

# Разработка мощного усилителя со скрещенными полями W-диапазона

Д.А. Сидоров<sup>1,2</sup>, А.В. Суховерхий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Салют»

<sup>2</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского

**Аннотация:** в данной работе исследовалась возможность реализации мощного усилителя со скрещенными полями в W-диапазоне. Проводилось компьютерное моделирование взаимодействия электронного потока с СВЧ волной.

**Ключевые слова:** СВЧ усилитель со скрещенными полями, W-диапазон

## 1. Введение

Реализация высокомоощных СВЧ приборов генерации и усиления сигналов в коротковолновом диапазоне представляет большой интерес для развития таких областей, как: досмотровые системы, системы управления высокоточным оружием, техническое зрение и радиовидение, системы слепой посадки летательных аппаратов, системы скрытой космической связи и т.д. Известен реализованный электровакуумный усилитель в виде лампы бегущей волны (ЛБВ) W-диапазона с ускоряющим напряжением менее 12 кВ и выходной импульсной мощностью около 20 Вт при скважности 3 [1]. В результате исследования зарубежного опыта разработки СВЧ усилителей W-диапазона обнаружено, что Американская компания Communication & Power Industries (CPI) предлагает две ЛБВ на цепочке связанных резонаторов моделей VTW-5795 и VTW-5795A2 с рабочей полосой частот 95 – 96 ГГц и 93.9 – 94.1 ГГц, соответственно, и пиковой импульсной мощностью 3 кВт [2]. Из известных типов мощных электровакуумных приборов особенно выделяются приборы со скрещенными полями, которые обладают высоким уровнем КПД в сравнении с приборами O-типа [3, 4]. Та же компания CPI может предложить усилитель со скрещенными полями в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц и уровнем выходной мощности от 90 кВт до 900 кВт [2, 5]. Так же известны различные модификации таких приборов в виде планарных систем с выходной мощностью около 800 кВт на частоте 3 ГГц и средним коэффициентом усиления 7,87 дБ, а пиковая мощность в эксперименте достигала 5 – 6 МВт и была ограничена высокочастотным пробоем [6]. Известна двухкаскадная схема сверхмощного усилителя в W-диапазоне, состоящая из цепочки двух giro-ЛБВ [7], одна из которых усиливает сигнал с 10 – 100 мВт до уровня мощности 1 – 2кВт, а после поступает на вход второй giro-ЛБВ уже с выходным уровнем мощности 100 – 350 кВт. Однако, giro-ЛБВ являются дорогими и сложно реализуемыми приборами. Главным отличием усилителя со скрещенными полями от приборов O-типа, является отсутствие необходимости формирования пролетного канала, а от giro-приборов отсутствием необходимости формирования винтовых траекторий электронов при больших значениях магнитных полей. Исходя из этого, разработка усилителя со скрещенными полями в W-диапазоне является актуальной и перспективной задачей.

## 2. Моделирование электронного взаимодействия в приборе со скрещенными полями W-диапазона

На данный момент известны и исследованы различные типы замедляющих систем и их модификации, которые могут быть применены в усилителе со скрещенными полями. В миллиметровом диапазоне длин волн в магнетронах применяются многоступенчатые резонаторные системы, в которых высшие пространственные гармоники могут обладать большим сопротивлением связи, чем (0)-я пространственная гармоника в одноступенчатой системе [5, 6, 9]. Таким образом была рассчитана дисперсионная характеристика и сопротивление связи (рисунок 1) двухступенчатой резонаторной системы, представляющей собой прямоугольные вырезы различной глубины (рисунок 2).

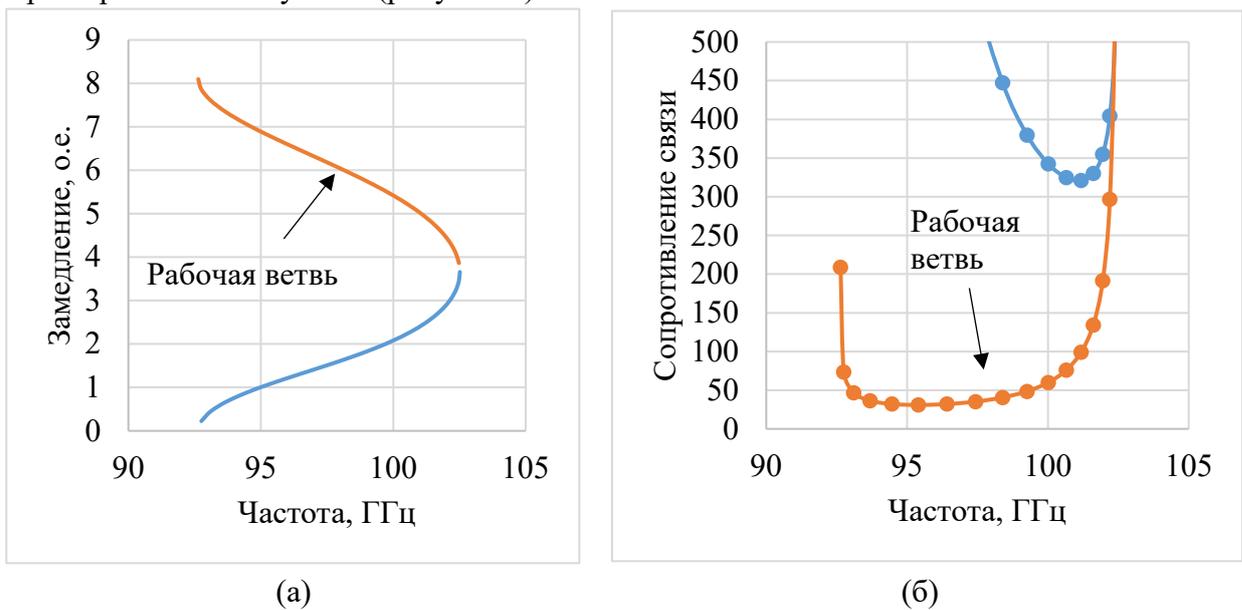


Рисунок 1. Дисперсионная характеристика (а) и сопротивление связи (б)

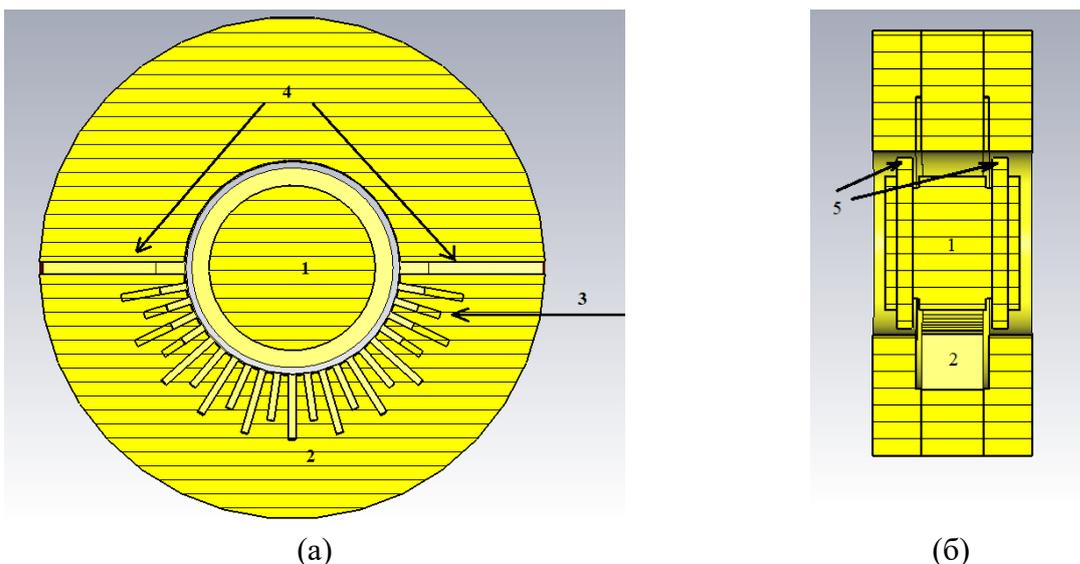


Рисунок 2. Общий вид конструкции усилителя М-типа в разрезе (а), вид конструкции в разрезе сбоку (б). 1 – катод, 2 – замедляющая система, 3 – согласующие штыри, 4 – ввод/вывод энергии, 5 – концевые экраны

Рабочий диапазон напряжений и магнитного поля прибора определяется

параболой критического режима  $U_{\text{крит}}(B_{\text{крит}})$  (парабола Халла), при котором все электроны попадают с катода на анод, и пороговым напряжением  $U_{\text{порог}}$  (уравнение Бунемана – Хартри) [3, 10], при котором начинается взаимодействие СВЧ-сигнала с электронным потоком:

$$U_{\text{крит}} = \frac{\eta B_{\text{крит}}^2 r_a^2}{8} \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2, \quad (1)$$

где  $U_{\text{крит}}$  – критическое напряжение,  $B_{\text{крит}}$  – критическое магнитное поле,  $r_a$  – радиус анода,  $r_k$  – радиус катода,  $\eta$  – удельный заряд электрона.

$$U_{\text{порог}} = U_{\text{синх}} \left(\frac{2B}{B_0} - 1\right), \quad (2)$$

$$U_{\text{синх}} = \left(\frac{505}{n}\right)^2, \quad (3)$$

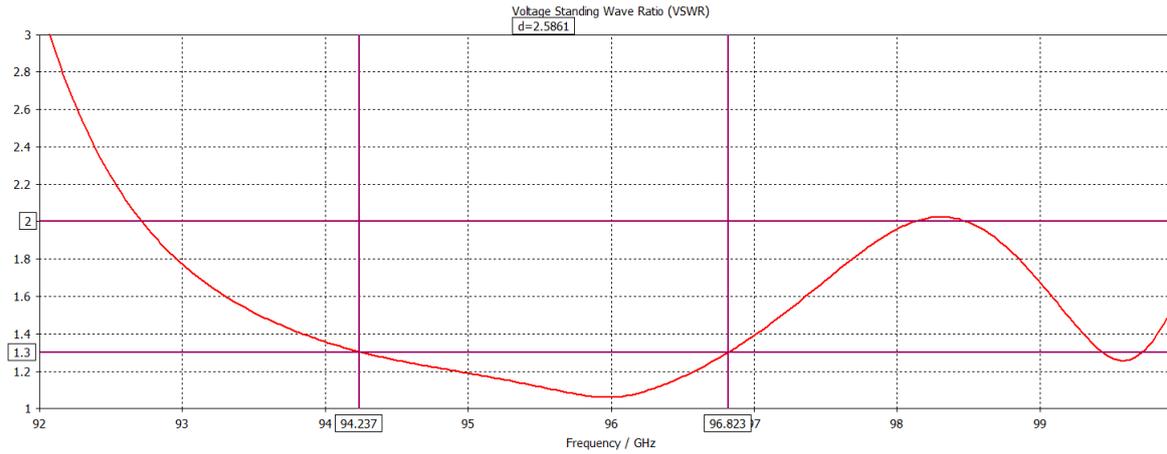
$$B_0 = \sqrt{\frac{8 * U_{\text{синх}}}{\eta} \frac{1}{r_a \left(1 - \left(\frac{r_k}{r_a}\right)^2\right)}}. \quad (4)$$

где  $n$  – замедление в системе,  $B$  – магнитное поле,  $U_{\text{синх}}$  – синхронное значение напряжения и  $B_0$  – магнитное поле, соответствующее пересечению параболы критического режима и порогового напряжения.

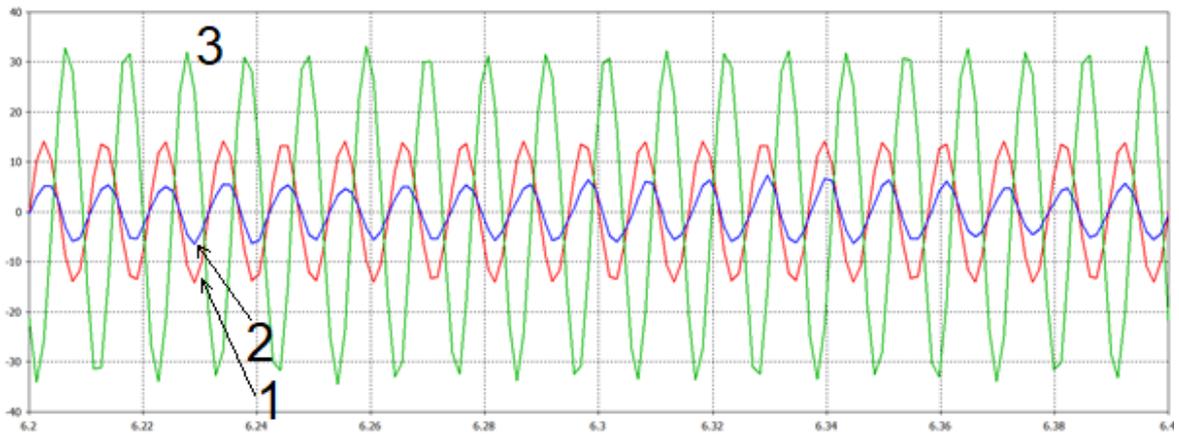
Как известно [10], рабочее напряжение прибора лежит в диапазоне:

$$U_{\text{синх}} < U < 4U_{\text{синх}} \quad (5)$$

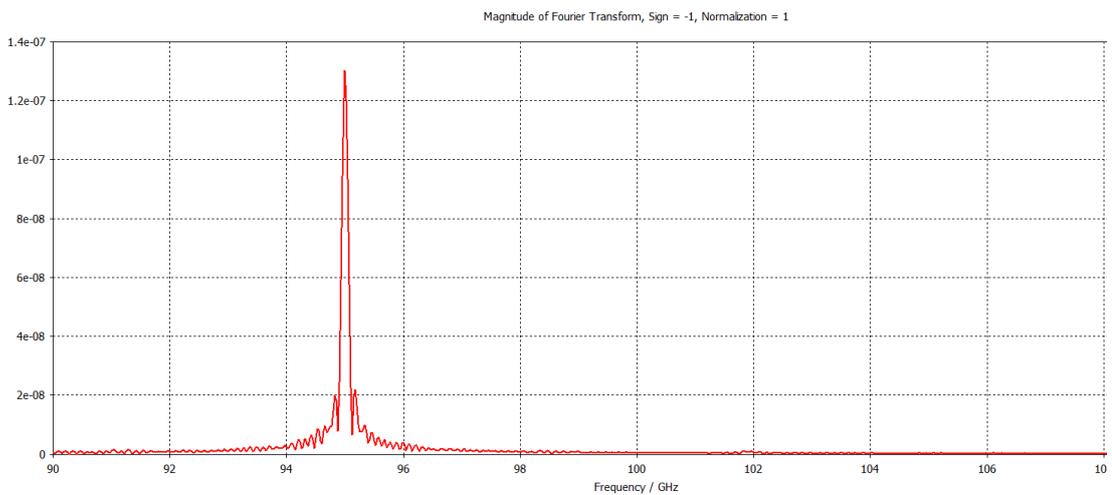
Общий вид прибора представляет собой цилиндрическую систему, состоящую из катода с концевыми экранами и анода (рисунок 2). В качестве рабочей гармоники выбрана (-1) – пространственная гармоника, которая обладает достаточно высокими значениями замедления для работы прибора при относительно низких значениях напряжения и магнитного поля. Зазор между катодом и анодом выбран 0,35 мм, исходя из соображений быстрого спада амплитуды поля сигнала при приближении к катоду. Радиус катода и анода составили 1.15 и 1.5 мм, соответственно. Согласование замедляющей системы проводилось при помощи согласующих штырей (3) на рисунке 2 и подобраны таким образом, чтобы обеспечивалось КСВН < 1,3 в рабочем диапазоне частот (рисунок 3). Размеры концевых экранов и высота катода подобраны так, чтобы не возбуждались продольные типы колебаний внутри системы и электронный поток был локализован в пространстве взаимодействия. Для моделирования электронного взаимодействия выбрана модель постоянной эмиссии с поверхности катода. На вход системы подавался сигнал на частоте 95 ГГц с мощностью 100 Вт (рисунок 4). При продольном магнитном поле 1.2 Тл и напряжении 12 кВ мощность выходного сигнала составила 540 Вт, а отраженного от выхода сигнала 15 Вт. При этом средний ток на аноде составил 3.5 А. Электронный КПД равняется 1,26%.



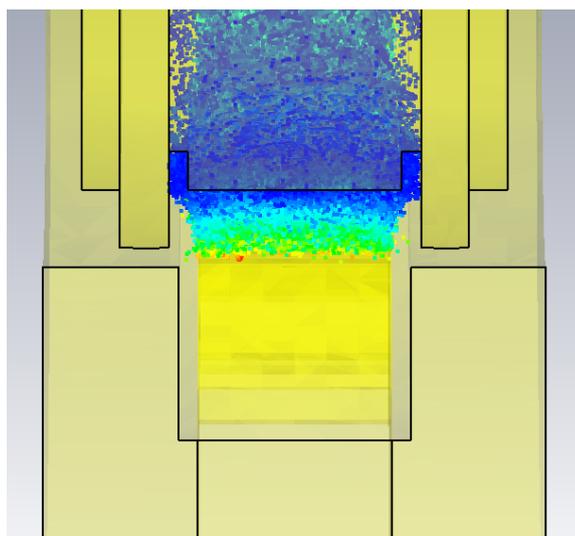
**Рисунок 3.** Расчетное значение КСВН в зависимости от частоты



**Рисунок 4.** Зависимость амплитуды входного (1), отраженного (2) и выходного сигнала (3) от времени в нс



**Рисунок 5.** Спектр выходного сигнала



**Рисунок 6.** Вид распределения электронного облака вдоль одного периода замедляющей системы

### 3. Заключение

Проведенное исследование известных замедляющих систем позволило выбрать наиболее перспективную для реализации в усилителе со скрещенными полями в  $W$  – диапазоне – двухступенчатую гребенчатую замедляющую систему. По расчетам усиление составило входного сигнала до 9 дБ при рабочем напряжении менее 15 кВ, среднем анодном токе равным 3.5 А и магнитном поле 1,2 Тл, которое может обеспечить постоянный магнит с радиальной намагниченностью. Данные расчеты показывают возможность реализации компактного и мощного импульсного усилителя  $W$  – диапазоне.

Исследование проводилось в рамках составной части научно-исследовательской работы **договор №17705596339200009540/07-НТ/21**

#### Список литературы

1. Иванов А.А. Исследование возможности улучшения выходных характеристик ламп бегущей волны  $W$ -диапазона, Известия вузов. Радиофизика, 59, 721 (2016).
2. URL: <https://www.cpii.com/product.cfm/1/17/119>.
3. Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. - Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012. 576 с.
4. Глимор А.С.-мл. Лампы с бегущей волной, - Москва: Техносфера, 2013. – 616 с.
5. George K. Farney Microwave Amplifier Tube Having Capacitive Loading Means for the Slow Wave Circuit: Patent № 3411034 USA: Nov. 12, 1968.
6. George K. Farney Interdigital stripline teeth forming shunt capacitive stubs connected to adjacent teeth: Patent № 3361926 USA: Jan. 2, 1968.
7. Steven C. Exelby et al. High-Power Amplification Experiments on a Recirculating Planar Crossed-Field Amplifier // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 48, no. 6, June 2020.
8. Sergey V. Samsonov, Alexander A. Bogdashov, Gregory G. Denisov et al. Cascade of Two W-Band Helical-Waveguide Gyro-TWTs With High Gain and Output Power: Concept and Modeling, // IEEE Trans. Electron devices, vol. 64, no. 3, March 2017.
9. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. – Москва: Советское радио, 1966. 632 с.
10. Стальмахов В.С. Основы электроники сверхвысокочастотных приборов со скрещенными полями. – Москва: Советское радио, 1963. 366 с.