"Разработка базовых конструкций и технологии изготовления сверхузкополосных температурно-стабильных ПЧ и СВЧ фильтров на ПАВ "

Москва, 2005 г.

ОСНОВНЫЕ ИСПОЛНИТЕЛИ ИНИЦИАТИВНОЙ ТЕМЫ

Руководитель инициативной темы и составитель отчета : д.т.н. Орлов В.С.

Проектирование и испытания образцов фильтров : Швец В.Б., Шварц А.Л., к.т.н. Сокольский В.В.

Технология и изготовление образцов фильтров: Афанасьев В.А., Семенова Е.Н., Серебрякова Л.Н.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

ГВЗ – групповое время запаздывания;

ВШП - встречно-штыревой преобразователь ;

КСВН - коэффициент стоячей волны по напряжению ;

КЭМС – коэффициент электромеханической связи;

ОР - отражательная решетка ;

ПАВ – поверхностная акустическая волна;

ПСРФ – фильтр на резонаторах с поперечной акустической связью;

ТКЗ – температурный коэффициент задержки;

ТКЧ – температурный коэффициент частоты ;

ТЧХ – температурно-частотная характеристика ;

ФЧХ – фазо-частотная характеристика.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

AR – пульсации амплитуды;

BW1,0 – полоса пропускания по уровню – 1,0 дБ;

BW3 – полоса пропускания по уровню - 3 дБ;

BW40 – полоса пропускания по уровню - 40 дБ;

f_a – частота параллельно включенного резонатора;

f_p – последовательно включенного резонатора;

F_0 – центральная частота;

GDT – групповое время запаздывания;

Q_u - ненагруженная добротность резонатора ;

Ks - коэффициент электромеханической связи (КЭМС) ;

IL – вносимые потери;

SWR – коэффициент стоячей волны ;

UR – гарантированное затухание.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. РАЗРАБОТКА БАЗОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫХ ТЕМПЕРАТУРНО- СТАБИЛЬНЫХ СВЧ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ С КВАРЦЕВЫМИ ПОДЛОЖКАМИ

1.1. Выбор базовых конструкций фильтров 7

1.2. Основные технические характеристики разработанных кварцевых 8

1.3. Перечень конструкторской документации 10

ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ БАЗОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫХ КВАРЦЕВЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

2.1.Фильтр ФП-710 145В0,09 МГц с оптимальной полосой пропускания BW3=0,06 % (90 кГц) 12

2.2. Фильтр ФП-713 505В0,25 МГц с типичной полосой пропускания BW3= 0,05% (0,25 МГц) 21

2.3. Фильтр ФП-715 315В0,82 МГц с максимальной широкой полосой пропускания BW3= 0,25 % (0,82 МГц) 28

2.4. Фильтры ФП-728 85,38В0,04 МГц и ФП-709 128В0,05 МГц на предельно низкие частоты 85 МГц и 128 МГц 36

2.5. Фильтр ФП-730 868,3В1,5 МГц на предельно высокую частоту 868 МГц 43

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА БАЗОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫХ РЕЗОНАТОРНЫХ ФИЛЬТРОВ СВЧ ДИАПАЗОНА НА КВАРЦЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

3.1. Технологические особенности изготовления узкополосных резонаторных фильтров на подложках из монокристаллического кварца 48

3.2. Основные этапы изготовления СВЧ кварцевых фильтров на ПАВ методом прямой фотолитографии 51

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 64

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 67

ВВЕДЕНИЕ

Из известных на сегодняшний день пьезоэлектрических материалов для устройств на ПАВ кварц обладает наилучшей температурной стабильностью . Так , для повернутых срезов семейства yxl/ 42^0- yxl/ 30^0 температурный коэффициент частоты изменяется от ТКЧ= 0 x$10^{-6}/^0$C для ST- среза yxl/ 42^0 45’ (при нулевой толщине металлической пленки) до ТКЧ=-(0,036-0,04)x$10^{-6}/^0C^2$ для среза yxl/ 30^0 (рис. В1 [1]), что на несколько порядков меньше , чем для температурно-стабильных срезов танталата лития с ТКЧ=- (18-30) x$10^{-6}/^0$C .

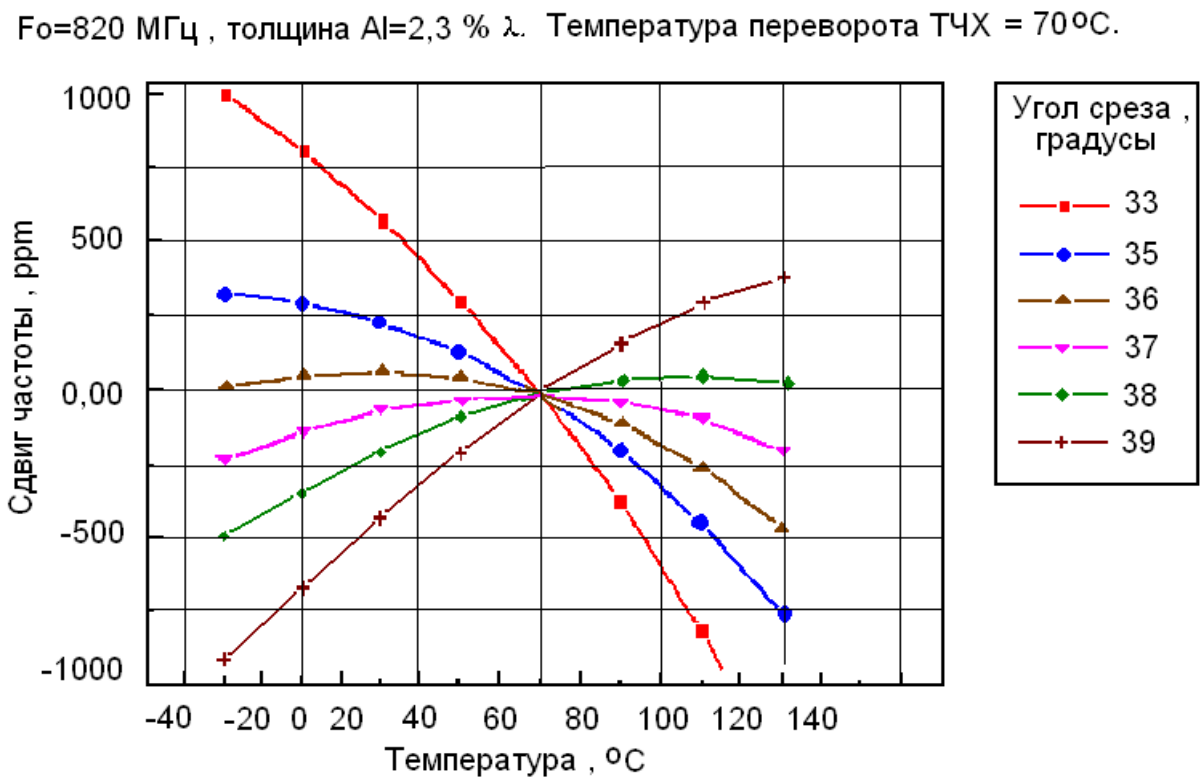


Рис.В1 Температурно-частотные характеристики СВЧ резонатора на ПАВ с кварцевыми подложками различных срезов

Однако коэффициент электромеханической связи для ПАВ на кварце КЭМС=0,1-0,2 % значительно уступает коэффициенту электромеханической связи КЭМС=4-10 % для ПАВ на танталате лития , что ограничивает ширину реализуемой полосы пропускания кварцевых фильтров при приемлемых потерях. Поэтому кварцевые фильтры на ПАВ принципиально более узкополосны ,чем на танталате лития , и позволяют реализовать полосы пропускания только BW3= 0,03-0,3% [2].

Теоретически на основе кварцевых резонаторов на ПАВ можно построить такие же структуры фильтров , что и на танталат-литиевых резонаторах :

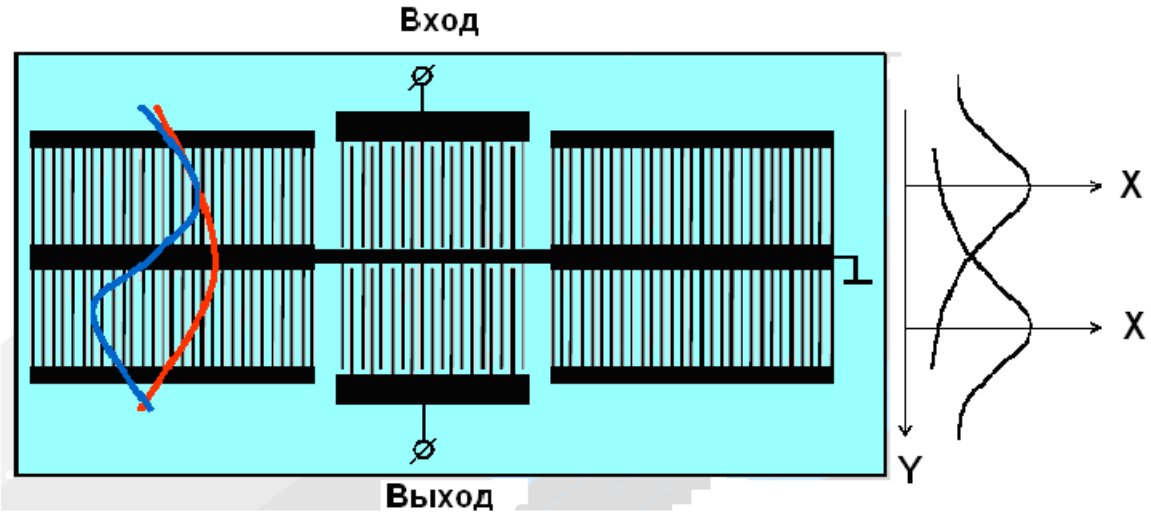
- лестничные фильтры с непосредственной электрической связью резонаторов ;

- фильтры с продольной акустической связью резонаторов и т.д.

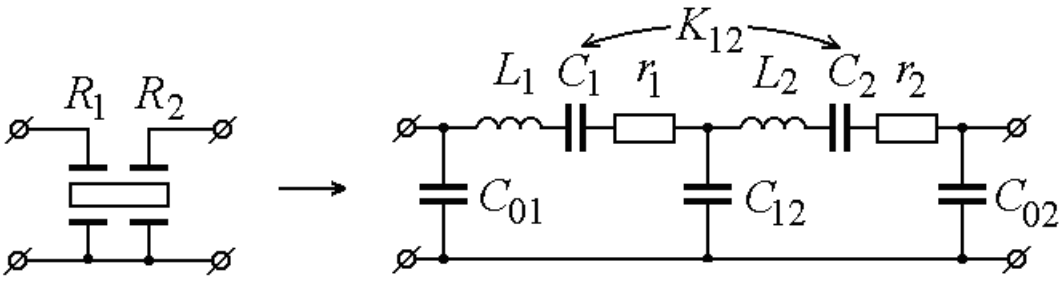
Однако из-за малости коэффициента электромеханической связи в кварцевых резонаторах требуется использовать 200-400 электродов в каждой из отражательных решеток , что приводит к росту их протяженности в 10-40 раз по сравнению с решетками резонаторов на танталате лития. Кроме того , из-за узости реализуемой полосы пропускания кварцевых фильтров резко возрастают требования к точности настройки парциальных частот резонаторов , входящих в их состав (до 0,005-0,05%).

Указанные ограничения заставляют искать более приемлемые для проектирования и изготовления базовые структуры кварцевых фильтров на ПАВ.

Наиболее оптимальными структурами для создания узкополосных и стабильных в диапазоне температур фильтров ПАВ являются цепочечные схемы на основе резонаторов с поперечной акустической связью (ПСРФ). Они свободны от физически обусловленных искажений правого ската АЧХ, что имеет место при использовании продольных акустических связей [4] .



а



б в

Рис.В2. Фильтр на ПАВ на основе двух резонаторов с поперечной акустической связью (а) и их эквивалентные схемы (б, в). Синий цвет- антисимметричная поперечная мода , красный цвет – симметричная поперечная мода

Фильтры на ПАВ основе резонаторов с поперечной акустической связью (ПСРФ) обычно используются в интервале частот от 70 до 1000 МГц. Нижняя рабочая частота определяется габаритами резонаторов и толщиной металлической пленки , необходимой для создания эффективных отражателей ПАВ. В случае применения алюминиевых электродов отражательных решеток на кварце необходимая толщина пленки составляет 10000- 12000 А для резонаторов на частотах 100-80 МГц и 1000-1200 А для резонаторов на частотах около 1000-800 МГц , что обуславливает использование преимущественно технологии прямой фотолитографии при изготовлении таких фильтров на частоты до 500 МГц.

Верхняя рабочая частота ПСРФ ограничена тремя основными факторами : во-первых , потерями в согласующих цепях на СВЧ , во-вторых , потерями на распространение ПАВ в кварце , резко возрастающими на частотах 1200-1300 МГц и выше , в-третьих , возрастающими с частотой требованиями к точности настройки резонаторов , составляющими , например , 50-80 кГц (0,008-0,01 %) на частоте 800 МГц. Поскольку требуемая толщина алюминиевых пленок на частотах 500-800 МГц составляет уже только 1500-1000 А , здесь возможно использование “взрывной ” фотолитографии.

Минимальная полоса пропускания ПСРФ определяется величиной температурного ухода средней частоты в рабочем интервале температур и составляет около $BW3_{min}$ =0,01 % или , например , около 10-15 кГц на частоте 80-100 МГц.

Максимальная полоса пропускания ПСРФ ограничена величиной акустической связи между резонаторами и не превышает $BW3_{max}$=0,187% для двух-резонаторных акустически связанных звеньев и $BW3_{max}$=0,287% для трех-резонаторных акустически связанных звеньев [2, 3].

ПСРФ обладают высокой избирательностью *UR*=50-70 дБ в полосе заграждения, хорошим коэффициентом прямоугольности АЧХ *SF*=1,5-1,8 и малыми вносимыми потерями *IL*=2,5-6,0 дБ [2, 3].

Следует отметить , что образование значительной поперечной акустической связи между резонаторами возможно только в материалах с сильной анизотропией , таких , как кварц и тетраборат лития. Тетраборат лития имеет коэффициент электромеханической связи (КЭМС) значительно выше , чем кварц, что позволяет расширить предельно достижимую полосу пропускания ПСРФ. Фильтрам на тетраборате лития будет посвящена отдельная работа. Широко же используемые температурно-стабильные срезы танталата лития yxl/ 36^0- yxl/ 48^0 с еще более высоким КЭМС такими свойствами не обладают.

ГЛАВА 1. РАЗРАБОТКА БАЗОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫХ ТЕМПЕРАТУРНО- СТАБИЛЬНЫХ СВЧ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ С КВАРЦЕВЫМИ ПОДЛОЖКАМИ

1.1. Выбор базовых конструкций фильтров

Физико-математические модели для проектирования , основные конструкции и базовый технологический процесс изготовления СВЧ полосовых фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с малыми вносимыми потерями **на основе резонаторов с поперечной акустической связью (ПСРФ)** были созданы в рамках предыдущих исследований в 2000-2002 г.г. , основные результаты которых опубликованы в [2,3]. Основной целью данной инициативной темы является обобщение ранних (2000-2002 г.г.) и полученных позднее (2003-2005 г.г.) результатов и выпуск конструкторской документации на некоторые из разработанных фильтров. На основании этих исследований для выпуска КД в рамках данной темы были выбраны **три базовые конструкции**, размещенных на подложках из кварца семейства температурно-стабильных повернутых срезов *yxl*/29 ^{0}-40 ^{0}:

- двухзвенный фильтр ФП-710 145В0,09 МГц с комбинированием поперечной акустической связи между резонаторами в звеньях и электрической (емкостной) связью между звеньями на частоту 145 МГц , имеющий **оптимальную для достижения минимальных вносимых потерь полосу пропускания** BW3= 0,06% (0,09 МГц);

- двухзвенный фильтр ФП-713 505В0,25 МГц с комбинированием поперечной акустической связи между резонаторами в звеньях и электрической (емкостной) связью между звеньями с полосой пропускания BW3= 0,05% (0,25 МГц), **типичной для данного типа фильтров (ПСРФ),** но на частоту 505 МГц , которая является практически предельной при использовании технологии прямой фотолитографии ;

- однозвенный фильтр ФП-715 315В0,82 МГц с чисто акустической поперечной связью трех резонаторов и с широкой полосой пропускания *BW3*= 0,25% (0,8 МГц) , **близкой к максимально возможной** для данного типа фильтров.

Кроме того , спроектированы , изготовлены и исследованы экспериментальные образцы еще двух типов ПСРФ **с частотами , близкими к предельным для данного типа фильтров на кварце (ПСРФ)** . Двухзвенный фильтр ФП-728 85,38В0,04 МГц с комбинированием акустической и электрической связи между резонаторами и с полосой пропускания BW3= 0,04 МГц (0,04%), проектировался на частоту 85,38 МГц , **близкую к минимально возможной для кварцевых фильтров на ПАВ (65-70 МГц)** ,

изготавливаемых по технологии прямой литографии из-за требуемой толщины электродов отражателей около 13000 А. Средняя частота двухзвенного фильтра ФП-709 128В0,05 МГц также близка к предельно низкой. Однозвенный трех-резонаторный фильтр **ФП-730 868,3В1,5 МГц** с полосой BW3= 1,5 МГц изготавливался уже по технологии “взрывной “фотолитографии на частоту 868,3 МГц , **близкую к предельно возможной частоте (1200-1300 МГц)** , ограниченной потерями на распространение ПАВ в кварце и потерями в согласующих цепях.

В состав каждого изделия (фильтра) входят:

- пьезоэлемент (плата) на подложке (пластине) одного из температурно-стабильных срезов *yxl/* 33^0 ; *yxl/* 36^0*; yxl/* 38^0 ; *yxl/* 40^0;

- планарные керамические корпуса типа SMD для монтажа на поверхность (для фильтров ФП-713 ; ФП-715 и ФП- 730 - корпус KD-V99902 , KYOCERA , Япония , с размерами 5,0х5,0х1,4 мм ; для фильтров ФП-709 и ФП-710 - корпус KD-V99J63 , KYOCERA, Япония , с размерами 13,3х6,5 х1,8 мм и для фильтра ФП-728 - корпус KD-V93742 с размерами 9,1х4,8х1,6 мм);

- цепи с планарными SMD элементами L1C1 и L2C2 соответственно на входе и выходе фильтров , требующиеся для согласования тракта 50 /50 Ом с высокоомными входными и выходными сопротивлениями фильтров.

Полосовые фильтры ФП-709 128В0,05 МГц , ФП-710 145В0,06 МГц и ФП-713 505В0,27 МГц спроектированы для узкополосной фильтрация сигналов с целью **очистки фазового и частотного спектра генераторов ,** гетеродинов и синтезаторов частот в аппаратуре специального назначения .

Полосовой фильтр ФП-728 85,38В0,04 МГц предназначен для фильтрации сигналов промежуточной частоты в **сотовых радиотелефонах стандарта AMPS**.

Полосовые фильтры ФП-715 315В0,8 МГц и ФП-730 868,3В1,5 МГц предназначены для фильтрации сигналов несущей частоты в приемниках **автомобильной сигнализации**.

1.2. Основные технические характеристики разработанных кварцевых фильтров с поперечной акустической связью резонаторов

Основные электрические параметры перечисленных фильтров приведены в таблице 1. Разработанные двухзвенные фильтры ФП-728 85,38В0,04 МГц, ФП-709 128В0,05 МГц, ФП-710 145В0,06 МГц и ФП-713 505В0,27 МГц имеют то несомненное преимущество перед лучшими зарубежными аналогами , например , фирмы VI

TELEFILTER , Германия , что в них отсутствует дополнительная согласующая катушка индуктивности между каскадами. Это позволяет уменьшить габариты , упростить настройку и повысить стабильность устройства .

Таблица 1.

Основные электрические параметры кварцевых фильтров при 20 ^{0}C

№	Наименование параметра	Едини-цы	Обозна-чение	Измеренное значение					
				ФП-728	ФП-709	ФП-710	ФП-715	ФП-713	ФП-730
1	Номинальная частота	МГц	F_0	85,38	128,0	145,0	315,0	505,0	868,3
2	Вносимые потери в полосе пропускания	дБ	IL	3,6	2,6	2,4	3,7	4,8	3,6
3	Полоса пропускания по уровню -1,0 дБ, МГц	дБ	BW1	0,035	0,06	0,07	0,82	0,27	1,5
4	Полоса пропускания по уровню -3 дБ	МГц	BW3	0,046	0,08	0,09	0,89	0,32	2,0
5	Неравномерность АЧХ в полосе пропускания	дБ	AR	0,1	0,2	0,25	0,2	0,7	0,5
6	Нелинейность ГВЗ в полосе пропускания	мсек	GDV	2,4	1,2	1,03	0,22	0,66	0,1
7	Полоса пропускания по уровню – 40 дБ	МГц	BW40	0,154	0,247	0,27	3,0	0,9	2,9
8	Относительное затухание в полосах заграждения: от 10 МГц до Fo - 2 BW40 от Fo + 2 BW40 до 3Fo	дБ	UR	70	65	62	40	56	40
10	Сопротивления нагрузки и генератора	Ом	RL/RS	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50
11	Температурный коэффициент частоты	ТКЧ	ppm/ $^oC^2$	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,036	-0,04
12	Размер корпуса SMD	мм	-	9,1x4,8 x1,6	13,3x 6,5x1,8	13,3x 6,5x1,8	5,0x5,0 x1,4	5,0x5,0 x1,4	3,8x3,8 x1,4
13	Рабочая температура	T	^oC	от –60°C до +85°C					

Фильтры ФП-709 128В0,05 МГц, ФП-710 145В0,06 МГц и ФП-713 505В0,27 МГц **отечественных аналогов не имеют.** Вносимые потери Фильтр ФП-710 145В0,06 МГц на 0,8-1,5 дБ **меньше вносимых потерь** лучших зарубежных аналогов , например , фирмы VI TELEFILTER , Германия , и MURATA , Япония.

Избирательность фильтра ФП-728 85,38В0,04 МГц **превосходит** требования спецификации В4858 фирмы EPCOS , Германия.

Параметры фильтров ФП-713 315В0,8 МГц и ФП-715 868,3В0,8 МГц **полностью отвечают требованиям спецификаций** соответственно В3551 и В3570 фирмы EPCOS , Германия .

1.3. Перечень конструкторской документации

При реализации одной из главных целей инициативной темы , на перечисленные фильтры была выпущена следующая **конструкторская документации литеры О":**

- технические условия МТО.460810.010 ТУ, общие на все типы изделий , разрабатываемые по теме , дополнены техническими требованиями и методиками измерения узкополосных и температурно-стабильных СВЧ фильтров с малыми вносимыми потерями на кварце ФП-710 , ФП-713 и ФП-715 .

- три комплекта чертежей на базовые конструкции изделий :

МТО.468844 064 на фильтр ФП-710 145В0,06 МГц ; МТО.468844 063 на фильтр ФП- 713 505В0,25 МГц; МТО.468844 062 на фильтр ФП- 715 315В0,8 МГц.

Полный перечень чертежей приведен в Таблице 2.

Серийный выпуск фильтров ФП-728 85,38В0,04 МГц, ФП-710 145В0,06 МГц, ФП-715 315В0,8 МГц и ФП-730 868,3В0,82 МГц **освоен на контрактном производстве**.

Таблица 2.

Перечень КД на СВЧ кварцевые фильтры на ПАВ по теме

1	**Общие документы**	
	МТО.460810.010 ТУ	ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ (Дополненные)
	МТО.460810.010 ПМ	ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ (Дополненные)
2	**Фильтр ФП-715**	**FP-715 315B0,8v1**
	МТО.468844.062 СБ	СБОРОЧНЫЙ ЧЕРТЕЖ
	МТО.468844.062 ВП	ВЕДОМОСТЬ ПОКУПНЫХ ИЗДЕЛИЙ
	МТО.468844.062 ЭТ	ЭТИКЕТКА
	МТО.757661.015	ПЛАСТИНА (ЗАГОТОВКА ДЛЯ МТО.758772.056)
	МТО.758772.056	ПЛАТА
3	**Фильтр ФП-710**	**FP-710 145B0,06v2**
	МТО.468844.064 СБ	СБОРОЧНЫЙ ЧЕРТЕЖ
	МТО 468844.064 ВП	ВЕДОМОСТЬ ПОКУПНЫХ ИЗДЕЛИЙ
	МТО.468844.064 ЭТ	ЭТИКЕТКА
	МТО.757661.017	ПЛАСТИНА (ЗАГОТОВКА ДЛЯ МТО.758772.058)
	МТО.758772.058	ПЛАТА
4	**Фильтр ФП-713**	**FP-713 505B0,27v1**
	МТО.468844.063 СБ	СБОРОЧНЫЙ ЧЕРТЕЖ
	МТО.468844.063 ВП	ВЕДОМОСТЬ ПОКУПНЫХ ИЗДЕЛИЙ
	МТО.468844.063 ЭТ	ЭТИКЕТКА
	МТО.757661.016	ПЛАСТИНА (ЗАГОТОВКА ДЛЯ МТО.758772.057)
	МТО 758772.057	ПЛАТА

ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ БАЗОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫХ КВАРЦЕВЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

2.1. Фильтр ФП-710 145В0,09 , версия v2, с оптимальной полосой пропускания BW3=0,06 % (90 кГц)

Как уже указывалось, четырех-резонаторный фильтр ФП-710 145В0,09 МГц содержит два звена , пары резонаторов в каждом из которых связаны между собой поперечной акустической связью , а каскадно соединенные звенья из пар резонаторов имеют электрическую (емкостную) связь.

Эквивалентная схема двухзвенного фильтра ФП-710 145В0,09 МГц в виде цепочечной структуры представлена на рис.2.1.На рис.2.2 показана эквивалентная схема того же фильтра , аналогичная двухзвенному монолитному фильтру на объемных акустических волнах и используемая для расчета коэффициентов связи между резонаторами .

Коэффициенты связи между резонаторами в цепочечной схеме фильтра ФП-710 145В0,09 МГц рассчитывались таким образом ,чтобы в качестве сопротивления связи между звеньями Z_{23} использовать только статические емкости примыкающих (второго и третьего) резонаторов и монтажной емкости фильтра в корпусе без дополнительных навесных элементов связи. Величина же коэффициента K_{23} электрической связи между звеньями рассчитывалась исходя из условий оптимального согласования импедансев примыкающих звеньев . Такой режим хотя и приводит к некоторому заужению реализуемой полосы пропускания, но позволяет снизить потери фильтра на рассогласование . В сочетании с оптимизацией согласующих цепей внешних звеньев , обеспечивших КСВ=1,1-1,2 в тракте 50/50 Ом , такое решение позволило получить вносимые потери фильтра IL=2,3=2,4 дБ , что является лучшим результатом , известным на сегодня.

Основные конструкционные и технологические характеристики двухзвенного четырех-резонаторного фильтра ФП-710 145В0,09 МГц , версия 2 , следующие :

- количество электродов в ВШП – 280 ;
- количество электродов в ОР – 220 ;
- шаг электродов в ВШП и ОР – 10 мкм ;
- апертура ВШП и ОР – 160 мкм ;
- зазор между резонаторами в звене – 28 мкм ;
- подложка – пьезокварц среза *yxl* / $+33^0 18'$;

- толщина электродов	–	5880 А ;
- материал электродов	–	алюминий на подслое титана 100-150 А;
- коэффициент металлизации	–	0,66-0,67;
- технология	–	прямая фотолитография .

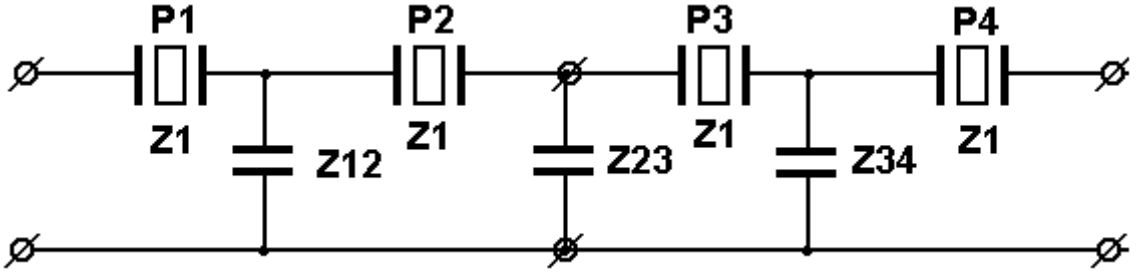


Рис.2.1. Эквивалентная схема двух-звенного фильтра ФП-710 145В0,09 МГц

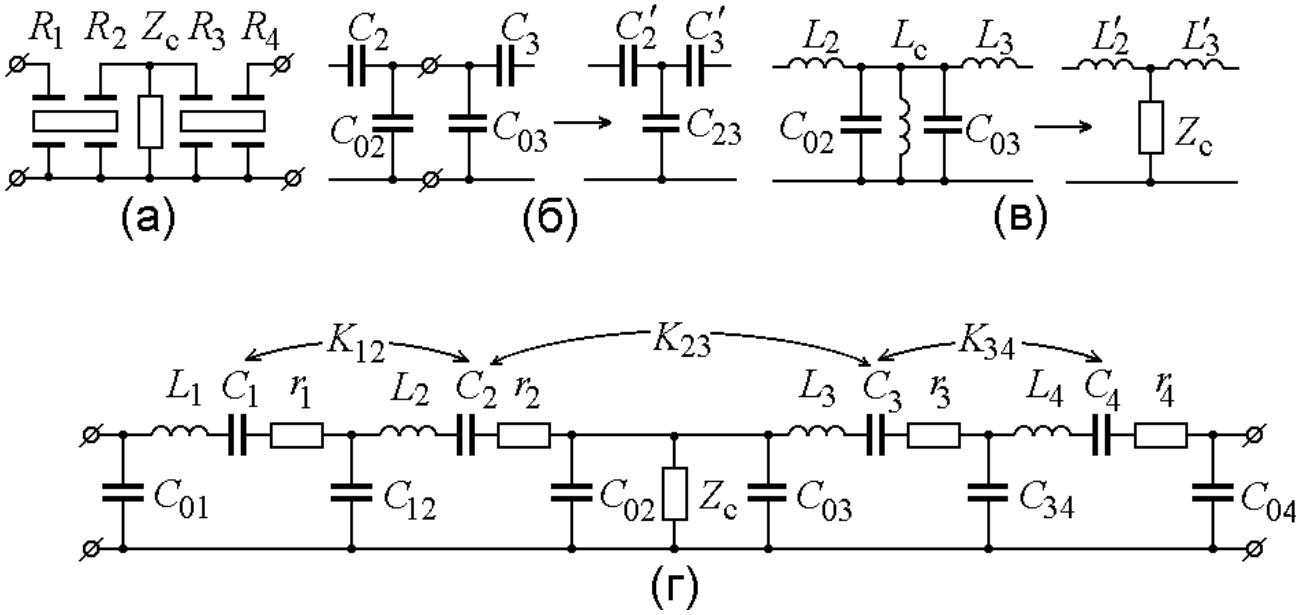


Рис.2.2. Четыре резонатора с комбинированной акусто-электрической связью (а) ; трансформация элементов связи (б, в); эквивалентная схема связанных резонаторов (г)

На рис.2.3. изображена топология данного фильтра.

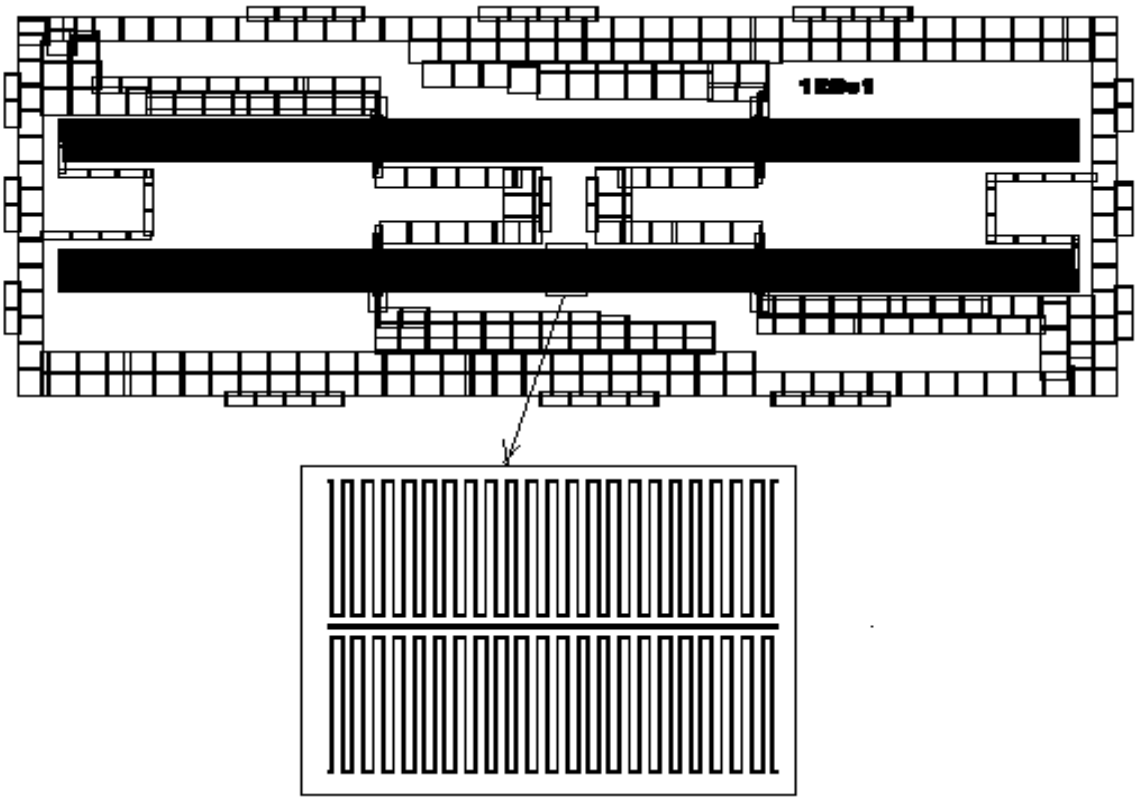


Рис.2.3. Топология двухзвенного фильтра ФП-710 145В0,09 МГц

На рис.2.4. показана сборка фильтра ФП-710 145В0,09 МГц в корпусе SMD 13,3х6,5х1,6 мм , KD-V99J63 , KYOCERA Corp., Япония.

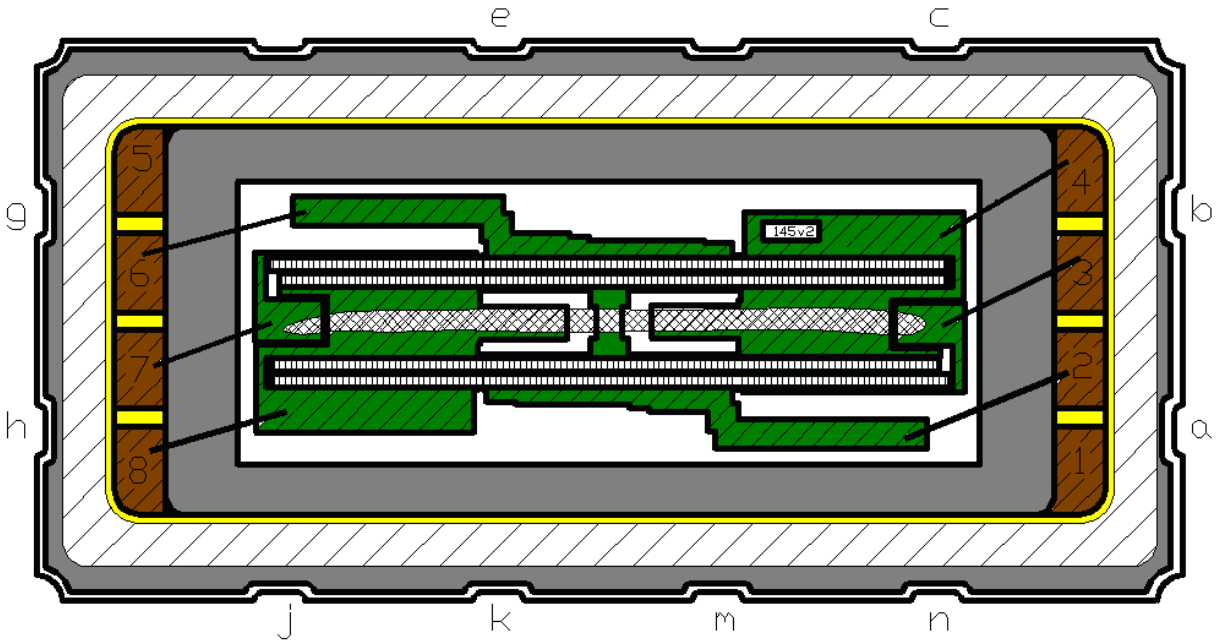


Рис.2.4. Сборка фильтра ФП-710 145В0,09 МГц в корпусе SMD 13,3х6,5х1,6 мм

На рис.2.5 показаны расчетные частотные характеристики данного фильтра. При этом ненагруженная добротность резонаторов составляла Q_u=9000, а резонаторы полагались настроенными на одну частоту уже в колебательной системе фильтра.

Рекомендуемая схема включения фильтра ФП-710 145В0,09 v2 в корпусе SMD 13,3x6,5x1,6мм , KD-V99J63 , KYOCERA Corp., Япония., приведена на рис.2.6.

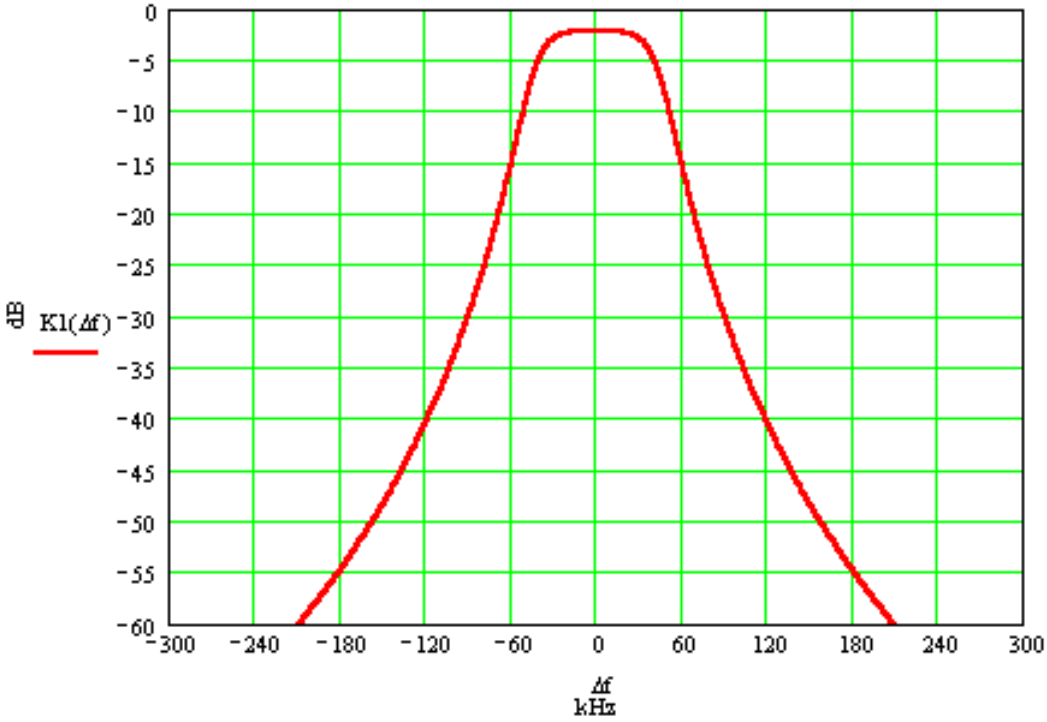
Конкретные номиналы LC элементов согласующих цепей зависят от паразитных емкостей и индуктивностей в печатной плате измерительного устройства или аппаратуры Заказчика. Дискретные значения номиналов
элементов цепей подбираются при регулировке фильтра в аппаратуре Заказчика.

Вносимые потери фильтра зависят от добротности катушек индуктивности согласующих цепей, которая должна быть не хуже Q=40-60.

Для справок: при Q=60 дополнительные потери *IL*=0,5 дБ;
при Q=40 дополнительные потери *IL*=0,8 дБ.

Гарантированное затухание в широком интервале частот определяется не только избирательностью фильтра на ПАВ, но и электромагнитной наводкой со входа на выход в печатной плате потребителя. Поэтому топология печатной платы должна обеспечивать уровень электромагнитной наводки не хуже -(70-80) дБ.

Для этого входную и выходную "земли" платы целесообразно разделить и каждую отдельно заземлить на обратной стороне платы. При этом металлизацию на лицевой и обратной стороне платы следует соединить между собой через сквозные металлизированные отверстия или перемычки.



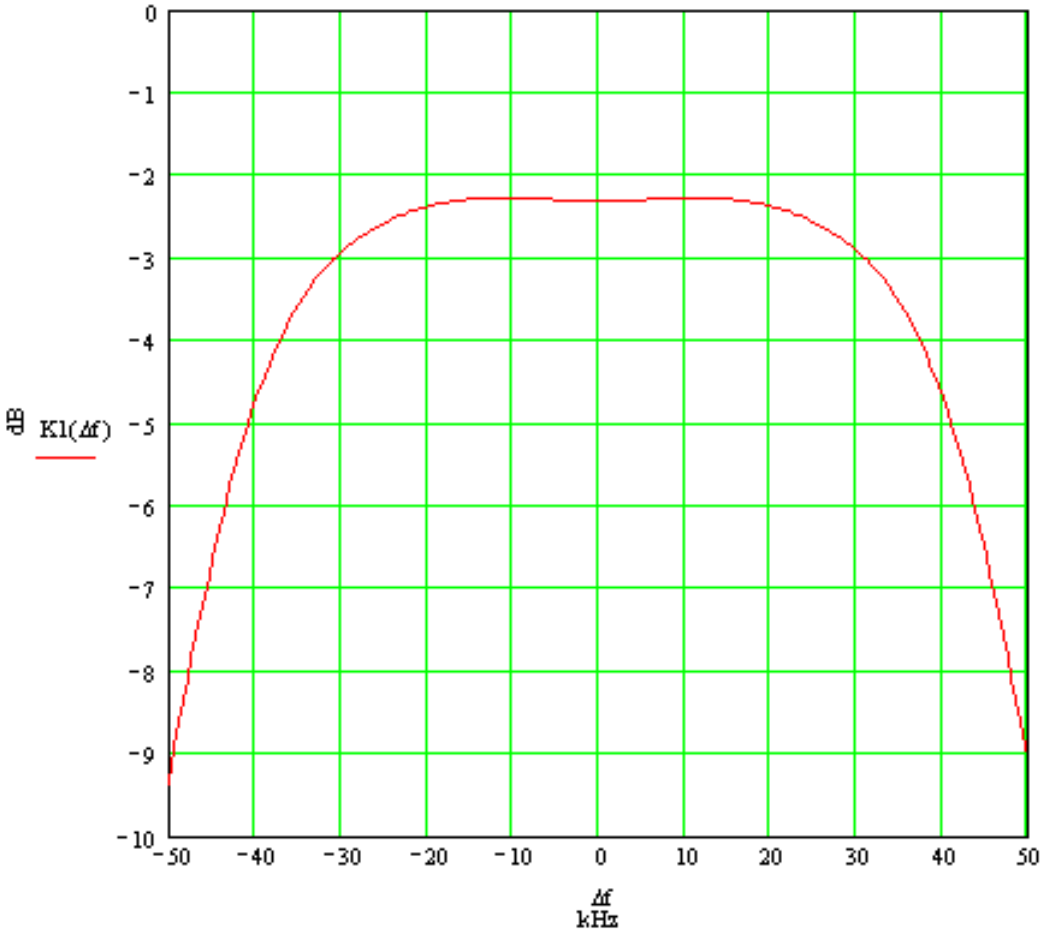
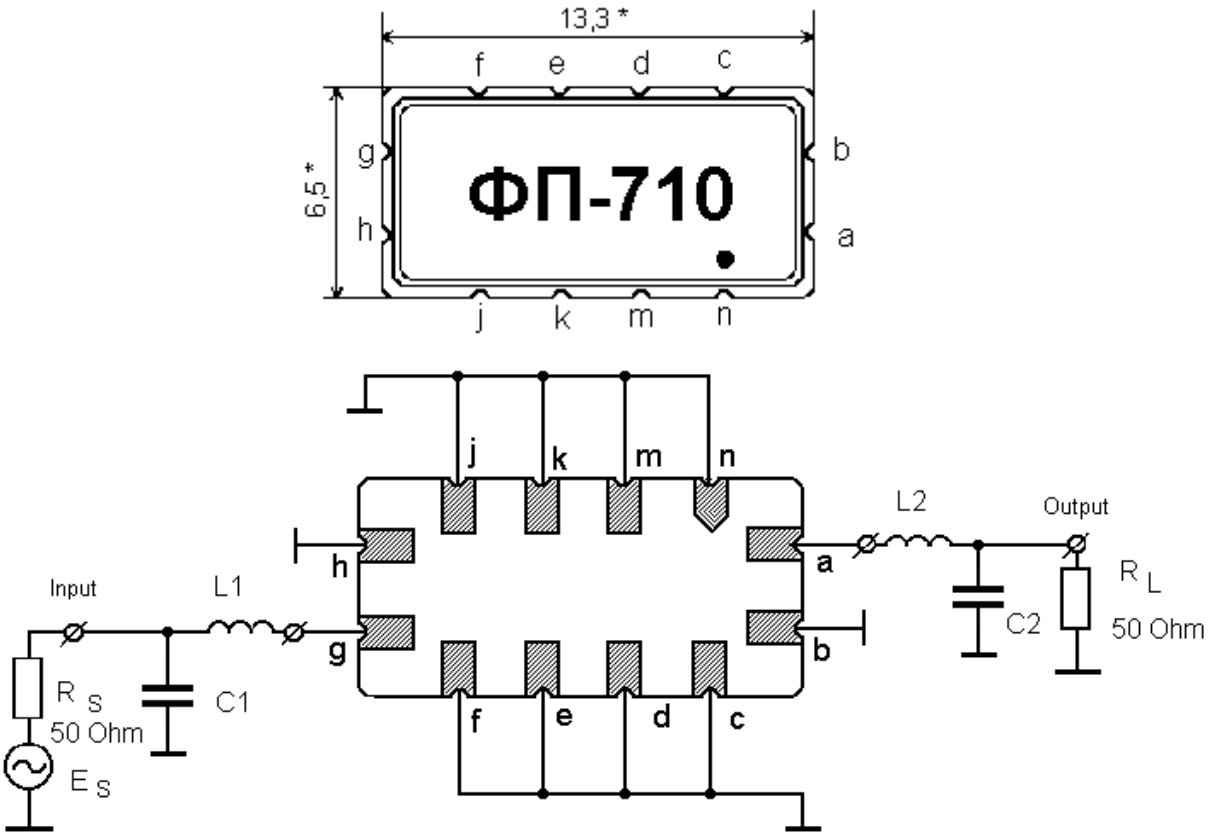


Рис.2.5. Расчетные характеристики фильтра ФП-710 145В0,09 МГц



R_S = R_L = 50 Ohm

L1* = 180±20 nH ;

C1* = 1÷5 pF

L2* = 180±20 nH ;

C2* = 1÷5 pF

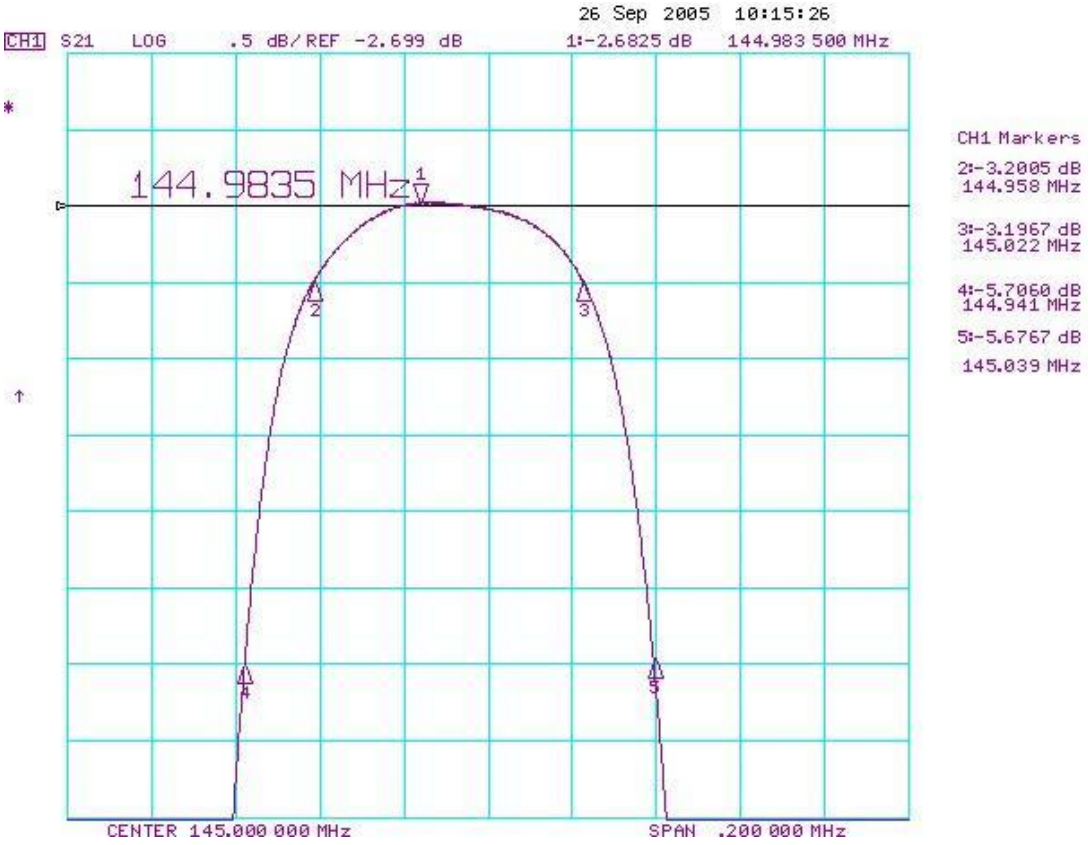
Примечания :

1. Вход: (11); выход: (5).
2. Знак (•) располагается на крышке напротив "ключевой" контактной площадки (4).

Рис.2.6. .Рекомендуемая схема включения фильтра ФП-710 145В0,09 v2 в корпусе SMD 13,3x6,5x1,8 мм

Типовые измеренные характеристики фильтра ФП-710 145В0,09 МГц , версия v2, для рекомендуемой выше схемы согласования приведены на рис. 2.7.

|S21|, дБ


26 Sep 2005 10:15:26
CH1 S21 LOG .5 dB/ REF -2.699 dB
1:-2.6825 dB 144.983 500 MHz
144.9835 MHz
CH1 Markers
2:-3.2005 dB
144.958 MHz
3:-3.1967 dB
145.022 MHz
4:-5.7060 dB
144.941 MHz
5:-5.6767 dB
145.039 MHz
CENTER 145.000 000 MHz
SPAN .200 000 MHz

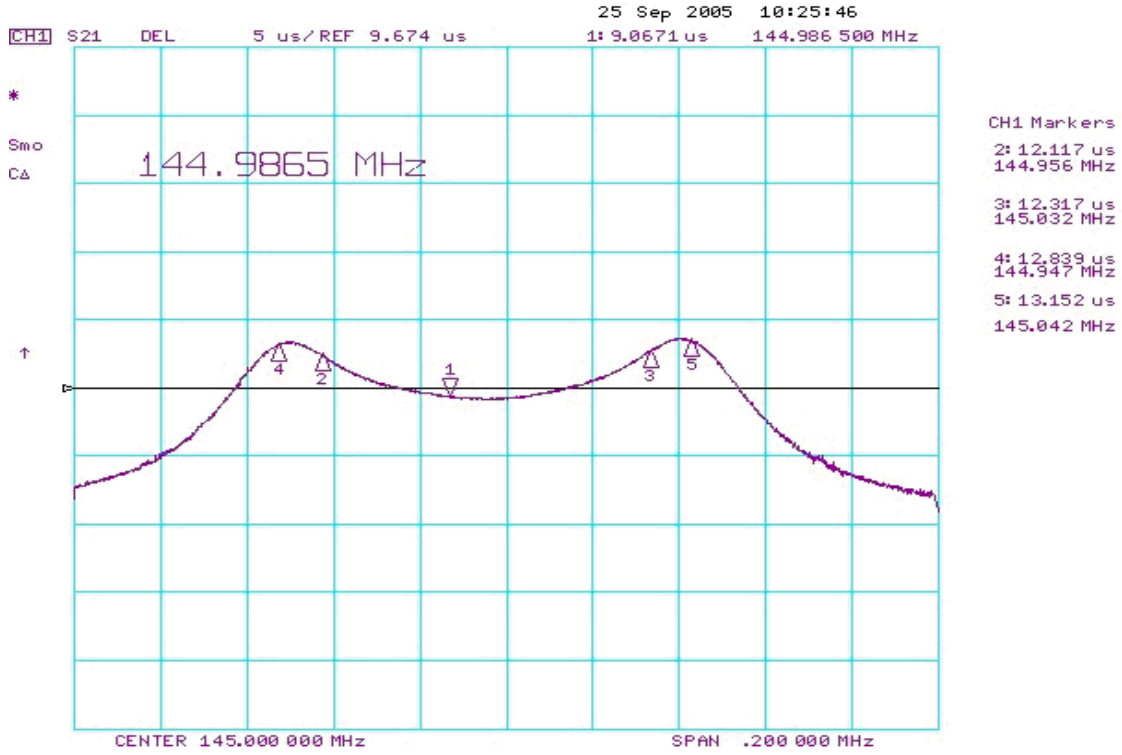
а

SWR

26 Sep 2005 10:17:24
CH1 S11 SWR 500 m / REF 0
1: 1.0344 144.983 500 MHz
144.9835 MHz
CH1 Markers
2: 1.3672
144.958 MHz
3: 1.1517
145.022 MHz
4: 2.6048
144.941 MHz
5: 2.2719
145.039 MHz
CENTER 145.000 000 MHz
SPAN .200 000 MHz

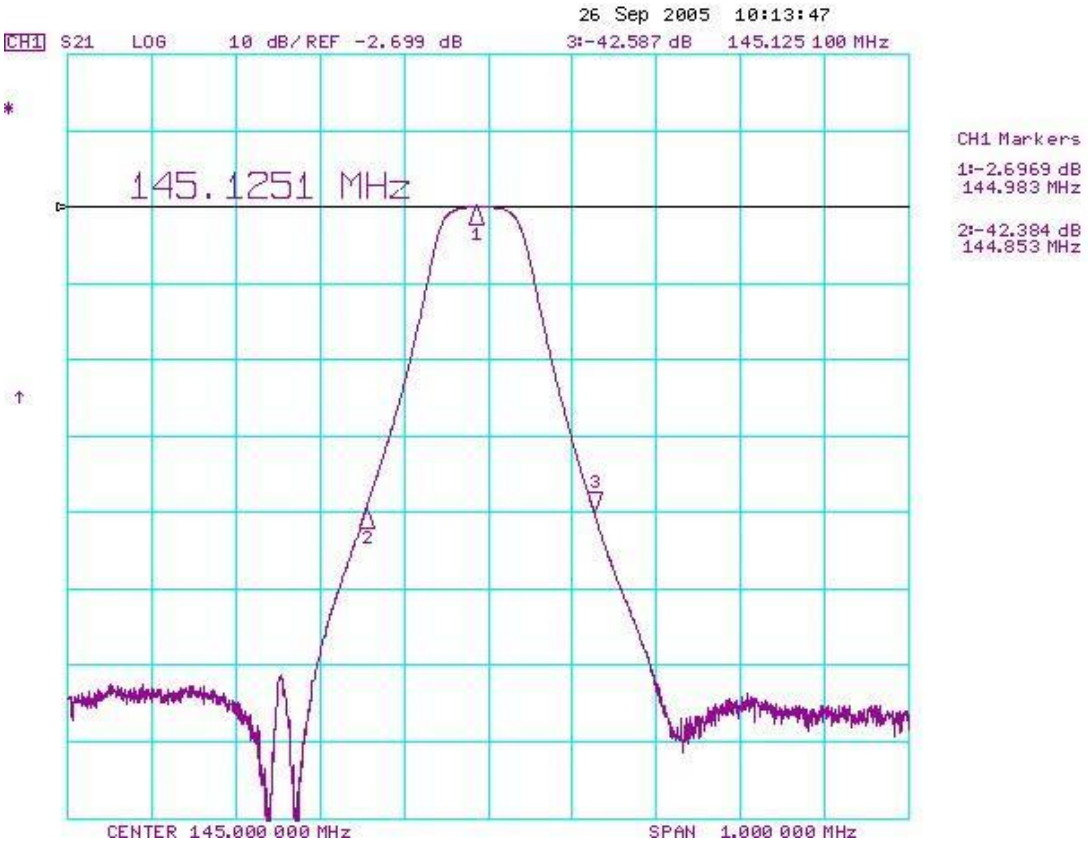
б

GDT , мксек



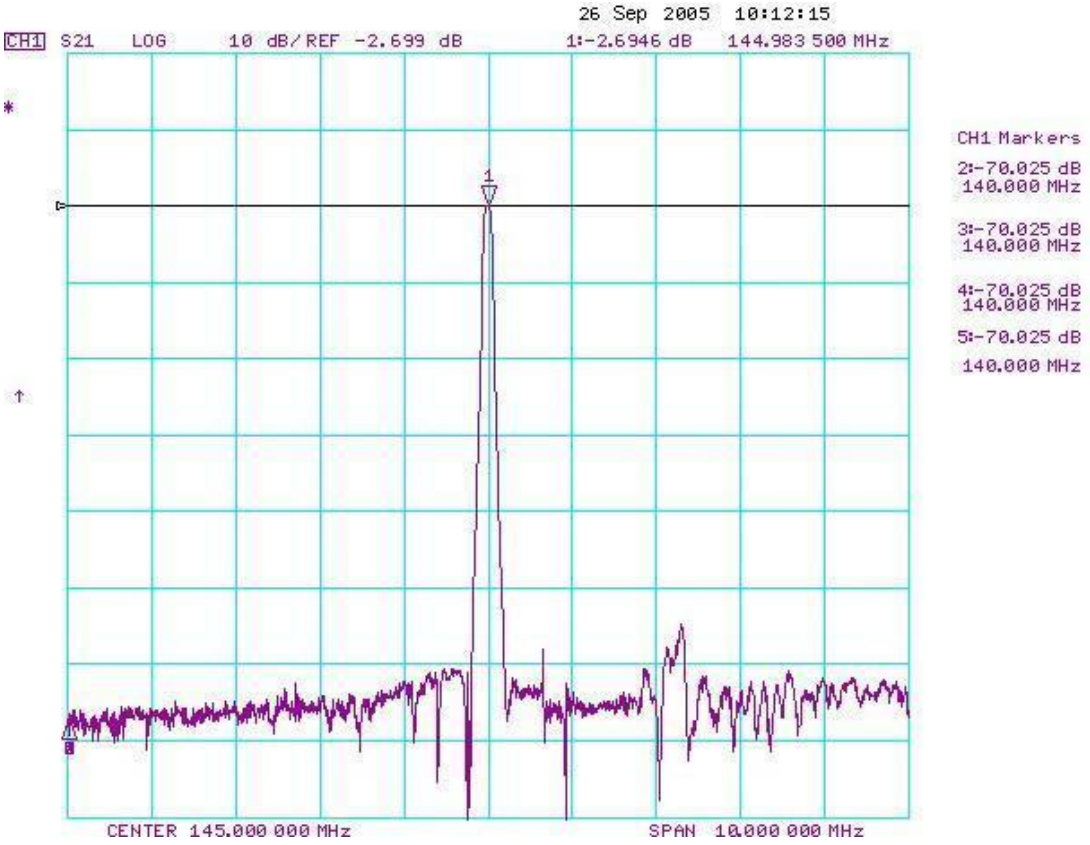
в

|S21|, дБ



г

|S21|, дБ



д

Рис.2.7. Измеренные частотные характеристики двухзвенного четырех-резонаторного фильтра ФП-710 145В0,09 МГц , версия v2 :

а - |S21| в полосе пропускания (F_0 = 145 МГц; IL=2,7 дБ; BW0,5 = 0,062 МГц; BW3 = 0,089 МГц ; AR= 0,2 дБ);

б - КСВН в полосе пропускания - (SWR = 1,034 на частоте F_0 =145 МГц);

в - GDV в полосе пропускания;

г - |S21| в полосе частот 144,5 – 125,5 МГц (BW40 = 0,276 МГц; UR=63-65 дБ);

д- |S21| в полосе частот 50 - 450 МГц (UR=65 – 70 дБ)

2.2. Фильтр ФП-713 505В0,25 МГц с типичной полосой пропускания BW3= 0,05% (0,25 МГц)

Четырех-резонаторный фильтр ФП-713 505В0,25 МГц также содержит два звена , пары резонаторов в каждом из которых связаны между собой поперечной акустической связью , а каскадно соединенные звенья из пар резонаторов имеют электрическую (емкостную) связь. Эквивалентная схема двухзвенного фильтра в виде цепочечной структуры представлена на рис.2.8.

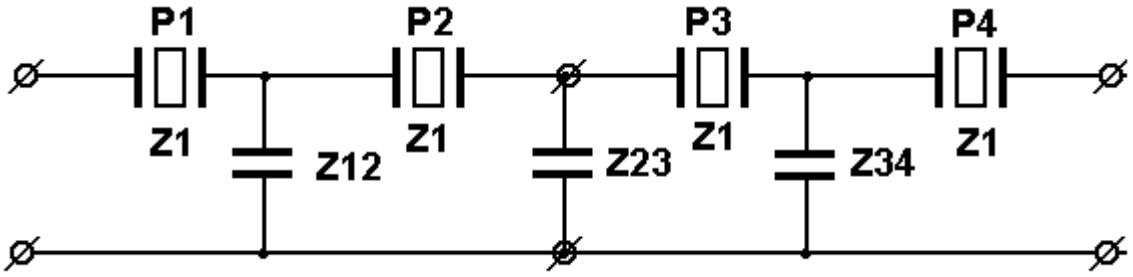


Рис. 2.8. Эквивалентная схема двухзвенного фильтра ФП-713 505В0,25 МГц

Также как и в предыдущем случае , коэффициенты связи между резонаторами в цепочечной схеме фильтра ФП-713 505В0,25 МГц рассчитывались таким образом , чтобы в качестве сопротивления связи между звеньями Z_{23} использовать только статические емкости примыкающих (второго и третьего) резонаторов и монтажной емкости фильтра в корпусе. Дополнительные навесные элементы связи отсутствуют . Величина акустической связи между резонаторами определяется шириной зазора между ними на кварцевой подложке и для выбранной типовой апертуры резонаторов около 7 длин ПАВ является оптимальной с точки зрения неравномерности АЧХ в полосе пропускания .Типовая достижимая полоса пропускания в таком режиме составляет BW3=0,05% для кварца срезов *yxl* / (30^{0-} 40^{0}).

На рис.2.9 изображена топология фильтра ФП-713 505В0,25 МГц.

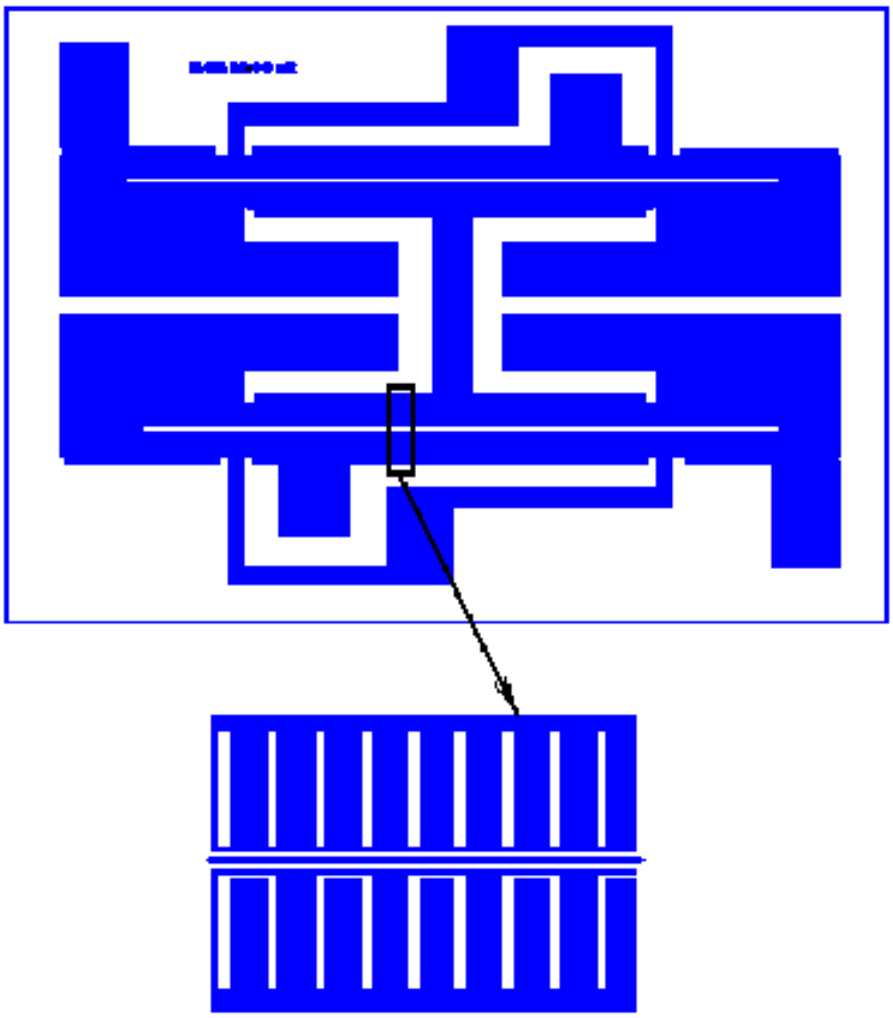


Рис.2.9. Топология двухзвенного фильтра ФП-713 505В0,25 МГц

Основные конструкционные и технологические характеристики фильтра ФП-713 505В0,25 МГц, версия 1, следующие :

- количество электродов в ВШП	- 285 ;
- количество электродов в ОР	- 200 ;
- шаг электродов в ВШП и ОР	- 2,9 мкм ;
- апертура ВШП и ОР	- 46 мкм ;
- зазор между резонаторами в звене	- 8 мкм ;
- подложка	- пьезокварц среза *yxl* / 33^0 18’ ;
- толщина электродов	- 1950 А ;
- материал электродов	- алюминий на подслое титана

100-150 А;

- коэффициент металлизации - 0,62 ;
- технология - прямая фотолитография .

На рис.2.10 представлена сборка фильтра ФП-713 505В0,25 МГц в корпусе SMD 5,0х5,0х1,25 мм, KD-V99902, изготовитель - KYOCERA , Япония.

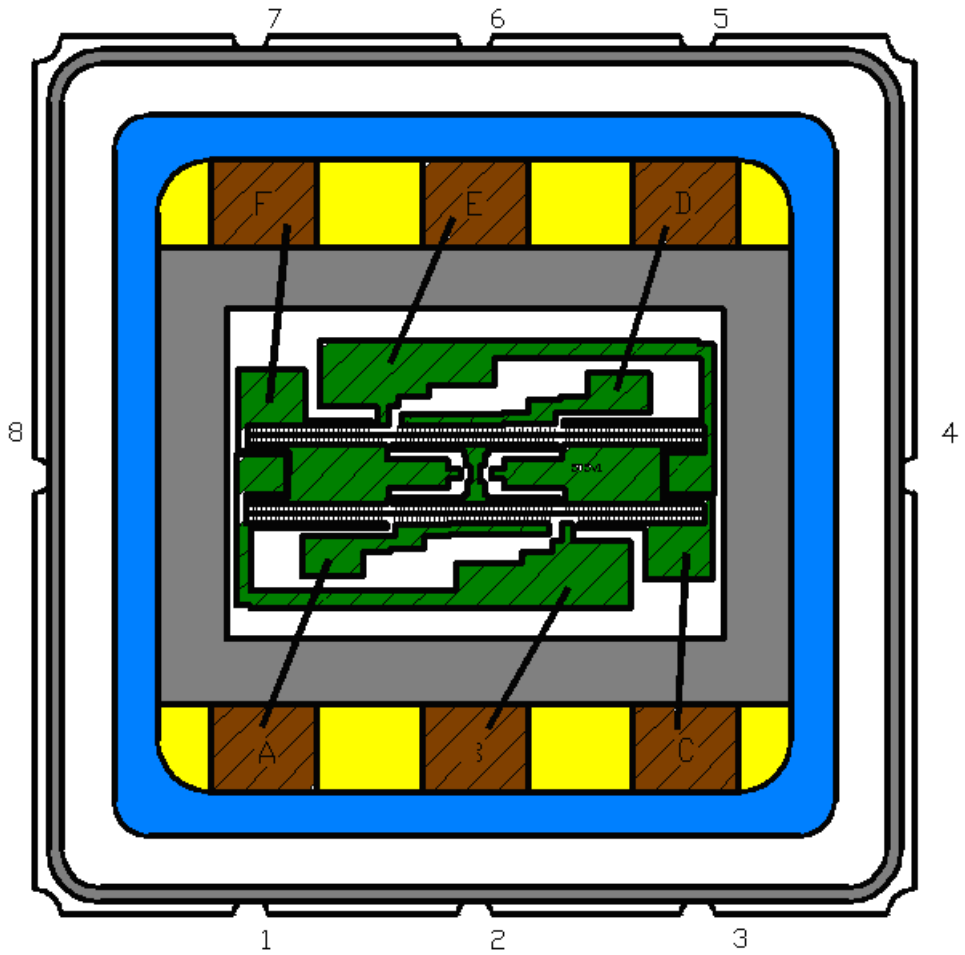
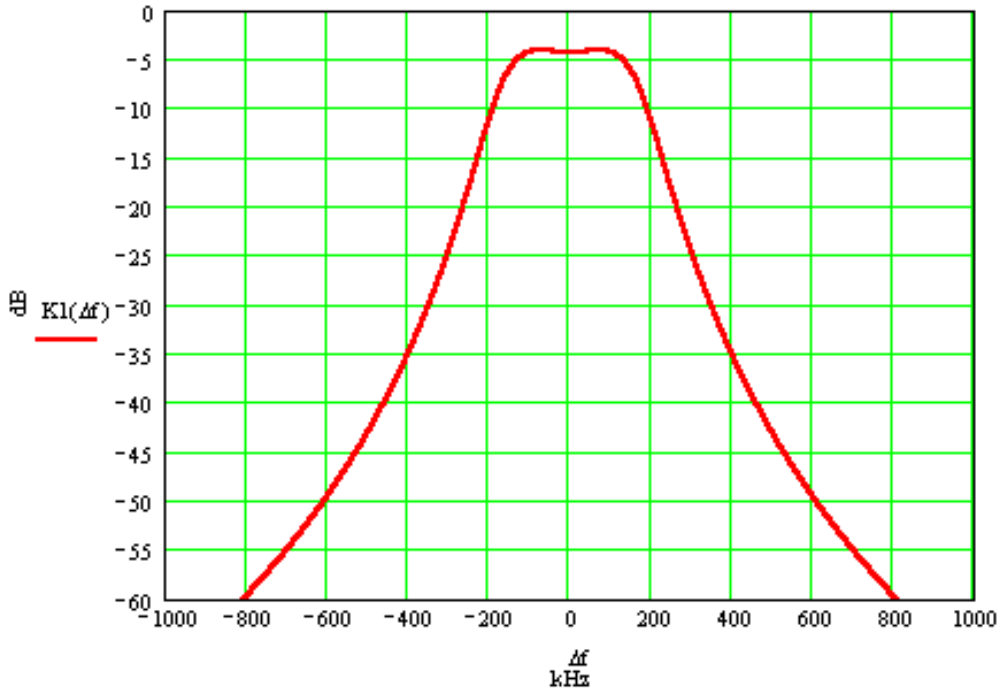


Рис.2.10. Сборка фильтра двухзвенного ФП-713 505В0,25 МГц в корпусе SMD 5,0х5,0х1,25 мм

На рис.2.11 показаны расчетные частотные характеристики данного фильтра на 505 МГц. При этом ненагруженная добротность резонаторов составляла Q_u=7000, а резонаторы полагались настроенными на одну частоту уже в колебательной системе фильтра.



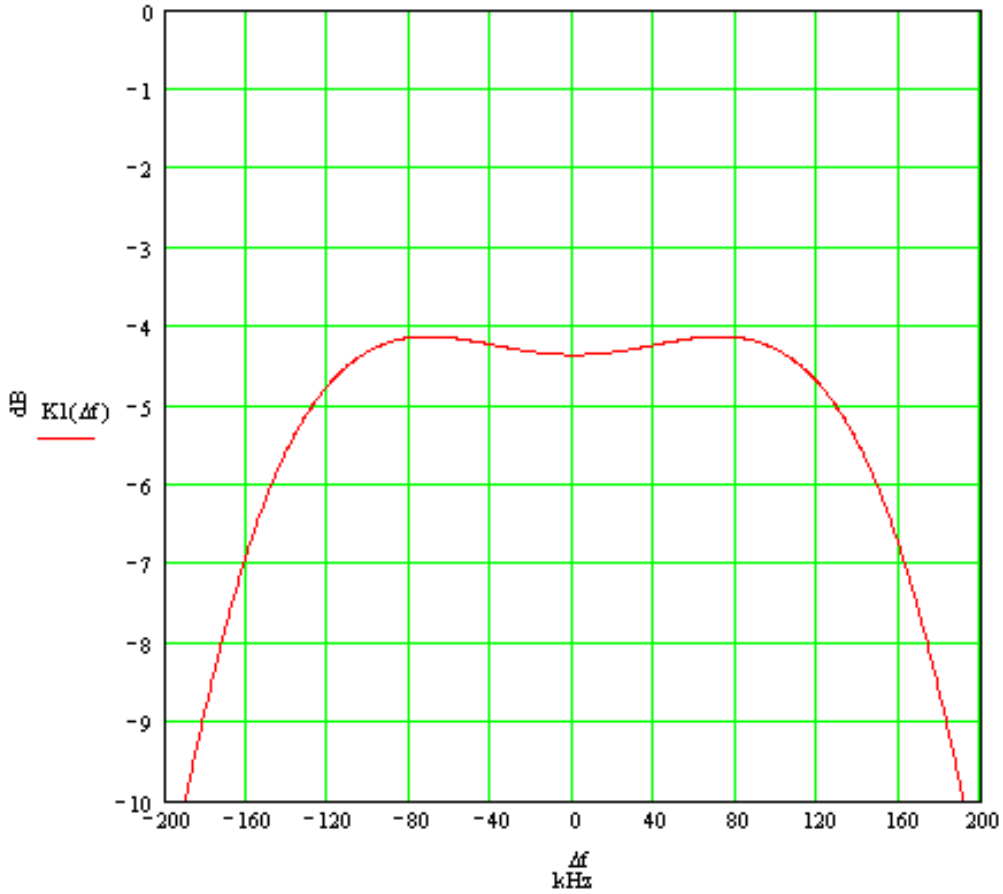
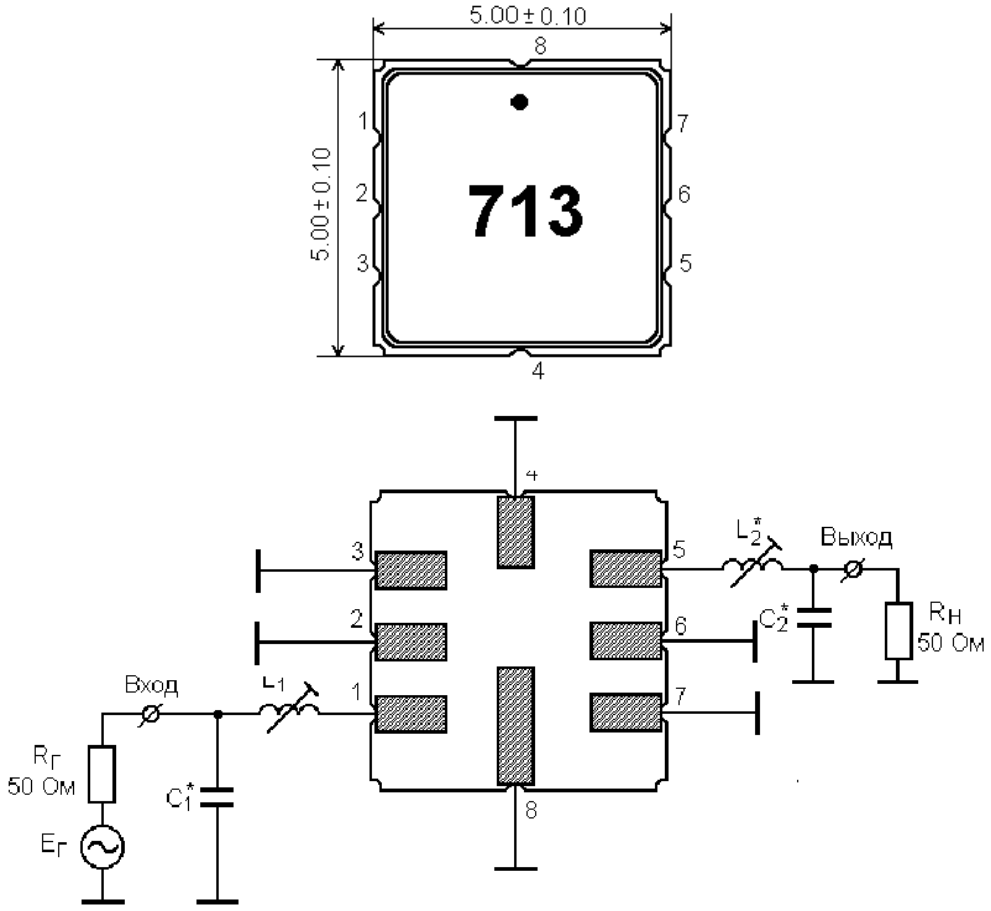


Рис.2.11. Расчетные характеристики фильтра на частоту 505 МГц

На рис.2.12 представлена рекомендуемая схема включения фильтра ФП-713 505В0,25 МГц , размещенного в корпусе SMD 5,0x5,0x1,25 мм, KD-V99902, KYOCERA, Япония.



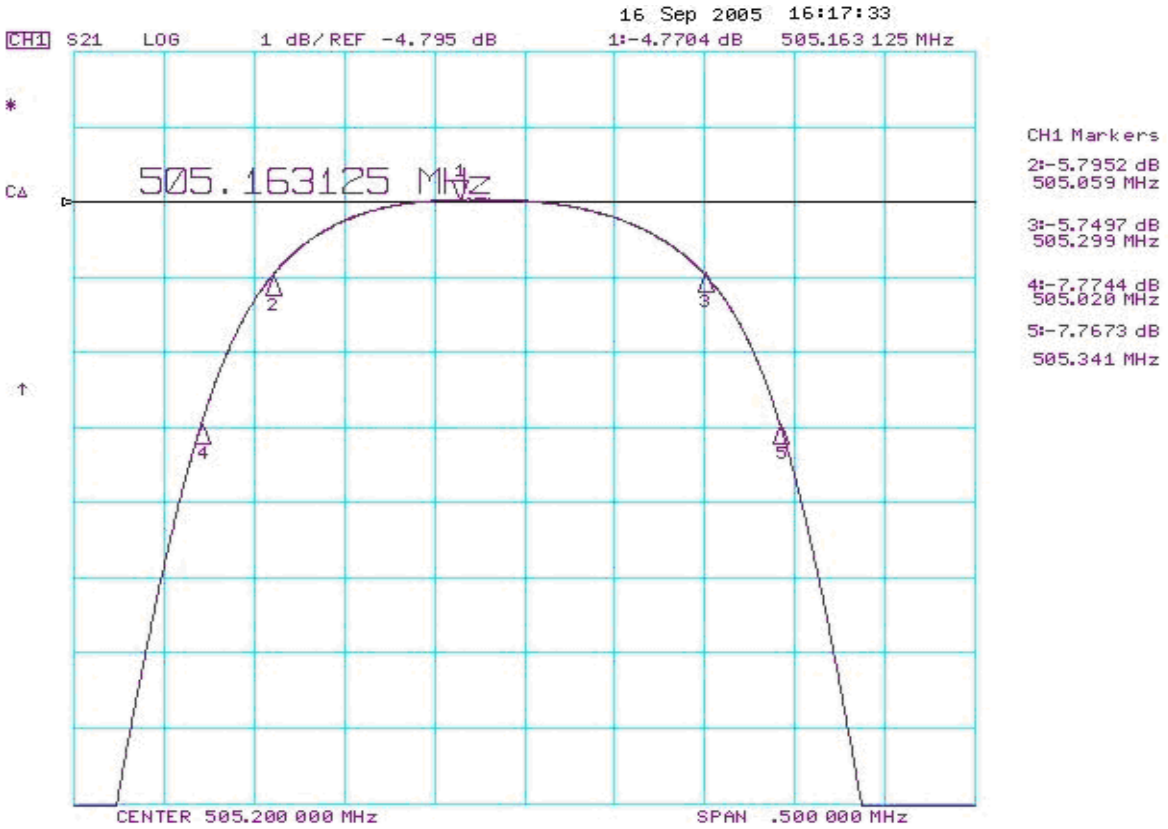
L1, L2 =25 – 50 nH (подбираются в зависимости от емкостей монтажа и платы).
C1,C2 = 1.8 – 2.2 pF. Сопротивления генератора и нагрузки : $R_Г/R_Н$=50/50 Ом.

Рис.2.12. Рекомендуемая схема включения фильтра ФП-713 505В0,25 МГц в корпусе SMD 5,0x5,0x1,2 мм

Особенности изготовления печатной платы и монтажа фильтра на 505 МГц , обеспечивающие низкий уровень электромагнитной наводки не хуже -(65-75) дБ., такие же , что для фильтра на 145 МГц . Но дополнительно “земляные” выводы корпуса 4 и 8 соединяются сплошной металлизированной полоской, к которой плотно прижимается корпус фильтра.

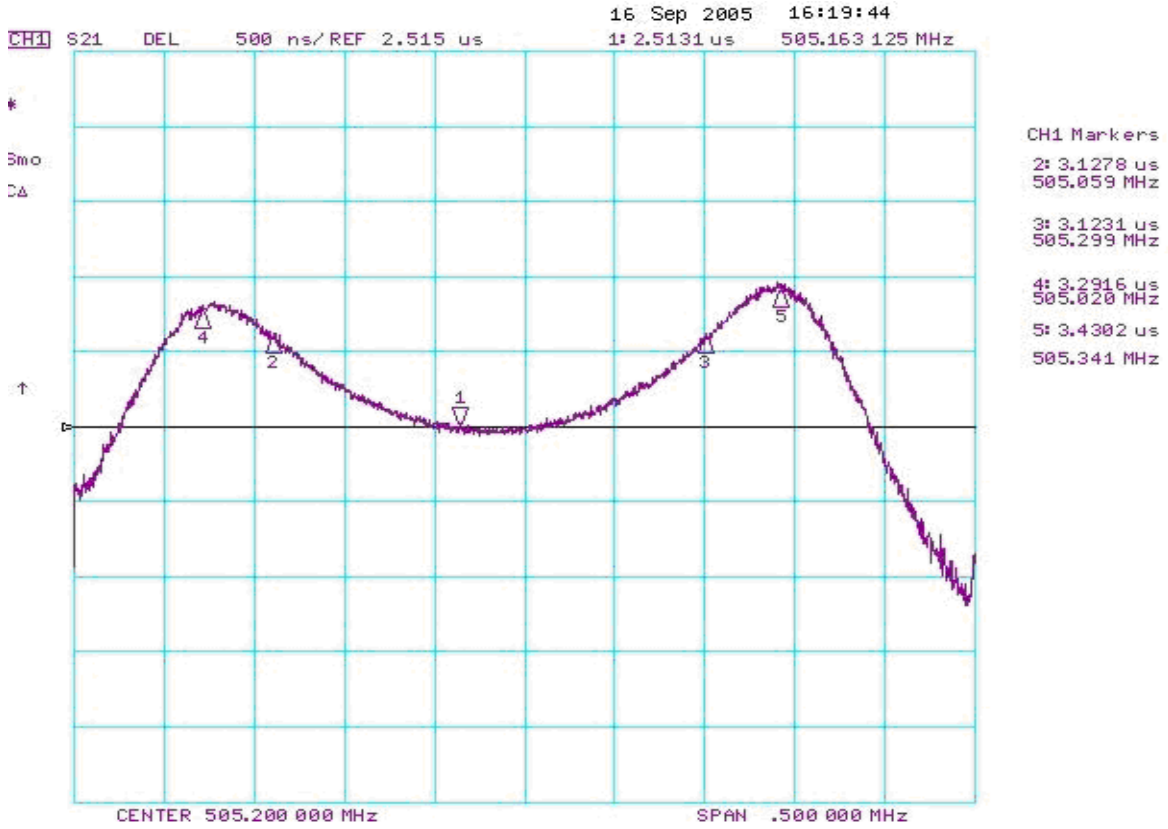
Типичные измеренные частотные характеристики фильтра при 20 ^{0}С приведены на рис. 2.13. Вносимые потери фильтра на 505 МГц увеличились до IL=4,8 дБ в первую очередь из-за дополнительных потерь в низкодобротных катушках согласующих цепей и частично из-за снижения нагруженной добротности резонаторов , обусловленного конечной проводимостью пленок алюминия и ростом потерь на распространение ПАВ в кварцевой подложке.

|S21|, дБ



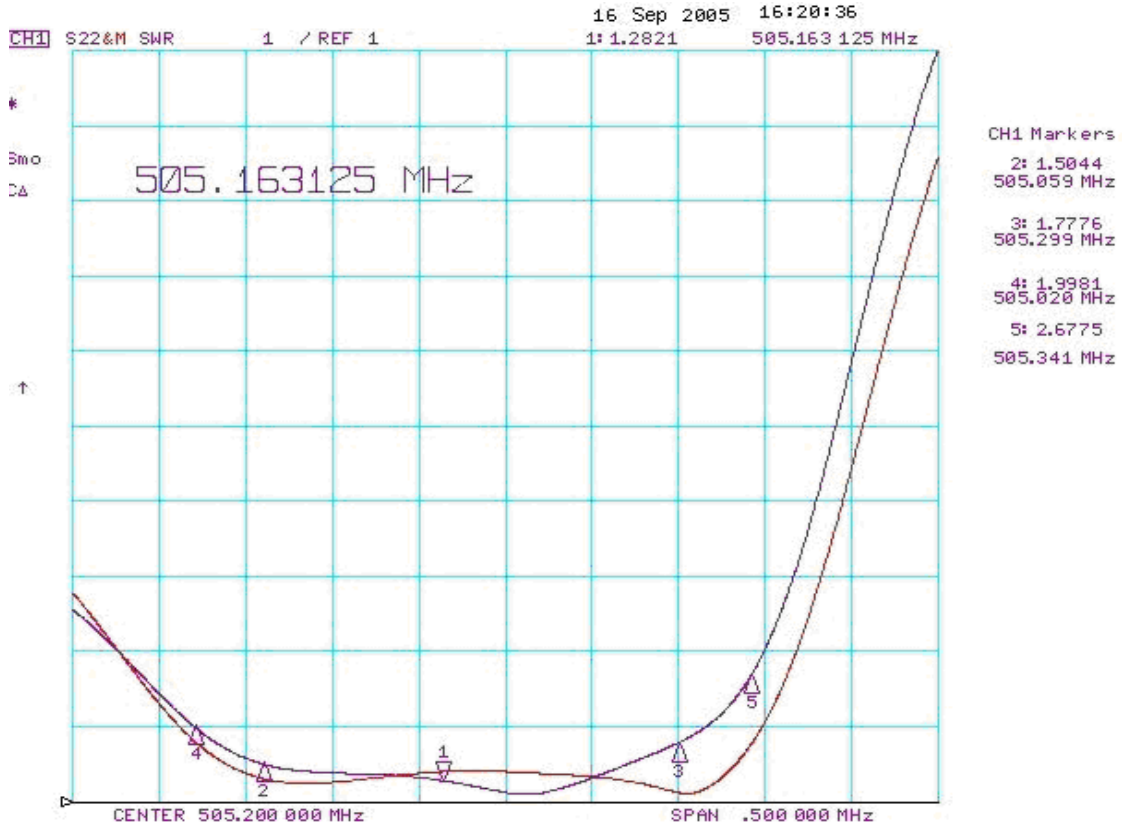
а

GDT , мксек



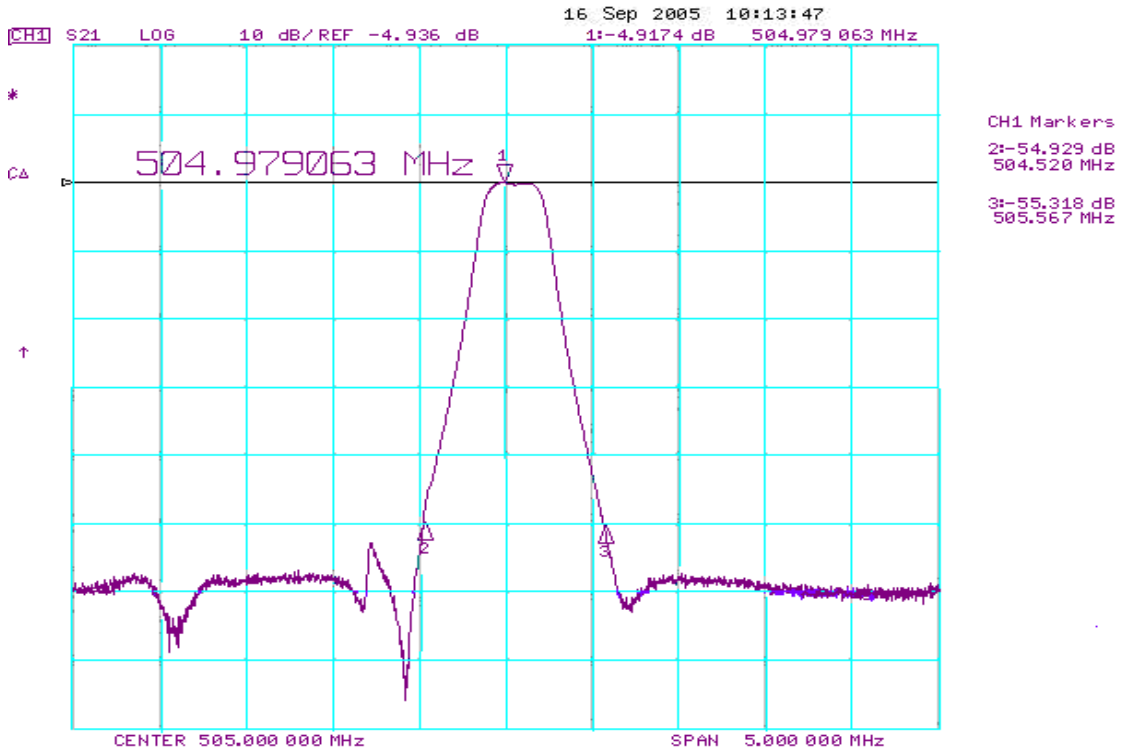
б

SWR


16 Sep 2005 16:20:36
CH1 S22&M SWR 1 / REF 1
1: 1.2821 505.163 125 MHz
505.163125 MHz
CH1 Markers
2: 1.5044
505.059 MHz
3: 1.7776
505.299 MHz
4: 1.9981
505.020 MHz
5: 2.6775
505.341 MHz
CENTER 505.200 000 MHz
SPAN .500 000 MHz

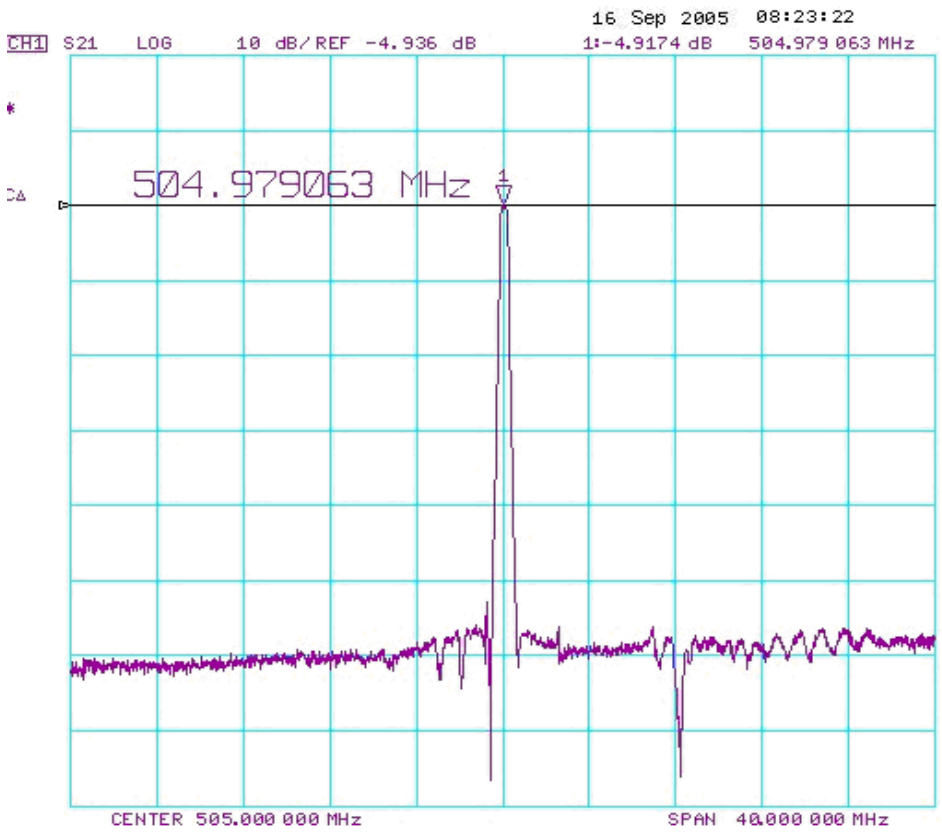
в

|S21|, дБ


16 Sep 2005 10:13:47
CH1 S21 LOG 10 dB/ REF -4.936 dB
1:-4.9174 dB 504.979 063 MHz
504.979063 MHz
CH1 Markers
2:-54.929 dB
504.520 MHz
3:-55.318 dB
505.567 MHz
CENTER 505.000 000 MHz
SPAN 5.000 000 MHz

г

|S21|, дБ



д

Рис.2.13. Измеренные частотные характеристики фильтра FP-713 505В0,25 МГц , версия 1 :

а - |S21| в полосе пропускания (BW1=0,24 МГц; BW3=0,34 МГц; IL=4,8 дБ);

б- GDT в полосе пропускания (GDV= 0,6 мксек) ;

в - КСВН в полосе пропускания (SWR = 1,28 на частоте F_0 =505 МГц);

г - |S21| в полосе частот 502,5 - 5057,5 МГц (BW50= 1,1 МГц ; UR=58 дБ);

д - |S21| в полосе частот 485 – 585 МГц (UR=58 дБ)

2.3. Фильтр ФП-715 315В0,8 МГц с максимальной широкой полосой пропускания BW3= 0,25 % (0,8 МГц)

Поскольку к фильтру ФП-715 315В0,8 МГц для автомобильной сигнализации не предъявлялись требования высокой избирательности , а ставилась задача реализовать максимально широкую полосу пропускания , фильтр выполнялся по однозвенной схеме из трех резонаторов с чисто акустической связью между ними.

Эквивалентная схема фильтра ФП-715 315В0,8 МГц в виде цепочечной структуры представлена на рис.2.14. На рис.2.15 показана эквивалентная схема того же фильтра , аналогичная однозвенному трех-резонаторному монолитному фильтру на объемных акустических волнах и используемая для расчета коэффициентов связи между резонаторами

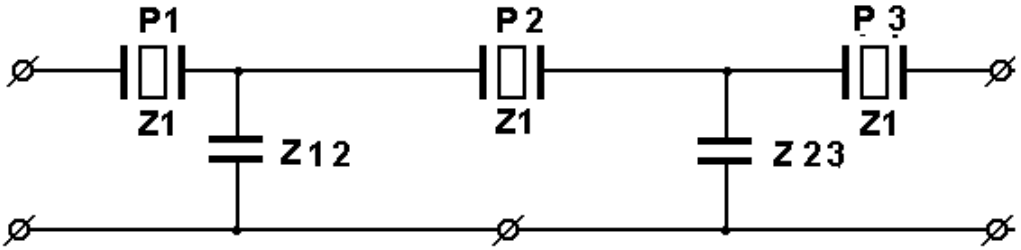


Рис.2.14. Эквивалентная схема однозвенного фильтра на частоту 315 МГц.

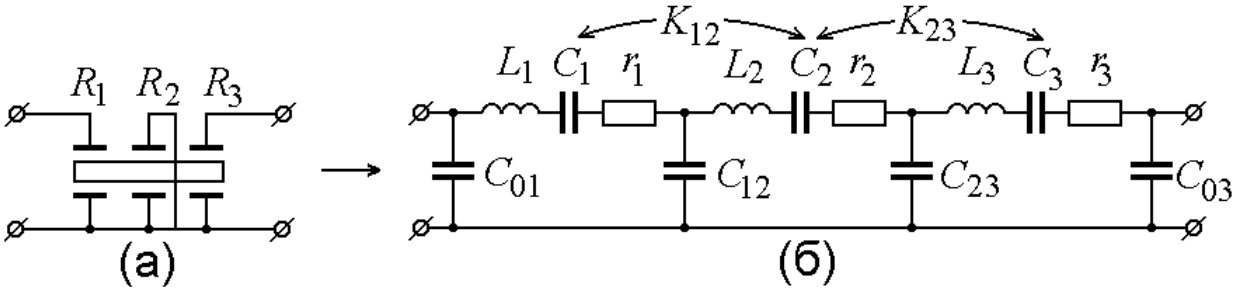


Рис.2.15. Три акустически связанных резонатора (а) и их эквивалентная схема (б)

Основные конструкционные и технологические характеристики фильтра ФП-715 315В0,8 МГц следующие :

- количество электродов в ВШП - 370 ;
- количество электродов в ОР - 200 ;
- шаг электродов в ВШП и ОР - 4,8 мкм ;
- апертура ВШП и ОР - 50 мкм ;
- зазор между резонаторами в звене - 6,2 мкм ;
- подложка - пьезокварц среза *yxl* / $33^0 18'$;
- толщина электродов - 2700 А ;
- материал электродов - алюминий на подслое титана 100-150 А;
- коэффициент металлизации - 0,62 ;
- технология - прямая фотолитография .

На рис.2.16 изображена топология данного фильтра ФП-715 315В0,8 МГц .

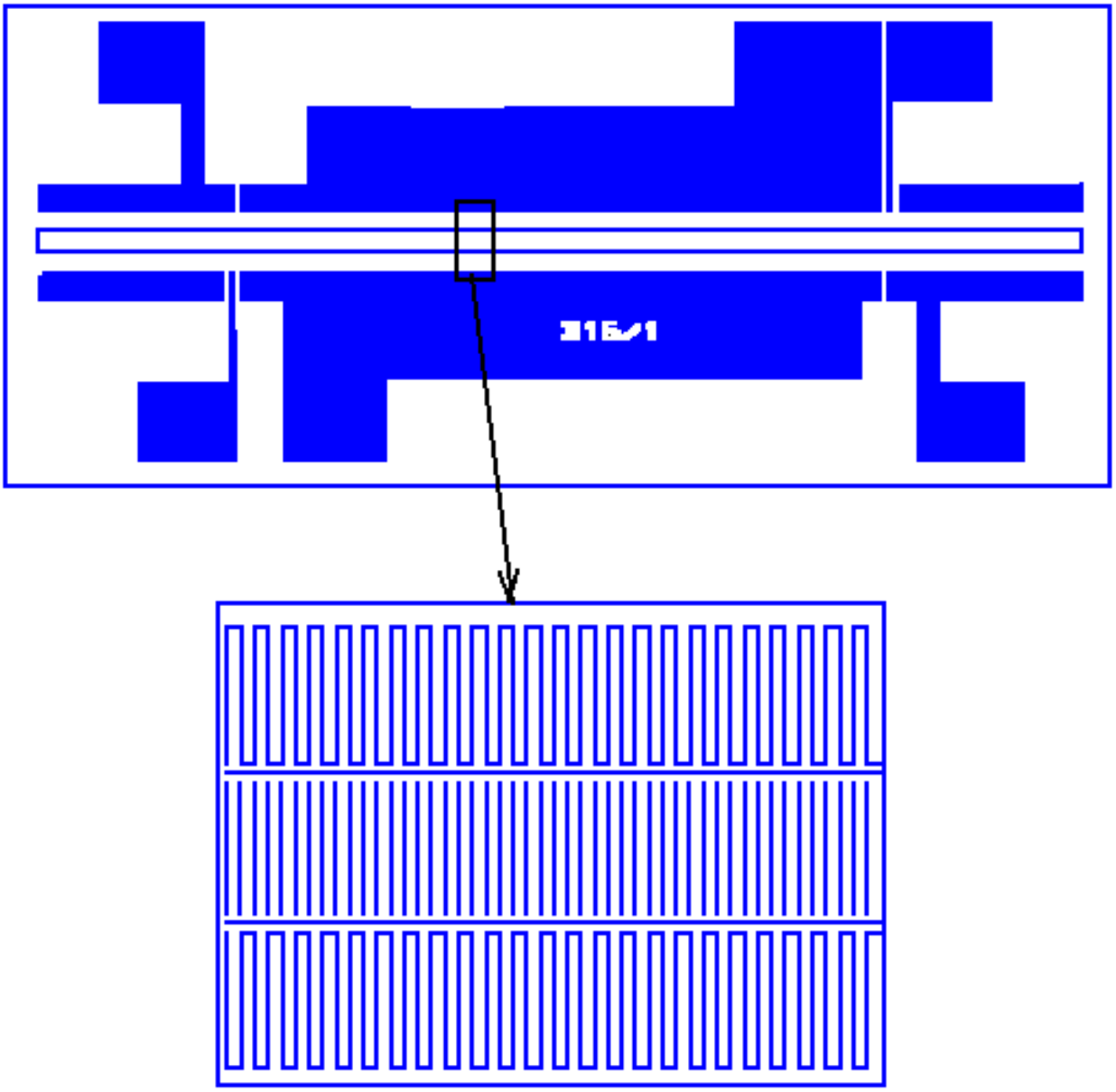


Рис.2.16. Топология однозвенного трех-резонаторного фильтра на частоту 315 МГц

На рис.2.17 представлена сборка фильтра ФП-715 315В0,8 МГц в корпусе SMD 5,0x5,0x1,25 мм, KD-V99902, KYOCERA, Япония

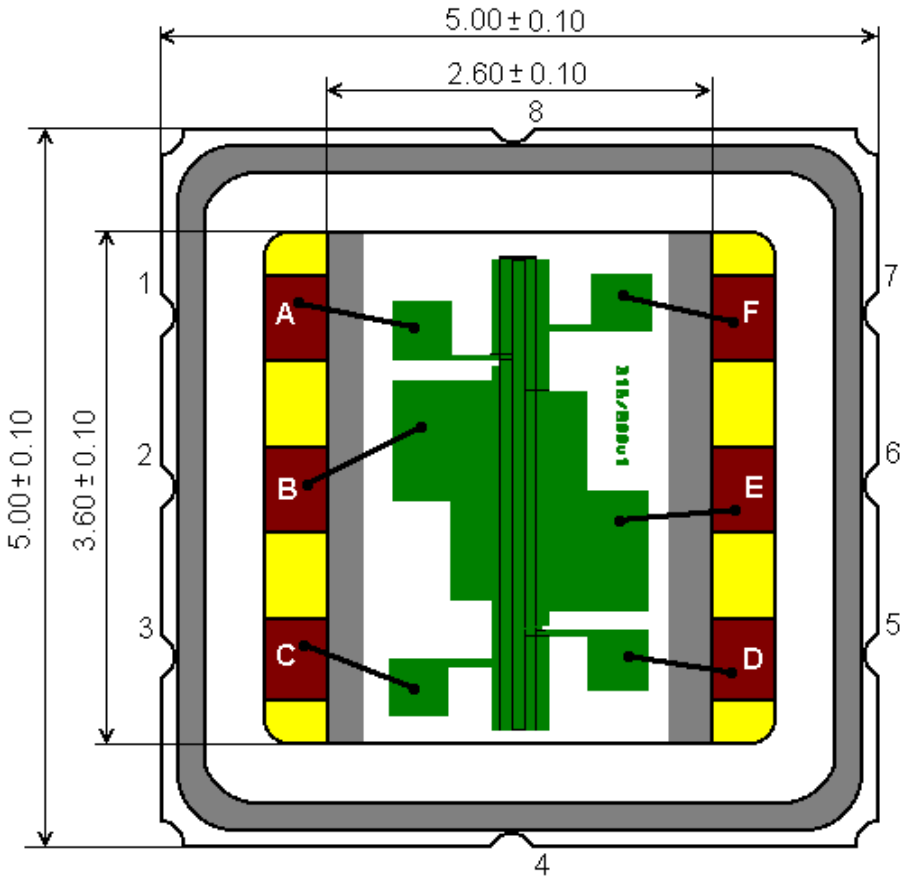


Рис.2.17. Сборка фильтра ФП-715 315В0,8 МГц в корпусе SMD 5,0х5,0х1,25 мм

На рис 2.18 представлены расчетные характеристики фильтра ФП-715 315В0,8 МГц , а на рис. 2.19 – рекомендуемая схема включения.

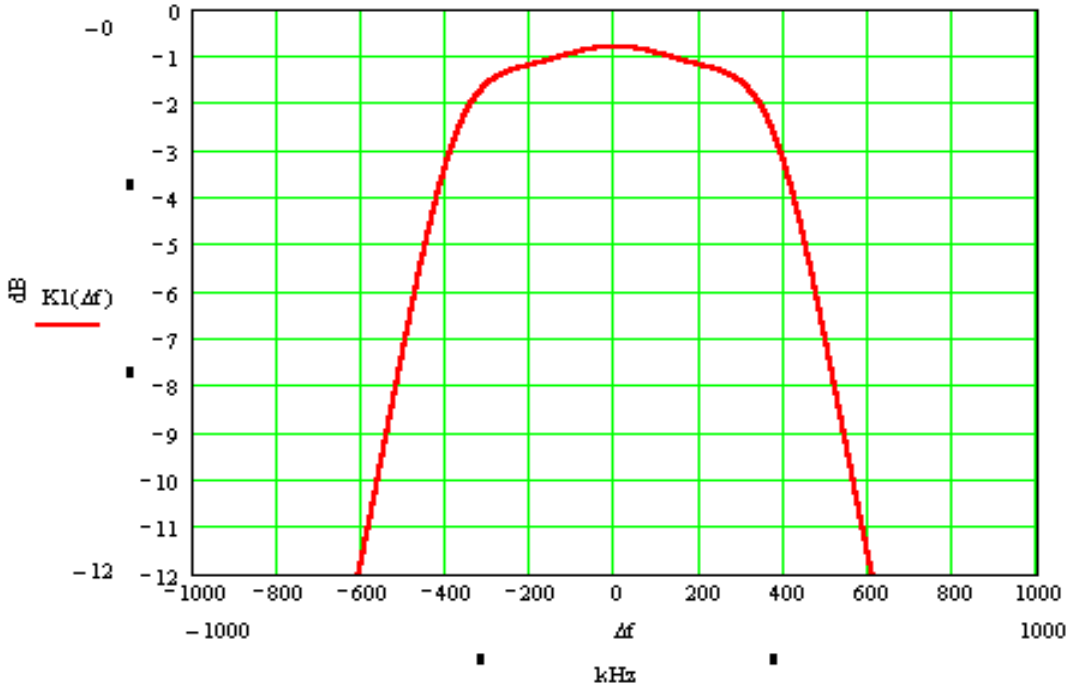
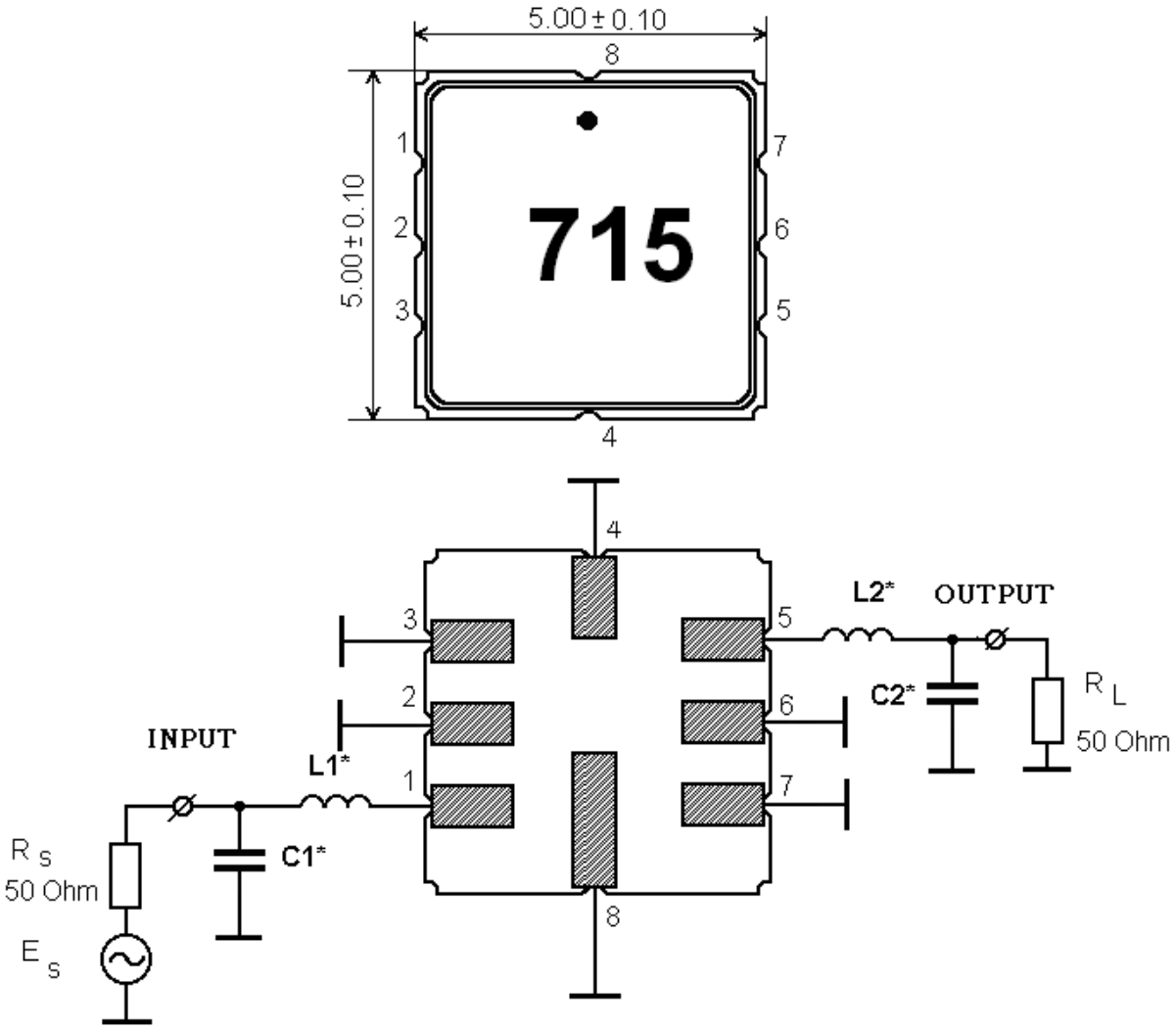


Рис.2.18. Расчетные характеристики однозвенного фильтра на 315 МГц



R_S = R_L = 50 Ohm

L1* = 120 nH, Q = 60

L2* = 120 nH, Q = 60

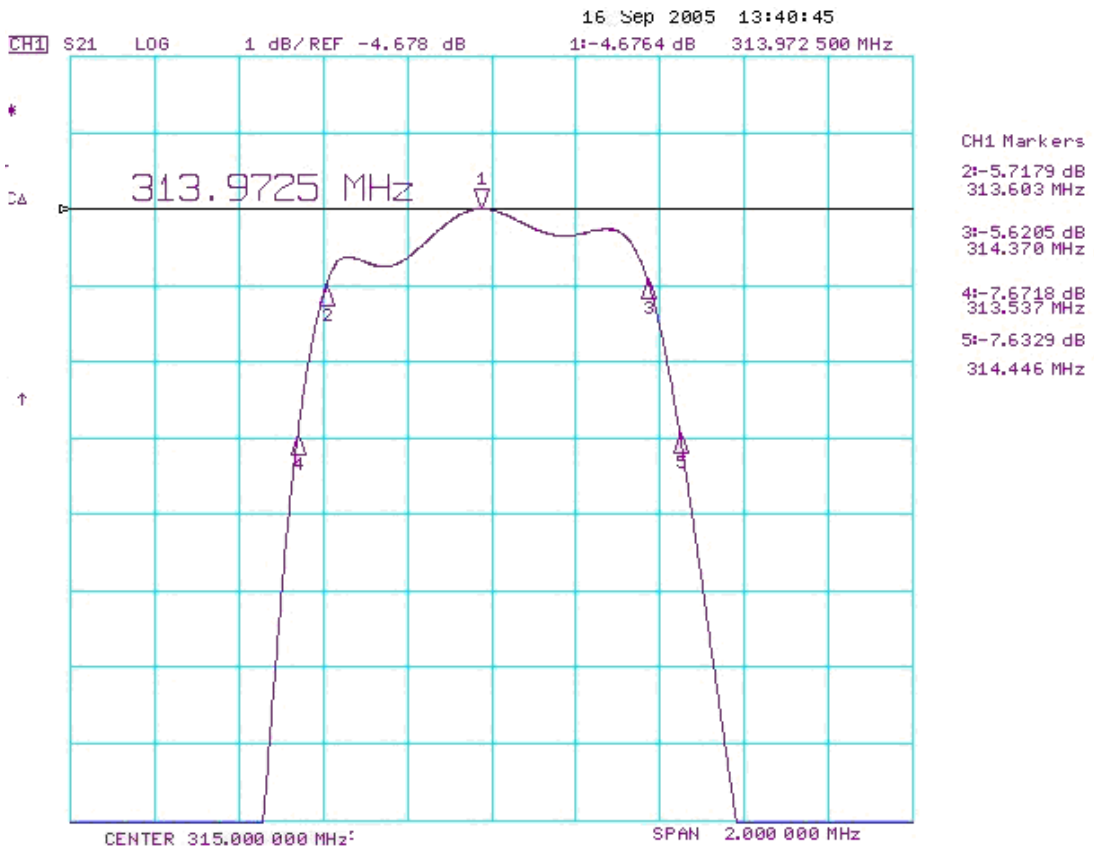
C1* = 8,2 pF

C2* = 8,2 pF

Рис.2.19 . Рекомендуемая схема включения фильтра ФП-715 315В0,8 МГц в корпусе SMD 5,0x5,0x1,25 мм, KD-V99902, KYOCERA , Япония

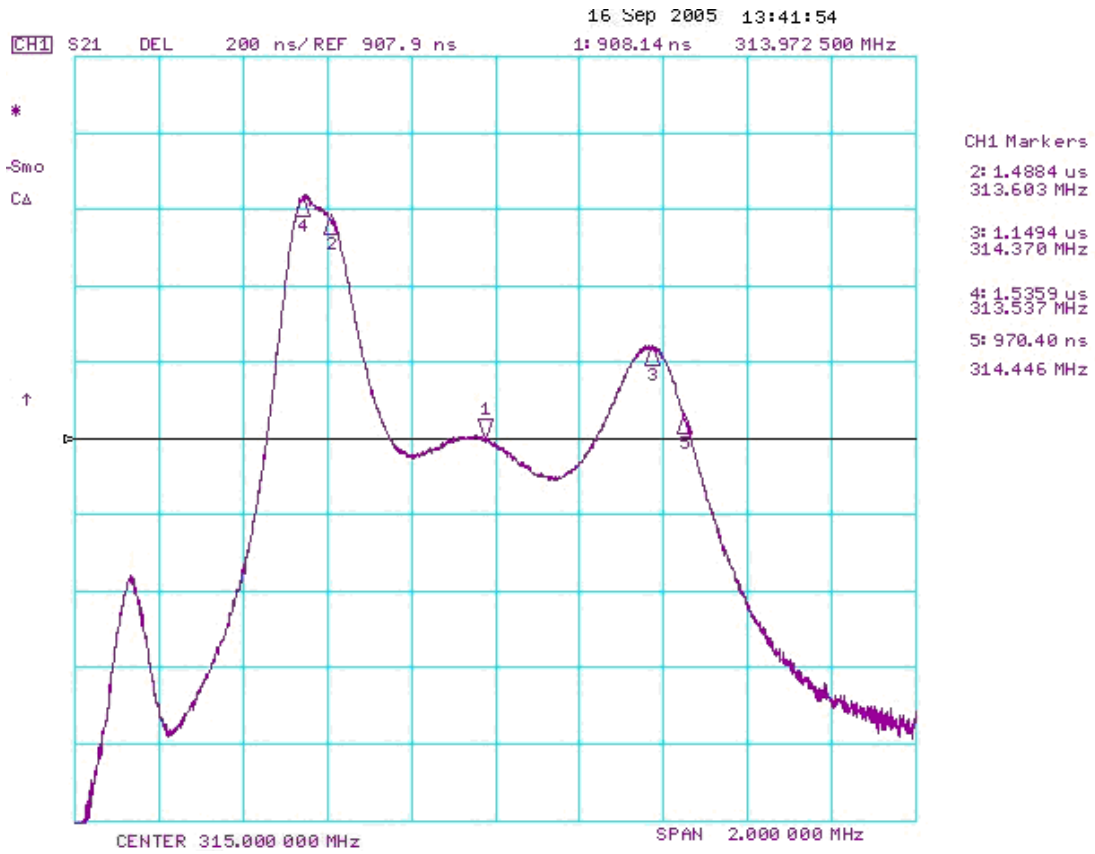
Типичные измеренные частотные характеристики однозвенного трех-резонаторного фильтра ФП-715 315В0,8 МГц , верия 2, представлены на рис . 2.20 .

|S21|, дБ



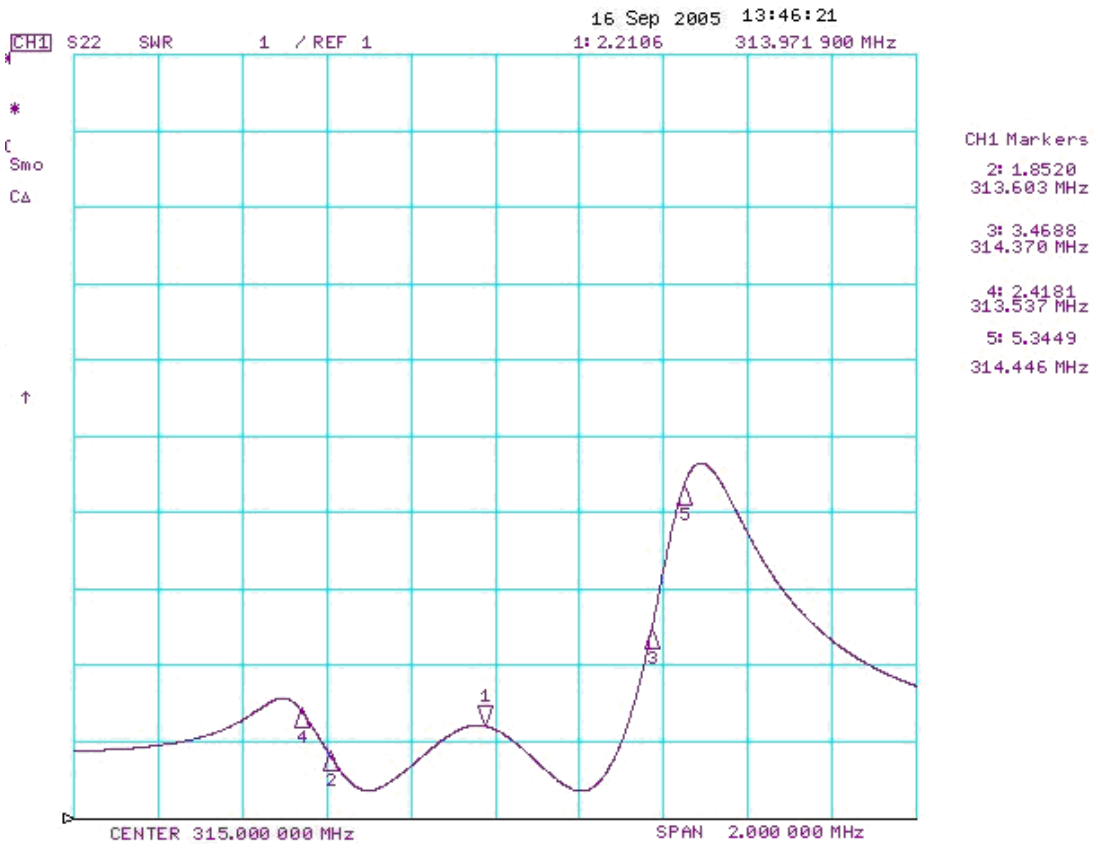
а

GDT, нсек



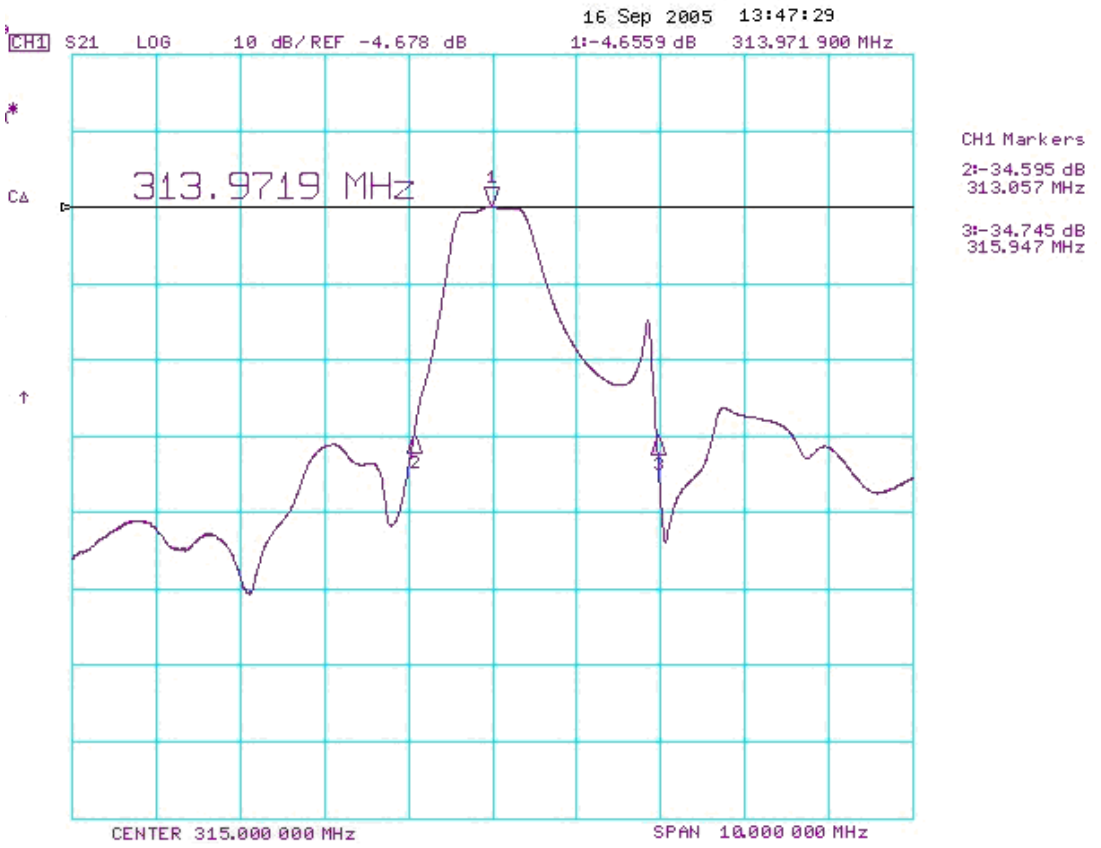
б

SWR


16 Sep 2005 13:46:21
CH1 S22 SWR 1 / REF 1
1: 2.2106 313.971 900 MHz
CH1 Markers
2: 1.8520
313.603 MHz
3: 3.4688
314.370 MHz
4: 2.4181
313.537 MHz
5: 5.3449
314.446 MHz
CENTER 315.000 000 MHz
SPAN 2.000 000 MHz

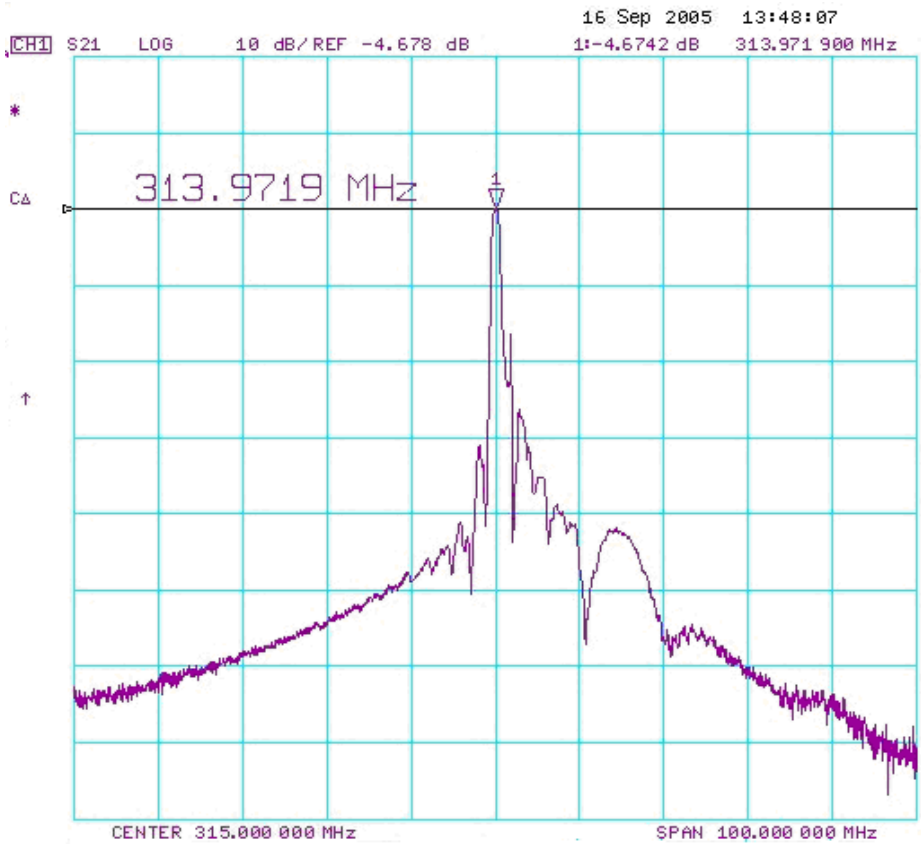
в

|S21|, дБ


16 Sep 2005 13:47:29
CH1 S21 LOG 10 dB/ REF -4.678 dB
1:-4.6559 dB 313.971 900 MHz
313.9719 MHz
CH1 Markers
2:-34.595 dB
313.057 MHz
3:-34.745 dB
315.947 MHz
CENTER 315.000 000 MHz
SPAN 10.000 000 MHz

г

|S21|, дБ



д

Рис.2.20. Измеренные частотные характеристики фильтра ФП-715 315 В0,82 МГц, версия 2:

а - |S21| в полосе пропускания (; BW1 = 0,81 МГц; BW3 =0,89 МГц;

IL=4,6 дБ; AR =0,5 дБ в полосе частот $F_0 \pm 0,4$ МГц);

б - ГВЗ в полосе пропускания (GDV = 600 нсек в полосе $F_0 \pm 0,4$ МГц);

в - КСВ в полосе пропускания (SWR =2,2 на частоте 315 МГц);

г - |S21| в полосе частот 309 - 319 МГц;

д - S21| в полосе частот 264 - 364 МГц

2.4. Фильтры ФП-728 85,38В0,04 МГц и ФП-709 128В0,05 МГц на предельно низкие частоты

2.4.1 Фильтр ФП-728 85,38В0,04 МГц на частоту 85 МГц

В данном разделе приведено описание разработанного и изготовленного двухзвенного четырех-резонаторного фильтра на частоту 85,38 МГц, близкую к предельно низкой для прямой фотолитографии частоте 70-80 МГц , ограниченной габаритами резонаторов и требуемой толщой пленки алюминия 1,3-1,5 мкм.

На рис.2.21 представлена сборка фильтра ФП-728 85,38В0,04 МГц, версия 4 , в корпусе SMD 9,1x4,8x1,6 мм , KD-V93742, Япония.

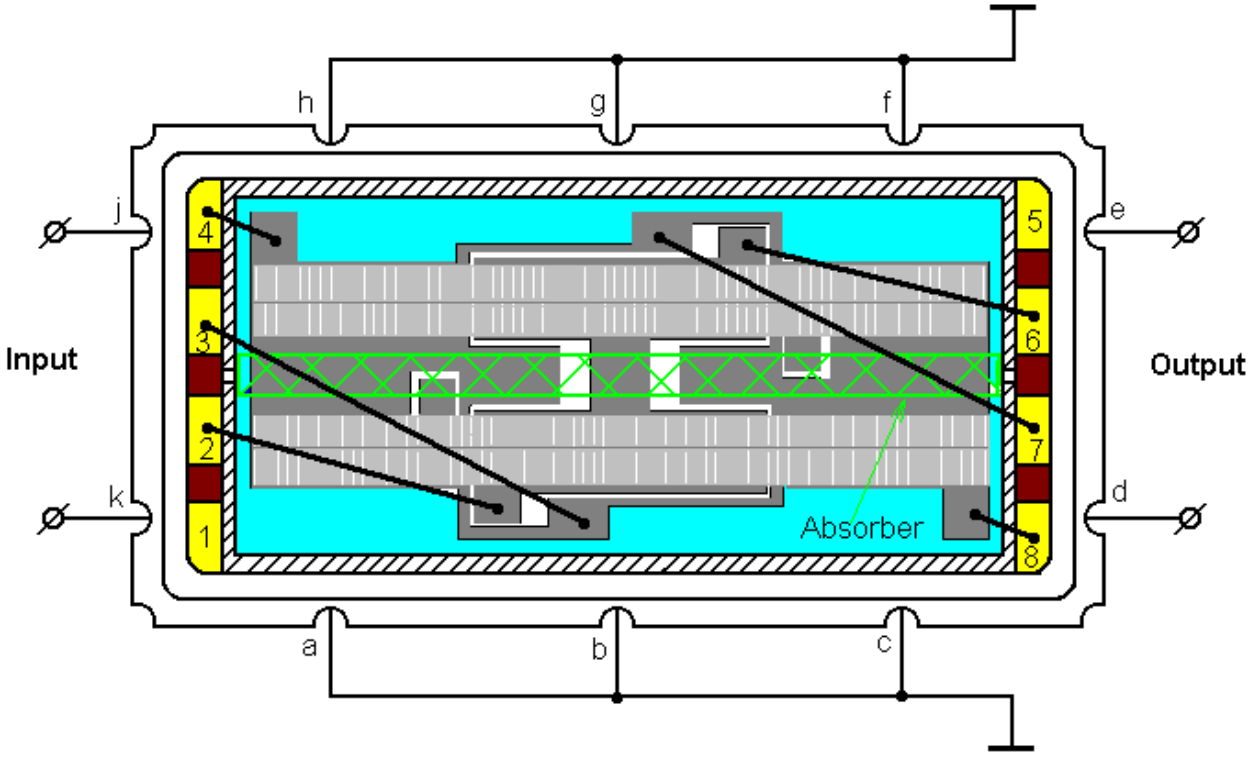
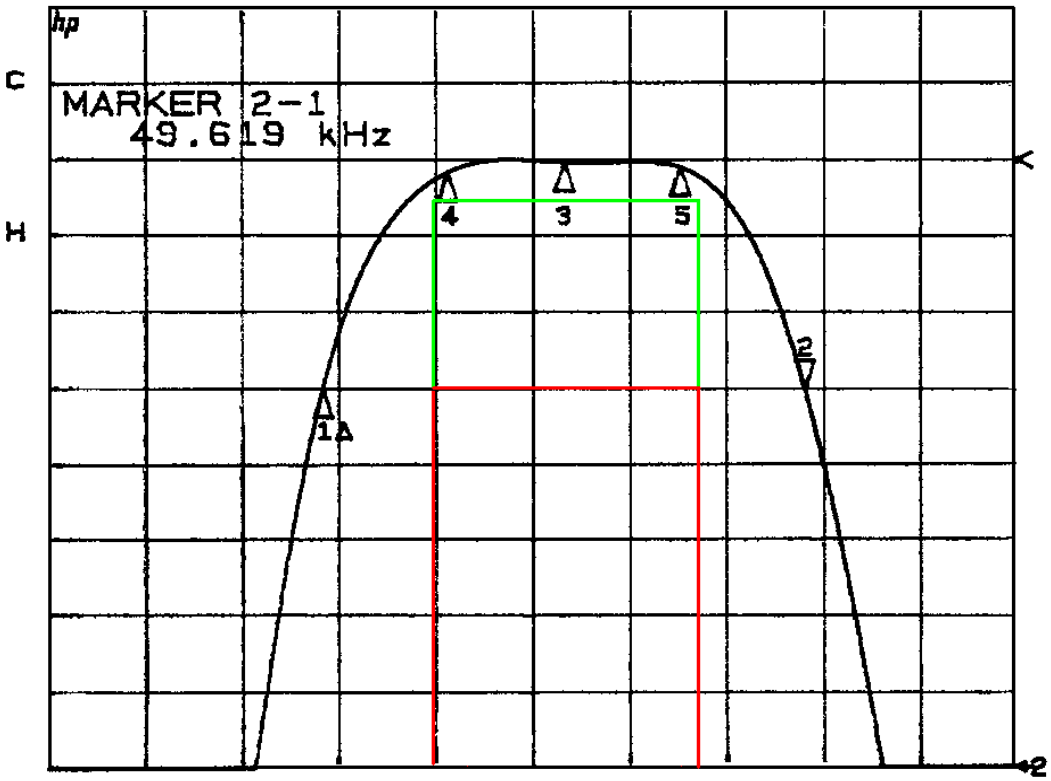


Рис.2.21. Сборка двух-звенного фильтра ФП-728 85,38В0,04 МГц в корпусе SMD 9,1x4,8x1,6 мм

На рис.2.22 показаны АЧХ ранее изготовленного и исследованного змеренного фильтра.на эту частоту для тракта ПЧ радиотелефона стандарта AMPS с нанесенными допусками в соответствии со спецификацией B4858 фирмы EPCOS , Германия.

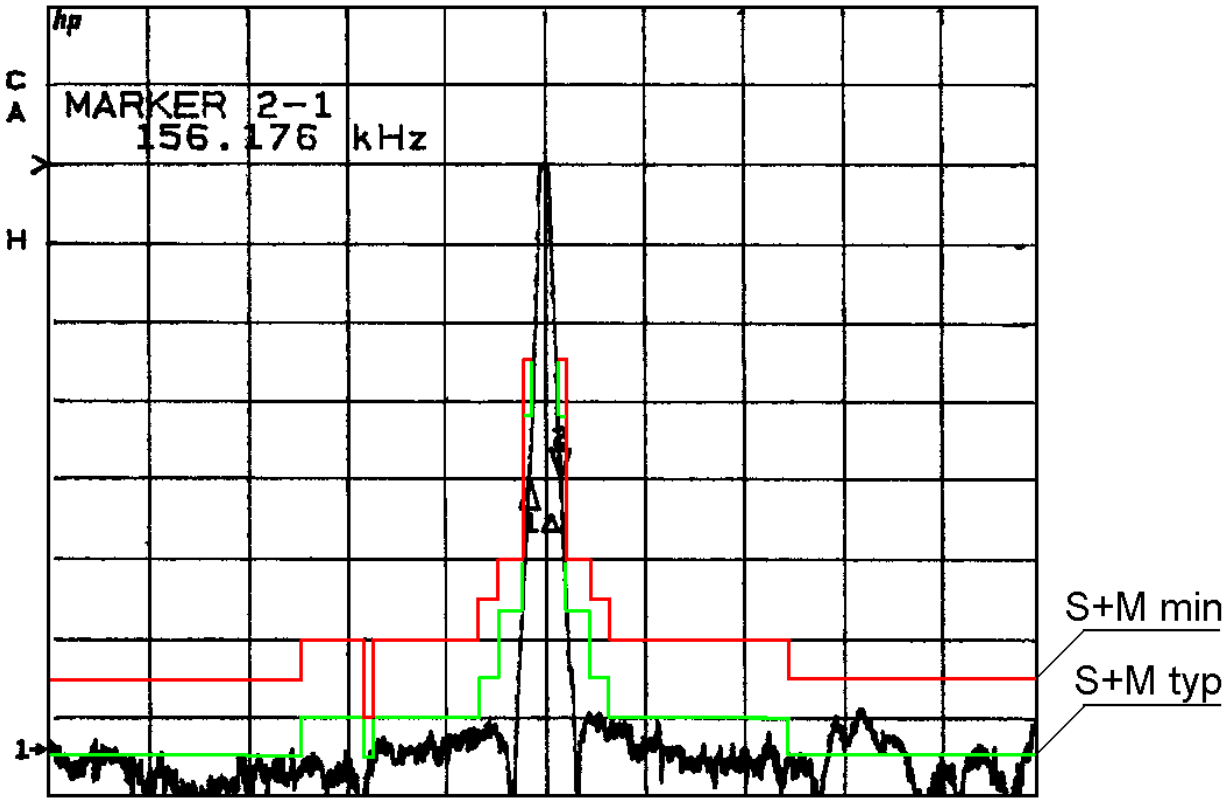
IS21I, dB ;REF -3.584 dB ; 1.0 dB / div



CENTER 0.085450000 GHz SPAN 0.000100000 GHz

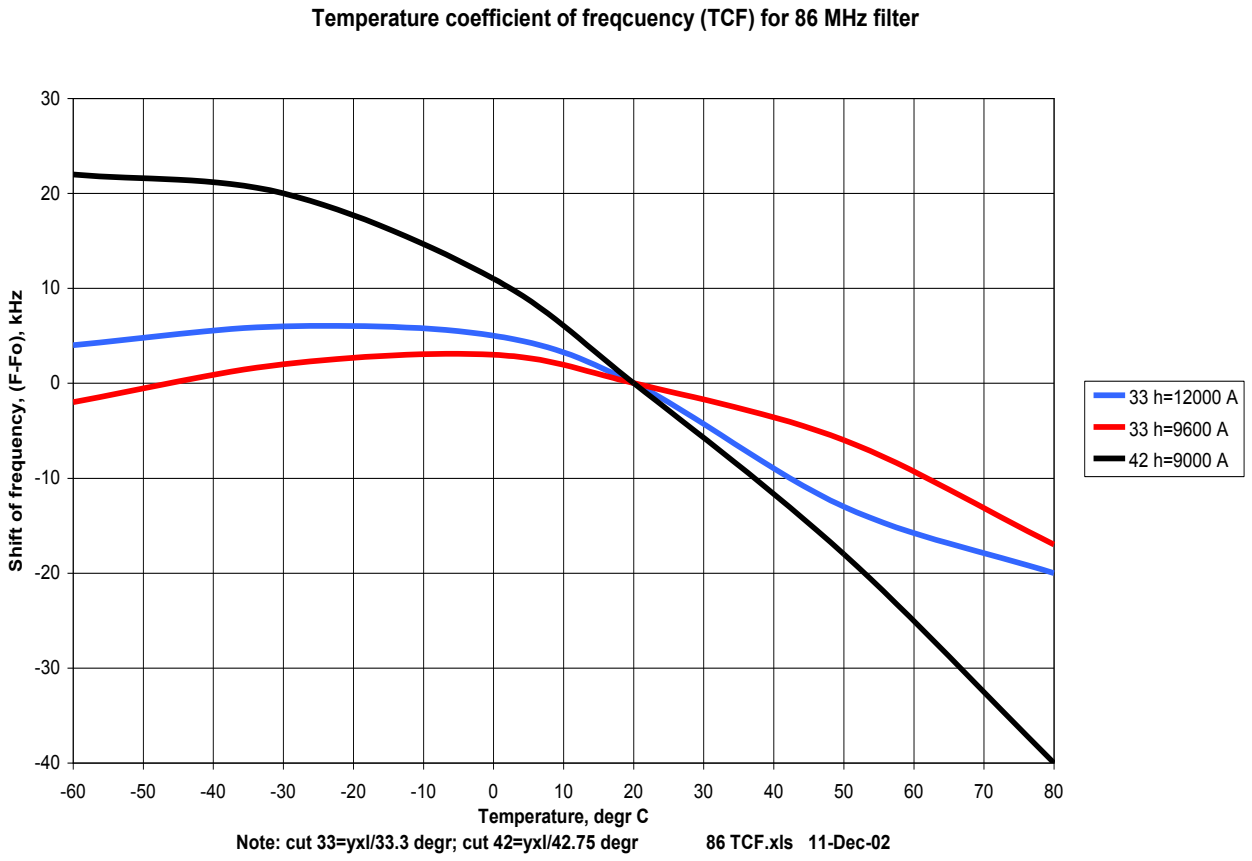
а

IS21I, dB ; REF - 3.618 dB; 10.0 dB/div



CENTER 0.085450000 GHz SPAN 0.005000000 GHz

б

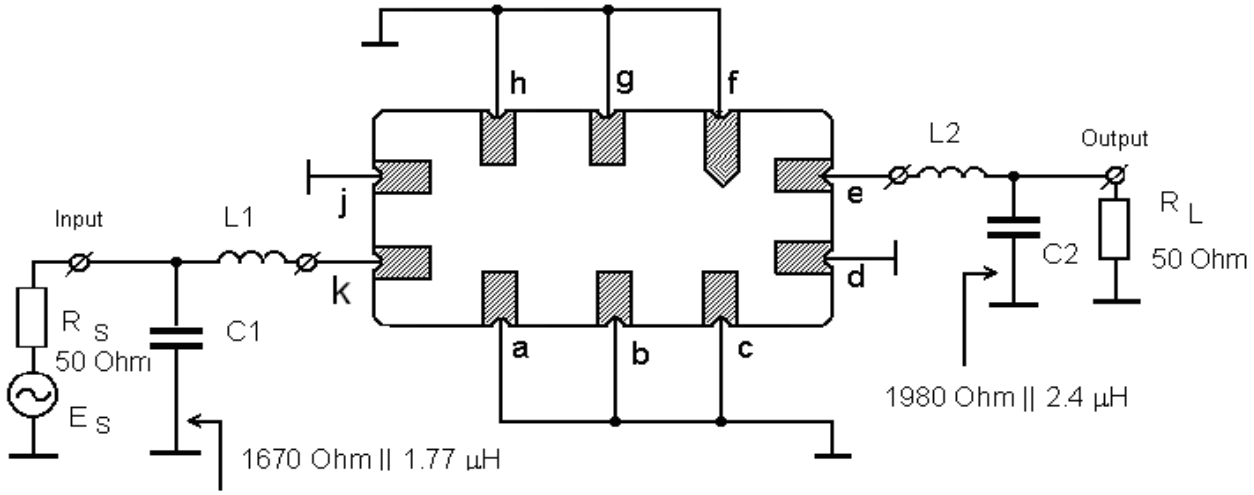


в

Рис.2.22. Измеренные АЧХ и ТЧХ фильтра ФП-728 85,38В0,04 МГц

Полосы пропускания фильтра составляют BW1=40 кГц по уровню –1 дБ и BW3=50 кГц. по уровню –3 дБ.

На рис 2.23 изображена схема согласования этого фильтра при аксиальном включении.



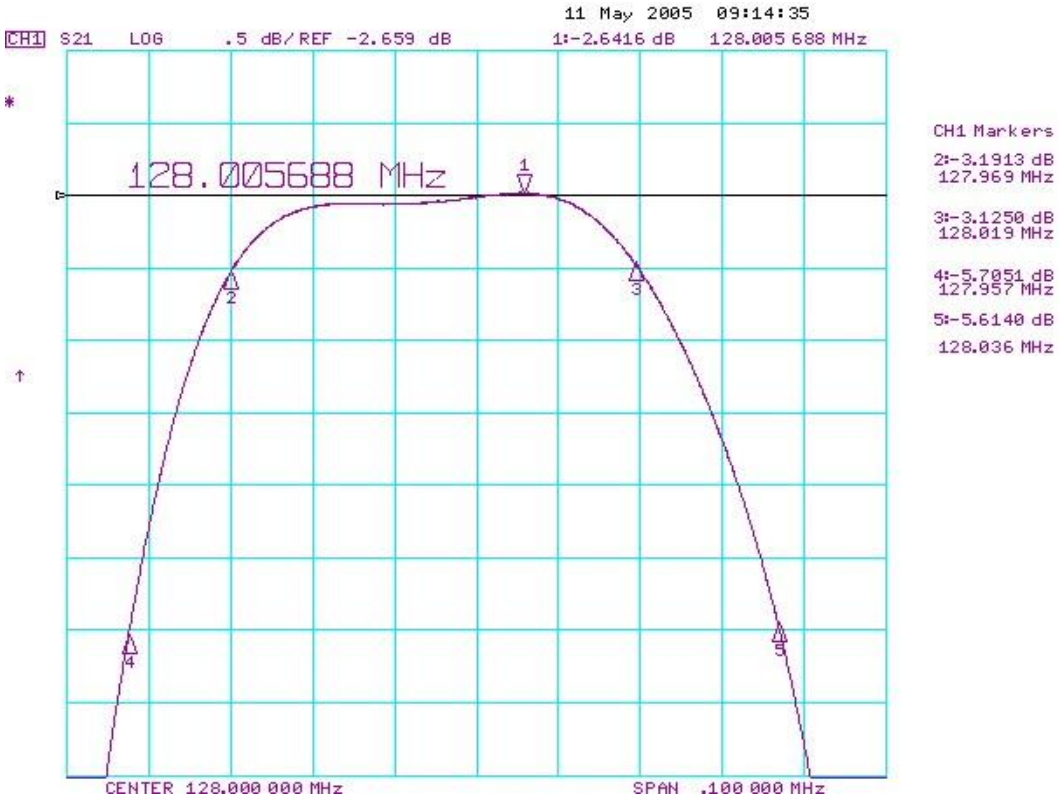
C_1=3.0 pF ; L_1=520 nH ; Q_1=60 C_2=3.0 pF; L_2=570 nH ; Q_2=60

Рис. 2.23 Схема согласования фильтра ФП-728 85,38В0,04 МГц в корпусе SMD 9,1x4,8x1,6 мм

2.4.2 Фильтр ФП-709 128В0,05 МГц на частоту 128 МГц

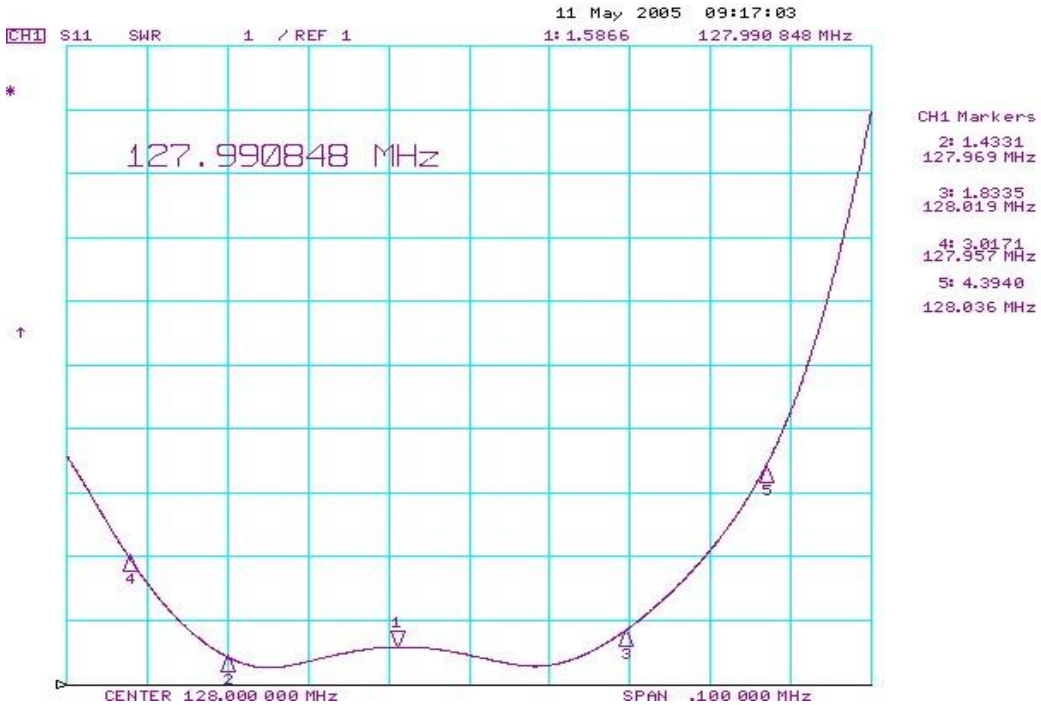
Измеренные частотные характеристики фильтра фильтра ФП-709 128В0,05 МГц , версия v1 , приведены на рис.24.

|S21|, дБ



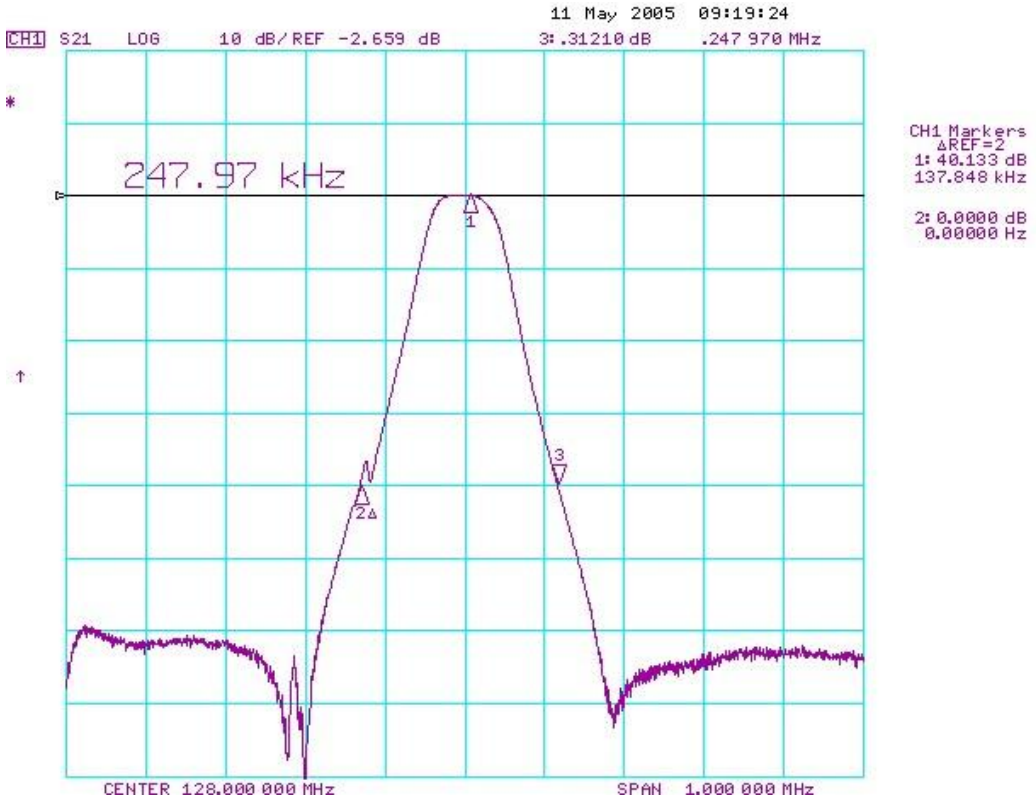
а

SWR



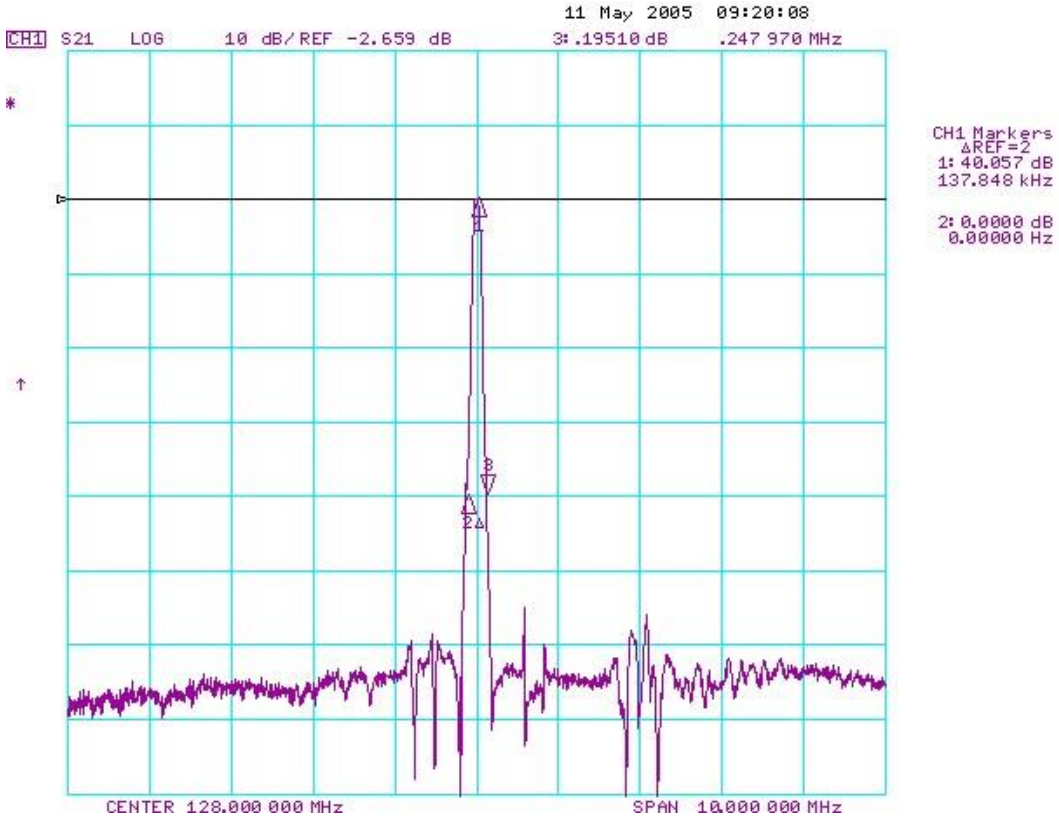
б

|S21|, дБ



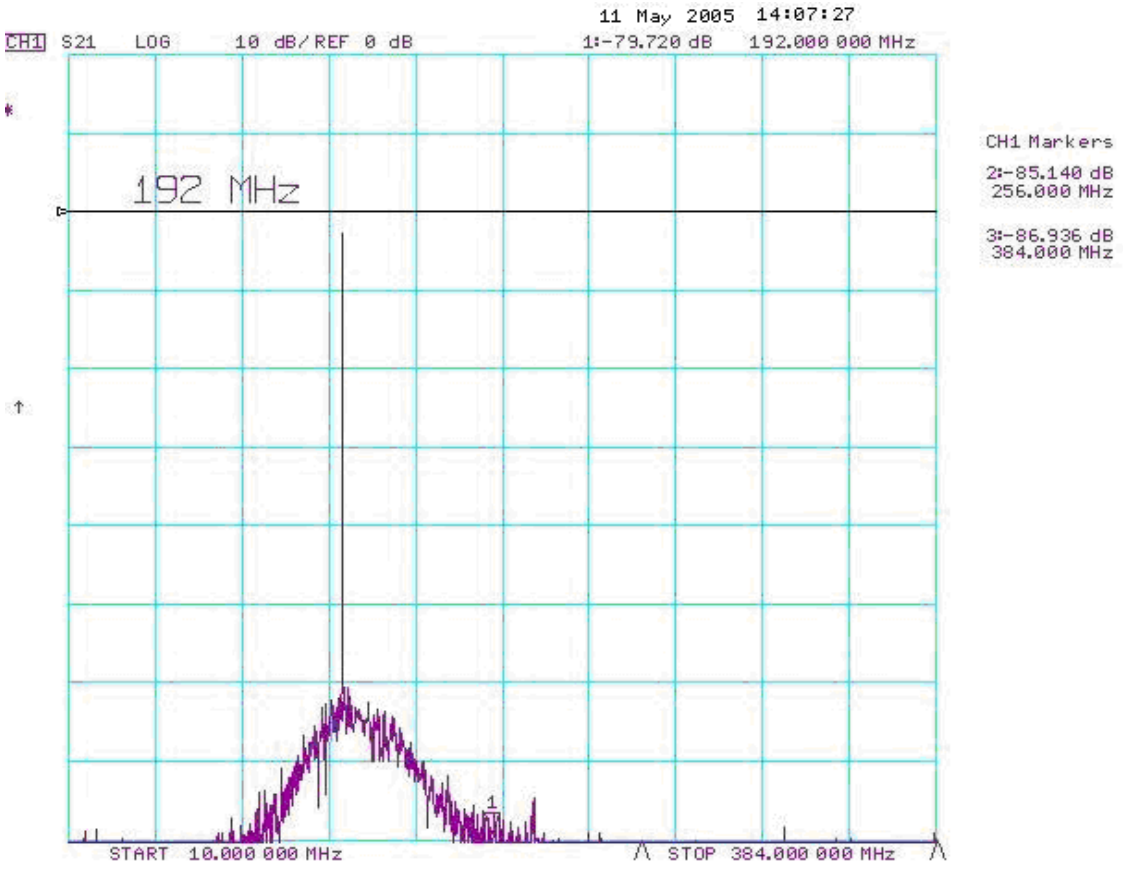
в

|S21|, дБ



г

|S21|, дБ



д

Рис. 24. Измеренные частотные характеристики фильтра ФП-709 128В0,05 МГц , версия v1 :

а - |S21| в полосе пропускания (F_0 = 128 МГц ; IL=2,6 дБ ; BW0,5 = 0,05 МГц ; BW3 = 0,09 МГц; AR= 0,2 дБ);

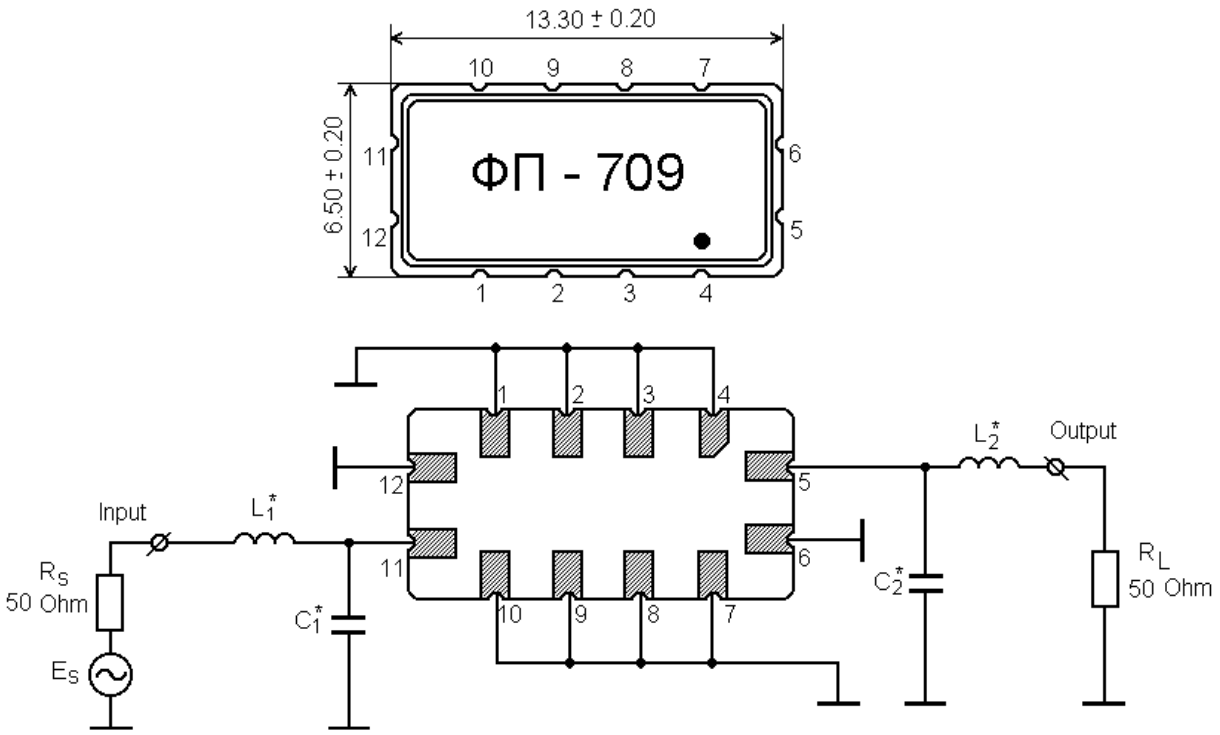
б - КСВН в полосе пропускания - (SWR = 1,6 на частоте F_0 =128 МГц);

в - |S21| в полосе частот 127,5 – 128,5 МГц (BW40 = 0,247 МГц; UR=60 дБ);

г - |S21| в полосе частот 123 - 133 МГц;

д- |S21| в полосе частот 10 – 384 МГц

Рекомендуемая схема включения фильтра ФП-709 128В0,05 МГц в корпусе SMD 13,3x6,5x1,8мм , M3-12991-R, Sumitomo Metal (SMI), Япония, показана на рис. 25.

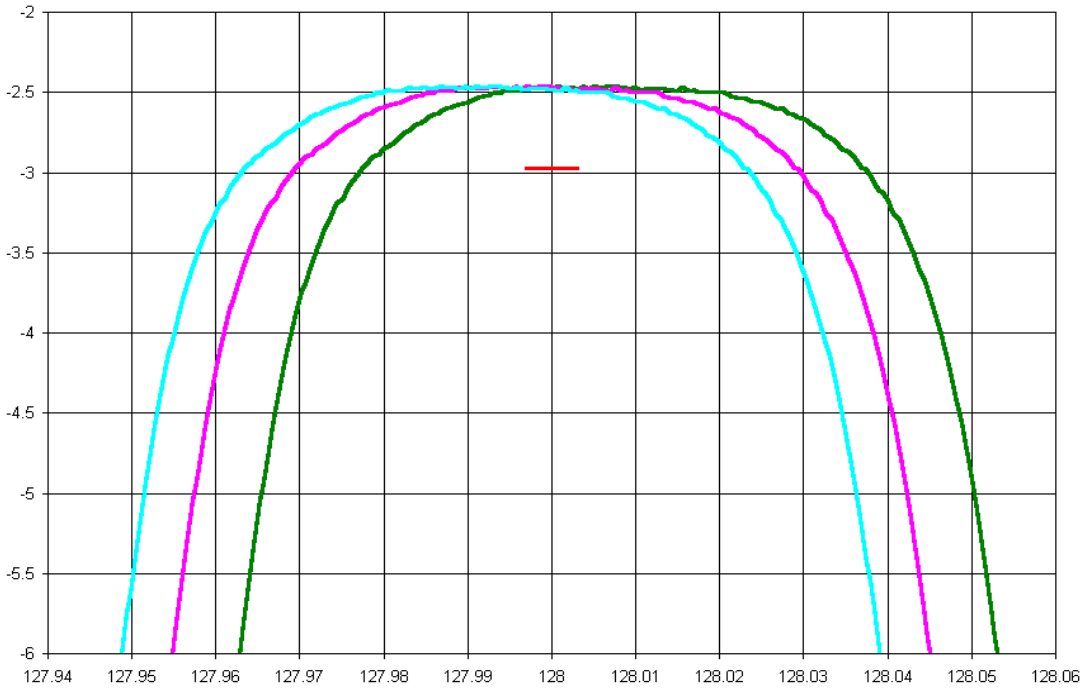


R_S = R_L = 50 Ohm . L1* = 210±20 nH , C1* = 1÷5 pF ; L2* = 210±20 nH , C2* = 1÷5 pF.

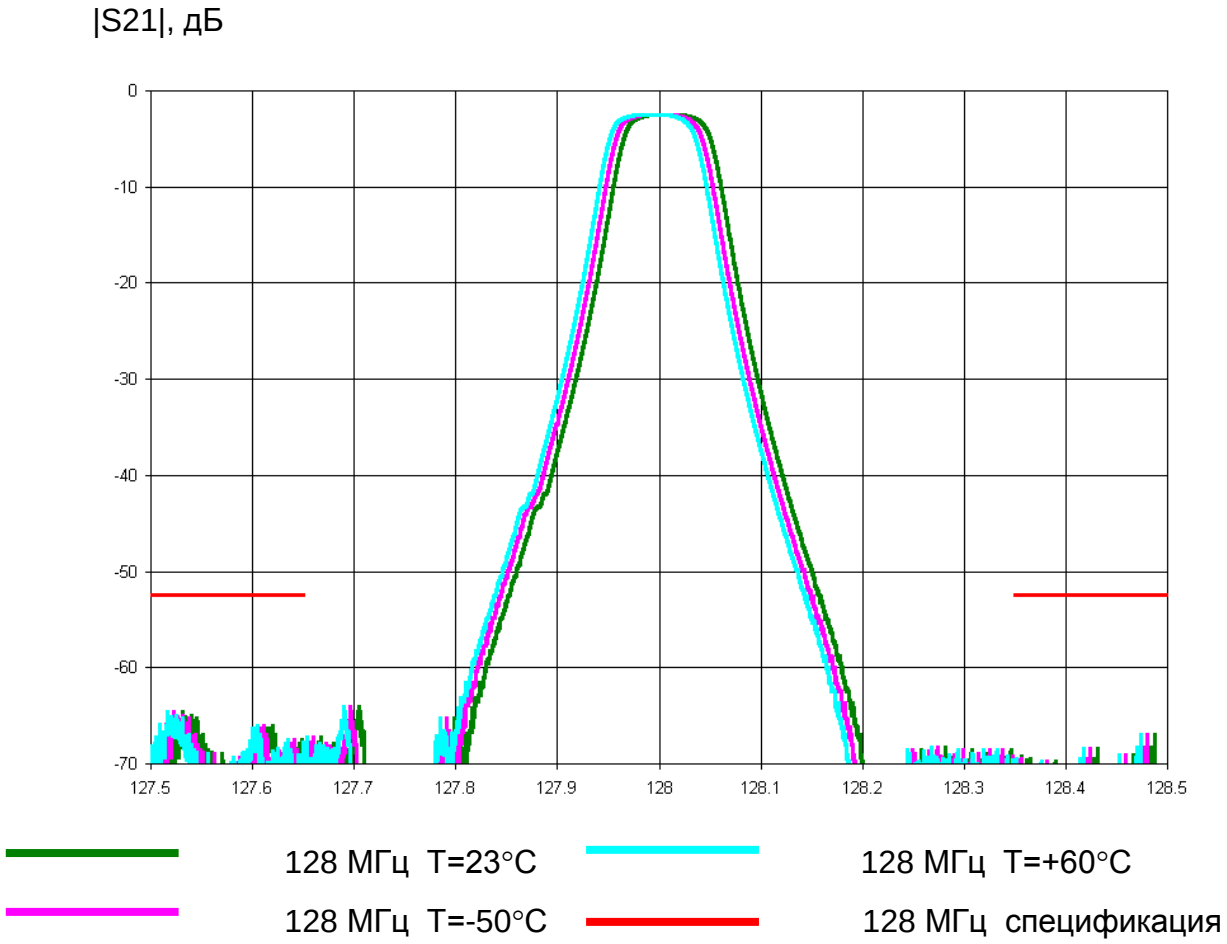
Рис.25. Рекомендуемая схема включения фильтра ФП-709 128В0,05 МГц в корпусе SMD 13,3х6,5х1,8мм

Смещение АЧХ фильтра ФП-709 128В0,05 МГц в диапазоне температур от -50 ^{0}С до +65 ^{0}С представлено на рис. 26.

|S21|, дБ



а



б

Рис.26. Смещение АЧХ фильтра ФП-709 128В0,05 МГц в диапазоне температур : а- в полосе пропускания , б- в интервале частот 127,5-128,5 МГц

2.5. Фильтр ФП-730 868,3В1,5 МГц на предельно высокую частоту 868 МГц

Однозвенный трех-резонаторный фильтр изготавливался уже по технологии “взрывной “фотолитографии на частоту 868,3 МГц , близкую к предельно возможной частоте 1000-1200 МГц, ограниченной потерями на распространение ПАВ в кварце , потерями в согласующих цепях и точностью настройки резонаторов Структура фильтра из . трех резонаторов с чисто акустической связью выбиралась исходя из требований реализации широекой полосы пропускания около BW3=0,1% , необходимой для передачи управляющих команд и и другой кодированной информации , например , в приемниках автомобильной сигнализации и считывателях систем радиочастотной идентификации.

На рис.2.27 представлена сборка однозвенного фильтра ФП-730 868,3В1,5 МГц с тремя акустически связанными резонаторами .

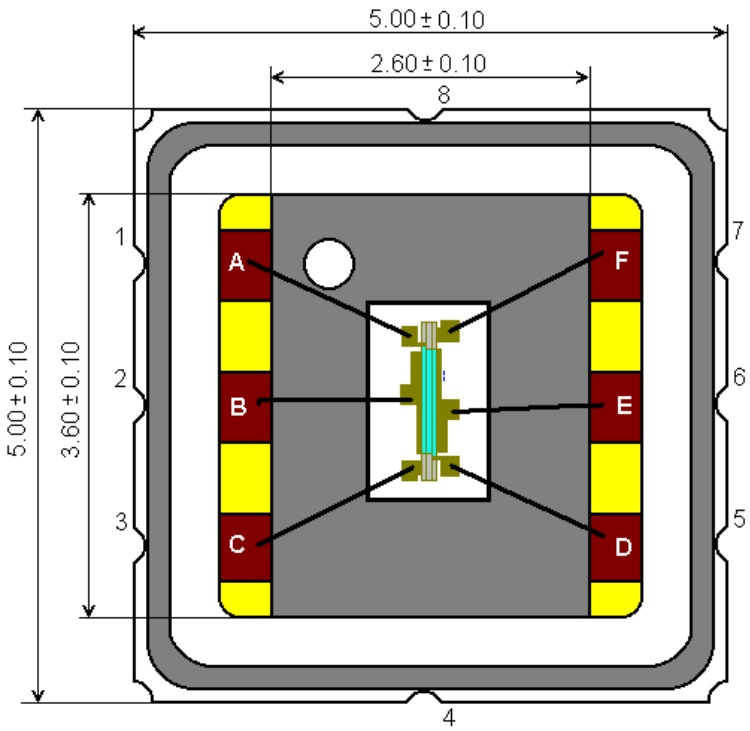
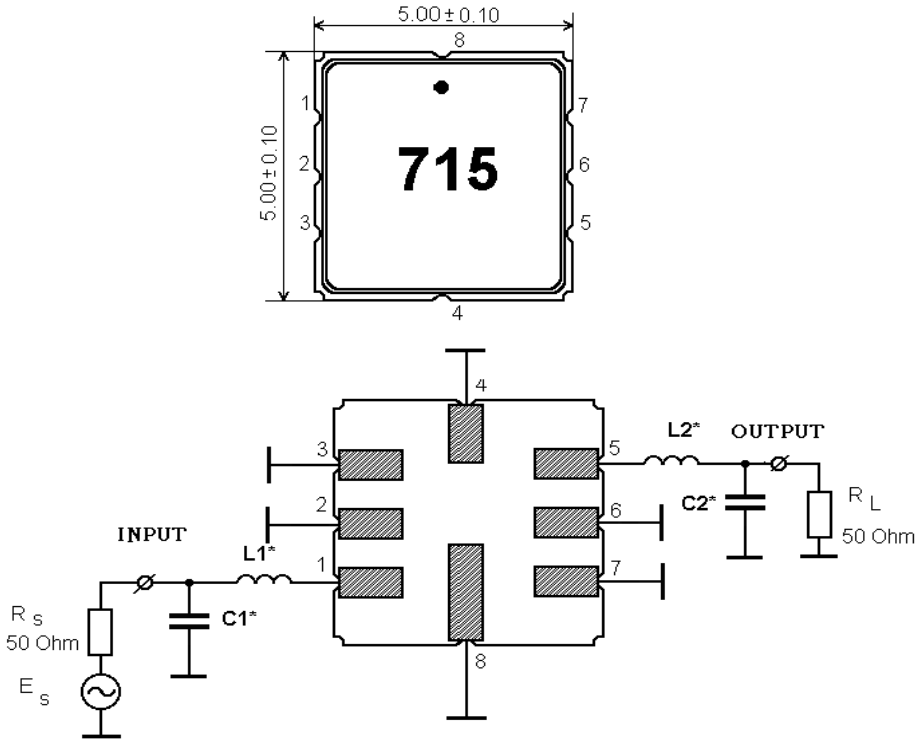


Рис. 2.27. Сборка фильтра 868 МГц в корпусе KD-V99902, KYOCERA, Япония.

Рекомендуемая схема включения фильтра ФП-730 868,3В1,5 МГц, версия v1 ,в корпусе KD-V99902, KYOCERA, Япония , приведена на рис.2.28, а его измеренные в согласованном режиме частотные характеристики представлены на рис. 2.29 .



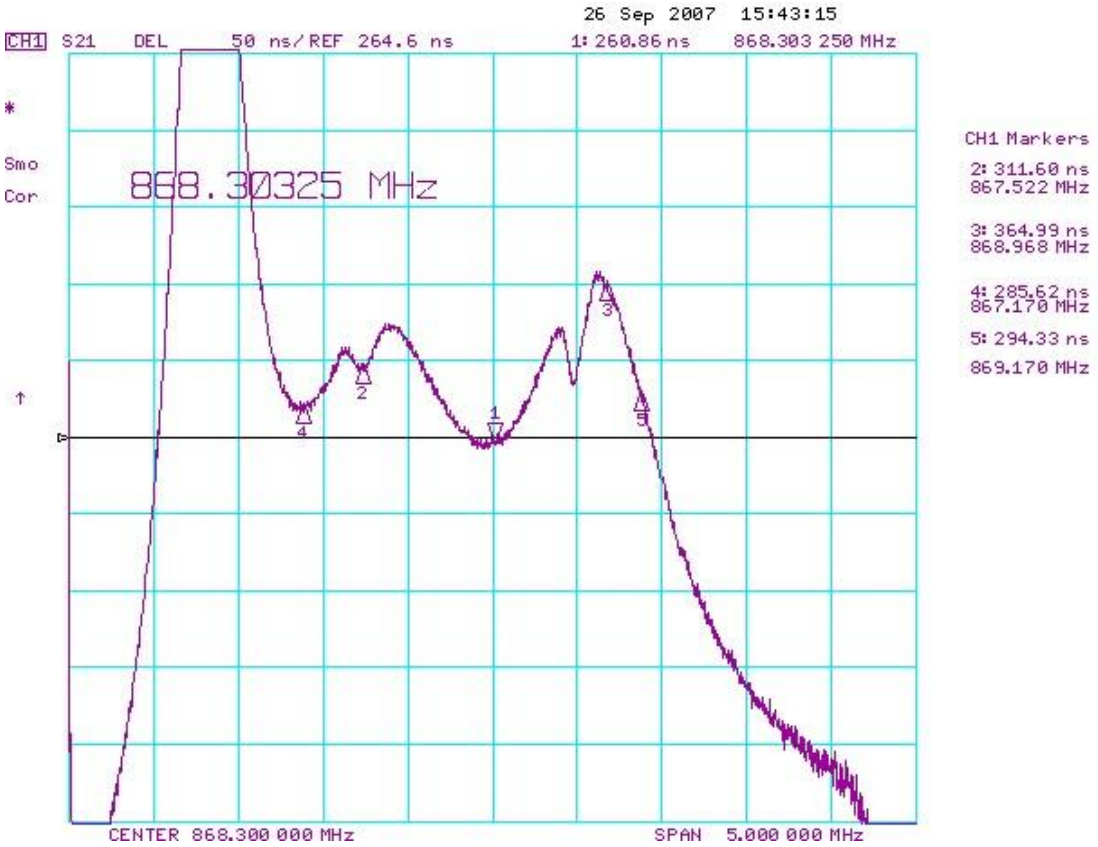
R_S= R_L= 50 Ohm. L1*=15 nH, Q=60 , C1*=3,3 pF ;L2*=15 nH, Q = 60, C2*=3,3 pF.

Рис.2.25. Рекомендуемая схема включения фильтра ФП-730 868,3В1,5 МГц

|S21|, дБ

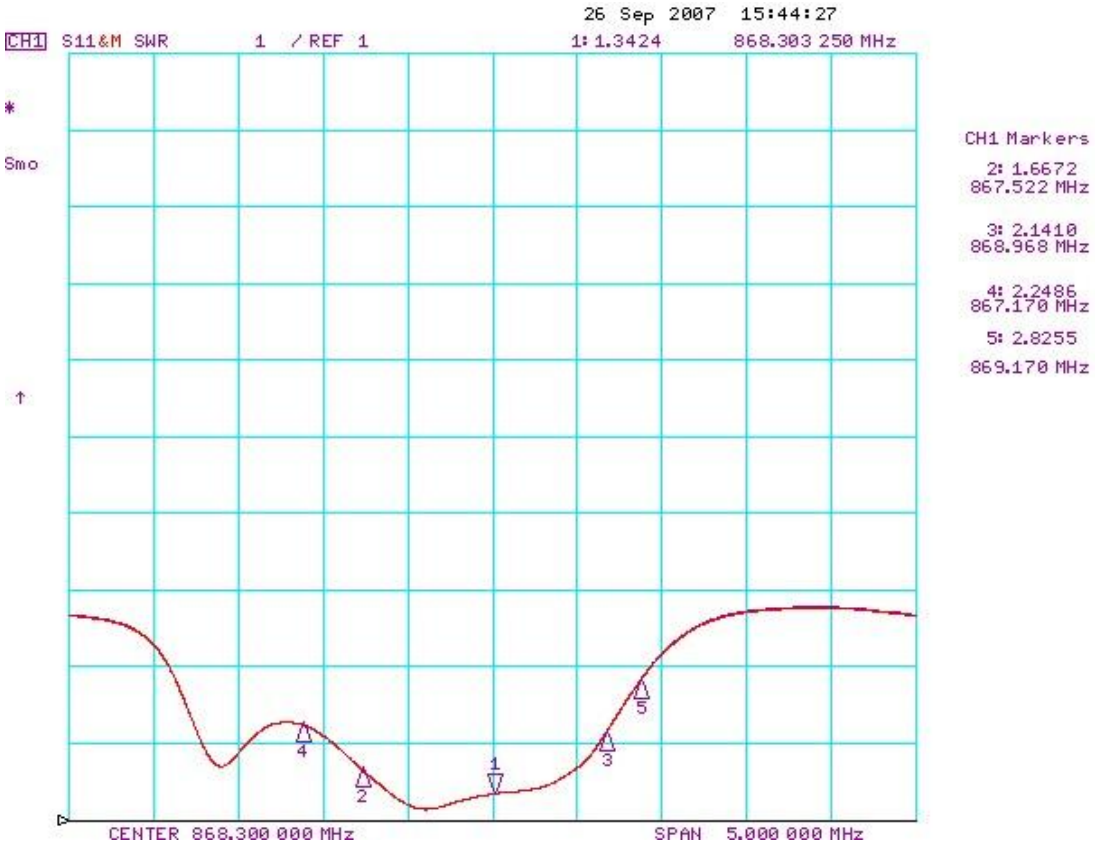
а

GDT, нсек



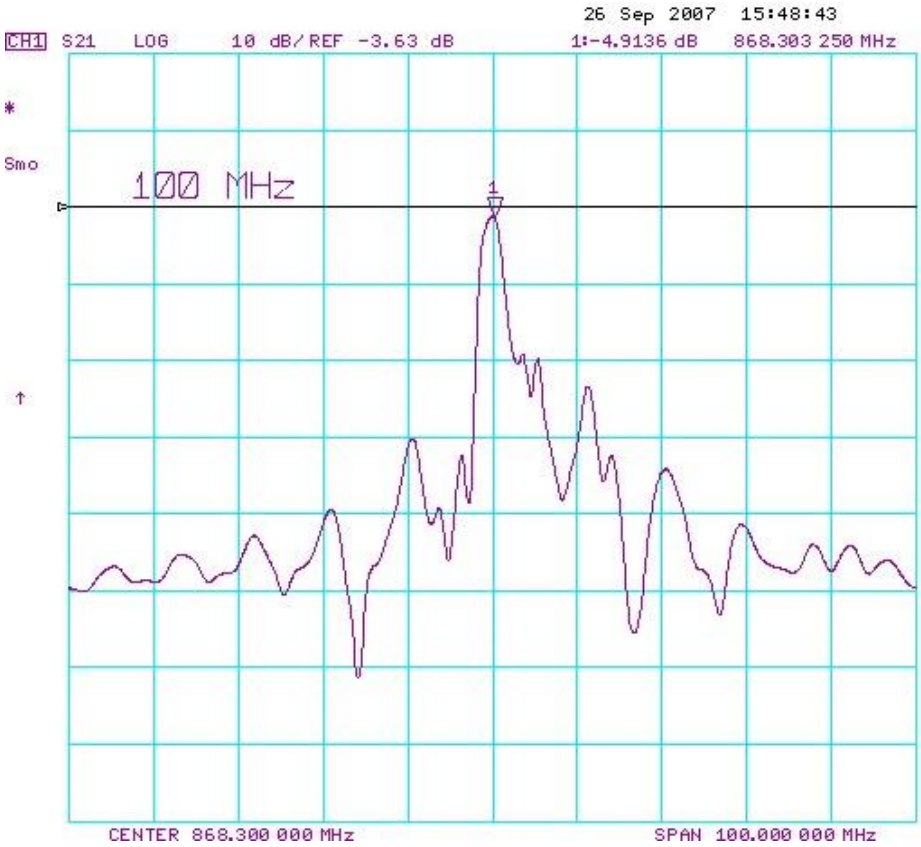
б

SWR


26 Sep 2007 15:44:27
CH1 S11&M SWR 1 / REF 1
1: 1.3424 868.303 250 MHz
Smo
CH1 Markers
2: 1.6672
867.522 MHz
3: 2.1410
868.968 MHz
4: 2.2486
867.170 MHz
5: 2.8255
869.170 MHz
CENTER 868.300 000 MHz
SPAN 5.000 000 MHz

в

|S21|, дБ


26 Sep 2007 15:48:43
CH1 S21 LOG 10 dB/ REF -3.63 dB
1:-4.9136 dB 868.303 250 MHz
Smo
100 MHz
CENTER 868.300 000 MHz
SPAN 100.000 000 MHz

г

Рис.2.26. Измеренные частотные характеристики фильтра ФП-730 868В1,5 МГц , версия v2:

а - |S21| в полосе пропускания (F_0 = 868,3 МГц; BW1 =1,5 МГц; BW3 =2,0 МГц; IL=3,6 дБ; AR = 0,4 дБ в полосе частот $F_0 \pm$ 0,4 МГц);

б - ГВЗ в полосе пропускания (GDV = 70 нсек в полосе $F_0 \pm$ 0,4 МГц);

в - КСВ в полосе пропускания (КСВ = на частоте 868,3 МГц);

г - |S21| в полосе частот 818 - 918 МГц

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА БАЗОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫХ РЕЗОНАТОРНЫХ ФИЛЬТРОВ СВЧ ДИАПАЗОНА НА КВАРЦЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

3.1. Технологические особенности изготовления узкополосных резонаторных фильтров на подложках монокристаллического кварца

Основным механизмом отражений ПАВ в решетках резонаторов на кварце является отражение от топографической неоднородности (канавки в поверхности подложки или металлического электрода на ее поверхности) . Для узкополосных резонаторных фильтров на ПАВ с отражательными решетками в виде сравнительно толстых (0,:6-1,5 мкм) алюминиевых электродов на поверхности пьезокварцевых подложек структуры формировались методом прямой литографии на частотах от 70-80 МГц до 500-550 МГц .

Достоинствами прямой литографии являются:

- возможность формирования структур фильтров с толстыми (до 1,5-2, 0 мкм) электродами преобразователей и отражателей , необходимых для построения резонаторов на кварце- слабом пьезоэлектрике ;

- меньшее количество операций по сравнению с “взрывной” фотолитографией за счет исключения плазмохимического процесса обработки поверхности пластин, напыления подслоя ванадия и его химического травления;

- повышенная адгезия проводящего слоя, поскольку нанесение алюминия с подслоем титана выполняется на первоначально химически очищенную поверхность.

При изготовлении маски использовался фоторезист марки "Shipley" бельгийского производства. Указанный фоторезист имеет хорошую адгезию к алюминию, исключающую проникновение травителей алюминия и титана под фоторезист, и обеспечивает высокую воспроизводимость процесса. Применение фоторезиста "Shipley" позволило уменьшить уход размеров при химическом изотропном травлении алюминия до 0,1-0,3 мкм на сторону при толщине алюминия $H \geq 0,3$ мкм. На отечественных фоторезистах коэффициент ухода размера составляет $k \approx 1,5$ к толщине алюминия.

Известно, что для более точного переноса размеров с фотошаблона на подложку необходимо использовать фоторезисты с минимальной толщиной. Фоторезист Shipley S1813 sp15 в семействе резистов S1800 является, наоборот, самым вязким и обеспечивающим самую большую толщину слоя фоторезиста около 1,3 мкм при скорости центрифуги 5500 об/мин. Данный фоторезист широко используется отечественными производителями микроэлектроники из-за его универсальности, стабильности и

возможности проводить проявление дешевым проявителем: слабыми растворами щелочей в воде (0,8-1,2% раствор гидроокиси калия). В случае массового производства можно использовать фоторезист Shipley S1805, но при этом проявление следует проводить только проявителем Microposit MF-319 той же фирмы. При скорости вращения шпинделя центрифуги 4000 об/мин фоторезист Shipley S1805 имеет толщину 0,5 мкм.

В случае массового производства узкополосных резонаторных фильтров необходим переход на проекционную фотолитографию. Обеспечить такой процесс могут, например, степперы ЭМ-5084А фирмы «Планар», Белоруссия, или Microstep-II, фирмы Perkin-Elmer, USA. Контактная же литография, имеющаяся в распоряжении исполнителей темы , дает существенно больший разброс коэффициента металлизации по подложке, чем проекционная, ведь только на шаблоне этот разброс составляет 15%. Далее этот разброс только увеличивается за счет неравномерности нанесения фоторезиста и химического травления. Ещё одним путем уменьшения разброса коэффициента металлизации мог бы стать переход на “сухое“(ионно-плазменное) травление.

Для фильтров с поперечной акустической связью резонаторов на кварце полоса пропускания составляет 0,01-0,28 % при типовой полосе пропускания 0,05 % . Отсюда следует , что обеспечение равномерности толщины металла по подложке не более 50-100 А и напыление заданной толщины 5000-15000 А с высокой точностью 50-100 А являются очень важными факторами. За рубежом для изготовления кварцевых резонаторов и кварцевых резонаторных фильтров на ПАВ разработано специальное технологическое оборудование , например , электронно-лучевые установки фирмы BALZERS , Швейцария. Высокая проводимость напыляемого алюминия и его хорошая адгезия к кварцу обеспечивается в них за счет использования криогенных насосов , позволяющих достигнуть вакуума до $1x10^{-9}$ мм. рт. ст. Равномерность толщины наносимой пленки улучшена за счет увеличения расстояния между испарителем и подложкой (около 1,2 м) , а также за счет вращения карусели с подожками . Обязательным условием является использование кварцевого датчика для контроля толщины напыляемой пленки с точностью 20-30А.

В виду отсутствия подобного оборудования, в рамках темы в 2000-2002 г.г. разработан технологический процесс для мелкосерийного изготовления кварцевых фильтров , включающий напыление толстых алюминиевых пленок 5000-15000 А на магнетронной установке PUMA-500 , Франция , с последующей подстройкой частоты фильтров на установке плазмо-химического травления XPL-26 , Австрия.

При массовом производстве низкочастотных (80-200 МГц) или широполосных (0,1-0,2%) кварцевых фильтров возможно использовать другое оборудование, обеспечивающее большую равномерность напыления слоев, например, установки электронно-лучевого напыления УВНРЭ.Э-045-004, “Оратория-9“ («Меш-плюс» Зеленоград, Россия) и A1100 (Leybold, Германия) или установки магнетронного напыления “Оратория-29“ (ОАО “НИИТМ“ Зеленоград, Россия) и “Каролина Д12Б“ (ООО “Вакуум-эста“, Зеленоград, Россия), которые имеют неравномерность пленки 1-3% на пластине диаметром 100 мм, тогда как у PUMA-500 (выпуск 1986 года) этот показатель составляет 10-15 % на пластине диаметром 76 мм. Все вышеозначенные установки напыления позволяют также проводить напыление заданной толщины металла со сравнительно высокой точностью.

Ещё одним важным фактором успешного производства узкополосных резонаторных фильтров является высокоточный контроль коэффициента металлизации при фотолитографии. При этом требуется достоверный замер до третьего знака после запятой. Управление коэффициентом металлизации позволяет получать требуемую частоту резонаторов фильтра с достаточной точностью. При массовом производстве фильтров участок фотолитографии необходимо будет оснастить металлографическим микроскопом, имеющим возможность работы, как на просвет, так и на отражение, и увеличение не хуже ×2000. Таковыми являются, например, Leica DM 4000M, Германия, и Olympus BX61, Япония.

Существенную помощь в производстве узкополосных резонаторных фильтров на кварце оказывает зондовое устройство для контроля частоты резонаторов и фильтров на подложках, например , разработанное и используемое исполнителями темы. На данном устройстве проводился 100 % контроль основных параметров структур фильтров на подложке после фотолитографии , а также пьезоэлементов (чипов со структурами фильтров) после резки подложки , который позволил существенно снизить трудоемкость процесса . Очевидно, что и при массовом производстве фильтров необходим будет подобный контроль.

Еще одной особенностью технологии изготовления узкополосных резонаторных фильтров является **применение стабилизационного отжига чипов** на воздухе при температуре 300-320°С в течение 2-3 часов. В результате данной обработки происходит снятие механических напряжений после резки и рифления, выгорают остаточные органические загрязнения.

Увеличить процент выхода годных акустоэлементов позволила также **подгонка частоты**. Данная процедура заключается в плазмо-химическом травлении кварца на 100-

300 А° в смеси аргона и хладона-14, что позволяет уменьшить частоту на 100-200 кГц и перевести пьезоэлементы с повышенной начальной частотой в разряд годных.

Отметим также особую важность соблюдения технологических требований к чистоте сборочных помещений, условий и сроков хранения акустоэлементов до герметизации фильтра, чистоте корпусов и крышек. Сборочные операции узкополосных резонаторных фильтров на кварце до герметизации включительно должны быть проведены в максимально сжатые сроки. Несоблюдение межоперационных сроков или условий хранения фильтров приводит к уходу частоты и резкому снижению процента выхода годных изделий.

3.2. Основные этапы изготовления СВЧ кварцевых фильтров на ПАВ методом прямой фотолитографии

3.2.1. Схема маршрута прямой фотолитографии

Схема маршрута прямой фотолитографии состоит из следующих операций:

- химическая отмывка подложек;
- напыление алюминия с подслоем титана;
- нанесение фоторезиста;
- подсушка фоторезиста;
- экспонирование слоя фоторезиста;
- проявление фоторезиста;
- дубление фоторезиста;
- последовательное химическое травление алюминия и титана;
- удаление фоторезиста;
- контроль фотолитографии и напыления;
- контроль частоты;
- резка;
- стабилизационный отжиг;
- контроль частоты;
- подгонка частоты;
- сборка пьезоэлементов в корпус;
- герметизация;
- контроль электрических параметров;
- маркировка;
- испытания фильтров.

3.2.2. Химическая отмывка подложек

Из кварцевых подложек формировалась партия. Для удаления жировых загрязнений и крупных механических частиц подложки (пластины) протирались батистом, смоченным этиловым спиртом, затем они помещались во фторопластовую кассету и проводилась обработка в серно-хромовой смеси. Состав смеси: 50 мл воды, 25 г бихромата калия $K_2Cr_2O_7$, 500мл серной кислоты H_2SO_4.. Смесь можно использовать многократно, до появления зеленого оттенка. При данной обработке происходит окисление и растворение большинства органических загрязнений и удаление следов металлов. Подложки в смеси нагреваются до температуры 70°С, выдерживаются при этой температуре 10 минут. Последующая промывка дистиллированной водой проводится последовательно в 3 стаканах при температуре 35-40°С в течение 5-10 секунд в каждом.

Для удаления механических загрязнений далее проводится гидромеханическая обработка подложек в течение 0,5-2,0 минут и сушка пластин.

Контроль качества отмывки осуществлялся под микроскопом ММУ-3 при увеличении ×80÷476. Межоперационный срок хранения до следующей операции не должен превышать 30 минут.

3.2.3. Напыление титана-алюминия

На отмытые пластины наносили алюминий с подслоем титана на установке "PUMA-500" магнетронным методом. Толщина подслоя титана составляла Н=80÷100 ангстрем. При этом толщина алюминия зависит от типа рабочей частоты фильтра на ПАВ. Режимы нанесения металлов следующие. **Для титана**: давление аргона в камере – 2,0 Па, мощность разряда - 450 Вт; время напыления – 5 мин. **Для алюминия**: напряжение разряда – 380-420 В, ток разряда - 3,8-4,0 А, давление аргона в камере - 0,7 Па, время осаждения алюминия при указанном режиме составляет 3-8 минут.

3.2.4. Формирование маски фоторезиста

Далее на пластины на установке HBS-80 нанесения фоторезиста наносится центрифугированием фоторезист марки Shipley S1813 sp15, Бельгия, толщиной 1,3-мкм. Нанесение фоторезиста проводится в 2 стадии: на первой стадии при скорости вращения шпинделя центрифуги 1000-1500 об/мин резист распределяется по подложке; вторая же стадия при скорости вращения шпинделя 5500 об/мин обеспечивает требуемую толщину

фоторезиста. Повышение скорости вращения шпинделя выше 5500 об/мин нецелесообразно, т.к. фирма-производитель гарантирует равномерное нанесение фоторезиста по поверхности подложки в интервале скоростей 3500-5500 об/мин.

Сушку фоторезиста проводили при температуре T=85-90°C в течение 10 мин в сушильном электрошкафу СНОЛ-3,5/3,5-И1.

Экспонировали фоторезист на установке ЭМ-5006А **в жестком ультрафиолете** λ=240 nm лампой ДРКС-500 при мощности засветки W=400-420 Вт и времени экспонирования τ=30÷50сек.

Проявление выполняли в стандартном проявителе 0,8-1,0 % раствор гидроокиси калия в воде в течение τ= 2÷30 сек. При проявлении очень важно контролировать температуру и величину pH проявителя. При изменении величины pH всего лишь на одну десятую долю размер элемента меняется примерно на 10% от номинала.

Контроль качества проявления проводился под микроскопом ММУ-3 при увеличении не менее ×80.

Дубление фоторезиста проводили при температуре T=115-120°C в течение 20 мин в сушильном электрошкафу СНОЛ-3,5/3,5-И1.

3.2.5. Химическое травление алюминия и титана

Травление алюминия проводится при температуре 40-55°C в травителе состава:

- 1% раствор синтанола ДС-10 в воде - 300 мл ;
- ортофосфорная кислота - 400 мл ;
- азотная кислота - 200 мл .

Входящий в состав травителя синтанол является поверхостно-активным веществом, обеспечивает идеальную смачиваемость поверхности металла во время травления, исключает появление «закороток» из-за газовыделения во время химической реакции. Время травления составляет от 0,5 до нескольких минут, зависит от толщины алюминия, температуры и степени выработки травителя.

Далее подложки промываются в трех стаканах с дистиллированной водой при температуре 20-35°C. Контроль полноты удаления алюминия проводится визуально под микроскопом ММУ-3 при увеличении не менее ×80.

Примечание: Травитель используется многократно.

Травление титана проходит при комнатной температуре в травителе состава:

- 40 % раствор фторида аммония - 50 мл ;
- азотная кислота - 450 мл .

Время травления 1-3 секунды. Затем подложки промываются последовательно в трех стаканах с дистиллированной водой комнатной температуры.

Примечание: Травитель используется многократно, превышение указанного срока травления не допускается.

Удаляли фоторезист в диметилформамиде после завершения химического травления и контроля травления, при необходимости подогревая его до температуры 80-100°С. Далее подложки промывались дистиллированной водой при температуре 20-35°С.

3.2.6. Контроль топологии и толщины металлизации

Контроль фотолитографии и напыления состоит из следующих операций:

1.Контроль внешнего вида проводится под микроскопом "Биолам-М" с увеличением не менее ×63. Минимальные геометрические размеры и коэффициент металлизации определялись при помощи микрометра окулярного винтового МОВ-1-16× .

2. Толщину нанесенного слоя измеряли на профилографе-профилометре Dektak-3030,Франция , с разрешаюшей способностью 10 А. Для максимальной точности производят позиционирование образца с точностью ±0,01°. Погрешность измерения составляет ±5%.

3.2.7. Контроль частоты фильтров на подложках

Далее проводился первичный контроль частоты на подложках в зондах. Те пластины, на которых частота соответствовала норме или была выше на 100-200 кГц, отправлялись на резку, в противном случае – на регенерацию.

3.2.8. Резка подложек на пьезоэлементы

Перед резкой подложек на чипы для защиты поверхности структуры фильтра от царапин подложки закрываются слоем фоторезиста Shipley S1813 sp15. Нанесение проводится на установке HBS-80 центрифугированием при скорости вращения шпинделя 1000-1500 об/мин.

Сушка фоторезиста проводится при температуре Т=85-90°С в течение 10-30 мин в сушильном электрошкафу СНОЛ-3,5/3,5-И1, Россия. Выгрузка подложек из шкафа осуществляется после остывания шкафа до 40-50°С.

Технологический процесс резки подложек всех материалов, использующихся при производстве фильтров на ПАВ (кварц, танталат лития, ниобат лития, лангасит), может

быть проведен на любом оборудовании, предназначенном для резки диэлектрических или полупроводниковых подложек микросхем на кристаллы и обеспечивающем основные параметры процесса (например, на установках типа 04ПП 100 или ЭМ-215 и пр.) , обеспечивающих :

- размер подложки до 100 мм;
- скорость подачи (стола, каретки и т.д.) 1-2 мм/сек;
- скорость вращения вала 20—50 тыс. об/минуту;
- шаг реза 0,01 мм;
- глубина реза 0,005 мм –1 мм.

Особенности технологии резки определяются конкретным имеющимся в наличии и используемым оборудованием.

В настоящем технологическом процессе использовалась установка типа DAD-2H/6T фирмы Disco Corp., Япония, с алмазным диском, имеющем внешнюю режущую кромку. При необходимости повышения производительности установка DAD-2H/6T позволяет использовать несколько режущих дисков.

Технология резки включает в себя закрепление подложки на вакуумном столе установки с помощью ленты-спутника типа ЛС АЗ шириной 220 мм и адгезионной прочностью 30—60 гс/см, совмещение реперов для резки с помощью микроскопа , оснащенным телемонитором, задания параметров резки и осуществление данного процесса.

Параметры резки выбираются исходя из толщины подложки, толщины напыленных слоев, размеров кристаллов. Поскольку размеры пьезоэлементов СВЧ фильтров достаточно малы, подложки режутся насквозь. Скорость вращения шпинделя при этом составляет 20000 об/мин, линейная скорость резки 1-1,5 мм/сек при использовании алмазных дисков АС 56х40х0,1 с дисперсностью 50/40.

Во время резки и рифления на режущий диск и подложку подается под напором охлаждающая вода с температурой 15± 5 C^{O}.

Критериями для выбора параметров резки являются отсутствие скола (или минимальный скол) у реза и максимальная производительность. Существенным фактором для корректировки параметров резки является остаточные механические напряжения пластин.

3.2.9. Отмывка пьезоэлементов после резки

После резки подложки пьезоэлементы снимаются с ленты-спутника и с обратной

стороны пьезоэлементов удаляются остатки ленты-спутника. Затем пьезоэлементы партией обрабатываются последовательно в двух стаканах с диметилформамидом, подогретым до температуры 30-35°С в течение 5-10сек. Поскольку не используется дубление защитного фоторезиста, этой температуры достаточно для качественного его удаления после резки. Далее партия пьезоэлементов обрабатывается последовательно в двух стаканах с ацетоном при комнатной температуре в течение 5-10 сек. После извлечения пьезоэлементы при необходимости досушиваются струей чистого сжатого воздуха.

3.2.10. Стабилизационный отжиг чипов

После резки подложек на кристаллы и химической отмывки кристаллов с целью стабилизации частоты проводился отжиг кристаллов в муфельной печи при температуре 300-320°С в течение 2 часов на воздухе. Выгрузка осуществлялась после остывания печи до 50°С.

3.2.11. Подстройка частоты резонаторов

Далее проводилась разбраковка кристаллов по частоте на 3 группы: годные; брак; частота выше нормы на 100-200 кГц.

Кристаллы последней группы подвергалась подгонке частоты на установке XPL-26, Австрия . Кварц в промежутках между электродами травился плазмохимическим способом в смеси аргона и хладона-14 в соотношении 7:3 при давлении 18-22 Па при мощности разряда 500 Вт в течение1-2 мин. При этом на поверхности подложки образовывались канавки , увеличивающие расстояние пробега ПАВ . В результате частота резонаторов фильтра понижалась .Опытным путем было установлено, что проводить подгонку при больших отклонениях частоты нецелесообразно из-за ухудшения характеристик фильтров. Подгонка проводилась не более двух раз на одной партии.

3.2.12. Приклейка пьезоэлементов в корпус

Перед приклейкой пьезоэлементов корпуса отмываются от возможных жировых загрязнений и отжигаются для удаления влаги из пор керамики. При установке пьезоэлементов в планарные метало-керамические корпуса SMD используется однокомпонентный кремний-органический клей-герметик «Эластосил-137-83», отвержение которого на воздухе при комнатной температуре происходит за 24 часа, а полная поликонденсация - за 72 часа. Поэтому герметизация корпусов выполняется не

ранее, чем через 72 часа после приклейки пьезоэлементов. Выбор клея обусловлен его эластичностью, термостойкостью, хорошей адгезией и удобством в работе. Работа с указанным клеем требует определенной аккуратности, так как попадание клея на поверхность алюминиевой пленки может приводить к разрушению последней за счет наличия реакционно-способных групп (- COOH, - NH_2, - OH) в неотвержденном клее.

3.2.13. Сварка проволочных выводов

В качестве выводов СВЧ фильтров на ПАВ используется отожженная золотая проволока диаметром 25 мкм. Сварка проволочных выводов производится на установке для ультразвуковой микросварки фирмы WEST BOND, мод. 7700 , США, с рабочей частотой магнитостриктора 40 кГц в штатном режиме работы установки с подогревом стола и инструмента до температуры 90…120 ^{0}C. После приклейки изделия выдерживаются не менее 72 часов для завершения процесса поликонденсации силиконового клея «Эластосил», а затем еще раз отжигаются при температуре 240 ^{0}C и не позднее 30 минут после этого герметизируются роликовой сваркой. Ещё один отжиг необходим для удаления летучих фракций из клея «Эластосил» и адсорбированной влаги с поверхности фильтра.

3.2.14. Герметизация планарных керамических корпусов

Герметизация СВЧ фильтров на ПАВ в SMD корпусах может осуществляться с помощью установок роликовой сварки типа ПГРС—1М или ОЗКС 700, г. Киев, разработанных в начале 80-х годов и предназначенных для герметизации корпусов интегральных схем типа “Тропа “ или “Трапеция”. Из доступных зарубежных аналогов могут быть использованы в лабораторных условиях установки HPS 9000 фирмы Pyramid Engiring Serviicos и Venus 3 фирмы Polams El. Corp. В основе работы этих установок заложен принцип шовной контактной сварки перекрывающимися сварными точками с прерывистым протеканием сварочного тока.

Герметизация фильтров в SMD корпусах в рамках темы проводилась на установке ОЗКС 700-2 с адаптацией ее для герметизации мелких серий различных типоразмеров SMD корпусов. Процесс включает в себя совмещение и фиксацию корпуса с установленным пьезоэлементом и крышки, осуществление сварки двух коротких сторон корпуса и крышки, визуальный контроль качества и последующую сварку двух длинных сторон корпуса и крышки.

Фиксация крышки корпуса, как правило, осуществляется хомутом на оснастке с гнездами под размер корпуса. Далее данное приспособление размещается на транспортере установки. При подборе режимов сварки в зависимости от типоразмера корпуса регулируется длительность сварки, длительность задержки, угол включения и компенсация (см. технологическую карту ТТП ИХО 054.025).

Критерием оптимально подобранных параметров режима сварки является визуальное качество сварного шва (ровный, гладкий, без выплесков металла) и степень герметичности.

Контроль герметичности корпуса осуществляют вакуумно-жидкостным способом на установке собственного изготовления . Фильтр в корпусе размещается в прозрачном стакане с изопропиловым спиртом, накрывается колпаком. Далее производится откачка до давления 10^{-1} мм. рт.ст., а по выделению пузырьков воздуха из корпуса фильтра судят о степени герметичности прибора. Время выдержки под вакуумом составляет 1÷3 минуты. Данный способ обеспечивает контроль степени герметичности 2-3 $\times 10^{-3}$л×мм.рт.ст./сек.

3.2.15. Контроль электрических параметров фильтров

Измерения электрических параметров фильтров проводятся на контрольно-измерительном стенде на базе анализатора электрических цепей типа HP 8753E, Agilent, США. Контроль параметров узкополосных фильтров проводится три раза : контроль средней частоты в зондовом устройстве на подложках и на чипах после резки ; контроль параметров фильтров в корпусах в несогласованном режиме после герметизации , выходной контроль параметров фильтров в соответствии с ТУ на приемо-сдаточных испытаниях . Для измерений параметров фильтров в корпусах используется специальное контактное устройство. Методики измерений параметров описаны в технических условиях МТО. 460810.010 ТУ .

3.2.16. Маркировка фильтров

Все изделия маркируются в соответствии с требованиями конструкторской документации. Маркировка выполняется краской ТПНФ-01 методом трафаретной печати или от руки (при мелких партиях). Сушка краски производится в термостате при температуре 120°С в течении 2 часов. Затем крышка корпуса покрывается двумя слоями лака УР-231 и производится сушка лака при температуре 120°С в течении 4 часов. Для исключения влияния пироэлектрического эффекта следует обеспечить скорость нагрева

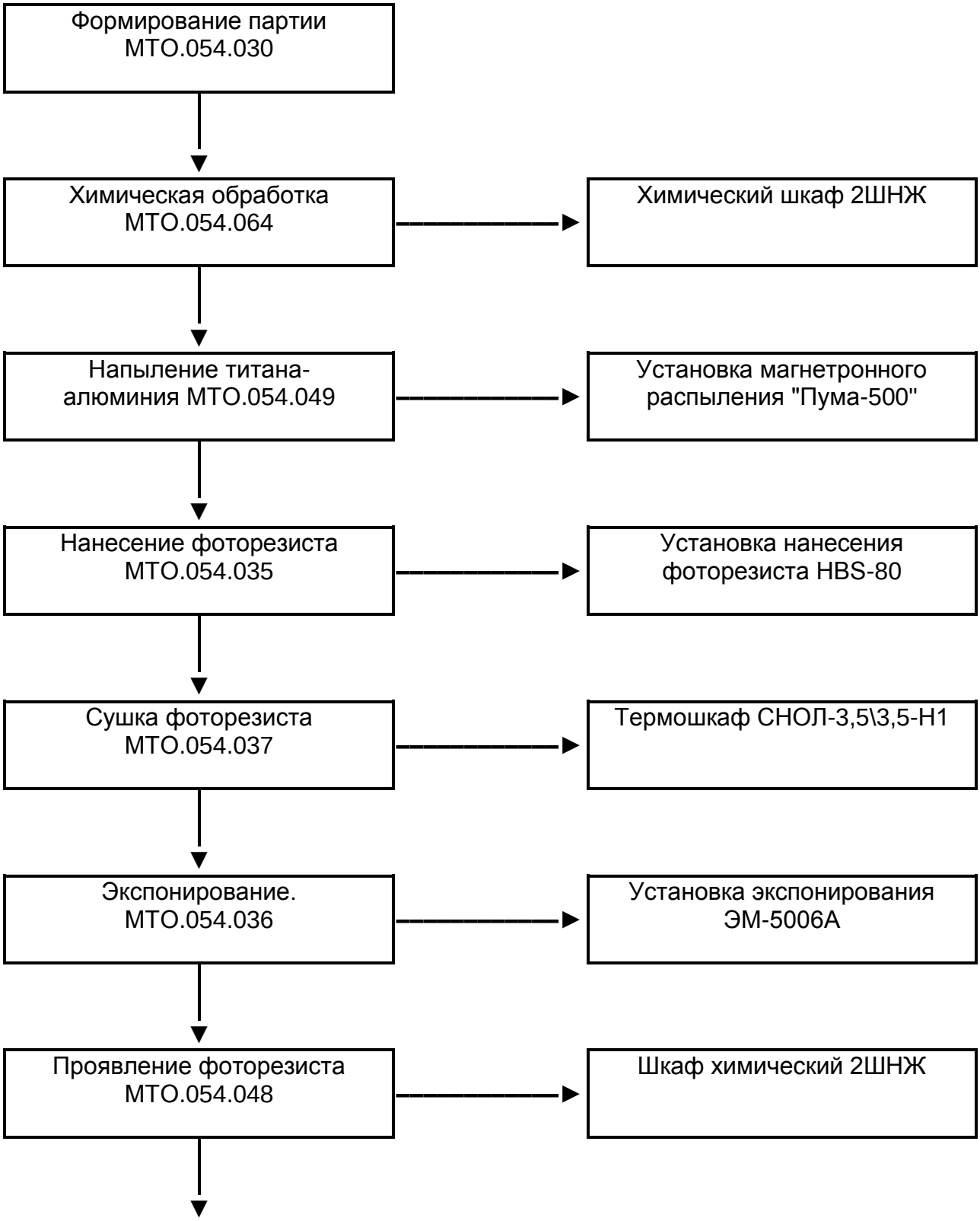
и охлаждения изделий в термостате не выше 20^0 С в минуту. Такой режим сушки обеспечивает стойкость маркировки в отмывочных жидкостях после монтажа фильтров на печатную плату.

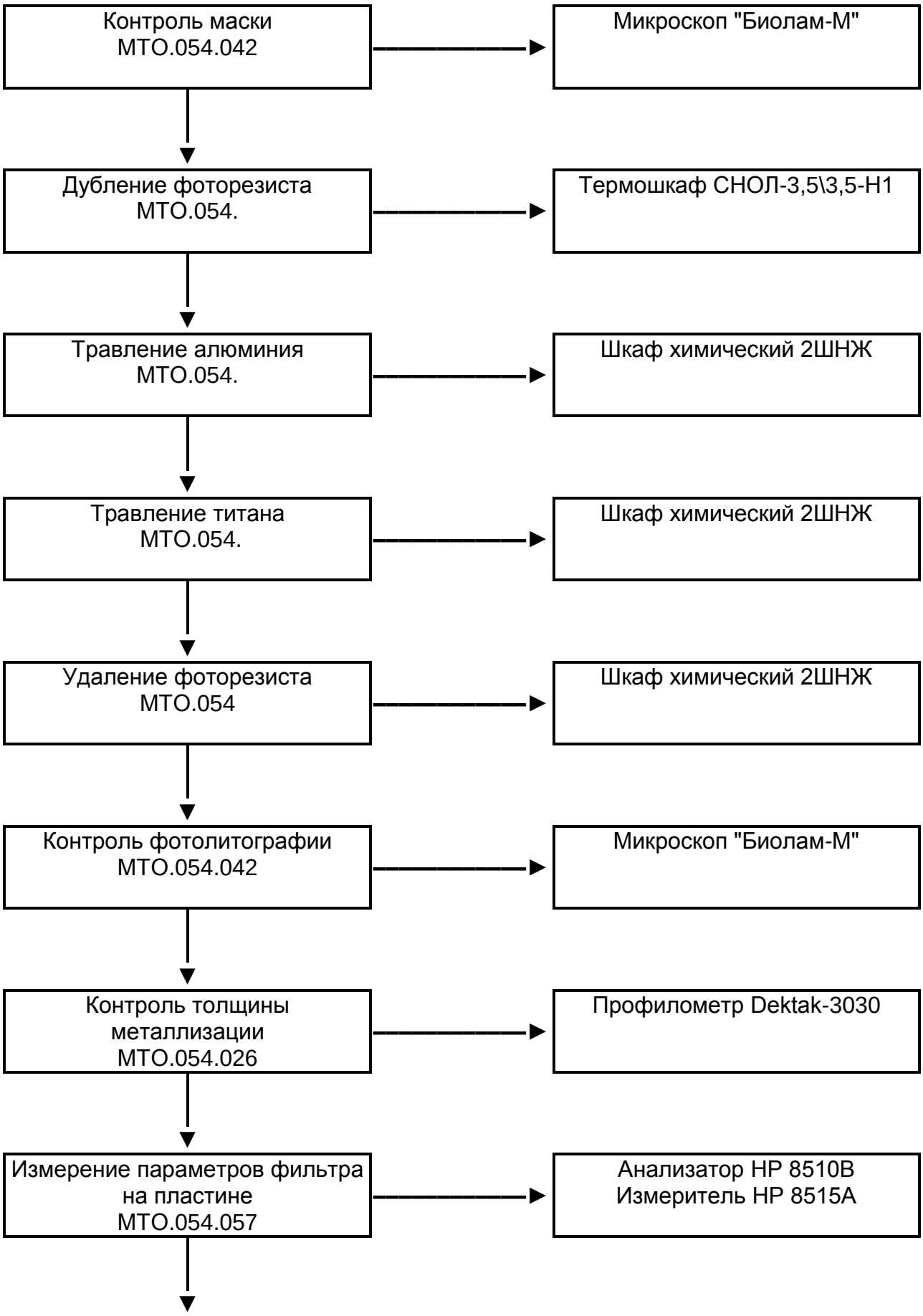
Контроль внешнего вида изделий выполняется визуально в соответствии с требованиями КД.

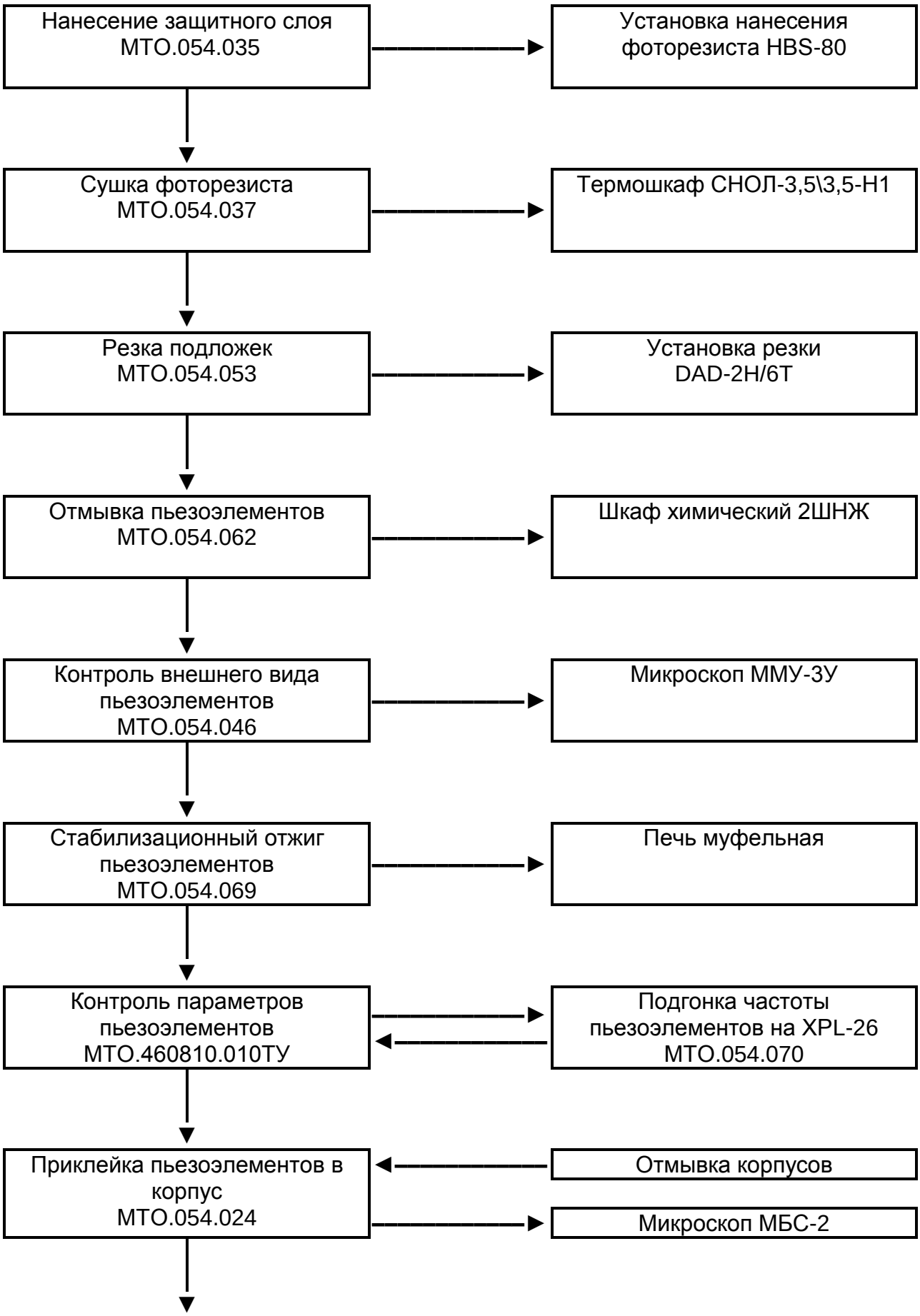
3.2.17. Полная схема маршрута изготовления СВЧ фильтров на ПАВ по методу «прямой» фотолитографии

Полная схема маршрута изготовления кварцевых СВЧ фильтров на ПАВ по методу «прямой» фотолитографии приведена на рис. 3.1.

Маршрутутная схема базового технологического процесса изготовления сверхузгополосных кварцевых фильтров методом прямой фотолитографии




Контроль маски
МТО.054.042
Микроскоп "Биолам-М"
Дубление фоторезиста
МТО.054.
Термошкаф СНОЛ-3,5\3,5-Н1
Травление алюминия
МТО.054.
Шкаф химический 2ШНЖ
Травление титана
МТО.054.
Шкаф химический 2ШНЖ
Удаление фоторезиста
МТО.054
Шкаф химический 2ШНЖ
Контроль фотолитографии
МТО.054.042
Микроскоп "Биолам-М"
Контроль толщины
металлизации
МТО.054.026
Профилометр Dektak-3030
Измерение параметров фильтра
на пластине
МТО.054.057
Анализатор HP 8510B
Измеритель HP 8515A


Нанесение защитного слоя МТО.054.035
Установка нанесения фоторезиста HBS-80
Сушка фоторезиста МТО.054.037
Термошкаф СНОЛ-3,5\3,5-Н1
Резка подложек МТО.054.053
Установка резки DAD-2H/6T
Отмывка пьезоэлементов МТО.054.062
Шкаф химический 2ШНЖ
Контроль внешнего вида пьезоэлементов МТО.054.046
Микроскоп ММУ-3У
Стабилизационный отжиг пьезоэлементов МТО.054.069
Печь муфельная
Контроль параметров пьезоэлементов МТО.460810.010ТУ
Подгонка частоты пьезоэлементов на XPL-26 МТО.054.070
Приклейка пьезоэлементов в корпус МТО.054.024
Отмывка корпусов
Микроскоп МБС-2

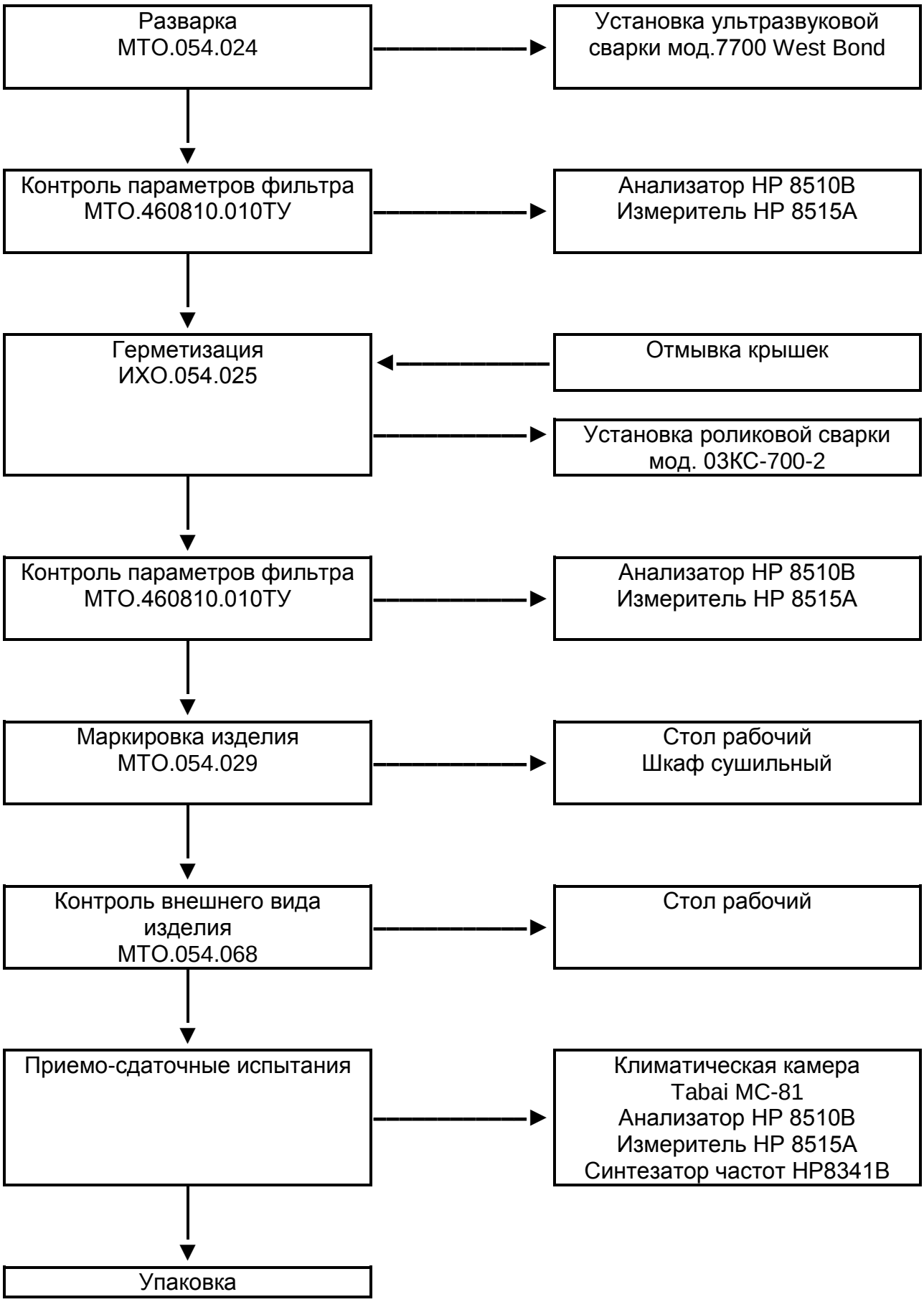


Рис. 3.1. Полная схема маршрута изготовления кварцевых СВЧ фильтров на ПАВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В течение 2000-2005 г.г. создано более 20 типов сверхузкополосных фильтров на основе резонаторов с поперечной акустической связью (ПСРФ) на подложках монокристаллов квара и тетрабората лития. В таблицах 3 , 4 и 5 приведены основные параметры фильтров на кварцевых подложках для различных применений. Фильтрам на тетраборате лития будет посвящен отдельный отчет.

Таблица 3

Основные электрические параметры ПСРФ на частоты от 85.3 МГц до 868,3 МГц. Полосы пропускания от 49.6 кГц до 1500 кГц. Вносимые потери IL=3.1-5.8 дБ.

Применение: Тракты промежуточных частот радиотелефонов стандартов GSM, AMPS, PHS и тракты несущих частот систем сигнализации (RCS)

Параметр	**Еди-ницы**	**Код фильтра / Типовые параметры**									
		FP-728	**FP-729**	**FP-727**	**FP-704**	**FP-705**	**FP-715**	**FP-717**	**FP-706**	**FP-708**	**FP-715**
Центральная частота, Fo	MHz	85.38	133.2	226.4	243.9	248.5	315	360	400	433.9	868.3
Вносимые потери, IL	dB	3.6	5.8	5.8	2.8	3.1	3.7	4.3	4.7	3.1	4.7
Полоса пропускания BW	kHz	49.6	71	200	384	368	891	264	302	688	780
Уровень полосы BW	dB	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.7
Пульсации амплитуды	dB	0.1	0.2	0.3	1.1	0.7	0.2	0.1	0.5	0.2	0.5
Пульсации ГВЗ	μs	2.5	3.5	1.5	0.48	0.42	0.22	1.2	0.6	0.8	-
Гарантированное затухание	dB	70	65	50	55	58	40	60	57	0	40
Коэффициент прямоугольности (40/3 дБ)	-	3.1	3.1	2.9	3.1	3.2	-	2.8	2.8		3.8
Сопротивление генератора	Ohm	$50 + L_1C_1$						$50+L_1$	$50 + L_1C_1$		
Сопротивление нагрузки	Ohm	$50 + L_2C_2$						$50+L_2$	$50 + L_2C_2$		
Температурный коэффициент частоты	ppm/^{0}C^2	0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	- 0.04	- 0.04	-0.04	-0.04
Размер корпуса SMD	mm	9.1x 7.1x 1.6	9.0 x 4.8 x 1.8	5.0 x 5.0 x x 1.4	3.8 x 3.8 x 1.4	3.8 x 3.8 x 1.4	5.0 x 5.0 x 1.4	5.0 x 5.0 x 1.4	5.0x 5.0x 1.4	5.0 x 5.0 x 1.4	3.8 x 3.8 x 1.4
Стандарт связи		AMPS	GSM	GSM	PHS	PHS	RCS	GSM	GSM	RCS	RCS
Материал подложки		Кварц , срез yxl/33°18′									

Таблица 4

Основные электрические параметры ПСРФ на частоты от от 130.0 МГц до 402.2 МГц. Полосы пропускания от 78 кГц до 568 кГц. Вносимые потери IL=3.9-11.0 дБ.

Применение: Тракты промежуточных частот радиоприемников.

Параметр	**Еди-ницы**	**Код фильтра / Типовые параметры**					
		FP-701	**FP-702**	**FP-703**	**FP-520**	**FP-718**	**FP-707**
Центральная частота, Fo	MHz	130	130	402.2	402.2	405.0	435.0
Вносимые потери, IL	dB	3.9	6.6	6.5	11	6.0	6.0
Полоса пропускания BW	kHz	78	102	490	568	250	250
Уровень полосы BW	dB	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Пульсации амплитуды	dB	0.5	0.7	0.2	0.5	0.8	0.8
Пульсации ГВЗ	μs	-	13	0.8	0.65	1.2	1.2
Гарантированное затухание	dB	60	70	55	40	55	55
Коэффициент прямоугольности (40/3 дБ)	-	3.4	1.9	2.8	2.75	3.0	3.0
Сопротивление генератора	Ohm	$50 + L_1C_1$					
Сопротивление нагрузки	Ohm	$50 + L_2C_2$					
Температурный коэффициент частоты	$ppm/^oC^2$	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
Размер корпуса SMD	mm	9.1x 7.1x 1.6	9.0 x 4.8 x 1.8	5.0 x 5.0 x x 1.4	3.8 x 3.8 x 1.4	3.8 x 3.8 x 1.4	5.0 x 5.0 x 1.4
Материал подложки	-	Кварц , срез yxl/33°18′					

Таблица 5

Основные электрические параметры ПСРФ на частоты от от 90.0 МГц до 505.0 МГц . Полосы пропускания от 15 кГц до 300 кГц.Вносимые потери IL=2.5-6.0 дБ.

Применение: Синтезаторы частоты, очистка спектра генераторов, гетеродинов.

Параметр	**Еди-ницы**	**Код фильтра / Типовые параметры**						
		FP-700	**FP-709**	**FP-710**	**FP-711**	**FP-712**	**FP-714**	**FP-713**
Центральная частота, Fo	MHz	120.0	128.0	145.0	240.0	300.0	456.25	505.0
Вносимые потери, IL	dB	120.0	128.0	145.0	240.0	300.0	456.25	505.0
Полоса пропускания BW	kHz	2.5	2.6	2.8	4.0	4.5	6.0	6.0
Уровень полосы BW	dB	80	90	90	150	200	300	300
Пульсации амплитуды	dB	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Пульсации ГВЗ	μs	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8	0.8
Гарантированное затухание	dB	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	1.4	1.4
Коэффициент прямоугольности (40/3 дБ)	-	60	60	60	60	60	55	55
Сопротивление генератора	Ohm	$50 + L_1C_1$						
Сопротивление нагрузки	Ohm	$50 + L_2C_2$						
Температурный коэффициент частоты	$ppm/^oC^2$	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
Размер корпуса SMD	mm	13.3x 6.5 x 1.6	13.3x 6.5 x 1.6	13.3x6.5 x 1.6	9.1x 7.1 x 1.6	9.1x 7.1 x 1.6	5.0 x 5.0 x1.4	5.0 x 5.0 x1.4
Материал подложки	-	Кварц , срез yxl/33°18′						

2. В рамках данной инициативной темы для выпуска конструкторской документации в качестве базовых были выбраны три конструкции СВЧ полосовых фильтров на ПАВ с малыми вносимыми потерями на подложках из кварца семейства температурно-стабильных повернутых срезов *yxl*/29 ^{0}-40 ^{0}:

- двухзвенный фильтр ФП-710 145В0,09 МГц с комбинированием поперечной акустической связи между резонаторами в звеньях и электрической (емкостной) связью между звеньями на частоту 145 МГц , имеющий оптимальную для достижения минимальных вносимых потерь полосу пропускания *BW3*= 0,06% (0,09 МГц);

- двухзвенный фильтр ФП-713 505В0,25 МГц с комбинированием поперечной акустической связи между резонаторами в звеньях и электрической (емкостной) связью между звеньями с полосой пропускания *BW3*= 0,05% (0,25 МГц), типичной для данного типа фильтров , но на частоту 505 МГц , которая является практически предельной при использовании технологии прямой фотолитографии ;

- однозвенный фильтр ФП-715 315В0,8 МГц с чисто акустической поперечной связью трех резонаторов и с широкой полосой пропускания *BW3*= 0,25% (0,8 МГц) , близкой к максимально возможной для данного типа фильтров.

3. Исследованы образцы фильтров , включая их температурно-частотные характеристики , и обобщены более ранние результаты для других типов ПСРФ с параметрами , близкими к предельным для данного класса фильтров на кварце . Двухзвенный фильтр ФП-728 85,38В0,04 МГц с комбинированием акустической и электрической связи между резонаторами и с полосой пропускания BW3= 0,04 МГц (0,04%), проектировался на частоту 85,38 МГц , близкую к минимально возможной для кварцевых фильтров на ПАВ , изготавливаемых по технологии прямой литографии из-за требуемой толщины электродов отражателей около 13000 А. Однозвенный трех-резонаторный фильтр ФП-730 868,3В1,5 МГц с полосой BW3= 1,5 МГц изготавливался уже по технологии “взрывной “фотолитографии на частоту 868,3 МГц , близкую к предельно высокой частоте, ограниченной потерями в согласующих цепях и потерями на распространение ПАВ в кварце.

4. В рамках данной инициативной темы на базовые конструкции фильтров была выпущена следующая конструкторская документации за литерой "О":

- технические условия МТО.460810.010 ТУ, общие на все типы изделий , разрабатываемые по теме, дополнены техническими требованиями и методиками измерения узкополосных и температурно-стабильных СВЧ фильтров с малыми вносимыми потерями на кварце ФП-710 , ФП-713 и ФП-715 ;

- комплекты чертежей на базовые конструкции изделий :

МТО.468844 064 на фильтр ФП-710 145В0,06 МГц ; МТО.468844 063 на фильтр ФП- 713 505В0,25 МГц; МТО.468844 062 на фильтр ФП- 715 315В0,8 МГц.

На фильтры в таблицах 4 и 5 конструкторская документация , включая ТУ , выпущена ранее .

5. На основании положительных результатов предварительных испытаний конструкторской документации на фильтры МТО.468844.063, МТО.468844.062 , МТО.468844.064 присвоена литера "0".

6. Разработан и оформлен базовый технологический процесс изготовления СВЧ сверхузкополосных фильтров на кварце с размерами элементов до 2,5 мкм методом прямой фотолитографии .

7.Ключевыми операциями разработанного технологического процесса являются следующие:

- формирование с использованием метода магнетронного распыления слоя металлизации титан-алюминий, обладающего высокой адгезией к подложке, малым удельным сопротивлением 0,35 Ом и минимальным разбросом толщины по подложке и между образцами;

- контроль частоты фильтров на подложках с помощью зондовой установки ;

- подстройка частоты резонаторов путем плазмохимического травления кварцевой подложки ;.

- высокотемпературный стабилизирущий отжиг после операций , вызывающих внутренние механические напряжения в подложках.

8. На базовый технологический процесс выпущена необходимая техническая документация.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСОЧНИКОВ

1. HiromiYatsuda, Kazuhiko Yamanouchi, "High-Frequency and Narrow-Band STW Filters for Cellular Power Amplifiers".", IEEE 1998 Ultrasonics Symposium Proc., pp. 89-92.
2. V.B.Chvets, V.S.Orlov, A.N. Rusakov, A.L.Schwarz, "Design of Narrow-Band Transversal Coupled and Balanced Bridge Resonator Filters Using Equivalent Circuit and P-Matrix Models", IEEE 2000 Ultrasonics Symposium Proc., pp. 79-82.
3. V.B.Chvets, A.L.Schwartz and V.S.Orlov, "Design of Wide Band Transversely Coupled Resonator Filters on Quartz", IEEE 2002 Ultrasonics Symposium Proc., pp. 93-97.