

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ
В ПЛАЗМЕ

УДК 533.951.8

УЗКОПОЛОСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ПЛАЗМЕННОМ
РЕЛЯТИВИСТСКОМ СВЧ-ГЕНЕРАТОРЕ

© 2021 г. И. Е. Иванов*

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

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

Поступила в редакцию 17.05.2020 г.

После доработки 07.11.2020 г.

Принята к публикации 25.12.2020 г.

Рассматривается работа плазменного релятивистского СВЧ-генератора в диапазоне частот 1–5 ГГц. По частотам генерации и параметрам резонатора определяются основные характеристики продольных мод: длина волны, фазовая скорость, длина эффективного резонатора. Предложена методика расчетов для определения этих параметров. Рассматриваются основные механизмы образования спектров. Отмечается невозпроизводимость спектров генерации в разных импульсах. Это связывается с неповторяемостью инъекции релятивистского электронного пучка.

Ключевые слова: плазменные релятивистские генераторы, плазменный волновод, медленные плазменные волны, узкополосная генерация, релятивистский пучок, фазовый синхронизм, продольные моды резонатора, резонансные частоты

DOI: 10.31857/S0367292121050036

1. ВВЕДЕНИЕ

Плазменные релятивистские СВЧ-генераторы (ПРГ) являются источниками мощного микроволнового излучения (~100 МВт), область частот которого может перестраиваться в зависимости от плотности плазмы в системе. Выходное излучение создается за счет передачи энергии релятивистского электронного пучка (РЭП) в электромагнитную волну в плазменном волноводе при фазовом синхронизме. ПРГ работают в импульсном режиме: длительность импульса СВЧ составляет 200–500 нс, а средняя частота излучения определяется плотностью плазмы, участвующей в создании плазменного волновода. Установка работает в режиме одиночных импульсов (1 импульс за 3 минуты). За счет изменения плотности плазмы может происходить перестройка выходного излучения на 1.5–2 ГГц. В зависимости от конструкции плазменные релятивистские источники микроволнового излучения могут работать в трех режимах: режим обычной генерации [1], режим широкополосной (шумовой) генерации [2] и режим усиления внешнего сигнала [3].

В работе [1] исследовался режим обычной генерации в диапазоне 1–4 ГГц. Были получены спектры при разной плотности плазмы. Рассматривалось изменение спектрального состава излучения в течение длительности импульса СВЧ. Осциллограммы СВЧ-излучения записывались на осциллографе с шириной полосы 3 ГГц. Также

производилось численное моделирование в коде КАРАТ [4], плазма считалась линейной средой с неизменными во времени свойствами. Временной интервал разбивался на несколько равных интервалов по 80 нс, и сравнивались экспериментальные и смоделированные спектры генерации на этих интервалах. Приведены дисперсионные кривые плазменного волновода в присутствии РЭП, а также коэффициенты усиления в зависимости от частоты и концентрации плазмы, полученные при расчетах по линейной теории. Изменение спектров в течение импульса генерации объяснялось изменением концентрации плазмы за рассматриваемый временной интервал. Аналогичные экспериментальные исследования были продолжены в работе [5] без численного моделирования и теоретических расчетов. Целью работы было получение генерации без значительного шумового фона (шумового пьедестала), детальное исследование изменения спектра со временем и исследование изменений в спектре при создании аксиальной анизотропии в резонаторе. Определялась временная последовательность появления узких линий в течение импульса. Для анализа осциллограмм применялся метод мгновенной частоты [6], позволяющий анализировать ход генерации с течением времени в одном импульсе. По сравнению с работой [1] была улучшена форма импульса тока релятивистского электронного пучка, изменена конструкция выходно-

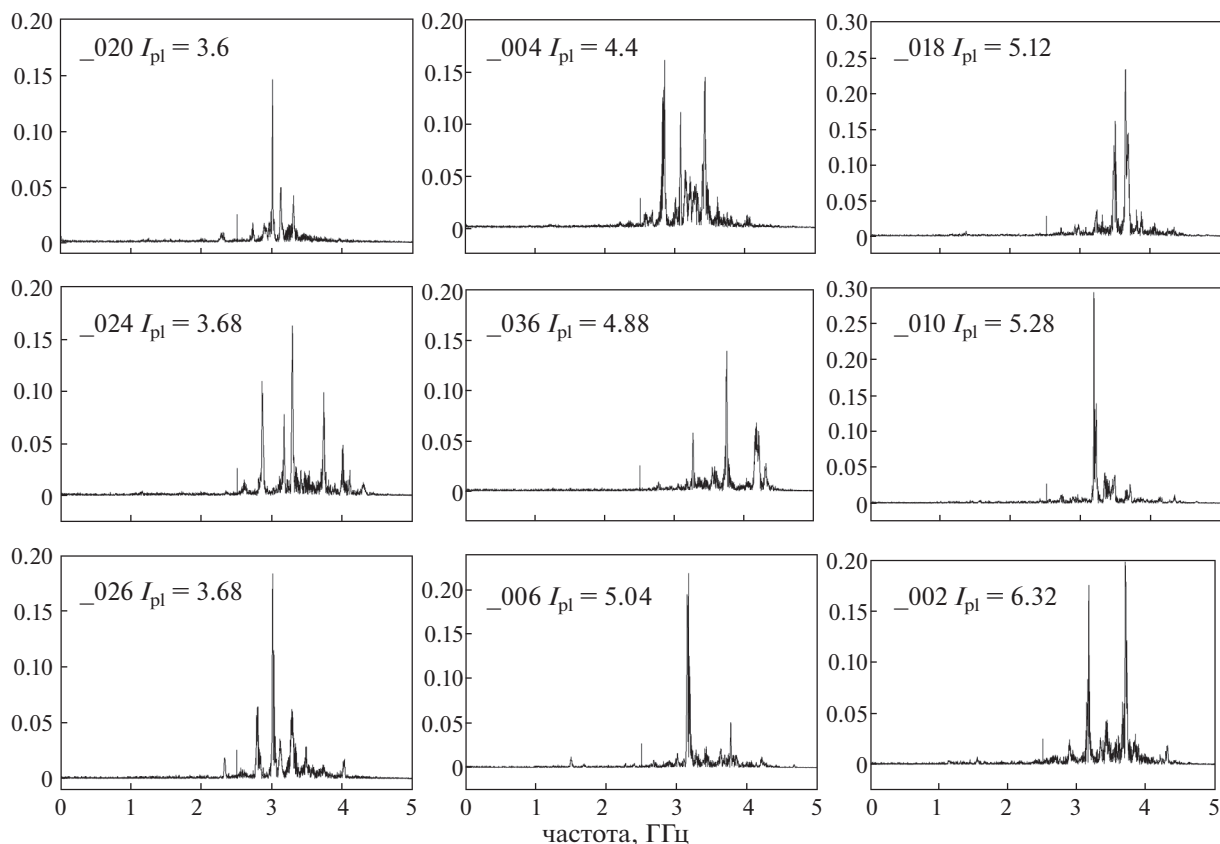


Рис. 1. Спектры тонкоструктурной генерации СВЧ-излучения, полученные на короткой базе. Ось абсцисс 0–5 ГГц. Спектры получены за всю длительность осциллограммы 800 нс. Плотность плазмы пропорциональна величине I_{pl} и увеличивается по столбцам сверху вниз.

го рупора, позволившая расширить диапазон излучения в сторону низких частот. Для анализа выходного излучения использовался осциллограф с шириной полосы 4 ГГц. Исследовались спектры, полученные при длине резонатора 1 м и 0.85 м при разной плотности плазмы. Было показано, что в течение одного импульса происходит переход генерации с одной частоты на другую, причем может быть как увеличение частоты, так и уменьшение. Увеличение частоты со временем находится в некотором противоречии с установленным ранее свойством уменьшения концентрации плазмы в течение импульса, которое должно приводить к уменьшению частоты. Был произведен наклон отражающей поверхности в резонаторе, что привело к упрощению спектра и уменьшению уровня шумов. Несмотря на большое количество полученных экспериментальных данных, не было зафиксировано повторения генерации на прежних частотах ни в одном из импульсов.

В настоящей работе предпринята попытка объяснения невозпроизводимости спектра генерации. Длина резонатора значительно уменьшена

со 100 см до 40 см для получения генерации на меньшем количестве линий. Такой режим мы называем генерацией на короткой базе. Общий характер спектров не изменился по сравнению с [5]. По-прежнему спектр генерации состоит из набора узких линий, но их количество уменьшилось. Интенсивность сопутствующей шумовой генерации стала незначительной. На рис. 1 показаны спектры, полученные на короткой базе при разной плотности плазмы. Следует отметить, что энергия в импульсе осталась на прежнем уровне, а именно 10 Дж. Шумовой пьедестал практически отсутствует.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На всех спектрах рис. 1, как и в [5], не было получено совпадающих частот. Однако зарегистрированная узкополосная генерация говорит о том, что процесс образования такого излучения связан с резонансным механизмом — с многократным прохождением СВЧ-волны внутри системы, т.е. с существованием резонатора. На длине резонатора L должно укладываться целое число полуволн N . Зная длину резонатора L и фазовую скорость

электромагнитной волны в резонаторе, можно вычислить резонансные частоты ν_N продольных мод

$$\nu_{ph} = \frac{\omega}{k_z} = u = \lambda\nu, \quad (1)$$

$$\Delta\nu = \frac{u}{2L}, \quad (2)$$

$$\nu_N = \Delta\nu N. \quad (3)$$

В этих формулах ν_{ph} – фазовая скорость волны, а u – скорость релятивистских электронов, $\Delta\nu$ – межмодовый интервал продольных мод. Передача энергии от электронов РЭП в волну происходит при фазовом синхронизме, т.е. при равенстве ν_{ph} и u , что отражено в формуле (1). Под резонатором подразумевается волновод, ограниченный плоскостями, от которых происходит отражение волн, рис. 2. На рисунке релятивистский электронный пучок изображен синими линиями, плазма – красными. Присутствие плазмы меняет дисперсионные характеристики участка L_0 таким образом, что в этой области волновода могут существовать электромагнитные волны с фазовыми скоростями, меньшими скорости света, рис. 3. На дисперсионной диаграмме, рис. 3, кривая 1 характеризует эти волны, они называются медленными плазменными волнами. Дисперсионная кривая 1 ограничена асимптотой, положение которой определяется плазменной частотой ω_L , которая зависит от концентрации плазмы. В присутствии в волноводе релятивистского электронного пучка в области, соответствующей равенству скоростей $\nu_{ph} = u$, появляется область частот $\nu_1 < \nu_{gen} < \nu_2$, где может происходить передача энергии и существовать электромагнитное излучение, вызванное резонансными эффектами. Эта область имеет значительную протяженность 1.5–2 ГГц. При изменении плотности плазмы дисперсионная кривая 1 смещается, и соответственно смещается и эта область возможной генерации. Как установлено в ранних исследованиях, плотность плазмы нельзя считать постоянной, ее значение уменьшается в течение длительности РЭП. В этом случае дисперсионная диаграмма (1) смещается вниз, что, с первого взгляда, должно приводить к уменьшению частоты излучения. Условие фазового синхронизма (1) выполняется, т.к. во всех точках диаграммы распространения релятивистского пучка скорость u одна и та же. Но здесь следует учитывать, что генерация должна соответствовать положению разрешенных частот (3) резонатора. Это означает, что частоты генерации “привязаны” к частотам продольных мод резонатора, т.е. частота генерации должна воспроизводиться на прежнем месте при одинаковых начальных условиях, несмотря на изменение плотности плазмы. В течение импульса область

допустимой генерации может смещаться, но не настолько, чтобы не было перекрытия области с предыдущими областями для других моментов времени. Для резонатора с базовой длиной $L_0 = 0.39$ м расстояние между продольными модами (2) резонатора для скоростей электронов с релятивистским фактором $\gamma = 2$ равно 0.3 ГГц. Таким образом, в области перекрытия должно укладываться несколько резонансных частот. Это означает, что изменение плотности плазмы не может являться причиной невоспроизводимости линий узкополосной генерации при разных выстрелах. Параметр, который непосредственно влияет на частоту генерации, – это скорость электронов релятивистского пучка. При выполнении условия фазового синхронизма (1) разрешенные частоты определяются скоростью электронов РЭП. Именно невоспроизводимость инжекции электронного пучка в разных выстрелах является причиной невоспроизводимости частот генерации.

Как следует из формул (2) и (3), положение частот зависит не только от скорости релятивистских электронов, но и от длины резонатора L . Поскольку волны при отражении частично проникают за базовые плоскости, определяемые торцом коллектора (справа) и отверстием в отражающей поверхности (слева), рис. 2, то для каждой частоты будет характерна своя эффективная длина резонатора, которую мы обозначим L_{eff} и которая будет больше базовой длины L_0 . Проникновение отраженной волны за базовые плоскости зависит от длины волны, но не может превышать $\lambda/2$, т.к. проникновение на большую величину означало бы не отражение, а прохождение волны в исходном направлении. Поэтому, учитывая две зоны отражения, будем считать, что L_{eff} заключена в пределах

$$L_0 < L_{eff} < L_0 + \lambda. \quad (4)$$

Величина N в (3) должна принимать целое значение. Поэтому неопределенность в положении резонансных частот может быть вызвана разным значением величины u , которая обозначает скорость электронов релятивистского пучка. Цель настоящей работы – связать экспериментально регистрируемые частоты с длиной резонатора и скоростями релятивистских электронов, выяснить причину неповторяемости частотного спектра в разных СВЧ-импульсах.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Как было показано выше, положение резонансных линий определяется скоростью релятивистских электронов пучка. В предположении безграничной эмиссии катода ток I зависит не

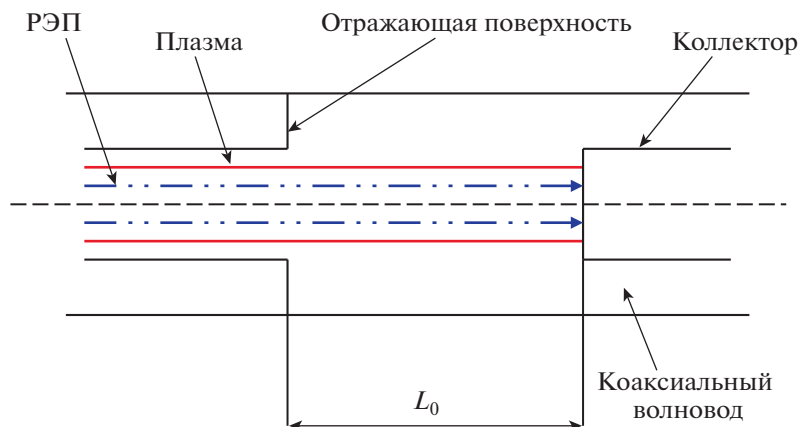


Рис. 2. Схема резонатора. L_0 – базовый размер длины резонатора.

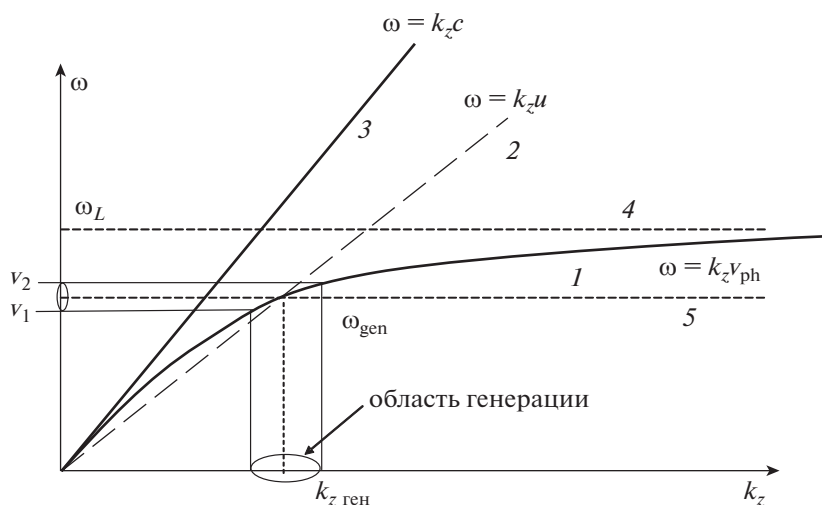


Рис. 3. Дисперсионные диаграммы: 1 – медленная плазменная волна, 2 – распространение релятивистских электронов со скоростью u , 3 – электромагнитная волна в свободном пространстве или мода ТЕМ в коаксиальном волноводе без диэлектрика, 4 – асимптота ω_L (плазменная частота), 5 – центр области генерации.

только от величины ускоряющего напряжения U , но и от геометрических факторов: радиуса r_b тонкого трубчатого пучка релятивистских электронов и внутреннего радиуса R цилиндрического анода. Это исследовалось в работах [7–9], где были получены формулы для сильноточных релятивистских пучков в приближении бесконечно сильного ведущего магнитного поля. Учитывая реальные размеры пучка и волноводов, можно получить приблизительное значение скорости электронов РЭП для нашего эксперимента. Оно равно $u \approx 0.23 \times 10^9$ м/с = 0.23 Гм/с (гигаметры в секунду). Однако присутствие плазмы в системе существенным образом экранирует радиальное поле пучка и уменьшает потенциал пучка. Это должно приводить к возрастанию скорости электронов РЭП. При использовании электродина-

мического кода КАРАТ [4] при расчете спектров для геометрии нашего эксперимента в присутствии плазмы были получены графики импульсов электронов пучка, рис. 4, из которых следует, что продольная составляющая импульса P_z/mc может принимать любые значения в диапазоне 0–3, что соответствует скоростям 0–0.28 Гм/с. Судя по графику, одновременно в резонаторе могут присутствовать электроны с большим набором скоростей. Исходя из этого, будем рассматривать возможные значения скорости релятивистских электронов в диапазоне

$$0.16 < u < 0.28 \text{ Гм/с}, \quad (5)$$

скорость света равна 0.3 Гм/с. Нижний предел этого диапазона соответствует энергиям электронов с $\gamma = 1.18$, или 300 кэВ, что еще отвечает реля-

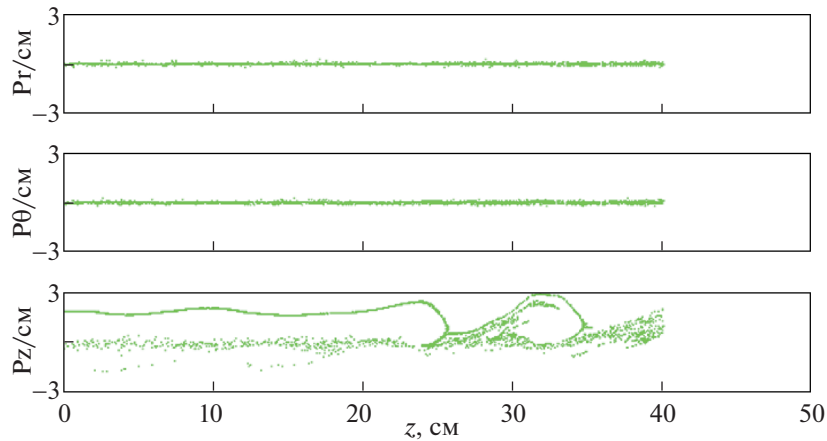


Рис. 4. Расчет движения электронов РЭП в коде КАРАТ (Тараканов В.П.). Момент времени 300 нс. P_z , P_r – составляющие импульсов электронов пучка в цилиндрической системе координат, m – масса покоя электрона, c – скорость света в вакууме.

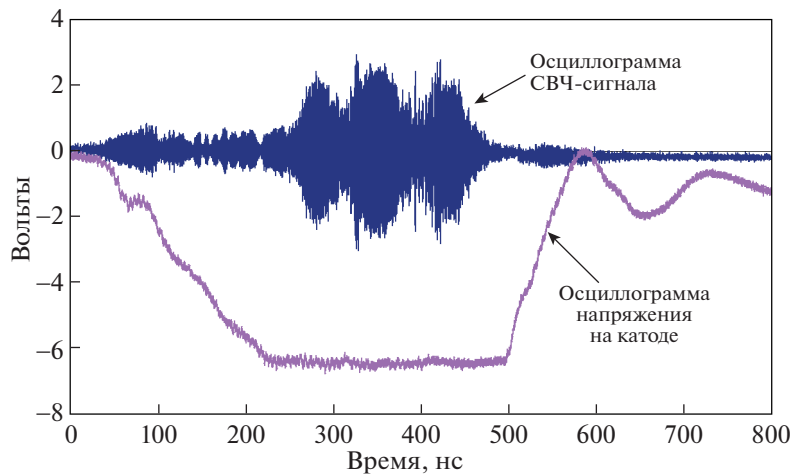


Рис. 5. Осциллограммы импульса СВЧ-излучения _024 (рис. 6) и напряжения на катоде ускорителя РЭП, амплитуда 500 кВ, ток пучка 2.5 кА.

тивизму. Верхний диапазон соответствует электронам с релятивистским фактором $\gamma = 2.8$ и превышает энергию электронов, которая определяется потенциалом катода ускорителя 500 кВ, или электронам с $\gamma = 2$. Таким образом, считаем, что, несмотря на достаточно постоянное напряжение на катоде ускорителя, рис. 5, в эксперименте имеет место существование электронов пучка в диапазоне скоростей (5).

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6 представлены спектры пяти импульсов микроволнового излучения, полученные на короткой базе ($L = 0.39$ м) при разной плотности плазмы в пределах $5 \times 10^{11} - 2.6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Спектры представлены в одном масштабе. Регистри-

ровался ток плазмы I_{pl} , который пропорционален плотности. Он указан на рисунке. Регистрация микроволнового излучения производилась с помощью штыревой антенны, сигнал с которой подавался по высокочастотному кабелю (~ 10 м) и аттенуатор 60 дБ на скоростной осциллограф Tektronix TDS 7404 с полосой 4 ГГц (20 GS/s). Осциллограммы, рис. 5, записывались с шагом 16 пс длительностью 800 нс. Длительность импульса тока РЭП составляла 500 нс, напряжение на катоде ускорителя 500 кВ, величина тока пучка 2.5 кА. Длительность импульса СВЧ-излучения колебалась в пределах 200–400 нс. Энергия в импульсе СВЧ-генерации 10–15 Дж, мощность излучения достигала 100 МВт. Фурье-преобразование проводилось для полной длительности осциллограммы (800 нс). В дополнение к этим спектрам стро-

ились графики мгновенной частоты [5] для определения характера генерации в течение импульса. Под мгновенной частотой понимается величина $1/T$, где T – время между локальными экстремумами осциллограммы.

5. АНАЛИЗ СПЕКТРОВ. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Цель настоящего раздела – связать значения параметров u , L_{eff} , N с конкретной экспериментальной частотой. Анализ основан на определении целого числа N количества полуволн, укладывающихся на длине эффективного резонатора L_{eff} . Точной величины L_{eff} мы не знаем. Также мы не знаем и величины u . Мы можем менять эти величины в пределах, установленных ранее. Для эффективной длины резонатора L_{eff} мы используем условие (4), для скоростей релятивистских электронов u – условие (5). При варьировании u и L_{eff} мы получаем в качестве величины N дробные значения. Мы ищем те значения u и L_{eff} , при которых получается наилучшее приближение к целому значению N . Считаем, что именно эти значения u и L_{eff} соответствуют данному экспериментальному значению частоты ν_1 .

Цикл такого расчета можно описать следующим алгоритмом.

1. Фиксируем экспериментальное значение частоты ν_1 .

2. Фиксируем начальное значение скорости, например, $u = 0.16$.

3. Устанавливаем начальное значение $L_{eff} = L_0$ и определяем значение N по формулам (2) и (3):

$$N = \frac{\nu_1}{\Delta\nu} = \frac{\nu_1 2L_{eff}}{u}, \quad (6)$$

одновременно вычисляя длину волны λ и фиксируя разность между N и его целой частью,

$$\Delta N = |N - \text{Int}(N)|. \quad (7)$$

4. Увеличиваем значение L_{eff} на 0.001 м и возвращаемся на шаг 3. Повторяем этот цикл, пока выполняется условие (4). В результате получаем некую промежуточную таблицу в координатах ΔN , L_{eff} при фиксированном значении скорости u . Выбираем из таблицы значения N и L_{eff} , соответствующие минимальной величине ΔN .

5. Переходим на шаг 2, увеличивая скорость u на 0.001. В итоге, выполняя действия 3 и 4 и ограничиваясь условием (5), получаем новую таблицу с полным набором допустимых значений параметров продольной моды частоты ν_1 .

6. ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ К ИМПУЛЬСУ _024

Рассмотрим результат обработки импульса _024, рис. 6: спектр импульса (а), график мгновенной частоты (б) и график (в) мощности излучения. Как видно из рисунка, последовательность генерации частот наиболее интенсивных линий следующая: (1) 2.851 → (2) 3.284 → (3) 3.729 ГГц. Длительность генерации на этих частотах определяется из графика мгновенной частоты (б): 50, 79 и 35 нс, соответственно. Спектральная ширина этих линий, измеренная на полувысоте, равна 25 МГц. На рис. 7 приведена зависимость расстройки ΔN от скорости u , построенная для частоты 3.284 ГГц в диапазоне скоростей 0.16–0.28 Гм/с. Нас будут интересовать точки графика, находящиеся вблизи нуля. Эти значения показаны в верхних трех строчках табл. 1. Из таблицы следует, что наилучшее приближение к целому числу N получается для трех скоростей 0.172, 0.246 и 0.266 Гм/с. Длина волны для этих продольных мод равна, соответственно, 5.2, 7.5 и 8.1 см. Общий заход волны (справа и слева) за базовые плоскости резонатора равен 2.9 см, 2.2 см и 1.5 см, соответственно. Если считать, что заходы за плоскости примерно одинаковые, то заход волны за отражающие плоскости не превышает $\lambda/4$ для мод с фазовыми скоростями 0.246 и 0.266 Гм/с и не превышает $\lambda/2$ для моды 0.172 Гм/с. Структура графика рис. 7 напоминает некий спектр в координатах (ΔN , u), который назовем прямым спектром расстройки ΔN в координатах скорости u . Если мы построим график обратной величины $1/\Delta N$, то получим обратный спектр, рис. 8. На нем синими сплошными линиями показан обратный спектр для частоты 3.2840 ГГц. Три самые интенсивные линии соответствуют тем трем значениям скоростей u , которые фигурируют в табл. 1. Амплитуда этих пиков характеризует степень приближения величины N к целому значению, наиболее хорошее приближение для скорости 0.246 Гс/м. Таким образом, график обратного спектра расстройки более удобный и информативный, поскольку сразу дает представление о количестве и расположении пиков наиболее подходящих значений скоростей релятивистских электронов. Моды со скоростями 0.172 и 0.266 Гм/с имеют приблизительно одинаковое значение ΔN для одной и той же частоты. Как это интерпретировать? Одна из возможностей такая. Имеет место вырождение в частотном спектре: одной частоте соответствует несколько продольных мод с разным количеством полуволн N в резонаторе. Можно также рассуждать, что в действительности работают те электроны, которых больше в пучке.

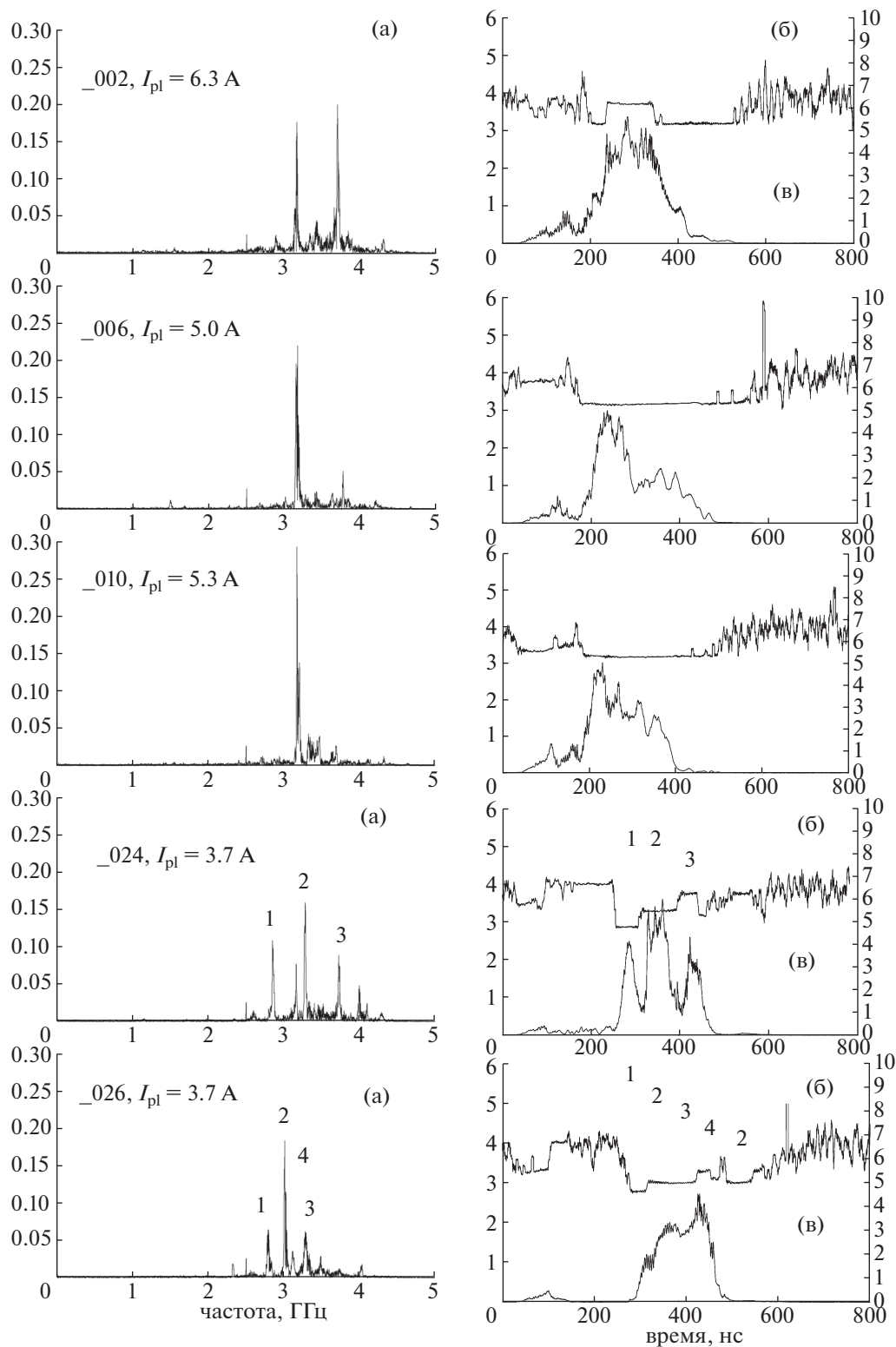


Рис. 6. Обработка осциллограмм импульсов СВЧ-генерации на короткой базе. Слева (а) спектры импульсов при разной плотности плазмы, которая пропорциональна величине I_{pl} (указана на рисунках). Спектры получены за всю длительность записи осциллограммы (800 нс, шаг дискретизации 16 пс). Масштабы рисунков одинаковы. Справа графики мгновенных частот (сверху) (б) и графики мощности СВЧ-импульсов (снизу) (в). Цифрами на импульсах _024 и _026 указано соответствие частоты и временного диапазона генерации.

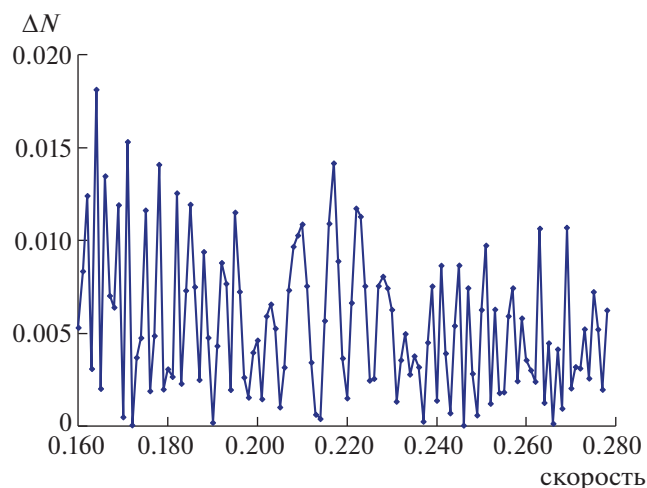


Рис. 7. Растройка ΔN от точного резонанса в зависимости от фазовой скорости волны для частоты $\nu_1 = 3.284$ ГГц.

7. УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим вопрос, что изменится в результатах, если неточно измерена базовая длина резонатора или частота. Произведем расчет, изменяя базовую длину резонатора на 1 см в интервале 0.38–0.42 м. Результаты представлены в табл. 2, из которой видно, что изменение базовой длины резонатора на одну длину волны в резонаторе приводит к замене одной моды на другую. Интересно отметить, что мода, соответствующая скорости 0.266, изменяет продольный индекс с 10 (базовый резонатор 0.36–0.40) на 12 (базовый резонатор 0.41–0.42). Изменение базовой длины резонатора на величину $0.40 - 0.36 = 0.04$, т.е. половину длины волны, еще не приводит к перескоку на другую продольную моду. Максимальная длина резонатора вычислялась по формуле

$$L_{\max} = L_0 + \lambda. \quad (8)$$

Таким образом, точность измерения базовой длины резонатора меньше, чем половина длины вол-

ны, является достаточной для анализа. Точность измерения базовой длины резонатора ± 1 см легко достигается в эксперименте и является достаточной.

Теперь посмотрим, к чему приведет неточность измерения частоты. Изменим ранее рассмотренную частоту 3.284 на 0.0001 ГГц, т.е. произведем расчет для частоты 3.2841 ГГц. Результаты расчета показаны в двух нижних строчках табл. 1. График обратного спектра представлен пунктирной красной линией на рис. 8. Видны отличия в явном виде. Таким образом, получение обратного спектра растройки является тонким инструментом для анализа небольшого изменения частот, связанных с резонансными эффектами. Значение частоты надо фиксировать с точностью 10^{-4} .

8. ПРОДОЛЖЕНИЕ АНАЛИЗА ИМПУЛЬСА _024

Проведем сравнительный анализ частот трех наиболее интенсивных линий импульса _024, рис. 6. Если считать, что набор скоростей электронов РЭП одинаков для разных интервалов времени, то можно сравнивать обратные спектры для разных частот. Однако возможны существенные различия в амплитудах этих обратных спектров, что усложняет сравнение. Поэтому удобнее сравнивать нормированные обратные спектры. На рис. 9 приведены нормированные обратные спектры для частот (1) 2.851 → (2) 3.284 → (3) 3.729 ГГц и нормировочные коэффициенты. В табл. 3 приведены параметры продольных мод, полученные в расчете. Частота 3.284 имеет самый большой нормировочный коэффициент и самую большую амплитуду в фурье-спектре. Частоты 2.851 и 3.729 ГГц имеют приблизительно равные k и приблизительно равные интенсивности линий в спектре. Как видно из графика, в образовании генерации на частоте 3.284 участвуют две группы электронов со скоростями 0.246 и 0.172. В образовании генерации на частоте 2.851 ГГц участвуют 6 групп электронов со скоростями 0.264, 0.240, 0.220, 0.252, 0.174, 0.163 Гм/с. В образовании гене-

Таблица 1

№	Базовая длина резонатора, м	Частота	N	Скорость	ΔN	Эффективная длина резонатора	Длина волны	Максимальная длина резонатора	Заход волны
	0.39	3.2840	16	0.172	0.000064	0.419	0.052	0.442	0.029
		3.2840	11	0.246	0.000050	0.412	0.075	0.465	0.022
		3.2840	10	0.266	0.000146	0.405	0.081	0.471	0.015
		3.2841	17	0.170	0.000021	0.440	0.052	0.442	0.050
		3.2841	12	0.237	0.000106	0.433	0.072	0.462	0.043

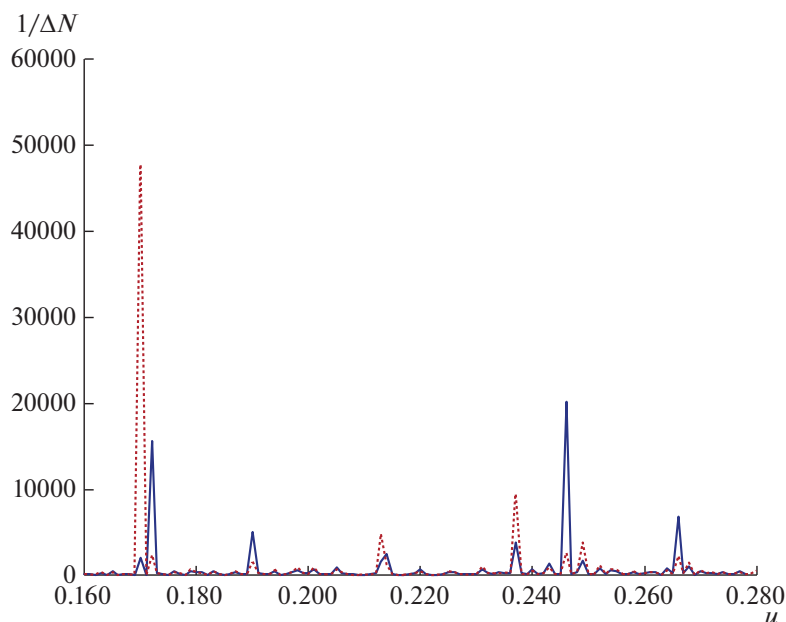


Рис. 8. Обратные спектры растройки ΔN для частоты 3.2840 ГГц (сплошная синяя линия) и частоты 3.2841 ГГц (пунктирная красная линия).

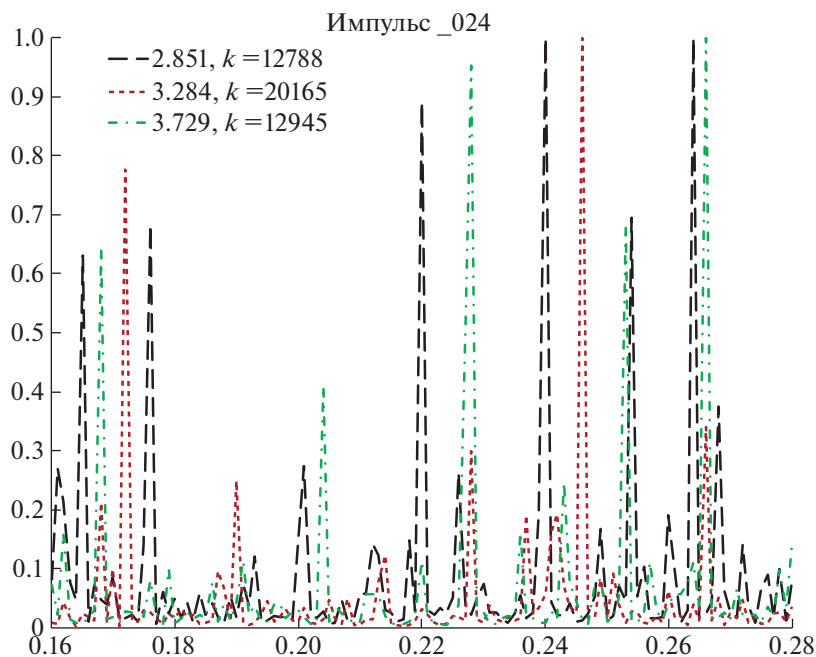


Рис. 9. Нормированные обратные спектры для частот (1) 2.851 → (2) 3.284 → (3) 3.729 импульса _024. Справа указан нормировочный коэффициент k , использованный при построении графиков.

рации на частоте 3.729 ГГц участвуют 4 группы электронов со скоростями 0.267, 0.228, 0.252, 0.168 Гм/с. Ни в одном из случаев совпадений скоростей электронов нет. Из рассмотрения

рис. 9 можно выделить две области электронов, участвующих в образовании генерации: область со скоростями электронов 0.22–0.27 и область 0.16–0.18 Гм/с.

Таблица 2

№	Базовая длина резонатора, м	Частота	N	Скорость	ΔN	Эффективная длина резонатора	Длина волны	Максималь- ная длина резонатора	Заход волны
_024	0.36	3.284	14	0.190	0.000187	0.405	0.058	0.418	0.045
		3.284	13	0.193	0.000138	0.382	0.059	0.419	0.022
		3.284	11	0.246	0.000039	0.412	0.075	0.435	0.052
		3.284	10	0.266	0.000137	0.405	0.081	0.441	0.045
		3.284	16	0.172	0.000073	0.419	0.052	0.422	0.049
	0.37	3.284	14	0.190	0.000191	0.405	0.058	0.428	0.035
		3.284	13	0.193	0.000134	0.382	0.059	0.429	0.012
		3.284	11	0.246	0.000043	0.412	0.075	0.445	0.042
		3.284	10	0.266	0.000140	0.405	0.081	0.451	0.035
		3.284	16	0.172	0.000069	0.419	0.052	0.432	0.039
	0.38	3.284	14	0.190	0.000195	0.405	0.058	0.438	0.025
		3.284	13	0.193	0.000130	0.382	0.059	0.439	0.002
		3.284	11	0.246	0.000046	0.412	0.075	0.455	0.032
		3.284	10	0.266	0.000143	0.405	0.081	0.461	0.025
		3.284	16	0.172	0.000064	0.419	0.052	0.442	0.029
	0.39	3.284	11	0.246	0.000050	0.412	0.075	0.465	0.022
		3.284	10	0.266	0.000146	0.405	0.081	0.471	0.015
		3.284	16	0.172	0.000058	0.419	0.052	0.452	0.019
	0.40	3.284	11	0.246	0.000053	0.412	0.075	0.475	0.012
		3.284	10	0.266	0.000150	0.405	0.081	0.481	0.005
		3.284	16	0.172	0.000053	0.419	0.052	0.462	0.009
	0.41	3.284	11	0.246	0.000056	0.412	0.075	0.485	0.002
		3.284	12	0.266	0.000157	0.486	0.081	0.491	0.076
		3.284	14	0.228	0.000176	0.486	0.069	0.489	0.066
0.42	3.284	12	0.266	0.000160	0.486	0.081	0.501	0.066	

Таблица 3

№	Базовая длина резонатора, м	Частота	N	Скорость	ΔN	Эффективная длина резонатора	Длина волны	Максимальная длина резонатора	Заход волны
_024	0.39	2.851	10	0.264	0.000078	0.463	0.093	0.483	0.073
		2.851	11	0.240	0.000078	0.463	0.084	0.474	0.073
		2.851	12	0.220	0.000088	0.463	0.077	0.467	0.073
		3.284	11	0.246	0.000050	0.412	0.075	0.465	0.022
		3.284	16	0.172	0.000064	0.419	0.052	0.442	0.029
		3.729	12	0.266	0.000077	0.428	0.071	0.461	0.038
		3.729	14	0.228	0.000081	0.428	0.061	0.451	0.038

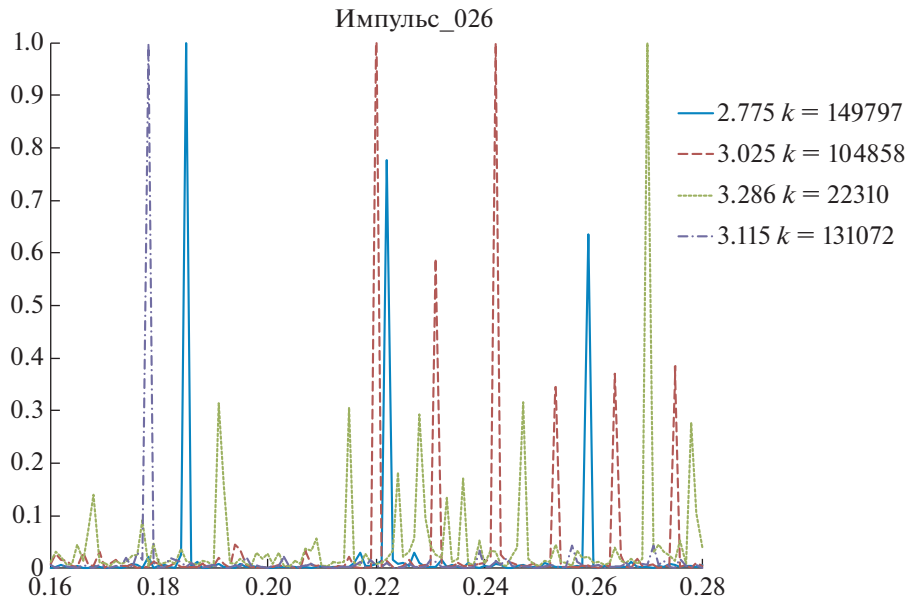


Рис. 10. Нормированные обратные спектры для частот (1) 2.775 → (2) 3.025 → (3) 3.286 → (4) 3.115 импульса _026. Коэффициент k показывает величину нормировочного коэффициента при построении графиков.

9. АНАЛИЗ СПЕКТРА ИМПУЛЬСА _026

Проведем анализ импульса _026, рис. 6. Он был получен при тех же условиях, что и импульс _024: энергии релятивистских электронов, тока плазмы, давления газа, величины ведущего магнитного поля. Энергия импульсов излучения также приблизительно одинаковая — значения интеграла квадрата амплитуды осциллограмм имеют близкие значения: $2.86 \times 10^{-7} \text{ В}^2 \times \text{с}$ для импульса _024 и $2.35 \times 10^{-7} \text{ В}^2 \times \text{с}$ для импульса _026. Спектры имеют сходство — мало шумов, узкие спектральные линии. Также похожи графики мгновенной частоты. Но положение частот спектраль-

ных линий различны. Линии спектра импульса _026 имеют другие частоты: (1) 2.775 → (2) 3.025 → (3) 3.286 → (4) 3.115 ГГц. На рис. 10 показаны нормированные обратные спектры для этих частот, а в табл. 4 основные характеристики этих мод. Наиболее интенсивная линия (2) 3.025 ГГц имеет нормировочный коэффициент меньший, чем у линий (1) и (3), что не повторяет особенности спектра _024. Также можно отметить одинаковое расстояние в 0.037 Гм/с между тремя пиками частоты (1) 2.775 ГГц на рис. 10, что является случайным проявлением кратности числа полу-волн на длине эффективного резонатора. То же

Таблица 4

№	Базовая длина резонатора, м	Частота	N	Скорость	ΔN	Эффективная длина резонатора	Длина волны	Максимальная длина резонатора	Заход волны
_026	0.39	2.775	12	0.185	0.000007	0.400	0.067	0.457	0.010
		2.775	10	0.222	0.000009	0.400	0.080	0.470	0.010
		2.775	9	0.259	0.000010	0.420	0.093	0.483	0.030
		3.025	11	0.220	0.000010	0.400	0.073	0.463	0.010
		3.025	11	0.231	0.000016	0.420	0.076	0.466	0.030
		3.025	10	0.242	0.000010	0.400	0.080	0.470	0.010
		3.286	13	0.228	0.000154	0.451	0.069	0.459	0.061
		3.286	12	0.247	0.000142	0.451	0.075	0.465	0.061
		3.286	10	0.278	0.000162	0.423	0.085	0.475	0.033
		3.115	14	0.178	0.000008	0.400	0.057	0.447	0.010

можно сказать и о частоте (2) 3.025 ГГц (расстояние между пиками 0.011 Гм/с). Из таблицы и из графиков следует, что основные зоны скоростей находятся вблизи величин 0.18 и 0.22–0.27 Гм/с, т.е. соответствуют диапазону для импульса _024.

10. ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлена узкополосная генерация, что свидетельствует о резонансном механизме генерации. Генерация в каждый момент времени происходит на одной частоте. Переходы с одной частоты на другую в течение импульса могут происходить как с понижением частоты, так и с увеличением.

2. Нет повторяемости положения частот в спектрах генерации. С одной стороны, неизменность конфигурации резонатора должна приводить к неизменности спектра генерации при одинаковых начальных условиях. С другой стороны, то, что такого нет, означает неповторяемость начальных условий. Поскольку генерация возникает при взаимодействии пучка и плазмы, это означает, что взаимодействие в каждом импульсе происходит по-разному. Резонансные эффекты определяются фазовыми скоростями тех волн, которые могут существовать в резонаторе. Изменение плотности плазмы приведет к перемещению контура усиления по оси частот, но фазовые скорости определяются скоростями электронов РЭП. При неизменном электронном пучке резонансные частоты должны оставаться на прежних местах. Если же в разных импульсах мы имеем разный набор релятивистских электронов, то это будет означать возникновение разных резонансных частот. Релятивистский электронный пучок, образованный за счет взрывной эмиссии, не обладает стабильностью, что и является причиной неповторяемости частот в разных импульсах.

3. Непостоянство частотного спектра является неустранимой и принципиальной особенностью генерации в обычном режиме. Это связано с неповторяемостью инжекции релятивистского электронного пучка.

Плотность плазмы определяет диапазон частот, в котором возможно распространение медленных плазменных мод в резонаторе. Этот диапазон имеет протяженность ~1.5–2 ГГц, а эффективность взаимодействия определяется контуром усиления (инкрементом усиления волны). Всегда есть условия для существования нескольких продольных мод. Нестабильность плотности плазмы может вызвать перемещение контура усиления на несколько процентов, но не на столько, чтобы исчезла возможность генерации на прежних частотах. Это означает, что изменение плотности плазмы в небольших пределах не должно приводить к смещению линий генерации. Это продемон-

стрировано, например, на рис. 6 в импульсах _006 и _010. Практически на всем времени существования импульсов частота генерации не изменялась, хотя плотность плазмы претерпевала изменение.

Нестабильность плотности плазмы не является причиной неповторяемости частотного спектра.

Генерация в каждый момент импульса, как правило, происходит на одной частоте. Факт свидетельствует в пользу того, что задействовано большое количество электронов, и может означать, что в создании генерации участвуют несколько групп электронов с разными скоростями. Это указывает на одновременную генерацию на нескольких продольных модах с одной частотой – вырожденный режим генерации.

Практически нет шумов в спектрах. Это объясняется тем, что не хватает усиления на одном проходе для образования значительной интенсивности излучения. Данное обстоятельство делает привлекательным режим генерации на короткой базе.

На короткой базе нет низких частот. Даже при значительном снижении плотности плазмы минимально зарегистрированная частота была равна 2.247 ГГц (импульс не представлен в этой статье), и при анализе зарегистрировано 7 полуволн, т.е. на длине резонатора укладывается только 3.5 длины волны. Это означает, что в эксперименте для низких частот достигнут порог по погонной плотности электронов релятивистского пучка для достаточного усиления. Обратный пересчет показывает, что для резонатора длиной 1 метр для фазовой скорости 0.26 ($\gamma = 2$) минимальная частота будет равна 0.9 ГГц.

В последнем столбце таблиц указана величина захода отражаемой волны за плоскость, определяющую базовую длину резонатора. Эта величина в большинстве случаев меньше $\lambda/2$. Если считать, что заход волны одинаков и справа и слева, то мы получаем величину захода меньше, чем $\lambda/4$.

Исследование резонансных эффектов требует измерения частоты с точностью ± 0.1 МГц в диапазоне частот до 5 ГГц. При измерении базовой длины резонатора достаточна точность ± 1 см в диапазоне частот до 5 ГГц.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм для определения основных характеристик продольных мод (фазовая скорость волны, длина эффективного резонатора, количество полуволн, длина волны, величина захода за отражающую плоскость). Входными данными являются экспериментальные частоты генерации (получены фурье-анализом, требуется точность измерения 10^{-4}) и базовая длина резона-

тора (достаточная точность измерения ± 1 см). Также задается диапазон скоростей электронов РЭП. Введены новые термины для демонстрации расчетных данных: прямой спектр и нормированный обратный спектр растройки ΔN в координатах скорости u .

Рассуждения базируются на рассмотрении взаимодействия релятивистского электронного пучка с плазмой, наличие которой в волноводе обеспечивает создание условий существования электромагнитных волн с фазовыми скоростями, меньшими скорости света. Это условие создает возможность выполнения фазового синхронизма для отдельно взятого электрона РЭП, т.е. равенства скорости электрона и фазовой скорости волны. Тогда возможна передача некоторой части энергии электрона в энергию волны — эффект Вавилова—Черенкова. Система релятивистский электрон — волна рассматривается как квантовая энергетическая система. В качестве энергии рассматривается кинетическая энергия релятивистского электрона. Квантовые переходы в такой системе — изменение кинетической энергии и излучение электромагнитного кванта. В системе имеются спонтанные и вынужденные переходы, аналогичные по своим свойствам переходам в атомах (изменение потенциальной энергии и излучение электромагнитного кванта). Такой подход дает возможность распространять хорошо исследованные свойства лазерного излучения на диапазон микроволнового излучения для черен-

ковского взаимодействия. Узкополосная генерация является следствием вынужденных квантовых переходов в системе релятивистский пучок — плазменная волна.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 19-08-00625 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Лоза О.Т., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2002. Т. 28(8). С. 748.
2. Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Стрелков П.С. // Физика плазмы. 2010. Т. 36(9). С. 815.
3. Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2016. Т. 42 (7). С. 644.
4. Тараканов В.П. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003.
5. Иванов И.Е. // Физика плазмы. 2019. Т. 45 (7). С. 633.
6. Иванов И.Е. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 3. С. 175.
7. Федосов А.И., Литвинов Е.А., Беломытцев С.Я., Бугаев С.П. // Изв. вузов СССР. Физика. 1977. № 10. С. 134.
8. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: ЛЕНАНД, 2018.
9. Лоза О.Т. Основы экспериментальной сильноточной релятивистской электроники. Учебное пособие. М.: РУДН, 2014.