

# О влиянии технологических погрешностей топологии на частотные характеристики фильтров на поверхностных акустических волнах

А. Б. Иванов<sup>1</sup>, А. А. Левицкий<sup>2</sup>, П. С. Маринушкин<sup>2</sup>, А. Н. Масюгин<sup>1</sup>, Д. И. Поляков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Радиосвязь»

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет

**Аннотация:** в работе рассмотрено влияние погрешностей топологии встречно-штыревых преобразователей на частотные характеристики фильтров на поверхностных акустических волнах. С помощью модели  $\delta$ -источников выполнены расчеты для оценки чувствительности амплитудно-частотной характеристики к отклонению длины электродов преобразователей. Представлены результаты измерения характеристик фильтров при различной толщине металлизации.

**Ключевые слова:** фильтр, поверхностные акустические волны, технологические погрешности

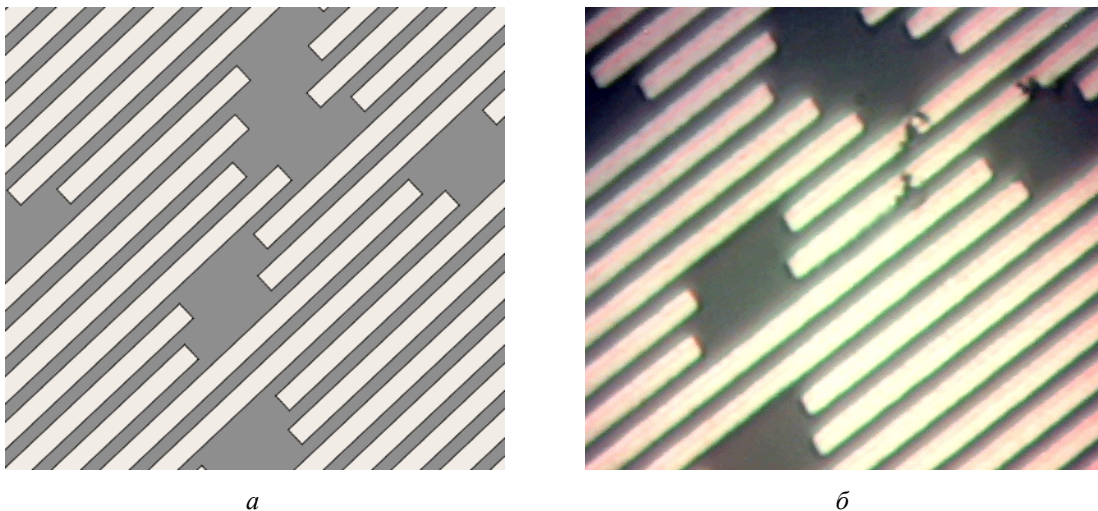
## 1. Введение

Повторяемость заданных частотных характеристик фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) зависит от ряда факторов, среди которых технологические погрешности воспроизведения топологии встречно-штыревых преобразователей (ВШП) являются наиболее характерными [1-4].

В данной работе рассмотрено влияние отклонения длины электродов ВШП и толщины металлизации на частотные характеристики полосно-пропускающих фильтров на ПАВ.

## 2. Влияние дефектов металлизации

Требуемая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра на ПАВ, как правило, обеспечивается за счет использования аподизованных ВШП. Пример фрагмента эквидистантного ВШП с аподизацией изменением перекрытия электродов представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Фрагмент встречно-штыревого преобразователя: *a* – исходная топология; *б* – металлизация изготовленного фильтра с локальными дефектами.

На рисунке 1 в левой части показан участок исходной топологии эквидистантного ВШП с расщепленными электродами. В правой части приведена фотография соответствующего фрагмента ВШП с локальными дефектами – частичными нарушениями и одним практически полным разрывом полосок металлизации. Подобные локальные дефекты, имеющие случайную природу, при отсутствии замыканий противофазных штырей ВШП, как правило, не приводят к заметному искажению АЧХ. Исследование влияния таких погрешностей на характеристики фильтров является достаточно сложной задачей [5].

Причинами появления систематической составляющей погрешности топологических элементов могут быть неточность воспроизведения размеров при выполнении литографии, неконтролируемые подтравы. В [5] представлен анализ влияния погрешностей длины электродов ВШП на АЧХ при аподизации с использованием прямоугольного «окна» и «окна» Ланцоша-Римана. Рассмотрим на примере весовых функций Хэмминга и Гаусса упрощенный подход, позволяющий оперативно провести аналогичную оценку.

Анализ изменения АЧХ, обусловленного отклонением длины электродов ВШП, удобно производить на основе модели  $\delta$ -источников, в соответствии с которой частотная характеристика  $K(f)$  эквивалентного ВШП трансверсального фильтра определяется соотношением [3, 4]:

$$K(f) = \sum_{n=1}^N (-1)^n W_n \exp(i2\pi f t_n), \quad (1)$$

где  $f$  – частота,  $N$  – число пар штырей ВШП,  $n$  – номера  $\delta$ -источников на электродах ВШП,  $t_n$  – значения времени выборки, соответствующие прохождению ПАВ через электроды ВШП,  $W_n$  – коэффициенты преобразования сигнала элементами ВШП в электрическое поле акустической волны,  $i = \sqrt{-1}$ .

Рассмотрим случай полосового фильтра на ПАВ, имеющего АЧХ близкую к прямоугольной. Как известно, импульсная характеристика и соответствующий ей закон изменения  $W_n$  эквивалентного трансверсального фильтра описывается функцией  $\sin(x)/x$ , где  $x = (\Delta f / 2) t$ ,  $\Delta f$  – полоса пропускания фильтра [1 – 4].

Для описания коррекции  $W_n$  вследствие погрешности воспроизведения длины штырей ВШП воспользуемся соотношением

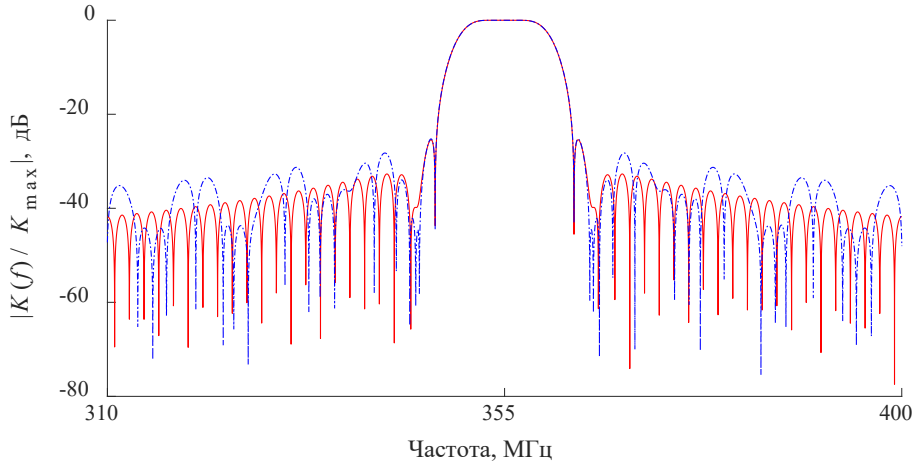
$$W_n' = \begin{cases} W_n - \frac{2\Delta L}{L_{\max}} \operatorname{sgn}(W_n), & |W_n L_{\max}| > 2\Delta L, \\ 0, & |W_n L_{\max}| \leq 2\Delta L, \end{cases} \quad (2)$$

где  $L_{\max}$  – апертура ВШП,  $\Delta L$  – отклонение длины штырей преобразователя.

При проведении количественной оценки  $W_n'$  примем отклонение длины штырей из-за технологических погрешностей равным  $\Delta L = 0,3$  мкм,  $L_{\max} = 50 \lambda_a$ , где  $\lambda_a = v_a / f_0$  – длина ПАВ,  $v_a$  – скорость распространения ПАВ ( $v_a = 3488$  м/с для указанной подложки). При этом в средней части ВШП, где длина электродов практически равна  $L_{\max}$ , относительное изменение длины штырей равно  $\Delta L / L_{\max} = \Delta L / (50 v_a / f_0) = 0,00061$  и, соответственно, изменение  $W_n$  составляет 0,122 %. Однако на краях ВШП, где перекрытие электродов мало, относительное изменение  $|W_n - W_n'| / W_n$  более существенно.

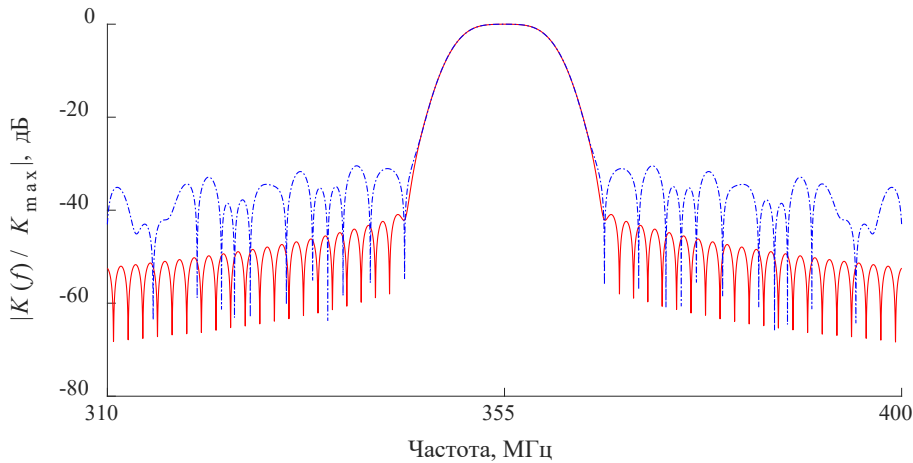
На рисунке 2 сплошной линией представлена нормированная относительно максимального коэффициента передачи  $K_{\max}$  частотная зависимость модуля  $K(f)$ , полученная на основе (1) для  $W_n \sim \sin(x)/x$  при использовании весовой функции Хэмминга вида  $F(t) = 0,54 + 0,46 \cos(\pi |t| / \tau)$ , где  $\tau = t_{\max}/2$ ,  $t_{\max}$  – время прохождения ПАВ через ВШП. Расчет выполнен для эквидистантного ВШП с аподизацией

изменением взаимного перекрытия электродов при следующих параметрах: центральная частота  $f_0 = 355$  МГц;  $\Delta f = 10$  МГц; материал подложки – ниобат лития, срез YZ. Параметр  $\tau$  выбран из условия  $\tau = (k + 1) / (\pi \Delta f)$ , где  $k$  взят равным 2 для получения соответствующего числа боковых лепестков зависимости  $W_n(t_n)$ . Частотная характеристика, рассчитанная с учетом отклонения длины штырей, показана на рисунке 2 штрихпунктирной линией.



**Рисунок 2.** Нормированный модуль коэффициента передачи  $K(f)$  для исходной структуры ВШП (сплошная линия) и с учетом отклонения длины штырей (штрихпунктирная линия) при использовании весовой функции Хэмминга.

Нормированные частотные зависимости модуля  $K(f)$  для исходной структуры ВШП и в случае отклонения длины штырей при использовании весовой функции Гаусса вида  $F(t) = \exp(-R (|t| / \tau))$ , где  $R = 20$ , представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Нормированный модуль коэффициента передачи  $K(f)$  для исходной структуры ВШП (сплошная линия) и с учетом отклонения длины штырей (штрихпунктирная линия) при использовании весовой функции Гаусса.

Из полученных характеристик видно, что отклонение длины штырей от заданных размеров приводит к ухудшению подавления сигнала вне полосы пропускания. При этом в полосе пропускания АЧХ практически не изменяется.

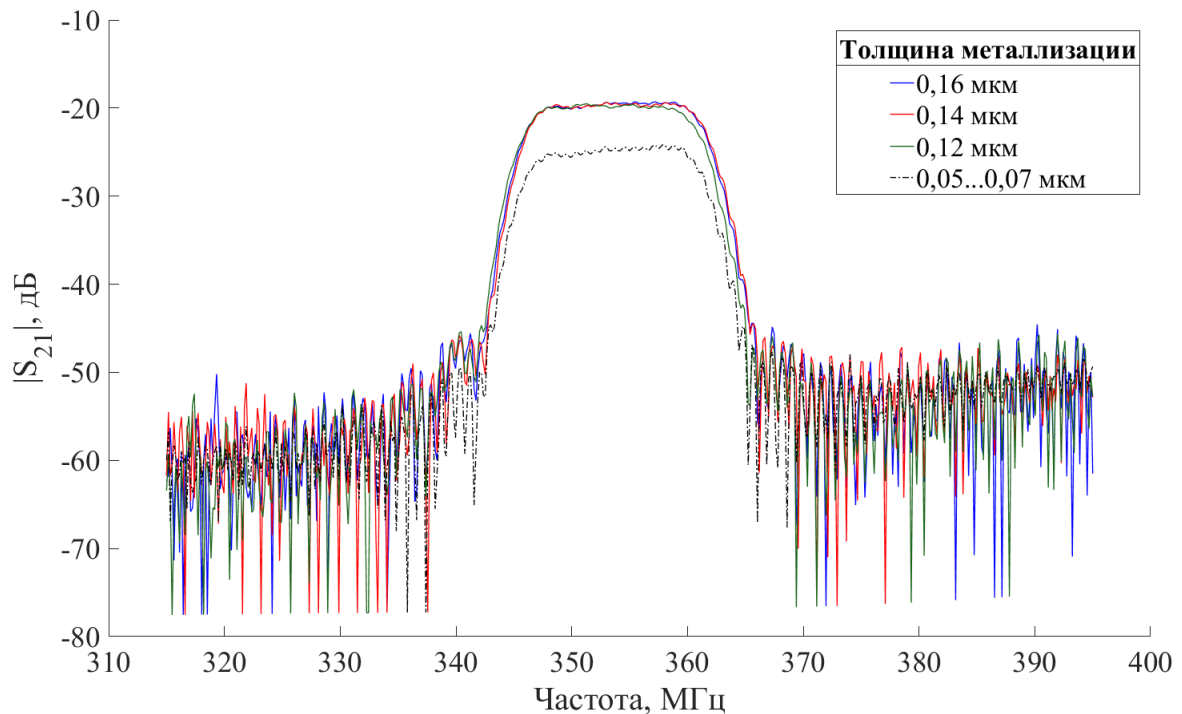
Частотная характеристика, рассчитанная для весовой функции Хэмминга характеризуется коэффициентом прямоугольности примерно 1,6 и внеполосным подавлением порядка  $-40$  дБ. Для данной функции, обеспечивающей формирование спектра сигнала противофазным сложением отдельных его составляющих [3], характерно относительно небольшое снижение весовых коэффициентов  $W_n$  на крайних

участках ВШП. Поэтому погрешность воспроизведения длины электродов приводит к умеренному снижению уровня внеполосного подавления – около 5 дБ.

Семейство функций Гаусса позволяет получить более высокое подавление вне полосы пропускания за счет более сильного «взвешивания». Однако, в связи с тем, что весовые коэффициенты  $W_n$  и соответствующие им участки перекрытия электродов на крайних лепестках функции аподизации очень малы, даже небольшие технологические погрешности могут приводить к существенному ухудшению внеполосного подавления.

### 3. Влияние толщины металлизации

Величина подтрава электродов ВШП, а также вносимые фильтром ПАВ потери в общем случае зависят от толщины металлизации. На рисунке 4 показаны АЧХ фильтра, измеренные для образцов с разной толщиной алюминиевой пленки (адгезионный подслои – ванадий толщиной 15 нм).



**Рисунок 4.** Изменение амплитудно-частотной характеристики фильтра на ПАВ при уменьшении толщины металлизации.

Критерием выбора параметров металлизации для фильтров ПАВ с точки зрения обеспечения величины электропроводности является условие  $h > l$ , где  $h$  – толщина металла,  $l$  – длина свободного пробега носителей заряда [6]. Для алюминия длина  $l$  может составлять порядка  $300 \text{ \AA}$ , поэтому толщина алюминиевых пленок выбирается во много раз больше  $l$  – до  $3000 \dots 5000 \text{ \AA}$  ( $0,3 \dots 0,5 \text{ мкм}$ ). На практике, однако, удельное сопротивление пленок алюминия, имеющих толщину  $0,1 \text{ мкм}$  и более, приближается к удельному сопротивлению объемного материала.

Анализ экспериментальных зависимостей, приведенных на рисунке 3, показывает, что при уменьшении толщины металлизации от  $0,16 \text{ мкм}$  до  $0,12 \text{ мкм}$  наблюдается небольшое возрастание среднего уровня потерь и неравномерности АЧХ фильтра в полосе пропускания. Некоторые образцы также показывали незначительное смещение центральной частоты. При дальнейшем снижении толщины проводников – до нескольких сотен ангстрем – существенно возрастают потери в полосе пропускания.

### 3. Заключение

Выполненные на основе модели  $\delta$ -источников оценки показывают, что с увеличением погрешности воспроизведения элементов ВШП наблюдается возрастание неравномерности АЧХ и существенное изменение уровня подавления вне полосы пропускания. При этом использование оконных функций с сильным «взвешиванием» может приводить к существенному ухудшению внеполосного подавления в случае отклонения длины электродов ВШП.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

#### Список литературы

1. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / О. Л. Балышева [и др.] ; под ред. Ю. В. Гуляева. – М. : Радиотехника, 2012.
2. Hashimoto K. Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications. Modelling and Simulation / Springer Science & Business Media, 2000.
3. Орлов В. С., Бондаренко В. С. Фильтры на поверхностных акустических волнах. – М. : Радио и связь, 1984.
4. Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология, применение : пер. с англ. / ред. : Г. Мэттьюз. – М. : Радио и связь, 1981.
5. Рупкус С. С., Маркявичс В. П. Исследование погрешностей параметров фильтров на поверхностных акустических волнах // Periodica Polytechnica Electrical Engineering. – 1982. – Vol. 26. – No. 3-4. – 281-293.
6. Расчет и конструирование АПВ-фильтров. – Новосибирск : Наука, 1982.