

УДК 621.385.69

Методы моделирования СВЧ-устройств на микрополосковых линиях

Кузнецов Вадим Вадимович

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

Лукашов Дмитрий Игоревич

dimitriluckashov@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены основные направления развития современных сверхвысокочастотных устройств, новые материалы для их изготовления, инновационные методы проектирования оборудования данного типа, а также перспективные, на данный момент, направления исследований в данной сфере. Объектом исследования являются последние достижения в области сверхвысокочастотных фильтров, основанных на микрополосковых линиях. Используя различные источники информации, были описаны улучшения характеристик данных устройств.

Ключевые слова: СВЧ-фильтры, микрополосковые линии, связанные резонаторы, метаматериалы, электромагнитные симуляции, программируемые фильтры

Введение. СВЧ-фильтры на микрополосковых линиях играют ключевую роль в современных радиоэлектронных системах, обеспечивая селекцию частот и формирование необходимых спектральных характеристик сигналов. Постоянно растущие требования к миниатюризации, повышению производительности и расширению функциональных возможностей радиоэлектронных устройств стимулируют развитие новых технологий в этой области.

Основные направления развития. Новые топологии фильтров. Устройства на основе связанных резонаторов обеспечивают высокую селективность и компактность, позволяя создавать фильтры с большим числом полюсов в ограниченном пространстве. Их конструкция основана на взаимодействии электромагнитных полей, что позволяет достичь более крутых скатов характеристик [1].

Устройства с распределенными элементами дают возможность реализовать сложные частотные характеристики, включая фильтры с крутыми скатами и полосами подавления. В них используются не только сосредоточенные элементы (индуктивности и емкости), но и распределенные параметры микрополосковых линий [2].

Фильтры на основе метаматериалов обеспечивают уникальные электромагнитные свойства, такие как отрицательная диэлектрическая проницаемость или магнитная проницаемость, что позволяет создавать устройства с необычными характеристиками, например, с отрицательной групповой скоростью. Новые материалы:

- диэлектрики;
- высокочастотные керамики: такие материалы, как алюминат лантана (LTCC), позволяют создавать многослойные структуры с высокой плотно-

стью интеграции и низкими потерями. Они широко используются в микроволновых интегральных схемах (МИС) [3];

- жидкие кристаллы: их электрооптические свойства используются при создании перестраиваемых фильтров, где изменение электрического поля воздействует на диэлектрическую проницаемость среды и, соответственно, его характеристики [4].

- метаматериалы — искусственные материалы с необычными электромагнитными свойствами, которые могут быть использованы для создания СВЧ-устройств с отрицательной эффективной диэлектрической проницаемостью или магнитной проницаемостью. Это позволяет реализовать компактные фильтры с уникальными характеристиками [5];

- металлы: благородные металлы такие как золото и серебро традиционно используются в СВЧ-технике благодаря своим низким потерям. Однако их высокая стоимость стимулирует поиск более дешевых альтернатив. К таким аналогам можно отнести нитриды металлов, например нитриды титана, ниобия и другие обладают низкими потерями и высокой температурой плавления, что делает их перспективными для высокотемпературных применений. Металлические сплавы, такие как монель и купроникель, используются для создания микрополосковых линий с высокой механической прочностью и хорошей проводимостью [1];

- композитные материалы: полимерные композиты — сочетание полимеров с металлическими или керамическими наполнителями позволяет создавать легкие и прочные материалы с заданными диэлектрическими свойствами; ферриты — материалы с ферромагнитными свойствами, которые используются в фильтрах для создания нерезонансных поглотителей и изоляторов [2].

Новые методы проектирования. Электромагнитные симуляции предоставляют возможность точно моделировать характеристики СВЧ-приборов и оптимизировать их конструкцию. Современные программные комплексы позволяют проводить детальный анализ электромагнитного поля внутри фильтра и учитывать различные паразитные эффекты. Нейронные сети используются для ускорения процесса проектирования и оптимизации. Они обучаются на больших массивах данных и позволяют определять характеристики фильтров без проведения трудоемких симуляций [3].

Интеграция с активными элементами позволяет создавать программируемые фильтры с низким уровнем шумов. Например, сочетание микрополосковых СВЧ-приборов с транзисторами позволяет реализовать фильтры с переменной полосой пропускания. Интеграция с другими пассивными компонентами дает возможность создавать компактные модули с высокой функциональностью. Например, объединение фильтра с антенной и усилителем позволяет реализовать компактный приемный модуль [4].

Перспективные направления исследований. Устройства с программируемыми характеристиками: Использование активных элементов и микроэлектромеханических систем (MEMS) для создания фильтров с динамически

изменяемыми характеристиками. Они могут использоваться в адаптивных системах связи и радиолокации.

Фильтры для многочастотных систем: разработка СВЧ-устройств, способных работать в широком диапазоне частот и перестраиваться под различные сигналы. Такие фильтры необходимы для систем связи нового поколения, которые будут поддерживать множество стандартов и протоколов [5].

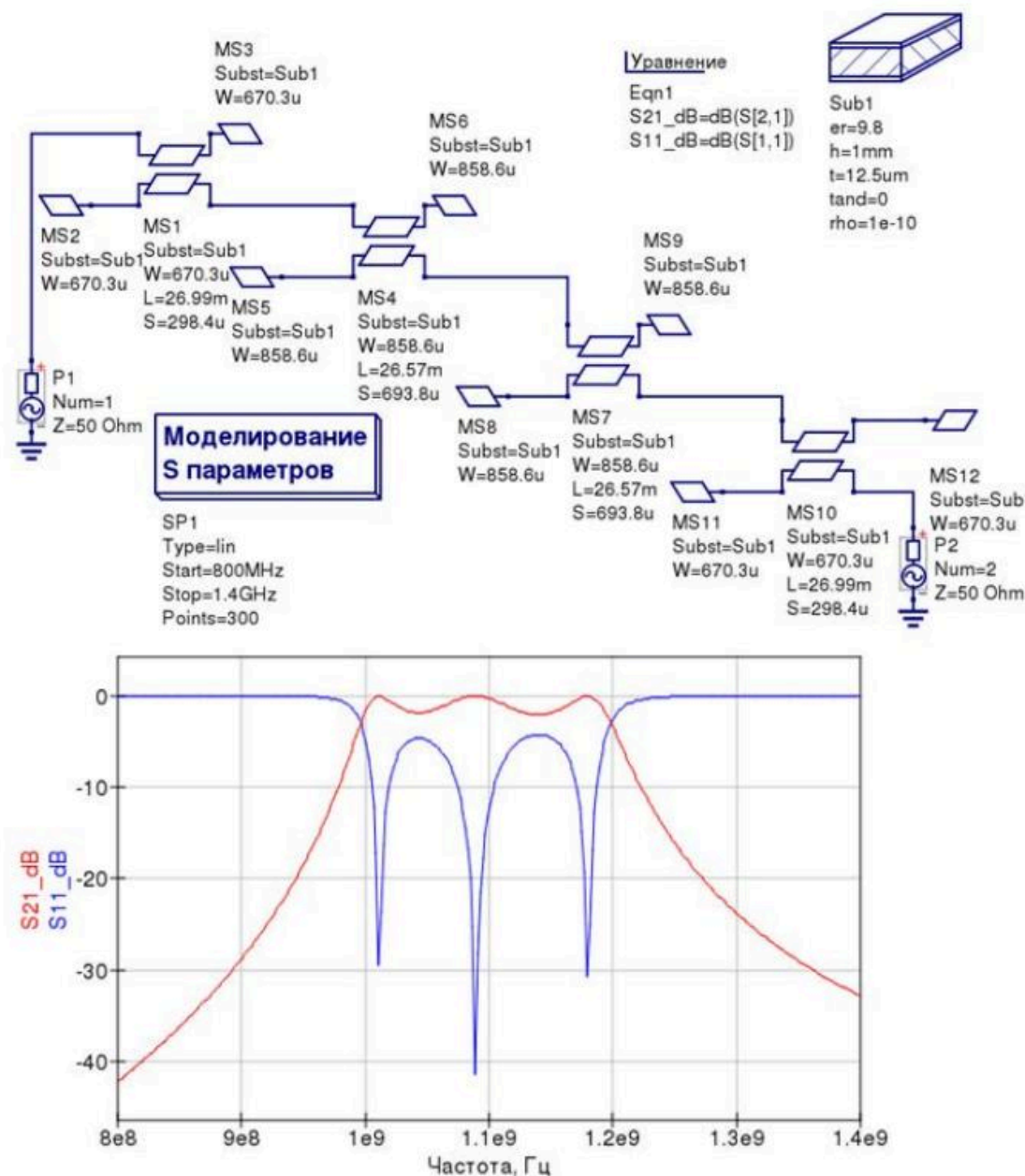


Рис. 1. Пример моделирования СВЧ-фильтра на микрополосковых линиях при помощи программного обеспечения Qucs

Приборы с повышенной устойчивостью к внешним воздействиям: разработка фильтров, способных работать в экстремальных условиях (высокая температура, высокая влажность, радиация). Они востребованы в космической и военной технике.

Фильтры для систем с фазовой модуляцией: разработка фильтров, обеспечивающих минимальные искажения фазы сигнала. Такие устройства необходимы для систем цифровой связи, где важна высокая точность передачи информации [1].

Заключение. СВЧ-фильтры на микрополосковых линиях продолжают развиваться, и новые технологии открывают широкий диапазон перспектив для их применения в различных областях. Постоянно появляются новые материалы, конструкции и методы проектирования, что позволяет создавать более совершенные и функциональные устройства. Дальнейшее развитие этой области будет направлено на создание еще более компактных, эффективных и многофункциональных устройств, способных удовлетворить растущие потребности современной электроники.

Литература

- [1] Елизаров А.А. *Микроволновые частотно-селективные устройства на резонансных отрезках электродинамических замедляющих систем и структурах с метаматериалами*. Москва, Издательский дом Высшей школы экономики, 2020, с. 18–46.
- [2] Кузнецов В.В. Моделирование высокочастотных схем в частотной области при помощи САПР Qucs. *Компоненты и технологии*, 2015, № 8, с. 120–126.
- [3] Иванов В.А. *Микроволновая электроника: основы и приложения*. Москва, Лань, 2022, с. 55–61.
- [4] Гуляев Ю.В. *Новые материалы для СВЧ-фильтров*. Москва, Наука, 2022, с. 55–62.
- [5] Урун Н.Э. *Компьютерное моделирование микроволновых устройств*. Новосибирск, НГТУ, 2011, с. 25–37.

Innovations in microstrip based microwave (ultra high frequency) filters: a review of recent advances

Kuznetsov V.V.

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

Lukashov D.I.

dimitriluckashov@yandex.ru

BMSTU, Moscow, Russia

This article discusses the main directions of development of modern ultra-high-frequency devices, new materials for their manufacture, innovative methods of designing equipment of this type, as well as promising, at the moment, research directions in this area. The object of the study is the latest achievements in the field of ultra-high-frequency filters based on microstrip lines. Using various sources of information, improvements in the characteristics of these devices were described.

Keywords: microwave filters, microstrip lines, coupled resonators, metamaterials, electromagnetic simulations, programmable filters