

**Моделирование  
интегральных пассивных  
элементов СВЧ и ВЧ  
диапазона,  
реализованных по МДМ-  
технологии**

## Как менялись размеры сотовых телефонов от 1G до 4G



1G

**1G** (AMPS (825—890 МГц), TACS (935-950 МГц))- аналоговый стандарт, речевые сообщения



2G

**2G** (GSM (900-1800 МГц))- цифровой стандарт, поддержка коротких сообщений (SMS)



3G

**3G** (UMTS (1800-2000МГц)) - большая ёмкость, пакетная передача данных, увеличение скорости сетей второго поколения



4G

**4G** (стандарты LTE (791-862 МГц) , Wi-Max (2500-2600 МГц)) - большая ёмкость, IP-ориентированная сеть, поддержка мультимедиа, скорости до сотен мегабит в секунду

# Характеристики катушек и конденсаторов

Катушки:

- Индуктивность
- Добротность
- Паразитная емкость
- Резонансная частота

Конденсаторы:

- Емкость
- Добротность
- Паразитная индуктивность
- Резонансная частота

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad - \text{индуктивность}$$

$$f_L = \frac{1}{\sqrt{LC_L}} \quad - \text{собственная резонансная частота катушки}$$

$$Q = \frac{2\pi fL}{R} \quad - \text{добротность катушки}$$

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad - \text{емкость конденсатора}$$

$$f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_C C}} \quad - \text{собственная резонансная частота конденсатора}$$

$$Q = \frac{1}{2\pi fCR} \quad - \text{добротность конденсатора}$$

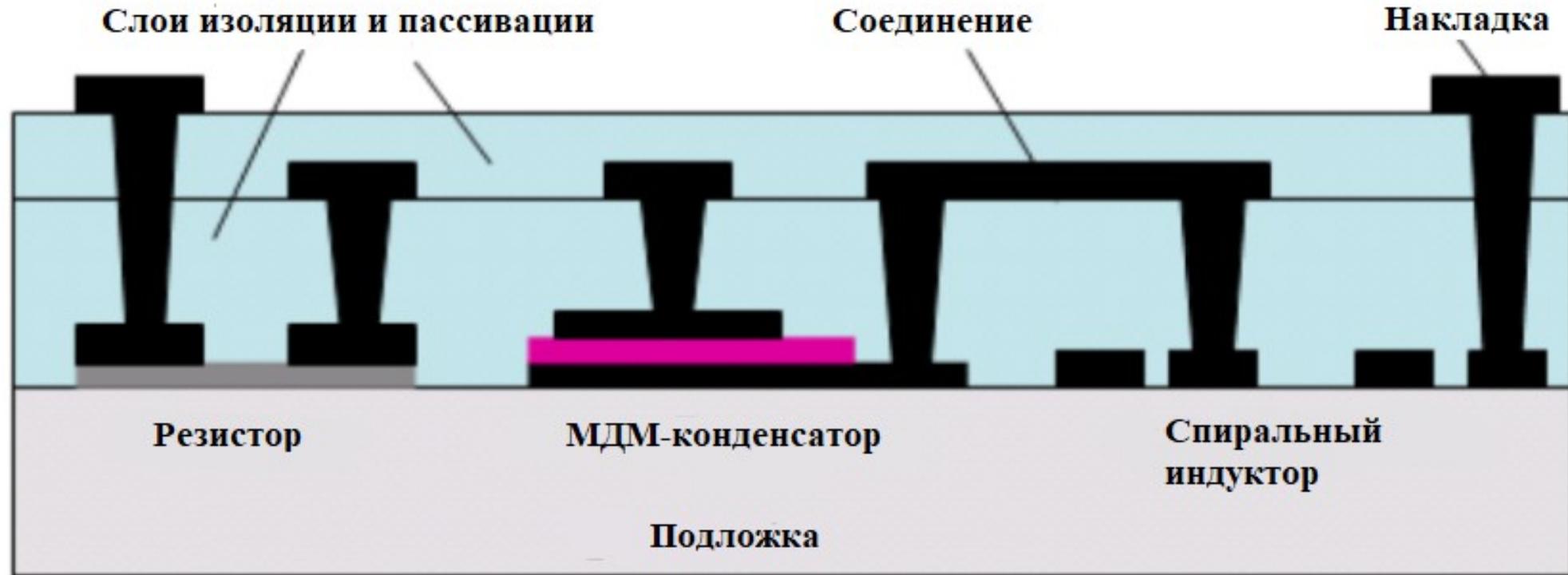
# Виды пассивных элементов L и C для см-диапазона

- Элементы с сосредоточенными параметрами в дискретном исполнении – практически не реализуются
- Элементы с сосредоточенными и квази-сосредоточенными параметрами в интегральном исполнении – реализуются как тонкопленочные (МДМ) и толстопленочные (LTSS) элементы.
- Элементы с распределенными параметрами в интегральном исполнении – реализуются как тонкопленочные (МДМ) и толстопленочные (LTSS) микрополосковые или волноводные линии

# Типовой маршрут на серебре

1. Очистка подложки
2. Напыление 1й металлизации
3. Фотолитография
4. Травление
5. Межоперационная очистка
6. Напыление диэлектрика
7. Фотолитография по хрому. Формирования переходных отверстий (меньше нижнего проводника на 20 мкм на сторону)
8. Травление
9. Удаление фоторезиста и травление хрома
10. Защита фоторезистом
11. Прошивка отверстий
12. Удаление фоторезиста
13. Межоперационная очистка
14. Напыление 2го металла. Запыление переходных отверстий и пропыление сквозных
15. Фотолитография. Формирование рисунка верхних обкладок
16. Травление
17. Осаждение серебра (гальваника)

# МДМ-структура



# Технологические нормы проектирования пассивных МДМ-структур

## Материалы

Материал	Диэл. проницаемость	Тангенс угла диэл. потерь	ТКЛР (10-6/°К)	Габариты (мкм)	Теплопроводность (Вт/м*К)
Керамика ВК-100 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Поликор	9,7	0,0001	7,2-8,2	60x48x0,5	29
Кварц	3,5 - 4,5	0,0025 - 0,0006	0.77 - 1.4	60x48x0,5	1,38
Сапфир	10	0,0001	6,66	60x48x0,15	23.1

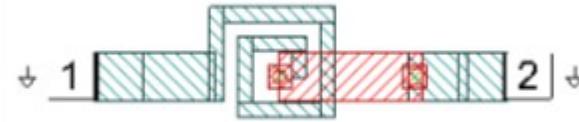
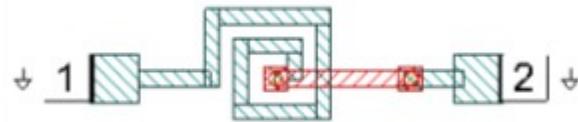
## Размеры элементов

Название элемента / номинал	Тип / Материал	Численное значение
Проводник	Тип: тонкопленочный полосок Материал: хром медь-серебро	Минимальная ширина полоска: 30 мкм
Индуктивность	Тип: тонкоплен. спиральная (прямоугольная) Материал: хром медь-серебро	Минимальная ширина линии / зазора – 30 / 30 мкм.
Емкость	Тип: тонкопленочный МДМ Материал: хром медь-серебро Материал диэлектрика: SiO <sub>2</sub>	Мин. размер обкладок: 100x100 мкм Толщина диэлектрического слоя – 1 мкм

# Характеристики САПР

Название	Тип ЭМ симулятора	Метод
HFSS	3D	Метод конечных элементов
ADS	3D	Метод гармонического баланса
AWR Microwave Office	2,5D/3D	Метод моментов / Метод конечных элементов

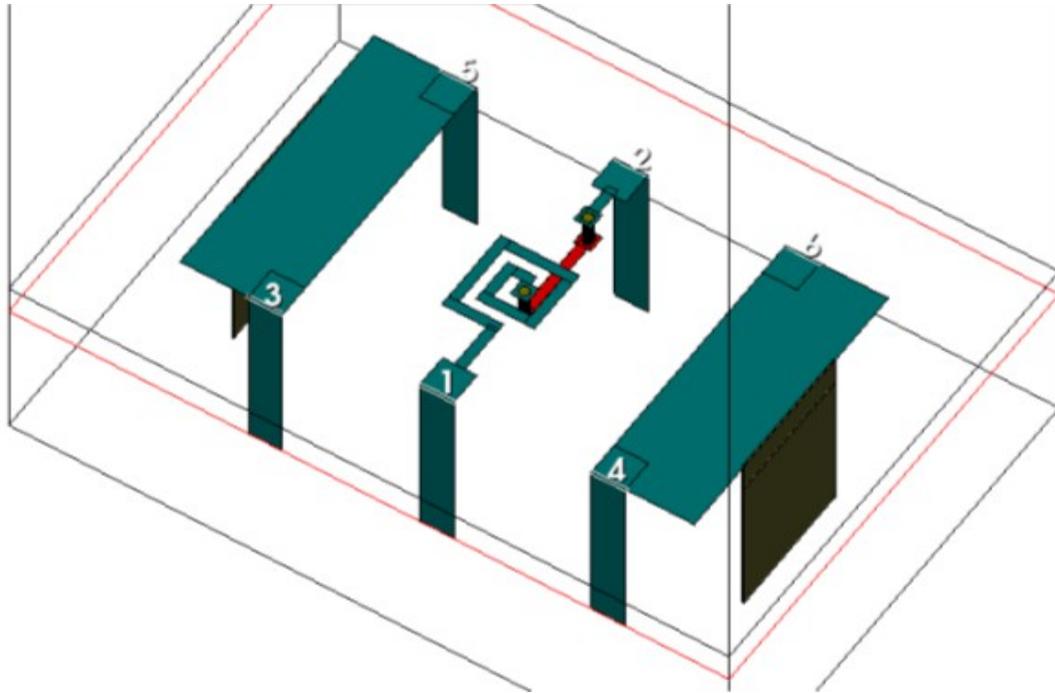
# Топология катушки индуктивности в среде AWR DE



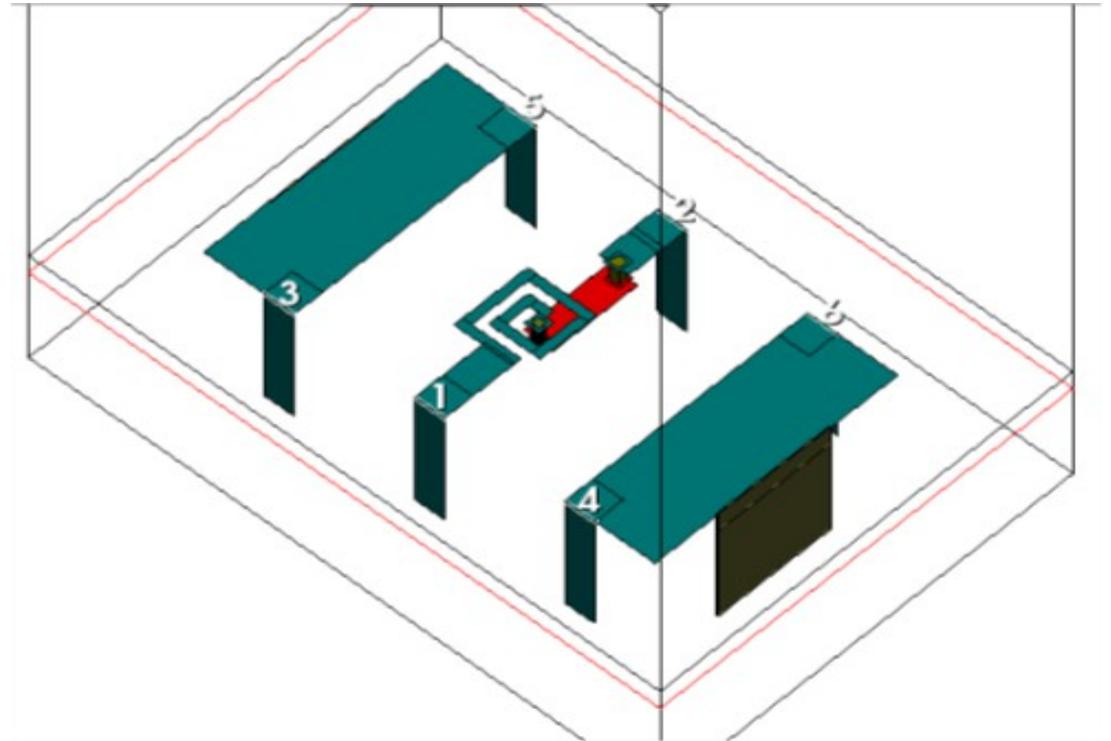
Первая итерация

Вторая итерация

# 3D-вид катушки индуктивности в среде AWR DE

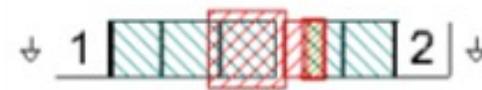
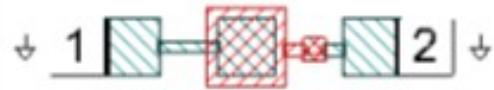
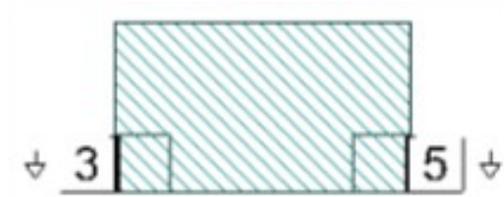


Первая итерация



Вторая итерация

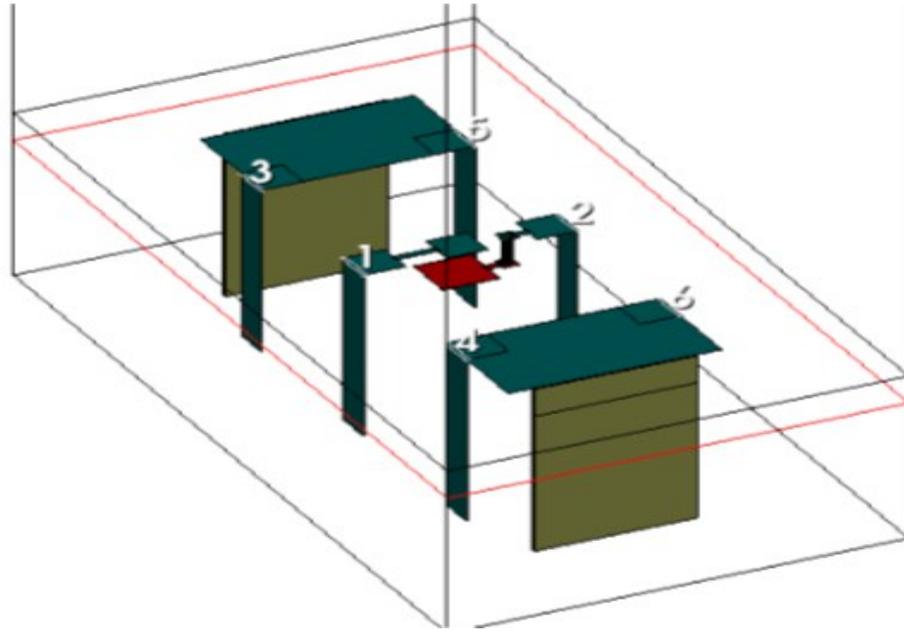
# Топология конденсатора в среде AWR DE



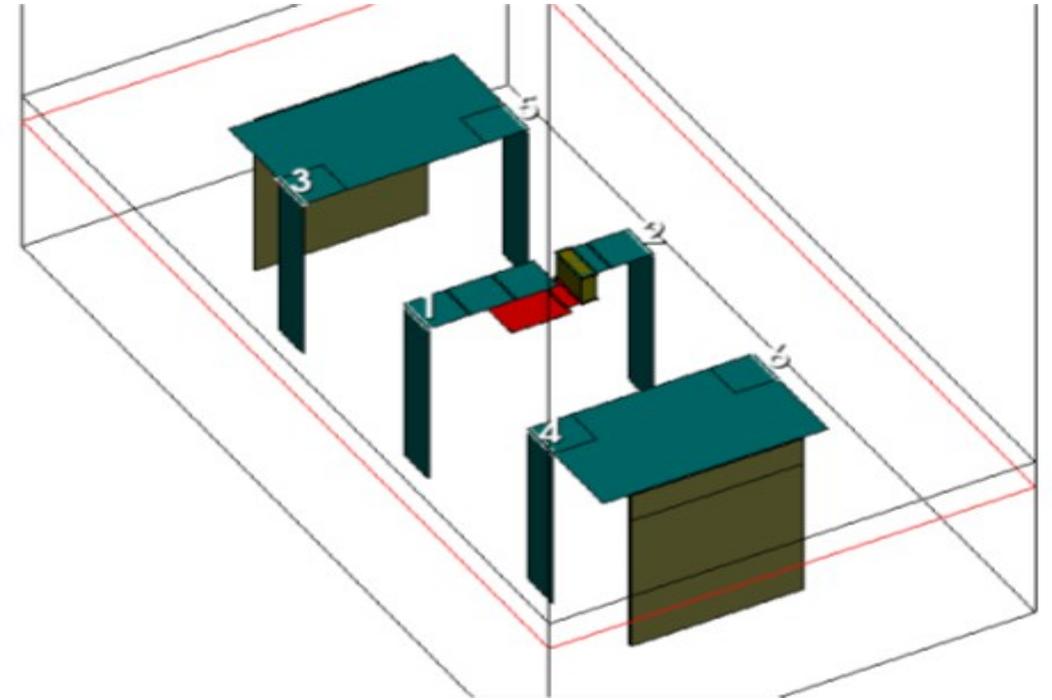
Первая итерация

Вторая итерация

# 3D-вид конденсатора в среде AWR DE



Первая итерация



Вторая итерация

# Результаты моделирования катушек:

Ширина полоска / зазор	Число витков	Индуктивность на 1 ГГц, нГн		Добротность на 1 ГГц		Частота резонанса, ГГц		Частота резонанса для добротности, ГГц	
		1 итерация	2 итерация	1 итерация	2 итерация	1 итерация	2 итерация	1 итерация	2 итерация
30/30	1	1,199	1,032	10,14	11,02	21,2	21,4	17,7	17,9
30/30	2	2,382	2,247	19,48	9,42	12,1	10,5	16,5	16
30/30	3	4,617	4,241	22,98	33,86	7,1	5,9	15,9	16
30/30	4	8,088	8,209	36,24	32,75	4,5	3,8	15,7	15,8
40/40	1	1,264	1,16	12,02	11,1	19,3	18,5	17,4	17,4
40/40	2	2,91	2,713	12,12	23,3	9,2	8,1	16	15,8
40/40	3	5,717	5,443	34,47	43,14	5,2	4,5	15,6	15,6
40/40	4	10,58	10,67	37,01	34,52	3,3	2,8	16	16,3
50/50	1	1,44	1,352	16,3	21,22	16	14,6	16,7	16,2
50/50	2	3,26	3,126	30,16	35,98	7,2	6,4	15,7	15,9
50/50	3	6,994	6,773	34,3	32,37	4	3,6	15,6	15,8
50/50	4	13,53	13,81	38,3	38,4	2,5	2,3	15,9	15,3
60/60	1	1,559	1,467	24,2	28,1	13,2	12,3	16,1	15,9
60/60	2	3,783	3,68	34,92	38,82	5,9	5,4	15,8	16
60/60	3	8,078	8,046	39,72	43,7	3,3	3	16,3	16,9
60/60	4	16,73	17,37	58,52	48,77	2,1	1,9	15,7	15,7
30/60	1	1,486	1,363	10,62	11,67	18,4	17,3	17,3	17
30/60	2	3,428	3,14	13,553	28,7	8,8	7,7	16,1	15,7
30/60	3	6,791	6,618	14,55	30,62	4,9	4,3	15,1	15,6
40/80	1	1,16	1,589	11,1	25,8	18,5	13	17,4	16,2
40/80	2	4,014	3,87	27,3	33,11	6,4	5,8	15,7	15,9
40/80	3	8,726	8,539	34,86	38,84	3,7	3,2	15,8	16,1
50/100	1	1,944	1,908	24,8	23,2	11,5	10,6	16,1	15,6
50/100	2	4,883	4,659	33,12	41,14	5,1	4,6	15,8	15,6
50/100	3	10,81	10,73	37	35,29	2,8	2,6	16,1	16,2
60/120	1	2,19	2,11	28,87	33,41	9,5	8,9	15,6	15,5
60/120	2	5,742	5,62	38,13	29,3	4,2	3,9	15,7	16,1
60x120	3	13,17	13,71	39,07	34,82	2,3	2,1	15,3	15,3

# Результаты моделирования конденсаторов:

Размер, мкм	Емкость на 1 ГГц, пФ		Добротность на 1 ГГц		Частота резонанса, ГГц		Частота резонанса для добротности, ГГц	
	1 итерация	2 итерация	1 итерация	2 итерация	1 итерация	2 итерация	1 итерация	2 итерация
100	0,393	0,4542	1101	2169,7	13,1	13,4	17	16,6
125	0,5878	0,6487	775,4	1886,5	10,5	11	17,3	16,9
150	0,8279	0,8881	521,7	1225,4	8,7	9,2	17,6	17,1
175	1,114	1,173	403,7	905,58	7,4	7,9	17,8	17,3
200	1,448	1,503	261,4	675,53	6,4	6,9	17,5	17,1
225	1,83	1,883	222,3	524,6	5,6	6,1	17,9	17,1
250	2,266	2,313	177,7	412,9	5	5,4	18,1	17,2
275	2,275	2,8	140,3	320,4	4,5	4,9	18,1	17,8
300	3,305	3,329	108,6	300,4	4,1	4,4	17,7	17,1
325	3,914	3,933	89,942	241,3	3,7	4	17,7	17,6
350	4,598	4,599	75,29	170,49	3,4	3,7	18	17,5
375	5,346	5,322	64,92	161,4	3,2	3,4	17,9	17,5
400	6,175	6,135	57,69	103,05	2,9	3,2	17,8	17,4
425	7,0878	7,003	49,02	112,6	2,7	3	17,7	17,3
450	8,101	7,963	41,72	93,99	2,6	2,8	17,6	17
475	9,264	9,066	30,59	63,79	2,4	2,6	17,4	17
500	10,44	10,18	31,32	69,54	2,3	2,5	17,4	17
525	11,8	11,45	27,7	60,61	2,2	2,3	17,3	16,9
550	13,4	12,96	28,36	68,29	2	2,2	17,4	17,1
575	15,14	14,5	26,04	54,78	1,9	2,1	17,3	17
600	17	16,3	24,8	58,85	1,8	2	17,3	17

# Выводы и дальнейшие планы:

- 1) Увеличивая количество витков и размеры полосков для катушки, индуктивность и добротность тоже увеличиваются, а резонансные частоты уменьшаются.
- 2) С увеличением размера конденсатора, емкость увеличивается, а добротность становится меньше. Частота резонанса так же уменьшается.
- 3) Увеличивая емкость подводящих полосков во 2й итерации, уменьшается индуктивность у катушек и увеличивается емкость конденсаторов.
- 4) При увеличении зазора между витками в два раза индуктивность увеличивается в полтора раза. Добротность и частота резонанса уменьшается.

Обратим внимание, что у катушки 50/50 мкм с 1 витком индуктивность = 1,35 нГн,  $f = 14,6$  ГГц, добротность = 21,22, а у катушки 30/60 мкм с 1 витком индуктивность = 1,36 нГн,  $f = 17,3$  ГГц, добротность = 11,6. Индуктивность у них практически одинаковая, но увеличение зазора привело к уменьшению добротности, и отодвинуло резонанс почти на 3 ГГц.

В дальнейшем планируется физическая реализация смоделированных СВЧ элементов по МДМ технологии и продолжение исследований по определению факторов влияющих на интегральные элементы СВЧ диапазона и выявление их взаимосвязей.

# Литература и источники

1. Кирильчук В.Б., Лихачевский Д.В. / Основы проектирования СВЧ интегральных схем. Часть 2. // Минск: БГУИР, 2012
2. Данилина Т.И. / Технология тонкопленочных микросхем // Томск: ТУСУР, 2006
3. Xiaoyu Mi & Satoshi Ueda / Integrated Passives for High-Frequency Applications // Fujitsu Laboratories Ltd. Japan, 2010
4. Технологические нормы проектирования пассивных МДМ-структур // Отдел микроэлектроники ЦКБА, 2018
5. Система автоматизированного проектирования ADS // <https://www.keysight.com/ru/pc-1297113/advanced-design-system-ads?nid=-34346.0&cc=RU&lc=rus>
6. Программное обеспечение NI AWR // <http://www.awrcorp.com/sites/default/files/content/attachments/PTFL-RU-2017-Final.pdf>
7. ANSYS HFSS // <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
8. Метод конечных элементов / ТПУ // <portal.tpu.ru:7777/SHARED/b/BGA/bio/bachelors/Tab/МКЕ.pdf>
9. Гребеников Е.А. / Метод усреднения в прикладных задачах. // Москва: Наука, 1986