



**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
АВТОМОДУЛЯЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ
3-САНТИМЕТРОВОЙ ЛОВ
С МЕГАВАТТНЫМ УРОВНЕМ МОЩНОСТИ***

*Н.С. Гинзбург, Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков,
И.С. Кулагин, Ю.В. Новожилова, А.С. Сергеев*

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований автомодуляционных режимов генерации в ЛОВ мегаваттного уровня мощности с электродинамической системой в виде слабоффрированного волновода. Бифуркационные значения токов, при которых имело место самовозбуждение колебаний, переход к режиму синусоидальной, а затем и глубокой автомодуляции в виде последовательности пиков, находились в хорошем соответствии с результатами моделирования. Упрощение режима генерации при дальнейшем повышении тока на основании результатов моделирования объясняется влиянием высокочастотного пространственного заряда.

Введение

Многочастотная динамика генераторов обратной волны была впервые исследована теоретически в работах [1,2], где было показано, что по мере превышения тока над стартовым значением режим стационарной одночастотной генерации сменяется режимом периодической автомодуляции, которая вначале носит синусоидальный характер, а затем приобретает вид последовательности пиков. При дальнейшем увеличении тока форма сигнала усложняется, теряет периодичность, и режим генерации становится стохастическим. Для специально разработанных макетов нерелятивистских ЛОВ с уровнем мощности десятки милливатт результаты экспериментальных наблюдений указанной последовательности бифуркаций приведены в [3,4].

Очевидно, эффекты автомодуляции могут представлять непосредственный практический интерес в связи с возможностью генерации периодически модулированных или шумоподобных сигналов. Это обстоятельство обуславливает важность ведущихся в настоящее время исследований нестационарных процессов в ЛОВ [5,6]. Экспериментальные исследования эффектов автомодуляции в ЛОВ мегаваттного уровня мощности были начаты в ИПФ РАН на основе микросекундного ускорителя «Сатурн» [7].

* Статья написана по материалам доклада на XI Международной школе по электронике СВЧ и радиофизике. Саратов, 2–6 марта 1999 года

В работе [5] были проведены первые экспериментальные наблюдения автомодуляционных режимов генерации в мощной ЛОВ, действовавшей по традиционной для диапазона релятивистских энергий электронов схеме [8]: электродинамическая система в виде слабогфрированного волновода с закритическим сужением на катодном конце и выводом излучения в сторону коллектора электронов. Для наблюдения автомодуляционных режимов генерации длина рабочего пространства была увеличена примерно в полтора раза по сравнению с прототипом, в котором был реализован стационарный режим генерации. Чтобы избежать проблем, обусловленных конкуренцией мод, поперечные размеры гофрированного волновода были выбраны так, чтобы электронный пучок мог взаимодействовать лишь с низшей модой H_{11} . Рабочая точка оказалась при этом в зоне малых групповых скоростей рабочей моды, что, с одной стороны, обеспечивало повышенный импеданс связи и облегчало получение автомодуляционных режимов, а с другой – затрудняло вывод энергии СВЧ-излучения из рабочего пространства и повышало риск возникновения отражений волны от выходного конца рабочего пространства. В итоге эти особенности расположения рабочей точки привели к повышенному уровню СВЧ-полей, поэтому выходная мощность ЛОВ оказалась ограниченной СВЧ-пробоями на уровне примерно 50–100 кВт при длительности импульса 10 мкс [5].

В настоящей статье представлен очередной этап этой работы, целью которого было получение автомодуляционных режимов при мегаваттном уровне средней выходной мощности. В новом варианте ЛОВ превышение рабочего тока над стартовым, достаточное для получения автомодуляционных режимов, обеспечивалось выбором сильно связанной с электронным пучком моды E_{01} , а выходная мощность при отсутствии пробоев – высокой групповой скоростью рабочей моды, облегчавшей вывод генерируемого излучения из рабочего пространства. Результаты анализа конкуренции мод, различающихся поперечным индексом, в ЛОВ, приведенные в работе [9], показали возможность реализации автомодуляционного режима генерации на одной из мод при нелинейном подавлении генерации другой моды и, следовательно, обеспечили определенную свободу в выборе рабочей точки на дисперсионной диаграмме.

В разделе 1 настоящей работы моделирование автомодуляционных режимов проведено на основе подхода, описывающего эволюцию медленно меняющейся (в масштабе несущей частоты) амплитуды поля [1,2]. В разделе 2 приводятся результаты экспериментального наблюдения автомодуляционных режимов в ЛОВ на моде E_{01} . Показано, что эти результаты достаточно хорошо соответствуют результатам моделирования.

1. Численное моделирование нестационарных процессов в ЛОВ

Рассмотрим модель ЛОВ с отрезком осесимметричного слабогфрированного волновода в качестве электродинамической системы, возбуждаемую тонким трубчатым электронным пучком. Предварительное моделирование многочастотных процессов в ЛОВ-генераторе можно провести на основе самосогласованной системы уравнений, состоящей из уравнения, описывающего эволюцию амплитуды поля [1,2]

$$\partial A / \partial \tau - \partial A / \partial \zeta = -J / \pi \int_0^{2\pi} \exp(-i\vartheta) d\vartheta_0, \quad (1)$$

и релятивистских уравнений движения электронов с учетом собственного поля пространственного заряда пучка

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

$$\partial \gamma / \partial \zeta = \operatorname{Re} [A(\zeta, \tau) \exp(i\vartheta) + i\sigma \sum_n f_n \rho_n \exp(in\vartheta)]. \quad (3)$$

Здесь $A=eE_z/(mc\omega)$ – безразмерная амплитуда синхронной (-1)-й гармоники поля излучения; $\tau=\omega(t-z/v_0)/(1/\beta_0+1/\beta_{гр})$ и $\zeta=\omega z/c$ – безразмерные время и продольная координата; $\vartheta=\omega t-lz$ – фаза электрона относительно синхронной гармоники поля; $J=eI/Zl(2\beta_0^2mc^2)$, Z – сопротивление связи для этой гармоники [10], I – ток пучка; γ – релятивистский масс-фактор электронов; ω – частота точного синхронизма; $v_0=\beta_0c$ – начальная поступательная скорость электронов; $v_{гр}=\beta_{гр}c$ – групповая скорость волны; $\sigma=Iel/(mc^3)gc^2/(\omega^2b)$ – параметр пространственного заряда;

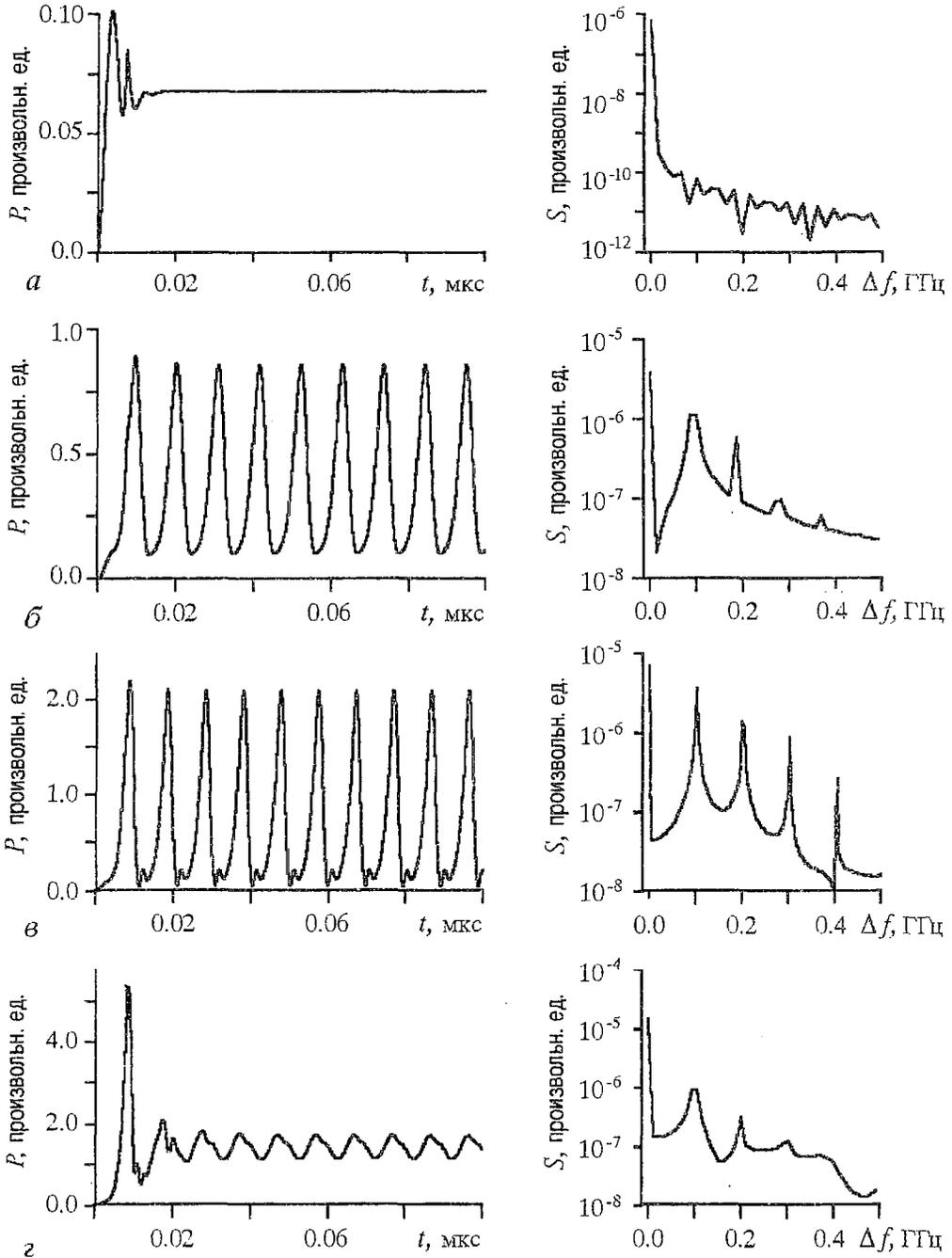


Рис. 1. Результаты моделирования нестационарных процессов в ЛОВ с длиной 41.5 см, импедансом связи 0.9 Ом и энергией частиц $\gamma_0=1.3$. Зависимость от времени мощности излучения и спектры квадрата амплитуды выходного сигнала в произвольных единицах при различных токах I : а – 7 А, б – 18 А, в – 27 А, г – 50 А

$f_n = 1 - \exp[-2gn(a-b)]$ – коэффициент редукции n -й гармоники поля пространствен-

ного заряда; $g = [(\omega/v_0)^2 - (\omega/c)^2]^{1/2}$ – поперечное волновое число; $\rho_n = 1/\pi \int_0^{2\pi} \exp(-in\vartheta) d\vartheta$ – n -я гармоника плотности пространственного заряда; a – средний радиус волновода; b – радиус электронного пучка. Коэффициент редукции f_n найден для приближенной модели, в которой не учитываем гофрировку стенки волновода, а также при выполнении условия $a-b \ll a$ пренебрегаем кривизной стенки волновода и электронного пучка. Граничные и начальные условия к уравнениям (1)–(3) имеют вид

$$A|_{\zeta=l} = 0, \quad A|_{\tau=0} = A_0(\zeta), \quad \vartheta|_{\zeta=0} = \vartheta_0 \in (0, 2\pi), \quad \gamma|_{\zeta=0} = \gamma_0, \quad (4)$$

где l – безразмерная длина пространства взаимодействия.

Численное моделирование уравнений (1)–(3) проводилось при различных значениях тока пучка для лампы с параметрами, близкими к реализуемым в эксперименте. Длина пространства взаимодействия составляла 41.5 см, средний радиус волновода примерно 1.4 см, период гофрировки 1.7 см, радиус электронного пучка 0.9 см, энергия электронов 150 кэВ. Сопротивление связи и стартовый ток были рассчитаны для заданной геометрии электродинамической системы на основе результатов работы [10]. На рабочей частоте 8.7 ГГц для моды E_{01} стартовый ток составил 6 А при сопротивлении связи 0.9 Ом. При моделировании учитывались первые четыре гармоники поля пространственного заряда. Учет следующих гармоник давал незначительные поправки к численному моделированию.

На рис. 1 приведены временные зависимости выходной мощности излучения, а также спектры квадрата амплитуды выходного сигнала для различных значений тока пучка. На рис. 1, а показан пример установления стационарного режима генерации при величине тока $I=7$ А. По мере увеличения тока реализуются автомодуляционные режимы генерации с усложняющимся характером модуляции и спектром. Так, при токе 18 А автомодуляция близка к синусоидальной (рис. 1, б), а при токе 27 А приобретает вид периодической последовательности пиков (рис. 1, в). Важно подчеркнуть, что при дальнейшем повышении тока и заданном сопротивлении связи возникает подавление автомодуляции, обусловленное влиянием пространственного заряда (ср. с [2,11]). Как видно из сравнения рис. 1, в, г, при токе $I=50$ А автомодуляция носит менее выраженный характер, чем при токе $I=27$ А.

При групповой скорости волны 0.25 с и поступательной скорости электронов 0.62 с период автомодуляции составляет около 10 нс. Ширина спектра в режиме сложной автомодуляции при токе $I=27$ А достигает 5 %.

На основе системы уравнений (1)–(3) было выполнено также численное моделирование нестационарных процессов для лампы, которая при тех же параметрах замедляющей системы имела длину 61 см, что в полтора раза превышало длину экспериментально реализованного макета. Как видно из рис. 2,

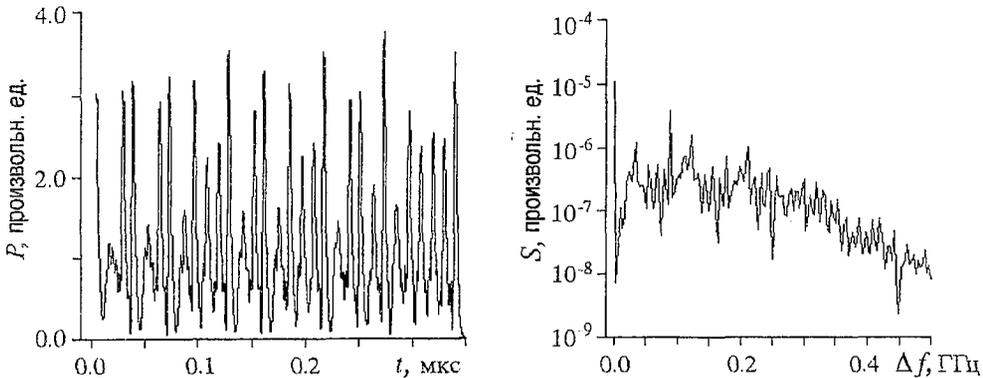


Рис. 2. Зависимость от времени мощности излучения и спектр квадрата амплитуды выходного сигнала при увеличении длины ЛОВ до 62 см. Ток инжекции $I=40$ А. Значения P и S даны в произвольных единицах

увеличение длины позволяет достичь режима стохастической автомодуляции при токе 40 А. При этом влияние пространственного заряда оказывается менее существенным, чем для более короткой лампы.

2. Экспериментальное исследование автомодуляционных режимов

В качестве источника электронного пучка использовался импульсный ускоритель «Сатурн» (рис. 3) на базе магнетронно-инжекторной пушки с

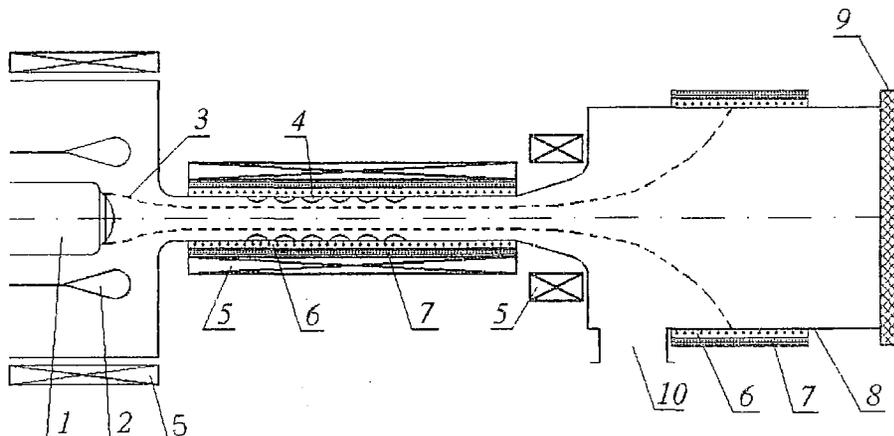


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – катод; 2 – промежуточный анод; 3 – трубчатый электронный пучок; 4 – электродинамическая система СВЧ-прибора; 5 – соленоиды; 6 – нагреватели; 7 – тепловые экраны с водяной рубашкой; 8 – коллектор; 9 – кварцевое вакуумное окно; 10 – патрубок вакуумной откачки

термокатодом, позволяющий формировать электронный пучок с длительностью импульса несколько микросекунд. В рабочем режиме ускоряющее напряжение достигало 150 кВ, ток инжекции варьировался в пределах $10 \div 70$ А. Термокатод работал в режиме ограничения тока пространственным зарядом, регулировка тока в необходимом диапазоне осуществлялась путем перераспределения потенциалов между элементами трехэлектродной электронной пушки. Это позволяло поддерживать малый разброс электронов по скоростям для всех значений токов.

Генерируемое излучение после прохождения вакуумного окна регистрировалось в безэховой камере. Приемный рупор располагался в максимуме диаграммы направленности моды E_{01} . Огибающая выходного сигнала регистрировалась с помощью кристаллического детектора с инерционностью не более 2 нс и цифровых осциллографов Hewlett Packard и Tektronix с периодом оцифровки не реже 1 нс, позволявших запоминать всю огибающую высокочастотного импульса для последующего просмотра отдельных его участков. Мощность выходного излучения измерялась как по калиброванному затуханию тракта, так и (для более точных измерений) по энергии в СВЧ-импульсе, измеряемой с точностью до $\pm 10\%$ специальным калориметром [12]. Для повышения электропрочности (см. [12]) температура электродинамической системы с помощью подогревателя постоянно поддерживалась на уровне 500°C .

Электродинамическая система представляла собой слабофривированный осесимметричный волновод с параметрами, приведенными в разделе 1. Как следует из анализа дисперсионных характеристик, при рабочем напряжении 150 кВ в принципе могло реализоваться синхронное взаимодействие с тремя низшими волноводными модами: H_{11} , E_{01} и H_{21} (рис. 4). На модах 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 [10], составили соответственно 6 А и 27 А. Для

моды H_{21} стартовый ток, вычисленный в рамках теории оротрона с нефиксированной продольной структурой поля [14], составил 13 А. Таким образом, мода E_{01} обладала более высоким сопротивлением связи и соответственно меньшим стартовым током по сравнению с другими модами. В настоящем эксперименте было зафиксировано только возбуждение рабочей моды E_{01} с центральной частотой 8.7 ГГц. Хотя для других мод в интервале рабочих токов 10÷50 А условия самовозбуждения выполнялись, по всей видимости, имело место нелинейное подавление этих мод. Это согласуется с результатами работы [9], где показано, что при достаточно сильно различающихся сопротивлениях связи нелинейная конкуренция мод приводит к установлению одномодового автомодуляционного режима, даже если пороги превышены настолько, что для каждой из мод в отдельности могли бы реализоваться автомодуляционные режимы генерации.

На рис. 5 приведены осциллограммы мощности излучения на рабочей моде, а также спектры квадрата амплитуды сигнала при различных токах инжекции и фиксированной величине напряжения на вершине импульса примерно в 150 кВ. В целом осциллограмма выходной мощности имеет достаточно сложную форму. Этот факт может быть объяснен переходами между различными динамическими режимами при изменении напряжения и, соответственно, импеданса связи, а также наличием паразитных отражений на коллекторном конце, которые, как известно, приводят к сильной зависимости выходной мощности от частоты, меняющейся с изменением напряжения [15]. Следует отметить, что при детектировании теряется информация об изменении несущей частоты с изменением напряжения, поэтому для вычисления спектра выбирался участок, где напряжение и несущая частота остаются примерно постоянными.

Как видно из приведенных осциллограмм, по мере роста тока имеет место переход от стационарного режима генерации к автомодуляционным режимам генерации. Автомодуляция при токе 18 А имеет форму, близкую к синусоидальной, а затем при токах, превышающих 25 А, усложняется и приобретает вид последовательности пиков. Величина основного периода автомодуляции (10÷11 нс), как и бифуркационные значения токов, хорошо соответствует результатам моделирования. При дальнейшем росте тока свыше 50 А происходило подавление автомодуляции. В результате автомодуляция вновь приобретала квазигармонический характер, а затем режим генерации становился близок к стационарному (см. рис. 5). В соответствии с результатами моделирования, такое поведение системы при больших токах можно объяснить влиянием поля пространственного заряда. В целом, как видно из сопоставления рис. 1 и рис. 5, экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

Экспериментальные результаты характеризовались хорошей степенью повторяемости от импульса к импульсу, если не принимать во внимание участок заднего фронта импульса напряжения. Отсутствие симметрии СВЧ-импульса на переднем и заднем фронтах можно объяснить СВЧ-пробоем, вызванным бомбардировкой электродинамической системы накопленными в пучке положительными ионами. С ростом ускоряющего напряжения СВЧ-импульс еще более укорачивается, поэтому нельзя исключить, что мощность излучения в автомодуляционном режиме ограничивалась СВЧ-пробоем. Измеренная калориметрическим методом при токе инжекции 30 А и напряжении 150 кВ

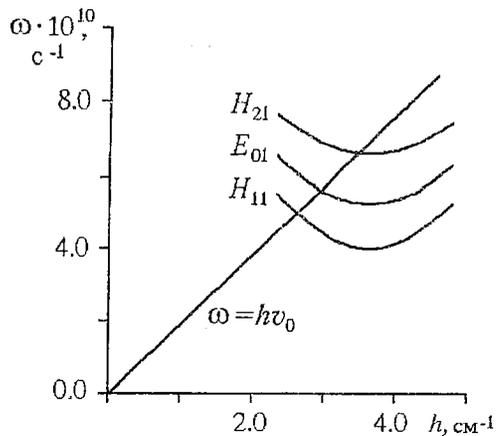


Рис. 4. Дисперсионная диаграмма ЛОВ с параметрами замедляющей системы, близкими к экспериментальным

мощность излучения в автомодуляционном режиме генерации составляла порядка 0.5 мВт, то есть электронный КПД достигал 10%.

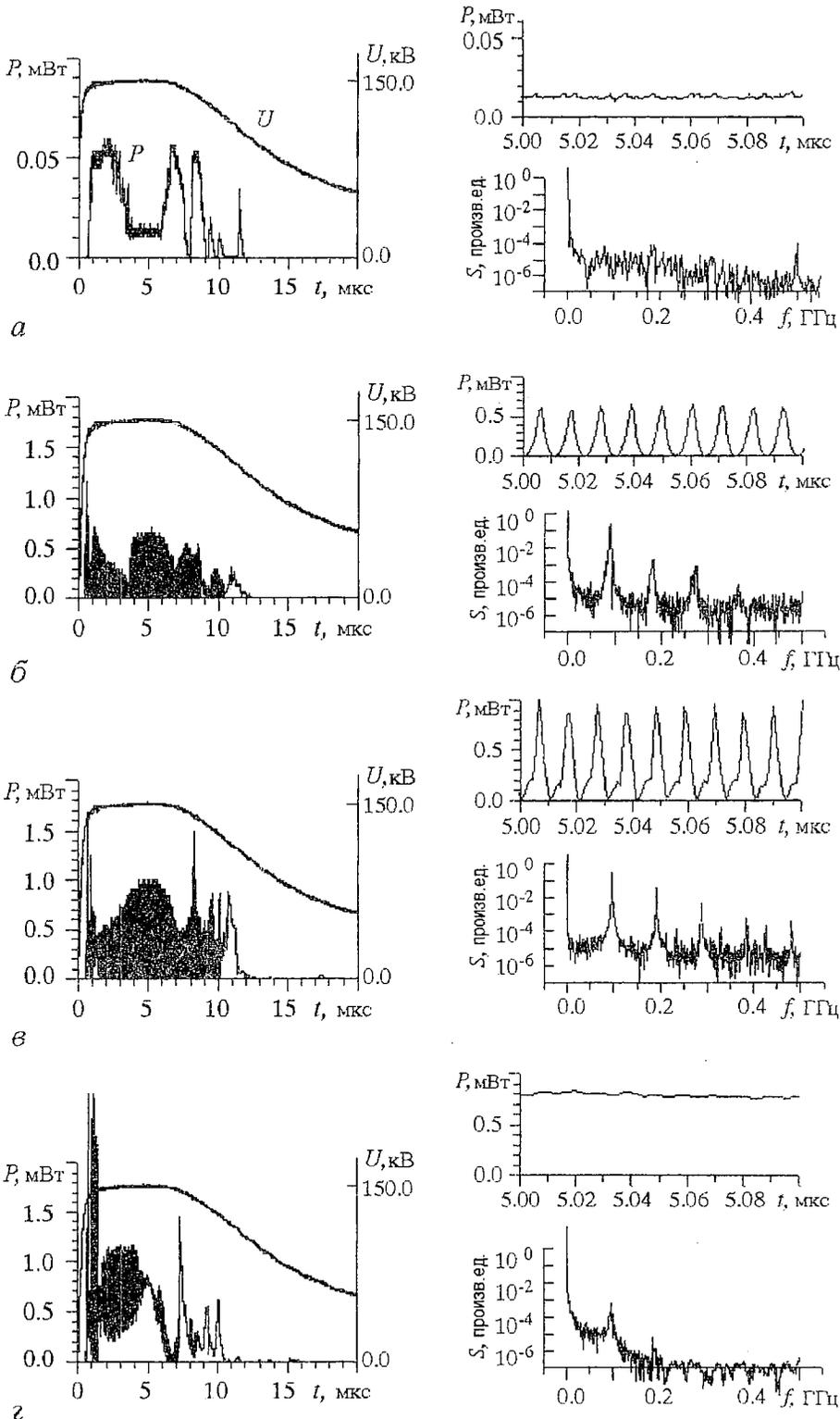


Рис. 5. Результаты эксперимента. Осциллограммы выходной мощности и спектры излучения при различных значениях тока инжекции I : *a* – 6 А, *б* – 18 А, *в* – 27 А, *г* – 53 А.

Заключение

Таким образом, в проведенных экспериментах наблюдались автомодуляционные режимы генерации в ЛОВ с мегаваттным уровнем мощности. По мере возрастания тока пучка от 10 А до 30 А имел место переход от стационарного режима к режиму глубокой периодической автомодуляции с периодом 10 нс, что соответствует результатам моделирования. В хорошем согласии с результатами расчетов находилось значение периода автомодуляции 10 нс. Согласно экспериментальным данным и результатам моделирования, при фиксированной величине импеданса связи увеличение тока инжекции свыше 30 А вновь приводило к упрощению режима генерации, что можно объяснить влиянием пространственного заряда.

На выбранных участках временной реализации, где напряжение почти не менялось, автомодуляция в основном носила периодический характер, хотя в ряде случаев наблюдалась небольшая непериодическая вариация формы автомодуляционных пучков. Однако, как правило, такая вариация была скоррелирована с некоторой вариацией во времени ускоряющего напряжения. Следующим этапом работы должно стать наблюдение стохастических режимов автомодуляции. С этой целью планируется разработка нового макета лампы с увеличенной в полтора раза длиной пространства взаимодействия. Кроме того, использование специальных технологий, повышающих электропрочность электродинамической системы, должно способствовать увеличению рабочих напряженностей полей. Это, в свою очередь, позволит повысить рабочие напряжения, токи и, следовательно, выходную мощность. Заметим, что импеданс связи также растет с ростом напряжения. Все эти факторы должны привести к увеличению превышения над порогом в 10–12 раз при одновременном снижении степени влияния пространственного заряда. Результаты моделирования подтверждают такую возможность (см. рис.2).

Авторы признательны М.И.Петелину за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 97-02-1761.

Библиографический список

1. Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т.21, № 7. С. 1037.
2. Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П. Периодические и стохастические автомодуляционные режимы в электронных генераторах с распределенным взаимодействием // Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 101.
3. Безручко Б.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. // Нелинейные волны: Стохастичность и турбулентность. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 29.
4. Безручко Б.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. Экспериментальное наблюдение стохастических колебаний в динамической системе электронный пучок – обратная электромагнитная волна // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т.29, № 3. С. 180.
5. Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Новожилова Ю.В., Сергеев А.С., Ткаченко А.К. Наблюдение автомодуляционных режимов генерации в мощной ЛОВ // Письма ЖТФ. 1998. Т.24, № 20. С.66.
6. Рыскин Н.М., Титов В.Н. О сценарии перехода к хаосу в однопараметрической модели лампы обратной волны // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т.6, № 1. С.75.
7. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кораблев Г.С., Кулагин И.С., Лыгин В.К., Мовшевский Б.З., Далолихин В.И., Шмелев М.Ю. Сильноточный микросекундный электронный ускоритель с термодатодом для мощных с.-в.-ч.-приборов // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 3. С. 138.

8. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д., Сморгонский А.В., Цопп Л.Э. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т.18, вып. 4. С.232.

9. Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Новожилова Ю.В., Розенталь Р.М., Сергеев А.С. Нелинейная динамика лампы обратной волны в условиях конкуренции двух мод // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т.41, № 12. С.1565.

10. Ковалев Н.Ф. Электродинамическая система ультрарелятивистской ЛОВ. // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1978. № 3. С.102.

11. Безручко Б.П., Булгакова Л.Б., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. Экспериментальное и теоретическое исследование стохастических колебаний в лампе обратной волны // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 5-я зимняя школа-семинар инженеров. Т.5. Саратов: СГУ, 1980. С.25.

12. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Ковнеристый Ю.К., Кораблев Г.С., Кулагин И.С., Лазарева И.Ю., Цалолыхин В.И., Шульгин В.В. Калориметр для измерения энергии мощного электромагнитного импульса // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 2. С. 153.

13. Ilyakov E.V., Korablyov G.S., Kulagin I.S., Zaitsev N.I. Relativistic carsinotron with a thermionic injector of electrons // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26, № 3. P. 332.

14. Гинзбург Н.С., Завольский Н.А., Запвалов В.Е., Мусеев М.А., Новожилова Ю.В. Нестационарные процессы в оротроне с дифракционным выводом излучения // ЖТФ. 1999 (в печати).

15. Levush B., Antonsen Th.M., Bromborsky A., Lou Wei-Ran, Carmel Yu. Theory of relativistic backward-wave oscillators with end reflections // IEEE Trans. Plasma Sci. 1992. V. 20, № 3. P. 263.

Институт прикладной физики РАН
Нижний Новгород

Поступила в редакцию 25.06.99
после переработки 15.09.99

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF SELF-MODULATION REGIMES IN THE MEGAWATT POWER X BAND BWO

N.S. Ginzburg, N.I. Zaitsev, E.V. Ilyakov,
I.S. Kulagin, Yu.V. Novozhilova, A.S. Sergeev

The results of theoretical and experimental investigations of self-modulation regimes in megawatt power level BWO with the slightly corrugated waveguide as microwave system are presented. Bifurcation currents corresponding to the oscillations self-excitation, to the transition to the self-modulation regimes with sinusoidal and spikes modulation of amplitude are in the good agreement with the simulation results. The simplification of generation regimes with the further to simulation can be explained by influence of electron space charge.



Гинзбург Наум Самуилович – родился в 1952 году. Работает в Институте прикладной физики РАН ведущим научным сотрудником, доктор физико-математических наук. Область интересов – лазеры на свободных электронах, мазеры на циклотронном резонансе, релятивистские гиротроны, многочастотные процессы в электронных СВЧ-приборах с распределенным взаимодействием, эффекты канализации и сверхизлучения, плазменные пучковые неустойчивости. Лауреат премии им. Ленинского комсомола (1980). Автор более 120 статей и обзоров по указанной проблематике.



Зайцев Николай Иванович – родился в 1944 году. Окончил Горьковский политехнический институт (1967) и занимался исследованиями гиротронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. С 1973 года как руководитель экспериментальной группы работает в области высокоточной релятивистской электроники. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в Институте прикладной физики АН СССР (1983). В настоящее время – старший научный сотрудник отдела релятивистской высокочастотной электроники и главный инженер отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН.



Иляков Евгений Викторович – родился в 1954 году в Горьком. Окончил Горьковский политехнический институт по специальности «Радиоэлектроника и кибернетика» (1981). В настоящее время – научный сотрудник Института прикладной физики (Нижний Новгород). Работает в области релятивистской СВЧ-электроники. Научные интересы связаны с исследованием процессов, определяющих длительность и мощность импульсов СВЧ-излучения в мощных микроволновых приборах. Результаты работы представлены более чем в 30 научных статьях и докладах на международных и внутренних конференциях.



Кулагин Игорь Станиславович – родился в 1954 году в Горьком. Окончил Горьковский государственный университет (1976). После окончания ГГУ работает в Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород). В 1994 году в ИПФ РАН защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по физической электронике. Научные интересы связаны с экспериментальными исследованиями физических процессов в мощных релятивистских электронных приборах микросекундного диапазона длительности импульса. Опубликовал 27 научных статей в журналах и сборниках.



Новожилова Юлия Владимировна – родилась в 1960 году. Окончила радиофизический факультет Горьковского государственного университета (1982). Работает в Институте прикладной физики РАН, кандидат физико-математических наук. Область научных интересов – релятивистская высокочастотная электроника, нелинейная динамика СВЧ-приборов. Опубликовано более 20 работ в отечественных и зарубежных журналах.

E-mail: river@appl.sci-nnov.ru



Сергеев Александр Сергеевич – родился в 1957 году в Горьком. Окончил механико-математический факультет Горьковского государственного университета (1980). Работает в Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород), кандидат физико-математических наук. Область научных интересов – математическое моделирование нелинейных нестационарных процессов электронно-волнового взаимодействия. Опубликовал более 80 статей в отечественных и зарубежных журналах.