

Исследование возникновения многочастотной генерации в усилителе М-типа с пространством дрейфа Ка-диапазона

Д.А. Сидоров^{1,2}, Д.В. Морозов¹, А.А. Цуканов¹, А.В. Суховерхий¹

¹АО «НПП «Салют»

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Аннотация: в данной работе исследовался усилитель М-типа обратной волны с пространством дрейфа Ка-диапазона с катодом в пространстве взаимодействия методами численного PIC 3D-моделирования. Основной ток с катода образован вторично-эмиссионными электронами. Представлены результаты расчетов, в которых при воздействии внешнего сигнала определенного уровня возникает генерация побочных частот в полосе около 7,5%, направленная от входа к выходу. Средний уровень выходной мощности относительно входной составил порядка 10 дБ.

Ключевые слова: усилитель М-типа, Ка-диапазон, миллиметровый диапазон, многочастотная генерация

1. Введение

Исследование процессов многочастотной генерации СВЧ диапазона представляет интерес в современном мире как для методов широкополосной спектроскопии, так и для систем передачи информации на основе шумоподобных сигналов и радиолокации [1, 2]. Практический интерес в этой области сводится к методам получения многочастотных генераций и возможности создания устройств генерации с высокими значениями выходной мощности и КПД.

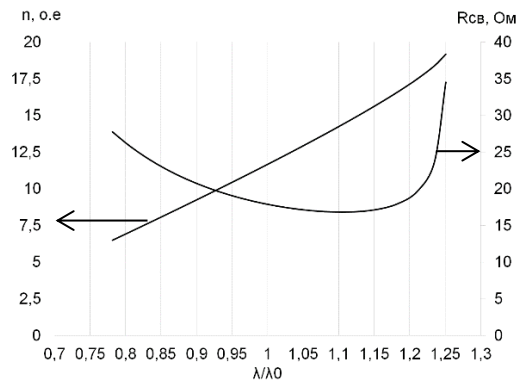
На данный момент больше всего теоретических и экспериментальных данных получено для приборов, в которых взаимодействие электромагнитной волны происходит с прямолинейным электронным пучком, таких как клистроны, лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы с обратной волной (ЛОВ). Распространение получил метод основанный на эффекте самосинхронизации мод. Так, например, экспериментально наблюдали этот эффект в спиральной ЛБВ 3-см диапазона длин волн с запаздывающей обратной связью. [3]

В сверхразмерной ЛОВ Ка-диапазона вблизи 30,2 ГГц с шириной 5-10МГц при стартовом токе 70-80 А и выходной мощностью 1,5-2 МВт в режиме генерации одной частоты с КПД 5-10%. [4]

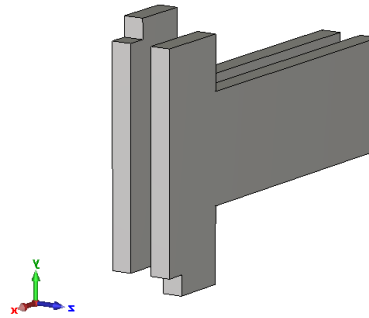
В данной работе рассматривается возможность работы усилителя М-типа обратной волны с пространством дрейфа в режиме усиления сигнала и режиме возбуждения побочных частот под действием внешнего сигнала. Данный класс приборов характеризуется достаточно большой выходной мощностью, которая для импульсных приборов сантиметрового диапазона может достигать величин в десятки и сотни киловатт.

2. Результаты PIC 3D-моделирования

Модель усилителя М-типа представляет собой цилиндрическую систему анода и катода с распределенной эмиссией в пространстве взаимодействия. СВЧ-сигнал в такой системе распространяется по замедляющей системе (рисунок 2 (б)), а ввод и вывод энергии разделены гладкой поверхностью анода – пространством дрейфа.



(a)



(б)

Рисунок 1. Дисперсионная характеристика 2-х ступенчатой замедляющей системы встречные штыри с дроссельными поддержками. (а) – дисперсионная характеристика, (б) – модель исследуемой замедляющей системы

В качестве замедляющей системы применяется двухступенчатая система встречные штыри с дроссельными поддержками (ВШПД), ее рабочей гармоникой является (-1)-пространственная гармоника, расчетная дисперсионная характеристика представлена на рисунке 1 (а). Данная замедляющая система обладает широкой полосой длин волн более 40% и высокими значениями сопротивления связи более 17 Ом в рабочей полосе.

Исследование рабочего режима проводилась методами PIC 3D-моделирования, в качестве источника электронов применяется материал с моделью вторичной эмиссии. Запуск эмиссии производится при помощи задания на поверхности материала катода площадки с единичной эмиссионной точкой.

При исследовании динамических характеристик наблюдалось усиление входного сигнала при рабочем напряжении порядка 5,5 кВ и магнитном поле в зазоре катод-анод 0,71 Тл. На рисунке 2 (а) представлена зависимость относительной амплитуды выходного сигнала от времени расчета в нс. Часть электронного облака, образованного в зазоре катод-анод, синхронизируется с фазовой скоростью входного СВЧ-сигнала и, постепенно отдавая свою энергию, прилетает на анод. Другая часть электронов, которая попадает в противофазу с СВЧ-сигналом, отражается обратно на катод и таким образом рождает новые электроны. Таким образом, происходит нарастание амплитуды входного сигнала и, как видно из рисунка, процесс усиления начинается примерно на 15 нс. Среднее значение тока на аноде в режиме усиления составляло приблизительно 2,2 А, КПД достигал значений порядка 8-10% и значение отраженного сигнала от выхода к входу составляло около 12 Вт.

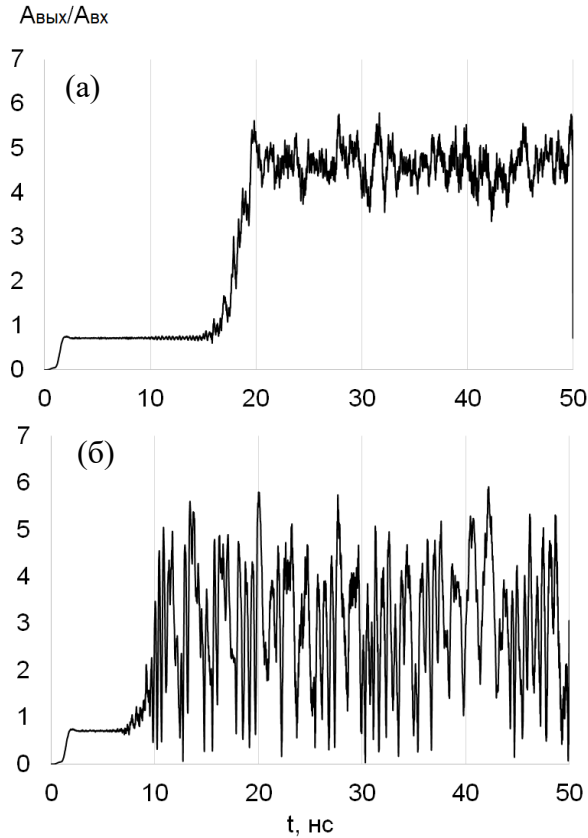


Рисунок 2. Зависимость относительной амплитуды выходного сигнала к входному от времени. (а) – напряжение 5,5 кВ, (б) – напряжение 5,7 кВ

Из рисунка 2 видно, что нарастание амплитуды высокочастотного поля начинается примерно на 16 нс при 5,5 кВ и при повышении напряжения до 5,7 кВ смещается в меньшую сторону и начинается при 8 нс. По мере увеличения напряжения край электронного потока смещается к замедляющей системе и наблюдается рождение новых частот (рисунок 3). При этом уровень отраженного от выхода к входу сигнала составляет порядка 12-14 Вт.

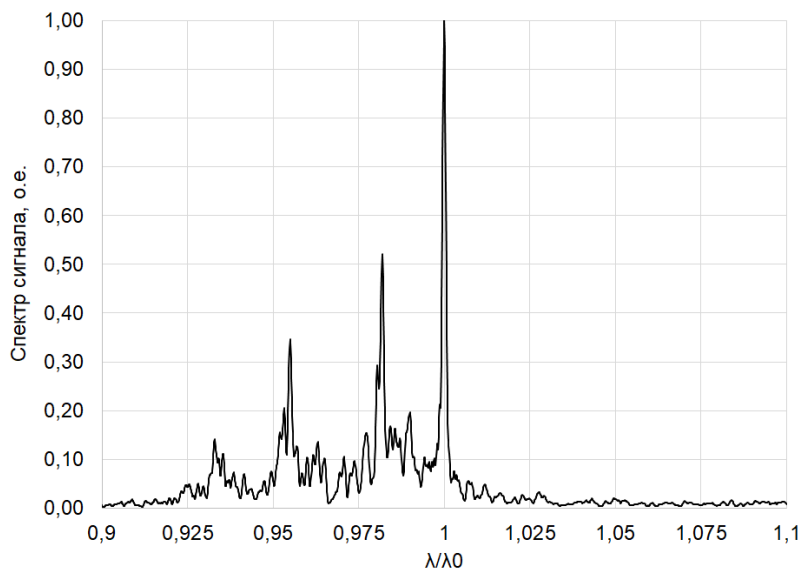


Рисунок 3. Спектр выходного сигнала (амплитуда нормирована на максимальное значение)

3. Заключение

Таким образом представлены результаты исследования усилителя М-типа обратной волны с пространством дрейфа Ka-диапазона.

Продемонстрирована возможность получения многочастотного сигнала на выходе устройства в полосе до 7,5%.

Список литературы

1. Гуляев Ю.В. и др. Информационные технологии на основе шумоподобных сигналов // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2025. – Т. 33. – №. 5. – С. 629-656.
2. Залогин Н. Н., Калинин В. И., Скарня А. В. Активная локация с использованием широкополосных хаотических сигналов // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2011. – Т. 3. – №. 1. – С. 3-17.
3. Сидоров Д.А., Иванов А.А., Розенталь Р.М. Экспериментальное наблюдение режимов самосинхронизации мод в спиральной ЛБВ с запаздывающей обратной связью // ELEKTRONNAYA TEKHNIKA. – 2022. – С. 51.
4. Ginzburg N. S. et al. Synchronization of radiation in an oversized coaxial Ka-band backward wave oscillator using two-dimensional Bragg structure // Physical Review Topics-Accelerators and Beams. – 2015. – Т. 18. – № 12. – С. 120701.
5. Brown W.C. The platinotron: Amplitron and stablotron // Crossed-field Microwave Device. – 1961. – С. 165-209.
6. Farney G.K. Interdigital stripline teeth forming shunt capacitive elements and an array of inductive stubs connected to adjacent teeth: пат. 3361926 США. – 1968.