

**КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ
В ПЛАЗМЕ**

УДК 533.951.8

**СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО
СВЧ-ГЕНЕРАТОРА**

© 2019 г. **И. Е. Иванов***

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

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

Поступила в редакцию 28.04.2017 г.

После доработки 08.10.2018 г.

Принята к публикации 25.11.2018 г.

Экспериментально исследован спектральный состав мощного микроволнового излучения плазменного релятивистского генератора. Изменялась длина резонатора, его конфигурация и варьировалась плотность плазмы. Излучение регистрировалось в диапазоне 1–4 ГГц. Длительность импульсов генерации 250–400 нс, энергия достигала 15 Дж. Объяснены основные закономерности в изменении спектров при различных конфигурациях резонатора.

DOI: 10.1134/S0367292119060076

1. ВВЕДЕНИЕ

Преимущество плазменных релятивистских СВЧ-генераторов (ПРГ) перед вакуумными заключается в возможности перестройки частоты излучения на несколько ГГц с помощью изменения плотности плазмы в пространстве взаимодействия. Релятивистский электронный пучок (РЭП) удерживается на оси круглого волновода внешним магнитным полем и высаживается на заземленный коллектор. В том же волноводе, отдельным источником создается соосная с РЭП плазма с концентрацией заряженных частиц в диапазоне 5×10^{11} – 2.6×10^{12} см⁻³. Присутствие плазмы в волноводе меняет условие распространения СВЧ-волн, образуется так называемый плазменный волновод, и возникает возможность существования медленных плазменных волн с фазовыми скоростями меньше скорости света. При соответствующей концентрации плазмы фазовая скорость электромагнитной волны становится равной скорости электронов РЭП, что приводит к возможности передачи части энергии РЭП в СВЧ-волну и выходу мощного (десятки мегаватт) электромагнитного излучения из устройства. Такие приборы работают в режиме отдельных импульсов, и повторяемость СВЧ-излучения зависит от многих факторов: стабильности РЭП, концентрации и распределения плазмы вдоль оси, давления газа, температурного режима на коллекторе. Поэтому получение повторяющегося в деталях СВЧ-излучения (по амплитуде, по времени и по спектральному составу) на практике не достигается. При неизменных задающих параметрах – энергии электронов РЭП, concentra-

ции плазмы, величины ведущего магнитного поля – обычно приводятся средние характеристики: энергия импульса СВЧ, положение спектра на оси частот за несколько импульсов.

Изучение таких устройств как экспериментально, так и теоретически продолжается на протяжении многих лет. Первоначально исследовалось СВЧ-излучение, полученное в системе, содержащей гладкий цилиндрический волновод, соосную цилиндрическую плазму и релятивистский пучок, в продольном ведущем магнитном поле. Положительная обратная связь создавалась автоматически при распространении электромагнитных волн по волноводу и элементам сопряжения, где происходили скачки фазовой скорости волны. Такой режим работы будем называть обычным режимом. Было показано [1], что в плазменном волноводе возбуждается азимутально-симметричная медленная плазменная волна с низшим радиальным индексом. Перестройка частоты излучения в таких системах осуществляется в пределах 4–28 ГГц [2] за счет изменения плотности плазмы, причем полная энергия излучения в импульсе почти постоянна во всей области частот.

В работе [3] было проведено детальное исследование изменения спектра излучения в течение импульса, экспериментальные результаты сравнивались со спектрами, полученными при помощи численного моделирования в коде KARAT [4]. Рассматривалась эволюция спектров при двух концентрациях плазмы, соответствующих генерации на низких частотах ~1.6 ГГц и более высоких частотах ~3.3 ГГц. При таком расчете плазма

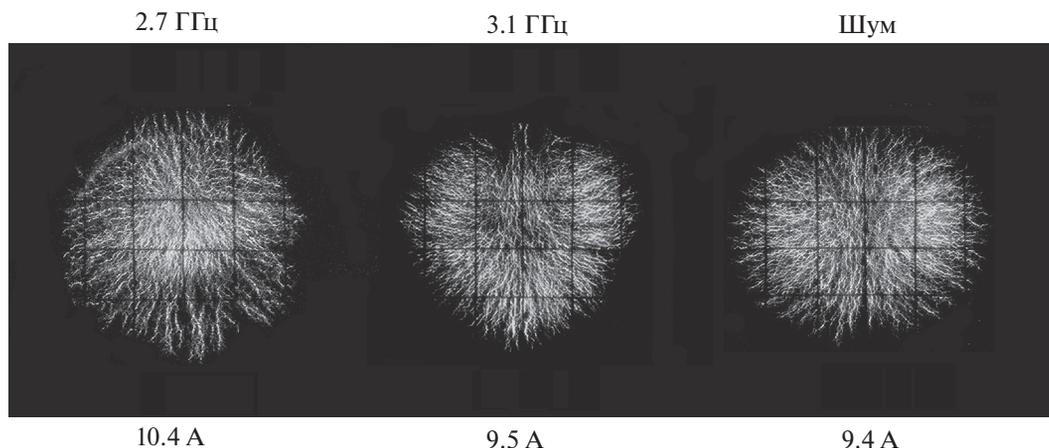


Рис. 1. Фотографии диэлектрического экрана, содержащего металлические опилки для шумового и монохроматических сигналов на расстоянии 5 см от рупора, сделанные при приблизительно одинаковой плотности плазмы (10.4, 9.5, 9.4 А — значения тока плазмы пропорциональны концентрациям). Размер координатной сетки на фотографиях 5 см.

представлялась линейной средой с неизменными во времени свойствами. В эксперименте было выделено несколько характерных фаз изменения спектра в течение импульса: от широкого спектра к узкому и опять к широкому; в моделировании только две фазы: переход от широкого спектра в начале импульса к узкому.

Последующее исследование плазменных релятивистских излучателей было связано с возможностью их использования в качестве усилителей внешнего монохроматического сигнала. Усилитель отличается от генератора наличием узла ввода задающего излучения и присутствием в пространстве взаимодействия поглотителя СВЧ-мощности для устранения положительной обратной связи. При входном излучении ~ 50 кВт на выходе получается 50–100 МВт монохроматического излучения с соотношением сигнал/шум в 30 дБл [5–8].

Далее прогресс в исследовании плазменных СВЧ-излучателей связан с режимом широкополосной генерации [9]. Если на вход усилителя не подается входное излучение, то такая система будет усиливать свои собственные шумы, причем энергия выходного шумового импульса равна энергии при работе в режиме усиления монохроматического излучения или в режиме генератора. Поскольку ширина полосы усиления для плазменных релятивистских генераторов заключена в интервале 1.5–2 ГГц, то спектральная ширина шумового импульса имеет ту же ширину ~ 1.5 ГГц. При изменении плотности плазмы максимум спектра шумового импульса смещается по оси частот аналогично смещению области генерации ПРГ. Таким образом, плазменный релятивистский шумовой генератор представляет собой мощный шумовой источник с электронной пере-

стройкой частоты в пределах 1–4 ГГц с шириной полосы 1.5–2 ГГц длительностью ~ 400 нс с энергией в импульсе 15 Дж. Напряженность электрического поля на расстоянии 0.5 м от выходного рупора может достигать 7 кВ/см.

Поперечная структура СВЧ-импульса в режиме усиления внешнего сигнала исследовалась в работе [10]. Для визуализации поперечного распределения выходного излучения использовался эффект возникновения электрического пробоя в воздухе между металлическими частицами малого размера — металлическими опилками на диэлектрическом экране (метод опилок). Однако в [10] не вошли результаты, полученные при регистрации этим методом шумовой генерации. На остриях металлических частиц возникает пробой, который можно сфотографировать, рис. 1. Фотография позволяет получить представление не только о форме поперечного сечения, но и о направлении силовых линий электрического поля в том месте, где стоит экран. С помощью численного моделирования и сравнения расчета с экспериментом было доказано, что в пространстве взаимодействия формируется аксиально симметричная E_{01} мода. Метод опилок в совокупности с мощным СВЧ-излучением позволяет изучать физику пробоя, а также оценивать когерентность СВЧ-излучения, поскольку при увеличении расстояния между экраном и выходным рупором поведение пробоя при шумовом импульсе отличается от пробоя при монохроматическом.

В настоящей работе подробно исследовались спектры плазменного релятивистского излучателя в обычном режиме генерации. Отличие от [3] заключается в большем экспериментальном наборе спектров при разной плотности плазмы. Эти спектры сравниваются друг с другом при измене-

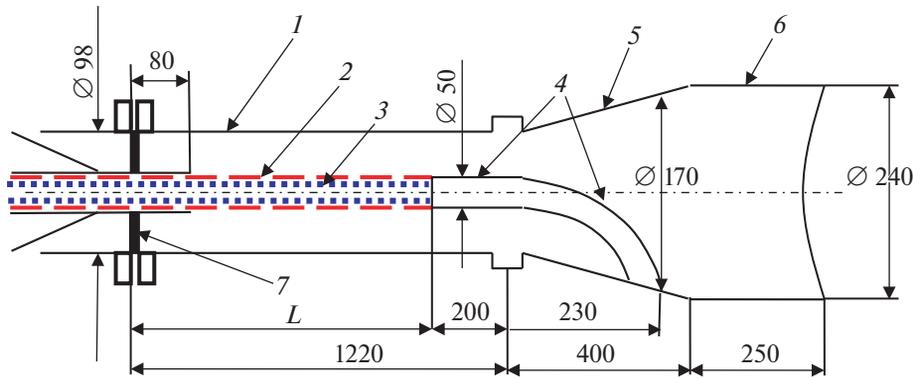


Рис. 2. Схема плазменного релятивистского генератора: 1 — цилиндрический металлический волновод, 2 — плазма, 3 — релятивистский электронный пучок (РЭП), 4 — коллектор РЭП и плазмы, 5 — рупор, 6 — выходной цилиндр, 7 — отражающая поверхность.

нии длины резонатора и при создании аксиальной анизотропии резонатора, которая создается наклоном отражающей поверхности относительно продольной оси. Кроме того, использован для регистрации более широкополосный осциллограф Tektronix TDS 7404 с шириной полосы до 4 ГГц. Помимо Фурье преобразования применен метод мгновенной частоты, позволяющий оперативно оценивать монохроматичность сигнала в течение импульса.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 2 представлена схема взаимного расположения основных узлов плазменного релятивистского генератора. Передача энергии релятивистского электронного пучка 3 (РЭП) в плазменную волну происходит за счет черенковского взаимодействия. Цилиндрическая плазма 2 в волноводе 1 предварительно создается в течение 100 мкс за счет ионизации ксенона при давлении 4×10^{-4} Торр электронами с энергией 600 эВ, эмитированными с кольцевого термокатода (на схеме не показан). РЭП и плазма представляют собой коаксиальную систему по отношению к оси металлического волновода круглого сечения 1. Токи РЭП и плазмы замыкаются на заземленный коллектор 4, который плавно загибается в сторону стенки выходного рупора 5 и вварен в нее. Плоскость загиба коллектора будем называть плоскостью коллектора. Такая система преобразует ТЕМ-моду коаксиального волновода в моду близкую к моде H_{11} полого цилиндрического волновода. Вваривание коллектора в область конусного волновода с диаметром, превышающим диаметр волновода 1, позволяет уменьшить частоту отсечки выходного излучения. Далее конус переходит в цилиндр 6, который является элементом узла откачки (на схеме не показан). Конус и цилиндр являются элементами, ограничивающими

выход низкочастотного излучения в районе 0.9 ГГц. Со стороны инжекции РЭП распространение СВЧ-волны ограничивается отражающей поверхностью 7, за счет перемещения которой менялась длина резонатора, а при изменении наклона вводилась угловая анизотропия. Плазма 2 совместно с металлическим волноводом 1 представляет собой плазменный волновод, по которому могут распространяться СВЧ-волны с фазовыми скоростями меньшими скорости света. На рис. 3 представлены дисперсионные характеристики медленной плазменной волны 1, релятивистского пучка 2 и СВЧ-волны в свободном пространстве 3. Точка пересечения медленной плазменной волны 1 и РЭП 2 соответствует равенству скоростей релятивистских электронов и фазовой скорости СВЧ-волны в системе (фазовый синхронизм). Для потенциала катода ускорителя 500 кВ и геометрии эксперимента скорость электронов РЭП равна 2.57×10^8 м/с. В зоне фазового синхронизма происходит передача энергии РЭП в плазменную волну. Экспериментально измеренная ширина спектра СВЧ-излучения составляет 1.5 ГГц. При изменении плотности плазмы дисперсионная диаграмма 1 будет смещаться, значение плазменной частоты ω_L служит асимптотой для этой кривой. Уменьшение плотности плазмы приведет к сдвигу кривой и перемещению зоны возможной генерации в сторону меньших частот. При некоторой плотности плазмы низкочастотный выход излучения будет ограничиваться областью частоты отсечки для волн полого волновода. Здесь также надо учитывать изменение коэффициента усиления системы при изменении плотности плазмы [3].

3. ДЛИНА РЕЗОНАТОРА 102 СМ

При распространении СВЧ-волн внутри генератора происходит отражение волн от областей,

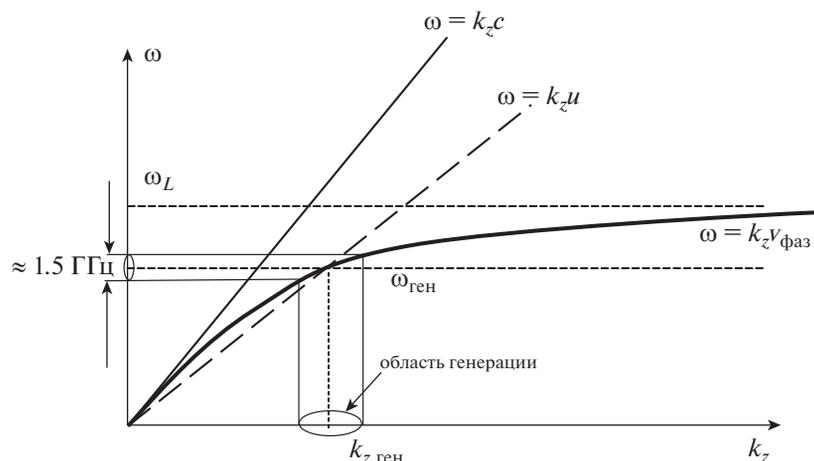


Рис. 3. Дисперсионные диаграммы: 1 – медленная плазменная волна, 2 – распространение релятивистских электронов со скоростью u , 3 – электромагнитная волна в свободном пространстве или мода ТЕМ в коаксиальном волноводе без диэлектрика.

где изменяется их фазовая скорость. Под резонатором будем подразумевать пространство L между поверхностями, где происходят скачки фазовой скорости и частичное отражение волн, рис. 2. Пространство взаимодействия РЭП с плазмой содержится внутри резонатора и в большинстве случаев совпадает с ним. Возникает положительная обратная связь, за счет которой на резонансных частотах происходит наиболее интенсивная генерация. Также присутствует шумовая генерация, т.е. выход нескоррелированных цугов, сформированных за один проход по резонатору (~ 3 нс). Длина волны излучения сравнима с элементами, которые вызывают отражение. Поэтому резонансная длина для разных мод может быть различной. Максимальное значение $L = 102$ см обеспечивается вставкой диска 7 в разрыв фланцев трубы 1. На рис. 4 приведены спектры СВЧ-импульсов для разных значений плотности плазмы в такой системе.

Интенсивные пики находятся на шумовом фоне пьедестале. Его спектральная ширина 1.5–2 ГГц, что указывает на принципиальную возможность генерации в этом диапазоне при данной плотности плазмы. В эксперименте плотность плазмы устанавливается током плазменного источника. Значение этого параметра $I_{пл}$ указано рядом с соответствующим спектром. Здесь и далее спектры получены фурье-преобразованием осциллограмм за полную длительность (800 нс), записанных с шагом дискретизации 16 пс. СВЧ-сигнал имел длительность 250–300 нс. Длительность импульса тока РЭП составляла 500 нс. Спектры расположены на рисунке в порядке увеличения плотности плазмы и содержат ряд относительно узких линий на шумовом пьедестале шириной 1.5–2 ГГц. Весь спектр смещается в вы-

сокочастотную область с увеличением плотности плазмы. Обращает на себя внимание интенсивная узкая линия, которая при малой плотности плазмы ограничивает спектр с длинноволновой стороны. Ее значение ν_1 указано рядом со спектрами. По мере увеличения плотности плазмы спектр смещается в коротковолновую сторону, интенсивность линии ν_1 уменьшается по сравнению со всем спектром и далее вообще пропадает. Это соответствует смещению зоны усиления на рис. 3 из области отсечки в область высоких частот при увеличении плотности плазмы. Образование этой узкой линии можно связать с резонансными явлениями, которые определяются в укладывании целого числа полуволн на длине резонатора L_1 . Можно построить зависимости резонансных длин для наиболее интенсивных частот $\nu_1 = 0.927$, $\nu_2 = 2.249$, $\nu_3 = 2.502$, $\nu_4 = 2.876$ ГГц, рис. 5. В случае резонанса все эти частоты должны при некоторых значениях N иметь одно и то же значение L_1 . Этому условию соответствует область в рамке с длиной резонатора $L_1 = 0.98$ м, которая приблизительно равна величине $L = 102$ см, указанная на рис. 2. Расстояние между продольными модами такого резонатора равно $\Delta\nu = v_{фаз}/2L \approx 0.13$ ГГц.

Исходя из анализа спектров, рис. 4, можно сделать следующие выводы.

1. При малой плотности плазмы с длинноволновой стороны выходные частоты ограничены значением 0.93 ГГц и представлены интенсивным узким пиком шириной 0.025 ГГц. Характер импульса шумовой (ток плазмы в интервале 4–5 А).

2. При увеличении плотности плазмы весь спектр смещается в коротковолновую сторону.

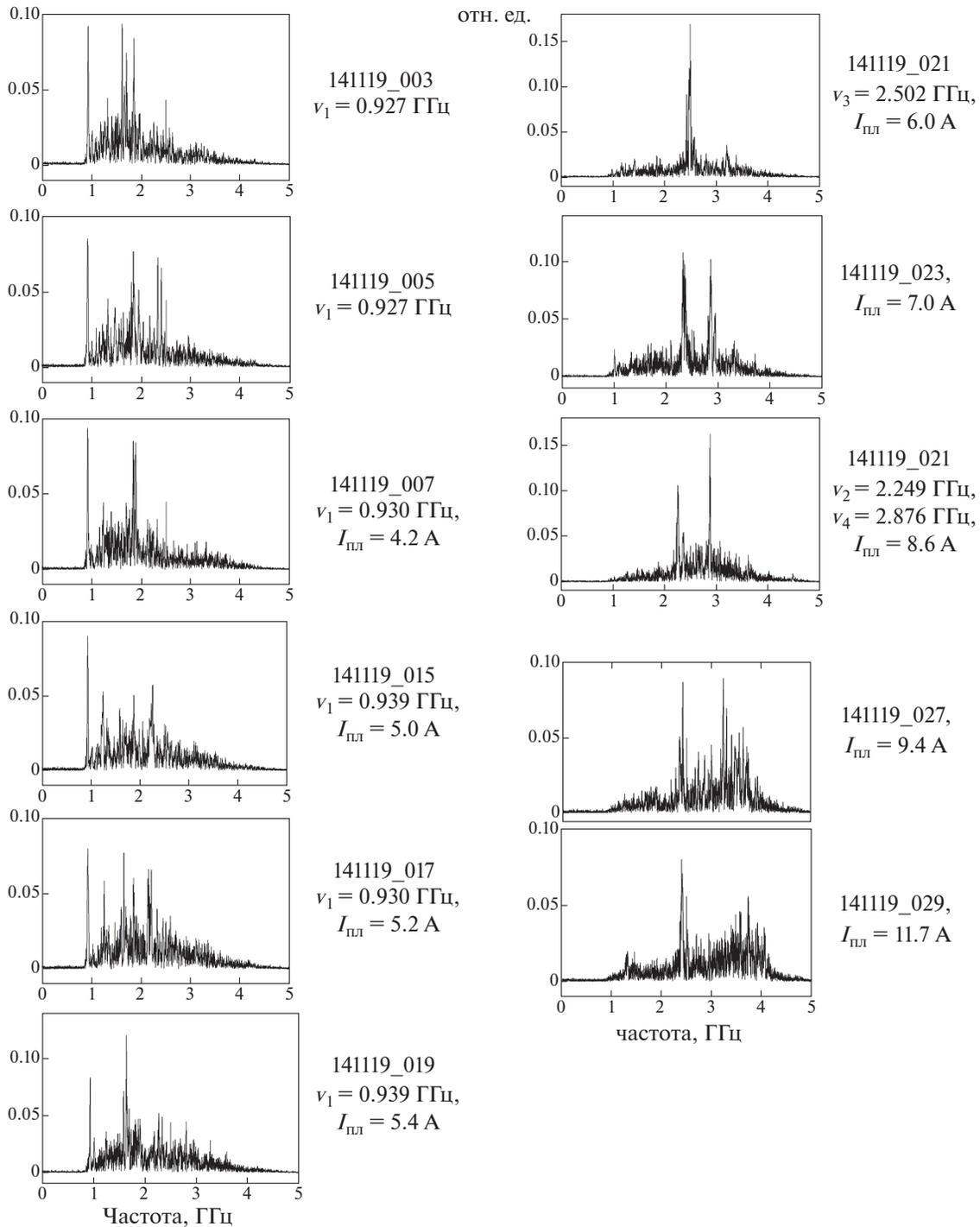


Рис. 4. Спектры СВЧ-импульсов для резонатора $L = 102$ см для разной плотности плазмы. ν_1, ν, ν_3, ν_4 — частоты интенсивных пиков спектров, которые использовались для определения длины резонатора. Ток плазмы $I_{пл}$ пропорционален плотности плазмы.

Линия 0.93 ГГц пропадает. Характер импульса изменяется: на шумовом пьедестале наблюдается набор узких линий (ток плазмы 5.5–9 А). Как будет показано ниже, генерация на узких линиях происходит индивидуально — сначала на более

высокочастотной, потом на следующей с меньшей частотой, далее еще с меньшей частотой.

3. При дальнейшем увеличении плотности плазмы шумы опять возрастают (ток плазмы больше 9.5 А), сам спектр с коротковолновой сто-

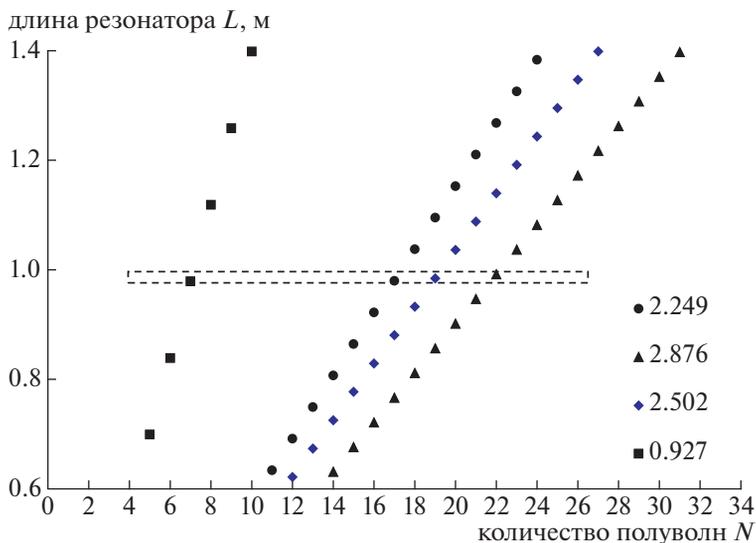


Рис. 5. Графики зависимостей количества N полуволн от длины резонатора L для частот 0.927, 2.249, 2.502, 2.876 ГГц в предположении равенства фазовой скорости этих волн и скорости электронов РЭП. Пунктирной рамкой отмечено количество полуволн, которые укладываются на длине резонатора ≈ 1 м для выбранных частот.

роны ограничен полосой пропускания регистрирующего осциллографа.

4. ДЛИНА РЕЗОНАТОРА 85 см

Длина резонатора уменьшена на 17 см путем перемещения отражающей поверхности 7 на рис. 2 в сторону коллектора 4. В этом случае характер спектров остается прежним, но исчезает линия отсечки 0.92 ГГц, рис. 6. Шумовой пьедестал имеет значительную интенсивность при всех плотностях плазмы. Присутствие отдельных узких линий сохраняется.

Затем аксиальная симметрия резонатора была нарушена. На рис. 7 показано первоначальное расположение отражающего диска (а) и замены его на наклонную отражающую поверхность (эллипс) (б) и (в), расположенный под углом 34° к продольной оси, с сохранением размера $L = 85$ см. В случае (б) перпендикуляр к отражающей поверхности лежит в плоскости коллектора, для (в) — в ортогональной плоскости. Спектры, полученные при условии (а), уже были рассмотрены на рис. 6. На рис. 8 представлены спектры, полученные для условия (б). Произошли значительные изменения:

1. шумовой пьедестал стал меньше.
2. отдельные узкие линии хорошо проявляются.
3. появились спектры с одной или двумя узкими линиями на незначительном шумовом фоне (спектры 141209_001, 141209_011, 141209_009, рис. 8)

При увеличении плотности плазмы спектр смещается в коротковолновую сторону, шумовой

пьедестал возрастает, узкие линии уширяются. Характер спектра становится шумовым.

На рис. 9 представлены спектры, полученные при повороте наклонной отражающей поверхности (см. рис. 7) на 90° (в) вокруг продольной оси. Из сравнения спектров рис. 8 и рис. 9 видно, что характер спектров одинаковый: малый фон шумовой пьедестал, наличие узких, интенсивных линий, возможность генерации на одной (см. спектры 141209_001, 141209_009, 141209_31, 141209_51, 141209_65) или двух линиях (141209_011, 141209_63). С энергетической точки зрения эти импульсы тоже примерно одинаковые, рис. 10.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛИ ЭНЕРГИИ В ЛИНИИ

Остановимся на рассмотрении осциллограмм импульсов СВЧ, которые дают спектры с одной линией на слабом шумовом пьедестале. Рассмотрим, например, спектр с номером 141209_009, рис. 8. Энергия, зарегистрированная калориметром, равна 15 Дж. На рис. 11(а) показан этот же спектр и график мгновенной частоты для осциллограммы этого СВЧ-импульса, рис. 11б. Под мгновенной частотой подразумеваем величину $f = 1/T$, где T — время между локальными максимумами осциллограммы. Внизу приведена кривая огибающей квадрата амплитуды осциллограммы, по которой можно судить, какая мощность сигнала соответствует данному временному участку, рис. 11в. Такая форма представления частотных характеристик удобна в определенных случаях. Из рис. 11 следует, что практически все время ге-

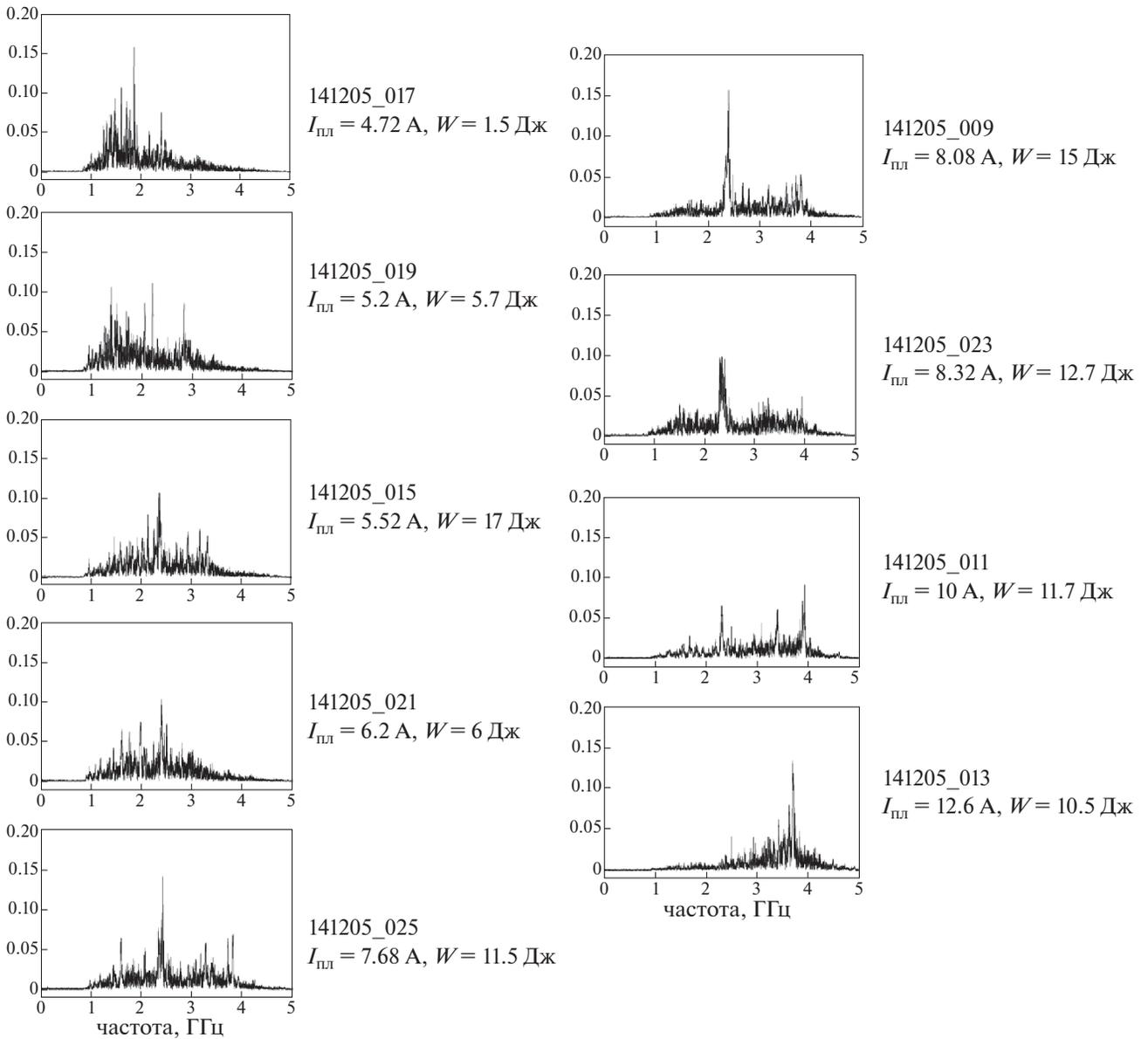


Рис. 6. Спектры СВЧ-импульсов для резонатора $L = 85$ см для разной плотности плазмы для перпендикулярного расположения отражающей поверхности. Справа указан ток плазмы $I_{пл}$ и энергия импульсов W .

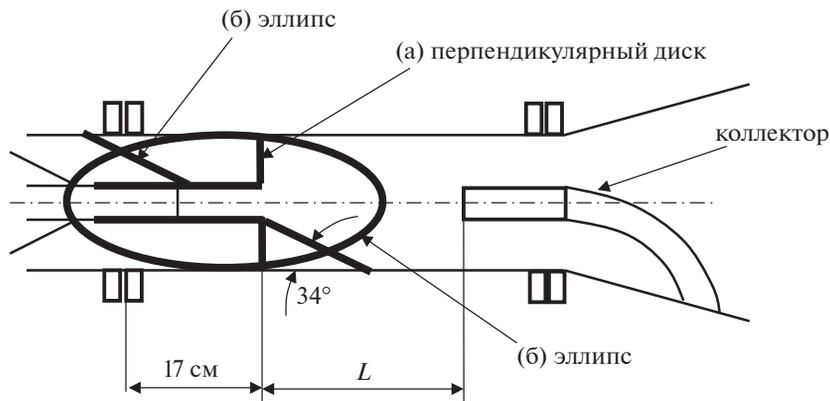


Рис. 7. Схема отражающих поверхностей в резонаторе: (а) перпендикулярный диск; (б) диск (эллипс) наклонен под углом $\approx 34^\circ$ к продольной оси волновода, перпендикуляр к поверхности находится в плоскости коллектора; (в) эллипс повернут на 90° вокруг продольной оси относительно положения (б).

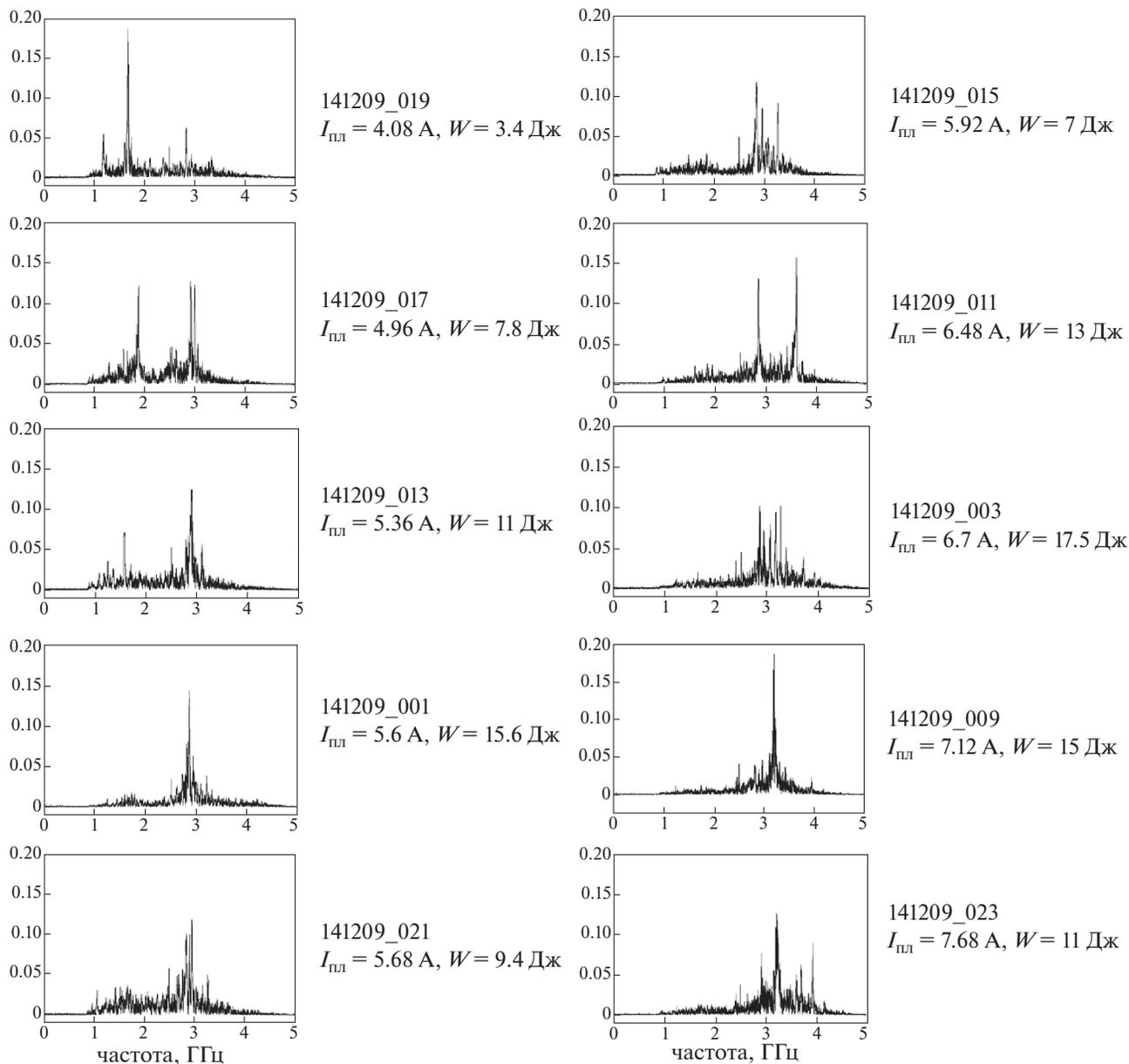


Рис. 8. Спектры СВЧ-импульсов для резонатора с эллиптическим диском, расположенным под углом 34° к оси волновода, перпендикуляр к отражающей поверхности лежит в плоскости коллектора.

нерация осуществлялась в узкой полосе на единственной частоте. Чтобы определить долю энергии в этой полосе мы должны сравнить интегралы квадрата амплитуды всей осциллограммы (за 800 нс – 15 Дж) с площадью под графиком (в), который по времени находится под линейным участком графика мгновенной частоты. При таком подходе не конкретизируется ширина полосы, соответствующая этой доли энергии.

Можно действовать по-другому. Воспользуемся равенством Парсеваля [11], определяющим

энергию СВЧ-сигнала W , выраженную через амплитудные и частотные характеристики

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega$$

Здесь $s(t)$ – амплитуда сигнала в вольтах, $S(\omega)$ – спектральная плотность энергии, приходящаяся на единичный частотный интервал на частоте $\omega = 2\pi f$. Для использования этой формулы на практике мы должны интегрировать $s^2(t)$ в пределах длительности импульса $t_2 - t_1$ и, перейдя к

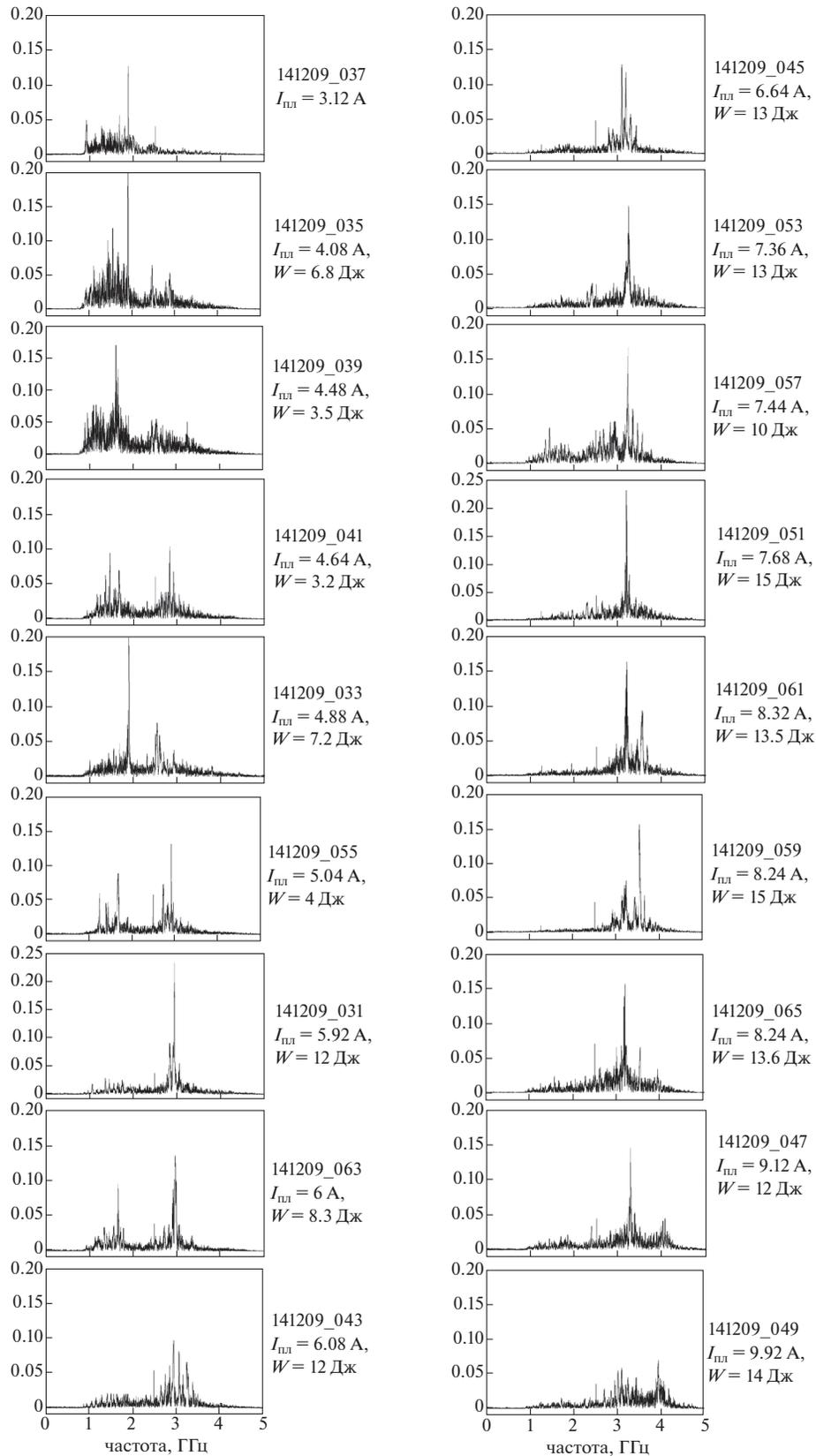


Рис. 9. Спектры СВЧ-импульсов для резонатора с эллиптическим диском, повернутым под углом 34° к продольной оси, перпендикуляр к отражающей поверхности лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости коллектора.

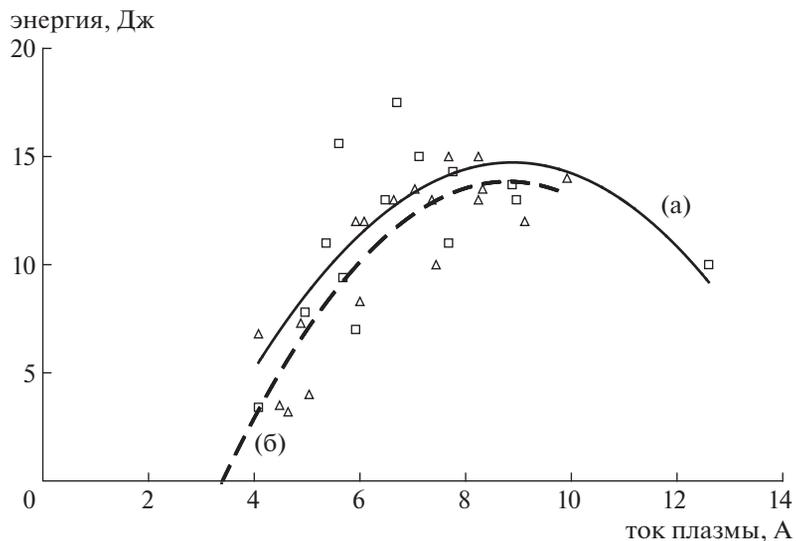


Рис. 10. Сравнение энергии импульсов СВЧ-генерации в случае наклонной отражающей поверхности в ортогональных направлениях: (а) отражение в плоскости коллектора; (б) отражение в перпендикулярной плоскости.

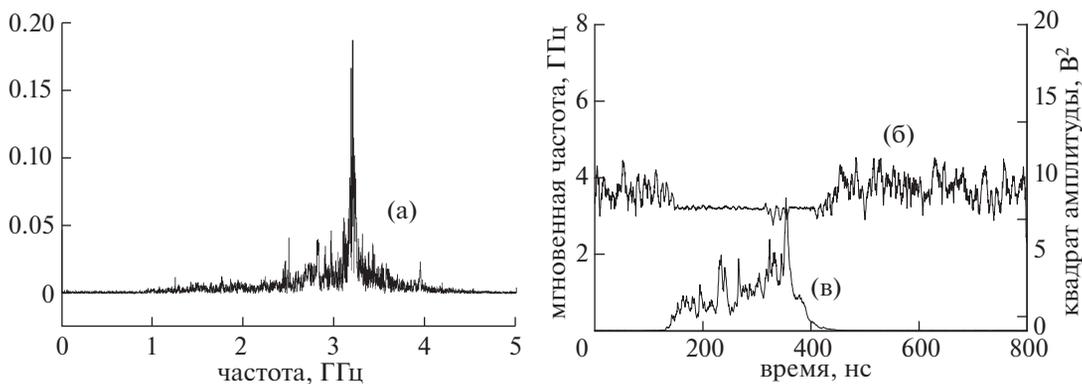


Рис. 11. Спектр (а) СВЧ-импульса и график сглаженной мгновенной частоты (б) (интервал усреднения 5 нс) для случая генерации на одной линии (номер 141209_009). Энергия импульса 15 Дж. Снизу показана огибающая (в) графика квадрата амплитуды осциллограммы.

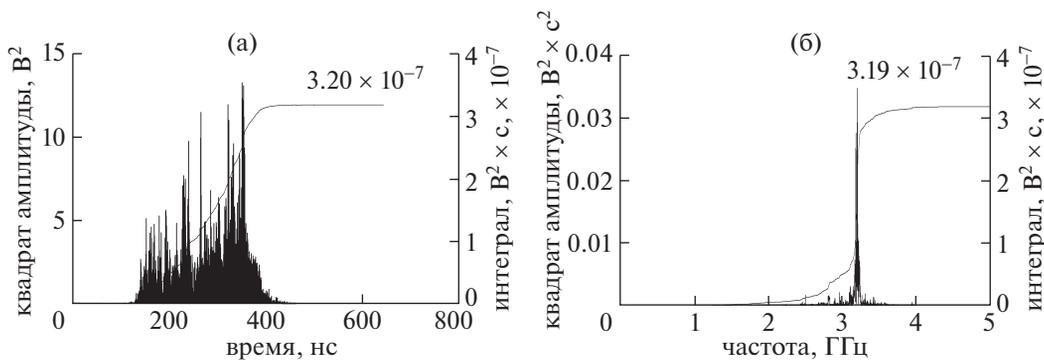


Рис. 12. Интегрирование осциллограммы (а) (номер 141209_009) и ее Фурье образа (б), согласно равенству Парсеваля. Интеграл для осциллограммы равен $3.20 \times 10^{-7} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$, для фурье-образа $3.19 \times 10^{-7} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$.

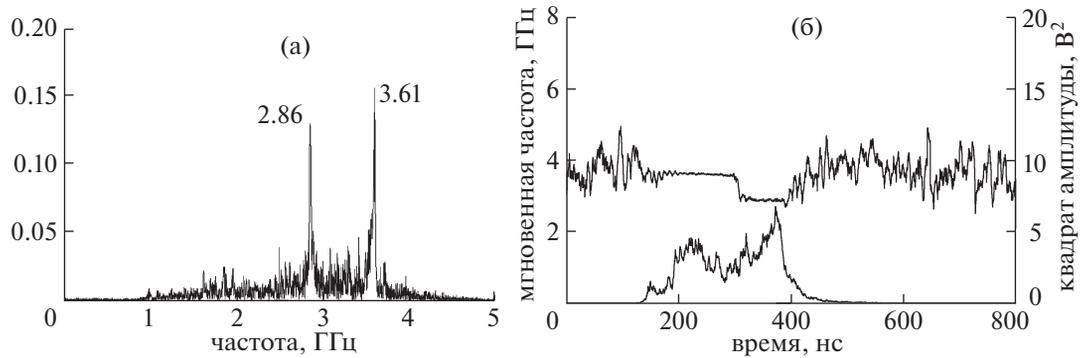


Рис. 13. Спектр СВЧ-импульса (а) и график сглаженной мгновенной частоты (б) (интервал усреднения 5 нс) для случая генерации на двух линиях (номер 141209_011). Энергия импульса 13 Дж.

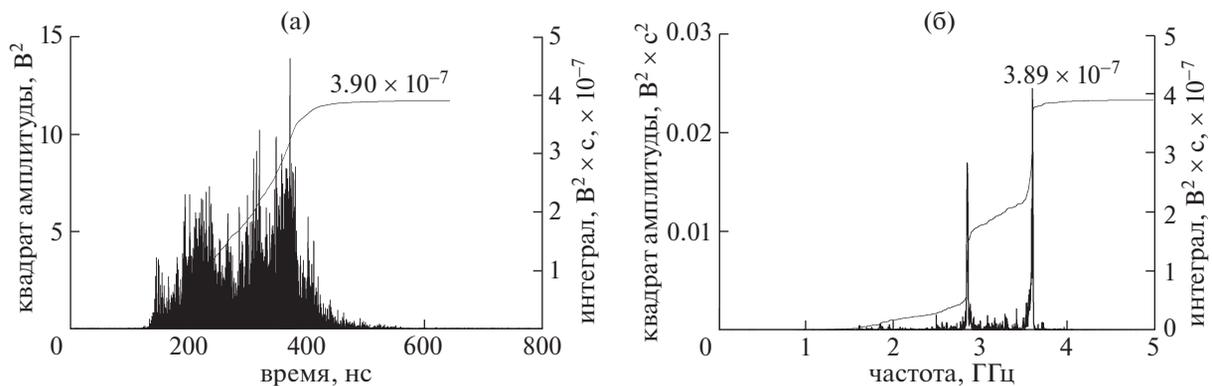


Рис. 14. Интегрирование осциллограммы (а) и фурье-образа (б) СВЧ-импульса при генерации на двух линиях 3.61 и 2.86 ГГц.

дискретному спектру, учесть, что энергия в i -й гармонике $A_i \sin(\omega_i t)$ за один период равна $W_{i1} = A_i^2 / 2f$, а за весь временной интервал $W_i = A_i^2 (t_2 - t_1) / 2$. На рис. 12 приведено сравнение этих интегралов. Теперь легко можно ответить на вопрос какая доля энергии лежит в определенной полосе, если растянуть шкалу частот на графике (б).

Применим этот подход для анализа импульсов, когда спектр генерации представлен двумя линиями, рис. 13. Из графика мгновенной частоты следует, что генерация сначала происходила на более высокочастотной линии 3.61 ГГц, а затем на линии 2.86 ГГц, причем легко определить соотношение энергий при генерации на этих линиях, проинтегрировав соответствующие участки осциллограммы. На рис. 14 приведены результаты, полученные с применением равенства Парсеваля. Из рис. 14б легко получить ответ о доле энергии при генерации на каждой из линий.

6. ОБЪЯСНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Независимость результата от ориентации наклонной отражающей поверхности в резонаторе говорит о том, что имеет место аксиальная симметрия волны в плазменном и коаксиальном волноводах.

2. Наклонная пластинка, введенная в резонатор в качестве отражающей поверхности, приводит к упрощению спектра и подавлению шумового пьедестала. Может быть получена длительность генерации на одной линии практически в течение всего импульса. Лучшее соотношение сигнал/шум.

Объяснение: перпендикулярная пластинка отражает все волны одинаково, наклонная только часть из них. Поэтому уменьшается количество частот, которые могут усиливаться. Спектр становится более простым.

3. Если спектр представлен несколькими интенсивными узкими линиями, одновременной генерации на этих частотах не происходит. Сначала идет излучение на более высокой частоте,

потом происходит переход на следующую более низкую частоту и т.д. По-видимому, это связано с уменьшением плотности плазмы в течение импульса тока РЭП.

4. При переходе от длины резонатора 102 см к длине 85 см пропала резонансная линия отсечки 0.92 ГГц.

Объяснение: из рис. 5 следует, что для частоты 0.93 ГГц соседний резонанс должен находиться при изменении длины резонатора на 14 см, а не 17 см.

7. ВЫВОДЫ

1. В пространстве взаимодействия образуется аксиально-симметричная СВЧ-мода.

2. Элементы, нарушающие аксиальную анизотропию резонатора, упрощают спектр, уменьшают шумовую генерацию. Одним из таких элементов является наклонная отражающая поверхность.

3. Возможно получение генерации на одной линии в течение всего импульса. Для этого надо подбирать условия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по Государственному заданию 01200953489 и программе Президиума РАН – ИРП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузелев М.В., Лоза О.Т., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 8. С. 710.
2. Стрелков П.С., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 4. С. 329.
3. 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.
4. Тараканов В.П. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003.
5. Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Лоза О.Т., Стрелков П.С., Ульянов Д.К., Garate E. // Письма ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 11. С. 65.
6. Иванов И.Е., Стрелков П.С., Шумейко Д.В. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 9. С. 1091.
7. Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Стрелков П.С. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 9. С. 815.
8. Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 6. С. 536.
9. Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 7. С. 644.
10. Алексеев И.С., Иванов И.Е., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 3. С. 277.
11. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Дрофа, 2006.