

09

Наблюдение автомодуляционных режимов генерации в мощной ЛОВ

© Н.С. Гинзбург, Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин,
Ю.В. Новожилова, А.С. Сергеев, А.К. Ткаченко

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Поступило в Редакцию 9 апреля 1998 г.

В специально сконструированной лампе обратной волны (ЛОВ) диапазона сантиметровых волн с уровнем мощности 100 kW при увеличении тока электронного пучка наблюдалось усложнение формы автомодуляции излучения: модуляция вначале была синусоидальной, затем приобретала вид периодической последовательности пиков и, наконец, теряла периодичность.

Многочастотная динамика генераторов обратной волны была впервые исследована теоретически в работах [1,2]. 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 в конечном итоге генерация становится стохастической. Для макетов ЛОВ с уровнем мощности в десятки милливатт описанная выше последовательность бифуркаций экспериментально наблюдалась в [3].

Целью настоящей работы явилось теоретическое и экспериментальное исследование возможности реализации автомодуляционных режимов генерации в ЛОВ с уровнем мощности до 100 kW. В качестве электродинамической системы был использован плавногфрированный осесимметричный волновод с закритическим сужением на катодном конце и дифракционным выводом излучения с коллекторного конца. Как известно, такие системы обладают повышенной электропрочностью, просты конструктивно и широко применяются в релятивистских ЛОВ [4].

В данном эксперименте ЛОВ была изготовлена на частоту 8 GHz. В качестве рабочей была выбрана низшая мода TE₁₁, что позволяло

избежать синхронного взаимодействия электронного потока с другими модами и связанных с этим проблем селекции мод по поперечному индексу. Волновод со средним радиусом 1.2 см, периодом гофрировки 1.7 см, глубиной гофры 0.25 см имел плавное согласование с выходным трактом на коллекторном конце. Были изготовлены две структуры, различавшиеся длиной пространства взаимодействия: 29 и 44 см. Трубочатый электронный пучок формировался в магнетронно-инжекторной пушке. Малый скоростной разброс обеспечивался сильным магнитным полем, составлявшим в пространстве взаимодействия 2.5 Т. Ускоряющее напряжение составляло около 70 кВ, ток пучка, эмитированный термокатодом, менялся в пределах от 3 до 35 А.

Предварительное моделирование стационарных процессов в ЛОВ-генераторе проводилось на основе самосогласованной системы уравнений, состоящей из уравнения, описывающего эволюцию амплитуды поля [1]:

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

и релятивистских уравнений движения электронов:

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

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \zeta} = \operatorname{Re}(A(\zeta, \tau) e^{i\vartheta}). \quad (3)$$

Здесь $A = eE_z(mc\omega)$ — безразмерная амплитуда синхронной (-1) -й гармоники поля, $\tau = \omega(t - z/v_0)/(1/\beta_0 + 1/\beta_{gr})$ и $\zeta = \omega z/c$ — безразмерные время и продольная координата, $\vartheta = \omega t - hz$ — фаза электрона относительно синхронной гармоники поля, $J = eI|Z|/(2\beta_0^2 mc^2)$, Z — сопротивление связи для этой гармоники [5], I — ток пучка, γ — релятивистский масс-фактор электронов, ω — частота точного синхронизма, $\beta_0 = v_0/c$, $\beta_{gr} = v_{gr}/c$, где v_0 — начальная поступательная скорость электронов, v_{gr} — групповая скорость волны. 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.

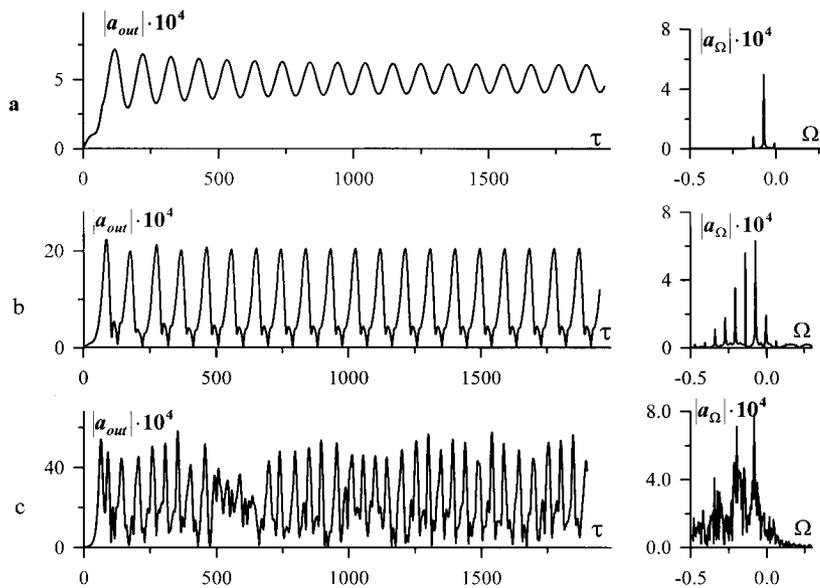


Рис. 1. Результаты моделирования временной зависимости амплитуды выходного излучения и его спектра при $l = 70$: a — $J = 1.15 \cdot 10^{-5}$, b — $J = 3.2 \cdot 10^{-5}$, c — $J = 1.2 \cdot 10^{-4}$.

Расчет сопротивления связи и стартовых токов был основан на использовании результатов работы [5]. Стартовый ток ЛОВ с длиной периодической структуры 29 см составлял около 3 А, для структуры длиной 44 см он понижался до 1 А. Заметим, что, поскольку ЛОВ работали в режиме, достаточно близком к частоте отсечки, расчетное значение стартового тока сильно зависело от напряжения пучка.

На рис. 1 представлены результаты численного моделирования временной зависимости амплитуды выходного сигнала, а также спектра сигнала при различных значениях тока для лампы длиной 44 см, которой соответствует нормированная длина $l = 70$. Периодическая автомодуляция возникает при относительном превышении тока над порогом порядка 3. Стохастический режим реализуется, когда указанное превышение достигает 10–15. Рис. 1, a иллюстрирует режим синусоидальной автомодуляции выходного сигнала, рис. 1, b соответствует более слож-

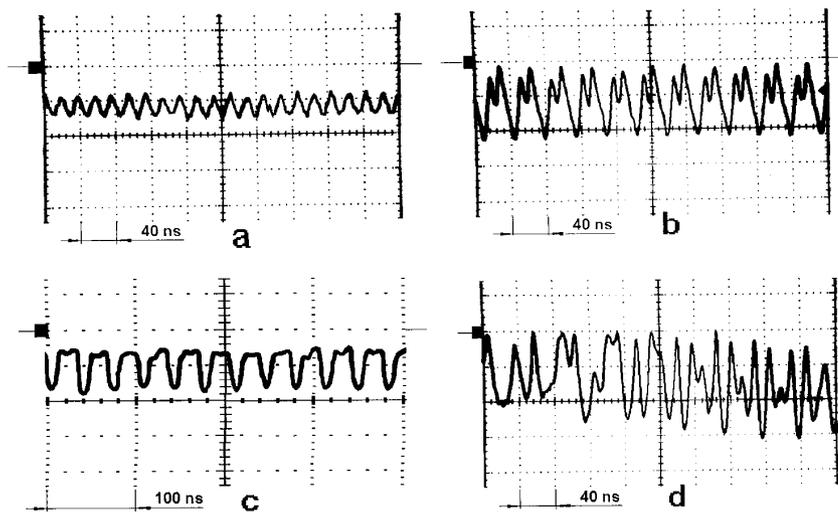


Рис. 2. Огибающая выходного излучения при различных значениях тока: $a - I = 3 \text{ A}$, $b - I = 21 \text{ A}$, $c - I = 28 \text{ A}$, $d - I = 35 \text{ A}$.

ной автомодуляции в виде периодической последовательности пиков. В безразмерных переменных период автомодуляции порядка 10^2 . При групповой скорости волны 0.2 s , поступательной скорости частиц 0.5 s период автомодуляции в размерных величинах равен 13 ns . Для оценок значение групповой скорости найдено по дисперсионной характеристике гладкого волновода и не учитывает типичного для гофрированных волноводов уменьшения групповой скорости, обусловленного деформацией дисперсионной кривой. В случае синусоидальной автомодуляции относительная ширина спектра излучения составляет 0.7% . На рис. 1, c представлен вариант стохастической автомодуляции, соответствующий превышению тока над стартовым в 30 раз. В этом варианте расчетная ширина спектра достигает 5% .

Излучение снималось с коллекторного конца пространства взаимодействия. Частота излучения измерялась с помощью перестраиваемого фильтра с полосой 60 MHz и находилась в хорошем соответствии с расчетной. Протектированный выходной сигнал регистрировался

с помощью цифрового осциллографа Tektronix 540A, позволяющего запоминать всю огибающую высокочастотного импульса общей длительностью до $10 \mu\text{s}$ для последующего просмотра отдельных его участков.

В лампе с длиной пространства взаимодействия 44 см синусоидальная автомодуляция имела место уже при токах в несколько ампер (рис. 2, *a*); по мере повышения тока модуляция становилась сложнопериодической (рис. 2, *b, c*), а при токах свыше 30 А она превращалась в стохастическую (рис. 2, *d*). Следует заметить, что в приведенной выше последовательности осциллограмм отсутствует режим стационарной генерации. Это объясняется тем, что уменьшение тока ниже 3 А было сопряжено со значительными техническими проблемами. Вместе с тем стационарные режимы генерации в диапазоне изменения тока от 3 до 20 А наблюдались в короткой лампе с длиной взаимодействия 29 см.

Сопоставляя осциллограммы огибающей высокочастотного импульса, полученные из результатов численного (рис. 1) и физического экспериментов (рис. 2), нетрудно видеть их качественное соответствие. Следовательно, можно предполагать и совпадение их спектральных характеристик. Отметим однако, что интерпретация экспериментальных данных основывалась на упрощенной теоретической модели, не учитывающей воздействие на электроны несинхронных компонент высокочастотного поля и полей пространственного заряда, наличие паразитных отражений на коллекторном конце лампы.

Следует также подчеркнуть, что в проведенных экспериментах напряжение и ток пучка выбирались из соображений ограничения мощности излучения на уровне около 100 kW, поскольку при более высоких мощностях наблюдалось укорочение длительности микроволновых импульсов. Укорочение импульсов вызывалось, вероятно, ВЧ пробоями внутри электродинамической системы, изготовленной из меди методом электрохимического наращивания. Очевидно, что существует возможность, значительного повышения допустимых полей на стенках электродинамической системы путем использования технологий, обычно применяющихся в промышленной электронике. Это позволит повысить ток инжекции, увеличить параметр надкритичности и соответственно среднюю мощность стохастического излучения.

Авторы признательны Э.Б. Абубакирову, L. Altgilbers'у, Н.Ф. Ковалеву и М.И. Петелину за полезные обсуждения.

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

Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. С. 1037.
- [2] Безручко В.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. // Нелинейные волны. Стохастичность и турбулентность. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 29.
- [3] Безручко В.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. С. 180.
- [4] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. С. 232.
- [5] Ковалев Н.Ф. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1978. В. 3. С. 102.