

Теоретическое и экспериментальное исследование миниатюрной планарной замедляющей системы на диэлектрической подложке для лампы бегущей волны W -диапазона

© Р.А. Торгашов,^{1,2} Н.М. Рыскин,^{1,2} А.Г. Рожнев,^{1,2} А.В. Стародубов,^{1,2} А.А. Сердобинцев,² А.М. Павлов,² В.В. Галушка,² И.Ш. Бахтеев,³ С.Ю. Молчанов⁴

¹ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 410019 Саратов, Россия

² Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

³ АО «Центральный научно-исследовательский институт измерительной аппаратуры», 410012 Саратов, Россия

⁴ Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия
e-mail: torgashovra@gmail.com

Поступило в Редакцию 2 августа 2019 г.

В окончательной редакции 2 августа 2019 г.

Принято к публикации 20 октября 2019 г.

Представлены результаты исследования миниатюрной планарной замедляющей системы (ЗС) типа меандр для лампы бегущей волны W -диапазона. Проведено компьютерное моделирование электродинамических параметров ЗС. Описана новая технология изготовления планарных микрополосковых ЗС с помощью лазерной абляции. Проведено экспериментальное исследование S -параметров изготовленных образцов ЗС. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами трехмерного компьютерного моделирования. Проведены расчеты выходных характеристик лампы бегущей волны с ленточным электронным пучком и планарной ЗС.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, меандр, замедляющая система, диэлектрическая подложка.

DOI: 10.21883/JTF.2020.04.49096.294-19

Введение

Разработка и создание миниатюрных электровакуумных приборов когерентного электромагнитного излучения короткой части миллиметрового диапазона длин волн является актуальной и перспективной задачей современной СВЧ-электроники [1,2]. Подобные приборы могут найти применение в различных областях науки и техники, в первую очередь, в современных системах беспроводной высокоскоростной передачи данных. Наибольший интерес представляют широкополосные усилители типа лампы бегущей волны (ЛБВ) с выходной мощностью порядка десятков W . С целью повышения мощности и КПД таких устройств целесообразно использование пространственно-развитых замедляющих систем (ЗС) и электронных пучков (ЭП) с большим поперечным сечением, в частности, ленточных. В частности, перспективными представляются планарные ЗС на диэлектрических подложках [3–9]. Они обладают большим замедлением, что позволяет снизить рабочие напряжения, сократить продольные размеры и массу прибора.

В работах [10–12] нами были разработаны планарные ЗС типа встречные штыри и меандр на диэлектрических подложках из кварца в V -диапазоне (50–70 GHz), проведены теоретическое и экспериментальное исследования

их электродинамических параметров. В настоящей работе исследуется возможность разработки подобных ЗС более высокочастотного W -диапазона (75–110 GHz).

1. Моделирование электродинамических параметров замедляющих систем

На рис. 1 представлено схематическое изображение ЗС типа меандр на диэлектрической подложке. Замедляющая система помещена в прямоугольный волновод стандартного сечения WR-10. Размеры структуры указаны в таблице. Предполагается, что замедленная электромагнитная волна в такой системе взаимодействует с ленточным электронным пучком, летящим на расстоянии a от поверхности металла.

Моделирование электродинамических параметров замедляющей системы проводилось в программном пакете COMSOL Multiphysics [13]. Рассматривается один период ЗС, а на границы системы вдоль продольного направления накладываются периодические граничные условия Флоке. В качестве материала для подложки выбран кварц, диэлектрическая проницаемость составляет $\epsilon = 3.75$.

Геометрические размеры ЗС

Геометрический параметр	Значение
Период, $d, \mu\text{m}$	130
Ширина меандра, $l, \mu\text{m}$	450
Ширина полоска, $w, \mu\text{m}$	32.5
Толщина металлического слоя, $t, \mu\text{m}$	5
Толщина подложки, $h, \mu\text{m}$	500
Размеры волновода, μm^2	2.4×1.2

На рис. 2, *a* представлена дисперсионная характеристика ЗС. Видно, что она состоит из двух симметричных ветвей, которые смыкаются на π -виде колебаний. Этот факт объясняется наличием в системе скользящей плоскости симметрии (см., например, [14,15]). Для использования в ЛБВ-усилителе необходимо использовать ту ветвь характеристики, которая обладает нормальной дисперсией.

Данная ЗС обладает большим замедлением ($n = c/v_{ph} = 5-10$). Такие значения замедления соответствуют рабочим напряжениям пучка порядка 4–8 кВ. Зависимость напряжения синхронизма от частоты представлена на рис. 2, *b*. Штриховой линией на рис. 2, *a* показана дисперсионная характеристика пучка при напряжении 5 кВ.

На рис. 2, *c* приведена частотная зависимость сопротивления связи для рабочей пространственной гармоники. Оно усреднялось по поперечному сечению пучка $430 \times 50 \mu\text{m}$. При этом считалось, что пучок летит на расстоянии $a = 75 \mu\text{m}$ от поверхности ЗС. Сопротивление связи превышает 20Ω на длинноволновом конце диапазона и убывает с ростом частоты. Для обратной гармоники сопротивление связи принимает значения на 1–2 порядка меньше (ср. [15]), поэтому при дальнейшем моделировании выходных характеристик ЛБВ (см. разд. 4) учитывалась только прямая гармоника.

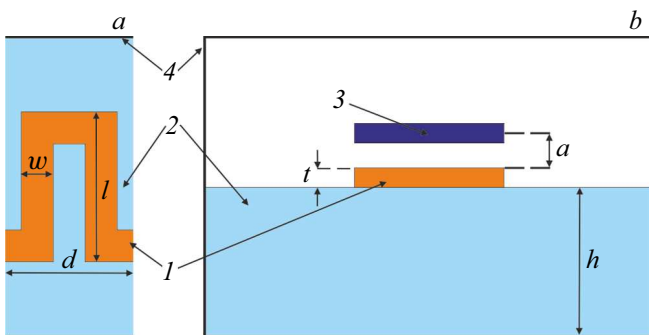


Рис. 1. Схематическое изображение ЗС типа меандр на диэлектрической подложке: *a* — вид сверху, *b* — вид сбоку; 1 — меандр, 2 — подложка, 3 — электронный пучок, 4 — волновод.

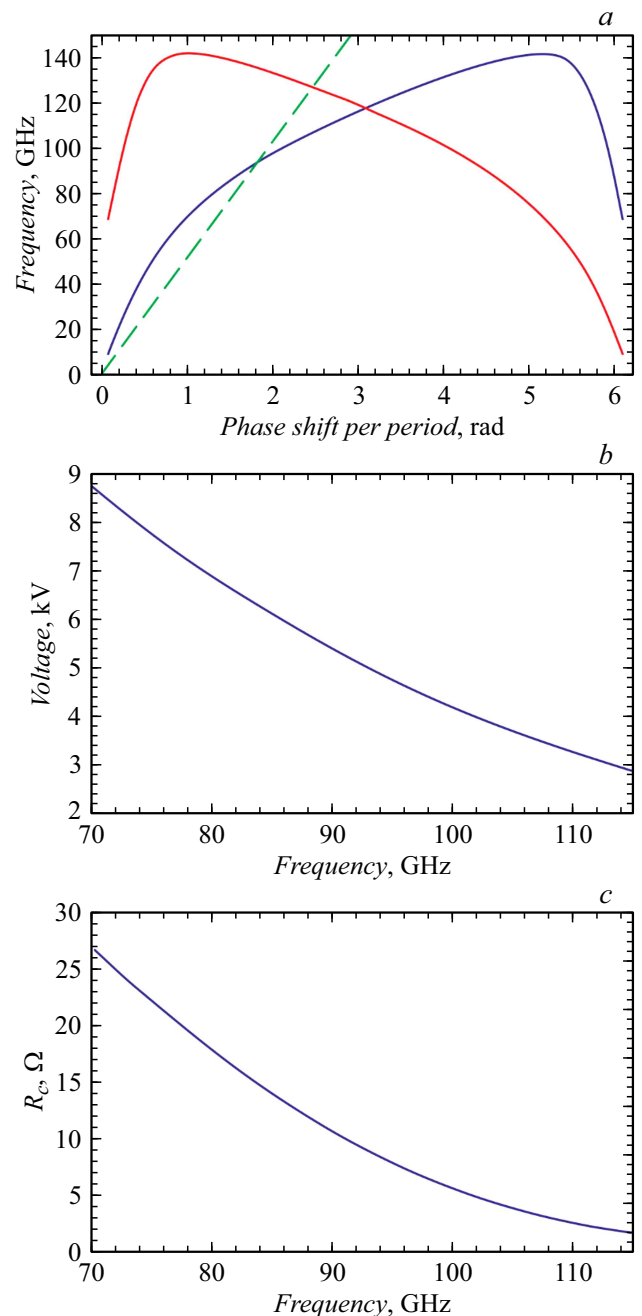


Рис. 2. Электродинамические параметры ЗС W-диапазона: *a* — дисперсионная характеристика (штриховой линией показана дисперсионная характеристика пучка при напряжении 5 кВ); *b* — зависимость напряжения синхронизма от частоты; *c* — зависимость усредненного сопротивления связи от частоты.

2. Технология изготовления

Ключевой проблемой создания устройств коротковолнового диапазона является изготовление электродинамических структур. С ростом частоты геометрические параметры структур уменьшаются пропорционально рабочей длине волны и могут достигать микронных раз-

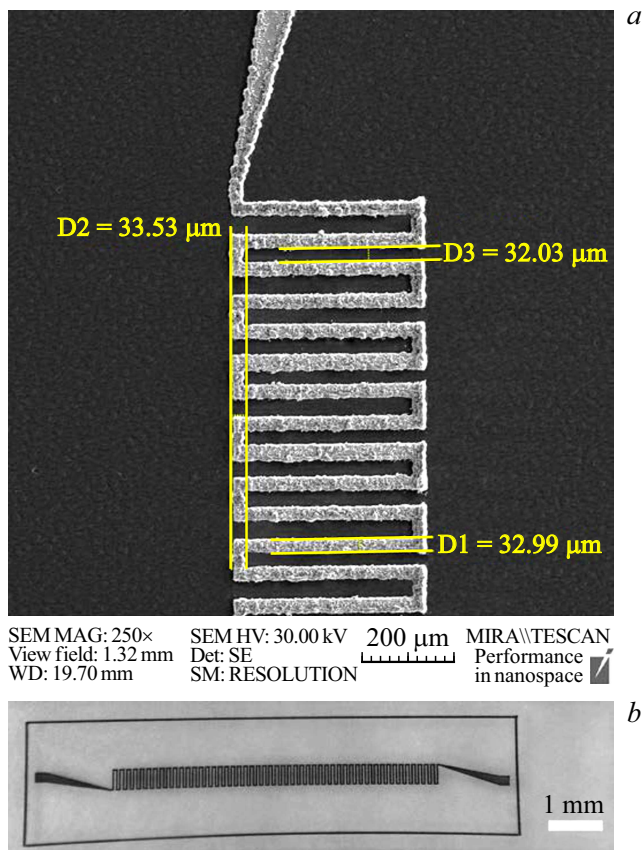


Рис. 3. *a* — изображение части изготовленной замедляющей системы, полученное со сканирующего электронного микроскопа; *b* — фотография изготовленной замедляющей системы с оптического микроскопа.

меров. Для изготовления миниатюрных ЗС используются технологии, основанные на фотолитографии и ее разновидностях (LIGA, UV-LIGA), глубокое реактивное ионное травление (DRIE), методы 3D-печати, микро- и нанозерезование с компьютерным управлением (см., например, [2]). Указанные технологии позволяют создавать микроразмерные структуры с прецизионной точностью, однако высокая стоимость и/или чрезвычайная технологическая трудоемкость изготовления структур с их помощью пока не позволяет говорить о переходе даже к мелкосерийному производству.

Авторами настоящей работы предложена оригинальная технология изготовления планарных ЗС на диэлектрических подложках, которая основана на методах магнетронного напыления и лазерной абляции и включает в себя три основных этапа [16,17]. На первом этапе на кварцевую диэлектрическую подложку наносится проводящий слой толщиной порядка $5\ \mu\text{m}$ с помощью технологии магнетронного напыления с использованием мишени из бескислородной меди (марка МБЧ, чистота 99.997%). Толщина напыляемой пленки контролировалась с помощью методов электронной сканирующей микроскопии и профилометрических измерений.

На следующем этапе происходит формирование рельефа ЗС с помощью лазерной абляции согласно заданной геометрии. Для этого используется коммерчески доступная установка прецизионной лазерной обработки „МиниМаркер-2“, оснащенная иттербиевым импульсным волоконным лазером (длина волны лазерного излучения $1064\ \text{nm}$). Выходной пучок со сверхгауссовым распределением мощности фокусировался в пятно диаметром $25\ \mu\text{m}$ на медную поверхность. Параметры лазерной абляции для изготовления ЗС были следующими: длительность одиночного импульса составляла $100\ \text{ns}$, частота повторения импульсов составляла $20\ \text{kHz}$, скорость движения сканирующего лазерного луча варьировалась в диапазоне $50\text{--}200\ \text{mm/s}$, в тангенциальном направлении разрешение составляло 200 линий на $1\ \text{mm}$, что приводило к перекрытию лазерных импульсов на 20%.

На заключительном этапе производится нарезка подложки на отдельные образцы ЗС заданного размера. Для нарезки используется прецизионный алмазный скрайбер RV-129 (ATV Technologie GmbH) с ручным позиционированием.

На рис. 3, *a* представлена фотография ЗС со сканирующего электронного микроскопа MIRA II Tescan. Сформированная медная пленка однородна по толщине, значение которой составляет порядка $5\ \mu\text{m}$. Отсутствие сколов и других дефектов подтверждает хорошую адгезию. Изображение с оптического микроскопа представлено на рис. 3, *b*. Геометрические размеры были также подтверждены измерениями с использованием профилометра Dektak® 150 Surface Profiler (Veeco).

Преимуществами разработанной и используемой технологии являются: высокая скорость производства, низкая стоимость по сравнению с технологией фотолитографии, которая использовалась авторами ранее [10,11], а также гибкость технологии в плане быстрого внесения изменений в геометрию ЗС. Полный цикл изготовления может занимать менее одного рабочего дня.

3. Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование S -параметров

Экспериментальное исследование S -параметров изготовленных макетов было проведено с использованием векторного анализатора цепей ZVA40 (Rohde&Schwarz) и двух преобразователей частоты ZVA-Z110 (Rohde&Schwarz), которые преобразуют частотный диапазон анализатора в диапазон $75\text{--}110\ \text{GHz}$. Изготовленный образец ЗС длиной $1\ \text{cm}$ (77 периодов ЗС) помещался в прямоугольный волновод, соответствующий стандарту WR-10, который с помощью преобразователей частоты подсоединялся к векторному анализатору цепей.

Результаты измерений представлены на рис. 4. В частотном диапазоне $70\text{--}110\ \text{GHz}$ ослабление не превышает $-10\ \text{dB}$, а коэффициент отражения составляет не

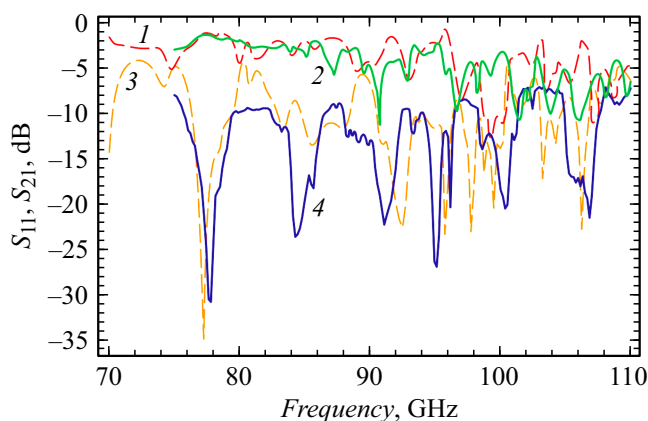


Рис. 4. Частотные зависимости S -параметров: 1, 2 — коэффициент затухания S_{21} , 3, 4 — коэффициент отражения S_{11} . Штрих — численное моделирование, сплошные линии — эксперимент.

более -5 dB. Подобные характеристики представляются приемлемыми для использования в ЛБВ W-диапазона.

Также было проведено сопоставление экспериментальных результатов с результатами моделирования S -параметров ЗС. Для этого в программном пакете COMSOL Multiphysics была построена полноразмерная модель ЗС длиной 1 см с устройствами ввода/вывода (рис. 3, *b*), помещенная в прямоугольный волновод. Полагалось, что в волновод подается гармонический входной сигнал, имеющий поперечную структуру моды TE_{10} . На входе в ЗС волноводная мода преобразуется в замедленную поверхностную электромагнитную волну, на выходе — вновь преобразуется в моду TE_{10} (см. [12]) Такая конфигурация соответствует условиям эксперимента. При моделировании эффективная проводимость медного слоя выбиралась равной $\sigma = 2.75 \cdot 10^7$ S/m, что позволяет достичь хорошего соответствия между экспериментальными и численными результатами.

4. Моделирование выходных характеристик ЛБВ

Расчитанные выше электродинамические параметры ЗС были использованы для моделирования выходных характеристик ЛБВ-усилителя. Расчеты проводились с использованием известных нелинейных уравнений одномерной теории ЛБВ (см., например, [15,18]). Уравнения движения электронов записываются в виде

$$-\frac{d^2\theta}{d\xi^2} = \left[\left(1 + C \frac{d\theta}{d\xi} \right)^2 - \frac{v_0^2}{c^2} \right]^{3/2} \text{Re}(F \exp(i\theta) + F_{sc}), \quad (1)$$

где $\theta = \omega t - \beta_e z$ — фаза электрона, ω — частота сигнала, $\beta_e = \omega/v_0$, v_0 — скорость электронного пучка, $\xi = \beta_e C z$ — безразмерная координата, $C = \sqrt[3]{I_0 R_C / 4V_0}$ — параметр усиления Пирса, I_0 —

постоянный ток электронного пучка, V_0 — ускоряющее напряжение, R_C — сопротивление связи, $F = \frac{E}{2\beta_e V_0 C^2} \exp(-i\beta_e z)$ — безразмерная комплексная амплитуда волны в ЗС, F_{sc} — безразмерная амплитуда поля пространственного заряда, которая определяется выражением

$$F_{sc} = iq \sum_{k=1}^{N_h} \frac{D_k^2 I_k}{k} \exp(ik\theta).$$

Здесь $I_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-ik\theta) d\theta_0$ — безразмерные комплексные амплитуды гармоник тока, θ_0 — начальные фазы электронов, N_h — число учитываемых гармоник поля пространственного заряда, $q = \omega_p^2 / (\omega C)^2$ — параметр пространственного заряда, ω_p — плазменная частота, D — коэффициент депрессии, для которого используем выражение

$$D^2 = 1 - \frac{\sinh(\gamma h_b) \cosh[\gamma h_b (a/h_b - 1)]}{\gamma h_b \cosh(\gamma a)}, \quad (2)$$

справедливое в случае ленточного пучка, движущегося между двумя проводящими плоскостями [15]. В формуле (2) $\gamma = (\omega/c) \sqrt{(c/v_0)^2 - 1}$, h_b — полутолщина электронного пучка, a — расстояние от поверхности ЗС до середины пучка.

Безразмерная комплексная амплитуда поля подчиняется уравнению возбуждения

$$\frac{dF}{d\xi} + irF = -(1 + bC)^2 \frac{2\gamma_0^2}{1 + \gamma_0} I_1, \quad (3)$$

где $r = b - id$, $b = (\beta - \beta_e) / (\beta_e C)$ — параметр несинхронности, β — постоянная распространения волны в системе без электронного пучка, d — параметр холодных потерь, $\gamma_0 = (1 - (v_0/c)^2)^{-1/2}$ — релятивистский масс-фактор Лоренца.

Считается, что электронный поток на входе в систему не модулирован ни по скорости, ни по плотности. Поэтому введенные выше уравнения (1), (3) необходимо дополнить граничными условиями для электронов и безразмерных амплитуд поля, которые имеют вид

$$\theta(\xi = 0) = \theta_0, \quad \left. \frac{d\theta}{d\xi} \right|_{\xi=0} = 0, \quad (4)$$

причем начальные фазы θ_0 равномерно распределены на интервале $[0, 2\pi)$. Также необходимо задать граничное условие для поля

$$F(\xi = 0) = F_m,$$

где F_m — постоянная амплитуда входного сигнала.

Приведенные выше уравнения решаются при помощи традиционного для СВЧ-электроники метода крупных частиц [18].

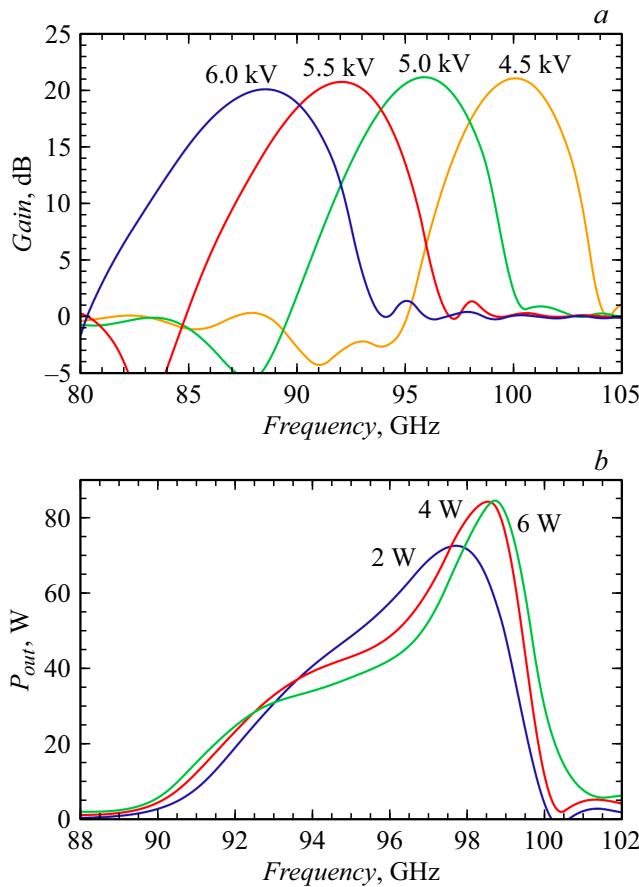


Рис. 5. Выходные характеристики ЛБВ с планарной ЗС на диэлектрической подложке длиной 1 см при токе пучка 100 мА: *a* — коэффициент усиления при различных напряжениях пучка; *b* — зависимости выходной мощности от частоты при напряжении 5 кВ и различных значениях входной мощности.

Для расчета усиления в режиме малого сигнала также использовался линеаризованный вариант уравнений (1)

$$\frac{d^2 I_1}{d\xi^2} + \frac{qD_1^2}{\gamma_0^3} I_1 = i \frac{F}{\gamma_0^3}.$$

Соответственно граничные условия (4) примут вид

$$I_1(\xi = 0) = \left. \frac{dI_1}{d\xi} \right|_{\xi=0} = 0.$$

Расчеты проводились при помощи программы, которая ранее использовалась для моделирования ЛБВ с ленточным пучком и ЗС типа плоской гребенки [15]. Как показано в [15], результаты, полученные с помощью данной программы, достаточно хорошо согласуются с современными универсальными 3D-программными пакетами CST Particle Studio и KARAT.

При моделировании длина системы была выбрана равной 1 см, что соответствует 77 периодам ЗС. Ток пучка составлял 100 мА. На рис. 5, *a* показаны зависимости коэффициента усиления в линейном режиме

от частоты при различных напряжениях пучка. Видно, что усиление может превышать 20 дБ. Поскольку ЗС обладает сильной дисперсией, полоса усиления оказывается достаточно узкой (3–5 GHz по уровню –3 дБ). Однако имеется возможность перестройки полосы усиления с помощью изменения ускоряющего напряжения (ср. [11]). Рис. 5, *b* иллюстрирует нелинейные характеристики усилителя. На нем представлены зависимости выходной мощности P_{out} от частоты при различных значениях мощности входного сигнала P_{in} и напряжении 5 кВ. С ростом P_{in} частота, на которой достигается максимальная выходная мощность, смещается вправо. Насыщение происходит при входной мощности 4–6 Вт в окрестности частоты 99 GHz, при этом выходная мощность составляет примерно 80 Вт, а электронный КПД соответственно около 15%.

Отметим, что при токе пучка порядка 100 мА средняя плотность тока составляет примерно 465 А/см². Хотя это значение является весьма высоким, имеются успешные примеры фокусировки и транспортировки ленточных пучков с такой плотностью тока на расстояния порядка нескольких сантиметров [19,20]. В данном слу-

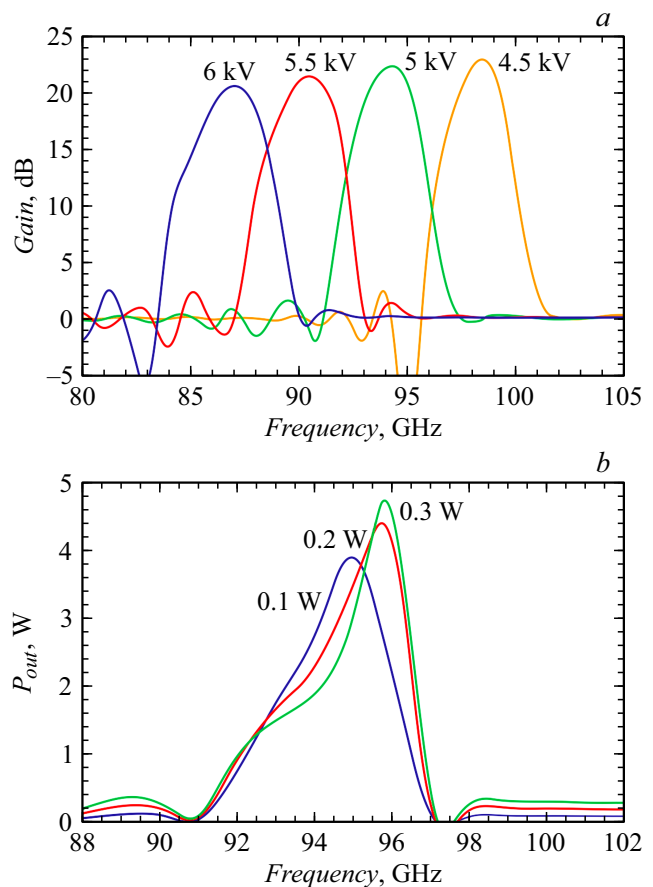


Рис. 6. Выходные характеристики ЛБВ с планарной ЗС на диэлектрической подложке длиной 2 см при токе пучка 10 мА: *a* — коэффициент усиления при различных напряжениях пучка; *b* — зависимости выходной мощности от частоты при напряжении 5 кВ и различных значениях входной мощности.

чае, ввиду большого коэффициента замедления планарной ЗС, длина пространства взаимодействия составляет 1 см, что значительно меньше, чем для ЛБВ с ЗС типа гребенки, которые рассматривались в [15,19,20] (4 см). Таким образом, характерный эффект закручивания краев ленточного пучка в магнитном поле, который может привести к оседанию на поверхность ЗС и подложки, будет выражен в меньшей степени.

Отметим, что недавно с помощью электронных пушек с холодной полевой эмиссией были экспериментально реализованы ленточные пучки толщиной 100–150 μm и током 5–10 мА [21,22]. Поэтому представляет интерес моделирование выходных характеристик ЛБВ при токе пучка 10 мА. Длина системы при этом была увеличена до 2 см (155 периодов ЗС). Результаты моделирования приведены на рис. 6. На рис. 6, *a* представлены частотные зависимости коэффициента усиления при различных значениях ускоряющего напряжения. В данном случае в линейном режиме коэффициент усиления достигает значений 20–23 дБ, однако полоса усиления оказывается несколько меньше, чем в предыдущем случае (2–3 ГГц). На рис. 6, *b* представлены зависимости выходной мощности от частоты при напряжении 5 кВ и различных значениях входной мощности. Максимальная мощность P_{out} достигается при значениях входной мощности 150–300 мВт и составляет 4–5 Вт. Насыщение в данном случае происходит в окрестности частоты 96 ГГц.

Заключение

В работе представлены результаты исследования планарной ЗС типа меандр на диэлектрической подложке из кварца в W -диапазоне (70–110 ГГц). Проведено компьютерное моделирование в программном пакете COMSOL Multiphysics, которое позволило определить основные электродинамические параметры ЗС. Она обладает большим замедлением, вследствие чего напряжение синхронизма в рабочем диапазоне частот лежит в пределах 4–6 кВ.

Представлена новая технология изготовления подобных электродинамических структур, основанная на методе магнетронного напыления и методе лазерной абляции. Преимуществами данной технологии является ее низкая стоимость, высокая скорость производства и технологическая гибкость. Изготовлены экспериментальные образцы ЗС и проведено исследование их S -параметров с помощью векторного анализатора цепей. Также проведено моделирование S -параметров для полноразмерной модели ЗС. Численные и экспериментальные результаты хорошо согласуются друг с другом.

На основе полученных результатов проведено численное моделирование выходных характеристик ЛБВ с ленточным электронным пучком. При токе пучка 100 мА и длине ЗС 1 см коэффициент усиления в линейном режиме может превышать 20 дБ, а выходная мощность

в режиме насыщения достигает 80 Вт. Хотя ввиду сильной дисперсии ЗС полоса усиления достаточно узкая, имеется возможность ее перестройки при изменении ускоряющего напряжения. Также рассмотрено усиление в ЛБВ при токе пучка 10 мА, который может быть получен в электронной пушке с полевой эмиссией. При увеличении длины ЗС до 2 см коэффициент усиления также превышает 20 дБ, а выходная мощность достигает 5 Вт.

Полученные результаты позволяют утверждать, что разработанная и исследованная ЗС перспективна для использования в миниатюрных низковольтных ЛБВ W -диапазона средней мощности.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Srivastava V.* // J. Phys. Conf. Ser. 2008. Vol. 114. N 1. P. 012015. DOI 10.1088/1742-6596/114/1/012015
- [2] *Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J.H., Temkin R.J.* // IEEE Tr. Thz Sci. Tech. 2011. Vol. 1. N 1. P. 54–75. DOI: 10.1109/THZ.2011.2151610
- [3] *Гуллев Ю.В., Жбанов А.И., Захарченко Ю.Ф., Нефедов И.С., Синуцын Н.И., Торгашов Г.В.* // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 12. С. 2049–2058.
- [4] *Ulisse G., Krozer V.* // IEEE Electr. Device Lett. 2017. Vol. 38. N 1. P. 126–129. DOI: 10.1109/LED.2016.2627602
- [5] *Shen F., Wei Y.-Y., Yin H.-R., Gong Y.-B., Xu X., Wang Sh., Wang W.-X., Feng J.-J.* // IEEE Tr. Plasma Sci. 2012. Vol. 40. N 2. P. 463–469. DOI: 10.1109/TPS.2011.2175252
- [6] *Sumathy M., Augustin D., Datta S.K., Christie L., Kumar L.* // IEEE Tr. Electr. Devices 2013. Vol. 60. N 5. P. 1769–1775. DOI: 10.1109/TED.2013.2252179
- [7] *Bai N., Feng C., Liu Y., Fan H., Shen C., Sun X.* // IEEE Tr. Electr. Devices 2017. Vol. 64. N 7. P. 2949–2954. DOI: 10.1109/TED.2017.2706368
- [8] *Galdetskiy A., Rakova E.* // Proc. of the 8th IEEE Int. Vacuum Electron. Conf. (IVEC 2017). London, UK, 2017. DOI: 10.1109/IVEC.2017.8289680
- [9] *Wang S., Aditya S., Xia X., Ali Z., Miao J.* // IEEE Tr. Electr. Device. 2018. Vol. 65. N 6. P. 2142–2148. DOI: 10.1109/TED.2018.2798575
- [10] *Бенедик А.И., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Синуцын Н.И., Торгашов Г.В., Шалаев П.Д.* // Радиотехника. 2016. № 7. С. 47–51.
- [11] *Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Torgashov R.A.* // Proc. of the 18th IEEE Int. Vacuum Electron. Conf. (IVEC 2017). London, UK, 2017. DOI: 10.1109/IVEC.2017.8289499

- [12] *Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Benedik A.I., Torgashov R.A., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I.* // IEEE Electr. Device Lett. 2018. Vol. 39. N 5. P. 757–760.
DOI: 10.1109/LED.2018.2821770
- [13] Электронный ресурс. Режим доступа:
<https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics>
- [14] *Силин Р.А.* Периодические волноводы. М.: Фазис, 2002. 438 с.
- [15] *Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Fedotov A.E., Mishakin S.V., Ginsburg N.S.* // IEEE Tr. Electr. Device. 2018. Vol. 65. N 6. P. 2129–2134.
DOI: 10.1109/TED.2017.2787960
- [16] *Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Galushka V.V., Mitin D.M., Ryskin N.M.* // Proc. of the 2018 IEEE Int. Vacuum Electron. Conf. (IVEC). Monterey, CA, 2018. P. 333–334. DOI: 10.1109/IVEC.2018.8391512
- [17] *Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Galushka V.V., Ryabukho P.V., Ryskin N.M.* // Proc. of the 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). Toyama, Japan, 2018. P. 506–509.
DOI: 10.23919/PIERS.2018.8597953
- [18] *Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А.* Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. М.: Сов. радио, 1975. 296 с.
- [19] *Baig A., Gamzina D., Kimura T., Atkinson J., Domier C., Popovic B., Himes L., Barchfeld R., Field M., Luhmann N.C.* // IEEE Tr. Electr. Device 2017. Vol. 64. N 5. P. 2390–2397. DOI: 10.1109/TED.2017.2682159.
- [20] *Field M., Kimura T., Atkinson J., Gamzina D., Luhmann N.C., Stockwell B., Grant T.J., Griffith Z., Borwick R., Hillman C., Brar B., Reed T., Rodwell M., Shin Y.-M., Barnett L.R., Baig A., Popovic B., Domier C., Barchfield R., Zhao J., Higgins J.A., Goren Y.* // IEEE Tr. Electr. Device. 2018. Vol. 65. N 6. P. 2122–2128. DOI: 10.1109/TED.2018.2790411
- [21] *Burtsev A.A.* // Electron. Lett. 2018. Vol. 54. N 13. P. 839–840. DOI: 10.1049/el.2018.0922
- [22] *Бурцев А.А., Павлов А.А., Кицюк Е.П., Григорьев Ю.А., Данилушкин А.В., Шумихин К.В.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 11. С. 88–94. DOI: 0.21883/PJTF.2017.11.44701.16570 [*Burtsev A.A., Pavlov A.A., Kitsyuk E.P., Grigor'ev Yu.A., Danilushkin A.V., Shumikhin K.V.* // Tech. Phys. Lett. 2017. Vol. 43. N 11. P. 542–544. DOI: 10.1134/S1063785017060062]