

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Исследование ЛБВ-усилителей W-диапазона с замедляющими системами
на основе петляющего волновода**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4011 группы

направления 03.03.01 Прикладные математика и физика

Института физики

Дмитриева Ивана Сергеевича

Научный руководитель
доцент кафедры динамических систем
на базе СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
к.ф.-м.н.



А.А. Ростунцова

Зав. кафедрой
нелинейной физики
к.ф.-м.н., доцент



Е.Н. Бегинин

Саратов 2026 г.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение миллиметрового диапазона длин волн, в частности, W-диапазона (75–110 ГГц), является одним из наиболее перспективных направлений для развития современных систем дальней космической связи, радиолокации и высокоскоростных телекоммуникаций. Источники субтерагерцевого излучения позволяют обеспечить скорости передачи информации на уровне десятков гигабит в секунду, при этом относительно низкое атмосферное поглощение в этом частотном диапазоне делает его пригодным для космической и спутниковой связи [1,2]. Например, в работе [3] была разработана технологическая платформа для передачи данных в W-диапазоне в рамках проекта CubeSat EIVE, направленного на создание портативных миниатюрных спутников.

Растущие потребности в передаче больших объемов данных (единицы петабайт в земные сутки) требуют не только высокой пропускной способности, но и наличия компактных, эффективных и достаточно мощных источников СВЧ-сигнала в субтерагерцевом диапазоне. Несмотря на то, что в настоящее время в этом диапазоне разработаны различные источники излучения, включая приборы твердотельной и квантовой электроники, наибольшую мощность способны обеспечивать вакуумные устройства, особенно в широкополосном режиме [2,4]. Примером таких приборов могут выступать гиротроны и лазеры на свободных электронах, однако указанные устройства зачастую представляют собой весьма громоздкие и дорогостоящие комплексы, выпускаемые единичными экземплярами.

Актуальной задачей является разработка миниатюрных приборов O-типа, прежде всего лампы бегущей волны (ЛБВ), которая представляет собой широкополосный усилитель с высоким коэффициентом усиления [5]. С ростом рабочих частот уменьшаются поперечные размеры ключевых элементов ЛБВ, включая электродинамические структуры, что ограничивает использование классических спиральных замедляющих систем (ЗС) в силу трудности их

изготовления и необходимости формирования электронных пучков со сверхвысокой плотностью тока. В связи с этим большое внимание привлекает разработка пространственно-развитых ЗС, в которых осуществляется взаимодействие с одним или несколькими ленточными электронными пучками [6-8]. Ленточный электронный пучок позволяет распределить ток по большей площади при той же силе тока, что и в круглых пучках, следовательно, уменьшить плотность тока, что снижает требования к фокусировке и теплоотводу.

Одними из наиболее перспективных ЗС для достижения широкополосного усиления и относительно высоких выходных мощностей в ЛБВ суб-ТГц диапазона являются структуры на основе петляющего волновода [7-13]. ЗС типа «петляющий волновод» представляет собой периодически изогнутый прямоугольный волновод. Такая конфигурация сочетает относительно простую технологию изготовления, широкую полосу пропускания и высокое сопротивление связи. Петляющий волновод не имеет узких щелей, ограничивающих ток пропускания, и допускает использование как круглого, так и ленточного электронного пучка.

Тем не менее, актуальной задачей остаётся улучшение выходных характеристик ЛБВ с ЗС на основе петляющего волновода, в частности, повышение выходной мощности, увеличение ширины полосы усиления, миниатюризация прибора и др. При этом интерес представляет как оптимизация хорошо известных моделей ЗС с использованием современных методов численного моделирования, так и разработка новых модифицированных конструкций.

Целью работы является моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия и оценка выходных характеристик ЛБВ W-диапазона с ЗС на основе петляющего волновода. **Задачи работы:**

1. Исследование ЗС типа «петляющий волновод» на основе известных теоретических формул. Выбор геометрии структуры для получения полосы пропускания ЗС в W-диапазоне;

2. Расчёт электродинамических параметров ЗС в виде стандартного петляющего волновода в COMSOL Multiphysics и сопоставление с теоретическими выводами. Исследование влияния канала для электронного пучка на дисперсионные характеристики ЗС;
3. Разработка модифицированной конструкции ЗС на основе петляющего волновода с целью увеличения площади поперечного сечения ленточного электронного пучка, с которым осуществляется взаимодействие в ЛБВ. Расчёт электродинамических параметров в COMSOL Multiphysics. Расчёт выходных параметров ЛБВ-усилителя на основе разработанной ЗС с использованием программы, численно решающей уравнения одномерной нелинейной нестационарной теории.

Результаты выпускной квалификационной работы докладывались на студенческой научной конференции Института физики СГУ (2026).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** описывается актуальность работы и основные сферы применения ЛБВ-усилителей W-диапазона, указываются основные трудности при проектировании субтерагерцевых приборов и возможности их преодоления, формулируются цели и задачи данной работы.

В **Главе 1** рассмотрена конструкция ЗС типа «петляющий волновод», перечислены основные электродинамические характеристики ЗС и изложена методика их моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics.

В **Разделе 1.1** представлена схема петляющего волновода и приведён обзор современного состояния исследований, посвящённых разработке ЛБВ W-диапазона с ЗС на основе петляющего волновода [7-13]. В **Разделе 1.2** представлены формулы, по которым рассчитываются основные электродинамические характеристики ЗС, в частности, дисперсионная характеристика, коэффициент замедления и сопротивление связи. Сформулирована теорема Флоке. В **Разделе 1.3** представлен алгоритм моделирования одного периода ЗС с периодическими граничными условиями

Флоке методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics.

В Главе 2 представлены результаты расчёта и анализа электродинамических параметров ЗС типа «петляющий волновод» стандартной геометрии, предназначенной для работы в W-диапазоне частот (75–110 ГГц). Расчёты выполнены двумя способами: с использованием аналитических формул из литературы и методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics. Исследовано влияние канала для электронного пучка на дисперсионные характеристики ЗС.

В Разделе 2.1 представлена схема ЗС в виде петляющего волновода (см. рис. 1). Приведены теоретические формулы, позволяющие оценить электродинамические параметры ЗС [14]. В частности, дисперсионная характеристика приближенно определяется формулой

$$\omega = \sqrt{\omega_c^2 + \frac{c^2 \beta_m^2 p}{(H + \pi p / 2)}}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, ω_c — частота отсечки прямоугольного волновода, $\omega_c = \pi c/a$, a — ширина волновода, β_m — постоянная распространения m -ой пространственной гармоники:

$$\beta_m = k \left(\frac{H + \pi p / 2}{p} \right) + \frac{(2m + 1)\pi}{p}, \quad (2)$$

$k = \varphi/d$ — постоянная распространения вдоль волновода, p — полупериод структуры, H — длина неизогнутой части. Основываясь на теоретических формулах, были подобраны геометрические параметры ЗС таким образом, чтобы полоса пропускания её основной моды лежала в окрестности 100 ГГц. Соответствующие размеры представлены в Таблице 1. Представлены результаты расчёта дисперсионной характеристики и зависимости коэффициента замедления от частоты в соответствии с теоретическими формулами. Показано, что нижняя отсечка полосы пропускания основной моды

составляет около 80 ГГц, а верхняя отсечка отсутствует, однако частота 0π - или 4π - вида составляет 117 ГГц. В диапазоне 95-115 ГГц замедление слабо зависит от частоты и составляет порядка 5-6. Таким образом, возможен синхронизм с электронным пучком на +1-ой прямой пространственной гармонике при ускоряющих напряжениях до 10 кВ.

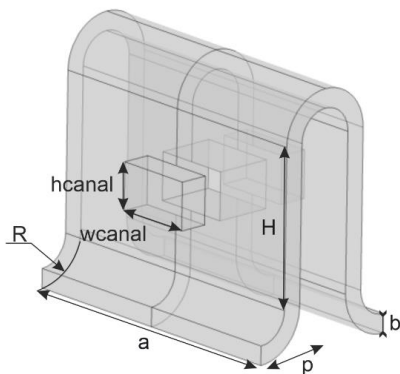


Рис. 1. Схема петляющего волновода.

Таблица 1. Размеры ЗС типа «петляющий волновод» W-диапазона

Параметры	Значения
Поперечные размеры изогнутого прямоугольного волновода, $a \times b$	1900 × 120 мкм
Радиус скругления, R	300 мкм
Длина неизогнутой части, H	1000 мкм
Полупериод, $p = R + (R - b)$	480 мкм

В *Разделе 2.2* приведены результаты расчётов электродинамических характеристик ЗС в виде стандартного петляющего волновода в программном пакете COMSOL Multiphysics. Показано хорошее соответствие между теоретическими кривыми и численными результатами. На рис. 2, а представлены результаты сопоставления дисперсионных характеристик. Зависимость коэффициента замедления от частоты, полученная в численном

моделировании, представлена на рис. 2, б. Замедление для +1-ой прямой пространственной гармоники составляет порядка 5.

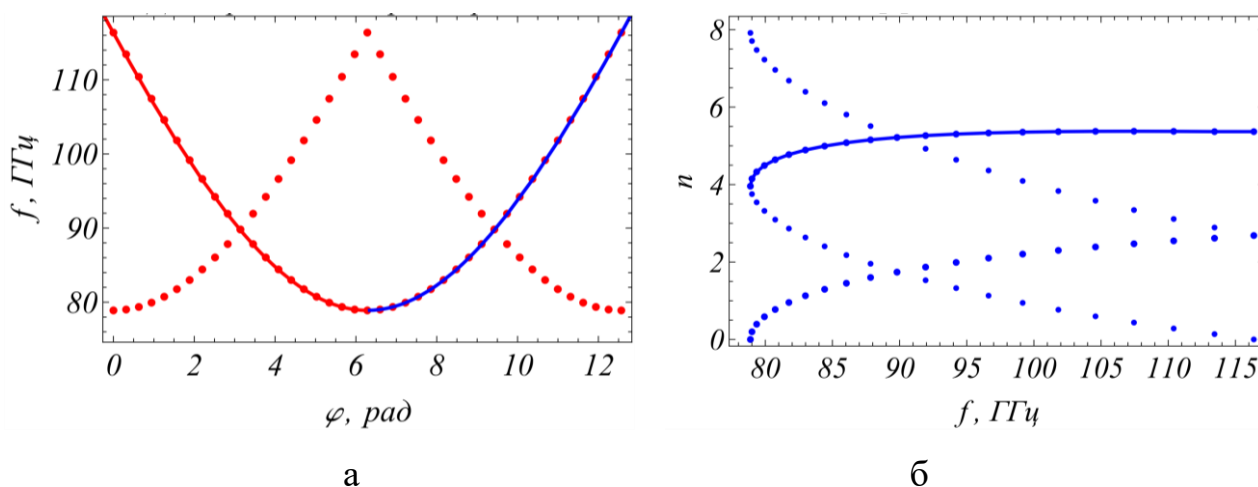


Рис. 2. а — сопоставление дисперсионных характеристик, построенных по теоретическим формулам (сплошная линия) и в численном моделировании (точки); б — зависимость коэффициента замедления от частоты, рассчитанная в COMSOL Multiphysics. Сплошной линией указана рабочая +1-ая гармоника.

В *Разделе 2.3* исследовано влияние прямоугольного канала для ленточного электронного пучка на дисперсионные характеристики ЗС типа «петляющий волновод». Установлено, что наличие канала приводит к расщеплению мод на 2π -виде колебаний, в результате чего образуется полоса непропускания, ширина которой растёт с увеличением ширины канала. В частности, при размерах канала 500×300 мкм полоса непропускания составляет 10 ГГц (см. рис. 3), а при увеличении ширины канала до 1000 мкм она растёт до 25 ГГц. При этом у основной моды ЗС появляется верхняя отсечка, что ограничивает её полосу пропускания. В частности, при канале 1000×300 мкм ширина полосы пропускания составляет 15 ГГц (от 80 до 95 ГГц).

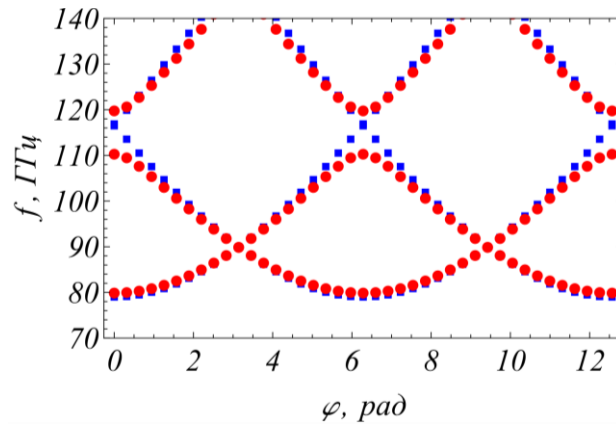
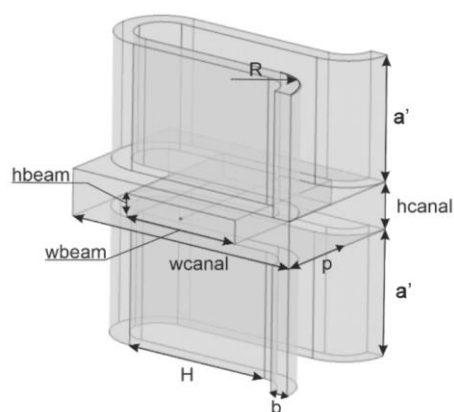


Рис. 3. Дисперсионная характеристика петляющего волновода при отсутствии канала (квадраты) и с прямоугольным каналом для электронного пучка сечением 500×300 мкм (кружки).

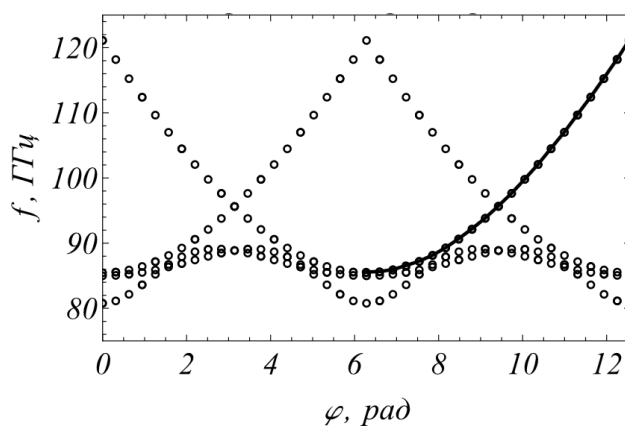
В **Главе 3** представлена модифицированная ЗС на основе петляющего волновода, позволяющая увеличить поперечные размеры ленточного электронного пучка, с которым осуществляется взаимодействие, и, соответственно, использовать пучки с более высокими токами. Рассчитаны электродинамические характеристики ЗС в Comsol Multiphysics и проведена оценка выходных характеристик ЛБВ-усилителя.

В **Разделе 3.1** представлена схема модифицированной ЗС (см. рис. 4). Она представляет собой широкий канал для электронного пучка, сверху и снизу от которого расположены два петляющих волновода. Во-первых, это позволяет разделить канал и волновод, а, во-вторых, использовать пучки с большей площадью сечения. Размеры соответствуют предыдущей модели (см. Таблицу 1), причём $2a' + h_{\text{canal}} = a$, $h_{\text{canal}} = 300$ мкм, а $w_{\text{canal}} = H + 2R$.

В **Разделе 3.2** представлены результаты расчёта электродинамики ЗС в COMSOL. Показано, что наблюдается более сложная картина мод (см. рис. 5). На основе анализа распределений продольной E_z компоненты электрического поля в поперечном сечении структуры продемонстрировано, что две низшие моды являются антисимметричными, а две следующие моды – симметричными. В качестве рабочей выбрана +1-ая прямая пространственная гармоника симметричной моды.



а



б

Рис. 4. а — схема модифицированной ЗС на основе петляющего волновода; б — дисперсионная характеристика ЗС при сдвигах фаз от 0 до 4π . Сплошной линией отмечена рабочая гармоника симметричной моды.

В *Разделе 3.3* приведены электродинамические параметры рабочей гармоники. Нижняя отсечка симметричной моды составляет 85 ГГц. Верхняя отсечка отсутствует несмотря на то, что в системе есть канал для электронного пучка, т.е. расщепления мод не происходит. Коэффициент замедления составляет порядка 5. Представлены результаты расчёта сопротивления связи как на оси пучка, так и усреднённого по сечению пучка. Сопротивление связи на оси пучка составляет свыше 1 Ом в диапазоне 85-95 ГГц, свыше 0.5 Ом на частотах до 100 ГГц и свыше 0.1 Ом на частотах вплоть до 110 ГГц. Показано, что вдали от нижней отсечки, на частотах от 90 ГГц и выше омические потери достаточно малы и не превышают 0.4 дБ на период.

В *Разделе 3.4* для оценки выходных параметров ЛБВ-усилителя использовалась одномерная программа, решающая уравнения нелинейной нестационарной теории [15]. Расчёты проводились для 70 периодов структуры (суммарная около 7 см) с электронным пучком сечением 800×150 мкм и током 200 мА (плотность тока 160 А/см^2). При ускоряющем напряжении 10.5 кВ коэффициент усиления в линейном режиме превышает 25 дБ в диапазоне от 103 до 107 ГГц (см. рис. 6). Показано, что при увеличении ускоряющего

напряжения значение коэффициента усиления растёт и сдвигается в область более низких частот, при этом сужается ширина полосы усиления. Также была рассчитана зависимость выходной амплитуды от входной на частоте 105 ГГц. В режиме насыщения можно достичь выходной мощности порядка 30 Вт.

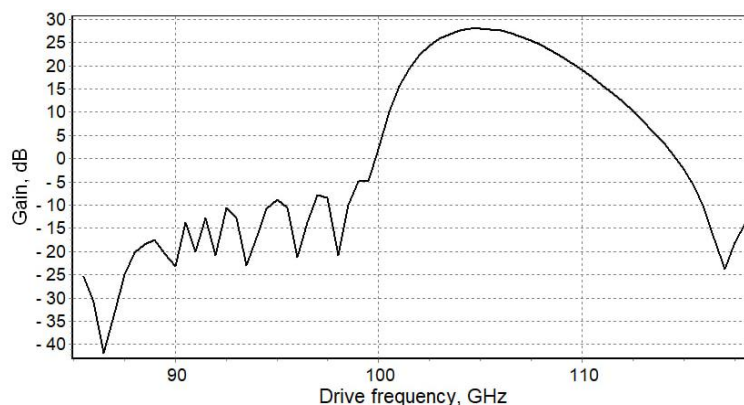


Рис. 6. Зависимость коэффициент усиления от частоты при входной мощности 5 мВт и ускоряющем напряжении 10.5 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие основные результаты.

1. Проведён анализ ЗС типа «петляющий волновод» на основе известных теоретических формул. Подобраны геометрические размеры структуры, обеспечивающие полосу пропускания основной моды петляющего волновода в W-диапазоне. В частности, поперечные размеры волновода составили 1900×120 мкм, радиус скругления – 300 мкм, полупериод – 480 мкм. На основе теоретических формул построены дисперсионная характеристика ЗС и зависимость коэффициента замедления от частоты. Показано, что нижняя отсечка основной моды волновода составляет 80 ГГц. Синхронизм с электронным пучком возможен на +1-ой прямой гармонике при ускоряющих напряжениях до 10 кВ.
2. Выполнено электродинамическое моделирование одного периода петляющего волновода с периодическими граничными условиями Флоке в

программном пакете COMSOL Multiphysics. Показано, что результаты моделирования хорошо согласуются с теоретическими кривыми.

3. Исследовано влияние прямоугольного канала для ленточного электронного пучка на дисперсионные характеристики ЗС типа «петляющий волновод». Установлено, что наличие канала приводит к расщеплению мод на 2π -виде колебаний, в результате чего образуется полоса непропускания, ширина которой растёт с увеличением ширины канала. В частности, при размерах канала 500×300 мкм полоса непропускания составляет 10 ГГц, а при увеличении ширины канала до 1000 мкм она растёт до 25 ГГц. При этом у основной моды волновода возникает верхняя отсечка, которая смещается вниз с увеличением ширины канала, из-за чего уменьшается полоса пропускания: при ширине канала 1000 мкм она составляет всего 15 ГГц. Таким образом, наличие канала неблагоприятно сказывается на широкополосность ЛБВ-усилителя, что делает актуальным модификацию ЗС типа «петляющий волновод» для возможности использования ленточных электронных пучков.
4. Предложена модифицированная ЗС, представляющая собой два петляющих волновода, расположенных сверху и снизу от широкого канала для электронного пучка. Исследована структура мод. Показано, что синхронизм с пучком может обеспечиваться на +1-ой гармонике симметричной моды при ускоряющих напряжениях порядка 10 кВ. При этом сопротивление связи на оси пучка составляет свыше 0.3 Ом в диапазоне 100-110 ГГц при омических потерях ниже 0.4 дБ на период.
5. Проведено моделирование выходных характеристик ЛБВ-усилителя на основе разработанной ЗС с помощью программы, решающей уравнения одномерной нелинейной нестационарной теории. Показано, что ЛБВ может обеспечивать усиление свыше 30 дБ в диапазоне 100-115 ГГц при напряжении пучка 10.5 кВ. В режиме насыщения можно достичь выходной мощности порядка 30 Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kurner T., Mittleman D.M., Nagatsuma T.* THz Communications. Paving the Way Towards Wireless Tbps. Cham, Switzerland: Springer. 2022. 531 p. DOI: 10.1007/978-3-030-73738-2.
2. *Tani M., Rieh J.-S., Park S.Y.* Advances in Terahertz Source Technologies. Singapore: Jenny Stanford Publishing. 2024. 773 p. DOI: 10.1201/9781003459675.
3. *Manoliu L., Schoch B., Haussmann S. et al.* The technology platform of the EIVE CubeSat mission for high throughput downlinks at W-band // *Acta Astronautica*. 2023. Vol. 205. P. 80-93. DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.02.039.
4. *Armstrong C.M., Snively E.C., Shumail M. et al.* Frontiers in the Application of RF Vacuum Electronics // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2023. Vol. 70, № 6. P. 2643-2655. DOI: 10.1109/TED.2023.3239841.
5. *Paoloni C., Gamzina D., Letizia R. et al.* Millimeter wave traveling wave tubes for the 21st century // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2021. Vol. 35, № 5. P. 567-603. DOI: 10.1080/09205071.2020.1848643.
6. *Torgashov G.V., Torgashov R.A., Titov V.N. et al.* Meander-line slow-wave structure for highpower millimeter-band traveling-wave tubes with multiple sheet electron beam // *IEEE Electron Device Letters*. 2019. Vol. 40, № 12. P. 1980–1983. DOI: 10.1109/LED.2019.2945502.
7. *Baig A., Gamzina D., Kimura T., et al.* Performance of a nano-CNC machined 220-GHz traveling wave tube amplifier // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2017. Vol. 64, № 5. P. 2390-2397. DOI: 10.1109/TED.2017.2682159.
8. *Zhang C., Duan Z., Guo Z., et al.* Demonstration of a compact W-band sheet beam traveling-wave tube // *IEEE Electron Device Letters*. 2025. Vol. 46, № 12. P. 2317-2320. DOI: 10.1109/LED.2025.3622323.
9. *Joye C.D., Cook A.M., Calame J.P., et al.* Demonstration of a high power, wideband 220 GHz serpentine waveguide amplifier fabricated by UV-LIGA //

- 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Paris, France. 2013. P. 1-2. DOI: 10.1109/IVEC.2013.6571005.
10. *Basten M.A., Tucek J.C., Gallagher D.A., Kreischer K.E.* 233 GHz high power amplifier development at Northrop Grumman // 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Monterey, CA, USA. 2016. P. 1-2. DOI: 10.1109/IVEC.2016.7561775.
 11. *Zhang L., Xing Y., Li H., Feng J.* Novel G-Band Slot-Loaded Folded Waveguide Traveling Wave Tube // IEEE Electron Device Letters. 2025. Vol. 46, № 7. P. 1215-1218. DOI: 10.1109/LED.2025.3563026.
 12. *Bian X., Wang Z., Zhang C., Feng J.* Design and Experiment of Modified Folded Waveguide Slow Wave Structure for 60-W G-Band Traveling Wave Tube // IEEE Microwave and Wireless Technology Letters. 2025. Vol. 35, № 8. P. 1194-1197, DOI: 10.1109/LMWT.2025.3563903.
 13. *Иванов А.А.* Исследование возможности улучшения выходных характеристик ламп бегущей волны W-диапазона // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8-9. С. 721–728.
 14. *Han S.-T., Kim J.-I., Park G.-S.* Design of a folded-waveguide traveling wave tube // Microwave Optical Technology Letters. 2003. Vol. 38, No. 2. P. 161-165. DOI: 10.1002/mop.11003.
 15. *Pobedonostsev A.S., Rozhnev A.G., Rumyantsev S.A., et al.* New 2.5D code for simulation of nonlinear multisignal amplification in a wideband helix TWT // 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Paris, France. 2013. 31st IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), Baltimore, MD, USA. 2004. P. 173-. DOI: 10.1109/PLASMA.2004.1339729