



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.18>

УДК: 621.385.6

РАЗРАБОТКА УСИЛИТЕЛЯ СО СКРЕЩЕННЫМИ ПОЛЯМИ W-ДИАПАЗОНА

Д.А. Сидоров^{1,2}, А.В. Суховерхий¹, Р.М. Розенталь²

¹ Акционерное общество Научно-производственное предприятие «Салют»,
603107, Нижний Новгород, ул. Ларина, 7, корпус 4, офис 4264

² Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского,
603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2024 г.

Аннотация. Представлены результаты разработки усилителя со скрещенными полями W-диапазона. Выбрана оптимальная геометрия замедляющей системы и рассчитаны ее дисперсионных характеристик. Выполнено трехмерное моделирование методом крупных частиц, в рамках которого продемонстрирован коэффициент усиления до 15 дБ и максимальный уровень выходной мощности более 1 кВт.

Ключевые слова: W-диапазон, усилитель со скрещенными полями.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного контракта № 20411.195.0192501.11.003

Автор для переписки: Сидоров Даниил Александрович, daniil_sidorov@mail.ru

Введение

В связи с освоением новых частотных диапазонов для средств связи и радиолокации одной из актуальных задач является разработка усилителей W-диапазона с большим уровнем импульсной выходной мощности. Примерами

использования излучения с таким уровнем мощности может служить действующие радары WARLOC [1] и HUSIR [2]. Данные системы базируются на усилителях гирорезонансного типа, в которых винтовой электронный поток взаимодействует с незамедленными волнами электродинамической системы. В настоящее время в W-диапазоне ведется разработка разнообразных типов гирорезонансных усилителей: клистронов [3], ламп бегущей волны [4,5], твистронов [6,7]. Получаемая в приборах данного типа импульсная выходная мощность на уровне сотен киловатт является недостижимой для традиционных приборов с прямолинейными электронными потоками. Однако существенным недостатком таких приборов является необходимость создания в пространстве электронно-волнового взаимодействия сильного магнитного поля. Кроме того, данные приборы характеризуются высокой энергией электронных потоков, составляющей величину 30 и более кэВ, что существенно усложняет их эксплуатацию.

В этой связи ведутся многочисленные разработки усилителей различных типов на основе прямолинейных электронных потоков, взаимодействующих с замедленными волнами. Примерами таких разработок в W-диапазоне могут служить лампы бегущей волны, в которых достигнута импульсная выходная мощность на уровне 0.6 кВт [8] и клистроны, где соответствующее значение достигает уровня 10 кВт [9,10].

Вместе с тем, разработка усилителей с высокой выходной мощностью и большими значениями коэффициента усиления сопряжена с решением задачи подавления процессов паразитного самовозбуждения системы. Частично ослабить эту проблему может использование каскадной схемы. При таком подходе на первом каскаде происходит усиление входного сигнала милливаттного уровня мощности до уровня 10-100 Вт, что соответствует приемлемому значению коэффициента усиления порядка 30-40 дБ. В свою очередь для получения киловаттного уровня мощности на втором каскаде необходимо уже выполнить усиление на уровне 10-20 дБ. В отечественной практике для реализации первого каскада могут быть использованы

разработанные в АО НПП "Салют" лампы бегущей волны W-диапазона, в которых достигнута импульсная выходная мощность около 50 Вт при коэффициенте усиления более 30 дБ [11]. Расчеты показывают, что при определенной модификации замедляющей системы выходная мощность данных ЛБВ может быть увеличена до уровня 80 Вт при коэффициенте усиления 38 дБ [12].

В данной работе предлагается вариант создания второго каскада на основе усилителя со скрещенными полями. Данный класс усилителей имеет определенные преимущества перед усилителями других типов. В частности, по сравнению с усилителями O-типа отсутствует необходимость создания сложной электронно-оптической системы для фокусировки электронного пучка в пролетном канале, характерные размеры которого уменьшаются пропорционально длине волны. В свою очередь, по сравнению с усилителями гирорезонансного типа, отсутствует необходимость создания сильных магнитных полей для формирования винтовых электронных потоков. Усилители со скрещенными полями характеризуются достаточно большой выходной мощностью в сантиметровом диапазоне, которая для импульсных приборов может достигать величин в десятки и сотни киловатт [13]. Вместе с тем, очевидны и перспективы создания приборов миллиметрового диапазона, учитывая успехи в разработке близких по конструкции приборов магнетронного типа [14,15,16].

В представленной работе на основе трехмерного моделирования методом крупных частиц показана возможность создания усилителя W-диапазона с коэффициентом усиления до 15 дБ и максимальным уровнем выходной мощности более 1 кВт.

1. Выбор типа замедляющей системы

Рабочий диапазон напряжений и магнитного поля усилителя со скрещенными полями определяется параболой критического режима $U_{\text{крит}}(B_{\text{крит}})$, при котором все электроны попадают с катода на анод и пороговым напряжением $U_{\text{порог}}$,

определяемым уравнением Бунемана – Хартри, при котором начинается взаимодействие СВЧ-сигнала с электронным потоком [17,18]:

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

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

$$U_{порог} = U_{синх} \left(\frac{2B}{B_0} - 1 \right), \quad U_{синх} = \left(\frac{505}{n} \right)^2, \quad B_0 = \sqrt{\frac{8U_{синх}}{\eta}} \frac{1}{r_a \left(1 - \left(\frac{r_k}{r_a} \right)^2 \right)}, \quad (2)$$

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

Как известно [18], рабочее напряжение прибора лежит в диапазоне:

$$3U_{синх} < U < 4U_{синх}. \quad (3)$$

Из этого соотношения можно получить требуемую величину замедления, которая для рабочего напряжения 10-18 кВ составит величину $n \sim 7$. В W-диапазоне (0)-я пространственная гармоника обладает недостаточно высокими значениями замедления. При этом с увеличением номера пространственной гармоники значение сопротивления связи $K_{св}$ уменьшается [17]:

$$K_{св} = \frac{|e_m|^2}{2\beta_m^2 P}, \quad (4)$$

где $|e_m|^2$ – средний по сечению электронного потока и по его длине квадрат амплитуды составляющей электрического поля, взаимодействующей с электронным потоком, P – средний по времени поток энергии, переносимый через любое поперечное сечение системы, β_m^2 – квадрат волнового вектора m -й

пространственной гармонике. В связи с этим единственным решением является работа на (-1) -й – пространственной гармонике, при которой поток СВЧ мощности направлен против движения электронов.

На данный момент известны и исследованы различные типа замедляющих систем и их модификации, которые могут быть применены в усилителе со скрещенными полями [19]. Основными характеристиками замедляющих систем являются дисперсионная характеристика и сопротивление связи. Помимо электродинамических характеристик, стоит учитывать и теплопроводящие свойства самой замедляющей системы, и простоту изготовления, так как размеры замедляющей системы уменьшаются пропорционально длине волны. В рамках исследования были выбраны и промоделированы три варианта замедляющих систем: гребенка с дроссельной поддержкой, встречные штыри с дроссельными поддержками и двухступенчатая резонаторная система. Геометрия данных систем представлена на Рис.1.

Расчет дисперсионных характеристик показывает, что гребенчатая замедляющая система с дроссельной поддержкой обладает достаточно высоким значением сопротивления связи только на пересечении дисперсионной характеристики (0) -й – и (-1) -й – пространственных гармоник, где сдвиг фаз на период замедляющей системы равняется 180 градусов, что характерно для магнетронов, в рабочей же полосе частот значение сопротивления связи близко к 1 (Рис.2а). В сравнении с ней замедляющая система типа встречные штыри с дроссельными поддержками имеет больше преимуществ: дисперсионная характеристика обладает более слабой дисперсией, а как следствие обладает широкой рабочей полосой частот при достаточно высоких значениях сопротивления связи около 50 (Рис. 2б). Обе из вышеперечисленных систем обладают малыми геометрическими размерами для гребенчатой замедляющей системы $H \approx H_\delta \approx \lambda_0 / 7$ (Рис.1а) и для встречно-штыревой с дроссельными поддержками $H \approx \lambda_0 / 4.5$ и $H_\delta \approx \lambda_0 / 6$ (Рис.1б), что приводит к сложности их изготовления, ужесточению допусков изготовления и ограничивает высоту катода, которая связана с высотой H . Помимо этого,

в замедляющей системе встречные-штыри с дроссельными поддержками необходимо обеспечить электрический контакт с корпусом прибора через одну ламель (Рис. 1б), что так же является сложной технологической задачей. Более перспективна двухступенчатая резонаторная система, которая в сравнении с замедляющей системой типа встречные штыри с дроссельными поддержками обладает приблизительно равным сопротивлением связи, но более крутой дисперсионной характеристикой (Рис. 2в). При этом, данная система представляет собой ряд штырей с глубиной выреза $H_1 \approx \lambda_0 / 5$ и $H_2 \approx \lambda_0 / 3.5$ (Рис.1в) без дополнительного электрического контакта с корпусом и обладает самыми большими геометрическими размерами, что упрощает изготовление. При этом высота $H \approx \lambda_0 / 3$ (Рис.1в) в 1.5 раза превышает тот же размер в системе встречные-штыри с дроссельными поддержками, что позволяет установить катод большей высоты, и, как следствие, получить больший ток.

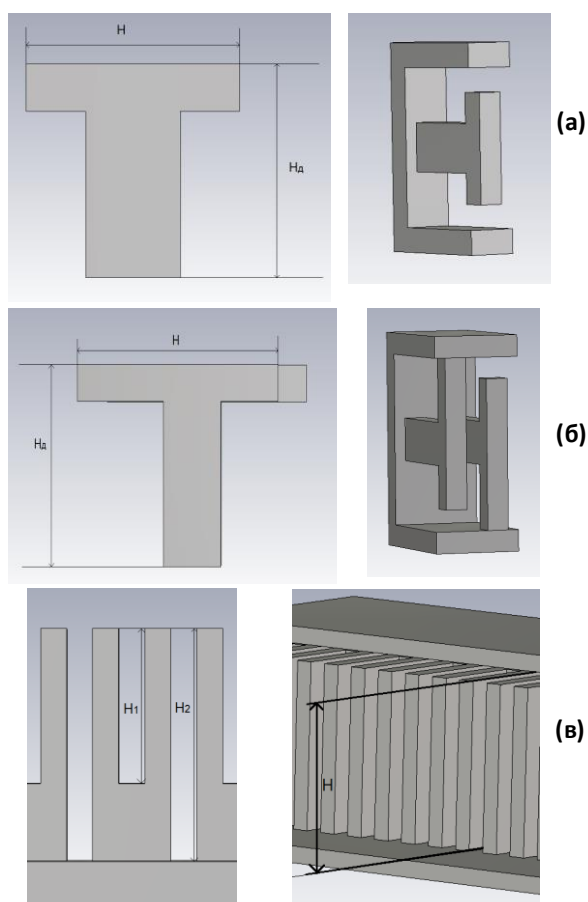


Рис. 1. Геометрия замедляющих систем: (а) – гребенка с дроссельной поддержкой, (б) – встречные штыри с дроссельными поддержками, (в) – двухступенчатая гребенка.

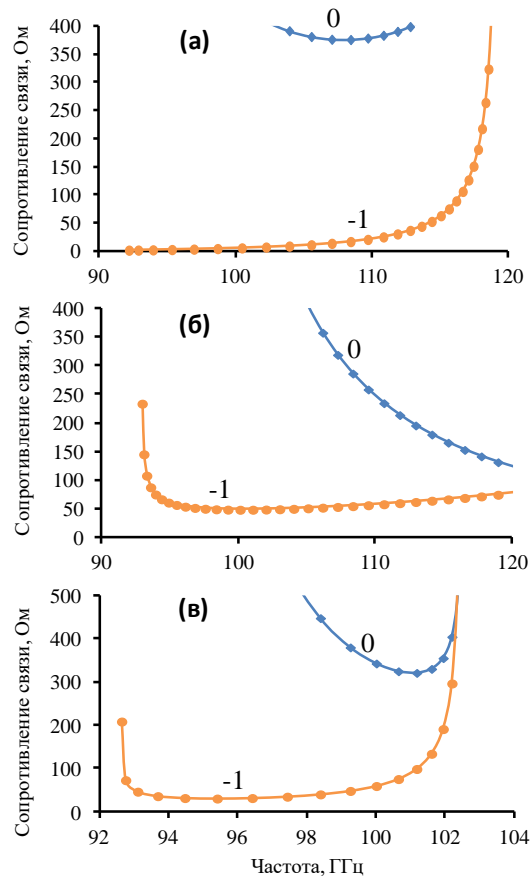


Рис. 2. Дисперсионные характеристики замедляющих систем: (а) – гребенка с дроссельной поддержкой, (б) – встречные штыри с дроссельными поддержками, (в) – двухступенчатая гребенка.

2. Трехмерное моделирование электронно-волнового взаимодействия

Моделирование усилителя со скрещенными полями проводилось с использованием пакета CST Studio Suite. Общий вид прибора представляет собой цилиндрическую систему с прямоугольными вырезами разной глубины (Рис. 3). В качестве рабочей гармоники выбрана (-1) -я пространственная гармоника, которая обладает достаточно высокими значениями замедления для работы прибора при относительно низких значениях напряжения и магнитном поле. 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. В качестве материала корпуса усилителя выбрана медь. Количество расчетных ячеек в модели составило около 5 млн. Число частиц при расчете взаимодействия электронов с СВЧ сигналом составило примерно 700 тыс.

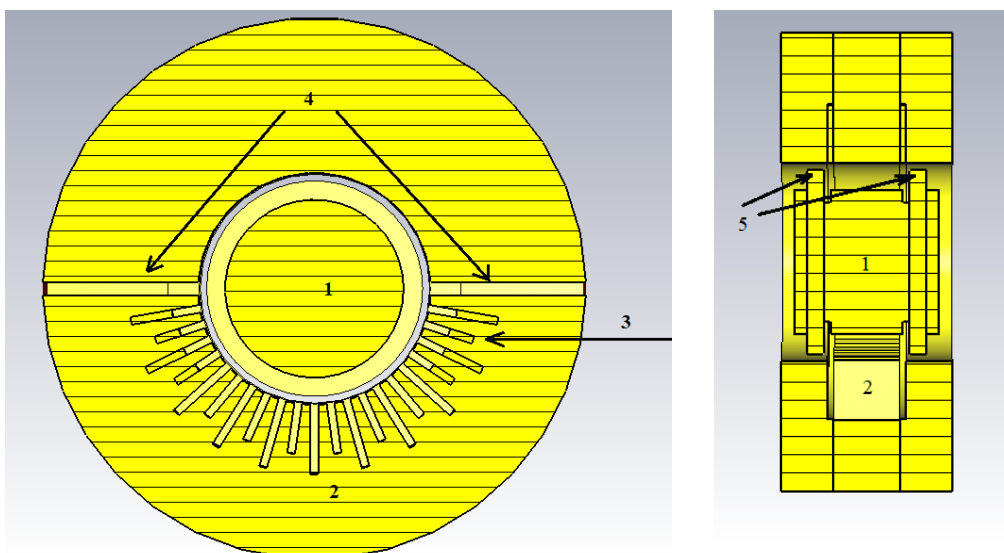


Рис. 3. Общий вид конструкции усилителя: 1 – катод с кольцевыми экранами, 2 – замедляющая система, 3 – согласующие штыри, 4 – ввод/вывод энергии, 5 – наконечники.

Согласование замедляющей системы проводилось при помощи согласующих штырей (3), которые подбирались таким образом, чтобы обеспечить КСВН < 1.3 в рабочем диапазоне частот 100-101 ГГц (Рис.4). Размеры наконечников и высота катода подбирались таким образом, чтобы не возбуждались продольные типы колебаний внутри системы и для локализации электронного потока в пространстве взаимодействия.

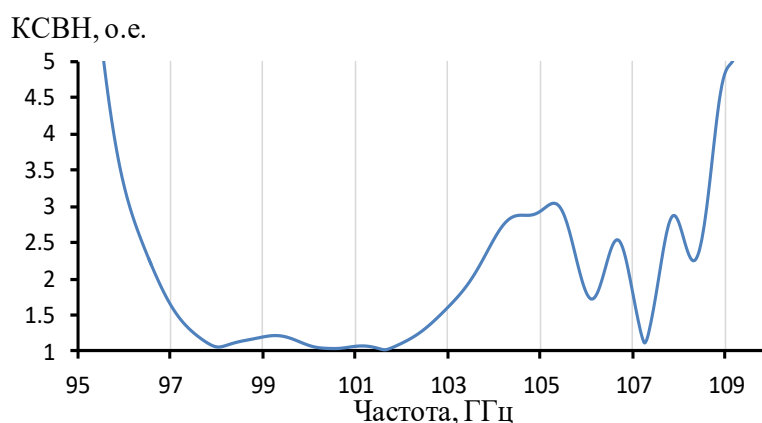


Рис. 4. Расчетное значение КСВН от частоты.

Для моделирования электронного взаимодействия выбрана модель постоянной эмиссии с поверхности катода, величина магнитного поля выбиралась равной 1.4 Тл, значение анодного напряжения составляло 15 кВ. На рис. 5 представлены зависимости коэффициента усиления от входной

мощности, построенные на границах и в середине рабочей полосы частот. Максимальный коэффициент усиления менялся в диапазоне 12-15 дБ при уровнях входной мощности до 50 Вт. Максимальная выходная мощность достигается при уровне входной мощности около 100 Вт на частоте 101 ГГц и достигает значения 1.3 кВт при коэффициенте усиления около 11 дБ. При среднем значении анодного тока 1.5 А это дает оценку электронного КПД около 5.8%.

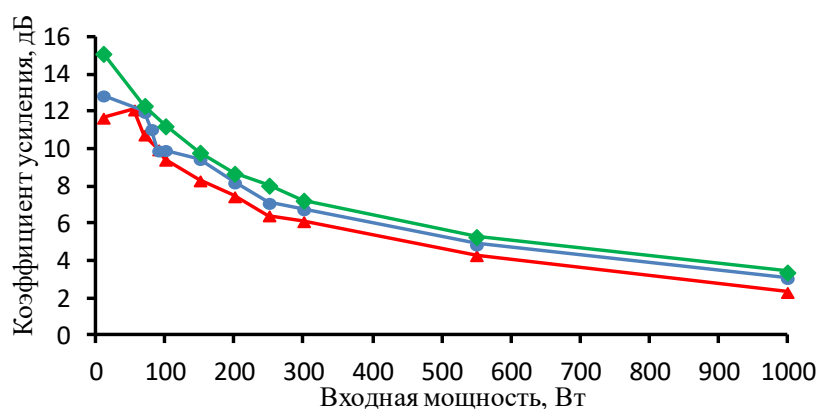


Рис. 5. Зависимости коэффициента усиления от входной мощности на различных рабочих частотах: (▲) – 100 ГГц, (●) – 100.5 ГГц, (◆) – 101 ГГц.

Заключение

Проведенное исследование позволило выбрать наиболее перспективную для реализации в усилителе со скрещенными полями W-диапазона двухступенчатую гребенчатую замедляющую систему, обладающую достаточно высоким значением сопротивления связи в рабочей полосе частот. Продемонстрирована возможность создания компактного и мощного импульсного усилителя в W-диапазоне. Полученный при максимальной выходной мощности коэффициент усиления около 11 дБ соответствует типичным значениям для современных приборов данного класса [20,21]

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного контракта № 20411.195.0192501.11.003

Литература

1. Linde G.J., Ngo M.T., Danly B.G., Cheung W.J., Gregers-Hansen V. WARLOC: A high-power coherent 94 GHz radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2008. – Т. 44. – №. 3. – P. 1102-1117. <https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4655367>.
2. MacDonald M., Abouzahra M., Stambaugh J. Overview of High-Power and Wideband Radar Technology Development at MIT Lincoln Laboratory // Remote Sensing. – 2024. – Т. 16. – №. 9. – С. 1530. <https://doi.org/10.3390/rs16091530>.
3. Засыпкин Е.В. Многорезонаторный гироклистрон непрерывного действия 3-миллиметрового диапазона длин волн // Изв. ВУЗов. Радиофизика, т.65, №5-6, с.434-447 (2022) <https://doi.org/10.1007/s11141-023-10222-6>
4. Samsonov S.V., Denisov G.G., Gachev I.G., Bogdashov A.A. CW operation of a W-band high-gain helical-waveguide gyrotron traveling-wave tube //IEEE Electron Device Letters. – 2020. – Т. 41. – №. 5. – С. 773-776. <https://doi.org/10.1109/LED.2020.2980572>.
5. Liu G., Jiang W., Yao Y., Wang Y., Cao Y., Wang J., Luo Y. Long pulse and high duty operation of a W-band gyrotron traveling wave tube //IEEE Electron Device Letters. – 2023. – Т. 44. – №. 5. – P. 829-832. <https://doi.org/10.1109/LED.2023.3255303>.
6. Yadav S.G., Thottappan M. Design and simulation investigations of stagger-tuned W-band gyro-twystron // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2022. – Т. 69. – №. 2. – P. 777-784. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3137366>.
7. Yadav S.G., Babu V.V., Thottappan M. Gain and Bandwidth Improvement Studies of Millimeter Wave Periodically Dielectric Loaded Gyro-Twystron Amplifier //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2022. – Т. 69. – №. 12. – С. 7059-7066. <https://doi.org/10.1109/TED.2022.3217760>.
8. Zhang X., Feng J., Cai J., Du Y., Dong R., WuX. Power enhancement in W-band pulsed folded waveguide TWT // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2021. – Т. 68. – №. 5. – P. 2504-2508. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3068692>.

9. Pasour J., Wright E., Nguyen K.T., Balkcum A., Wood F.N., Myers R.E., Levush B. Demonstration of a multikilowatt, solenoidally focused sheet beam amplifier at 94 GHz // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2014. – Т. 61. – №. 6. – P. 1630-1636. <https://doi.org/10.1109/TED.2013.2295771>.
10. Gamzina D., Barnett L.R., Ravani B., Luhmann N.C. Mechanical design and manufacturing of W-band sheet beam klystron // IEEE Transactions on electron Devices. – 2017. – Т. 64. – №. 6. – P. 2675-2682. <https://doi.org/10.1109/TED.2017.2690642>.
11. 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 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. – Т. 84. – № 2. – С. 238-242. <https://doi.org/10.3103/S1062873820020136>
12. Иванов А.А. Увеличение КПД ЛБВ W-диапазона при неизменных энергетических параметрах электронного пучка // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2024. – С. 151-154.
13. Gilmour Jr A.S., Gilmour A.S. Klystrons, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons. – Artech House, 2011. – 859 P.
14. Иванов И.М., Скрипкин Н.И., Шмелев А.В. Магнетроны 3-миллиметрового диапазона длин волн с возможностью перестройки и стабилизации частоты // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2016. – Т. 21. – №. 10. – С. 68-72.
15. Verma R.K., Maurya S., Singh V.V.P. A review on the advent of magnetrons at high frequency (mm and THz) gateway // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2018. – Т. 32. – №. 1. – С. 113-127. <https://doi.org/10.1080/09205071.2017.1377641>
16. Вагин А.И., Евдокимов Ю.В., Иванов И.М., Петюшин Н.В., Скрипкин Н.И. Передатчик системы досмотра на основе короткоимпульсного магнетрона W-диапазона в режиме многопозиционной локации и радиоосвещения // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – С. 577-582.

17. Стальмахов В.С. Основы электроники сверхвысокочастотных приборов со скрещенными полями. – Сов. радио, 1963.
18. Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. – 2012.
19. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. – Москва: Советское радио, 1966. 632 с.
20. Exelby S.C., Greening G.B., Jordan N.M., Packard D.A., Simon D., Lau Y.Y., Hoff B.W., Gilgenbach R.M. High-power recirculating planar crossed-field amplifier design and development // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2018. – Т. 65. – №. 6. – P. 2361-2365. <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2790802>.
21. Pearlman M., Watrous J., Smithe D., Yue A., Garner A.L., Worthington M., Browning J. A Simulation Study of the Gain Limits of a Crossed-Field Amplifier // 2023 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS). – P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/ICOPS45740.2023.10481390>.

Для цитирования:

Сидоров Д.А., Суховерхий А.В., Розенталь Р.М. Разработка усилителя со скрещенными полями W-диапазона. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.18>