

К 85-ЛЕТИЮ  
Н.И. СИНИЦЫНА

УДК 621.385.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ  
С ПЛАНАРНЫМИ МИКРОПОЛОСКОВЫМИ ЗАМЕДЛЯЮЩИМИ  
СИСТЕМАМИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ**

© 2022 г. Р. А. Торгашов<sup>a, b, \*</sup>, А. В. Стародубов<sup>a, b</sup>, А. Г. Рожнёв<sup>a, b</sup>, Н. М. Рыскин<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019 Российская Федерация

<sup>b</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012 Российская Федерация

\*E-mail: [torgashovra@gmail.com](mailto:torgashovra@gmail.com)

Поступила в редакцию 12.04.2022 г.

После доработки 12.04.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

Приведены результаты разработки и исследования планарных микрополосковых замедляющих систем (ЗС) на диэлектрических подложках для миниатюрных низковольтных ламп бегущей волны (ЛБВ) *O*-типа субтерагерцевого диапазона. Исследованы основные электродинамические характеристики ЗС в форме меандровой линии различных частотных диапазонов (V, W, D). С помощью технологии на основе магнетронного напыления и лазерной абляции изготовлены макеты ЗС и проведено измерение их *S*-параметров. Проведено трехмерное моделирование электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ *V*-диапазона. Показано, что при токе пучка 100 мА и напряжении 5 кВ коэффициент усиления может достигать 33 дБ, а мощность в режиме насыщения 23 Вт.

DOI: 10.31857/S0033849422100138

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач современной электроники является освоение коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Источники когерентного излучения этого диапазона являются весьма перспективными для применения в различных областях современной науки и техники. В частности, наибольшее применение такие устройства могут найти в системах беспроводной высокочастотной передачи данных нового поколения [1]. Особый интерес привлекают миниатюрные приборы вакуумной СВЧ-электроники: лампы бегущей волны (ЛБВ), лампы обратной волны, клистроны [2]. Современные системы передачи информации накладывают определенные требования к используемым генераторам и усилителям: высокие рабочие частоты, миниатюрность, низкие рабочие напряжения. Поэтому в последние годы большое развитие получили ЛБВ с планарными микрополосковыми замедляющими системами (ЗС) на диэлектрических подложках. Подобные ЗС обеспечивают высокие значения коэффициента замедления, что позволяет значительно снизить рабочие напряжения и, соответственно, способствует миниатюризации приборов. Также планарные ЗС являются пространственно-разви-

тыми и позволяют использовать ленточные электронные пучки с большой площадью поперечного сечения, при этом нет необходимости в отдельном формировании пролетного канала в таких структурах.

Планарные ЗС на диэлектрических подложках рассматривались еще в 1970 годы. В работе [3] сообщалось о разработке ЛБВ, которые демонстрировали в *S*-диапазоне (3.1...3.5 ГГц) коэффициент усиления 20 дБ и выходную мощность 2 кВт, а в *X*-диапазоне (9.5...10.5 ГГц) – коэффициент усиления 30 дБ, пиковую мощность 100 Вт и среднюю мощность 10 Вт. В 90-е годы были исследованы [4] планарные ЗС встречно-штыревого, лестничного и меандрового типов, в том числе для приборов миллиметрового диапазона.

В последние годы в связи с развитием освоения миллиметрового диапазона вновь вырос интерес к приборам с планарными ЗС. Подобные исследования проводятся как в России [5–10], так и в зарубежных странах [11–15]. В данной работе представлены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований электродинамических параметров ЗС, а также обсуждаются результаты моделирования режимов усиления в ЛБВ с ленточным электронным пучком.

**Таблица 1.** Геометрические параметры ЗС для различных диапазонов

Параметр	V-диапазон (50...70 ГГц)	W-диапазон (75...110 ГГц)	D-диапазон (110...170 ГГц)
$d$ , мкм	200	130	87
$l$ , мкм	650	450	290
$w$ , мкм	50	32.5	21.75
$H$ , мкм	250	500	250
$W_b \times H_b$ , мкм <sup>2</sup>	650 × 100	450 × 75	290 × 50
$a \times b$ , мм <sup>2</sup>	1.8 × 1.8	2.4 × 1.2	1.6 × 0.8

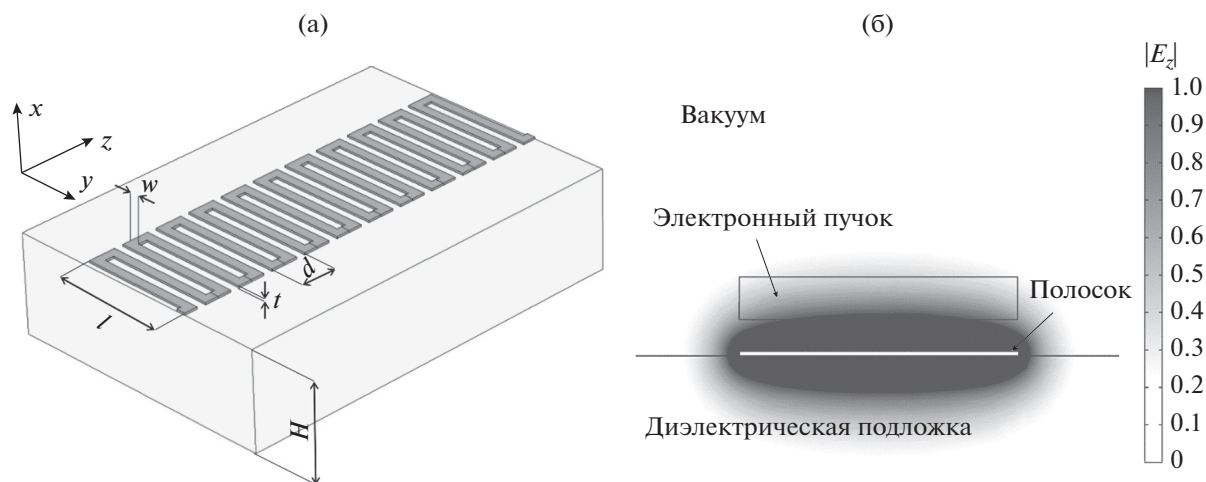
### 1. МИКРОПОЛОСКОВАЯ МЕАНДРОВАЯ ЗС ДЛЯ ЛБВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

На рис. 1а схематически показана ЗС в виде микрополосковой меандровой линии на диэлектрической подложке. Предполагается, что структура размещена в прямоугольном металлическом волноводе с поперечными размерами  $a \times b$ , а ленточный электронный пучок с поперечным сечением  $W_b \times H_b$  распространяется на расстоянии  $h$  над поверхностью меандра. Подложка, на которую нанесен полосок, заполняет всю ширину волновода. В качестве материала подложки выбирался кварц с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 3.75$ .

Были разработаны конструкции ЗС V-, W- и D-диапазонов частот. Размеры ЗС приведены в табл. 1.

Для расчета параметров ЗС использовался универсальный конечно-элементный пакет COMSOL Multiphysics. При расчетах дисперсии и сопротивления связи ЗС рассматривался один период структуры, при этом на плоскостях, перпендикулярных оси  $z$  и отстоящих друг от друга на один период, ставились граничные условия Фло-

ке. На остальных металлических поверхностях ставились либо граничные условия идеально проводящей поверхности, либо граничные условия Леонтовича. В первом случае потери в системе рассчитывались по теории возмущений, во втором случае непосредственно вычислялись комплексные частоты собственных типов колебаний в объеме одного периода и по значениям мнимых частей находился коэффициент пространственного затухания волны при ее распространении вдоль системы. Для всех систем значения затухания, рассчитанные вторым способом, превосходили значения, найденные с использованием теории возмущений. Так, для ЗС V-диапазона расчеты с импедансными граничными условиями показали изменение коэффициента затухания от 0.13 до 0.27 дБ/период при изменении частоты от 50 до 70 ГГц, тогда как по теории возмущений затухание менялось от 0.08 до 0.16 дБ/период. Большая разница между данными, полученными различными методиками, показывает, что к расчету этого параметра для микрополосковых структур малой толщины необходимо подходить с особой тщательностью. Можно также оценить затухание в ЗС, рассчитав S-параметры в системе без пучка



**Рис. 1.** Схема микрополосковой меандровой ЗС (а) и поперечное распределение амплитуды  $z$ -компоненты синхронной пространственной гармоники основной моды на частоте 62 ГГц (б).

с помощью какого-либо другого программного пакета, например, CST Studio Suite. Такое сопоставление показало, что более адекватными представляются результаты, полученные с использованием импедансных граничных условий. Однако определение потерь по расчетам S-параметров дает несколько завышенные значения влияния устройств ввода–вывода.

На рис. 1б приведен пример поперечного распределения  $z$ -компоненты электрического поля прямой пространственной гармоники, синхронной с электронным пучком. Электрическое поле сосредоточено между поперечными полосами меандра и по мере удаления от меандра его напряженность быстро уменьшается. Поэтому чем больше расстояние между пучком и ЗС, тем слабее его взаимодействие с волной.

Результаты расчета основных электродинамических параметров ЗС для ЗС V-диапазона (50...70 ГГц) представлены на рис. 2. На рис. 2а показана дисперсионная диаграмма, т.е. зависимость частоты от фазового сдвига на период структуры  $\varphi$ . Так как в рассматриваемой системе существует скользящая плоскость симметрии (сдвиг структуры на  $d/2$  вдоль оси и последующее отражение в плоскости  $yz$  переводит ее в саму себя), то существуют две ветви дисперсионной характеристики основной моды, которые пересекаются в точке, соответствующей сдвигу фазы  $\varphi = \pi$  [7–10]. Как показывают расчеты [8], сопротивление связи для обратной пространственной гармоники на несколько порядков меньше, чем для прямой, поэтому данную ЗС предпочтительно использовать в ЛБВ-усилителе.

Также на рис. 2а представлена дисперсия незамедленной объемной волны. Размеры ЗС были модифицированы по сравнению с [8] таким образом, чтобы частота отсечки объемной моды (72 ГГц) располагалась за пределами рабочей полосы частот.

Как отмечалось во Введении, одним из главных достоинств меандровой ЗС является возможность получения больших значений коэффициента замедления  $n = c/v_\varphi$ , где  $c$  – скорость света в вакууме,  $v_\varphi$  – фазовая скорость замедленной волны. На рис. 2б приведена зависимость этой величины от частоты (кривая 1), из которой видно, что замедление в V-диапазоне может достигать величин 6...8, т.е. в ЛБВ с такой ЗС обеспечиваются относительно низкие рабочие напряжения 3.5...6.5 кВ.

Также рис. 2б приведена частотная зависимость усредненного по сечению пучка сопротивления связи рабочей (нулевой) пространственной гармоники прямой моды. В этих расчетах расстояние от диэлектрической подложки до нижней границы пучка выбрано  $h = 50$  мкм. Приведенные результаты показывают, что конструкция ЗС обеспечивает высокие значения сопротивления связи в рабочем диапазоне частот.

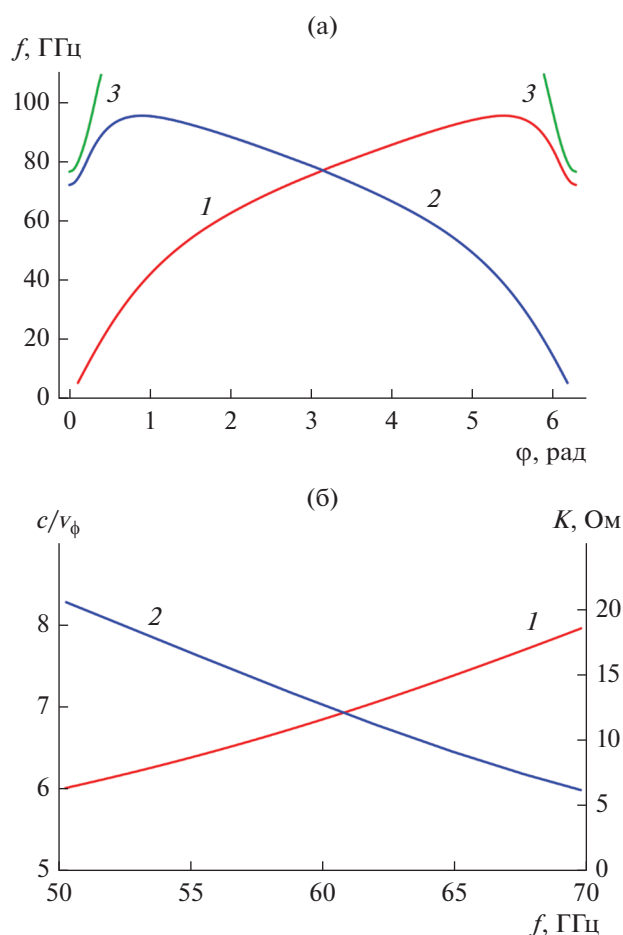


Рис. 2. Электродинамические параметры меандровой ЗС V-диапазона: а – дисперсионная характеристика прямой (1) и обратной (2) замедленной поверхностной волны, а также объемной незамедленной волны (3), б – коэффициент замедления (1) и усредненное сопротивление связи (2) прямой волны.

Аналогичные результаты были получены для меандровых микрополосковых ЗС в более высокочастотных W- и D-диапазонах (рис. 3 и 4). Также изучалось влияние толщины металлического полоска, образующего меандр. На рис. 4 приведены серия кривых, которая отвечает изменению толщины от 2.5 до 10 мкм. При увеличении толщины поле все меньше сосредоточено в подложке, что приводит к уменьшению коэффициента замедления (рис. 4а) и увеличению сопротивления связи (рис. 4б).

## 2. ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Для изготовления микрополосковых ЗС была разработана оригинальная технология, основанная на магнетронном напылении и лазерной абляции [8–10] (подробнее см. [16]). Основными достоинствами данной технологии являются высокая скорость (полный цикл изготовления может

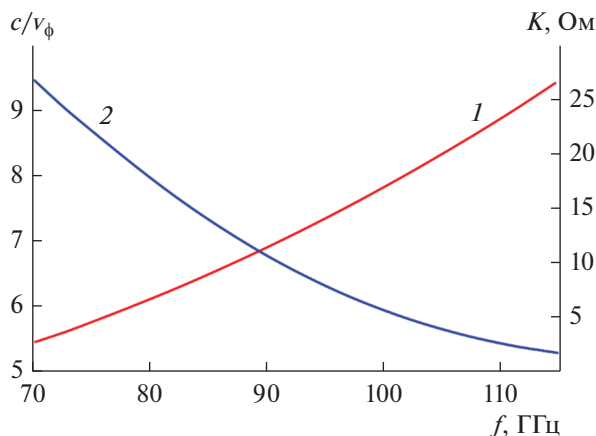


Рис. 3. Зависимости коэффициента замедления (1) и сопротивления связи (2) от частоты для ЗС W-диапазона.

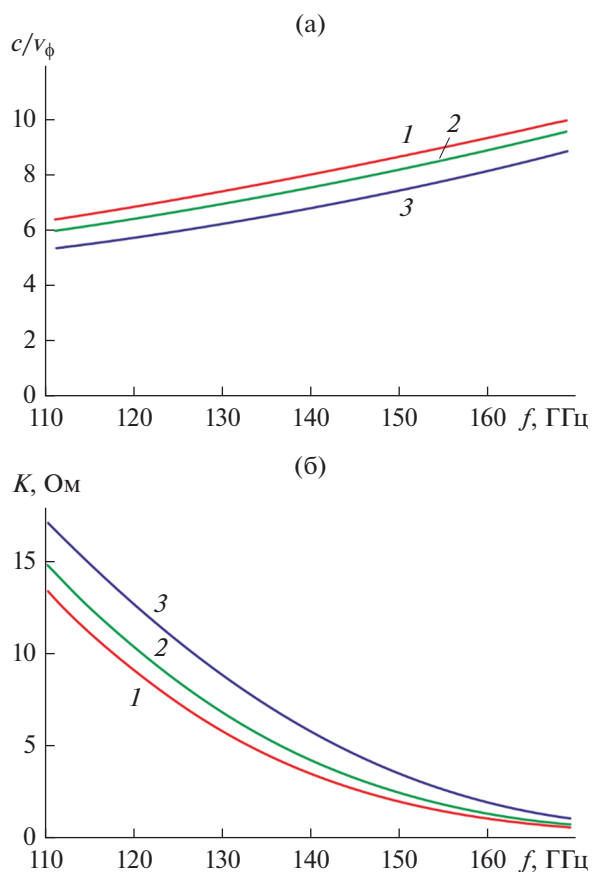


Рис. 4. Зависимости коэффициента замедления (а) и сопротивления связи (б) от частоты для ЗС D-диапазона при различной толщине полоска: 2.5 (1), 5 (2), 10 мкм (3).

занимать менее одного рабочего дня), гибкость, т.е. возможность быстрого внесения изменений в геометрию структуры, а также низкая стоимость по сравнению с технологией фотолитографии,

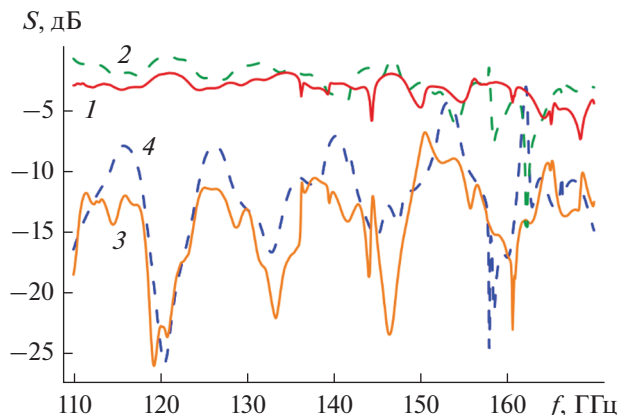


Рис. 5. Экспериментальные (1, 3) и рассчитанные (2, 4) зависимости коэффициента прохождения  $S_{12}$  (1, 2) и коэффициента отражения  $S_{11}$  (3, 4) от частоты для ЗС D-диапазона.

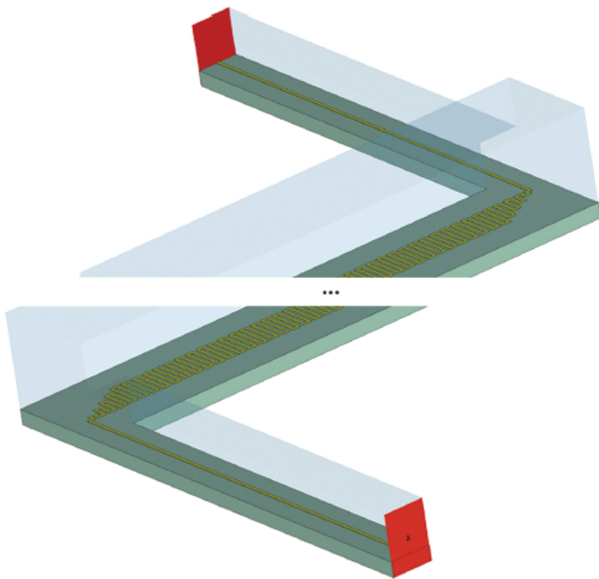
которая часто используется для изготовления планарных ЗС.

С помощью разработанной технологии были изготовлены макеты ЗС V-, W- и D-диапазонов и проведены холодные измерения их потерь на отражение и передачу [8–10]. Измерения проводили с помощью экспериментальной установки на основе векторного анализатора цепей. Изготовленный образец помещали в прямоугольный волновод стандартного сечения, после чего производили измерения S-параметров системы. Предварительно для каждого измерения производилась полная двухпортовая калибровка типа TRL (through reflect line). Измерения в V-диапазоне проводили с использованием установки анализатора цепей PNA N5227A (Keysight Technologies). Для измерений в W-диапазоне использовали анализатор цепей ZVA40 (Rohde & Schwarz), а в D-диапазоне – ZVA-Z110 (Rohde & Schwarz).

На рис. 5 приведены зависимости коэффициента прохождения  $S_{12}$  и коэффициента отражения  $S_{11}$  для ЗС D-диапазона. Структура содержала 50 периодов меандра, т.е. ее длина составила примерно 4.35 мм. В рабочем диапазоне (110...140 ГГц) потери на прохождение составляют примерно 7 дБ/см, а потери на отражение не превышают 10 дБ. Экспериментальные результаты достаточно хорошо согласуются с численными при соответствующем выборе эффективной проводимости металла  $\sigma = 2.75 \times 10^7$  С/м.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Трехмерное численное моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ V-диапазона было проведено с помощью па-

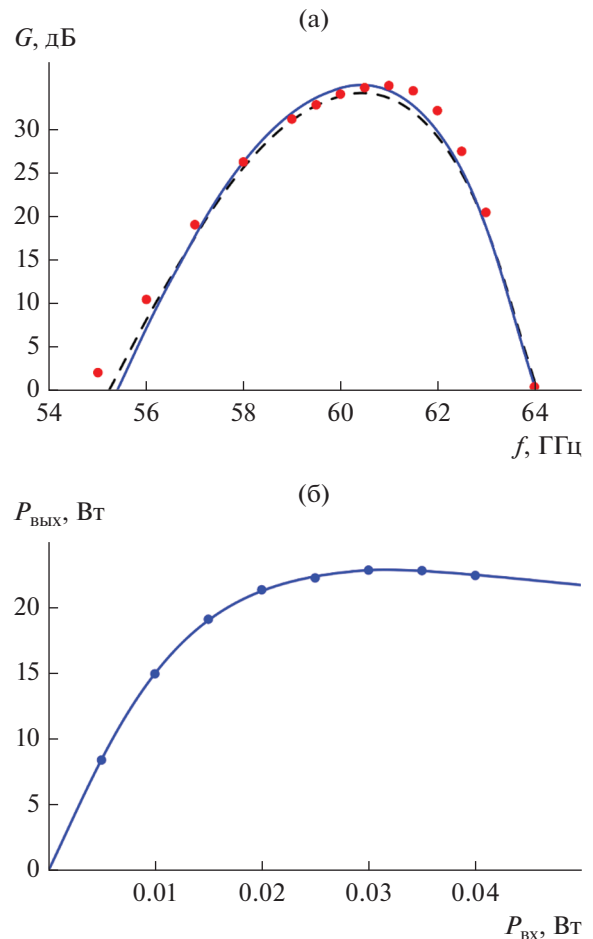


**Рис. 6.** Схематическое изображение полноразмерной ЗС с согласующими устройствами ввода-вывода на концах.

кета CST Studio Suite, который использует метод частиц в ячейке (PIC).

По сравнению с [8] конструкция ЗС была модифицирована: уменьшены толщина подложки и ширина волновода, чтобы исключить преобразование входного сигнала в объемную незамедленную волну. Также была разработана схема согласующих устройств ввода-вывода, которые представляют собой два участка длиной 5 периодов ЗС на концах (рис. 6) с шириной меандровой линии  $l$ , меняющейся по линейному закону. Участки согласования связаны с перпендикулярно направленной микрополосковой линией, через которую осуществляется подача входного сигнала. Регулярная часть структуры состоит из 125 периодов меандра. В расчетах эффективная проводимость меди принималась равной  $\sigma = 2.25 \times 10^7$  С/м, что учитывает шероховатость поверхности. Разработанная система согласования обеспечивает уровень КСВ, не превышающий 1.3 в рабочем диапазоне частот. Однако на частотах выше 72 ГГц становится существенным преобразование входного сигнала в незамедленную объемную моду.

При моделировании считалось, что в пространство взаимодействия инжектируется моноразмерный прямолинейный электронный пучок с током 100 мА и напряжением 5 кВ; размеры поперечного сечения пучка приведены в табл. 1. Плотность тока составляет 154 А/см<sup>2</sup>. Такие интенсивные пучки обычно формируются электронно-оптическими системами с компрессией. Электронная пушка, формирующая ленточный пучок с подобными параметрами, была разработана и экспериментально реализована в [17]. Вопрос



**Рис. 7.** Результаты 3D PIC-моделирования электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ V-диапазона с планарной меандровой ЗС: а — зависимости коэффициента усиления от частоты, полученные в результате PIC-моделирования (кружки) и расчетов по одномерной линейной (сплошная линия) и нелинейной (штриховая линия) теории; б — зависимость выходной мощности от входной на частоте 62 ГГц.

о влиянии реальной структуры многоскоростного пучка на процессы электронно-волнового взаимодействия несомненно важен и будет являться целью дальнейших исследований.

Пучок фокусируется однородным магнитным полем 0.8 Тл, что обеспечивает транспортировку без оседания на поверхность металлического полоска и диэлектрической подложки.

Проведенные расчеты показали, что в режиме малого входного сигнала коэффициент усиления может достигать 33 дБ, а полоса усиления по уровню  $-3$  дБ составляет 2.8 ГГц. На рис. 7а представлена зависимость коэффициента усиления от частоты, рассчитанная при входной мощности 5 мВт. Отметим, что PIC-моделирование достаточно хорошо согласуется с результатами расчетов по традиционной одномерной линейной и нелинейной теории ЛБВ [18, 19]. При этом мак-

симальный коэффициент усиления, полученный с помощью РИС-моделирования, оказывается несколько выше. Это объясняется пульсациями пучка, в результате чего часть электронов проходит ближе к поверхности ЗС, где локальные значения амплитуды поля более высокие.

На рис. 76 приведены зависимости выходной мощности от входной на частоте 62 ГГц. Максимальная выходная мощность около 23 Вт достигается при входной мощности 30...40 мВт. Мощность электронно-волнового взаимодействия при этом составляет 46.2 Вт, что соответствует электронному КПД 9.3%. Не вызывает сомнений, что дальнейшая оптимизация конструкции ЗС, в которой используется многосекционная структура с изменяющимся замедлением, позволит значительно повысить выходную мощность и КПД.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования планарных ЗС типа меандр на диэлектрической подложке для миниатюрных низковольтных ЛБВ V-, W- и D-диапазонов. С использованием программного пакета COMSOL Multiphysics были проведены расчеты электродинамических параметров ЗС, которые показывают, что для таких систем характерными являются высокие значения сопротивления связи (до 20 Ом) и низкие значения рабочих напряжений пучка (3.5...6.5 кВ).

Для изготовленных образцов проведено экспериментальное исследование S-параметров. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами численного моделирования, что свидетельствует о хорошем качестве изготовления таких структур с использованием разработанной технологии. Например, для изготовленных структур D-диапазона в рабочем диапазоне потери на прохождение составляют примерно 7 дБ/см, а потери на отражение не превышают 10 дБ.

Разработана система согласующих устройств ввода–вывода для ЗС V-диапазона, которая позволяет обеспечить уровень КСВ не превышающий 1.3.

Проведено трехмерное численное моделирование электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ V-диапазона. Полученные результаты показывают, что при токе пучка 100 мА и напряжении 5 кВ коэффициент усиления превышает 30 дБ, а выходная мощность может достигать 23 Вт при электронном КПД в 9.3%. Дальнейшее улучшение выходных характеристик возможно с использованием секционирования ЛБВ и оптимизации геометрии ЗС.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-57-12001).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Paoloni C.* // IEEE Commun. Magazine. 2021. V. 59. № 5. P. 102.  
<https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000326>
2. *Григорьев А.Д.* // Актуальные проблемы электронного приборостроения: 13-я Международная науч.-тех. конф. Саратов, СГТУ, 2018. Т. 1. С. 5.  
<https://doi.org/10.1109/APEDE.2018.8542172>
3. *Potter B.R., Scott A.W., Tancredi J.J.* // 1973 Intern. Electron Devices Meet. 1973. P. 521.  
<https://doi.org/10.1109/IEDM.1973.188775>
4. *Гуляев Ю.В., Жбанов А.И., Захарченко Ю.Ф. и др.* // РЭ. 1994. Т. 39. № 12. С. 2049.
5. *Богомолова Е.А., Галдецкий А.В., Духновский М.П. и др.* // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 7. С. 72.  
[https://doi.org/10.18127/j00338486-201907\(10\)-12](https://doi.org/10.18127/j00338486-201907(10)-12)
6. *Бенедик А.И., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М. и др.* // Радиотехника. 2016. № 7. С. 47.
7. *Торгашов Р.А., Бенедик А.И., Рыскин Н.М.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 25. № 5. С. 35.  
<https://doi.org/10.18500/0869-6632-2017-25-5-35-46>
8. *Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Starodubov A.V. et al.* // IEEE Electron Device Lett. 2018. V. 39. № 5. P. 757.  
<https://doi.org/10.1109/LED.2018.2821770>
9. *Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г. и др.* // ЖТФ. 2020. Т. 20. № 4. С. 686.  
<https://doi.org/10.21883/JTF.2020.04.49096.294-19>
10. *Ryskin N.M., Torgashov R.A., Starodubov A.V. et al.* // J. Vacuum Sci. Technol. B. 2021. V. 22. № 1. 013204.  
<https://doi.org/10.1116/6.0000716>
11. *Sumathy M., Augustin D., Datta S. K. et al.* // IEEE Trans. 2013. V. ED-60. № 5. P. 1769.  
<https://doi.org/10.1109/TED.2013.2252179>
12. *Ulisse G., Krozer V.* // IEEE Electron Device Lett. 2017. V. 38. № 1. P. 126.  
<https://doi.org/10.1109/LED.2016.2627602>
13. *Socuéllamos J.M., Dionisio R., Letizia R., Paoloni C.* // IEEE Trans. 2021. V. MTT-69. № 4. P. 2148.  
<https://doi.org/10.1109/MTT.2021.3054913>
14. *Sengele S., Jiang H., Booske J.H. et al.* // IEEE Trans. 2009. V. ED-56. № 5. P. 730.  
<https://doi.org/10.1109/TED.2009.2015416>
15. *Wang S., Aditya S., Xia X. et al.* // IEEE Trans. 2018. V. ED-65. № 6. P. 2142.  
<https://doi.org/10.1109/TED.2018.2798575>
16. *Стародубов А.В., Ножкин Д.А., Расулов И.И. и др.* // РЭ. 2022. Т. 67. № 10. С.
17. *Navrotsky I.A., Burtsev A.A., Emelyanov V.V. et al.* // IEEE Trans. 2021. V. ED-68. № 2. P. 798.  
<https://doi.org/10.1109/TED.2020.3041425>
18. *Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973.
19. *Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А.* Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. М.: Сов. радио, 1975.