УМЕНЬШЕНИЕ ПЛОЩАДИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Д.А. Борейко, А.С. Валенко

Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

Исследованы возможности уменьшения общей площади интегральных конденсаторов без уменьшения собственной резонансной частоты и добротности. Представлены результаты, показывающие, что расположение межслойных переходов в пределах обкладок плоскопараллельных интегральных конденсаторов позволяет достичь расширения диапазона их рабочих частот. Приведены результаты анализа электромагнитных моделей емкостных элементов в виде графиков частотных зависимостей их параметров и сводной таблицы.

Ключевые слова: интегральный конденсатор, уменьшение площади, частота собственного резонанса, электромагнитный анализ.

REDUCING AREA OF INTEGRATED CAPACITORS

D.A. Boreyko, A.S. Valenko

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

The possibilities of reducing the total area of integrated capacitors without reducing their own resonant frequency and quality factor are investigated. The results are presented showing that the location of the interlayer transitions within the plates of plane-parallel integrated capacitors allows to achieve the expansion of the range of their operating frequencies. The results of the analysis of electromagnetic models of capacitive elements in the form of graphs of the frequency dependencies of their parameters and a summary table are presented.

Keywords: integrated capacitor, area reduction, intrinsic resonance frequency, electromagnetic analysis.

В ВЧ-СВЧ диапазонах в качестве частотно-избирательных устройств широко применяются LC-фильтры, выполненные на основе сосредоточенных элементов. Их достоинствами являются широкий диапазон реализуемых относительных полос пропускания (от 5 до 100 %), малый уровень вносимого затухания и отсутствие побочных полос пропускания.

На сегодняшний день актуальной проблемой является уменьшение их массогабаритных показателей. Данная задача решается с использованием многослойных структур с интегрированными в их объем пассивными элементами. Одним из путей миниатюризации интегральных фильтров является уменьшение габаритных размеров их элементов – катушек индуктивности и конденсаторов.

В связи с более высокой добротностью интегральных конденсаторов по сравнению с катушками индуктивности, часто используются схемы с минимальным числом индуктивных элементов. Количество конденсаторов при этом может быть достаточно большим, поэтому даже незначительное уменьшение площади каждого емкостного элемента позволяет достичь уменьшения линейных размеров интегрального фильтра.

Целью данной работы является поиск способов уменьшения площади интегрального конденсатора без уменьшения номинального значения, без снижения резонансной частоты и без ухудшения добротности за счет модификации известных конструкций емкостных элементов.

В работах [1–3] показана целесообразность применения плоскопараллельных конденсаторов с прямоугольной формой обкладок при проектировании интегральных устройств.

При этом для достижения высоких значений частоты собственного резонанса и добротности необходимо обеспечивать максимальную ширину подводящих проводников [4]. Конструкция многослойного емкостного элемента, спроектированного с учетом данного требования, приведена на рис. 1.

При достаточно большом диаметре переходных отверстий, например от 0,2 мм для ЛТСС-технологии, необходимости в наличии технологического «пояска» (для обеспечения гарантированного соединения переходных отверстий на разных слоях) нет, в связи с чем отверстия могут быть расположены на краю обкладок.

Рис. 1. Конструктивное исполнение конденсатора-прототипа

Основным недостатком этой конструкции является небольшая площадь перекрытия обкладок относительно общей площади конденсатора, что обусловливается необходимостью обеспечивать технологический зазор между обкладками конденсатора и переходными отверстиями для гарантии отсутствия замыкания между ними. На рис. 2 показана топология конденсатора с обозначением геометрических параметров. Серым цветом отмечена площадь одной обкладки, которая имеет меньшее значение по сравнению с площадью всего емкостного элемента по причине наличия технологического выреза.

Рис. 2. Топология конденсатора-прототипа:

w – ширина конденсатора, h – длина конденсатора, $h1$ – длина площади перекрытия обкладок,
 $h2$ – длина подводящих проводников, d – диаметр переходных отверстий,
 g – технологический зазор

Решением этой проблемы является применение предложенной в данной работе конструкции интегрального конденсатора, у которого переходные отверстия расположены в пределах обкладок с обеспечением технологического зазора со всех сторон отверстия (рис. 3).

Рис. 3. Топология исследуемого конденсатора:
 a – ширина технологического выреза, b – длина технологического выреза,
 m – расстояние от края обкладки до края переходного отверстия

Площади конденсаторов, выполненных с использованием известной конструкции (S1) и с применением предлагаемой (S2), могут быть определены при помощи следующих выражений:

$$S1 = wb, S2 = ab \quad (1)$$

Соотношение этих площадей представляется как

$$S1/S2 > w/a \quad (2)$$

Очевидно, что при выполнении условия $a < w$ площадь технологического выреза предложенного варианта конструкции будет меньше по сравнению с известной конструкцией.

Исследование параметров конденсаторов может быть выполнено с использованием специализированной САПР, позволяющей проводить электромагнитный анализ конструкций для получения значений электрических характеристик с последующим анализом их величин.

При сравнении представленных топологий конденсаторов учитывались значения частоты собственного резонанса и добротности, при этом такие параметры, как номинальное значение, количество слоев реализации конденсатора, диаметр переходных отверстий, а также технологические зазоры выбирались одинаковыми.

При расположении переходных отверстий в пределах обкладок может меняться как расстояние от края обкладки до края переходного отверстия, так и положение переходных отверстий относительно вертикальной оси симметрии обкладок.

Рассмотрим случай, когда переходные отверстия находятся на краях обкладок, как наиболее близкий к конструкции, изображенной на рис. 1, при этом рассмотрим три варианта размещения переходных отверстий, показанные на рис. 4.

Сравнение площадей известной и предлагаемой конструкций осуществлялось для конденсаторов с номинальным значением 10 пФ и более, так как конденсаторы с меньшими значениями как правило обладают небольшой площадью.

Также учитывалось, что в ВЧ-СВЧ диапазонах емкость используемых при проектировании LC-фильтров конденсаторов, как правило, имеет значение не более 100 пФ. В связи с этим рассматривались номинальные значения: от 10 до 50 пФ, от 50 до 100 пФ. Для первой группы исследовались конструкции с количеством слоев от 4 до 8, для второй – от 4 до 16. Расчетная частота всех конденсаторов была принята равной 100 МГц (частота, на которой реализуемы все номинальные значения из выбранного диапазона).

Рис. 4. Конструкции исследуемых конденсаторов:

а – переходные отверстия на углах с одной стороны; *б* – переходные отверстия на углах с противоположных сторон; *в* – переходные отверстия на вертикальной линии симметрии

Технологические зазоры между краем обкладок и переходными отверстиями конденсатора были приняты равными 0,1 мм.

При создании топологии конденсаторов также учитывался такой параметр, как коэффициент прямоугольности конденсатора:

$$k = \frac{w}{h}. \quad (3)$$

Значения данного параметра выбирались из следующего ряда: 0,4 ($w = 2,5h$); 1 ($w = h$); 2,5 ($h = 2,5w$), исходя из необходимости получить более чем в два раза вытянутые по длине или ширине обкладки, для корректной оценки влияния коэффициента прямоугольности на электрические характеристики.

На рис. 5 и 6 показаны частотные зависимости номинальных значений емкости для конденсаторов крайних значений исследуемого диапазона: 10 пФ и 75 пФ. Данные графики показаны для конструкций с $k = 0,4$ и $k = 2,5$ соответственно, для того чтобы наглядно представить результаты для различного сочетания конструктивных параметров.

Из рис. 5 и 6 видно, что максимальными значениями частоты собственного резонанса и добротности на расчетной частоте обладает конструкция с расположением переходных отверстий на оси симметрии. Минимальные значения имеют конфигурация с расположением переходных отверстий в углах обкладок. Остальные варианты конструкции отличаются значительно меньшими резонансной частотой и добротностью на расчетной частоте.

Необходимо отметить, что при разработке интегральных заземленных конденсаторов, содержащихся в поперечных ветвях схемы, может быть целесообразным подключение части их обкладок к общей шине с помощью нескольких переходных отверстий, что способствует повышению их ЧСР [2; 5]. Однако при отсутствии необходимости улучшения параметров фильтра данный способ не применяется, так как приводит к усложнению топологии и увеличению времени электромагнитного моделирования.

В сводной таблице ниже представлены электрические параметры для ряда исследуемых конденсаторов. Расположение переходных отверстий снаружи соответствует рис. 1, остальные варианты их расположения изображены на рис. 4: посередине (см. рис. 4б), на одном краю (рис. 4а), по диагонали (рис. 4в). Значения добротности на расчетной частоте (100 МГц) составило порядка 660–670 единиц и в данной таблице не приводится по причине небольшого разброса значений.

Рис. 6. Частотная зависимость добротности интегрального конденсатора емкостью $C = 75$ пФ ($k = 2,5$), выполненного в 8 слоях:

399

<i>C, пФ</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>Расположение отверстий</i>	<i>Занимаемая площадь, мм²</i>	<i>Резонансная частота, МГц</i>
10	4	0,4	снаружи	4,55	2425
			посередине	4,03	2566
			на одном краю		2509
			по диагонали		2491
		1	снаружи	5,25	2992
			посередине	4,41	3126
			на одном краю		2855
			по диагонали		2750
		2,5	снаружи	5,95	3523
			посередине	4,16	3763
			на одном краю		3324
			по диагонали		2524
	8	0,4	снаружи	2,34	2331
			посередине	2,07	2441
			на одном краю		2468
			по диагонали		2468
		1	снаружи	2,85	2771
			посередине	2,25	291
			на одном краю		2838
			по диагонали		2731
		2,5	снаружи	3,36	3256
			посередине	2,07	3590
			на одном краю		3375
			по диагонали		2676
25	4	0,4	снаружи	11,00	1392
			посередине	10,20	1438
			на одном краю		1353
			по диагонали		1353
		1	снаружи	12,21	1751
			посередине	10,56	1839
			на одном краю		1608
			по диагонали		1538
		2,5	снаружи	13,00	2029
			посередине	10,20	2125
			на одном краю		1826
			по диагонали		1370
	8	0,4	снаружи	5,46	1355
			посередине	4,90	1398
			на одном краю		1366
			по диагонали		1367
		1	снаружи	6,21	1646
			посередине	5,06	1728
			на одном краю		1619
			по диагонали		1534
		2,5	снаружи	7,03	1882
			посередине	4,90	1991

Окончание табл.

$C, n\Phi$	n	k	Расположение отверстий	Занимаемая площадь, мм ²	Резонансная частота, МГц
75	8	0,4	на одном краю	15,18	1859
			по диагонали		1413
			снаружи	15,18	706
			посередине	14,03	728
			на одном краю		682
			по диагонали		681
	16	1	снаружи	16,38	898
			посередине	14,06	913
			на одном краю		828
			по диагонали		784
		2,5	снаружи	17,98	980
			посередине	14,16	1027
			на одном краю		918
			по диагонали		703
	16	0,4	снаружи	7,65	647
			посередине	6,80	665
			на одном краю		656
			по диагонали		657
		1	снаружи	8,37	750
			посередине	6,76	762
			на одном краю		730
			по диагонали		718
		2,5	снаружи	9,68	806
			посередине	6,97	835
			на одном краю		807
			по диагонали		653

Из данных, приведенных в таблице, а также на основе проведенных в данной работе исследований можно сделать следующие выводы:

1. Интегральные конденсаторы с расположением переходных отверстий непосредственно в пределах обкладок обладают уменьшенной площадью, при этом чем шире конденсатор, тем больше экономия площади (для $k = 2,5$ до 38 %, для $k = 1$ до 21 %, для $k = 0,4$ до 11 %).

2. При увеличении количества слоев реализации конденсаторов экономия площади увеличивается (для исследованных конденсаторов при увеличении количества слоев в два раза – увеличилась на 3–10 %).

3. Интегральные конденсаторы с расположением переходных отверстий в пределах обкладок на вертикальной линии симметрии имеют частоту собственного резонанса выше на величину до 10 % при таком же уровне добротности (порядка 660–670 ед. на расчетной частоте).

4. При подключении части обкладок интегральных конденсаторов к общей шине несколькими отверстиями их ЧСР становится больше, однако предложенная конструкция исключает возможность применения такого способа. При этом необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на решение этой проблемы.

5. При расположении отверстий в пределах обкладок конденсатора на вертикальной линии симметрии увеличение ширины обкладок за счет изменения коэффициента прямоугольности ведет к увеличению резонансной частоты конденсатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хроленко Т.С.* Интегральные LC-фильтры ВЧ и СВЧ диапазонов на основе современных материалов: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2013. 173 с.
2. *Борейко Д.А.* Исследование влияния конструктивных параметров на характеристики интегральных конденсаторов // *Техника радиосвязи*. 2014. Вып. 2 (22). С. 91–100.
3. *Вендик И.Б., Холодник Д.В., Симин А.В.* Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига // *Компоненты и технологии*. 2005. Вып. 5. С. 190–196.
4. *Борейко Д.А.* Расширение диапазона рабочих частот LC-фильтров и интегральном исполнении: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2017. 174 с.
5. *Bahl Inder.* Lumped Elements for RF and Microwave Circuits. Artech House, 2003. 488 p.