

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.37

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРНОГО ФИЛЬТРА НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ. СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ

© 2022 г. А. С. Койгеров^а *, О. Л. Балышева^б

^аСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. проф. Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376 Российская Федерация

^бСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Б. Морская, 67, Санкт-Петербург, 190000 Российская Федерация

*E-mail: a.koigerov@gmail.com

Поступила в редакцию 10.01.2022 г.

После доработки 21.03.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

Представлено сравнение моделирования на основе двух подходов – феноменологической модели связанных мод и численного анализа методом конечных элементов на примере расчета характеристик резонаторного фильтра на вытекающих поверхностных акустических волнах на пьезоэлектрической подложке ниобата лития среза $64^\circ Y-X$. Необходимые для модели связанных мод параметры получены на основе численного анализа бесконечных тестовых структур в пакете COMSOL. Рассчитан и проанализирован коэффициент передачи фильтра, сравнение с экспериментальными данными показало хорошее совпадение. Предложены практические рекомендации по моделированию резонаторных фильтров с различной топологической структурой, рассмотрена возможность учета различных эффектов второго порядка при моделировании.

DOI: 10.31857/S0033849422110055

ВВЕДЕНИЕ

Постоянно растущие требования к характеристикам проектируемых фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) можно удовлетворить только применением соответствующих точных и эффективных средств моделирования. К настоящему времени для моделирования ПАВ устройств предложены различные подходы и модели [1–3], однако для разработчика конкретного фильтра по-прежнему актуальной является задача выбора наиболее подходящих средств моделирования по таким критериям, как перечень учитываемых в модели вторичных эффектов, необходимые вычислительные и временные ресурсы, ограничения в применении, возможность получения 2D- и 3D-представления, точность получаемых результатов при сравнении с экспериментальными и т.д. Анализ публикаций последних лет [4, 5] демонстрирует возросшую популярность численного моделирования, в частности, расчетов в пакете COMSOL.

Цель данной работы – сравнить два подхода к моделированию ПАВ устройств: численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) и подход на основе модели связанных мод (МСМ) с применением матричного описания, а также

предложить практические рекомендации по моделированию фильтров с различными топологическими структурами.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МКЭ И МСМ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ ПОДХОДОВ

На рис. 1а приведена топология резонаторного фильтра на продольных резонансных модах (ПРМ). В работе рассматривается традиционный подход на основе МСМ и его формализация с применением P -матриц, подробно описанный в работе [1]. МКЭ представлен для упрощенной модели, в которой предполагаем, что полученное решение на малом участке апертуры распространяется на весь преобразователь с точностью до множителя апертуры. На рис. 1б дан пример отображения построенной сетки для модели на основе МКЭ. На рис. 2 представлены рассчитанные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтра на подложке ниобата лития среза $64^\circ Y-X$, на рис. 3 представлено сравнение коэффициента передачи фильтра по результатам моделирования и эксперимента.

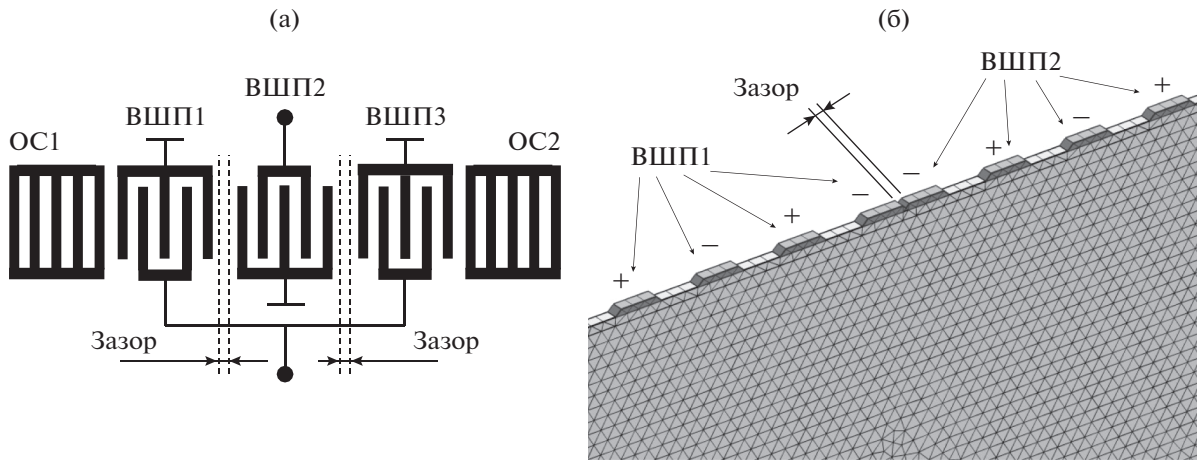


Рис. 1. Топологическая структура фильтра на ПАВ (а) и пример отображения построенной сетки для модели МКЭ для участка геометрии (б); ОС – отражательная структура.

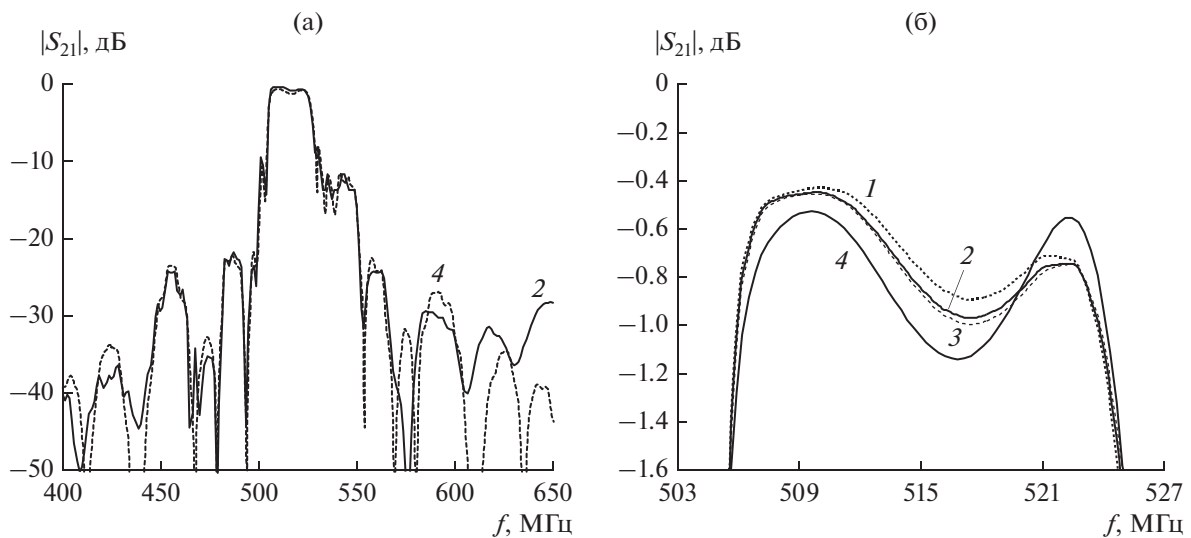


Рис. 2. Расчетный коэффициент передачи фильтра в диапазоне частот (а) и его подробный вид в диапазоне частот полосы пропускания (б), полученный МКЭ-1 (1), МКЭ-2 (2), МКЭ-3 (3) и МСМ (4).

При моделировании с помощью МКЭ не были учтены следующие эффекты: резистивные потери в электродах встречно-штыревого преобразователя (ВШП), дифракция акустической волны, потери за счет вязкостных свойств материала. Это сделано по следующим соображениям. Во-первых, полноценный учет дифракции и резистивных потерь возможен, но тогда необходимо прорисовать полную 3D-модель, что потребует задания большого числа элементов сетки, числа степеней свободы и, как следствие, больших вычислительных затрат и расчетного времени. Во-вторых, учет потерь на распространение связан с необходимостью введения в модель соответствующих коэффициентов, ошибочные значения которых приведут к дополнительным ошибкам в

расчетах. Поэтому выполнено сравнение двух подходов без учета данного вида потерь. В МСМ используются параметры, полученные численным методом (МКЭ) с помощью пакета COMSOL [6]. Сравнивая характеристики коэффициента передачи (см. рис. 2а), необходимо отметить наличие незначительного расхождения в области верхних частот, что, по-видимому, связано с большей величиной утечки акустической энергии. Можно отметить небольшой наклон зависимости АЧХ в полосе пропускания (см. рис. 2б), наблюдаемый при расчетах как МКЭ, так и МСМ. В расчетах с помощью МКЭ не стояла задача оптимизации по времени расчета, интересно было сравнение результатов расчета при одинаковых условиях, но разной плотности сетки, с це-

лю анализа сходимости расчета. Размер ячейки сетки, указанный в табл. 1, соответствует случаю разбиения на конечные элементы по глубине подложки. Расчетная сетка из конечных элементов в случае грубого разбиения ($\lambda/6$) в области под электродами все равно будет более плотной, в отличие от сетки в глубине подложки. Рисунок 1б отображает случай разбиения — 12 элементов на длину волны. Сравнительные данные расчета сведены в табл. 1. Как видно из рис. 2б, при расчетах с разными сетками абсолютное отклонение характеристик в полосе пропускания не превышает 0.1 дБ, причем при изменении размеров конечных элементов частоты основных резонансов не изменяются и дополнительные резонансы не возникают. Из сравнительного анализа видно, что выбранного размера — шесть элементов на длину волны — достаточно для предварительной оценки характеристики, а сходимость результата наблюдается уже при сетке в 12 элементов на длину волны. Требуемое время расчета для МКЭ многократно выше, чем для МСМ. Наибольшее расхождение на АЧХ наблюдается в области высоких частот, где преобладают “паразитные” объемные акустические волны (ОАВ), учет которых хотя и возможен в МСМ, но все же является приближенным.

Сопоставление результатов расчета коэффициента передачи, полученного на основе МСМ, с экспериментальными данными для фильтра на ПРМ представлено на рис. 3. Отличия характеристик в полосе пропускания не превышают 0.2 дБ, в полосе заграждения 5 дБ.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Оба рассмотренных подхода — и аналитический с применением МСМ, и численный анализ МКЭ в пакете COMSOL, являются современными и широко используются при проектировании. Первый подход позволяет получить результаты

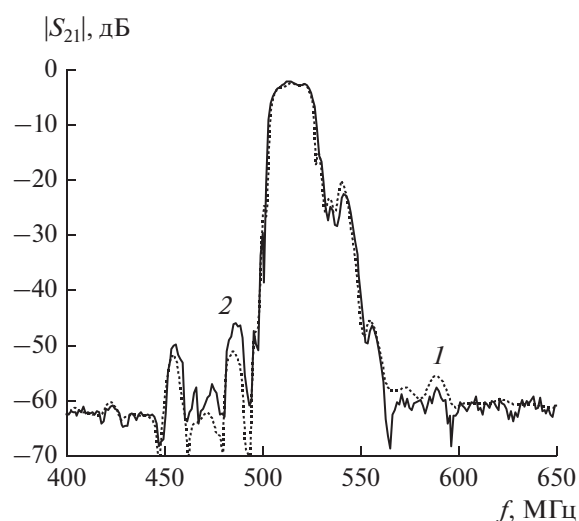


Рис. 3. Коэффициент передачи двухкаскадного фильтра: 1 — расчет МСМ, 2 — эксперимент.

гораздо быстрее и его применение целесообразно для предварительной оценки характеристик на этапе синтеза и корректировки топологии. Особенностью моделирования при данном подходе является необходимость предварительного нахождения МСМ-параметров. Авторами использованы МСМ-параметры, найденные численно по предложенному ранее [6] алгоритму анализа бесконечных тестовых структур. Численный подход, предполагающий прорисовку геометрии всего устройства в целом, обеспечивая большую точность расчетов, требует больших временных и вычислительных ресурсов. Предполагается, что данный комбинированный подход позволит объединить преимущества быстрой аналитической модели с точностью, обеспечиваемой при численном анализе.

Сравнение результатов моделирования МКЭ выполнено для трех размеров сетки, что позволя-

Таблица 1. Сравнение МКЭ и МСМ на примере результатов расчета фильтра на ПРМ

Параметр	МКЭ-1	МКЭ-2	МКЭ-3	МСМ
Дискретизация сетки, длин волн	1/6	1/12	1/16	—
Число элементов (областей) сетки	65016	114392	297845	—
Требуемая оперативная память, Гб	16	23	66	—
Число степеней свободы (DOF)	1286724	2832225	5838471	—
Число частотных точек	201	201	201	201
Время расчета	4 ч 50 мин	11 ч 20 мин	~35 ч	2 с
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц	22.5	22.5	22.5	22.5
Вносимые потери, дБ	-0.429	-0.454	-0.448	-0.52
Неравномерность в полосе пропускания, дБ	0.47	0.53	0.55	0.6
Центральная частота, МГц	515.625	515.625	515.625	515.625

Таблица 2. Применимость двух подходов к моделированию резонаторов и различных типов резонаторных фильтров

Моделируемая топологическая структура	МКЭ	МСМ
Двухмодовый фильтр на ПРМ на основе трех ВШП (классический DMS-фильтр)	+	+
Двухмодовый фильтр на ПРМ (с изменением шага электродных структур на краях ВШП)	+	+
Фильтр на ПРМ на основе двух ВШП	+	+
Двухпортовый резонатор	+	+
Однопортовый резонатор	+	+
Лестничный фильтр на основе резонаторов на ПАВ	+ ¹	+
Комбинированный фильтр (каскадное включение звеньев фильтра на ПРМ и звена на основе лестничного фильтра)	+ ¹	+
Фильтр на поперечно связанных модах	-	+ ²

¹ Каскадирование отдельных звеньев фильтра осуществляется во внешней программе, а расчет каждого звена возможен с помощью данного подхода МКЭ.

² Необходима некоторая модификация подхода МСМ для фильтров на поперечно связанных модах, см. [9].

ет судить о сходимости алгоритма. Учитывая резкое увеличение числа степеней свободы и времени расчета, авторы ограничились уменьшением размеров сетки до $\lambda/16$.

В настоящее время для реализации предельных селективных параметров широко использу-

ются сложные конструкции резонаторных фильтров (на ПРМ с изменением шага электродов на краях преобразователя, лестничные, гибридные) [1, 7]. В табл. 2 отражена возможность применения рассматриваемых подходов для расчета резонаторов и различных типов современных резонаторных ПАВ фильтров с малыми потерями. С целью оценки учитываемых в моделях факторов в табл. 3 приведены механизмы потерь и эффектов “второго” порядка, которые важны при расчете устройств на ПАВ, особенно для фильтров с малыми потерями. Важно отметить, что большинство вторичных эффектов учитывается с помощью МКЭ в “автоматическом” режиме, в то время как МСМ требует отдельной настройки или модификации. Предложенный подход на основе МКЭ, реализованный для “упрощенной” модели на участке геометрии с небольшим значением апертуры и периодическими условиями по апертуре, описывает и автоматически учитывает практически все акустические эффекты, не связанные с 3D-геометрией и величиной апертуры преобразователя. Если важны такие эффекты, как дифракция и волноводный эффект, необходимо переходить в 3D, что требует значительно больших временных затрат и повышает требования к аппаратному и программному обеспечению вычислений. Учет всех паразитных LC-элементов требует прорисовки геометрии в 3D, поэтому целесообразнее их вводить через эквивалентные элементы во внешних программах.

Таблица 3. Учет вторичных эффектов в рамках двух подходов

Эффекты “второго” порядка	Рассматриваемый в работе МКЭ	МСМ
Потери на распространение (за счет вязкостных свойств материала и воздушной нагрузки)	+ ¹	+
Направленность преобразователя	+	+
Паразитные отражения ПАВ внутри преобразователя, решетки	+	+
Масс-электрические отражения от отдельного электрода	+	+
Сигнал тройного прохождения (и другие сигналы многократного отражения)	+	+
Дифракционные потери	-	+
Резистивные потери в электродах	+ ¹	+
Возбуждение паразитных ОАВ, распространяющихся вглубь подложки	+	-
Генерация гармоник ПАВ	+	+
Потери на рассогласование	+	+
Наличие паразитных емкостей и индуктивностей контактных площадок и проводников, взаимной индуктивности	-	+
Неоднородность распределения заряда по ширине электродов преобразователя	+	+
Волноводный эффект	-	+

¹ МКЭ: требуется ввод дополнительных констант при настройке модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ результатов, полученных с помощью аналитического подхода на основе МСМ и численного на основе МКЭ, показал, что эффективность традиционного МСМ чрезвычайно высока. Сравнение двух подходов на качественном и количественном уровне показало сопоставимость результатов расчета, на количественном уровне отклонение не превышает 0.3 дБ в полосе пропускания и 5 дБ в полосе заграждения. Можно говорить об адекватности обоих подходов, в основе которых лежат принципиально разные положения. Используя МСМ при корректной физической интерпретации параметров модели удается приблизиться к точности МКЭ в полосе пропускания фильтра. В полосе заграждения требуется более детальный и строгий анализ ОАВ.

Таким образом, у разработчиков существует возможность отдавать предпочтение тому или иному способу моделирования в зависимости от конструктивных и топологических особенностей конкретных ПАВ-устройств, стадии разработки и доступных ресурсов. В целом рассматриваемые в работе подходы на основе МКЭ и МСМ подходят для расчета большого класса резонаторных фильтров.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность В.Р. Реуту (АЭК Дизайн) за ценные практические замечания и предоставление экспериментальных данных по фильтрам на ПАВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аристархов Г.М., Гуляев Ю.В., Дмитриев В.Ф. и др.* Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства / Под ред. Ю.В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2020.
2. *Hashimoto K.* Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications, Modelling and Simulation. Berlin: Springer, 2000.
3. *Зеленка И.* Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: материалы, технология, конструкция, применения. М.: Мир, 1990.
4. *Zhang Q., Chen Z., Chen Y. et al.* // *Micromachines.* 2021. V. 12. P. 141. <https://doi.org/10.3390/mi12020141>
5. *Shen J., Fu S., Su R. et al.* // *Electronics.* 2021. V. 10. P. 23. <https://doi.org/10.3390/electronics10010023>
6. *Койгеров А.С., Балышева О.Л.* // *РЭ.* 2021. Т. 66. № 12. С. 1224.
7. *Макаров В.М., Иванов П.Г., Данилов А.Л., Зая В.Г.* // *РЭ.* 2008. Т. 53. № 3. С. 377.
8. *Дмитриев В.Ф.* // *ЖТФ.* 2003. Т. 73. № 2. С. 99.