

Разработка и исследование широкополосной планарной замедляющей системы на подложке из CVD-алмаза для СВЧ-приборов миллиметрового диапазона

Е.А. Богомолова, Е.В. Медянкова

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в работе представлено теоретическое обоснование и результаты исследования оригинальной конструкции планарной замедляющей системы (ЗС) для ламп бегущей волны (ЛБВ) миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Основу предложенного технического решения составляет меандровая линия, размещенная на подложках из CVD-алмаза, обладающего высокой теплопроводностью. Ключевой особенностью конструкции является внедрение в диэлектрическую подложку сквозных металлизированных отверстий. Данное решение позволяет сформировать параллельный высокочастотный канал связи, обеспечивающий расширение рабочей полосы частот с 4.8% до 12% при сохранении эффективного синхронизма электронного пучка с волной. Кроме того, металлизация отверстий решает критическую проблему накопления статического заряда на поверхности диэлектрика, обеспечивая эффективный перехват осевших электронов.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, замедляющая система, планарный меандр, CVD-алмаз, миллиметровый диапазон, полоса пропускания, электродинамические характеристики.

1. Введение

Современный этап развития инфокоммуникационных систем и средств радиоэлектронной борьбы характеризуется устойчивой тенденцией к освоению миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов [1–3]. Ключевым активным компонентом таких систем остаются лампы бегущей волны (ЛБВ). Однако продвижение в область частот выше 30 ГГц выдвигает экстремальные требования к основному узлу ЛБВ — замедляющей системе (ЗС). Традиционные спиральные конструкции сталкиваются с термическими ограничениями из-за малых габаритов, что делает приоритетным поиск планарных решений [4–7].

При проектировании планарных ЗС на подложках из CVD-алмаза ($\epsilon \approx 5.7$) разработчики сталкиваются с противоречием между высокой теплопроводностью и сужением полосы пропускания, а также с проблемой накопления статического заряда на диэлектрике [4, 6]. Целью данной работы является исследование оригинальной конструкции планарной ЗС со сквозными металлизированными отверстиями, позволяющей одновременно расширить рабочую полосу частот и обеспечить сток паразитных электронов.

2. Конструкция замедляющей системы планарного типа

Предложенная ЗС представляет собой прямоугольный волновод, содержащий две идентичные диэлектрические подложки с проводниками в виде меандра (рис. 1). Ключевым нововведением является выполнение в диэлектрической подложке сквозных отверстий (прямоугольных щелей) с периодом, равным половине периода меандра, и металлизацией их внутренней поверхности.

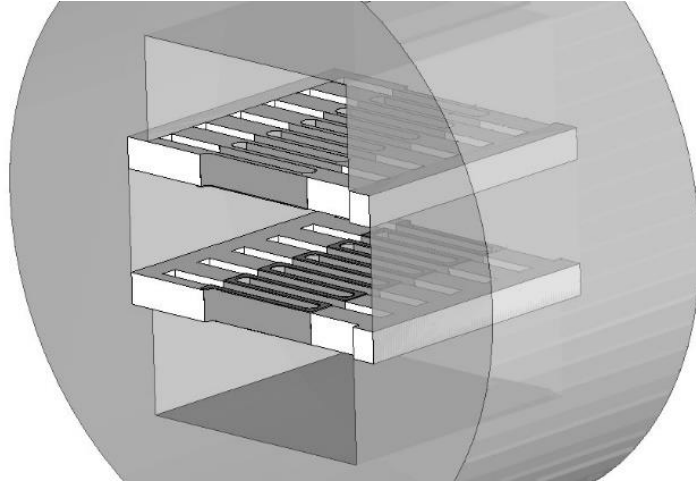


Рисунок 1. Разработанная конструкция замедляющей системы планарного типа.

Конструктивная модификация ЗС направлена на одновременное решение задач широкополосности и электрической прочности. Путем снижения эффективной диэлектрической проницаемости и формирования параллельного ВЧ-канала достигается расширение полосы пропускания при сохранении высокого сопротивления связи. Одновременно с этим решается проблема накопления заряда на диэлектрике, характерная для планарных ЛБВ, за счет создания путей стока для перехваченных электронов пучка. Уменьшает эффективную диэлектрическую проницаемость подложки, изменяя электродинамические характеристики и расширяя полосу пропускания.

3. Анализ электродинамических характеристик планарной замедляющей системы

На рис. 2 представлены сравнительные дисперсионные характеристики разработанной замедляющей системы (кривая 1) и прототипа [7] (кривая 2). Анализ формы кривых показывает, что характеристика прототипа обладает значительной дисперсией в высокочастотной области, ограничивающей полосу эффективного синхронизма электронного потока с волной. В отличие от него, кривая предложенной конструкции демонстрирует более пологий и линеаризованный характер. Рабочая полоса частот увеличилась с 4.8% до 12%. Такое значительное расширение (более чем в 2.5 раза) объясняется взаимной компенсацией коэффициентов отражения от неоднородностей внутри системы

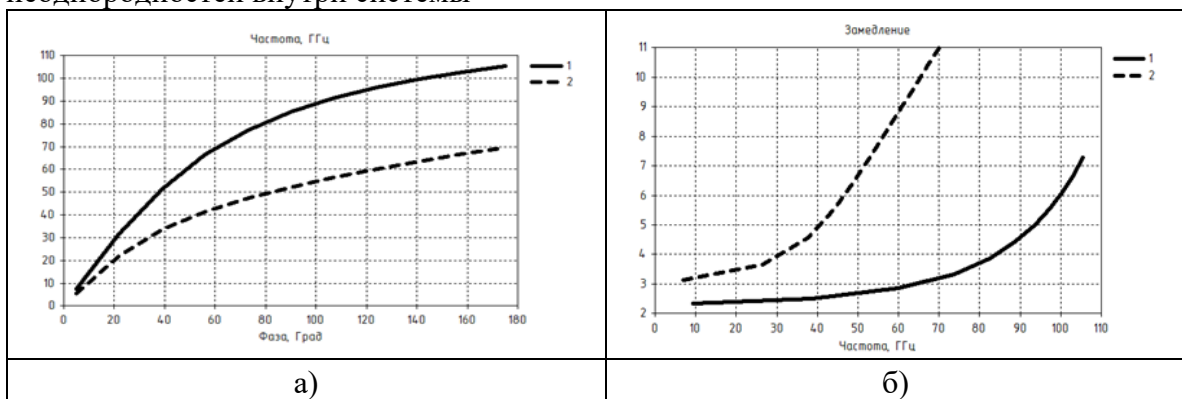


Рисунок 2. Диаграмма Бриллюэна (а) и дисперсионная характеристика (б) для предлагаемой замедляющей системы (1) и прототипа (2).

Уменьшение неравномерности замедления в полосе частот (рис. 2б) напрямую ведет к выравниванию коэффициента усиления прибора. Это позволяет использовать ЛБВ в системах передачи данных с многопозиционной модуляцией, где критична линейность характеристик.

4. Заключение

В ходе исследования предложена и детально проработана оригинальная конструкция планарной ЗС (решение о выдаче патента на изобретение от 03.02.2026 по заявке № 2025131396, приоритет 12.11.2025).

Получены следующие научные и практические результаты:

1. Расширение функциональных возможностей: установлено, что внедрение в диэлектрическую подложку сквозных прямоугольных щелей обеспечивает линеаризацию дисперсионной характеристики и расширение рабочей полосы частот с 4,8% до 12% (на примере модели для 92 ГГц). Обеспечение стабильного коэффициента замедления в широком диапазоне частот способствует выравниванию коэффициента усиления ЛБВ. Это позволяет использовать разработанную ЗС в перспективных инфокоммуникационных системах, требующих высокой линейности характеристик для передачи данных с высокой спектральной эффективностью;
2. Повышение эксплуатационной надежности: металлизация отверстий выполняет функцию эффективного перехвата «оседающих» электронов пучка. Это исключает накопление статического заряда на поверхности CVD-алмаза и минимизирует риск электрического пробоя системы.

Список литературы

1. Pan, Q. Research on Millimeter-Wave Radar Range-Doppler Quality Assessment and Target Simulation Testing Technology // *Artificial Intelligence and Digital Technology*. — 2025. — Vol. 2, no. 1. — P. 141–147
2. Lyons, G. et al. Radar and communications system extends signal range at millimeter-wave frequencies // *MIT Lincoln Laboratory News*. — May 2025.
3. Kumar, P. et al. Millimeter-wave radar for intelligent sensing: A comprehensive survey // *Measurement*. — 2025. — Vol. 250.
4. Liu, W. A Novel Planar Grating Slow-Wave Structure for Sub-Millimeter Wave TWT / W. Liu, Y. Zhao, L. Zhang // *IEEE Journal of the Electron Devices Society*. — 2024. — Vol. 12. — P. 45–52.
5. He, J. Design of a W-Band Planar Microstrip Meander-Line Slow-Wave Structure With Improved Stability / J. He, G. Zhao, T. Huang // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2020. — Vol. 48, no. 9. — P. 3122–3128.
6. Богомолова, Е. А. Анализ дисперсионных характеристик планарных меандровых замедляющих систем на подложках из искусственного алмаза / Е. А. Богомолова, Д. В. Богомолов, Н. С. Карасев // *Радиотехника*. — 2023. — Т. 87, № 11. — С. 45–52.
7. Галдецкий А. В., Богомолова Е. А. «Замедляющая система планарного типа» // Патент РФ № 2653573 от 11.05.2018