

Многолучевые лампы бегущей волны с пространственно-развитыми замедляющими системами типа петляющих волновод

И.А. Емелин^{1,2}, А.Ю. Мирошниченко², П.Д. Шалаев¹

¹АО «Научно-производственное предприятие «Алмаз».

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Аннотация: в работе проведен краткий обзор и оценка эффективности работы в миллиметровом диапазоне длин волн, существующих конструкций ламп бегущей волны (ЛБВ) с замедляющей системой (ЗС) типа петляющий волновод. Дана краткая характеристика конструкции многолучевой ЛБВ, отличающейся от известных ранее увеличенной длиной прямолинейных участков петляющего волновода. Увеличение длины этих участков ЗС позволяет соответственно увеличить в них количество пролётных каналов и электронных потоков в ЛБВ. Результатом таких изменений конструкции ЛБВ является увеличение выходной мощности, КПД и коэффициента усиления ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн.

Ключевые слова: петляющий волновод, замедляющая система, миллиметровый диапазон, лампа бегущей волны

1. Введение

В области современной вакуумной СВЧ электроники особую актуальность получила проблема освоения миллиметрового диапазона длин волн. Усилители мощности радиосигналов этого диапазона могут найти широкое применение в информационно-коммуникационных системах новых поколений, радиоастрономии дальних космических объектов, спектроскопии, диагностики плазмы, бесконтактного контроля качества производства, системах обеспечения безопасности и радиоэлектронной аппаратуре специальных назначений. По оценкам отечественных и зарубежных исследователей, наиболее перспективными усилителями миллиметрового диапазона являются лампы бегущей волны (ЛБВ) с замедляющими системами (ЗС) следующих типов: петляющий волновод, плоская гребенка, встречные штыри и меандр различной конфигурации. При создании мощных ЛБВ непрерывного действия миллиметрового диапазона наиболее сложные проблемы возникают именно при разработке ЗС. Известно, что часть энергии электромагнитных волн (СВЧ-волн) и часть кинетической энергии электронного потока в ЛБВ преобразуется в тепло на внутренних поверхностях ЗС. В миллиметровом диапазоне, по сравнению с сантиметровым, возрастает удельная величина мощности СВЧ потерь относительно мощности отданной электронным потоком электромагнитному полю, что приводит к увеличению количества тепла. Кроме этого, уменьшаются размеры ЗС, что снижает возможности отвода тепла от её деталей к охлаждаемым поверхностям. При увеличении выходной мощности ЛБВ миллиметрового диапазона и снижения возможности отвода тепла от деталей ЗС, возникает опасность их перегрева и снижения надёжности ЛБВ. ЗС типа петляющий волновод, имеют монолитную конструкцию, за счет чего обеспечивается более

эффективная передача тепла от внутренних рабочих поверхностей к внешней поверхности их корпуса, по сравнению с ЗС, содержащих для теплоотвода промежуточные конструктивные элементы. Исследованиям ЗС типа петляющий волновод и ЛБВ с этими ЗС за предыдущие 20 лет посвящено большое количество публикаций. Но большого практического применения ЗС и ЛБВ такого типа пока не получили ни в России, ни за рубежом. В представленной работе анализируются известные достижения и проблемы при проектировании и разработке ЛБВ с ЗС типа петляющий волновод и предлагается решение проблем увеличения выходной мощности, КПД и надёжности приборов этого типа.

2. Обзор известных конструкций ЛБВ

ЗС типа петляющий волновод известны достаточно давно [1-4]. Компания Northrop в конце 80-х годов одна из первых разработала ЛБВ с полосой усиления 40—54 ГГц при выходной мощности более 100 Вт и фокусировке электронного пучка магнитной системой типа МПФС [4]. На сегодняшний день продолжают активные разработки подобных ЛБВ. Известны конструкции, способные показывать более 100 Вт импульсной выходной мощности в миллиметровом диапазоне длин волн [5]. Приведённые в этой работе экспериментальные данные получены при исследовании экспериментального образца ЛБВ в импульсном режиме работы при длительности импульсов, составляющих 10% от периода следования импульсов. Полученные результаты можно считать уникальными: В канале ЗС диаметром 0,4 мм, в периодическом магнитном поле, при плотности тока электронного потока более 280 А/см² получено прохождение более 98 % электронного потока в коллектор. При таких параметрах электронного потока и ЗС разработать конструкцию и технологию ЛБВ и освоить их промышленное производство очень сложно. Кроме этого, у таких ЛБВ электронный КПД, отнесённый к выходной мощности ($\eta_{э(вых)} = P_{вых} / P_0$), обычно не превышает 5%, где $P_{вых}$ – выходная мощность ЛБВ на частоте входного сигнала, P_0 – мощность электронного потока на входе в ЗС. Снижение плотности тока электронного потока в ЗС до величины не более 100 А/см² может существенно сократить проблемы разработки и производства таких ЛБВ.

Известны предложения частичного решения проблемы повышения КПД и выходной мощности в ЛБВ миллиметрового диапазона с ЗС типа петляющий волновод. Для этого предлагаются ЗС типа петляющий волновод для двух- и трёхлучевых ЛБВ.

В работе [6] проведено сравнение двухлучевой конструкции ЗС типа петляющий волновод с продольным и с поперечным расположением пролетных каналов. Было проведено сравнение режимов передачи и СВЧ потерь двух конструкций ЗС. Результаты моделирования показывают, что ЗС с поперечным расположением пролетных каналов имеет более широкую полосу пропускания, чем ЗС с продольным расположением пролетных каналов. Также авторы определили, что с уменьшением радиуса пролетных каналов улучшаются характеристики передачи и уменьшаются СВЧ потери в ЗС. Компьютерные модели таких ЗС, представленные в [6], здесь показаны на рисунке 1 а1 и 1 а2.

В работе [7] представлены результаты моделирования трехлучевой конструкции ЗС типа петляющий волновод. Длина ЗС составляла 70 периодов. Фокусировка

электронного пучка величиной 12 мА и напряжением 9,55 кВ осуществлялась постоянным магнитным полем величиной 0,57 Т. В результате моделирования выходная мощность составила 21,78 Вт с усилением 33,38 дБ на частоте 0,14 ТГц. Компьютерная модель ЗС, представленная в [7], показана на рисунке 1 б.

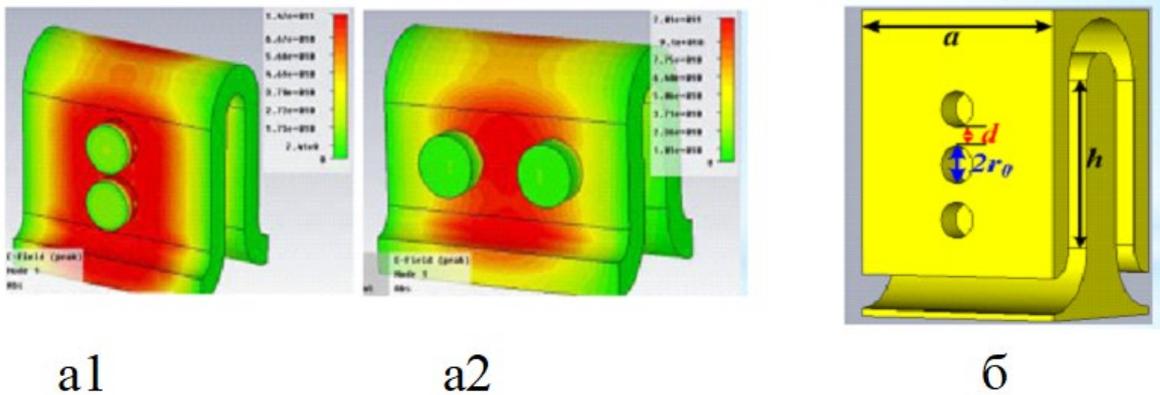


Рисунок 1. Модели ЗС: а1 и а2 - представленные в [6], б – представленная в [7]

3. ЛБВ с модифицированной ЗС типа петляющий волновод

Исследования многолучевых ЗС типа петляющий волновод, в основном имеют положительные результаты. Однако все известные ЗС этого типа на каждом периоде имеют короткий прямолинейный участок волновода с отверстиями в широкой стенке для пролётных каналов. Длина этого прямолинейного участка равна или близка к четверти длины волны СВЧ-сигналов. На таком участке разместить более трёх пролётных каналов в реализуемых конструкциях нет возможности. Это ограничивает возможности увеличения выходной мощности ЛБВ из-за невозможности ещё большего увеличения количества электронных потоков.

АО «НПП «Алмаз» предложена многолучевая ЛБВ с ЗС типа петляющий волновод [8]. Предлагаемая конструкция ЛБВ представлена на рисунке 2. От всех известных аналогов она отличается тем, что длины прямолинейных участков петляющего волновода между его изгибами больше одной четверти длины усиливаемых ЛБВ волн в волноводе. Они равны одному и тому же целому числу N длин полувольт электромагнитной волны в волноводе на средней частоте рабочего диапазона частот (f_{cp}). Имеющиеся в плоских участках широких сторон волновода отверстия образуют для прохождения электронных потоков $k = N \cdot m$ пролётных каналов, где m – целое число, количество пролётных каналов на длине волновода, равной одной половине длины электромагнитной волны на f_{cp} в волноводе. Синхронизм движения в ЗС электромагнитной волны на f_{cp} и электронных потоков обеспечивается при заданных в [8] размерах изгибов волновода, периодов ЗС (P) и напряжения ЗС относительно катода ($U_{ЗС}$). Замедление электромагнитной волны в ЗС таких ЛБВ должно быть равно или близким к отношению длины волны в волноводе к длине полупериода ЗС: $n \approx 2\lambda_{в}/P$, где $\lambda_{в}$ – длина электромагнитной волны в волноводе. При этом условии за один период колебания бегущей в волноводе волны (T) она проходит расстояние, равное $\lambda_{в}$, за это же время электронный поток пройдёт расстояние, равное половине P . Тогда P будет связан с T и $U_{ЗС}$ таким выражением: $P=2T \cdot 5,932 \cdot 10^5 \cdot (U_{ЗС})^{0,5}$, соответственно $n \approx \lambda_{в}/(T \cdot 5,932 \cdot 10^5 \cdot (U_{ЗС})^{0,5})$. Так как в прямоугольном волноводе на основном типе колебаний $\lambda_{в} = \lambda/(1-(\lambda/2a)^2)^{0,5}$, где λ – длина волны в свободном пространстве в вакууме, a – размер широкой стенки

волновода, то $n \approx \lambda / (T \cdot 5,932 \cdot 10^5 \cdot (U_{3C})^{0,5} \cdot (1 - (\lambda/2a)^2)^{0,5})$ или $n \approx c / (5,932 \cdot 10^5 \cdot (U_{3C})^{0,5} \cdot (1 - (\lambda/2a)^2)^{0,5})$, где c – скорость света в вакууме.

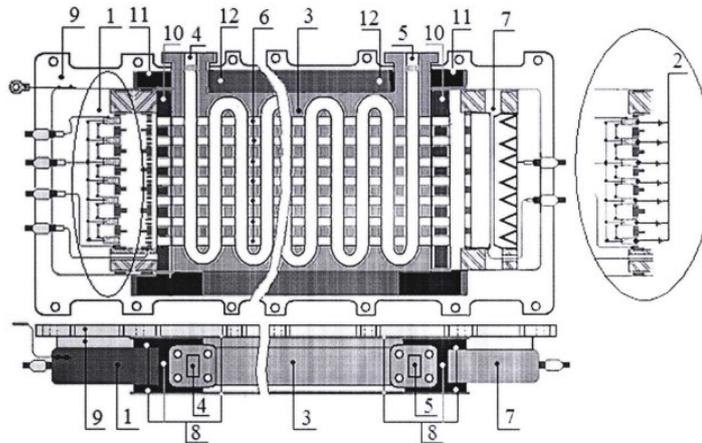


Рисунок 2. Конструкция многолучевой ЛБВ: 1 -многолучевая электронная пушка; 2 - катодные эмиттеры; 3 - ЗС типа петляющий волновод; 4 - вход СВЧ-энергии; 5 - выход СВЧ-энергии; 6 - пролетные каналы; 7 - коллектор электронов; 8 - магнитная фокусирующая система; 9 - основание ЛБВ; 10 - полюсные наконечники магнитной фокусирующей системы; 11 - магниты магнитной фокусирующей системы; 12 - магнитопровод магнитной фокусирующей системы.

Предлагаемая конструкция многолучевой ЛБВ с ЗС типа петляющий волновод позволяет увеличить количество электронных потоков и их суммарную мощность и соответственно увеличить выходную мощность и коэффициент усиления. При последовательном взаимодействии электронных потоков с СВЧ-сигналами, проходящими в участках волновода, поперечно расположенных относительно продольной оси ЛБВ, в электромагнитной волне происходит последовательное накопление энергии, полученной от каждого отдельного электронного потока. Это позволяет увеличить выходную мощность и коэффициент усиления ЛБВ, а также достичь заданного значения коэффициента усиления при меньшем по сравнению с аналогами количестве периодов ЗС в ЛБВ. А это приводит к сокращению размера ЗС и соответствующему уменьшению расстояния между полюсными наконечниками магнитной системы с постоянным магнитным полем. Уменьшение расстояния между полюсными наконечниками магнитной системы, в свою очередь, дает возможность создавать в пролетных каналах ЗС магнитное поле с величиной индукции, достаточной для сопровождения электронных потоков в пролетных каналах ЗС ЛБВ при меньших размерах и массе ее магнитов. Увеличение количества электронных потоков в ЛБВ также позволяет снизить плотность тока электронных потоков в ЗС, что дополнительно позволяет снизить габариты и массу магнитной системы, а также снизить величину параметра пространственного заряда в электронном потоке и, соответственно, улучшить условия повышения $\eta_{э(вых)}$ ЛБВ. Легко также заметить, что в предложенной конструкции ЛБВ, по сравнению с известными ранее, электромагнитная волна проходит на много меньшее расстояние по волноводу между местами взаимодействия с электронным потоком. Это способствует снижению потерь мощности бегущей в волноводе волны и повышению КПД ЛБВ.

4. Заключение

Предложенная АО «НПП «Алмаз» конструкция многолучевой ЛБВ с ЗС типа петляющий волновод, за счет увеличения длин прямолинейных участков петляющего волновода обеспечивает возможность увеличения количества пролетных каналов в ЛБВ. В результате увеличения количества пролетных каналов в ЛБВ снижаются плотности тока и пространственные заряды в электронных потоках, снижаются потери мощности бегущей в волноводе волны, улучшаются условия повышения $\eta_{\text{э(вых)}}$ ЛБВ. Это позволяет увеличить выходную мощность, коэффициент усиления и КПД ЛБВ, достичь заданного значения коэффициента усиления при меньшем по сравнению с аналогами количестве периодов ЗС в ЛБВ, снизить габариты и массу магнитной системы.

Список литературы

1. Na Y. H., Chung S. W., Choi J. J. Analysis of a broadband Q band folded waveguide traveling-wave tube //IEEE transactions on plasma science. – 2002. – Т. 30. – №. 3. – С. 1017-1023.
2. Han S. T., Kim J. I. I., Park G. S. Design of a folded waveguide traveling-wave tube //Microwave and Optical Technology Letters. – 2003. – Т. 38. – №. 2. – С. 161-165.
3. Booske J. H. et al. Accurate parametric modeling of folded waveguide circuits for millimeter-wave traveling wave tubes //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2005. – Т. 52. – №. 5. – С. 685-694.
4. Dohler G. et al. Serpentine waveguide TWT //1987 International Electron Devices Meeting. – IEEE, 1987. – С. 485-488.
5. Fei L. et al. Development of W-band folded waveguide TWT with lowered operating voltage and improved gain flatness //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2020. – Т. 48. – №. 8. – С. 2939-2947.
6. Wenxin Liu, Ke Li1, Yong Wang, Miaomiao Cao Investigation of High- frequency Characteristics of Beam-wave Interaction System of Terahertz Two-beam Folded Waveguide // 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2015. – С. 27-29.
7. ShengMei Y., Wei S., YaJun W. Analysis of D-band fundamental mode multi-beam folded waveguide TWT //2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2015. – С. 1-2.
8. Шалаев П.Д. Многолучевая лампа бегущей волны с замедляющей системой типа петляющий волновод. //Патент Россия № 2021117743, 2021.