с анодом на входном сапфировом окне // Журнал технической физики, 2021 г., т. 91, № 3, с. 505

60. A. V. Buleyko, N. G. Gusein-zade, and O. T. Loza. Plasma Masers: Status Quo and Development Prospects // Physics of Wave Phenomena, 2018, Vol. 26, № 4, p. 317

61. 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

62. 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

63. 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

64. Булейко А.Б., Лоза О.Т. Ульянов Д.К. Широкополосный плазменный релятивистский СВЧ-генератор // IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2018, 30 января- 1 февраля 2018 г., г. Москва, , с. 202

65. Булейко А.Б. Сверхширокополосные плазменные мазеры // VI Всероссийская Микроволновая конференция, Доклады, 28-30 ноября 2018 г., г. Москва, с. 170

66. 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

67. 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

68. 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

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

70. Беховская К. С., Богданкевич И. Л., Стрелков П. С., Тараканов В. П., Ульянов Д. К. Использование большого тока электронного пучка в плазменном релятивистском СВЧ-генераторе // Прикладная физика, 2010 г., № 5, с. 54

71. Лоза О. Т., Ульянов Д. К., Стрелков П. С., Иванов И. Е., Баранов Р. В. Увеличение средней мощности излучения плазменного релятивистского СВЧ-генератора // Краткие сообщения по физике ФИАН, 2011 г., т.38, №4., с.47

72. Лоза О.Т., Ернылева С.Е., Городничев Е.Б., Богданкевич И.Л., Гусейнзаде Н.Г., Шульгина Е.А. Диод плазменного СВЧ-генератора // Патент на изобретение № 2569493 рег. 29.10.2015 г.

73. A. G. Shkvarunets. A broadband microwave calorimeter of large cross section. // *Instruments and Experimental Techniques*, 1996, v. 39, № 4, p. 535
74. S. E. Ernyleva, and O. T. Loza. Plasma relativistic microwave noise amplifier with the inverse configuration // *Physics of Wave Phenomena*, 2017, v. 25(1), p. 56
75. M.V. Kuzelev, A.A. Rukhadze. *Basics of Plasma Free Electron Lasers* // Editions Frontieres, 1995, Paris, p. 246
76. Loza O.T., Ponomarev A.V., Strelkov P.S., Ulyanov D.K., Shkvarunets A.G. Source of an annular controlled-radius plasma for a plasma relativistic microwave oscillator // *Plasma Physics Reports*, 1997, v. 23(3), p. 201
77. Benford J., and Benford G. Survey of pulse shortening in high-power microwave sources // *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1997, v. 25(2), p.311
78. Яландин М.И., Шпак В.Г. Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона // *ПТЭ*, 2001, №3, с. 5.
79. K. A. Sharypov, M. R. Ul'masculov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. I. Yalandin, G. A. Mesyats, V. V. Rostov, M. D. Kolomiets. Current waveform reconstruction from an explosively emissive cathode at a subnanosecond voltage front // *Rev. Sci. Instrum.*, 2014, 85(12), 125104
80. V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. I. Yalandin, and A. N. Dyad'kov. The RADAN SEF-303A, a small high-current pulsed power supply // *Instrum. Exp. Tech.*, 1993, v.36, p.106
81. M. I. Yalandin, S. K. Lyubutin, M. R. Oulmasculov, S. N. Rukin, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, and B. G. Slovikovsky. High peak power and high average power subnanosecond modulator operating at a repetition frequency of 3.5 kHz // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2002, v.30, p.1700
82. Р. Девидсон. Теория заряженной плазмы // Москва: Мир, 1978 г., с.215
83. П. С. Стрелков, И. Е. Иванов, Е. Д. Диас Михайлова, Д. В. Шумейко. Спектры плазменного релятивистского СВЧ-усилителя монохроматического сигнала // *Физика плазмы*, 2021 г., т. 47, № 3, с. 257