

01;09;12

Хаотическая генерация в лампе обратной волны мегаваттного уровня мощности

© Н.С. Гинзбург, Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, Ю.В. Новожилова, Р.М. Розенталь, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики РАН,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 1 марта 2001 г.)

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований автомодуляционных режимов генерации в мощной ЛОВ с электродинамической системой в виде слабофрированного волновода, запитываемой электронным пучком с энергией частиц 150 keV и током до 150 А. В качестве рабочей использована мода E_{01} со средней частотой генерации 8.7 GHz. Для получения режима динамического хаоса длина пространства взаимодействия была увеличена примерно в три раза по сравнению с прототипом, в котором реализовался стационарный режим генерации. По мере возрастания тока в пределах от 6 до 60 А последовательно наблюдались режимы стационарной генерации, периодической синусоидальной и хаотической автомодуляции. Далее в области токов 70–90 А происходили упрощение режима генерации и вновь его усложнение при возрастании тока свыше 100 А. Экспериментальные наблюдения в хорошем соответствии с результатами моделирования, которые показывают, что определенное упрощение режима автомодуляции в области токов 70–90 А может быть объяснено влиянием высокочастотного пространственного заряда. Средняя мощность в хаотическом режиме генерации достигала 2 MW при относительной ширине спектра сигнала 4% и полной длительности СВЧ импульса 10 μ s.

Введение

В настоящее время значительное внимание привлекает нелинейная динамика ламп обратной волны (ЛОВ) [1–6], являющихся достаточно важным примером распределенной автоколебательной системы. Как было впервые показано в [7,8], в этой системе при больших значениях параметра надкритичности могут реализоваться сложные, в том числе хаотические, режимы генерации. Поскольку ЛОВ является одним из наиболее освоенных приборов в мощной релятивистской электронике, исследование многочастотных процессов в данном классе генераторов может представлять непосредственный практический интерес для генерации мощных периодически модулированных или шумоподобных сигналов. Вместе с тем до недавнего времени экспериментально автомодуляционные режимы генерации наблюдались только в специальных макетах слаборелятивистских ЛОВ, имевших мегаваттный уровень мощности [9–11]. Исследование автомодуляционных режимов генерации в мощных ЛОВ было начато в последние годы в ИПФ РАН на базе микросекундного ускорителя "Сатурн" [12]. При этом в качестве экспериментального макета исследуется ЛОВ с типичной для диапазона релятивистских энергий электронов схемой: электродинамическая система в виде слабофрированного волновода с закритическим сужением на катодном конце и выводом излучения в сторону коллектора [13].

Впервые автомодуляционные режимы генерации в мощной ЛОВ наблюдались в работе [1], где длина рабочего пространства примерно в полтора раза превышала длину, соответствующую стационарному режиму генерации. Вопрос селекции мод по поперечному индексу решался путем выбора в качестве рабочей низшей мо-

ды H_{11} , что позволило избежать синхронного взаимодействия электронного пучка с другими поперечными модами. Однако в таких условиях рабочая точка находилась в зоне малых групповых скоростей ($0.2c$), что, с одной стороны, обеспечивало повышенный импеданс связи и облегчало получение автомодуляционных режимов, но, с другой стороны, затрудняло вывод энергии СВЧ излучения из рабочего пространства и повышало риск возникновения отражений волны от выходного конца рабочего пространства. В итоге указанные особенности привели к повышенному уровню СВЧ полей внутри пространства взаимодействия, вследствие чего выходная мощность ЛОВ в автомодуляционных режимах оказалась ограниченной СВЧ пробоями на уровне примерно 50–100 kW при микросекундной длительности импульса [1].

Целью следующего этапа исследований было получение автомодуляционных режимов при мегаваттном уровне средней выходной мощности. Превышение рабочего тока над стартовым, достаточное для реализации автомодуляционных режимов, обеспечивалось выбором сильно связанной с электронным пучком моды E_{01} , а достаточно большая выходная мощность при отсутствии пробоев — относительно высокой групповой скоростью рабочей моды ($0.4c$), облегчавшей вывод генерируемого излучения из рабочего пространства. Важно также отметить, что ранее на базе ускорителя "Сатурн" в микросекундной ЛОВ на рабочей моде E_{01} были исследованы стационарные режимы генерации [14]. При этом были рассмотрены механизмы ограничения длительности СВЧ импульсов и использован ряд технологий (в том числе изготовление электродинамической системы из бескислородной меди), позволивших увеличить выходную мощность до 5 MW при длительности импульса до 10 μ s.

Необходимо подчеркнуть, что при работе на моде E_{01} возникает проблема селекции мод по поперечному индексу. Действительно, реализация режимов периодической, а тем более хаотической автомодуляции требует значительных (в 10 и более раз) превышений токов инжекции над стартовым значением. При этом, вообще говоря, стартовые условия выполняются и для нескольких других мод с поперечной структурой, отличной от структуры рабочей моды. Теоретический анализ конкуренции мод, различающихся поперечным индексом, в ЛОВ показал возможность реализации автомодуляционного режима генерации на одной из мод при нелинейном подавлении генерации другой моды [15].

В первом из исследованных экспериментов макетов ЛОВ с рабочей модой E_{01} и длиной пространства взаимодействия, в полтора раза превышающей соответствующую стационарному режиму генерации, наблюдалась глубокая периодическая автомодуляция [2]. Мощность излучения в автомодуляционном режиме составила 0.5 MW и ограничивалась СВЧ пробоем в замедляющей системе, изготовленной электрохимическим способом. Для достижения хаотических режимов генерации на заключительном этапе исследований было проведено дополнительное увеличение длины замедляющей системы, так что полная длина втрое превысила длину стационарной ЛОВ. Одновременно путем изготовления электродинамической системы ЛОВ по специальной технологии из бескислородной меди [14] была увеличена электропрочность, что позволило при варьировании тока инжекции наблюдать режимы не только периодической, но и хаотической автомодуляции. При этом средний уровень мощности выходного излучения достигал 2 MW и более при длительности импульса до 10 μ s.

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию автомодуляционных процессов в мощной ЛОВ на моде E_{01} . В разделе 1 проведено моделирование нестационарных процессов в экспериментальном макете ЛОВ на основе системы уравнений, включающей уравнения для медленно меняющейся амплитуды поля, и релятивистских уравнений движения электронов. Анализ проведен как для модели ЛОВ с одной поперечной модой, синхронной электронному пучку, так и для модели, в которой учитывается возбуждение и конкуренция нескольких мод. В разделе 2 приведены результаты экспериментов по наблюдению автомодуляционных, в том числе хаотических, режимов генерации в мощной ЛОВ. Эти результаты находятся в хорошем соответствии с результатами теоретического анализа.

1. Численное моделирование нестационарных процессов в ЛОВ

Модель ЛОВ с одной синхронной электронному пучку модой замедляющей системы. В предположении, что электронный пучок воз-

буждает единственную моду гофрированного волновода, многочастотные процессы в ЛОВ генераторе описываются самосогласованной системой уравнений, состоящей из уравнения для амплитуды синхронной волны [7,8]

$$\frac{\partial A}{\partial \tau} - \frac{\partial A}{\partial \eta} = -\frac{J}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\vartheta} d\vartheta_0, \quad (1)$$

и релятивистских уравнений движения электронов, включающих влияние поля пространственного заряда пучка,

$$\frac{\partial \vartheta}{d\zeta} = \frac{1}{\sqrt{1-\gamma^{-2}}} - \frac{1}{\sqrt{1-\gamma_0^{-2}}}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \zeta} = \operatorname{Re} \left(A(\zeta, \tau) \exp(i\vartheta) + i\sigma \sum_n f_n \rho_n \exp(in\vartheta) \right) \quad (3)$$

с граничными и начальными условиями

$$A|_{\zeta=l} = 0, \quad A|_{\tau=0} = A_0(\zeta),$$

$$\vartheta|_{\zeta=0} = \vartheta_0 \in (0, 2\pi), \quad \gamma|_{\zeta=0} = \gamma_0. \quad (4)$$

Здесь $A = eE_z/(mc\omega)$ — безразмерная амплитуда синхронной (-1) -й гармоники поля излучения, $\tau = \omega(t - z/v_0)/(1/\beta_0 + 1/\beta_{gr})$ и $\zeta = \omega z/c$ — безразмерные время и продольная координата, l — безразмерная длина пространства взаимодействия, $\vartheta = \omega t - hz$ — фазы электронов относительно синхронной гармоники поля, $J = e|Z|/(2\beta_0^2 mc^2)$, Z — сопротивление связи для этой гармоники [16], I — ток пучка, γ — релятивистский масс-фактор электронов, ω — частота точного синхронизма, $v_0 = \beta_0 c$ — начальная поступательная скорость электронов, $v_{gr} = \beta_{gr} c$ — групповая скорость волны, $\sigma = Ieg/(mc\omega^2 b)$ — параметр пространственного заряда, f_n — коэффициент редукции n -й гармоники поля пространственного заряда, $\rho_n = (1/\pi) \int_0^{2\pi} \exp(-n\vartheta) d\vartheta_0$ — n -я гармоника плотности пространственного заряда. Коэффициент редукции пространственного заряда f_n выбирался из расчета наиболее полного согласования с результатами эксперимента. Наилучшее совпадение получалось при $f_{1,2} \approx 0.55$. Данное значение было примерно вдвое меньше значений, рассчитанных по оценочной формуле $f_n = 1 - \exp(-2ngd)$, где d — расстояние между пучком и стенкой волновода, $g = \omega/(c\beta_0\gamma)$ — поперечное волновое число. При этом волновод считается гладким и предполагается также, что расстояние d много меньше среднего радиуса волновода, так что кривизной стенки волновода и электронного пучка можно пренебречь.

Численное моделирование уравнений (1)–(3) проводилось при различных значениях тока пучка для лампы с параметрами, близкими к реализуемым в эксперименте. Длина пространства взаимодействия составляла 62.3 см, средний радиус волновода 1.38 см, период гофрировки 1.73 см, радиус электронного пучка 0.67 см, энергия

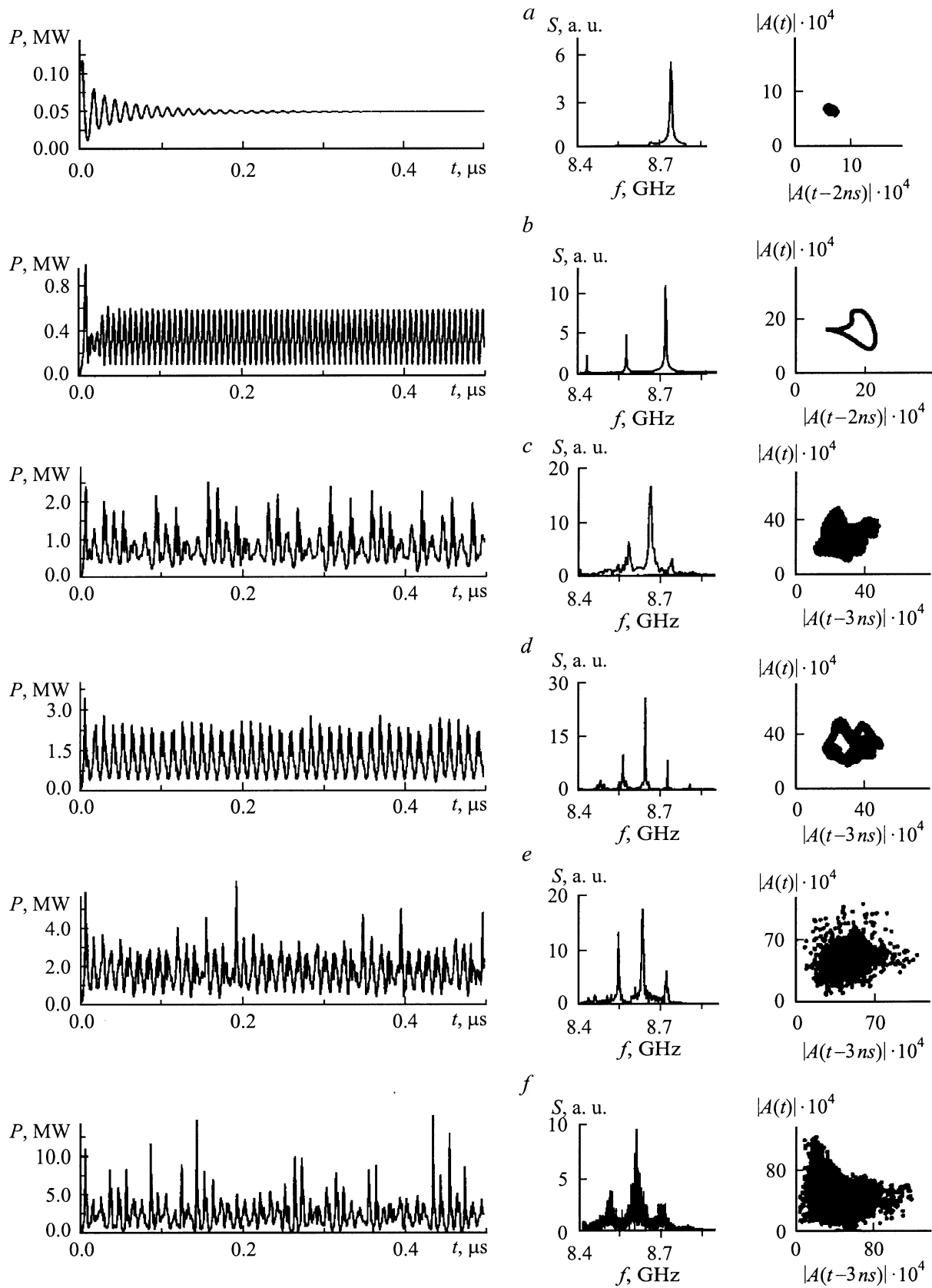


Рис. 1. Результаты моделирования нестационарных процессов в ЛОВ с импедансом связи 0.47Ω и энергией частиц $\gamma_0 = 1.3$. Зависимость мощности излучения от времени (левая колонка), спектры выходного сигнала (средняя колонка) и фазовые портреты (правая колонка) при токах инжекции I : $a - 7$, $b - 30$, $c - 55$, $d - 70$, $e - 90$, $f - 120$ А.

электронов 150 keV. Сопротивление связи и стартовый ток были рассчитаны для заданной геометрии электродинамической системы на основе результатов работы [16]. На рабочей частоте 8.7 GHz для моды E_{01} стартовый ток составил 6 А при сопротивлении связи 0.5Ω . При моделировании учитывались первые две гармоники поля пространственного заряда, поскольку учет следующих гармоник давал незначительные поправки.

На рис. 1 для различных значений тока пучка приведены временные зависимости выходной мощности излучения, а также спектры выходного сигнала и так называемые фазовые портреты. Для построения фазовых портретов взята временная реализация амплитуды сигнала на выходе из генератора $|A(0, t)|$ и на плоскость $(|A(0, t)|, |A(0, t - t_{\text{del}})|)$ нанесены точки, соответствующие состоянию системы в последовательные моменты времени. Здесь t_{del} — время задержки, которое выбиралось равным примерно $1/4$ периода автомодуляции. На рис. 1, *a* показан пример установления стационарного режима генерации при величине тока $I = 7$ А. По мере увеличения тока реализуются режимы генерации с усложняющимся характером автомодуляции и соответственно спектром и фазовым портретом. Так, при токе 30 А атомодуляция является периодической (рис. 1, *b*), а при токе 55 А теряет периодичность и становится хаотической (рис. 1, *c*). Сравнение спектров и фазовых портретов при токах 30 и 55 А (рис. 1, *b, c*) подтверждает переход к хаотическому режиму генерации. Ширина спектра в хаотическом режиме составляет около 3% при среднем КПД 10%. Важно подчеркнуть, что при дальнейшем повышении тока и заданном сопротивлении связи возникает подавление автомодуляции, обусловленное влиянием пространственного заряда (ср. с [8,9]).

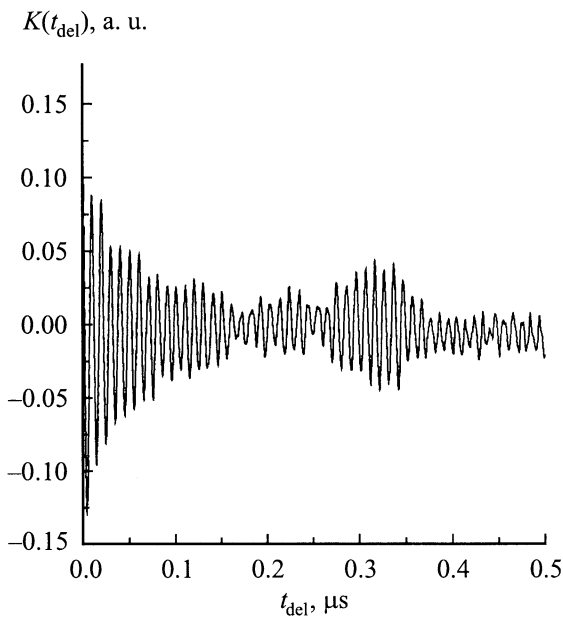


Рис. 2. Автокорреляционная функция, вычисленная по результатам численного моделирования для тока 120 А.

Так, при токе $I = 70$ А автомодуляция вновь становится периодической синусоидальной (рис. 1, *d*). Однако при дальнейшем возрастании тока инжекции и заданной величине коэффициента редукиции параметра пространственного заряда характер режима автомодуляции вновь усложняется (рис. 1, *e, f*). При токе 90 А режим генерации является квазипериодическим (рис. 1, *e*), а при токе 120 А автомодуляция становится хаотической (рис. 1, *f*). Следует отметить, что период автомодуляции при токе 30 А составляет 90 в безразмерных величинах или 7 ns в размерных (рис. 1, *b*). При увеличении тока свыше 70 А и прохождении через область хаотической автомодуляции период атомодуляции удваивается и составляет 170 в безразмерных единицах или 13 ns в размерных (рис. 1, *d*). В связи с возрастанием характерного временного масштаба автомодуляции время задержки при построении фазовых портретов также было увеличено: на рис. 1, *a-c* оно составило 2 ns, а на рис. 1, *d-f* — 3 ns. На рис. 2 для тока инжекции 120 А построена автокорреляционная функция, определенная как

$$K(t_{\text{del}}) = \frac{1}{T} \int_0^T (|A(0, t')| - \bar{A})(|A(0, t' + t_{\text{del}})| - \bar{A}) dt', \quad (5)$$

где T — время реализации, на котором вычисляется указанная функция; \bar{A} — среднее по времени реализации значение модуля амплитуды поля [17].

Характерный масштаб спада автокорреляционной функции в хаотическом режиме генерации при заданном токе составляет 50 ns, что соответствует ширине основной линии в спектре сигнала, которая, согласно рис. 1, *f*, порядка 0.02 GHz.

Моделирование процесса нелинейной конкуренции мод. Как следует из анализа дисперсионных характеристик электродинамической системы с параметрами, приведенными выше, при рабочем напряжении 150 kV могло иметь место синхронное взаимодействие с тремя низшими волноводными модами: H_{11} , E_{01} и H_{21} (рис. 3). Для мод H_{11} и E_{01} точки синхронизма соответствовали возбуждению обратных волн, тогда как для моды H_{21} частота синхронизма близка к частоте отсечки. Стартовые токи для мод E_{01} и H_{11} , рассчитанные на основе работы [16], составили соответственно 6 и 27 А. Для моды H_{21} стартовый ток, вычисленный в рамках теории оротрона с нефиксированной продольной структурой поля [18], составил 13 А. Таким образом, мода E_{01} обладала более высоким сопротивлением связи и соответственно меньшим стартовым током по сравнению с другими модами.

В эксперименте было зафиксировано возбуждение только одной рабочей моды E_{01} с центральной частотой 8.7 GHz. Тем не менее, поскольку рабочий ток, необходимый для достижения режима хаотической генерации, повышался до 120 А, условия самовозбуждения выполнялись и для других мод. Отсутствие составляющих, связанных с возбуждением этих мод, в

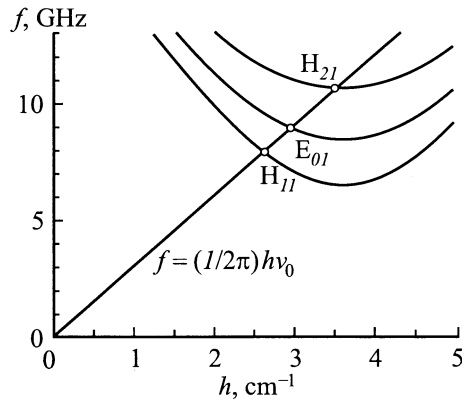


Рис. 3. Дисперсионная диаграмма ЛОВ с параметрами замедляющей системы, близкими к экспериментальным.

спектре излучения и диаграмме направленности может быть объяснено механизмами нелинейной конкуренции мод. Действительно, согласно результатам приведенного ниже моделирования (см. также [15]), при достаточно сильно различающихся сопротивлениях связи нелинейная конкуренция мод может приводить к установлению одномодового автомодуляционного режима, даже если пороги возникновения автомодуляции превышены для каждой из мод в отдельности.

Продемонстрируем подавление паразитной моды на примере конкуренции двух поперечных мод E_{01} и H_{11} . Процесс взаимодействия мод в релятивистской ЛОВ описывается в пренебрежении высокочастотным полем пространственного заряда следующей системой уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial \tau} - \frac{\partial A_1}{\partial \zeta} &= -\frac{\bar{J}}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\vartheta_1} d\vartheta_{10} d\vartheta_{20}, \\ p_1 \frac{\partial A_2}{\partial \tau} - \frac{\partial A_2}{\partial \zeta} &= -\frac{\bar{J} p_2}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\vartheta_2} d\vartheta_{10} d\vartheta_{20}, \\ \frac{\partial \vartheta_1}{\partial \zeta} &= \frac{1}{\sqrt{1-\gamma^{-2}}} - \frac{1}{\sqrt{1-\gamma_0^{-2}}}, \\ \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \zeta} &= \nu \left(\frac{1}{\sqrt{1-\gamma^{-2}}} - \frac{1}{\sqrt{1-\gamma_0^{-2}}} \right), \\ \frac{\partial \gamma}{\partial \zeta} &= \text{Re}(A_1 \exp(i\vartheta_1) + \nu A_2 \exp(i\vartheta_2)). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь использованы следующие нормированные переменные: $\zeta = \omega_1 z/c$ — продольная координата, $\tau = \omega_1(t - z/v_0)/(1/\beta_0 + 1/\beta_1)$ — время, $\vartheta_{1,2} = \omega_{1,2}t - h_{1,2}z$ — фазы электронов относительно каждой из волн, $A_{1,2} = eE_{1,2}/(mc\omega_{1,2})$ — амплитуды волн, $v_{1,2} = \beta_{1,2}c$ — групповые скорости волн, $\bar{J} = eI|Z_1|/(2mc^2\beta_0^2)$, $z_{1,2}$ — сопротивление связи для

каждой из мод, $p_1 = (\beta_0^{-1} + \beta_2^{-1})/(\beta_0^{-1} + \beta_1^{-1})$, $p_2 = |Z_2|\omega_2/(|Z_1|\omega_1)$, $\nu = \omega_2/\omega_1$. Граничные и начальные условия к уравнениям (6) имеют вид

$$A_{1,2}|_{\zeta=l} = 0, \quad A_{1,2}|_{\tau=0} = A_0(\zeta),$$

$$\vartheta_{1,2}|_{\zeta=0} = \vartheta_{10,20} \in (0, 2\pi), \quad \gamma|_{\zeta=0} = \gamma_0. \quad (7)$$

Численное моделирование уравнений (6) было проведено для ЛОВ с параметрами, близкими к реализуемым в эксперименте. На рис. 4 приведены результаты моделирования при токе инжекции 120 А. Из рис. 4, *a* видно вызванное нелинейной конкуренцией подавление моды H_{11} , имеющей меньший импеданс связи и соответственно больший стартовый ток по сравнению с рабочей волной E_{01} , для которой при выбранных параметрах реализуется хаотический режим генерации. В то же время если сопротивление связи Z_1 рабочей моды E_{01} достаточно сильно уменьшить, то в отсутствие возбуждения этой моды реализуется сложный автомодуляционный режим генерации на моде H_{11} (рис. 4, *b*). Таким образом,

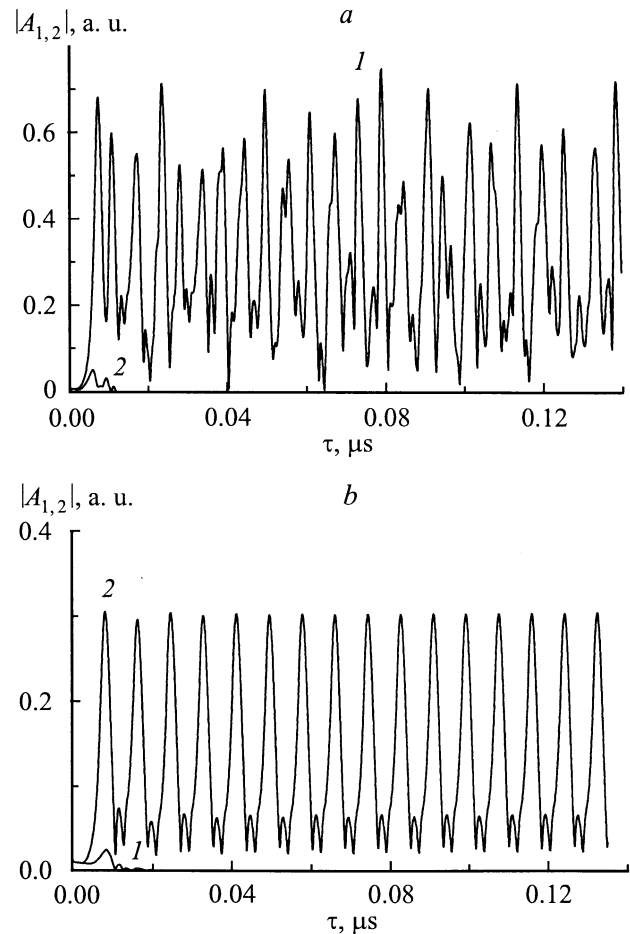


Рис. 4. Временные зависимости модулей амплитуд волн E_{01} (1) и H_{11} (2) в условиях конкуренции мод при токе 120 А. *a* — импедансы связи волн близки к реальным значениям: $|Z_1| = 0.5 \Omega$, $|Z_2| = 0.15 \Omega$ ($p_1 = 0.75$, $p_2 = 0.09$, $\nu = 0.9$, $J = 10^{-4}$); *b* — импеданс связи для волны E_{01} уменьшен в 10 раз.

моделирование подтверждает возможность получения одномодового автомодуляционного режима генерации на рабочей моде E_{01} при нелинейном подавлении паразитной моды, для которой, вообще говоря, также имеет место существенное превышение тока инжекции над стартовым значением.

2. Экспериментальное исследование автомодуляционных режимов

В качестве источника электронного пучка использовался импульсный ускоритель "Сатурн" на базе магнетронно-инжекторной пушки с термокатодом, позволяющий формировать электронный пучок с длительностью импульса до $10 \mu\text{s}$. В рабочем режиме ускоряющее напряжение достигало 150 kV , ток инжекции варьировался в пределах $10\text{--}140 \text{ A}$. Термокатод работал в режиме ограничения тока пространственным зарядом. Регулировка тока в необходимом диапазоне осуществлялась путем перераспределения потенциалов между элементами трехэлектродной электронной пушки.

Электродинамическая система представляла собой слабоффрированный осесимметричный волновод с параметрами, приведенными в разделе 1. Для повышения электропрочности [14] температура электродинамической системы с помощью подогревателя постоянно поддерживалась на уровне 500°C .

Генерируемое излучение после прохождения вакуумного окна регистрировалось в беззеховой камере. Приемный рупор располагался в максимуме диаграммы направленности рабочей моды E_{01} . Огибающая выходного сигнала регистрировалась с помощью кристаллического детектора с инерционностью не более 2 ns и цифровых осциллографов Hewlett Packard и Tektronix с полосой пропускания 500 MHz и периодом оцифровки не реже 1 ns , позволявших запомнить всю огибающую высокочастотного импульса для последующего просмотра отдельных его участков. Для определения спектра выходного излучения использовался гетеродинный метод. Разностный сигнал в течение СВЧ импульса также записывался осциллографом, а затем восстанавливался спектр сигнала. Мощность выходного излучения определялась как по калиброванному затуханию тракта, так и для более точных измерений по энергии в СВЧ импульсе. В последнем случае специальный калориметр, описанный в [19], позволял определить энергию в импульсе и соответствующую мощность с точностью до $\pm 10\%$.

Как уже отмечалось в предыдущем разделе, в эксперименте было зафиксировано возбуждение только одной рабочей моды E_{01} с центральной частотой 8.7 GHz . Типичная осциллограмма сигнала в режиме хаотической модуляции представлена на рис. 5 для тока инжекции 120 A . Видно, что автомодуляционный режим занимает практически всю длительность СВЧ импульса (порядка $10 \mu\text{s}$). Вместе с тем более детальный анализ

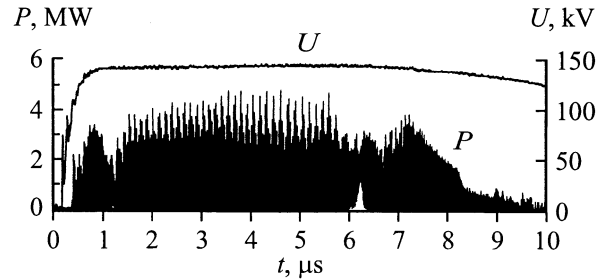


Рис. 5. Полная осциллограмма СВЧ сигнала при токе 120 A .

формы огибающей показывает, что характер автомодуляционного режима несколько меняется в течение импульса, что может быть объяснено небольшой вариацией напряжения. В результате в течение импульса несколько изменяется импеданс связи. Кроме того, в электродинамической системе неизбежно присутствуют паразитные отражения от коллекторного конца, которые, как известно, приводят к сильной зависимости выходной мощности от частоты, меняющейся с изменением напряжения [6].

В этой связи для сравнительного анализа бифуркационных значений токов выбирались центральные фрагменты осциллограмм, соответствующих фиксированному напряжению на вершине импульса $\sim 150 \text{ kV}$ длительностью $\sim 500 \text{ ns}$. Подобные участки осциллограмм, а также соответствующие спектры сигнала и фазовые портреты на плоскости $(|A(0, t)|, |A(0, t - t_{\text{del}})|)$ приведены на рис. 6. Как видно из указанного рисунка, по мере роста тока имеет место переход от стационарного режима генерации, реализующегося при токе менее 7 A (рис. 6, *a*) к автомодуляционным режимам генерации (рис. 6, *b-f*). Автомодуляция при токе 30 A имеет форму, близкую к синусоидальной (рис. 6, *b*) с периодом 8 ns , затем по мере увеличения тока характер автомодуляции усложняется и при токе порядка 50 A она становится хаотической (рис. 6, *c*). Однако при дальнейшем росте тока свыше 50 A имеет место упрощение режима автомодуляции. Так, из рис. 4, *d, e* видно, что при токах от 70 до 90 A автомодуляция является квазигармонической с периодом 14 ns . В конечном итоге при увеличении тока свыше 100 A автомодуляция вновь приобретает хаотический характер с относительной шириной спектра $\sim 4\%$ (рис. 6, *f*). Важно подчеркнуть, что бифуркационные значения токов и основных периодов автомодуляции находятся в хорошем соответствии с результатами моделирования. При этом, как следует из численного моделирования, чередование режимов автомодуляции при возрастании тока инжекции можно объяснить влиянием поля пространственного заряда. Заметим также, что автокорреляционная функция (рис. 7), построенная на основании осциллограммы сигнала, представленной на рис. 6, *f*, находится в хорошем соответствии с вычисленной при заданном токе инжекции 120 A на основании результатов моделирования (ср. с рис. 2).

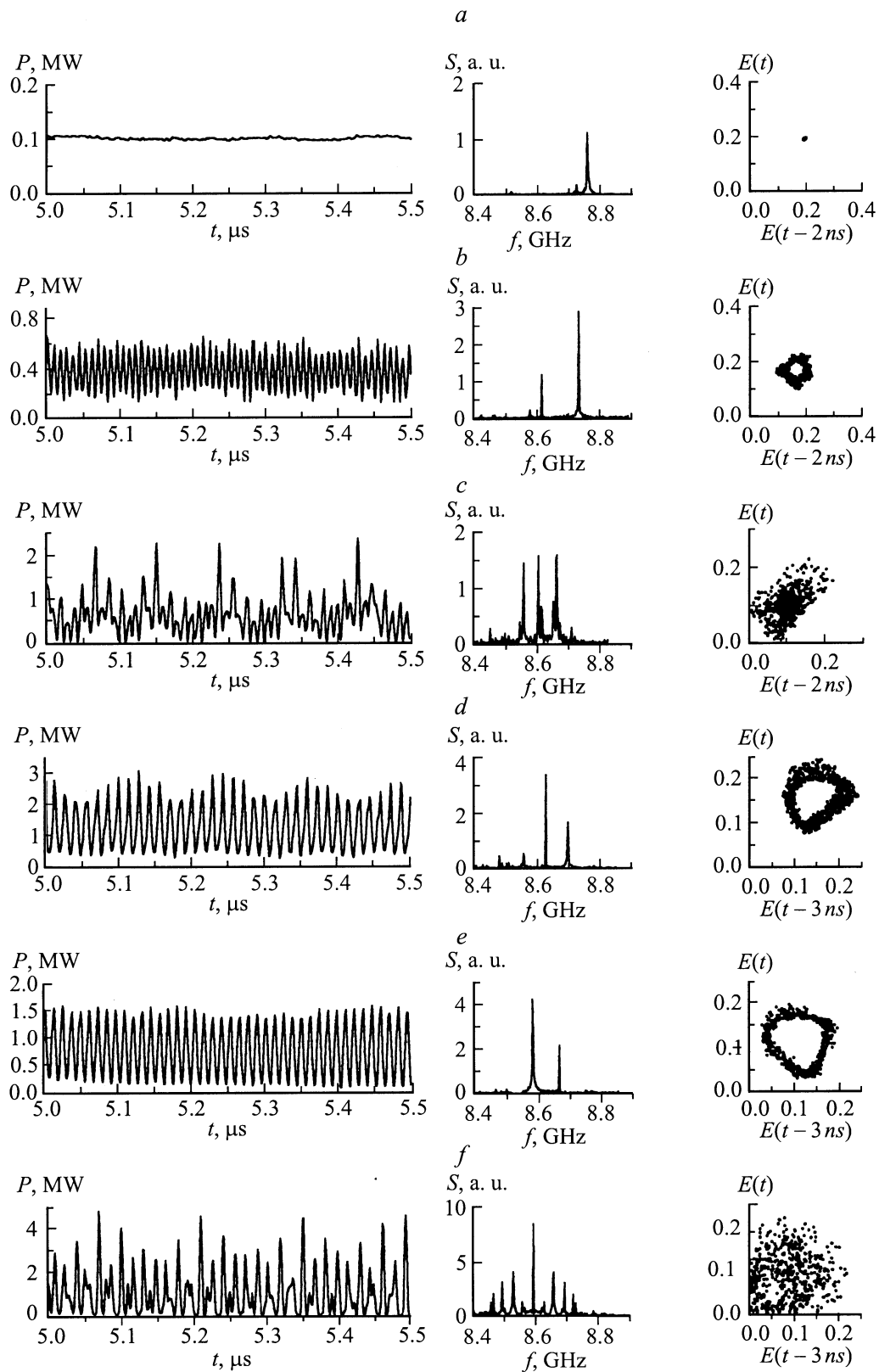


Рис. 6. Экспериментальные осциллограммы выходной мощности (левая колонка), спектры излучения (средняя колонка) и фазовые портреты (правая колонка) при токах инжекции I : a — 10, b — 30, c — 55, d — 70, e — 90, f — 120 А.

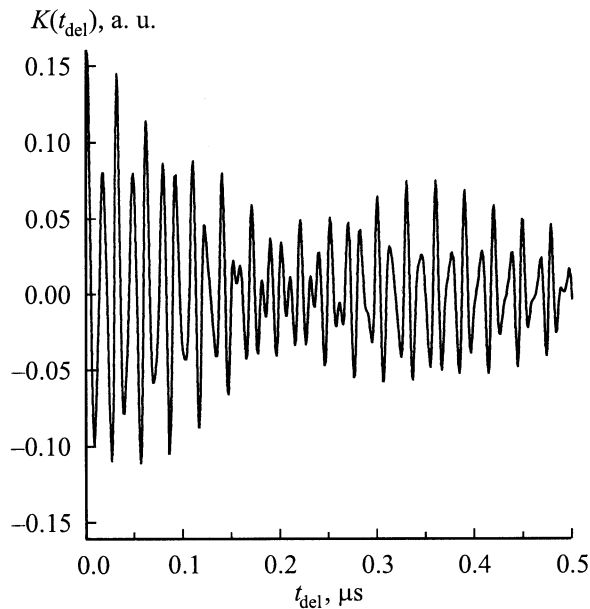


Рис. 7. Автокорреляционная функция, соответствующая осциллограмме сигнала при токе 120 А.

Экспериментальные результаты характеризовались хорошей степенью повторяемости от импульса, за исключением участка заднего фронта импульса напряжения. Отсутствие симметрии СВЧ импульса на переднем и заднем фронте можно объяснить СВЧ пробоем, вызванным бомбардировкой электродинамической системы накопленными в пучке положительными ионами. С ростом ускоряющего напряжения свыше 150 кВ наблюдалось заметное укорочение длительности СВЧ импульса. В этой связи нельзя исключить, что при токах инжекции выше 100 А мощность излучения в атомодюляционных режимах генерации ограничивалась СВЧ пробоем. Измеренная калориметрическим методом при токе инжекции 50 А и напряжении 150 кВ мощность излучения в атомодюляционном режиме генерации составляла 1 МВт, т.е. электронный КПД достигал 10%. При токе 120 А средняя мощность хаотического излучения была порядка 2 МВт.

Авторы признательны М.И. Петелену, Э.Б. Абубакирову, Н.Ф. Ковалеву, М.И. Яландину за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-02-16412а).

Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В. и др. // Письма ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 20. С. 66–71.
- [2] Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В. и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Вып. 5. С. 60–69.
- [3] Яландин М.И., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Ульмаскулов М.Р. // Письма ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 10. С. 19–22.

- [4] Рыскин Н.М., Титов В.Н. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т. 6. Вып. 1. С. 75–92.
- [5] Пегель И.В. // Изв. вузов. Физика. 1996. Т. 39. Вып. 12. С. 62–83.
- [6] Levush B., Antonsen Th.M., Bromborsky A. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1992. Vol. 20. N 3. P. 263–280.
- [7] Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. Вып. 7. С. 1037–1052.
- [8] Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П. // Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. Горький: ИПФ АФ СССР, 1981. С. 101–144.
- [9] Безручко Б.П., Булгакова Л.Б., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 5-я зимняя школа-семинар инженеров. Саратов: СГУ, 1980. Т. 5. С. 25–77.
- [10] Безручко В.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. // Нелинейные волны. Стохастичность и турбулентность. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 29–36.
- [11] Безручко В.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. // Письма ЖЭТФ. 1979. Т. 29. Вып. 3. С. 180–184.
- [12] Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кораблев Г.С. и др. // ПТЭ. 1995. Вып. 3. С. 138–145.
- [13] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. // Письма ЖЭТФ. 1973. Т. 18. Вып. 4. С. 232–235.
- [14] Lyakov E.V., Korablyov G.S., Kulagin I.S. и др. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. N 3. P. 332–335.
- [15] Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41. Вып. 12. С. 1565–1571.
- [16] Ковалев Н.Ф. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1978. Вып. 3. С. 102–106.
- [17] Винтцель Е.С. // Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.
- [18] Гинзбург Н.С., Завольский Н.А., Запезалов В.Е. и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 4. С. 99–105.
- [19] Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Ковнеристый Ю.К. и др. // ПТЭ. 1992. Вып. 2. С. 153–154.