ИНТЕГРАЛЬНЫЕ LC-ФИЛЬТРЫ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПО ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Д.А. Борейко, А.И. Тюменцев, О.И. Солодовникова

Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

Исследованы возможности реализации фильтров различных типов на основе сосредоточенных катушек индуктивности и конденсаторов, выполненных по тонкопленочной технологии. Представлены результаты электромагнитного анализа разработанного фильтра высоких частот и полосового фильтра. Произведено сопоставление частотных зависимостей расчетных моделей и экспериментальных образцов.

Ключевые слова: интегральные LC-фильтры, ФВЧ, ПФ, тонкопленочные технологии, элементы с сосредоточенными параметрами.

INTEGRAL LC-FILTERS OF VARIOUS TYPES FOR THIN-FILM TECHNOLOGY

D.A. Boreyko, A.I. Tyumentsev, O.I. Solodovnikova

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

The possibilities of implementing filters of various types based on lumped inductors and capacitors made by thin-film technology are investigated. The results of electromagnetic analysis of the developed high-pass filter and a band-pass filter are presented. The frequency dependences of the calculation models and experimental samples are compared.

Keywords: integrated LC filters, high-pass filters, BP, thin-film technologies, elements with lumped parameters.

В радиоэлектронике широкое применение имеют компоненты частотной селекции, например, электрические фильтры, построенные на основе элементов с сосредоточенными параметрами. Массогабаритные показатели таких устройств не всегда удовлетворяют высоким требованиям для современной компактной аппаратуры. Одним из возможных путей решения этой проблемы является интеграция пассивных элементов, таких как конденсаторы и катушки индуктивности, в объем многослойной структуры вместе с соединяющими их проводниками [1].

Устройства, реализованные таким образом, называются интегральными фильтрами и могут быть реализованы по различным технологиям, среди которых, можно назвать классическую технологию изготовления многослойных печатных плат, изготовление толстопленочных многослойных структур (технология LTCC), а также создание многослойного проводящего рисунка с использованием прецизионной тонкопленочной технологии. При этом последняя технология отвечает максимальной степени микроминиатюризации благодаря тому, что позволяет обеспечивать точность нанесения металлизации порядка нескольких микрометров [2].

Дополнительные возможности для микроминиатюризации при использовании тонкопленочной технологии является возможность создания диэлектрического слоя с большим значением диэлектрической проницаемости ϵ ($\epsilon = 16$ для моноалюмината неодима NdAlO_3) одновременно с толщиной порядка 0,1–2 мкм, что позволяет значительно уменьшить площадь интегральных конденсаторов и, как следствие, всего фильтра.

Однако на сегодняшний день особенности проектирования с использованием данной технологии в открытых источниках представлена слабо. В связи с этим необходимо осуществлять исследования в данном направлении по проектированию устройств частотной

селекции. Ранее в [3; 4] была показана возможность создания тонкопленочных интегральных фильтров нижних частот, созданных по различным схемотехническим решениям, однако вопрос создания подобных фильтров других типов остается открытым.

Целью данной работы является исследование возможностей создания интегральных тонкопленочных фильтров различных типов, в том числе фильтров верхних частот и полосовых фильтров, изготовленных по прецизионной технологии.

Исходя из особенностей тонкопленочной технологии, а также основываясь на результатах предыдущих исследований [3–6], было решено реализовывать структуру, содержащую два слоя коммутации (медных проводников). Коммутационные слои разделены друг от друга в местах пересечения диэлектрическим материалом малой толщины. В качестве жесткой основы выбран обладающий высокими электрическими и эксплуатационными параметрами материал ВК100-1 (оксид алюминия), на котором сначала происходило формирование первого слоя коммутации толщиной 0,6 мкм. Затем формировались два диэлектрических слоя из моноалюмината неодима NdAlO_3 толщиной 0,5 мкм каждый. Диэлектрические слои сделаны таким образом, чтобы верхний диэлектрик был шире нижнего. Это обеспечивает плавный перепад высоты для исключения обрыва металлических проводников при переходе с одного уровня коммутации на другой. Последней стадией создания LC-фильтров по тонкопленочной технологии являлось формирование второго коммутационного слоя толщиной 3 мкм. Схема многослойной структуры LC-фильтра показана на рис. 1.

Рис. 1. Многослойная структура на жесткой подложке ВК100-1

На основе информации из открытых источников [7; 8], учитывая особенности технологии и возможности компоновки пассивных элементов в двуслойной структуре, были выбраны следующие схемотехнические решения для проектируемых фильтров.

Для фильтра верхних частот (ФВЧ) выбрана схема на основе П-образного звена (рис. 2а), так как она позволяет использовать две катушки меньшего номинала, что способствует удобству расположения топологии на вытянутой по форме подложке. Для полосового фильтра (ПФ) была выбрана схема на основе параллельных контуров с емкостной связью (рис. 2б), которая широко используется при реализации LC-фильтров, в особенности в интегральном исполнении. Она практически полностью совпадает со схемой ФВЧ, отличаясь только наличием параллельно подключенных к катушкам индуктивности конденсаторам.

Рис. 2. Схемотехническое решение фильтра высоких частот (а) и полосового фильтра (б)

При проектировании данных фильтров в части создания топологии учитывались технологические параметры элементов проводящего рисунка, соответствующие высокому проценту выхода годных изделий и гарантированному обеспечению необходимых соединений. Геометрические параметры элементов топологии были следующими:

- минимальная ширина проводника – 50 мкм,
- минимальный зазор между элементами проводящего рисунка – 50 мкм,
- технологический запас для контактных площадок – 20 мкм,
- технологический запас между двумя подслоями маски – 20 мкм,
- перекрытие маски верхним слоем коммутации – 40 мкм.

На рис. 3 представлена топология фильтра с указанными размерами.

Рис. 3. Геометрические параметры элементов топологии разрабатываемых фильтров

На основе топологий сформированы трехмерные модели (рис. 4), содержащие информацию об электромагнитных свойствах материалов и проводящих сред, для которых в специализированной САПР был проведен анализ с целью получения частотных характеристик.

Рис. 4. Трехмерная модель разрабатываемого фильтра высоких частот (а) и полосового фильтра (б)

Из рис. 4 видно, что для полосового фильтра была выбрана реализация конденсатора в продольной ветви в виде последовательного соединения двух конденсаторов для обеспе-

чения симметричности структуры, так как полосовой фильтр является более чувствительным элементом по сравнению с ФВЧ.

На рис. 5 представлены частотные характеристики затухания разработанных фильтров.

Рис. 5. Частотные характеристики затухания разработанных ВФЧ (а) и ПФ (б)

На рис. 5 штриховой линией показаны расчетные характеристики, а сплошной – экспериментальные, измеренные после корпусирования модулей в корпуса QLCC 6/8-1 в тракте 50 Ом.

Различие характеристик за полосой объясняется недостаточно эффективным подключением элементов к общей шине и может быть устранено путем введения переходных отверстий в подложке.

Разница характеристик полосового фильтра в полосе является следствием неточности изготовления конденсаторов, находящихся по краям модуля, и в дальнейшем может быть устранена с помощью более точного разделения общей подложки на модули. Также анализ полученной экспериментальной характеристики показал, что конденсатор продольной ветви схемы имеет низкую добротность, в следствие чего в дальнейшем предлагается реализовывать его аналогично конденсатору в представленном в работе ФВЧ.

В данной работе показана возможность реализации таких типов LC-фильтров как фильтр верхних частот и полосовой фильтр на основе тонкопленочной прецизионной технологии. В дальнейшем возможна разработка LC-фильтров различного типа в корпусном и бескорпусном исполнениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вендик И.Б., Холодняк Д.В., Симин А. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига // Компоненты и технологии. 2005. Вып. 5. С. 190–196.
2. Ворожцов А.Л. Технология интегрированных пассивных устройств // Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «СВЧ-2018». Омск: ЦКБА, 2018. С. 97–102.
3. Борейко Д.А., Тюменцев А.И., Солодовникова О.И. Разработка интегральных LC-фильтров нижних частот на основе тонкопленочной технологии // Техника радиосвязи. 2019. Вып. 2 (41). С. 87–92.
4. Борейко Д.А., Тюменцев А.И., Солодовникова О.И. Интегральные LC-фильтры нижних частот по тонкопленочной прецизионной технологии // Сборник статей VIII всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб: СПбГЭТУ, 2019. С. 39–43.
5. Борейко Д.А., Тюменцев А.И. Улучшение параметров элементной базы в интегральном исполнении // Сборник докладов IV Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб: СПбГЭТУ, 2015. Том 2. С. 69–73.
6. Bahl Inder. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits. 2003. 488 p.
7. Босый Н.Д. Электрические фильтры. Киев, 1957. 516 с.
8. Ханзел Г.Е. Справочник по расчету фильтров / пер. с англ. под ред. А.Е. Знаменского. М.: Сов. радио, 1974. 288 с.