

Хохол Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник НИИ МЭС, Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники, г. Томск

Коровкин Егор Николаевич, младший научный сотрудник НИИ СЭС, Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники, г. Томск

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛОСНОПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРА Ku- ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ МЭМС ТЕХНОЛОГИИ

Аннотация: Статья посвящена результатам моделирования перестраиваемого полосно-пропускающего фильтра диапазона 14-16 ГГц на основе технологии микро электромеханических систем (МЭМС). Фильтр представляет собой монолитную интегральную схему (МИС) с интегрированными микро электромеханическими коммутируемыми звеньями (МЭМ КЗ), управляемыми напряжением. Шаг перестройки фильтра составляет 0,5 ГГц, относительная полоса пропускания не более 15%, прямые потери составляют не более 1,5 дБ, коэффициент отражения по входу/выходу не более - 15 дБ. Микросхема разработана на основе технологического процесса научно-образовательного центра «Нанотехнологии» ТУСУР, габаритные размеры микросхемы составляют 1,4x1,1,0,1 мм.

Ключевые слова: микросхема, СВЧ, фильтр, МЭМС, модель, топология.

Annotation: The article is devoted to the results of modeling a tunable bandpass filter in the range of 14-16 GHz based on the technology of micro electromechanical systems (MEMS). The filter is a monolithic integrated circuit with integrated microelectromechanical switched circuits controlled by voltage. The filter tuning step is 0.5 GHz, the relative bandwidth is not more than 15%, direct losses are not more

than 1.5 dB, the input / output reflection coefficient is not more than -15 dB. The microcircuit was developed on the basis of the technological process of the scientific and educational center "Nanotechnologies" TUSUR, the overall dimensions of the microcircuit are 1.4x1.1x0.1 mm.

Keywords: integrated circuits, RF, filter, MEMS, model, topology.

В настоящее время области применения МЭМ систем достаточно обширны – акселерометры, гироскопы, микрофоны, СВЧ, различного рода датчики, микрозеркала, и т.д. [1]. Рассматривая СВЧ направление, МЭМ КЗ разделяются по механизму управления балкой (электростатическим, электромагнитным, пьезоэлектрическим и термическими полями), а также по типу контакта – с омическим или емкостным контактом [2] и с различной схемой включения/отключения (нормально открытые и нормально закрытые) [3,4]. СВЧ МЭМ КЗ различаются по типу механизма работы, а соответственно и по частотным и электрическим параметрам [5; 6]. В данной работе были использованы МЭМ КЗ с электростатическим типом управления, обладающие рядом преимуществ [7] в сравнении с остальными типами.

В зависимости от условий эксплуатации для разных типов МЭМ ключей может меняться область применения, но у электростатических она более широкая, не только из-за перечисленных преимуществ, но также из-за возможности использования при изготовлении ключа хорошо известной технологии изготовления полупроводниковых приборов на основе соединений $A^{III}B^V$.

Современная спутниковая связь, радары, системы радиоэлектронной борьбы и контрольно-измерительные приборы требуют настраиваемых фильтров для гибких и адаптивных операций в широком диапазоне частот [8; 9; 10]. СВЧ МЭМС перестраиваемые фильтры [11; 12; 13; 14] обладают гораздо более низкими вносимыми потерями, лучшими показателями нелинейности и более высокой добротностью, чем у полупроводниковых устройств [7; 13; 14]. СВЧ МЭМС также имеют преимущества простой (электростатической)

настройки со сверхнизким энергопотреблением, широкой полосой пропускания и возможностью монолитной интеграции с активной схемой.

Приступая к эскизному проектированию МИС коммутатора на основе МЭМС, в первую очередь необходимо определиться с моделью используемого МЭМ КЗ. Поскольку изготовление опытных образцов планируется на базе научно-образовательного центра «Нанотехнологии» ТУСУР, за основу была взята модель, описанная в [3], схематически представленная на рисунке 1.

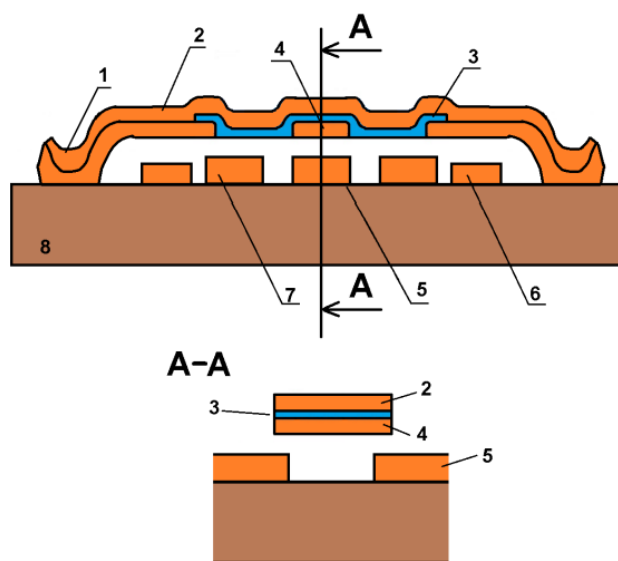


Рисунок 1 – Схематическое изображение балки МЭМ КЗ

- 1 – опора балки МЭМ КЗ; 2 – основная металлизация балки МЭМ ключа;
- 3 – Диэлектрический изолирующий слой; 4 – замыкающий электрод;
- 5 – Сигнальный электрод; 6 – Управляющий электрод;
- 7 – Заземляющий электрод; 8 – подложка GaAs.

Модель МЭМ КЗ, представленная в [3], была разработана для не утонённой подложки толщиной 600 мкм, ввиду чего в структуру были добавлены заземляющие электроды («7» на рисунке 1). Поскольку планируется изготовление МЭМС на пластинах GaAs рНЕМТ, то необходимо изменить конфигурацию МЭМ КЗ, в частности устранить заземляющие электроды, передвинуть управляющие электроды, расположить заземляющие отверстия по краям опор балки МЭМ КЗ. Поскольку в используемых САПР отсутствует модель, описанная выше, необходимо было провести моделирование структуры МЭМ КЗ. В САПР была собрана модель, представленная на рисунке 2. Прямые

потери в МЭМ КЗ напрямую зависят от толщины диэлектрического изолирующего слоя («3» на рисунке 1). В [3] толщина диэлектрического слоя была выбрана минимально допустимой – 0.2 мкм, соответственно в данной работе данное значение было также установлено в 0.2 мкм. При увеличении толщины диэлектрического слоя возможно получить гораздо меньшие прямые потери за счёт уменьшения эквивалентной ёмкости между замыкающим электродом («4» на рисунке 1) и заземлённой основной металлизацией балки МЭМ КЗ («2» на рисунке 1). Однако, увеличение толщины диэлектрического слоя является технологически трудной задачей, для решения которой необходимо пересмотреть всю конструкцию МЭМ КЗ и технологический процесс изготовления, ввиду чего было принято решение провести разработку на основе текущей конфигурации МЭМ КЗ.

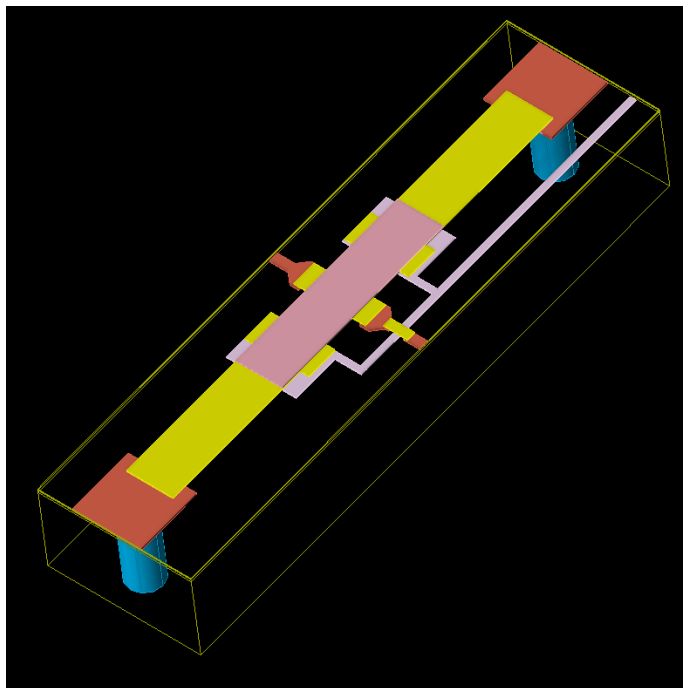


Рисунок 2 – Модель МЭМ КЗ в трёхмерном представлении

При построении электрической схемы за основу была взята структура полосно-пропускающего фильтра, представленная на рисунке 3.

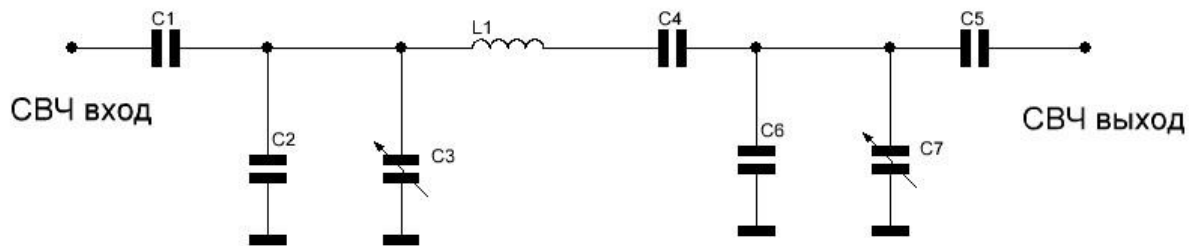


Рисунок 3 – Схема электрическая перестраиваемого фильтра на сосредоточенных идеальных элементах

Следующим шагом необходимо осуществить переход с идеальных элементов схемы к реальным (распределённым) элементам и провести схемотехническое, топологическое и электромагнитное моделирование. На рисунке 4 представлена схема электрическая принципиальная разработанного перестраиваемого фильтра.

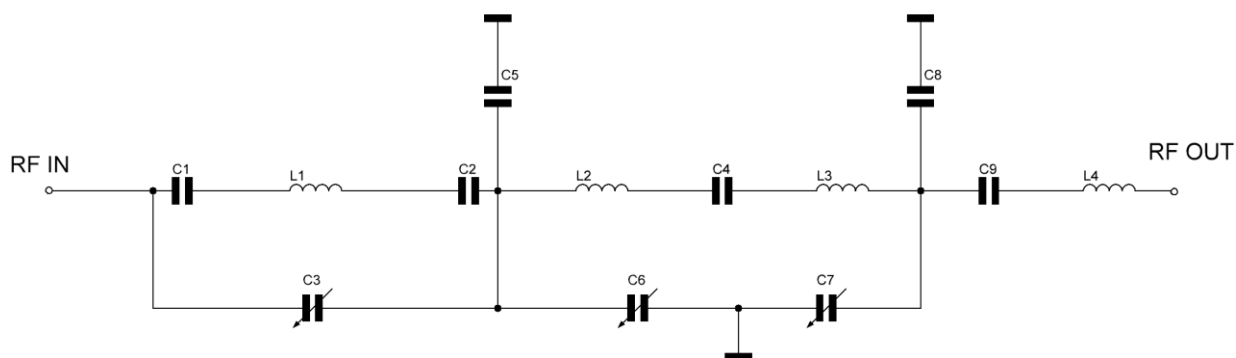


Рисунок 4 – Схема электрическая принципиальная перестраиваемого фильтра

МЭМ коммутируемые звенья представлены на рисунке перестраиваемыми конденсаторами C3, C6 и C7. В отличие от изначальной схемы, представленной на рисунке 3, потребовалось добавить дополнительное МЭМ КЗ C3 для усиления глубины регулировки полосы пропускания фильтра. Для согласования с 50 Омным трактом потребовалось интегрировать дополнительные реактивные элементы. На рисунке 5 представлены частотные зависимости модулей коэффициента отражения и коэффициента передачи перестраиваемого фильтра во всех доступных состояниях. Как видно из рисунка, максимальное значение

прямых потерь составляет порядка 1,5 дБ, коэффициент отражения не превышает минус 15 дБ. Шаг перестройки составляет 0,5 ГГц. Моделирование велось с учётом проволочных выводов по СВЧ входу/выходу и по каждому DC контакту. Относительная полоса пропускания в каждом состоянии коммутируемого фильтра составляет менее 15%.

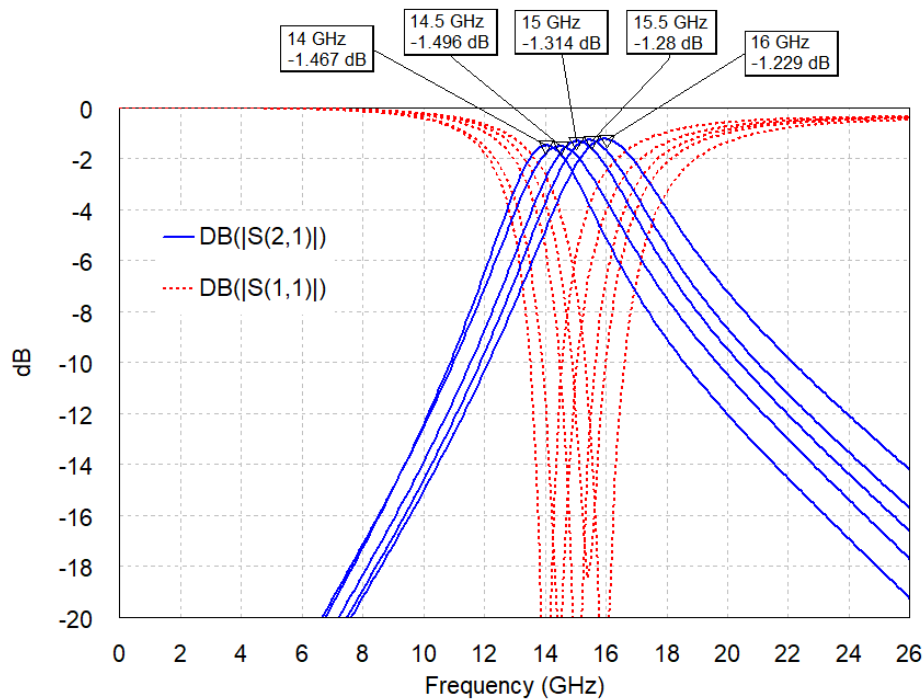


Рисунок 5 – Частотные зависимости модулей коэффициента передачи и коэффициента отражения микросхемы перестраиваемого фильтра

На рисунке 6 представлена топология разработанной микросхемы. Габариты микросхемы составляют 1,4x1,1 мм, площадь кристалла составляет 1,54 мм².

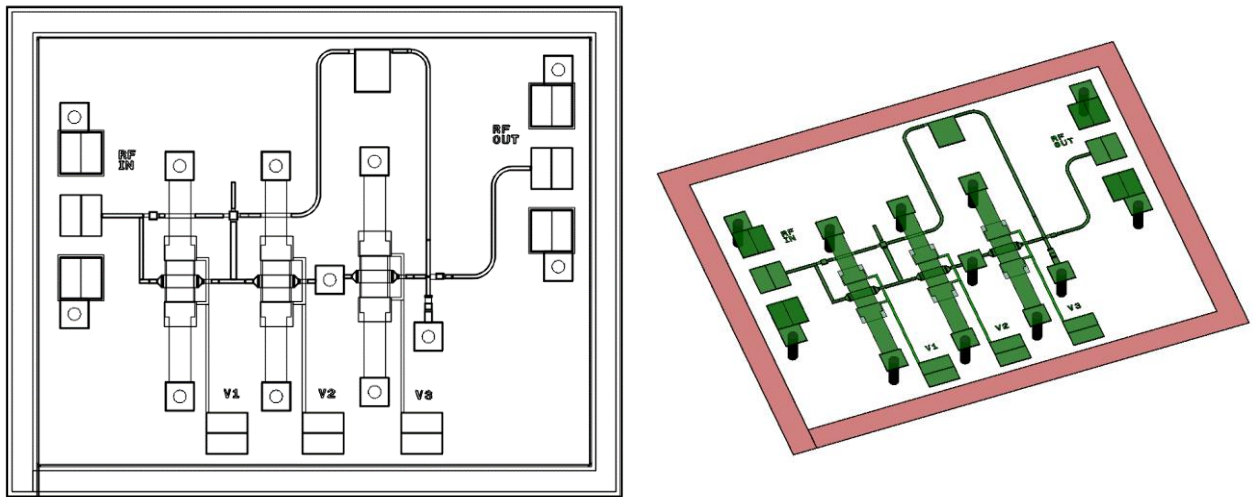


Рисунок 6 – Топология разработанной микросхемы перестраиваемого фильтра

Работа выполнена при финансовой поддержке «Фонда содействия инновациям» по договору № 61ГУРЭС14/72772 от 28.12.2021 в рамках проекта «Умник-21. Проектная команда. Электроника».

Библиографический список:

1. INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS MEMS, 2013.
2. Белов, Л. Переключатели сверхвысокочастотных сигналов // - Электроника: Наука, Технология, Бизнес. №1 М.: Техносфера. – 2006. – С. 20– 25.
3. «Микроэлектромеханический переключатель для сверхвысокочастотных широкополосных интегральных схем» Кулинич И.В., диссертация на соискание степени кандидата технических наук, Томск, 2019.
4. «Проектирование и изготовление микроэлектромеханических переключателей на подложках GaAs для СВЧ диапазона» Щаврук Н.В., диссертация на соискание степени кандидата технических наук, 2015.
5. Колпаков, Ф.Ф. Микроэлектромеханические устройства в радиотехнике и системах телекоммуникаций: учебное пособие / Ф.Ф. Колпаков, Н.Г. Борзяк, В.И. Картунов. – Харьков: ХАИ. – 2006. – С. 83.
6. Щаврук, Н.В Сравнение микроэлектромеханических переключателей

для коммутации СВЧ сигнала / Н.В. Щаврук //Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC — 2013). – М.: МИРЭА. – 2013. – С. 191-197.

7. Варадан, В ВЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе; пер. с англ. Ю.А. Заболотной. – М.: Техносфера. – 2004. – 528 с.

8. I.C. Hunter, L. Billonet, B. Jarry, and P. Guillon, “Microwave Filters— Applications and Technology”. IEEE Trans. Microwave Theory & Tech. 50(3), pp.794-804, 2002.

9. J. Uher, and J. R. Hofer, “Tunable microwave and milimeter-wave band pass filters”. IEEE Trans.Microwave Theory Tech., 39(4), pp. 643-653, 1991.

10. G. L. Matthaei, E. Young, and E. Jones, “Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures”. Norwood, MA: Artech House, 1980.

11. G. M. Rebeiz, “RF MEMS Theory, Design, and Technology”. John Wiley and Sons, 2003.

12. K. Entesari, and G. M. Rebeiz, “A 12-18 GHz 3 Pole RF MEMS Tunable Filter”. IEEE Trans. on Microwave Theory Tech., 53 (8), pp. 2566-2571, 2005.

13. A. Pothier, J. C. Orlianges, and E. Zheng “Low Loss 2-Bit Bandpass Filters Using MEMS DC contact switches”. IEEE Trans. on Microwave Theory Tech. 53, pp. 354-360, 2005.

14. M. Miao, J. Bu, and L. Zhao, “A Bulk Micromachined Tunable Microwave Lowpass Filter for 10-15GHz Wireless/Satellite Communication”. Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular System, China, pp. 524-528, 2008.