

Пиковые режимы генерации в усилителе со скрещенными полями W-диапазона

Д.А. Сидоров^{1,2}, Р.М. Розенталь^{2,3}, А.А. Цуканов¹

¹АО «НПП «Салют»

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского

³Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Аннотация: Выполнены исследования усилителя со скрещенными полями W-диапазона, работающего в режиме двухчастотного самовозбуждения. При подаче внешнего сигнала на частоте, равной среднему значению между генерируемыми частотами, получены режимы генерации последовательностей ультракоротких импульсов с длительностью порядка 20 пс, периодом следования около 100 пс и пиковой мгновенной мощностью более 1 кВт.

Ключевые слова: СВЧ усилитель со скрещенными полями, W-диапазон, генерация ультракоротких импульсов

1. Введение

Генерация ультракоротких импульсов большой мощности в миллиметровом диапазоне длин волн представляет интерес для ряда научных приложений. Например, подобные импульсы востребованы в методах нелинейной импульсной спектроскопии. В настоящее время активно исследуются способы генерации таких импульсов на основе эффекта синхронизации и самосинхронизации мод в вакуумных усилителях с прямолинейными и винтовыми электронными потоками. В частности, в Ka-диапазоне на основе гирорезонансной лампы бегущей волны с винтовым гофрированным волноводом экспериментально реализован генератор последовательностей коррелированных импульсов большой мощности [1]. Для получения режима синхронизации мод в данной системе вводилась цепь обратной связи, в которой устанавливался т.н. "насыщающийся поглотитель", представляющий из себя циклотронный поглотитель, обеспечивающий сильное поглощение излучения малой амплитуды, и хорошее пропускание излучения с большой амплитудой. Данная схема изначально была предложена в электронике СВЧ [2] и в дальнейшем нашла широкое применение в физике лазеров [3, 4]. Другим активно исследуемым подходом является использование эффекта самосинхронизации мод, который может быть реализован в ЛБВ черенковского типа с линейной цепью обратной связи [5]. В частности, теоретически исследован вариант такого генератора на основе экспериментально реализованной лампы бегущей волны W-диапазона [6,7] и показано, что в такой системе могут быть получены коррелированные последовательности ультракоротких импульсов [8]. Также следует отметить, что в экспериментальной работе [9] последовательности хорошо коррелированных импульсов были получены в K-диапазоне в гирорезонансной лампе бегущей волны со спиральным гофрированным волноводом в условиях наличия сильных отражений выходного излучения.

В данной работе рассматривается возможность генерации ультракоротких импульсов в W-диапазоне в усилителе магнетронного типа со скрещенными полями. Данный класс приборов характеризуется достаточно большой выходной мощностью, которая для импульсных приборов сантиметрового диапазона может достигать величин в десятки и сотни киловатт [10, 11]. Для генерации пиков предлагается схема, в которой усилитель работает в режиме самовозбуждения, при котором в выходном сигнале присутствует две спектральные компоненты с соразмерными амплитудами. В свою очередь, в систему подается внешний сигнал на частоте, близкой

к среднему значению данных частот. Как показывает моделирование, в выходном сигнале при этом могут возникать последовательности импульсов, средняя мощность излучения которых многократно превосходит средний уровень излучения.

2. Описание модели и результаты моделирования

В усилителях со скрещенными полями миллиметрового диапазона длин волн наиболее перспективными замедляющими системами являются многоступенчатые резонаторные системы [12]. Многоступенчатые системы позволяют обеспечить большее разделение видов колебаний, чем одноступенчатые. Помимо этого, многоступенчатые системы обладают большим сопротивлением связи на высших пространственных гармониках, что позволяет расширить возможности разработки усилительных приборов при необходимом уровне замедления. Так, в исследуемом приборе применяется 3-х ступенчатая резонаторная замедляющая система (рисунок 1), что позволяет обеспечить работу на $(+1)$ -й – пространственной гармонике при достаточно высоких значениях сопротивления связи. Резонаторная система представляет собой три прямоугольных выреза, два с одинаковой глубиной и один большей глубины. В такой резонаторной системе образуются три полосы пропускания, представленных на рисунке 2 (а).

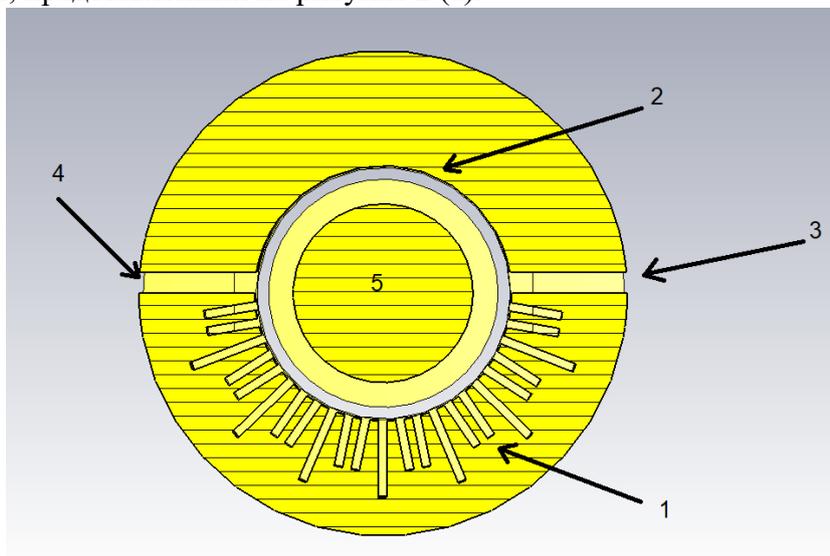


Рисунок 1. Общий вид модели исследуемого усилителя со скрещенными полями.
1 – 3-х ступенчатая резонаторная система, 2 – пространство дрейфа, 3 и 4 – ввод и вывод энергии, 5 – катод

Видно, что рабочая гармоника в диапазоне 90-100 ГГц обладает достаточной полосой пропускания, в сравнении с более высокочастотной гармоникой в диапазоне 110-115 ГГц и по сравнению с низкочастотной гармоникой в диапазоне 65-75 ГГц она обладает более высоким сопротивлением связи.

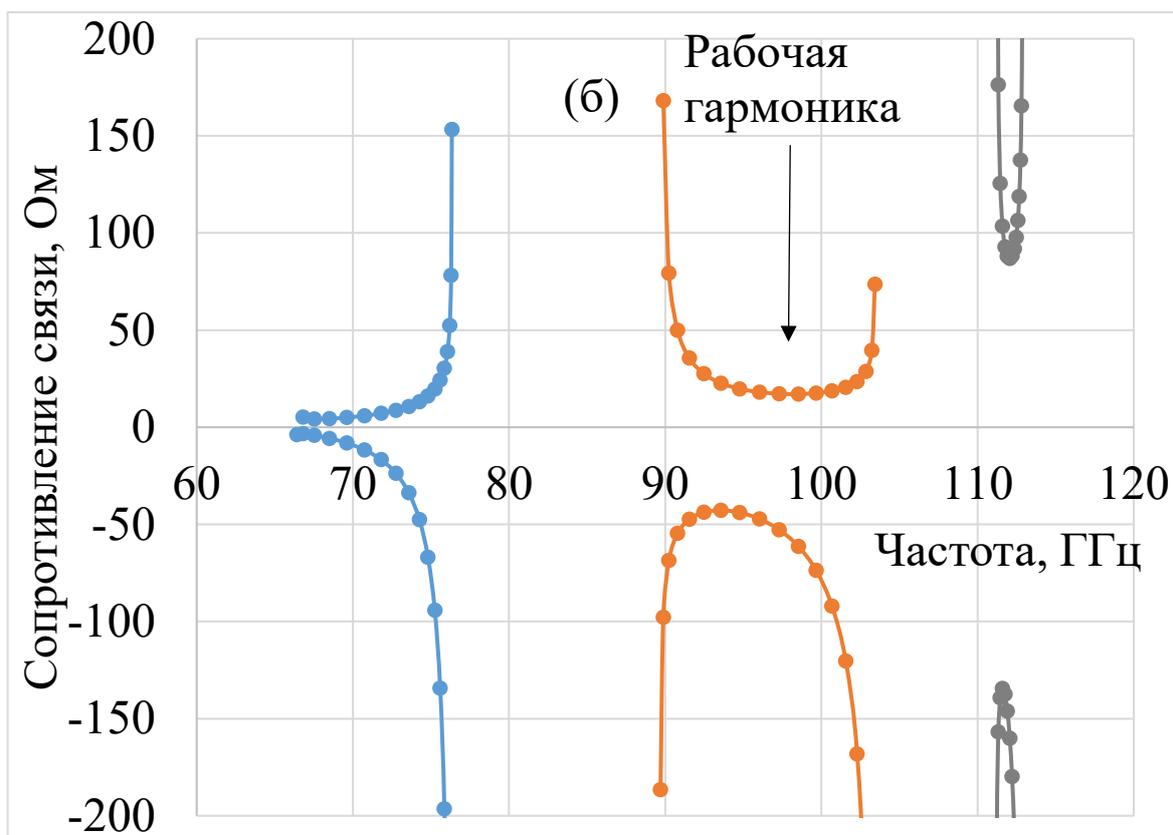
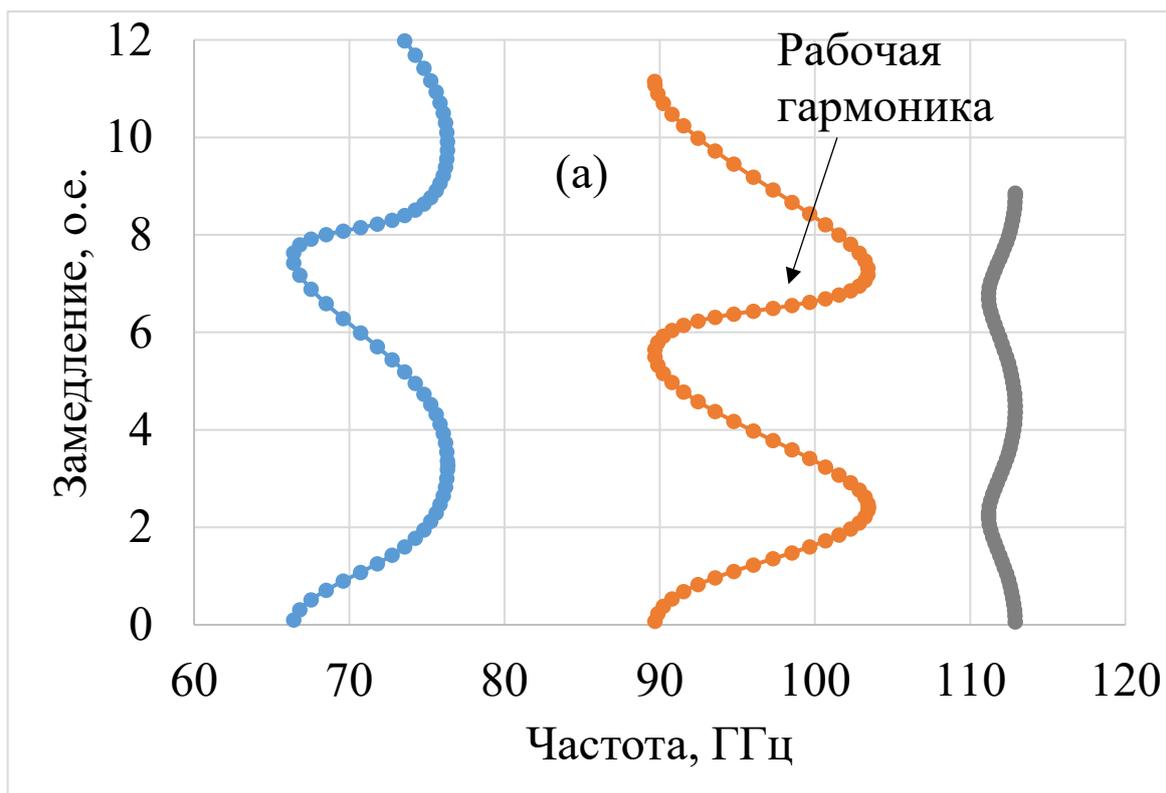


Рисунок 2. Расчетные значения зависимости замедления (а) и сопротивления связи (б) от частоты 3-х ступенчатой резонаторной системы

При отсутствии внешнего сигнала в системе возникает двухчастотный режим генерации со спектральными составляющими, расположенными на частотах 90 и

111.1 ГГц. Как видно из рис.2б данные частоты находятся на краях соответствующих полос пропускания, где значительно возрастает величина сопротивления связи. Одновременно для этих частот имеет место сильное отражение от входа и выхода системы, что дополнительно создает условия для их эффективного возбуждения.

Если же в данную систему ввести внешний сигнал с частотой, расположенной в центре между частотами собственных колебаний, то на выходе системы получается пиковый режим генерации, связанный с процессами взаимной синхронизации колебаний (Рис.3). Длительность пиков составляет порядка 20 пс при периоде следования около 100 пс. Мгновенная мощность колебаний при этом достигает значений около 1.4 кВт, что соответствует пиковому значению усредненной мощности равной 0.7 кВт. Полученные последовательности импульсов характеризуются достаточно высоким коэффициентом корреляции между импульсами, величина которого составляет около 0.96.

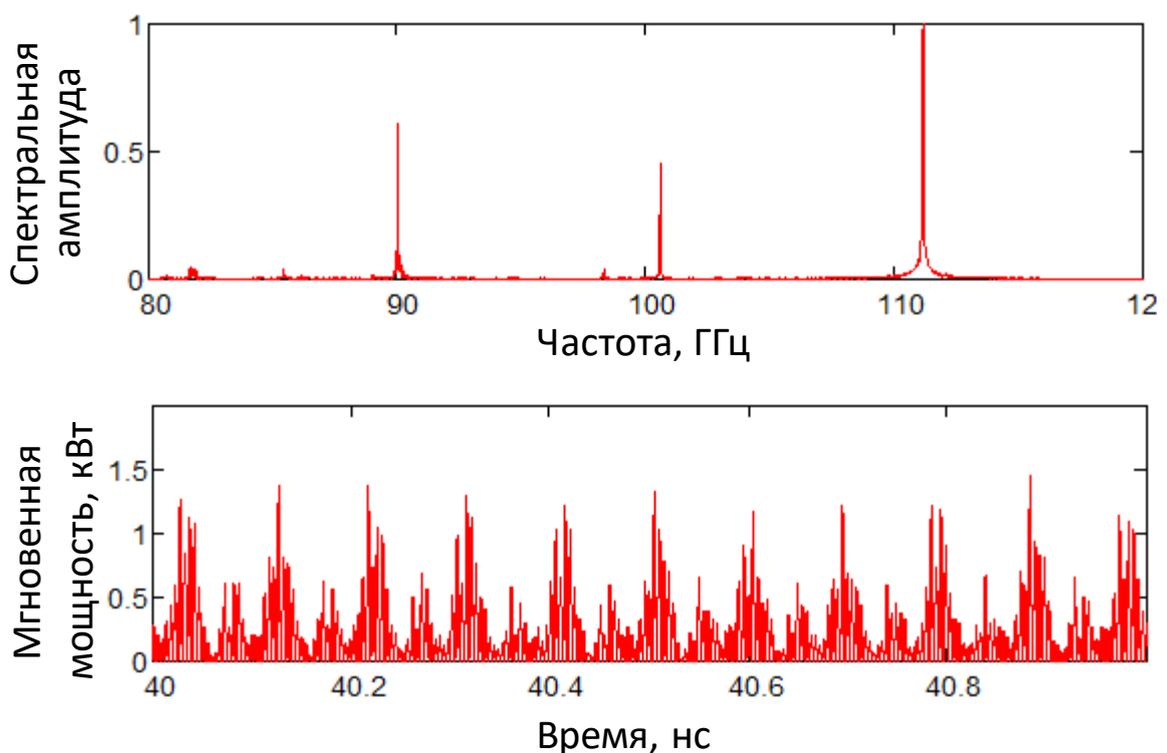


Рисунок 3. Спектр колебаний и зависимость мгновенной мощности от времени в пиковом режиме генерации.

Список литературы

1. Ginzburg N S., Samsonov S.V., Denisov G.G., Vilkov M.N., Zotova I.V., Bogdashov A.A., Gachev I.G., Sergeev A.S., Rozental R.M. Ka-Band 100-kW Subnanosecond Pulse Generator Mode-Locked by a Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber // *Phys. Rev. Appl.*, v.16, no.5, art.no.054045 (2021)
2. C. C. Cutler, "The Regenerative Pulse Generator," in *Proceedings of the IRE*, vol. 43, no. 2, pp. 140-148, Feb. 1955, doi: 10.1109/JRPROC.1955.278070.
3. H. A. Haus, "Mode-locking of lasers," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 6, pp. 1173-1185, Nov.-Dec. 2000, doi: 10.1109/2944.902165.
4. Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов // *Квантовая электроника*. 2001. Т. 31. № 2. С. 95–119.
5. Сидоров Д.А., Иванов А.А., Розенталь Р.М. Экспериментальное наблюдение режимов самосинхронизации мод в спиральной ЛБВО с запаздывающей обратной связью // *Электронная техника. Сер. I. СВЧ-техника*, №3, с.55-63 (2022)

6. Иванов А.А. Исследование возможности улучшения выходных характеристик ламп бегущей волны W-диапазона // Изв. ВУЗов. Радиофизика, т.59, №8-9, с.721-728 (2016)
7. Иванов А.А., Нагорнюк М.С., Смирнов А.Е., Вилков М.Н., Гинзбург Н.С., Розенталь Р.М. Возможности создания широкополосных хаотических генераторов на основе семейства импульсных ЛБВ W-диапазона // Изв. РАН. Сер. физическая, т.84, №2, с.238-242 (2020)
8. Rozental R.M., Ivanov A.A., Sidorov D.A., Vilkov M.N. Self-Mode-Locking Operation Regimes in a TWT With Low-Level Delayed Feedback // IEEE Trans. Electron Dev., v.70, no.11, p.5940-5945 (2023)
9. Rozental R.M., Samsonov S.V., Bogdashov A.A., Gachev I.G., Ivanov A.A., Kamenskiy M.V. Self-Mode-Locking Regime in a K-Band Gyro-TWT With External Reflections // IEEE Electron Dev. Lett., v.44, no.1, p.140-143 (2023)
10. Белов Л. Мощные усилители сверхвысоких частот // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. №6, 2006, с. 66-70.
11. Principles of Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Cross-Field Amplifiers, and Gyrotrons (Gilmour, 2011)
12. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. – Москва: Советское радио, 1966. 632 с.