

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(5)

Научная статья
УДК 621.385.6

DOI: 10.18500/0869-6632-003191
EDN: HHZBIR

Исследование микрополосковых планарных замедляющих систем для приборов вакуумной микроэлектроники миллиметрового диапазона

Р. А. Торгашов^{1,2}✉, А. Г. Рожнев^{1,2}, Н. М. Рыскин^{1,2}

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

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, Россия

E-mail: ✉torgashovra@gmail.com, rozhnevag@gmail.com, ryskinm@gmail.com

Поступила в редакцию 7.05.2025, принята к публикации 9.07.2025,
опубликована онлайн 14.07.2025, опубликована 30.09.2025

Аннотация. Целью данной работы является исследование электродинамических характеристик планарных замедляющих систем типа меандр на диэлектрической подложке для миниатюрных ламп бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточными электронными пучками. **Методы.** Основным методом является численное моделирование процессов распространения электромагнитных волн в указанных структурах с использованием современных конечно-элементных и конечно-разностных программных пакетов трехмерного полностью электромагнитного моделирования. **Результаты.** Показано, что, помимо основной замедленной волны, в микрополосковой замедляющей системе существуют также быстрые объемные моды, которые могут препятствовать стабильной работе ЛБВ-усилителя. Проведена оптимизация геометрических параметров системы с целью подавления объемных мод в рабочем диапазоне частот. Особенностью указанных систем являются также высокие значения коэффициента затухания для замедленных волн. Приведены результаты моделирования омических потерь с использованием различных численных методов, проведено их качественное и количественное сравнение. **Заключение.** Подробно исследованы электродинамические характеристики миниатюрных планарных замедляющих систем типа микрополосковый меандр на диэлектрической подложке. Исследовано влияние геометрических параметров системы на частоты отсечки объемных и поверхностных мод. Проанализированы основные методы моделирования омических потерь. Показано, что моделирование по теории возмущений и во временной области даёт заниженные значения омических потерь.

Ключевые слова: вакуумная микроэлектроника, планарные замедляющие системы, лампа бегущей волны, дисперсионная характеристика, сопротивление связи, коэффициент затухания, численное моделирование электромагнитных волн, метод конечных элементов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Для цитирования: Торгашов Р. А., Рожнев А. Г., Рыскин Н. М. Исследование микрополосковых планарных замедляющих систем для приборов вакуумной микроэлектроники миллиметрового диапазона // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 5. С. 731–747. DOI: 10.18500/0869-6632-003191. EDN: HHZBIR

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Study of the microstrip planar slow-wave structures for the millimeter-band vacuum microelectronics devices

R. A. Torgashov^{1,2}✉, A. G. Rozhnev^{1,2}, N. M. Ryskin^{1,2}

¹Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS, Russia

²Saratov State University, Russia

E-mail: ✉torgashovra@gmail.com, rozhnevag@gmail.com, ryskinm@gmail.com

Received 7.05.2025, accepted 9.07.2025, available online 14.07.2025, published 30.09.2025

Abstract. The aim of this work is study of high-frequency characteristics of planar meander-line slow-wave structures on dielectric substrates for millimeter-band traveling-wave tubes with sheet electron beam. The main method is numerical simulation of electromagnetic wave propagation processes in the mentioned structures using modern three-dimensional fully-electromagnetic finite-element and finite-difference software simulation packages. Results. For the microstrip slow-wave structure in addition to the main slow-wave mode there are fast volume modes, which can prevent stable regimes of TWT-amplifier operation. The spatial parameters of the structure were optimized to suppress the volume modes in the operating frequency band. High values of the attenuation coefficient of the surface slow-wave modes are also the features of the system. The results of the simulation of the ohmic losses using different numerical methods are presented, their qualitative and quantitative comparison is carried out. Conclusion. The high-frequency characteristics of miniaturized planar microstrip meander-line slow-wave structures on a dielectric substrate are studied in detail. The effect of spatial parameters of the structure on the cut-off frequencies of volume and surface modes is investigated. The main methods of ohmic loss simulation are presented. It is shown that simulation using perturbation theory and time-domain simulation gives underestimated values of ohmic losses.

Keywords: vacuum microelectronic, planar microstrip slow wave structures, traveling wave tube, dispersion, interaction impedance, attenuation coefficient, numerical modeling of the electromagnetic waves, finite element method.

Acknowledgements. This study was carried out within the framework of the state task of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS.

For citation: Torgashov RA, Rozhnev AG, Ryskin NM. Study of the microstrip planar slow-wave structures for the millimeter-band vacuum microelectronics devices. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(5):731–747. DOI: 10.18500/0869-6632-003191

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Одной из важнейших тенденций развития электровакуумных приборов СВЧ является их миниатюризация. В конце 1980-х годов на стыке вакуумной и твердотельной электроники сформировалось целое научное направление — вакуумная микроэлектроника. Более того, в настоящее время вошел в употребление термин «вакуумная наноэлектроника». В нашей стране одним из пионеров этого научного направления является академик Юрий Васильевич Гуляев, который ещё на Первой международной конференции по вакуумной микроэлектронике в Вильямсбурге, США (1988 г.), представил обзорный доклад, посвященный состоянию исследований по проблеме миниатюризации, проводившихся в Советском Союзе (см. [1]).

Миниатюрные аналоги «классических» электровакуумных приборов, таких как лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы обратной волны (ЛОВ), вызывают особый интерес в связи с перспективами освоения миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевого) диапазонов длин волн [2]. Ключевыми требованиями, предъявляемыми к подобным приборам, являются их малая масса и габариты, а также возможность работы при сравнительно низких значениях рабочих напряжений (менее 10 кВ). С этой точки зрения перспективными представляются приборы с электродинамическими структурами в виде планарных микрополосковых замедляющих систем (ЗС) на диэлектрических подложках. Такие структуры способны обеспечить высокие значения

Торгашов Р. А., Рожнев А. Г., Рыскин Н. М.
Известия вузов. ПНД, 2025, т. 33, № 5

замедления, что позволяет сократить длину пространства взаимодействия, что, очевидно, имеет принципиальное значение для миниатюризации. Планарные микрополосковые ЗС являются пространственно-развитыми структурами, в которых можно обеспечить взаимодействие с высокоаспектными ленточными электронными пучками. Кроме того, их конструкция избавляет от необходимости формирования микроразмерного пролетного канала для электронного пучка.

Первые приборы на основе подобных ЗС были созданы еще в 1970-х годах [3]. В 1990-е годы по инициативе Ю. В. Гуляева разработка миниатюрных приборов с планарными ЗС на диэлектрических подложках была начата в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. В этих исследованиях принимал участие коллектив сотрудников под руководством Н. И. Синицына, в том числе Г. В. Торгашов, Ю. Ф. Захарченко, А. И. Жбанов, И. С. Нефедов и другие сотрудники. Ими были предложены и исследованы конструкции встречно-штыревых, лестничных и меандровых ЗС, в том числе миллиметрового диапазона [4].

В последнее десятилетие исследования планарных ЗС значительно активизировались в разных странах (США, Китай, Индия, Великобритания, Германия, Сингапур) в связи с обострением интереса к освоению ТГц-диапазона. Наибольшее внимание уделяется ЗС в виде меандровой линии и её различным модификациям (см., например, [5–11]). Однако возможны и иные конфигурации, например, встречно-штыревые или копланарные структуры [12, 13], структуры типа «кольцо-перемычка» [14] и др. Обзор современного состояния исследований можно найти в недавних монографиях [15, 16]. В том числе работы по данной тематике были возобновлены в СФИРЭ РАН, где совместно с сотрудниками СГУ имени Н. Г. Чернышевского была предложена оригинальная технология изготовления микрополосковых ЗС, основанная на лазерной микрообработке проводящих пленок толщиной несколько микрон, нанесенных на диэлектрическую подложку с помощью магнетронного напыления [5, 17–19]. Очевидными достоинствами разработанной технологии является высокая скорость изготовления, низкая себестоимость и возможность быстро вносить изменения в конструкцию ЗС. Кроме того, магнетронное напыление позволяет наносить проводящие покрытия относительно большой толщины (до 10 мкм). Были изготовлены структуры вплоть до D-диапазона частот (110...170 ГГц), причем экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетными [19].

В настоящее время для исследования электродинамических характеристик ЗС обычно применяются различные коммерческие или свободно распространяемые программные пакеты, в которых реализовано численное решение уравнений Максвелла методами конечных элементов или конечных разностей. Наиболее распространенными являются COMSOL Multiphysics [20], ANSYS HFSS [21] и CST Studio Suite [22]. Они позволяют получить достаточно полную картину распространения электромагнитных волн в различных, в том числе периодических, системах, изучить структуру полей различных мод и другие характеристики. В данной работе приведены результаты исследования электродинамических характеристик микрополосковой меандровой ЗС для миниатюрной ЛБВ V-диапазона (50...70 ГГц). Приведены результаты численного моделирования, исследована структура собственных мод и другие электродинамические характеристики ЗС. Отдельное внимание уделяется корректному учету омических потерь, что в случае тонкопленочных структур представляет достаточно сложную задачу, даже при использовании современных программных пакетов. Также представлено сопоставление с результатами экспериментального исследования ЗС.

1. Особенности электродинамических характеристик меандровой ЗС на диэлектрической подложке

Рассмотрим структуру в виде микрополосковой линии в форме прямоугольного меандра на диэлектрической подложке в прямоугольном волноводе сечением $a \times b$, схема которой представлена на рис. 1. Предполагается, что подложка толщиной h_s изготовлена из кварца ($\varepsilon = 3.75$),

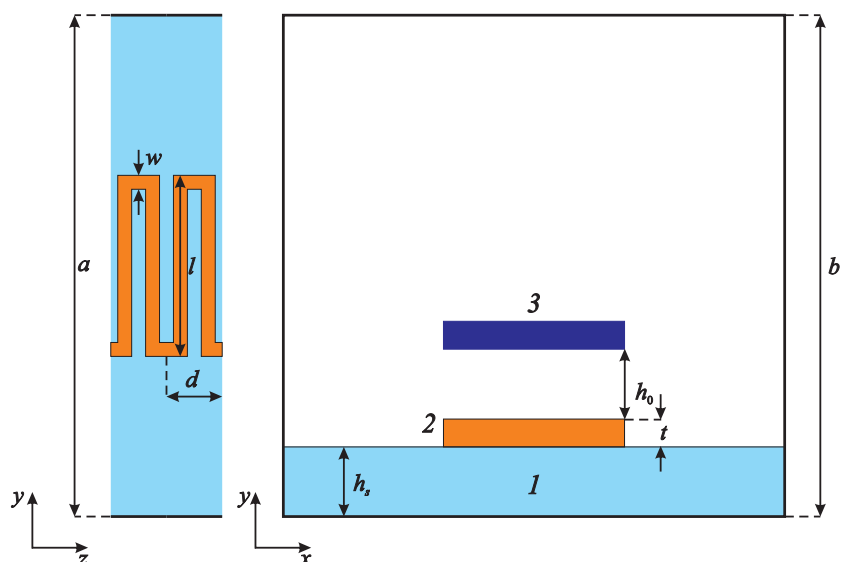


Рис. 1. Схема меандровой ЗС на диэлектрической подложке: 1 — подложка, 2 — меандр, 3 — электронный пучок (цвет онлайн)

Fig. 1. Schematic diagram of the meander-line SWS on a dielectric substrate: 1 — substrate, 2 — meander line, 3 — electron beam (color online)

а её ширина равна ширине волновода. Период и ширина микрополосковой линии были выбраны равным $d = 200$ мкм и $l = 650$ мкм, ширина микрополоска составила $w = d/4 = 50$ мкм, толщина проводящего слоя $t = 1$ мкм.

Моделирование проводилось с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics (результаты расчета дисперсионных характеристик и сопротивления связи хорошо согласуются с данными, полученными с помощью программных пакетов CST Studio Suite и ANSYS HFSS, рассматриваемых в рамках данной работы). На первом этапе исследований предполагалось, что подложка имеет толщину $h_s = 500$ мкм и располагается в прямоугольном волноводе стандартного сечения WR-15 ($a \times b = 3.6 \times 1.8$ мм²), что соответствовало размерам структуры, которая исследовалась экспериментально в работе [5]. На рис. 2, а приведены результаты расчета дисперсионных характеристик ЗС в координатах частота f — сдвиг фазы на период структуры φ .

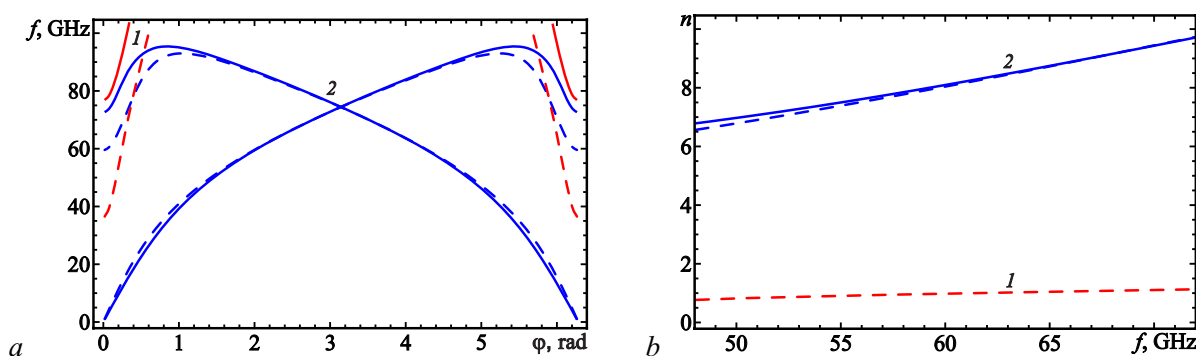


Рис. 2. Дисперсионная характеристика (а) и зависимости коэффициента замедления от частоты (б): 1 — объемные быстрые моды, 2 — поверхностные замедленные моды. Штриховыми линиями показаны зависимости для изначальной конструкции, сплошными — после оптимизации (цвет онлайн)

Fig. 2. Dispersion diagram (a) and slow-wave factor vs. frequency (b): 1 — volume fast modes, 2 — surface slow-wave modes. The dashed lines show the dependencies for the original design, the solid lines show those after optimization (color online)

Анализ собственных мод в такой системе показывает, что существуют две моды, соответствующие замедленной поверхностной волне. На дисперсионной диаграмме соответствующие кривые смыкаются на π -виде колебаний. Это является следствием наличия у системы скользящей плоскости симметрии [23].

Поверхностная волна является замедленной, её поле локализовано вблизи микрополосковой линии, а поперечное волновое число чисто мнимое. На рис. 2, *b* приведена зависимость коэффициента замедления $n = c/v_{ph}$ для прямой пространственной гармоники в рабочем диапазоне частот. Видно, что обеспечивается высокий коэффициент замедления, который в диапазоне 50...70 ГГц составляет 5...9. Соответственно, синхронизм волны с электронным пучком возможен при достаточно низких напряжениях 2...10 кВ. Нижняя частота отсечки у поверхностной моды отсутствует, так же как и у однородной микрополосковой линии.

Помимо медленных поверхностных волн, в рабочем диапазоне частот также может распространяться гибридная объемная мода. Частота отсечки этой моды совпадает с частотой отсечки объемной моды однородной микрополосковой линии и определяется поперечными размерами структуры. Из рис. 2, *b* видно, что объемная мода является незамедленной ($n < 1$). Таким образом, она не взаимодействует с электронным пучком. Однако в устройствах ввода/вывода энергии может иметь место частичная трансформация сигнала в объемную моду, что негативно влияет на согласование. Поэтому целесообразно увеличить частоту отсечки объемной моды, чтобы она лежала выше рабочего диапазона частот.

Исследование влияния поперечных размеров системы на частоты отсечки (частоты 2π -вида колебаний) объемной и поверхностных мод показало, что основной эффект оказывают ширина волновода и толщина диэлектрической подложки. На рис. 3 приведены соответствующие зависимости, из которых видно, что при уменьшении ширины волновода частота отсечки замедленной поверхностной моды практически не меняется, а частота отсечки объемной быстрой моды быстро увеличивается. Уменьшение толщины подложки приводит к увеличению двух указанных частот. В связи с этим в дальнейшем толщина подложки была уменьшена до $h_s = 250$ мкм, а ширина волновода — до $a = 1.8$ мм.

Указанная модификация геометрии приводит к тому, что частота отсечки объемной моды увеличивается до 76 ГГц и находится вне рабочего диапазона частот. В то же время дисперсионные характеристики замедленной моды в полосе частот 50...70 ГГц меняются слабо.

Замедленная волна также обладает явно выраженной продольной компонентой электрического поля, что позволяет обеспечить её взаимодействие с электронным пучком. Важным параметром,

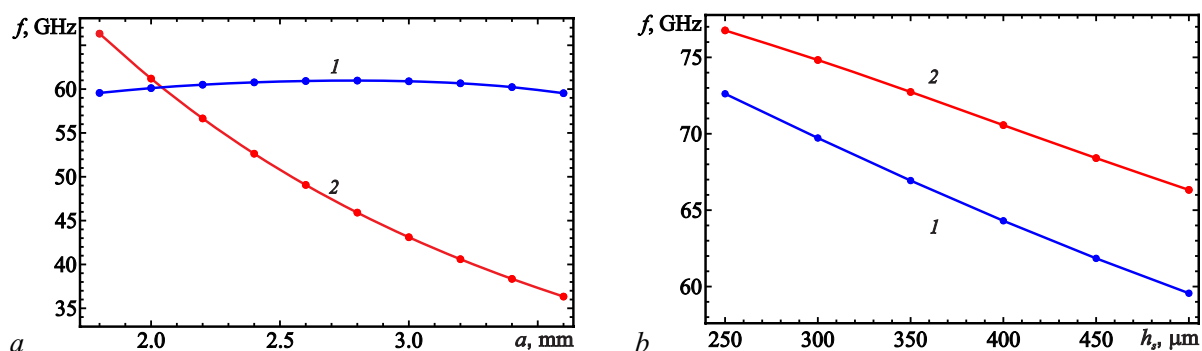


Рис. 3. Зависимость частоты 2π -вида колебаний от ширины волновода (*a*) и от толщины подложки (*b*): 1 — поверхностные замедленные волны, 2 — объемные быстрые моды (цвет онлайн)

Fig. 3. Frequencies of a 2π -type oscillations vs. waveguide width (*a*) and substrate thickness (*b*): 1 — surface slow-wave modes, 2 — volume fast modes (color online)

определяющим эффективность электронно-волнового взаимодействия, является сопротивление связи, которое определяется формулой [23, 24]:

$$K_m = \frac{\overline{|E_{z,m}|^2}}{2\beta_m^2 P}. \quad (1)$$

Здесь

$$E_{z,m} = \frac{1}{d} \int_0^d E_z \exp(i\beta_m z) dz \quad (2)$$

— амплитуда продольной составляющей m -ой пространственной гармоники, с которой взаимодействует ЭП, β_m — постоянная распространения,

$$P = \iint_{s_\perp} S_z dx dy = \frac{v_{gr} W}{d} \quad (3)$$

— усредненный по времени поток энергии через поперечное сечение структуры s_\perp , переносимый вдоль продольного направления, S_z — проекция вектора Умова–Пойнтинга на продольное направление, W — средняя по времени запасенная на периоде структуры энергия, v_{gr} — групповая скорость. В (1) черта сверху означает усреднение по поперечному сечению пучка S_b :

$$\overline{|E_{z,m}|^2} = \frac{1}{S_b} \iint_{S_b} |E_{z,m}|^2 dx dy. \quad (4)$$

На рис. 4 представлено распределение амплитуды нулевой пространственной гармоники поля замедленной моды на частоте 60 ГГц. Пространственная гармоника сильно локализована в области меандровой микрополосковой структуры. Причем в горизонтальном направлении распределение амплитуды оказывается относительно однородным. Соответственно, целесообразно выбрать ширину ленточного электронного пучка совпадающей с шириной меандра.

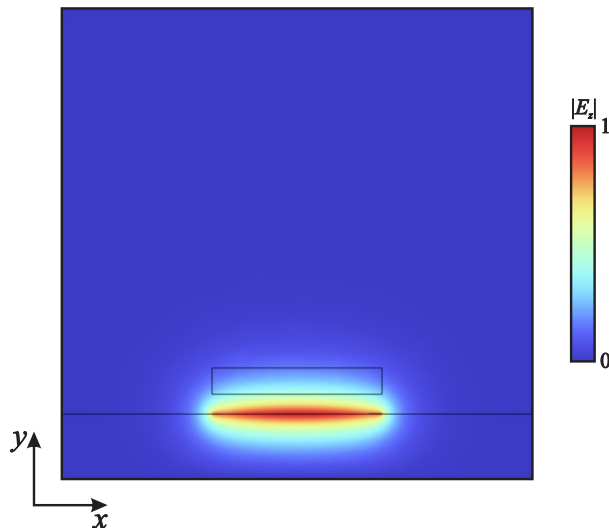


Рис. 4. Распределение $|E_{z,m}|$ в поперечном сечении ЗС на частоте 60 ГГц (цвет онлайн)

Fig. 4. Distribution of the $|E_{z,m}|$ in the SWS cross section at a frequency of 60 GHz (color online)

При удалении от поверхности ЗС амплитуда пространственной гармоники быстро падает, изменяясь примерно как $|E_z| \sim \exp(-\gamma_m y)$, где $\gamma_m = \sqrt{\beta_m^2 - (\omega/c)^2}$ — поперечное волновое число. Соответственно, чем ближе будет положение электронного пучка к поверхности микрополосковой линии, тем выше будут значения сопротивления связи. Также пучок должен иметь небольшую толщину. Однако ленточные электронные пучки при фокусировке постоянными магнитными полями подвержены диокотронной неустойчивости, что приводит к сильной деформации формы пучка по мере распространения вдоль поверхности ЗС и создает риск оседания электронов на поверхность ЗС [25, 26].

В связи с указанными выше соображениями размеры пучка были выбраны равными 650×100 мкм², и считалось, что пучок распространяется на расстоянии $h_0 = 75$ мкм от поверхности меандра. Положение электронного пучка показано прямоугольником на рис. 4.

Интерес представляет также разработка ЗС с большей толщиной проводящего слоя t , так как при увеличении толщины снижается риск разрушения структуры в случае токооседания. На рис. 5 приведены результаты расчета электродинамических характеристик в случае увеличения толщины проводящего слоя до значений 10 мкм. Видно, что с ростом t происходит небольшое изменение дисперсии в области рабочих частот (рис. 5, *a*). Коэффициент замедления уменьшается, как показано на рис. 5, *b*. Также был проведен расчет сопротивления связи, усредненного по поперечному сечению пучка, в рабочей полосе частот. Как видно из рис. 5, *c*, сопротивление связи оказывается достаточно высоким — до 20 Ом на длинноволновом конце рабочего диапазона. С ростом частоты его значения уменьшаются. Увеличение толщины проводящего слоя приводит к увеличению сопротивления связи примерно на 1.5...2 Ом в рабочем диапазоне.

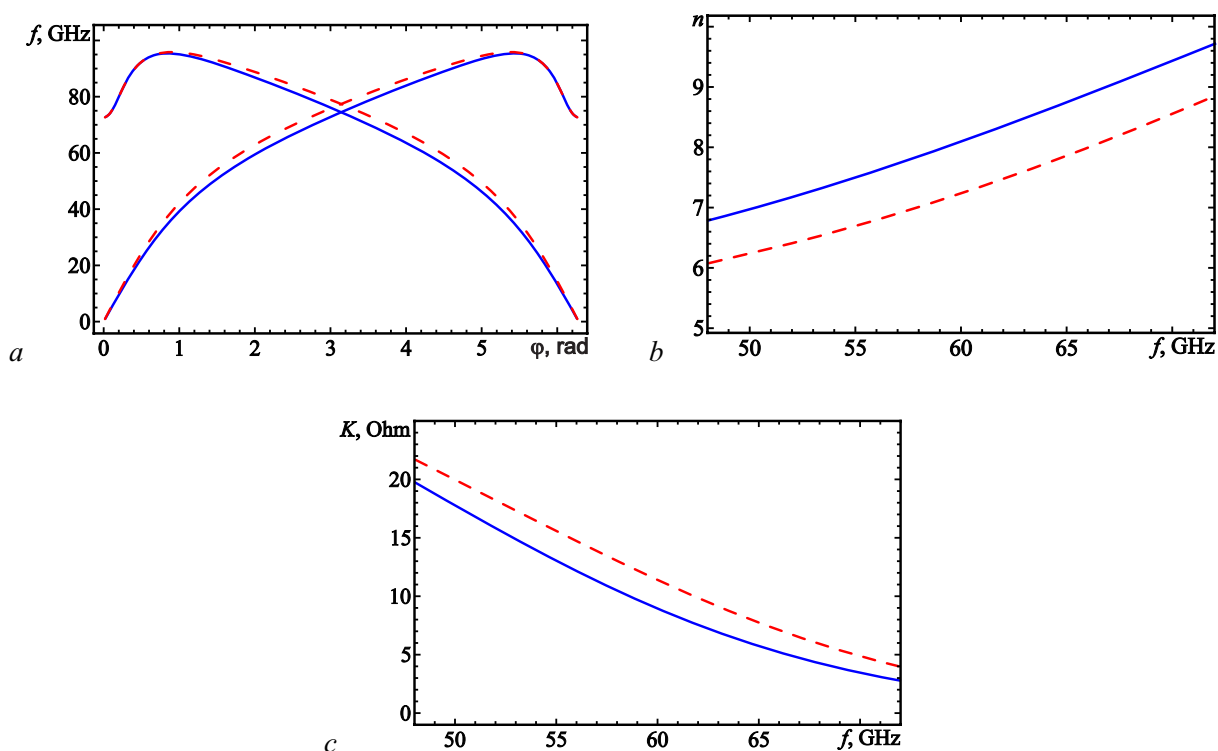


Рис. 5. Дисперсионная характеристика (*a*), коэффициент замедления (*b*) и сопротивление связи (*c*) ЗС для толщины металлического покрытия 1 мкм (сплошные линии) и 10 мкм (штриховые) (цвет онлайн)

Fig. 5. Dispersion characteristic (*a*), slow-wave factor (*b*) and interaction impedance (*c*) for the SWS with 1-um (solid lines) and 10-um (dashed lines) strip thickness (color online)

В работе [18] показано, что в ЛБВ V-диапазона с меандровой ЗС с толщиной проводящего слоя в 10 мкм возможно эффективное взаимодействие с электронным пучком с током 100 мА и напряжением 6 кВ. В такой системе можно получить высокие значения коэффициента усиления до 30 дБ, а также выходную мощность порядка 15...20 Вт. Полоса усиления по уровню –3 дБ составляет примерно 2 ГГц. Такие выходные параметры соответствуют требованиям, предъявляемым к усилителям миллиметрового диапазона для использования в системах передачи данных нового поколения.

2. Особенности расчета омических потерь в тонкопленочных ЗС

При проектировании и разработке устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн важным фактором является корректный учет омических потерь, которые существенно влияют на выходные характеристики приборов. В случае микрополосковых ЗС возникают дополнительные сложности, связанные с наличием в системе тонкопленочного металлического покрытия. Величина потерь увеличивается с уменьшением толщины пленки. Такая зависимость объясняется краевыми эффектами, а именно увеличением поверхностных токов, текущих по пленке вблизи её краев.

Часто применяемые методы учета затухания за счет конечной проводимости металла заключаются в использовании теории возмущений, а также импедансных граничных условий (ГУ) на поверхности металла. Ограничением применимости этих методик является требование того, чтобы толщина слоя металла и радиус кривизны поверхности были значительно больше, чем толщина скин-слоя [27, 28]. Толщина скин-слоя рассчитывается по формуле $\delta_s = \sqrt{1/(\pi f \mu_0 \sigma)}$, где σ — проводимость металла, μ — его относительная магнитная проницаемость, μ_0 — магнитная постоянная. Для пленки, изготовленной из меди, с учетом шероховатости поверхности проводимость лежит в диапазоне $\sigma = (2...3) \cdot 10^7$ См/м. Тогда на частоте $f = 60$ ГГц получаем $\delta_s \sim 0.4$ мкм, то есть для пленки толщиной несколько микрон скин-слой составляет заметную долю её толщины. В таких условиях возникает вопрос, насколько данные методики применимы для систем миллиметрового диапазона в случае, когда металлическая пленка имеет малую толщину от 1 до 10 мкм.

В современных программных пакетах, предназначенных для моделирования электромагнитных полей в различных СВЧ-устройствах, в таких ситуациях предусмотрено использование специальных разновидностей ГУ, которые позволяют моделировать поля в системах, содержащих металлические элементы с малой толщиной (пленки, тонкие ребра и т. д.). Например, в программе COMSOL Multiphysics для этого применяются граничные условия, называемые “Transition Boundary Condition”. Эти ГУ связывают компоненты поверхностных токов, текущих по двум сторонам тонкой пленки, а через них связываются и компоненты электромагнитных полей в точках, лежащих по разные стороны пленки. Ввиду отсутствия общепринятого русскоязычного перевода для этого названия будем в дальнейшем использовать для обозначения этого типа ГУ термин “Transition BC”. Если размеры металлических элементов существенно превышают толщину скин-слоя, для моделирования систем с омическими потерями хорошо работают импедансные граничные условия, также реализованные в пакете COMSOL Multiphysics.

В коде ANSYS HFSS (HFSS), входящем в пакет ANSYS Electronics Suite, для моделирования систем с тонкими металлическими структурами используется, по существу, этот же тип ГУ, с той разницей, что такие структуры могут состоять из нескольких слоев с разной проводимостью, что позволяет моделировать слоистые системы или изменение проводимости металла по направлению, нормальному к его поверхности.

В программе CST Microwave Studio (CST), которая является составной частью пакета CST Studio Suite и предназначена для решения в основном того же круга задач, что и HFSS,

для моделирования омических потерь в металле используются либо импедансные ГУ, как и в двух упомянутых выше программах, либо подход, связанный с использованием теории возмущений. В этом случае система рассчитывается в предположении идеальной проводимости металлических элементов и отсутствия потерь в объеме диэлектрических включений, а затем рассчитываются поправки к частотам и добротность колебаний в объемных резонаторах или поправки к постоянной распространения и коэффициент затухания в случае анализа волн в передающих структурах.

В CST для нахождения характеристик системы с затуханием с помощью теории возмущений реализованы специальные макросы. Хотя такие возможности отсутствуют в COMSOL Multiphysics и HFSS, их несложно реализовать, используя возможности постпроцессоров обеих программ.

Помимо этого, отметим, что существуют два различных общих подхода к расчету потерь в периодических электродинамических системах. Первый основан на моделировании прохождения сигнала через полноразмерную структуру, содержащую большое число периодов и имеющую на обоих концах согласующие устройства, соединяющие ЗС с регулярными линиями передачи. Если число периодов структуры достаточно велико (несколько десятков и более), а согласование хорошее, то вкладом согласующих элементов в общие потери можно пренебречь. В этом случае коэффициент затухания определяется простой формулой $\alpha \text{ [dB/N]} = S_{21}/N$, где S_{21} — элемент матрицы передачи, выраженный в дБ, N — число периодов ЗС. Матрица передачи рассчитывается либо в частотной, либо во временной области. В первом случае анализируется прохождение через систему гармонического сигнала, частота которого меняется для построения зависимости коэффициента затухания в требуемой полосе частот. В другом варианте исследуется прохождение через систему широкополосного импульса с использованием кода для нестационарного компьютерного моделирования, а затем элементы матрицы передачи всей системы рассчитываются с помощью преобразования Фурье. Очевидно, что в обоих случаях для подобных расчетов необходимы вычислительные устройства, обладающие мощными процессорами и большой оперативной памятью. Помимо этого, для проведения моделирования требуется значительное время.

Существенно менее затратным является подход, основанный на моделировании колебаний в одной ячейке ЗС, ограниченной двумя плоскостями, перпендикулярными её оси и разнесенными между собой на один период структуры d . На этих плоскостях ставятся периодические граничные условия Флоке, согласно которым колебания поля в двух точках, сдвинутых друг относительно друга на период, отличаются только сдвигом фазы φ , который задается как параметр. При такой постановке задача сводится к расчету частот и добротностей собственных типов колебаний в замкнутом резонаторе. Из-за потерь в металлических стенках ЗС и в объеме возможных диэлектрических включений частоты собственных колебаний в резонаторе являются комплексными: $\omega_i = \omega'_i + j\gamma_i$, где ω'_i — действительная часть частоты, γ_i — коэффициент затухания, индекс i нумерует типы колебаний. Поскольку далее будут представлены результаты только для основного типа волны и, соответственно, для основного типа колебаний на одном периоде ЗС, индекс i будем опускать.

Найденная зависимость $\omega'(\varphi)$ дает закон дисперсии для распространяющейся в ЗС волны, величина $\beta = \varphi/d$ — продольная постоянная распространения. Фазовая и групповая скорости равны соответственно $v_{ph} = \omega'/\beta$ и $v_{gr} = d\omega'/d\beta$. Пространственный коэффициент затухания волны на одном периоде ЗС α связан с коэффициентом затухания колебаний в резонаторе во времени γ соотношением $\alpha = \gamma v_{gr}$. Учитывая, что добротность колебаний равна

$$Q = \frac{\omega'}{2\gamma}, \quad (5)$$

получаем формулу для расчета параметра пространственного затухания в виде

$$\alpha = 8.686 \frac{1}{2Q} \frac{2\pi f d}{v_{gr}}. \quad (6)$$

Коэффициент затухания здесь выражается в дБ/период. Формула (6) удобна в случае расчетов с использованием любой из упомянутых выше программ численного моделирования электромагнитных полей, так как все они имеют в постпроцессоре макросы или другие возможности для вычисления добротности найденных собственных колебаний в исследуемых резонаторах. Групповая скорость в (6) определяется либо численным дифференцированием полученной в расчете дисперсионной зависимости, либо с помощью соотношения (3).

Добротность колебаний, входящая в (6), определяется по-разному в зависимости от способа моделирования. Если решается краевая задача с постановкой на проводящих границах импедансных граничных условий или условий типа “Transition BC”, а для описания поглощения в объеме диэлектрических включений используется комплексная диэлектрическая проницаемость, то результатом вычислений будет в том числе значение комплексной частоты рассчитываемой моды $\omega = \omega' + j\gamma$. Тогда добротность находится из формулы (5). В случае подхода, основанного на теории возмущений, для вычисления добротности используется формула

$$Q = \frac{\omega' W}{\frac{R_s}{2} \int_{S_m} |H_\tau|^2 dS + \frac{\omega'}{2} \int_{V_d} \varepsilon'' \varepsilon_0 |\vec{E}|^2 dV}. \quad (7)$$

Здесь $R_s = 1/(\delta_s \sigma)$ — действительная часть поверхностного импеданса металла, H_τ — касательная компонента магнитного поля к поверхности металла, ε'' — мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости объемных диэлектрических включений, ε_0 — диэлектрическая постоянная, S_m — поверхность металла с конечной проводимостью, V_d — объем, занимаемый диэлектриком.

Описанные методики расчета затухания и три упомянутых выше пакета программ численного моделирования электромагнитных полей использованы для расчетов коэффициента затухания в микрополосковой планарной ЗС на диэлектрической подложке в прямоугольном волноводе. При решении задачи на собственные значения в каждой из указанных программ и при моделировании полноразмерной структуры в программных пакетах COMSOL и HFSS применялись модули, реализующие метод конечных элементов. Расчеты проводились на тетраэдральных нерегулярных сетках с векторными конечными элементами второго порядка.

Решалась задача нахождения собственных значений для колебаний в резонаторе на одном периоде структуры, ограниченном плоскостями, перпендикулярными оси системы, на которых ставились периодические граничные условия Флоке. По найденным значениям частот и распределениям полей рассчитывался коэффициент затухания с использованием приведенных выше формул. В ходе решения указанной задачи в различных программных пакетах для увеличения точности расчета собственных значений использовались методы адаптивного сгущения расчетных сеток, которые приводили к сходимости решения после 2–3 итераций. Точность решения задавалась с использованием соответствующих настроек решателя каждой из программ. Относительная погрешность при расчете собственных значения составляла величину порядка 10^{-6} , а для рассчитанных полей $10^{-3} \dots 10^{-4}$.

Размеры системы были такими же, что и в предыдущей части статьи. Проводимость, используемая в расчетах, была равна $\sigma = 2.4 \cdot 10^7$ См/м. Эта величина примерно соответствует значению эффективной проводимости, полученной по формуле [29]

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\left(1 + \frac{2}{\pi} \arctan \left[1.4 \left(\frac{r}{\delta}\right)^2\right]\right)^2} \quad (8)$$

для средней частоты рассматриваемого диапазона $f = 60$ ГГц, среднеквадратичного размера шероховатости поверхности $r = 0.25$ мкм и проводимости чистой бескислородной меди $\sigma_0 = 5.8 \cdot 10^7$ См/м. Тангенс угла потерь в кварцевой подложке составлял $\tan \delta = 0.0004$.

На рис. 6 приведены частотные зависимости коэффициента затухания основного типа волны в исследуемой ЗС, рассчитанные с использованием пакетов COMSOL, CST и HFSS. Сплошные линии соответствуют толщине пленки, из которой изготовлен меандр, равной 1 мкм, пунктирные линии — толщине 10 мкм. Синий, красный и зеленый цвета использованы для представления результатов, полученных с помощью программ COMSOL, CST и HFSS соответственно. Для расчета затухания структур с толщиной металлизации 10 мкм во всех трех случаях использовались импедансные ГУ. При толщине 1 мкм в программах HFSS и COMSOL применялись граничные условия типа “Transition BC”, а в CST — импедансные ГУ. Из рис. 6 видно, что для толстой пленки результаты расчетов по всем трем программам хорошо соответствуют друг другу. В то же время в случае меандра с толщиной 1 мкм расчет по программе HFSS дает в области высоких частот заметно меньшие значения затухания по сравнению с двумя другими программами. Из рис. 6 следует также, что с уменьшением толщины пленки затухание в системе растет, что согласуется с общими теоретическими представлениями о влиянии краевых эффектов в тонких пленках на величину затухания.

Далее был исследован вопрос о возможности использования метода возмущений для расчета затухания в системах, содержащих тонкие металлические элементы. На рис. 7 приведены результаты расчета коэффициента затухания в меандровой ЗС с использованием двух подходов, в которых применяются ГУ, позволяющие явным образом учитывать влияние конечной проводимости металла (сплошные линии), а также результаты, полученные с помощью формул метода возмущений (пунктирные линии). Красные кривые посчитаны с помощью программы CST, синие — с помощью COMSOL Multiphysics. Толщина меандра во всех случаях составляла 1 мкм. Для учета конечной проводимости металла в программе COMSOL использовались ГУ типа “Transition BC”, в то время как в CST применялись ГУ импедансного типа. Из рисунка видно, что в случае тонких пленок метод возмущения дает существенно заниженные величины затухания по сравнению с более строгими методиками. Дополнительное исследование также показало, что заниженные значения коэффициента затухания, полученные с помощью метода возмущений, сохраняются и в случае более толстых пленок, вплоть до толщины 10 мкм. Эти результаты здесь не приводятся.

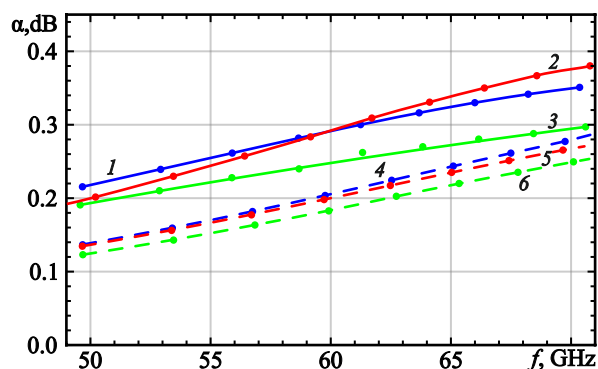


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента затухания для ЗС с толщиной металлизации 1 мкм (сплошные линии) и 10 мкм (пунктир), рассчитанные с использованием различных пакетов электромагнитного моделирования: COMSOL (кривые 1, 4), CST (кривые 2, 5) и HFSS (кривые 3, 6) (цвет онлайн)

Fig. 6. Attenuation vs. frequency for SWS with metallization thickness of 1 μm (solid lines) and 10 μm (dashed lines), calculated by various electromagnetic codes: COMSOL (lines 1, 4), CST (lines 2, 5) and HFSS (lines 3, 6) (color online)

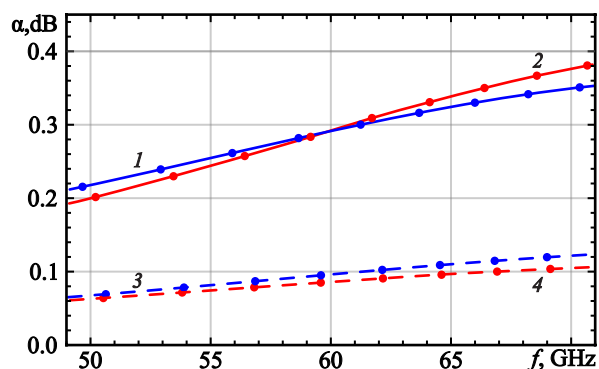


Рис. 7. Сравнение затухания, рассчитанного с использованием программ COMSOL (линии 1 и 3) и CST (линии 2 и 4). Сплошная кривая 1 — ГУ типа “Transition BC”, сплошная кривая 2 — импедансные ГУ, пунктирные кривые 3 и 4 — метод возмущений (цвет онлайн)

Fig. 7. Comparison of attenuation calculated by COMSOL (lines 1 and 2) and CST (lines 3 and 4). 1 and 2 solid lines are calculated by using impedance boundary condition and “Transition BC” on metal surface respectively, dashed lines 3 and 4 calculated with perturbation theory (color online)

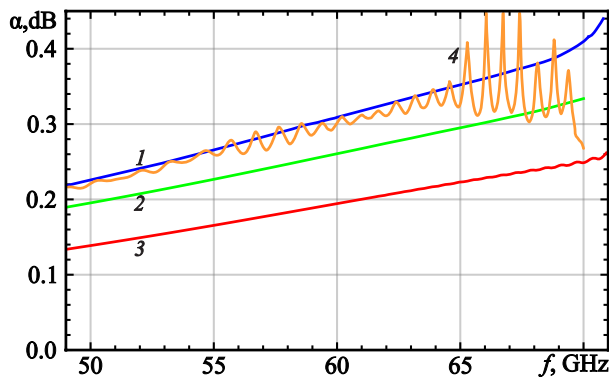


Рис. 8. Сравнение экспериментальной зависимости коэффициента затухания от частоты с результатами расчетов этой величины, полученными из вычисленных зависимостей коэффициента прохождения сигнала через полноразмерную модель ЗС с толщиной металлизации 1 мкм. Кривая 1 — расчет по программе COMSOL с использованием ГУ типа “Transition BC”, 2 — по программе HFSS с использованием ГУ типа “Transition BC”, 3 — по программе CST с использованием ГУ импедансного типа во временной области, кривая 4 — экспериментальные результаты (цвет онлайн)

Fig. 8. Comparison of the experimental values of the attenuation vs. frequency with the results of simulation of the full-sized SWS model with metallization thickness of 1 μm obtained by COMSOL, HFSS and CST. Line 1 — calculation by COMSOL using “Transition BC”, 2 — by HFSS using “Transition BC”, 3 — by CST using impedance boundary condition in time domain, line 4 — experimental results (color online)

экспериментальными данными наблюдается при использовании пакета COMSOL Multiphysics, где моделирование проводится в частотной области с ГУ типа “Transition BC”. Расчет во временной области с помощью пакета CST с импедансными ГУ на тонких металлических поверхностях приводит к существенно меньшей (почти в два раза) величине коэффициента затухания. Это обстоятельство необходимо учитывать при моделировании нестационарных процессов взаимодействия электромагнитных волн с пучками заряженных частиц в случае, когда в электродинамической структуре присутствуют металлические элементы с малой толщиной. Для решения подобных задач часто используется пакет CST Particle Studio, в котором часть, относящаяся к расчету электромагнитных полей, основана на тех же алгоритмах, что и программа CST Microwave Studio.

При моделировании процессов электронно-волнового взаимодействия или распространения электромагнитных волн во временной области методом конечных разностей в программном пакете CST для случая ЗС с тонкими металлическими элементами требуется уточнение значений эффективной проводимости с целью достижения соответствия между различными методами. Как показано на рис. 6, расчет омических потерь методом конечных элементов в частотной области в программных пакетах CST и COMSOL дает близкие результаты. Поэтому в качестве первого шага предлагается проводить моделирование именно с использованием модели одиночного периода в пакете CST, проводя далее расчет полноразмерной модели во временной области с аналогичным значением эффективной проводимости. В случае, если результаты показывают различие в расчетах коэффициента затухания, необходимо снизить значение эффективной проводимости при моделировании полноразмерной модели во временной области для достижения соответствия по величине затухания в системе.

Помимо методик, использующих анализ колебаний на одном периоде системы, было также проведено моделирование прохождения сигнала через полноразмерную систему и рассчитаны частотные зависимости коэффициента прохождения $S_{21}(f)$. После этого были получены коэффициенты затухания как функции частоты. Эти результаты представлены на рис. 8. На нем кривая 1 рассчитана с использованием программы COMSOL Multiphysics, кривая 2 — с помощью HFSS, кривая 3 — с помощью CST. В пакетах COMSOL и HFSS расчеты проводились в частотной области методом конечных элементов, а в CST — во временной области с помощью прямого трехмерного моделирования нестационарных уравнений Максвелла методом конечного интегрирования (Finite integration technique, FIT), который является разновидностью метода конечных разностей во временной области. В случае HFSS модель ЗС содержала 46 периодов ЗС, в двух остальных программах — 138 периодов.

Кривая 4 на рис. 8 представляет результаты экспериментального измерения коэффициента прохождения. Методика измерений подробно описана в [19]. Как следует из рисунка, наилучшее совпадение результатов расчетов с

Заключение

В работе проведен подробный анализ основных электродинамических характеристик микрореполосковой замедляющей системы в форме прямоугольного меандра на диэлектрической подложке из кварца для миниатюрной низковольтной ЛБВ V-диапазона с ленточным электронным пучком. Исследована структура дисперсионных характеристик. Показано, что, помимо основной замедленной моды, в системе может распространяться быстрая объемная мода. Исследовано влияние геометрических размеров ЗС на частоты отсечки таких мод и проведена оптимизация структуры с целью подавления объемных мод в рабочем диапазоне частот. Показано, что для поверхностной моды характерны высокие значения коэффициента замедления, соответствующие напряжениям синхронизма порядка 2...10 кВ. Исследована структура поля замедленной моды и показано, что в системе возможны высокие значения сопротивления связи до 20 Ом, что обеспечивает эффективное электронно-волновое взаимодействие в приборах типа ЛБВ-усилителя с такими ЗС.

Показано, что для систем типа меандр на диэлектрической подложке характерными являются высокие значения коэффициента затухания. В процессе численного моделирования необходим тщательный выбор способа учета потерь, поскольку использование различных методик может приводить к сильно различающимся результатам. В расчетах, основанных на анализе собственных затухающих колебаний на одном периоде структуры, наиболее достоверными представляются результаты, полученные с помощью программы COMSOL и ГУ типа "Transition BC", а также результаты по программе CST с использованием импедансных ГУ. Последнее обстоятельство является неожиданным, поскольку для пленок толщиной 1 мкм формальные условия применимости импедансных ГУ не выполняются.

Использование формул теории возмущений во всем исследованном диапазоне толщин меандра 1...10 мкм приводит к существенным ошибкам в определении коэффициента затухания ЗС.

При нестационарном моделировании полноразмерной системы с использованием CST и импедансных ГУ получается значительно меньшее значение коэффициента затухания по сравнению с экспериментальными данными и результатами полноразмерного моделирования в частотной области по программе COMSOL. Эту особенность необходимо учитывать при моделировании с помощью CST нестационарных процессов в электродинамических структурах, содержащих тонкие металлические элементы, в частности, при моделировании процессов взаимодействия электромагнитных волн с потоками заряженных частиц.

Список литературы

1. Gulyaev Y. V., Sinitsyn N. I. Super-miniaturization of low-power vacuum microwave devices // IEEE Trans. Electron Devices. 1989. Vol. 36, no. 11. P. 2742–2743. DOI: 10.1109/16.43782.
2. Денисов Г. Г., Глявин М. Ю., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Песков Н. Ю., Савилов А. В., Рыскин Н. М. Вакуумная СВЧ-электроника: освоение терагерцового диапазона частот // В кн.: Терагерцовая фотоника и оптоэлектроника / Под ред. В. Я. Панченко. М.: РАН, 2024. 764 с.
3. Potter B. R., Scott A. W., Tancredi J. J. High-power printed circuit traveling wave tubes // In: 1973 International Electron Devices Meeting. 1973, Washington, DC, USA. P. 521–524. DOI: 10.1109/IEDM.1973.188775.
4. Гуляев Ю. В., Жбанов А. И., Захарченко Ю. Ф., Нефедов И. С., Синицын Н. И., Торгашов Г. В. Планарные замедляющие системы миниатюрных электровакуумных СВЧ приборов // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 12. С. 2049–2058.
5. 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. Planar microstrip slow-wave structure for low-

- voltage V-band traveling-wave tube with a sheet electron beam // IEEE Electron Device Letters. 2018. Vol. 39, no. 5. P. 757–760. DOI: 10.1109/LED.2018.2821770.
6. Wang S., Aditya S., Xia X., Ali Z., Miao J. On-wafer microstrip meander-line slow-wave structure at Ka-band // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. Vol. 65, no. 6. P. 2142–2148. DOI: 10.1109/TED.2018.2798575.
7. Wang S., Aditya S., Xia X., Ali Z., Miao J., Zheng Y. Ka-band symmetric V-shaped meander-line slow wave structure // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. Vol. 47, no. 10. P. 4650–4657. DOI: 10.1109/TPS.2019.2940254.
8. Wang Z., Du F., Li S., Hu Q., Duan Z., Gong H., Gong Y., Feng J. Study on an X-band sheet beam meander-line SWS // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. Vol. 48, no. 12. P. 4149–4154. DOI: 10.1109/TPS.2020.3035411.
9. Socu  lamos J. M., Dionisio R., Letizia R., Paoloni C. Experimental validation of phase velocity and interaction impedance of meander-line slow-wave structures for space traveling-wave tubes // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2021. Vol. 69, no. 4. P. 2148–2154. DOI: 10.1109/TMTT.2021.3054913.
10. Guo G., Zhang T., Zeng J., Yang Z., Yue L., Wei Y. Investigation and fabrication of the printed microstrip meander-line slow-wave structures for D-band traveling wave tubes // IEEE Trans. Electron Devices. 2022. Vol. 69, no. 9. P. 5229–5234. DOI: 10.1109/TED.2022.3192214.
11. Guo G., Jing Z., Qixiang Z., Tianzhong Z., Taifu Z., Pengyu L., HanBiao T., Yanyu W. Investigation and experiment of a novel chamfered V-shaped microstrip slow-wave structure for W-band traveling-wave tube // J. Infrared Milli. Terahz Waves. 2024. Vol. 45. P. 629–644. DOI: 10.1007/s10762-024-00994-x.
12. Торгашов Р. А., Бенедик А. И., Рыскин Н. М. Исследование миниатюрного низковольтного генератора обратной волны миллиметрового диапазона с планарной замедляющей системой // Известия вузов. ПНД. 2017. Т. 25, № 5. С. 35–46. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-35-46.
13. Zhao C., Aditya S., Wang S. A novel coplanar slow-wave structure for millimeter-wave BWO applications // IEEE Trans. Electron Devices. 2021. Vol. 68, no. 4. P. 1924–1929. DOI: 10.1109/TEDE.2021.3059435.
14. Ullisse G., Krozer V. W-band traveling wave tube amplifier based on planar slow wave structure // IEEE Electron Device Letters 2017. Vol. 38, no. 1. P. 126–129. DOI: 10.1109/LED.2016.2627602.
15. Zhao C., Aditya S. Planar Slow-Wave Structures: Applications in Traveling-Wave Tubes. Institute of Physics Publishing, 2024. 326 p. DOI: 10.1088/978-0-7503-5764-7.
16. Gong Y., Wang S. Planar Slow Wave Structure Traveling Wave Tubes. Design, Fabrication and Experiment. Institute of Physics Publishing, 2024. 188 p. DOI: 10.1088/978-0-7503-5452-3.
17. Ryskin N. M., Torgashov R. A., Starodubov A. V., Rozhnev A. G., Serdobintsev A. A., Pavlov A. M., Galushka V. V., Bessonov D. A., Ullisse G., Krozer V. Development of microfabricated planar slow-wave structures on dielectric substrates for miniaturized millimeter-band traveling-wave tubes // J. Vac. Sci. Technol. B. 2021. Vol. 39, no. 1. P. 013214. DOI: 10.1116/6.0000716.
18. Торгашов Р. А., Стародубов А. В., Рожнев А. Г., Рыскин Н. М. Исследование и разработка ламп бегущей волны с планарными микрополосковыми замедляющими системами на диэлектрических подложках // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67, № 10. С. 981–986. DOI: 10.31857/S0033849422100138.
19. Nozhkin D. A., Starodubov A. V., Torgashov R. A., Galushka V. V., Kozhevnikov I. O., Serdobintsev A. A., Lebedev A. D., Kozyrev A. A., Ryskin N. M. Laser micromachining of 2-D microstrip V-band meander-line slow wave structures // IEEE Trans. Electron Devices. 2025. Vol. 72, no. 1. P. 453–458. DOI: 10.1109/TED.2024.3507759.
20. RF Module User’s Guide, COMSOL Multiphysics® v. 5.6. 2020. Stockholm: COMSOL AB, 2020.

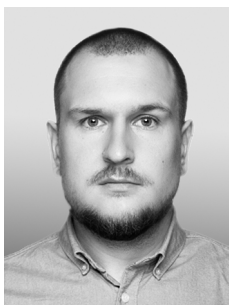
21. High Frequency Structure Simulator (HFSS). ANSYS Inc, Pittsburg, PA, USA [Electronic resource] // Available from: <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
22. CST STUDIO SUITE [Electronic resource] // Available from: <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite>
23. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. М.: Советское радио, 1966. 632 с.
24. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по СВЧ электронике для физиков. М.: Физматлит, 2003. Т. 1. 496 с.
25. Cutler C. C. Instability in hollow and strip electron beams // J. Appl. Phys. 1955. Vol. 27, no. 9. P. 1028–1029. DOI: 10.1063/1.1722535.
26. Nguyen K. T., Pasour J., Antonsen T. M., Larsen P. B., Petillo J. J., Levush B. Intense sheet electron beam transport in a uniform solenoidal magnetic field // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. Vol. 56, No. 5. P. 744–752. DOI: 10.1109/TED.2009.2015420.
27. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.
28. Ильинский А. С., Слепян Г. Я. Колебания и волны в электродинамических системах с потерями. М.: Изд-во МГУ, 1983. 232 с.
29. Hammerstad E. O. Microstrip Handbook / ed. by Bekkadal F. Trondheim, Norway: Norwegian Inst. Technol, 1985. 118 p.

References

1. Gulyaev YV, Sinitsyn NI. Super-miniaturization of low-power vacuum microwave devices. IEEE Trans. Electron Devices. 1989;36(11):2742–2743. DOI: 10.1109/16.43782.
2. Denisov GG, Glyavin MYu, Ginzburg NS, Zotova IV, Peskov NY, Savilov AV, Ryskin NM. Vacuum microwave electronics: development of terahertz frequency range. In: Panchenko VYa, editor. Terahertz Photonics and Optoelectronics. M.: RAS; 2024. 764 p. (in Russian).
3. Potter BR, Scott AW, Tancredi JJ. High-power printed circuit traveling wave tubes. In: 1973 International Electron Devices Meeting. 1973, Washington, DC, USA. P. 521–524. DOI: 10.1109/IEDM.1973.188775.
4. Gulyaev YuV, Zhanov AI, Zakharchenko YuF, Nefedov IS, Sinitsyn NI, Torgashov GV. Planar slow-wave systems for miniature electrovacuum microwave devices. J. Commun. Technol. Electron. 1994;39(12):2049–2058.
5. Ryskin NM, Rozhnev AG, Starodubov AV, Serdobintsev AA, Pavlov AM, Benedik AI, Torgashov RA, Torgashov GV, Sinitsyn NI. Planar microstrip slow-wave structure for low-voltage V-band traveling-wave tube with a sheet electron beam. IEEE Electron Device Letters. 2018;39(5):757–760. DOI: 10.1109/LED.2018.2821770.
6. Wang S, Aditya S, Xia X, Ali Z, Miao J. On-wafer microstrip meander-line slow-wave structure at Ka-band. IEEE Trans. Electron Devices. 2018;65(6):2142–2148. DOI: 10.1109/TED.2018.2798575.
7. Wang S, Aditya S, Xia X, Ali Z, Miao J, Zheng Y. Ka-band symmetric V-shaped meander-line slow wave structure. IEEE Transactions on Plasma Science. 2019;47(10):4650–4657. DOI: 10.1109/TPS.2019.2940254.
8. Wang Z, Du F, Li S, Hu Q, Duan Z, Gong H, Gong Y, Feng J. Study on an X-band sheet beam meander-line SWS. IEEE Transactions on Plasma Science. 2020;48(12):4149–4154. DOI: 10.1109/TPS.2020.3035411.
9. Socuélamos JM, Dionisio R, Letizia R, Paoloni C. Experimental validation of phase velocity and interaction impedance of meander-line slow-wave structures for space traveling-wave tubes. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2021;69(4):2148–2154. DOI: 10.1109/TMTT.2021.3054913.
10. Guo G, Zhang T, Zeng J, Yang Z, Yue L, Wei Y. Investigation and fabrication of the printed

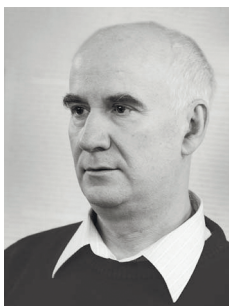
- microstrip meander-line slow-wave structures for D-band traveling wave tubes. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2022;69(9):5229–5234. DOI: 10.1109/TED.2022.3192214.
11. Guo G, Jing Z, Qixiang Z, Tianzhong Z, Taifu Z, Pengyu L, HanBiao T, Yanyu W. Investigation and experiment of a novel chamfered V-shaped microstrip slow-wave structure for W-band traveling-wave tube. *J. Infrared Milli. Terahz Waves*. 2024;45:629–644. DOI: 10.1007/s10762-024-00994-x.
12. Torgashov RA, Benedik AI, Ryskin NM. Study of miniaturized low-voltage backward-wave oscillator with a planar slow-wave structure. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2017;25(5):35–46. (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-35-46.
13. Zhao C, Aditya S, Wang S. A novel coplanar slow-wave structure for millimeter-wave BWO applications. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2021;68(4):1924–1929. DOI: 10.1109/TED.2021.3059435.
14. Ulisse G, Krozer V. W-band traveling wave tube amplifier based on planar slow wave structure. *IEEE Electron Device Letters*. 2017; 38(1):126–129. DOI: 10.1109/LED.2016.2627602.
15. Zhao C, Aditya S. *Planar Slow-Wave Structures: Applications in Traveling-Wave Tubes*. Institute of Physics Publishing; 2024. 326 p. DOI: 10.1088/978-0-7503-5764-7.
16. Gong Y, Wang S. *Planar Slow Wave Structure Traveling Wave Tubes. Design, Fabrication and Experiment*. Institute of Physics Publishing, 2024. 188 p. DOI: 10.1088/978-0-7503-5452-3.
17. Ryskin NM, Torgashov RA, Starodubov AV, Rozhnev AG, Serdobintsev AA, Pavlov AM, Galushka VV, Bessonov DA, Ulisse G, Krozer V. Development of microfabricated planar slow-wave structures on dielectric substrates for miniaturized millimeter-band traveling-wave tubes. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2021;39(1):013214. DOI: 10.1116/6.0000716.
18. Torgashov RA, Starodubov AV, Rozhnev AG, Ryskin NM. Research and development of traveling Wave tubes with planar microstrip slow-wave structures on dielectric substrates. *J. Commun. Technol. Electron*. 2022;67:1231–1236. DOI: 10.1134/S1064226922100138.
19. Nozhkin DA, Starodubov AV, Torgashov RA, Galushka VV, Kozhevnikov IO, Serdobintsev AA, Lebedev AD, Kozyrev AA, Ryskin NM. Laser micromachining of 2-D microstrip V-band meander-line slow wave structures. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2025;72(1):453–458. DOI: 10.1109/TED.2024.3507759.
20. RF Module User's Guide, COMSOL Multiphysics® v. 5.6. 2020. Stockholm: COMSOL AB; 2020.
21. High Frequency Structure Simulator (HFSS). ANSYS Inc, Pittsburg, PA, USA [Electronic resource]. Available from: <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
22. CST STUDIO SUITE [Electronic resource]. Available from: <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite>
23. Silin RA, Sazonov VP. *Slow-Wave Structures*. M.: Sovetskoe Radio; 1966. 632 p. (in Russian).
24. Trubetskov DI, Khramov AE. *Lectures on Microwave Electronics for Physicists*. Vol. 1. Moscow: Fizmatlit; 2003. 496 p. (in Russian).
25. Cutler CC. Instability in hollow and strip electron beams. *J. Appl. Phys*. 1955;27(9):1028–1029. DOI: 10.1063/1.1722535.
26. Nguyen KT, Pasour J, Antonsen TM, Larsen PB, Petillo JJ, Levush B. Intense sheet electron beam transport in a uniform solenoidal magnetic field. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2009; 56(5):744–752. DOI: 10.1109/TED.2009.2015420.
27. Vainshtein LA. *Electromagnetic waves*. Moscow: Radio i Svyaz; 1988. 440 p. (in Russian).
28. Ilinskiy AS, Slepian GYA. *Oscillations and waves in a electordynamic structures with losses*. Moscow: Moscow University Press; 1983. 232 p. (in Russian).
29. Hammerstad EO. *Microstrip Handbook* / ed. by Bekkadal F. Trondheim, Norway: Norwegian Inst. Technol. Publishing; 1985. 118 p.

Торгашов Роман Антонович — родился в Саратове (1997). Окончил с отличием бакалавриат (2018) и магистратуру (2020) Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского по направлению «Прикладные математика и физика». Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Радиофизика» (2024). Младший научный сотрудник лаборатории вакуумной микро- и наноэлектроники Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Доцент кафедры нелинейной физики СГУ имени Н. Г. Чернышевского. Область научных интересов: приборы вакуумной электроники ТГц-диапазона, вакуумная микроэлектроника. Автор более 60 научных трудов по указанным направлениям.



Россия, 410019 Саратов, ул. Зелёная, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: TorgashovRA@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9090-0349
AuthorID (eLibrary.Ru): 992133

Рожнев Андрей Георгиевич — родился в Саратове (1959). Окончил с отличием физический факультет Саратовского государственного университета по специальности «Радиофизика» (1981). С 1981 года работал в НИИ механики и физики СГУ, затем в НИИ естественных наук СГУ. С 2002 преподаёт на кафедре нелинейной физики СГУ в должности доцента. С 2017 года работает в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН в должности старшего научного сотрудника. Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «Радиофизика» (2019, СГУ). Научные интересы — вакуумная электроника СВЧ, вакуумная микроэлектроника, нелинейная теория колебаний и волн, вычислительная электродинамика, фотоника, метаматериалы. Опубликовал свыше 100 научных статей по указанным направлениям.



Россия, 410019 Саратов, ул. Зелёная, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: RozhnevAG@gmail.ru
ORCID: 0000-0003-4687-1357
AuthorID (eLibrary.Ru): 29273

Рыскин Никита Михайлович — окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1991). Защитил диссертации на соискание учёной степени кандидата (1996) и доктора физико-математических наук (2005). Главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Саратовского филиала ИРЭ РАН. Заведующий кафедрой динамических систем СГУ на базе СФ ИРЭ РАН. Область научных интересов: нелинейная теория колебаний и волн, приборы вакуумной электроники ТГц-диапазона, вакуумная микроэлектроника. Имеет более 200 научных публикаций по указанным выше направлениям.



Россия, 410019 Саратов, ул. Зелёная, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: ryskinm@info.sgu.ru
ORCID: 0000-0001-8501-6658
AuthorID (eLibrary.Ru): 29838