

Исследование миниатюрной замедляющей системы на диэлектрической подложке для низковольтной лампы бегущей волны миллиметрового диапазона

Р.А. Торгашов^{1,2}, Н.М. Рыскин^{1,2}, А.Г. Рожнев^{1,2}, А.В. Стародубов^{1,2}, А.А. Сердобинцев², В.В. Галушка², Г.В. Торгашов¹, И.Ш. Бахтев³, С.Ю. Молчанов³

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

²СГУ им. Н.Г. Чернышевского

³АО Центральный научно-исследовательский институт измерительной аппаратуры

Аннотация: В данной работе исследованы характеристики планарных замедляющих систем (ЗС) на диэлектрической подложке для лампы бегущей волны (ЛБВ) миллиметрового диапазона. Проведено моделирование электродинамических параметров ЗС. Изготовлены экспериментальные макеты ЗС с использованием технологий магнетронного напыления и лазерной абляции. Проведено экспериментальное измерение S-параметров ЗС. Экспериментальные результаты и результаты численного моделирования хорошо согласуются между собой. Проведено моделирование выходных характеристик ЛБВ с подобными ЗС.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, замедляющие системы, меандр, диэлектрические подложки

1. Введение

Освоение миллиметрового диапазона длин волн и разработка миниатюрных электровакуумных генераторов и усилителей СВЧ излучения является одной из приоритетных проблем современной вакуумной СВЧ-электроники. Подобные приборы находят различное применение науке и технике, в том числе в современных системах высокоскоростной беспроводной передачи данных нового поколения. Для улучшения выходных характеристик и КПД таких устройств целесообразно использовать пространственно-развитые замедляющие системы и электронные пучки с большим поперечным сечением. Одним из перспективных направлений в данном плане является разработка устройств с планарными ЗС на диэлектрических подложках [1].

Такие ЗС обладают большим замедлением, что в свою очередь приводит к возможности снижения рабочего напряжения. Снижение напряжения приводит к уменьшению продольных размеров устройства и, следовательно, его массы. В последние несколько лет интерес к подобным устройствам увеличился, о чем свидетельствуют публикации зарубежных и российских научных коллективов [2-4].

В работах [5,6] были представлены результаты исследований планарных ЗС типа меандр и встречные штыри на диэлектрических подложках из кварца и поликора, которые предлагается использовать в лампах бегущей волны (ЛБВ) и лампах обратной волны (ЛОВ) средней части миллиметрового диапазона (50-70 ГГц). Были изучены электродинамические параметры предложенных ЗС, проведено исследование стартовых характеристик ЛОВ [7] и выходных характеристик ЛБВ [8]. В данной статье представлены результаты исследований планарной ЗС типа меандр для ЛБВ W-диапазона (75-110 ГГц).

2. Моделирование и экспериментальное исследование ЗС

Была разработана ЗС типа меандр на диэлектрической подложке из кварца ($\epsilon=3,75$). При моделировании электродинамических характеристик в программном пакете COMSOL Multiphysics [9] предполагалось, что один период ЗС помещен в прямоугольный волновод стандартного сечения WR-10. Геометрические размеры ЗС представлены в Таблице. Схематическое изображение ЗС представлено на рисунке 1а. На рисунке 1б представлена фотография ЗС со сканирующего электронного микроскопа.

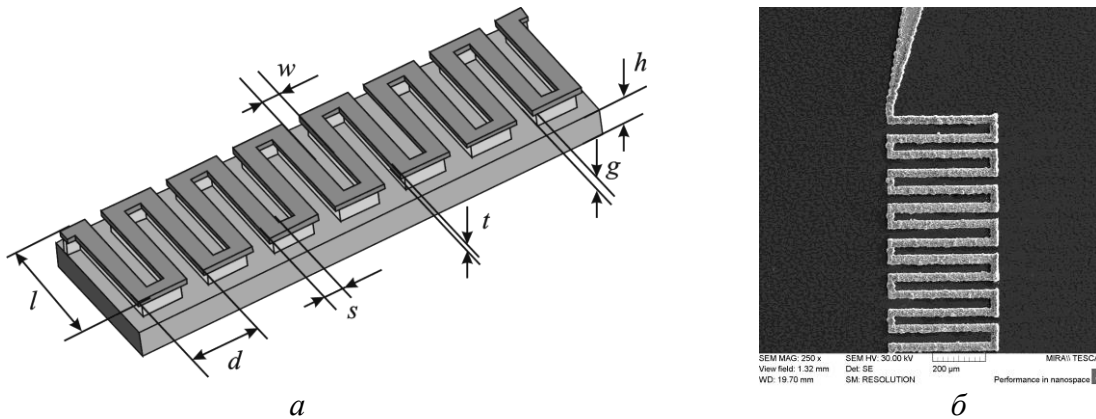


Рисунок 1. (а) – схематичное изображение геометрии ЗС, (б) – фотография ЗС W-диапазона со сканирующего электронного микроскопа

Таблица. Геометрические размеры ЗС

Период, d (мкм)	130
Высота, l (мкм)	450
Ширина штыря, s (мкм)	32.5
Ширина полоска, w (мкм)	32.5
Толщина металлического слоя, t (мкм)	10
Толщина подложки, h (мкм)	500
Размеры волновода (мм ²)	2.4×1.2

На рисунке 2 представлены основные электродинамические параметры ЗС. Видно, что данная ЗС обладает большим замедлением (5-10). Такие значения замедления соответствуют рабочим напряжениям пучка порядка 4-8 кВ. Сопротивление связи превышает 20 Ом на длинноволновом конце диапазона и убывает с ростом частоты.

Для изготовления экспериментальных образцов была разработана новая технология, которая использует методы магнетронного напыления и лазерной абляции [8,10,11]. На первом этапе происходит напыление медного слоя толщиной до 10 мкм на диэлектрическую подложку. Толщина напыляемой пленки контролируется с профилометрических измерений и электронной микроскопии. Далее происходит двумерная лазерная абляция с использованием иттербиевого импульсного волоконного лазера (длина волны лазерного излучения 1064 нм) согласно заданной геометрии ЗС. Преимуществами подобной технологии являются: высокая скорость производства, низкая стоимость по сравнению с технологией фотолитографии, которая использовалась ранее, а также гибкость технологии в плане быстрого внесения изменений в геометрию ЗС.

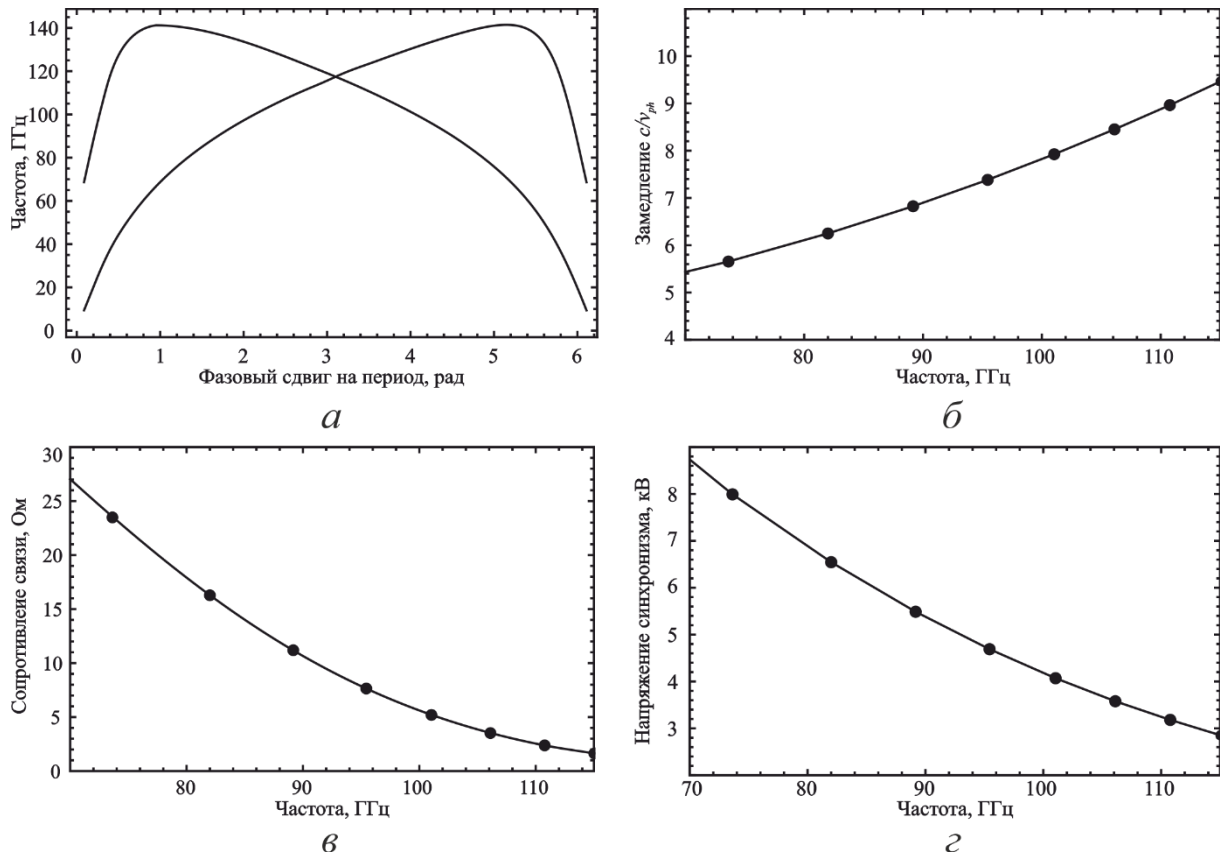


Рисунок 2. Электродинамические параметры: (а) – дисперсионная характеристика ЗС, (б) – зависимость замедления от частоты, (в) – зависимость сопротивления связи, усредненного по поперечному сечению пучка площадью $430 \times 50 \text{ мкм}^2$, (г) – зависимость напряжения синхронизма от частоты.

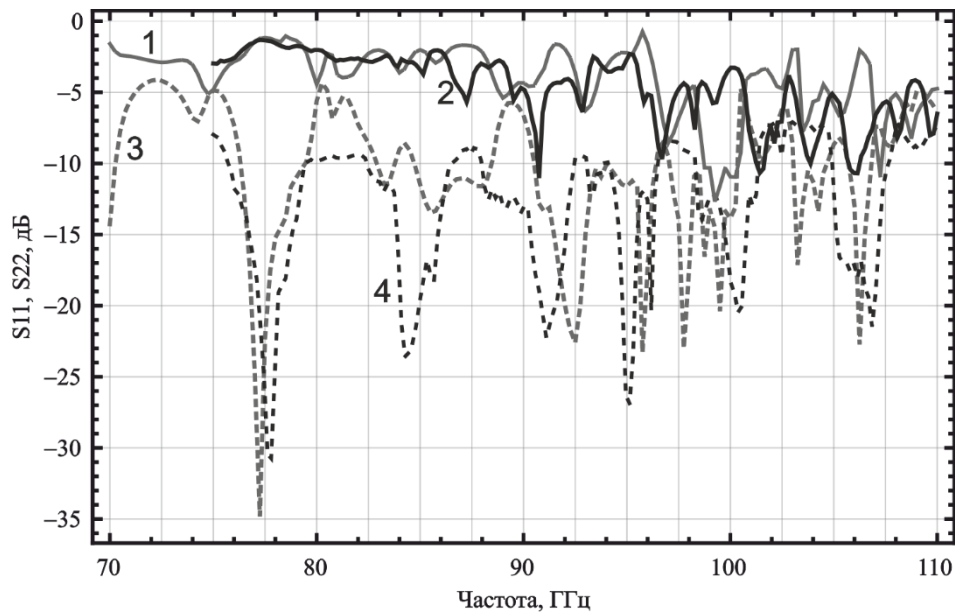


Рисунок 3. Зависимость коэффициентов прохождения (кривые 1,2) и отражения (кривые 3,4) от частоты. (1), (3) – экспериментальные измерения, (2), (4) – компьютерное моделирование.

Было проведено моделирование S -параметров ЗС в пакете COMSOL, для чего была построена полноразмерная модель ЗС с устройствами ввода-вывода энергии. Экспериментальное исследование S -параметров изготовленных макетов было

проведено с использованием векторного анализатора цепей ZVA40 (Rohde&Schwarz) и двух преобразователей частоты ZVA-Z110 (Rohde&Schwarz). Изготовленный образец помещался в прямоугольный волновод стандартного сечения, который с помощью преобразователей частоты подсоединялся к анализатору. Было получено, что в данной ЗС длиной 75 периодов (1 см) ослабление не превышает 10 дБ, а коэффициент отражения составляет не более -5 дБ. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования, которые представлены на рисунке 3.

3. Моделирование выходных характеристик ЛБВ

Было проведено моделирование выходных характеристик ЛБВ с ленточным электронным пучком с площадью поперечного сечения 430×50 мкм² и планарной ЗС типа меандр на диэлектрической подложке из кварца с использованием известной системы нелинейных уравнений ЛБВ [12-15]. Оказалось, что в силу сильной дисперсии полоса усиления оказывается достаточно узкой (7-10 ГГц), однако возможна перестройка полосы усиления с помощью изменения ускоряющего напряжения пучка. При токе пучка 100 мА в линейном режиме работы коэффициент усиления может превышать 20 дБ. Моделирование в нелинейном режиме показывает, что при таких значениях тока выходная мощность может превышать 80 Вт.

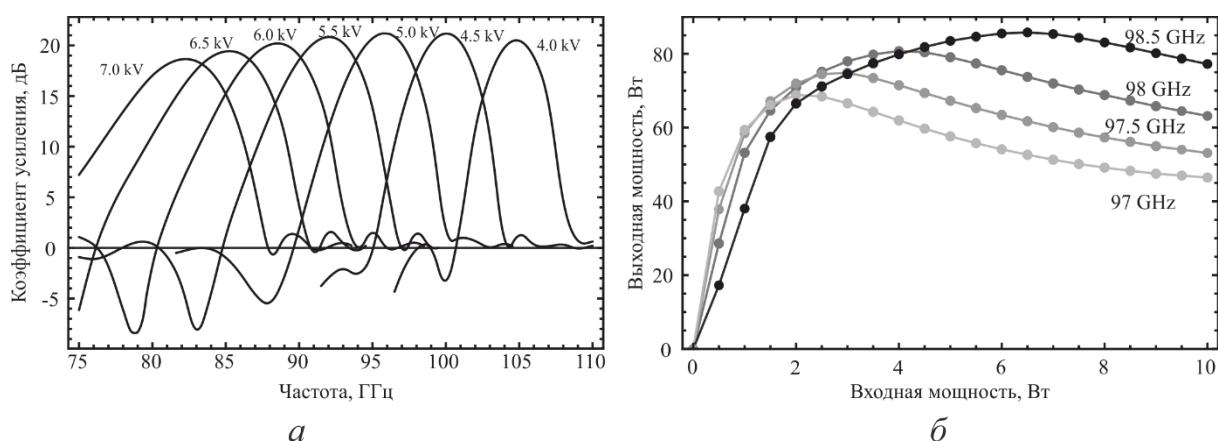


Рисунок 4. (а) – зависимость коэффициента усиления от частоты при различных напряжениях пучка и тока 100 мА, (б) – зависимость выходной мощности от входной при различных частотах входного сигнала при токе пучка 100 мА и напряжении 5 кВ.

Заключение

В данной работе проведено исследование планарной ЗС типа меандр W-диапазона на диэлектрической подложке из кварца. Проведено моделирование ЗС и подобраны оптимальные геометрические размеры. Рассчитаны основные электродинамические характеристики ЗС. Результаты моделирования показывают, что подобные ЗС обладают большим замедлением и поэтому пригодны для использования в низковольтных приборах (ускоряющее напряжение менее 10 кВ).

Проведено моделирование полноразмерной ЗС в программном пакете COMSOL Multiphysics и получены частотные зависимости S-параметров. В рабочей полосе частот ослабление не превышает 10 дБ, а коэффициент отражения принимает значения не более -5 дБ. Изготовлены экспериментальные образцы с использованием технологии лазерной абляции, проведено экспериментальное исследование их S-параметров, результаты которого хорошо согласуются с результатами моделирования.

Проведено моделирование выходных характеристик ЛБВ с предложенной ЗС с ленточным электронным пучком с поперечными размерами 430×50 мкм². Показано, что коэффициент усиления в режиме малого сигнала может достигать 20 дБ. Полоса усиления составляет 7-10 ГГц. Существует возможность ее перестройки за счет изменения рабочего напряжения пучка. Рассчитаны амплитудные характеристики ЛБВ, показано, что выходная мощность в режиме насыщения может превышать 80 Вт.

Так как актуальным является вопрос продвижения в область более высоких частот, в дальнейшем будет разработана ЗС D-диапазона (110-170 ГГц) и исследована возможность изготовления таких ЗС с использованием описанной технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке **Российского научного фонда (проект № 17-12-01160)**.

Список литературы

1. Гуляев Ю.В. Планарные замедляющие системы миниатюрных электровакуумных СВЧ приборов / Гуляев Ю.В. [и др.] // Радиотехника и электроника – 1994 – Т. 39 – № 12 – С. 2049-2058.
2. Ulisse G. W-band traveling wave tube amplifier based on planar slow wave structure / Ulisse G., Krozer V. // IEEE Electron Device Lett. – 2017 – Vol. 38 – No. 1 – P. 126-129.
3. Wang S. A microfabricated V-shaped microstrip meander-line slow-wave structure / Wang S., Aditya S. // Abstracts of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2017) – 24-26 April 2017 – London, United Kingdom
4. Galdetskiy A. New slow wave structure for W-band TWT / Galdetskiy A., Rakova E // Abstracts of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2017)– 24-26 April 2017– London, United Kingdom.
5. Benedik A.I. Study of electrodynamic parameters of the planar meander slow-wave structures for THz band traveling wave tubes / Benedik A.I. [et al.] // Abstracts of the Sixteenth IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2015) – April 27-29, 2015 – Beijing, China.
6. Бенедик А.И. Разработка планарных замедляющих систем на диэлектрических подложках для приборов вакуумной микроэлектроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазона / Бенедик А.И. [и др.] // Радиотехника – 2016 – № 7 – С. 47-52.
7. Торгашов Р.А. Исследование миниатюрного низковольтного генератора обратной волны миллиметрового диапазона с планарной замедляющей системой / Торгашов Р.А., Бенедик А.И., Рыскин Н.М. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика – 2017 – Т. 25 – № 5 – С. 35–46.
8. Ryskin N.M. Planar microstrip slow-wave structure for a low-voltage V-band traveling-wave tube with a sheet electron beam / Ryskin N.M. [et al.] // IEEE Electron Device Lett. – 2018 – Vol. 39 – No. 5 – P. 757-760.
9. Comsol Multiphysics Engineering Simulation Software. COMSOL Inc., Burlington, MA USA. <http://www.comsol.com/products/multiphysics/>
10. Starodubov A. V. A novel microfabrication technology of planar microstrip slow-wave structures for millimeter-band traveling-wave tubes / Starodubov A. V. [at al.] // 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) – 2018 – Monterey, CA – pp. 333-334
11. Starodubov A. V. Study of electromagnetic parameters of a V-band planar meander slow-wave structure / Starodubov A. V. [at al.] // // 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) – 2018 – Monterey, CA – pp. 421-422
12. Пирс Дж. Лампа с бегущей волной. / Пирс Дж. М.: Сов. радио. 1952.
13. Цейтлин М.Б. Лампа с бегущей волной: Вопросы теории и расчета. / Цейтлин М.Б., Кац А.М. М.:Сов. радио, 1964.
14. Трубецков Д.И. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2 т. Т. 1. / Трубецков Д.И., Храмов А.Е. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003. 496 с.
15. Кац А.М. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. / Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А. М.: «Сов. радио». 1975. 296 с.