

# Исследование распространения электромагнитных волн в миллиметровом диапазоне в планарной замедляющей системе типа «меандр» на подложке из CVD алмаза

А.В. Галдецкий, А.Н. Савин, Е.А. Богомолова

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** Предложена перспективная планарная ЗС типа «меандр» на подвешенной подложке из алмаза для мощной ЛБВ W-диапазона частот. Численными методами исследован характер трансформации дисперсионных характеристик и зависимостей сопротивления связи рабочих пространственных гармоник от частоты при изменении толщины проводников. В результате исследования было установлено, что начало спада (излома) кривой сопротивления связи можно контролировать за счет отношения толщины проводника к толщине подложки. Рассчитано затухание электромагнитных волн в ЗС с учетом влияния конечной проводимости и шероховатости проводников, что существенно в W-диапазоне. В результате проведенного цикла расчетов была найдена оптимальная геометрия планарной ЗС типа «меандр» на подвешенной подложке, обладающая требуемыми ЭДХ и учитывающая имеющуюся технологию изготовления.

**Ключевые слова:** миллиметровый диапазон, планарная замедляющая система, CVD алмаз, ЛБВ.

## 1. Введение

Наиболее перспективным в настоящий момент является использование радиоволн миллиметрового диапазона для создания сверхскоростных беспроводных транспортных сетей мобильного трафика [1-3]. Превосходство электровакuumных приборов (ЭВП) над твердотельными в данном диапазоне особенно выражено в достижении максимальной мощности и устойчивости к перегреву. На основе ЛБВ можно разработать компактное, достаточно дешевое широкополосное низковольтное оборудование для связи между базовыми станциями 5G в W-диапазоне [4].

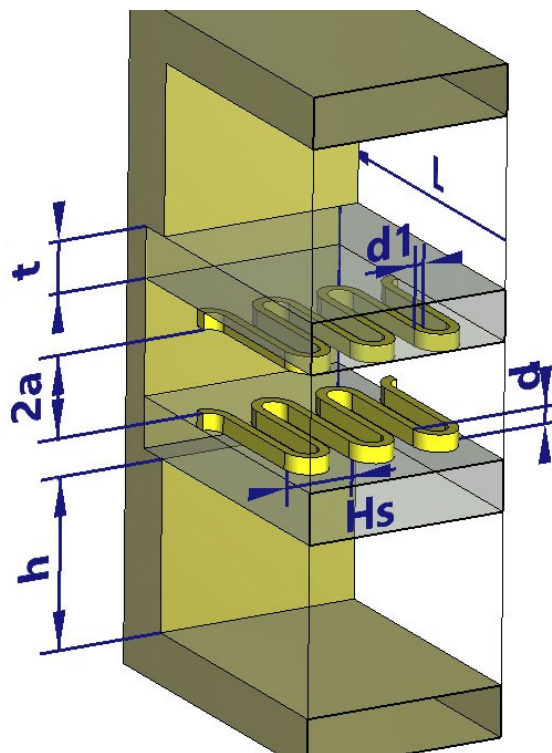
Однако для практического освоения данного диапазона необходимо разрабатывать принципиально новые конструкции основных узлов ЭВП и технологии их изготовления.

Отсюда интерес к вакуумным приборам на основе технологии микроэлектроники [5-8], позволяющей прецизионно изготовить конструктивные элементы замедляющей системы (ЗС).

В данной работе рассмотрена конструкция планарной ЗС типа «меандр» на подвешенной подложке из CVD алмаза [9] при различном значении толщины проводников  $d$  (рис. 1). В таблице 1 приведены размеры ЗС.

Таблица 1. Размеры исследуемых ЗС

Период, Hs	190 $\mu\text{m}$	Расстояние от внутренней стенки волновода, h	500 $\mu\text{m}$
Ширина волновода, L	800 $\mu\text{m}$		
Высота пролетного канала, 2a	240 $\mu\text{m}$	Толщина проводников, d	6 $\mu\text{m}$
Толщина алмазной подложки, t	150 $\mu\text{m}$		30 $\mu\text{m}$
Ширина проводников, d1	25 $\mu\text{m}$		50 $\mu\text{m}$
			80 $\mu\text{m}$



**Рисунок 1.** Конструкция планарной ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой из CVD алмаза.

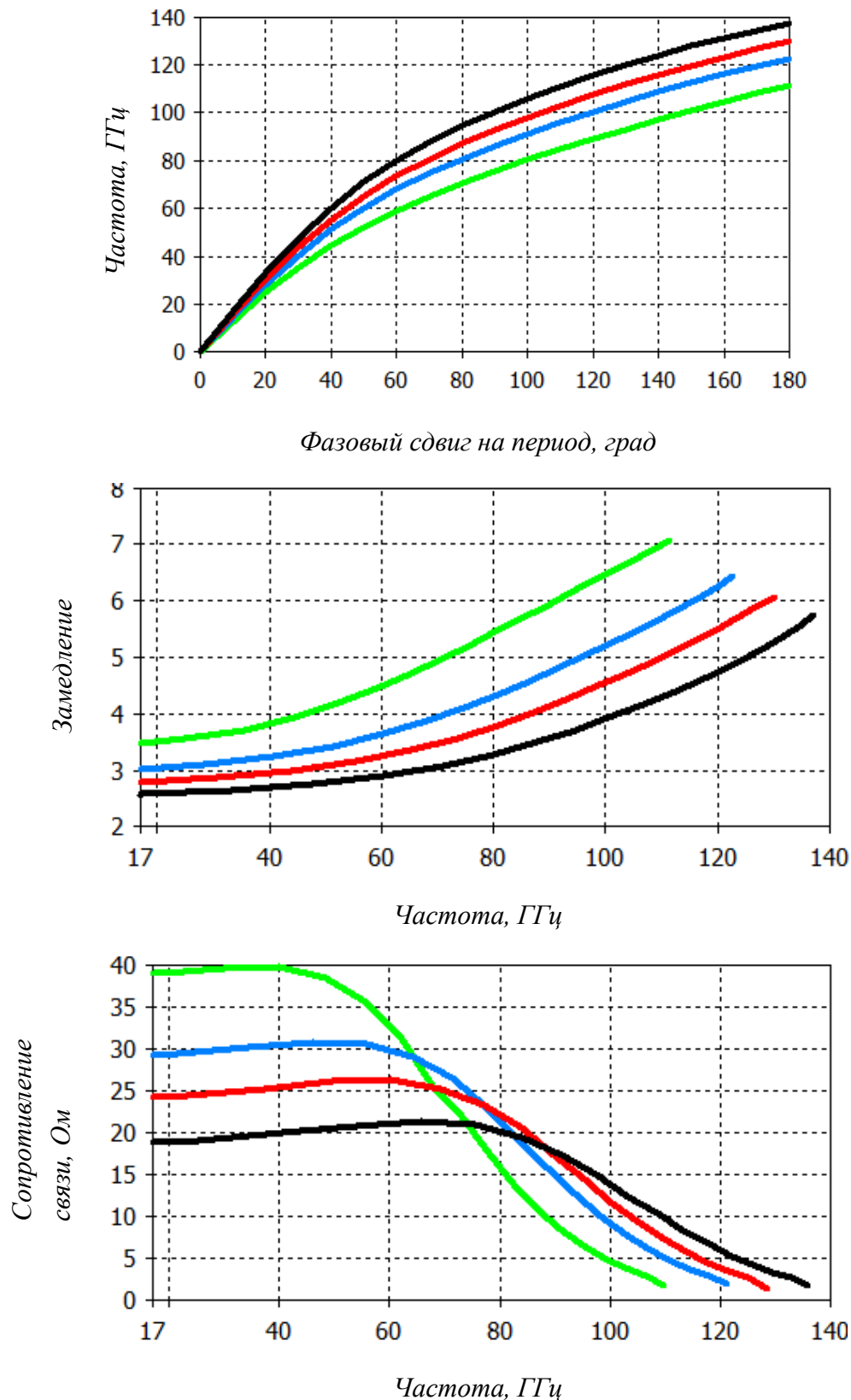
Полоса прозрачности в такой структуре достигает 5% при коэффициентах замедления рабочей (0)-й пространственной гармоники ЗС равных  $4 \div 4.28$ , а сопротивление связи  $22 \div 18 \text{ Ом}$  [10], необходимые для создания мощной низковольтной ЛБВ W-диапазона. Для надежной работы прибора требуется исключить возможность зарядки диэлектрика в ЗС за счет перехвата электронного потока проводниками. Цель работы состояла в исследовании распространения электромагнитных волн в планарной ЗС типа «меандр» с алмазным теплоотводом при различных значениях  $d$  методами математического моделирования.

## 2. Результаты численного моделирования ЭДХ ЗС

Анализ электродинамических параметров ЗС осуществлялся с помощью программного модуля [11], осуществляющего расчет дисперсионной характеристики и сопротивления связи в основной и высших полосах пропускания на любой пространственной гармонике с погрешностью не более 0.07% по длине волны и 6.5% по сопротивлению связи.

Учет потерь весьма важен в рассматриваемом диапазоне частот. При проводимости материала проводников  $2,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$  и шероховатости поверхности  $Ra = 320 \text{ нм}$  потери в ЗС составляют 40 дБ/м.

Для снижения вызываемой диэлектрической подложкой нагрузки на проводники, приводящей к уменьшению концентрации электрического поля в области пучка, а также с учетом имеющихся технологических возможностей была выбрана минимальная толщина подложки  $t = 150 \text{ мкм}$ . Исходя из требований к параметрам электронно-оптической системы (ускоряющее напряжение не более 15 кВ при плотности тока с катода  $100 \text{ А/см}^2$ ), были рассчитаны электродинамические характеристики планарной ЗС типа «меандр» (таблица 1), представленные на рисунке 2.



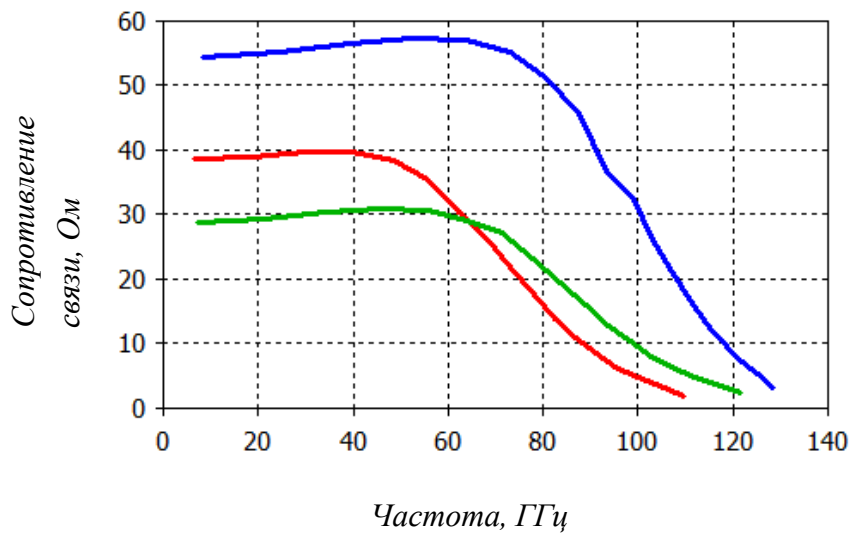
**Рисунок 2.** АЧХ диаграммы Бриллюэна (верхний график), замедления (средний график) и сопротивления связи ЗС (нижний график):  $d=6$  мкм (зеленая кривая),  $d=30$  мкм (голубая кривая),  $d=50$  мкм (красная кривая) и  $d=80$  мкм (черная кривая).

Анализ результатов, представленных на рис. 2, показал, что полоса прозрачности расширялась с 147% до 156% при увеличении толщины проводников  $d$  от 6 до 80 мкм

за счет смещения высокочастотной границы. Увеличение толщины проводников  $d$  приводило также к уменьшению замедления и, следовательно, к увеличению ускоряющего напряжения. Сопротивление связи в высокочастотной области значительно уменьшалось при увеличении толщины проводников  $d$ , однако в низкочастотной области наблюдалось высокое сопротивление связи с незначительной крутизной. Это связано с тем, что замедленная длина волны велика по сравнению с толщиной подложки  $t$ , и большая часть энергии волны распространялась в вакууме, а при укорочении длины волны большая часть энергии поля находилась в диэлектрике.

Для увеличения протяженности участка с высоким сопротивлением связи и слабой крутизной (см. рис. 2, нижний график) в высокочастотную область исследовалось влияние отношения толщины проводников к толщине подложки  $d/t$  (рис. 3).

При соотношении  $d/t = 0.2$  начало спада АЧХ сопротивления связи находилось на частоте  $\sim 70$  ГГц, а при  $d/t = 0.04$  частота начала спада кривой сопротивления связи смещалась в низкочастотную область (рис. 3).



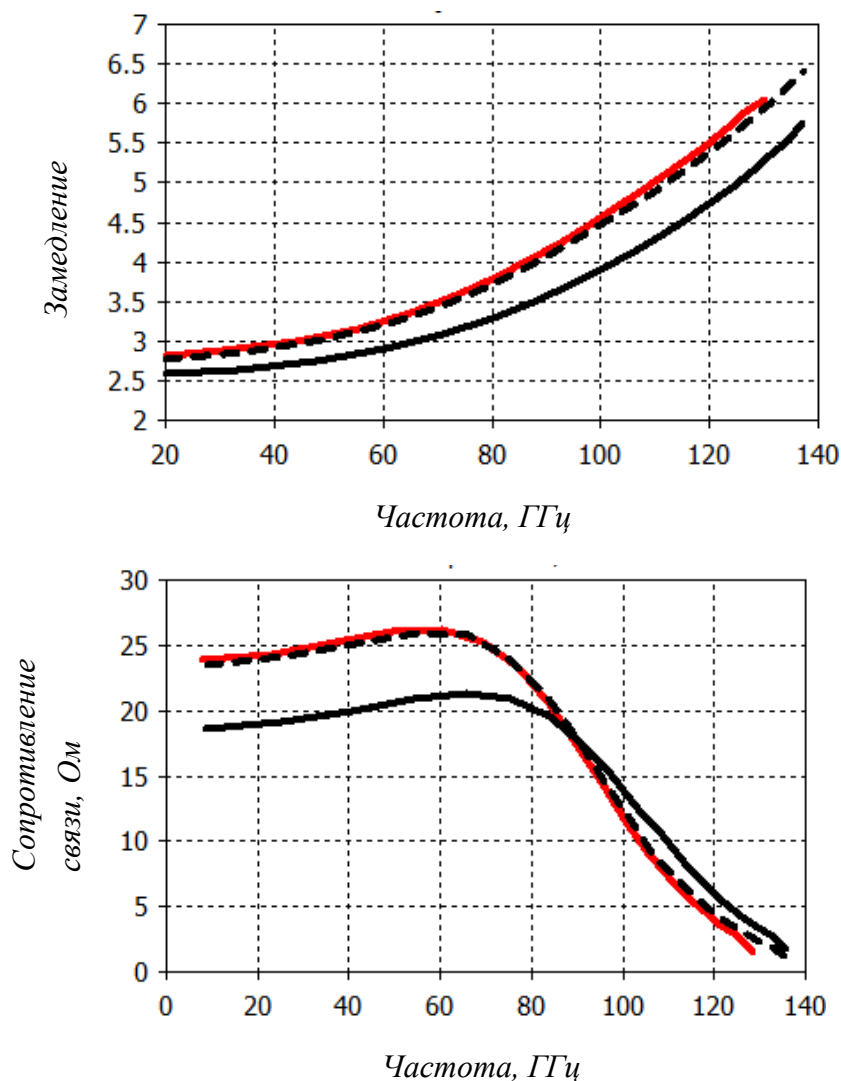
**Рисунок 3.** АЧХ сопротивления связи в ЗС при толщине проводников  $d$  и толщине подложки  $t$ :  $d=6$  мкм и  $t=150$  мкм ( $d/t = 0.04$ ) — красная кривая,  $d=6$  мкм и  $t=30$  мкм ( $d/t = 0.2$ ) — синяя кривая,  $d=30$  мкм и  $t=150$  мкм ( $d/t = 0.2$ ) — зеленая кривая.

Таким образом, частотная область излома кривой сопротивления связи зависела от отношения  $d/t$ , что дало возможность расширять участок с высоким сопротивлением связи и слабой крутизной в высокочастотную область путем увеличения величины  $d/t$ .

### 3. Исследование влияния периода ЗС на ЭДХ ЗС

Как отмечалось выше, увеличение толщины проводников  $d$  приводило к уменьшению сопротивления связи и замедления (рис. 2), ухудшая тем самым ЭДХ ЗС.

В результате исследования было установлено, что уменьшение периода ЗС  $N\lambda$  компенсировало недостатки связанные с увеличением толщины проводников  $d$  (рис. 4).



**Рисунок 4.** АЧХ замедления (верхний график) и сопротивления связи ЗС (нижний график) при толщине проводников  $d$  и периоде ЗС  $H_s$ :  $d=50$  мкм и  $H_s=190$  мкм (красная кривая),  $d=80$  мкм и  $H_s=190$  мкм (сплошная черная кривая),  $d=80$  мкм и  $H_s=170$  мкм (пунктирная черная кривая).

Анализ результатов, представленных на рис. 4, показал, что при периоде ЗС  $H_s = 190$  мкм и толщине проводников  $d = 50$  мкм и  $d = 80$  мкм замедление уменьшалось, например, на частоте 100 ГГц с 4.5 до 3.8, соответственно ускоряющее напряжение изменялось с 13 до 18 кВ. Уменьшение периода ЗС до 170 мкм при толщине проводников 80 мкм компенсировало изменение сопротивления связи и замедления (на рис. 4 кривые для  $d = 50$  мкм и  $H_s = 190$  мкм практически совпадают).

#### 4. Заключение

Исследуемая конструкция планарной ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой из поликристаллического алмаза обладает высоким сопротивлением связи 0-й пространственной гармоники основной моды в широкой полосе частот.

Совокупность вышеуказанных свойств позволяет использовать предложенную планарную ЗС в разрабатываемых мощных низковольтных ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн.

В результате численного моделирования установлено, что толщина проводника  $d$  должна была быть не менее  $p/17$ , где  $p$  – расстояние между соседними проводниками

на подложке, т.к. при меньшей толщине происходило токооседание электронного потока на поверхность диэлектрика, приводившее к накоплению заряда в подложке, появлению паразитных электростатических полей и инициализации процессов вторичной эмиссии.

#### Список литературы

1. Final Report of the Project MiWaveS “Beyond 2020 heterogeneous wireless network with millimeter-wave small-cell access and backhauling”.
2. Kelly D., Pilgrim D. The Golden Age of Mobile Wireless. – [www.csmantech.org/Digests/2011/papers/1.2.pdf](http://www.csmantech.org/Digests/2011/papers/1.2.pdf).
3. F. Andre et al., “Fabrication of W-band TWT for 5G small cells backhaul,” in Proc. 18th Int. Vac. Electron. Conf. (IVEC), London, U.K., Apr. 2017, pp. 1–4, doi: 10.1109/IVEC.2017.8289653.
4. F. Andre et al., “Technology, Assembly, and Test of a W-Band Traveling Wave Tube for New 5G High-Capacity Networks” in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 67, no. 7, pp. 2919–2924, July 2020, doi: 10.1109/TED.2020.2993243
5. N.M. Ryskin, A. G. Rozhnev, A. V. Starodubov, A. A. Serdobintsev, R. A. Torgashov, V. V. Galushka and A. M. Pavlov, “Development of planar slow-wave structures for low-voltage millimeter-band vacuum tubes,” 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), pp. 1-2, Nagoya, Japan, 2018
6. Ulisse G., Krozer V. “W-Band Traveling Wave Tube Amplifier Based on Planar Slow Wave Structure”, IEEE Electron Device Letters. 2017. Т. 38. № 1. — с. 126-129.
7. Yang Xie et al., “Design and Fabrication of D-band Planar Double Microstrip Meander Line Slow Wave Structure” in Proc. 22th Int. Vac. Electron. Conf. (IVEC), Virtual Event, Apr. 2021, pp. 106-107.
8. Yijun Zhu et al., “Design of Microstrip Meander Line SWS with Fully Connected Auto-adaptive Neural Network” in Proc. 22th Int. Vac. Electron. Conf. (IVEC), Virtual Event, Apr. 2021, pp. 108-109.
9. А.В. Галдецкий, Е.А. Богомолова Замедляющая система планарного типа. Патент РФ №2653573 приоритет от 06.03.2017г.
10. Е.А. Ракова, Галдецкий А.В. «Планарная замедляющая система мм диапазона- проектирование и исследование технологии изготовления», материалы конференции 26-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 4-10 сентября 2016г., г. Севастополь, Крым, Россия, том 1, стр. 339-347.
11. А.В. Галдецкий, Е.А. Богомолова Модуль для расчета дисперсионной характеристики и сопротивления связи замедляющих систем в программе моделирования высокочастотных электромагнитных полей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619311 от 08.06.2021