

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.10>

УДК: 621.377.22

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ НА ЧАСТОТАХ ВЫШЕ 6 ГГц

Сучков С.Г., Николаевцев В.А., Сучков Д.С.

СГУ имени Н.Г. Чернышевского
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2024 г.

Аннотация. В работе исследовано взаимодействие поверхностных акустических волн (ПАВ) с отражателями и встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) с электродами с высоким аспектным отношением (ВАО-электродами). Установлены условия резонансного отражения и прохождения ПАВ через отражатель и эффективного преобразования ВШП мощности ПАВ в электрическую мощность на нагрузке. Показана реальная возможность создания эффективных устройств на ПАВ (фильтры, линии задержки, резонаторы, радиочастотные идентификационные метки) на частотах свыше 6 ГГц (до 12-15 ГГц) с применением ВАО-электродов.

Ключевые слова: акустоэлектроника, поверхностная акустическая волна, электроды с высоким аспектным отношением, радиочастотные идентификационные метки на ПАВ, линии задержки на ПАВ, резонаторы на ПАВ, фильтры на ПАВ.

Автор для переписки: Николаевцев Виктор Андреевич, nikolaevcev@ya.ru

Введение

Акустоэлектронные устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) – фильтры, резонаторы, линии задержки, радиочастотные идентификационные метки (РИМ) вследствие их компактности и высоких технических характеристик обработки радиосигналов, широко применяются в диапазонах частот от 50 МГц до 3 ГГц (экспериментально до 6 ГГц) в мобильных средствах связи и телекоммуникаций, радиочастотной идентификации. В последнее время в связи с повышением диапазонов частот мобильной связи, а также с повышением частот обработки сложных сигналов требуются аналогичные устройства, работающие в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн, то есть на частотах выше 6 ГГц.

В технике устройств на ПАВ традиционно считается, что с повышением рабочих частот необходимо уменьшать толщину электродов для снижения «массовой» нагрузки и предотвращения переотражений ПАВ внутри встречно-штыревого преобразователя (ВШП), несмотря на увеличение вносимых потерь вследствие возрастания омического сопротивления электродов. Исходя из этих требований диапазон промышленно выпускаемых устройств на ПАВ ограничен частотами около 3 ГГц с толщиной электродов не менее 100 нм, а в экспериментальных исследованиях устройства на ПАВ создавались на частотах 6 ГГц с толщиной электродов 40 нм [1], и даже на частотах до 17 ГГц [2-5] с толщиной электродов до 12 нм.

Ранее были получены теоретические результаты по исследованию распространения и отражения ПАВ в диапазоне частот около 6 ГГц [6] в структурах из алюминиевых электродов увеличенной толщины (до 700 нм), то есть электродов с высоким аспектным отношением (ВАО-электроды), которые показали, что с увеличением толщины электрода до размеров, сравнимых с длиной поперечной объемной акустической волны в материале электрода, коэффициенты отражения и прохождения ПАВ изменяются немонотонно и возникают ограниченные области минимальных и максимальных значений этих коэффициентов. Как будет показано в данной статье,

акустические колебания в ВАО-электродах распространяются в виде волн Лэмба и их можно использовать как для резонансного снижения уровня переотраженных внутри ВШП ПАВ, так и для резонансного увеличения коэффициента отражения от электродов, что позволяет повысить эффективность устройств на ПАВ в СВЧ диапазоне.

Технологические возможности создания структур из ВАО-электродов были показаны в работе [7], где продемонстрирована возможность создания структуры в виде решетки наноразмерных элементов с высоким аспектным отношением из электронного резиста ПММА (рис. 1) с помощью технологии электронно-лучевой литографии. При напылении металла на структуры такого типа можно сформировать структуру ВШП с ВАО-электродами.

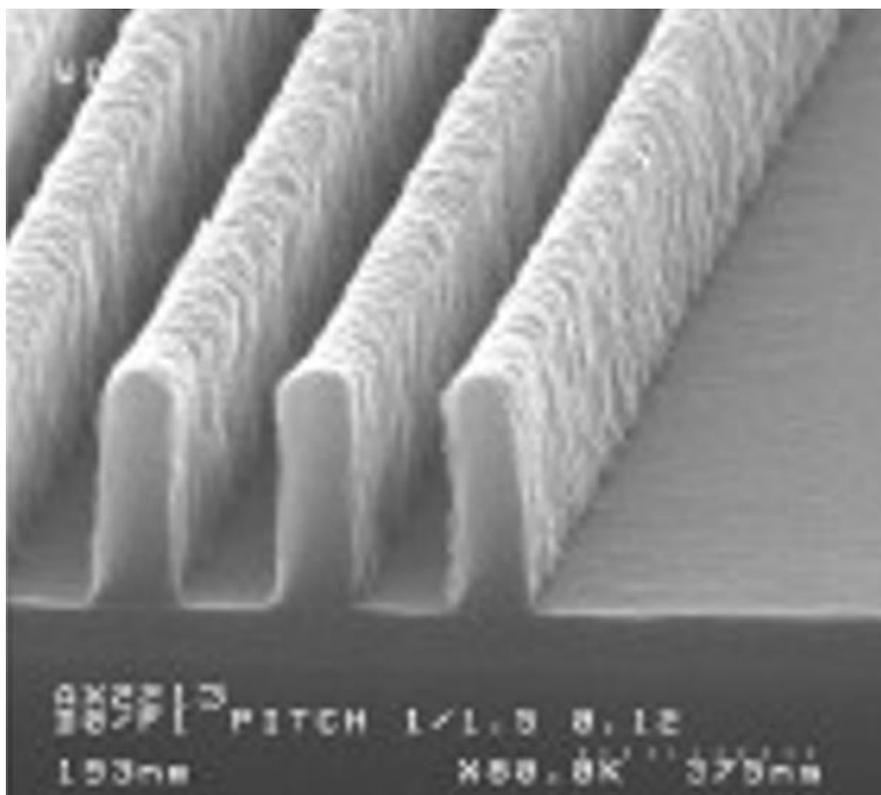


Рис. 1. Структуры с высоким аспектным отношением из ПММА.

Возможна и другая технология создания ВШП из ВАО-электродов, использующая прямую электронную литографию и плазмохимическое травление в индуктивно-связанной плазме [8].

Другой аспект использования ВАО-электродов состоит в выборе наиболее подходящего металла для их формирования. Так алюминиевая пленка,

используемая для создания ВАО-электродов, состоит из кристаллитов размером около 0.2 мкм [9], которые сравнимы с размером ВАО-электродов, что ухудшает их упругие и электрические характеристики. Кроме того, необходимо также обеспечить их высокую адгезию к подложке, для чего дополнительно напыляется адгезионный подслои, например, ванадия, толщиной около 20 нм. Также алюминиевые электроды из-за относительно низкой температуры плавления не выдерживают больших мощностей сигнала. Поэтому в данной статье для изготовления ВАО-электродов предлагается рассмотреть молибден, который при напылении создаёт высокоадгезионные пленки с мелкодисперсной структурой, у которых мало изменяются плотность и упругие константы, а электропроводность немного (в 2 раза) меньше объемного алюминия, но сравнима с электропроводностью алюминиевой пленки, состоящей из кристаллитов.

В настоящей статье приводятся результаты теоретического исследования, на основе применения программного комплекса COMSOL Multiphysics, основных элементов акустоэлектронных устройств – встречно-штыревых преобразователей (ВШП) и отражателей ПАВ – с ВАО-электродами. Проводится сравнение экспериментальных характеристик РИМ на ПАВ с тонкими электродами (40 нм) и с ВАО-электродами толщиной около 500 нм для диапазона частот 6 ГГц. Также проводится сравнение расчетных АЧХ фильтров на ПАВ с ВАО-электродами (260 нм) и тонкими (40 нм) электродами на частоте 12 ГГц.

1. Модель взаимодействия ПАВ со структурами ВАО-электродов

В металлических электродах, имеющих толщину, сравнимую с длиной акустической волны (ВАО-электроды), сформированных на поверхности кристалла, при прохождении ПАВ возбуждаются волны Лэмба, распространяющиеся в электродах перпендикулярно поверхности кристалла. Таким образом, в ВАО-электродах могут возникнуть резонансы на волнах

Лэмба, которые могут существенно повлиять на прохождение ПАВ под такой электродной структурой или на отражение ПАВ от нее.

Для исследования таких взаимодействий использовался программный пакет COMSOL Multiphysics, в котором проводилось 2D-моделирование процессов распространения ПАВ в кристалле с электродной структурой на его поверхности. Для расчетов использовались модули AC/DC, Piezoelectricity, Electrical Circuit [10]. В области, заполненной пьезоэлектрическим материалом, решались уравнения упругой пьезосреды в квазистатическом и линейном приближениях

$$\begin{cases} \rho \ddot{u}_i = c_{ijlm} \partial_j \partial_l u_m + e_{lij} \partial_j \partial_l \varphi \\ \varepsilon_0 \varepsilon_{ij} \partial_i \partial_j \varphi - e_{ijl} \partial_i \partial_j u_l = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность кристалла, u_i – i -ая компонента упругих смещений в кристалле, c_{ijlm} – тензор модулей упругости, e_{ijl} – тензор пьезомодулей, φ – электростатический потенциал, ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, ε_{ij} – компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости кристалла, точки обозначают дифференцирование по времени, символы ∂_i обозначают дифференцирование по i -й координате, по повторяющимся индексам подразумевается суммирование.

В области металлических электродов решалась система уравнений Кристоффеля

$$\rho \ddot{u}_i = c_{ijlm} \partial_j \partial_l u_m. \quad (2)$$

На границах пьезоэлектрик-металл выполнялись граничные условия непрерывности механических напряжений $\sigma_{ij}^{\text{пьез}} = \sigma_{ij}^{\text{мет}}$ и упругих смещений $u_i^{\text{пьез}} = u_i^{\text{мет}}$, равенства нулю тангенциальной составляющей напряженности электрического поля $E_1^{\text{пьез}} = 0$ или, что то же самое, граничное условие плавающего потенциала

$$\varphi = \text{const}, \quad (3)$$

а также граничное условие для нормальной составляющей электрической индукции на границе кристалла и металлического электрода площадью S

$$\iint_S D_3^{\text{пьез}} dS = -Q_{\text{пов}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{пов}}$ – плотность заряда на поверхности электрода, граничащей с кристаллом.

Для отражателя ПАВ в виде системы параллельных штырей, замкнутых по их концам, в граничном условии (3) константа является общей для всех электродов отражателя. Общий заряд отражателя в этом случае находится как интеграл по поверхности всех штырей отражателя в выражении (4). Для отражателя с изолированными штырями потенциал φ для каждого электрода имеет свое, меняющееся во времени, значение. Величины наводимых зарядов на электродах для каждого штыря находятся как интеграл по поверхности соответствующего штыря в выражении (4).

Для снижения сигнала прямого прохождения встречно-штыревые преобразователи рассматриваем с нечетным числом электродов, в которых нечетные электроды соединены с корпусом. Тогда для электродов выходного ВШП, нагруженного на активную нагрузку, потенциал на электродах с нечетными номерами приравнивается к нулю, а граничные условия для электродов с четными номерами задаются граничным условием (4), соотношением, определяющим силу тока в нагрузке, и законом Ома для внешнего участка цепи

$$\left\{ \begin{array}{l} \iint_S D_3^{\text{пьез}} dS = -Q_{\text{пов}} \\ \dot{Q}_{\text{пов}} = I \\ I = \frac{\varphi}{R_n} \end{array} \right., \quad (5)$$

где R_n – сопротивление внешней активной нагрузки, равное 50 Ом, φ – потенциал на шине сигнальных (четных) электродов ВШП.

Для учёта сопротивления электродов ВШП и статической межэлектродной ёмкости используется модуль Electrical Circuit. К каждому электроду ВШП последовательно подключается сопротивление номиналом, рассчитанным по формуле для сопротивления участка цепи

$$R_{\text{эл}} = \rho \frac{2W}{m\lambda h}, \quad (6)$$

где ρ – удельная проводимость металла, W – апертура ВШП, m – коэффициент металлизации, λ – длина волны ПАВ, h – толщина ВАО-электродов (толщина металлизации).

Зависимость статической межэлектродной ёмкости между двумя штырями от параметров m и h отдельно моделируется в пакете COMSOL, поскольку стандартная формула [11] справедлива только для тонких электродов. Рассчитанная ёмкость используется для моделирования токопрохождения между соседними электродами.

Для свободной границы кристалла действуют граничные условия нулевых механических напряжений на свободной границе $\sigma_{i3}^{\text{пъез}} = 0$ и непрерывности нормальной составляющей электрической индукции $D_3^{\text{пъез}} = D_3^{\text{мет}}$ (то есть для нулевой поверхностной плотности заряда $\sigma_{\text{пов}} = D_3^{\text{мет}} - D_3^{\text{пъез}} = 0$).

Для проведения вычислительной процедуры нахождения всех полей в рассматриваемых структурах методом конечных элементов необходимо ограничить область рассматриваемого пространства. Для устранения отражений акустических волн от границ области на боковых и нижней границах кристалла располагаются поглощающие слои. Подобранные коэффициенты потерь и толщины слоев обеспечивают амплитуды нежелательных в расчете отраженных от поглотителя волн не более 0.01% от амплитуды упругих смещений ПАВ.

На рис. 2 показана геометрия модельной структуры для исследования взаимодействия ПАВ с ВАО-электродами на поверхности кристалла. Коэффициенты отражения (в точке 3) $R = 100 \cdot (u_1/u_0)^2$ и прохождения (в точке 4) $D = 100 (u_2/u_0)^2$ рассчитываются в процентах, u_0 – амплитуда ПАВ в источнике (область 1), u_1 и u_2 – y -компоненты упругих смещений ПАВ в точках 3 и 4.

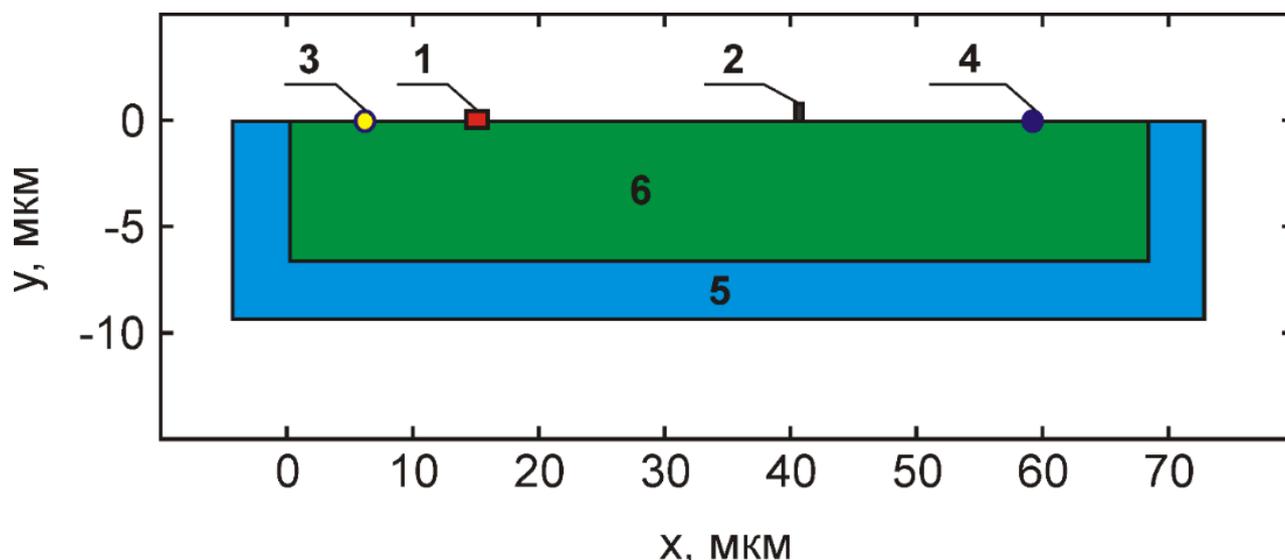


Рис. 2. Геометрия модельной структуры. 1 – область возбуждения ПАВ, 2 – ВАО-электрод, 3 – точка, в которой вычисляется амплитуда u_1 отраженной ПАВ, 4 – точка, в которой вычисляется амплитуда u_2 прошедшей ПАВ, 5 – область поглотителя акустических волн, 6 – кристалл.

2. Расчет коэффициентов отражения и прохождения ПАВ при взаимодействии с ВАО- электродами

Отражатели, используемые в приборах на ПАВ, обычно выполняются в виде группы параллельных металлических штырей или группы канавок, размещенных на поверхности кристалла. В данной статье структуры в виде канавок не рассматриваются, поскольку известно [6], что для таких структур рассеяние в объем монотонно возрастает с ростом их глубины, в то время как для штыревых структур имеет место квазипериодическая зависимость. В качестве металла для наносимой на поверхность кристалла металлизированной структуры, как указывалось выше, выбирается молибден. Плотность молибдена ($\rho=10220 \text{ кг/м}^3$) более чем в три раза превосходит плотность алюминия, а модуль Юнга ($E=336.3 \text{ ГПа}$) – почти в 5 раз [12], что предоставляет существенные конструктивные преимущества перед алюминием при создании структур с ВАО-электродами.

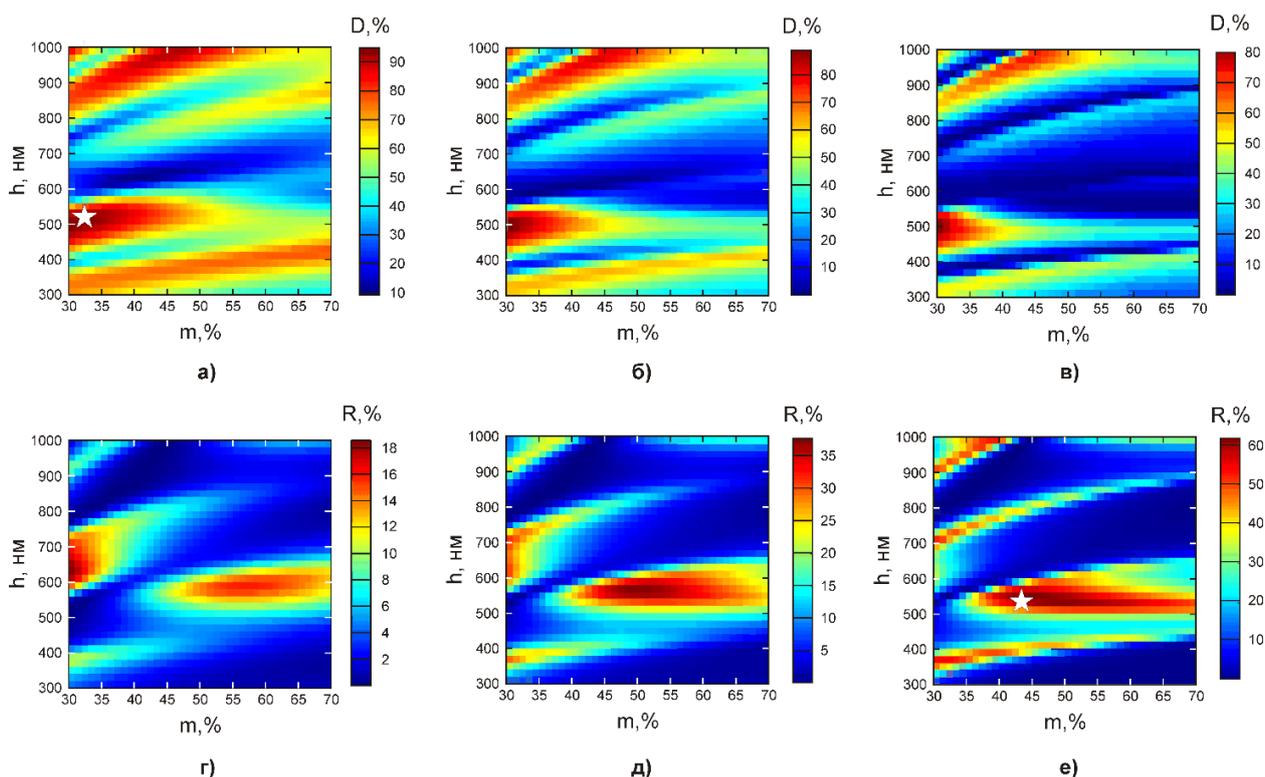


Рис. 3. Карты коэффициентов прохождения (а – 1 электрод, б – 2 электрода, в – 4 электрода) и отражения (г – 1 электрод, д – 2 электрода, е – 4 электрода) ПАВ от группы замкнутых молибденовых электродов.

Расчеты проводились для ВАО-электродов на свободной поверхности $Y+128^\circ$ -среза ниобата лития. Для дальнейшего сравнения с имеющимися экспериментальными данными [1] частота ПАВ выбрана 6 ГГц. Результаты расчетов коэффициентов отражения и прохождения ПАВ для групп штырей в количестве $n = 1, 2$ и 4 в зависимости от высоты электрода h (толщины металлизации) и его ширины $b = mp$, где $p = \lambda/2$ (половина длины волны ПАВ), а m – коэффициент металлизации, представлены на рис. 3.

На рис. 3а, 3б и 3в отчетливо видны две области высокого (до 80%) коэффициента прохождения ПАВ через группы электродов, что является важным для конструирования ВШП с амплитудно-частотной характеристикой с малой изрезанностью в полосе пропускания. На рис. 3г, 3д и 3е отчетливо видны области высокого (выше 10%) коэффициента отражения при других коэффициентах металлизации. Таким образом, если ВШП изготовить из ВАО-электродов с $h = 500$ нм, $m = 30-35\%$, а отражатель с той же высотой, но другим коэффициентом металлизации $m = 35-50\%$, то тогда можно изготовить,

например, эффективные радиочастотные идентификационные метки (РИМ) как с единичными отражателями ($m = 50\%$) с высоким коэффициентом отражения (для многодиапазонных РИМ [13]), так и РИМ со многими отражателями с небольшими коэффициентами отражения ($m = 35-45\%$) для традиционных конструкций РИМ [14]. Из рис. 3, видно, что сумма коэффициентов отражения и прохождения не равна 100%. Это связано с тем, что в расчётах учитываются вязкоупругие потери в кристалле и металлических электродах, а также потери на рассеяние ПАВ в объём.

3. Анализ акустических полей при взаимодействии ПАВ с ВАО-электродами

Рассмотрим процессы, происходящие при прохождении и отражении ПАВ через структуру из одного и четырех ВАО-электродов. На рис. 4а представлены результаты расчета пространственного распределения компоненты упругих смещений u_y для ПАВ в кристалле и симметричной волны Лэмба в электроде при резонансном прохождении ПАВ через единичный отражатель, а на рис. 4б представлены результаты расчёта пространственного распределения компоненты упругих смещений u_x для ПАВ в кристалле и антисимметричной волны Лэмба в электроде при резонансном отражении ПАВ от отражателя из четырёх электродов.

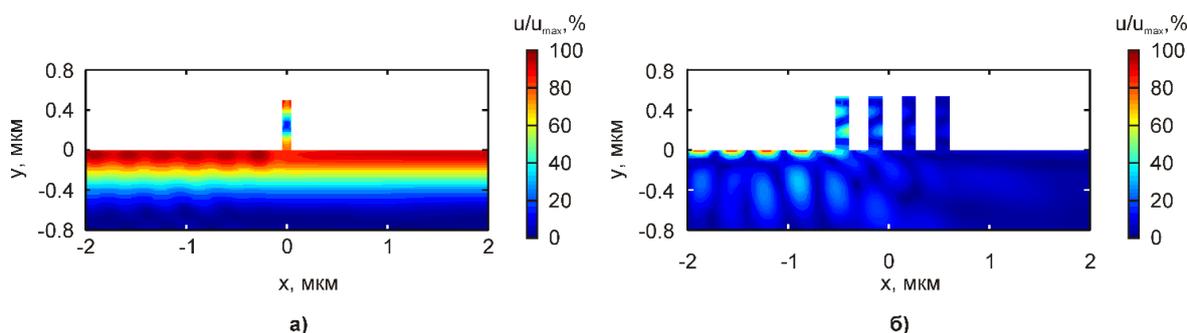


Рис. 4. Прохождение ПАВ под отражателями из ВАО-электродов:

а) $h = \lambda_L/2$ – полуволновый резонатор симметричной волны Лэмба.

Параметры штырей соответствуют звёздочке на рис. 3а;

б) $h = 3\lambda_L/2$ – полутораволновый резонатор антисимметричной волны Лэмба.

Параметры штырей соответствуют звёздочке на рис. 3е.

На рис. 4а представлено распределение амплитуд ПАВ и волны Лэмба в электроде, когда его высота равна половине длины волны симметричной моды Лэмба, то есть электрод является полуволновым резонатором. Видно, что в этом случае ПАВ проходит под электродом практически без отражения.

При полуволновом или кратном ему резонансе для антисимметричной моды Лэмба возникает интенсивное отражение энергии ПАВ (рис. 4б). Видно также небольшое излучение энергии в объем.

В системе из 4 замкнутых ВАО-электродов имеет место интерференция колебаний нескольких связанных как акустически (через поверхность кристалла), так и электрически, резонаторов. Расчёты показывают, что рассеяние в объем снижается при увеличении числа штырей.

Для системы из 4 электрически незамкнутых ВАО-электродов расчёты показывают, что коэффициент отражения ПАВ от нее ниже на 5% относительно замкнутой системы. Это обусловлено тем, что в системе с разомкнутыми электродами нарушается синхронизм распределения потенциала в электродах и поверхностного потенциала ПАВ из-за наличия емкостей между штырями, вносящих сдвиг фаз.

4. Моделирование ВШП ПАВ

Для сравнения результатов моделирования РИМ на ПАВ с ВАО-электродами с экспериментальными данными, имеющимися в [1] для РИМ с тонкими электродами, необходимо исследовать эффективность ВШП. Частотные характеристики ВШП в режимах возбуждения и приема ПАВ, как показали точные расчеты с учетом затухания ПАВ и рассеяния в объем, практически не отличаются. Поэтому рассмотрим только режим приема ПАВ. Выбор оптимальных коэффициентов металлизации ВШП и отражателей для одной толщины молибдена можно осуществить с использованием карты коэффициента преобразования акустической мощности ПАВ в электрическую мощность в нагрузке.

На рис. 5 представлены результаты расчетов коэффициента преобразования для ВШП из 15 штырей в виде карты коэффициента преобразования в ВШП акустической мощности ПАВ в электрическую мощность в нагрузке.

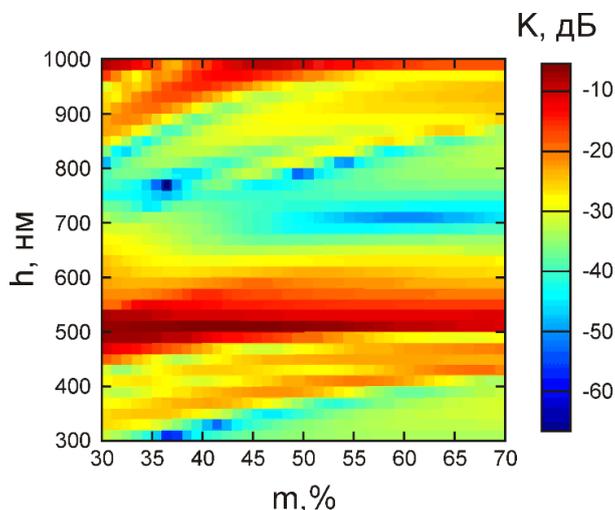


Рис. 5. Карта коэффициента преобразования акустической мощности ПАВ в электрическую мощность в нагрузке.

На рис. 5 отчётливо видны две области максимального приёма ВШП. Эти области соответствуют областям максимального прохождения ПАВ через отражатели на рис. 3а, 3б и 3в. Эффективный приём ПАВ, таким образом, происходит при параметрах $h = 520$ нм и $m = 40\%$.

На рис. 6 изображена картина модуля акустических смещений u_y в кристалле и в ВАО-электродах в режиме приёма ПАВ, падающей на ВШП слева.

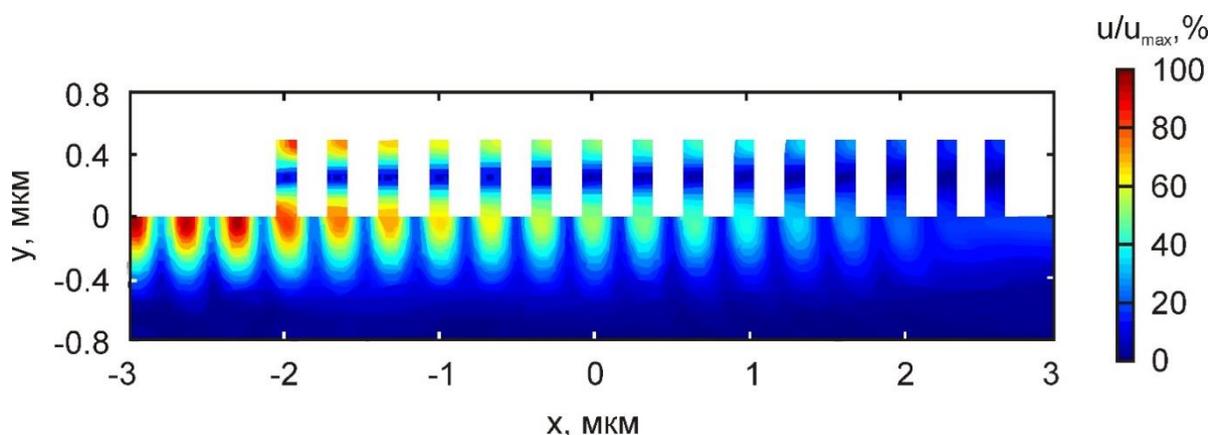


Рис. 6. Приём ПАВ ВШП с ВАО-электродами.

Слева от ВШП отчетливо видна стоячая волна, образованная интерференцией падающей на ВШП ПАВ и вторичной волной, возбуждаемой ВШП, а отражения от электродов отсутствуют.

5. Сравнение характеристик РИМ с тонкими электродами и с ВАО-электродами

Для выяснения преимущества систем с ВАО-электродами рассчитаем временную характеристику сигналов РИМ на ПАВ с эквидистантными ВАО-электродами ($h = 520$ нм), по аналогии с [1], в диапазоне частот 6 ГГц и проведем сравнение с экспериментальными результатами РИМ с электродами толщиной 40 нм [1].

Сначала были проведены расчёты частотной зависимости элемента матрицы рассеяния отражателей S_{11} . Затем для получения временного отклика РИМ вычислялось обратное фурье-преобразование в виде свертки функции S_{11} со спектром радиоимпульса опроса длительностью $\Delta t = 1.3$ нс с частотой заполнения $f_0 = 6037.5$ МГц, также как это было сделано в [1] для корректности сравнения результатов.

Из рис. 7 видно, что для РИМ на ПАВ с ВАО-электродами потери кодовых сигналов в среднем на 4 дБ ниже, чем для РИМ на ПАВ с электродами 40 нм [1]. Указанное небольшое преимущество ВАО-электродов связано со снижением омического сопротивления электродов. Но, если использовать возможность управления коэффициентом отражения в ВАО-отражателях изменением ширины электрода, то можно уменьшить количество электродов в отражателях и увеличить коэффициенты отражения, что при расположении отражателей по разные стороны от ВШП, как показывают расчеты, позволит снизить потери кодовых сигналов на 6-8 дБ.

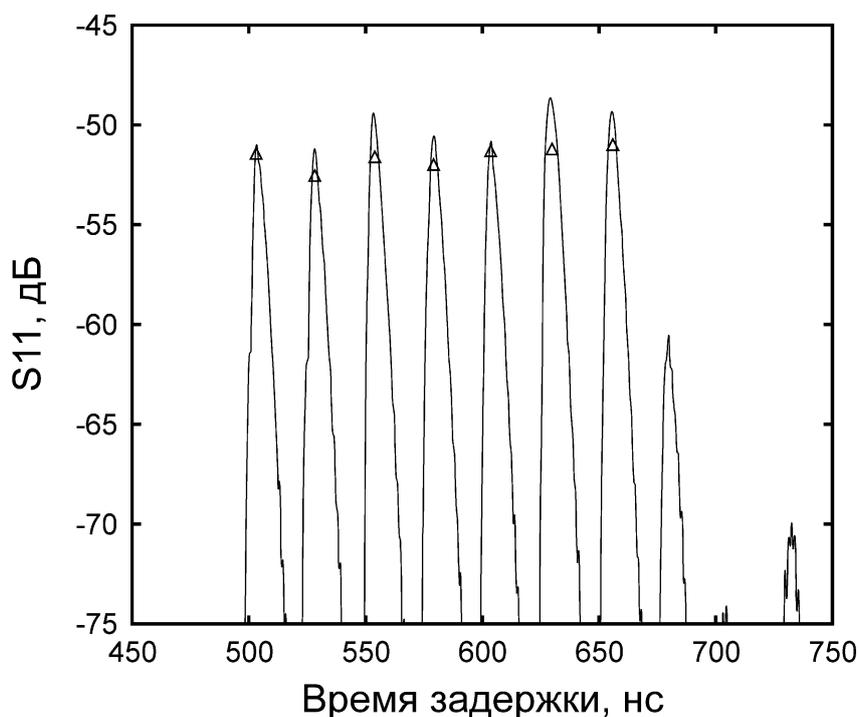


Рис. 7. Сравнение кодовых сигналов РИМ с ВАО-электродами (520 нм) (кривая) и сигналов РИМ с тонкими (40 нм) алюминиевыми электродами (треугольниками) [1].

6. АЧХ фильтра на ПАВ с ВАО-электродами в диапазоне 12 ГГц

Разработанные модели анализа акустических полей в системах с ВАО-электродами на поверхности пьезокристаллов были использованы для исследования фильтра на ПАВ на частоте 12 ГГц. Была рассмотрена простейшая структура из двух одинаковых неаподизованных ВШП, расположенных на расстоянии 50 мкм друг от друга. Количество штырей $N = 15$, полупериод ВШП с тонкими электродами составляет 128 нм, а у ВШП с ВАО-электродами – 165 нм.

На рис. 8 представлены рассчитанные АЧХ таких фильтров. Двустороннее согласование ВШП с генератором и нагрузкой снижает потери на 8 дБ и позволяет достигнуть на частоте 12 ГГц вносимых потерь 15 дБ. Аналогичный ПАВ фильтр с тонкими штырями имеет вносимые потери 37 дБ, его АЧХ является изрезанной из-за сильных переотражений ПАВ между ВШП и внутри ВШП, а полоса пропускания сужена, как у резонаторов. Изрезанность на вершине АЧХ фильтра с ВАО-штырями, не отражающими ПАВ, является следствием интерференции со вторичной ПАВ, электрически возбуждаемой

выходным ВШП. Это наблюдается в фильтрах на ПАВ на подложках из сильных пьезоэлектриков. Несовпадение по частоте максимума полосы пропускания и максимальной изрезанности связано с неидентичностью условий возбуждения и приема ПАВ ВШП, поскольку при возбуждении ПАВ сигнал подаётся одновременно на все штыри ВШП, а при приёме амплитуда ПАВ уменьшается при прохождении последовательно под штырями ВШП, что приводит к нарушению симметрии импульсного отклика.

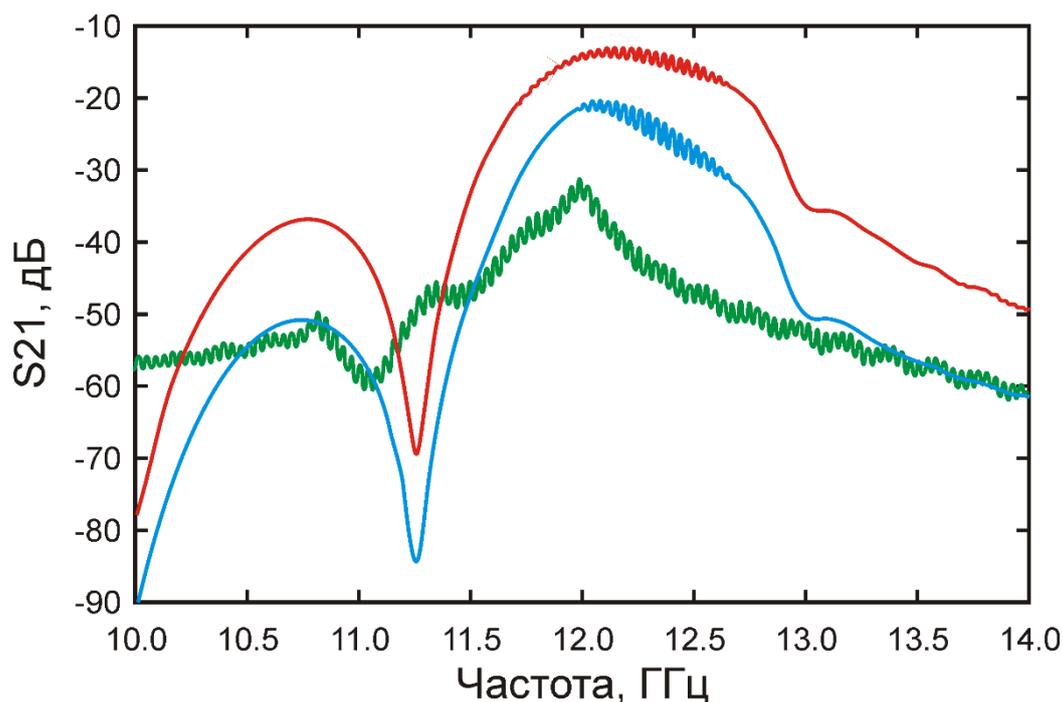


Рис. 8. АЧХ фильтра на ПАВ с ВАО-электродами (толщина 260 нм). Красная линия – при двустороннем согласовании индуктивностью 23 нГн, синяя линия – для несогласованных ВШП, зелёная линия - АЧХ фильтра на ПАВ с тонкими электродами (40 нм).

Для линии задержки на ПАВ с такими ВШП с ВАО-электродами при расстоянии между ВШП 100 мкм время задержки составит 25 нс, а вносимые потери на частоте 12 ГГц будут 16 дБ. При расстоянии между ВШП 400 мкм время задержки составит 100 нс, а вносимые потери будут 25 дБ. Для практически важной задержки 330 нс расстояние между ВШП составит 1.32 мм, а вносимые потери будут около 52 дБ.

Заключение

Проведенные исследования взаимодействия ПАВ с отражателями и ВШП с ВАО-электродами показали реальную возможность создания эффективных устройств на ПАВ (фильтры, линии задержки, резонаторы, РИМ) на частотах свыше 6 ГГц. Современные технологии дугового плазменного осаждения металлических пленок из тугоплавких металлов, электронно-лучевой литографии высокого разрешения и ионно-плазменного травления в индуктивно связанной плазме с применением плазмостойких резистов высокого качества дают возможность создания ВШП и отражателей ПАВ с ВАО-электродами ($h/b > 3$) для использования в разработках эффективных акустоэлектронных устройств на ПАВ на частотах от 6 ГГц до 12-15 ГГц.

Литература

1. Ю.В. Гуляев, С.Г. Сучков, С.С. Янкин, С.А. Никитов, Д.С. Сучков, В.П. Плесский. Радиочастотная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах в диапазоне частот 6 ГГц // Радиотехника и электроника, 2015, Т. 60, № 4, с. 429-432. <https://doi.org/10.7868/S0033849415040087>
2. K. Yamanouchi, J.A. Qureshi, H. Odagawa. 5-15 GHz Range Surface Acoustic Wave Filters Using Electrode Thickness Difference Type And New Reflector Bank Type Of Unidirectional Interdigital Transducers. // Proceedings of the Ultrasonics Symposium, P. 61–64, 1997. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1997.662980>
3. M.A. Mohammad, J. Conway, B. Liu, Y. Yang, T.-L. Ren. High Performance Lithium Niobate Surface Acoustic Wave Transducers In The 4–12 Ghz Super High Frequency Range // Journal of Vacuum Science and Technology B, V. 33, P. 06F401, 2015. <https://doi.org/10.1116/1.4935561>

4. A. Badar, A. Dow, C. Popov, U. Schmid, N.P. Kheran. Super-High-Frequency SAW Transducer Utilizing AlN/Ultrananocrystalline Diamond Architectures // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, V. 60, №. 8, P. 1581-1586, 2013. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2013.2738>
5. N.-H. Chen, J.-C. Huang, C.-Y. Wang, F.-S. Huang. Fabrication Of A GHz Band Surface Acoustic Wave Filter By UV-Nanoimprint With An HSQ Stamp // Journal of Micromechanics and Microengineering, V. 21, P.045021, 2011. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/21/4/045021>
6. С.Г. Сучков, С.С. Янкин, С.А. Никитов, Ю.А. Шатрова. Рассеяние поверхностных акустических волн на системе топографических неоднородностей, сравнимых с длиной волны // Радиотехника и электроника, 2014, Т. 59, № 4, с. 405-410. <https://doi.org/10.7868/S0033849414040123>
7. Nanofabrication Techniques Dominique Mailly Laboratoire de Photonique et de Nanostructures Marcoussis // [Электронный ресурс]. URL: <https://magnetism.eu/esm/2005-constantia/slides/mailly-slides.pdf>
8. S. Huang, C. Huard, S. Shim, S.K. Nam, I.-C. Song, S. Lu, M.J. Kushner. Plasma Etching Of High Aspect Ratio Features In SiO₂ Using Ar/C₄F₈/O₂ Mixtures: A Computational Investigation // Journal of Vacuum Science and Technology A, V. 37, P. 031304, 2019. <https://doi.org/10.1116/1.5090606>
9. С.Г. Сучков, Д.А. Баринов. Анизотропия упругих свойств тонких металлических пленок и её влияние на характеристики устройств на ПАВ // Радиотехника и электроника, 2002, Т. 47, №4, с. 510-512.
10. The AC/DC Module User's Guide // [Электронный ресурс]. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.acdc/ACDCModuleUsersGuide.pdf>
11. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / под ред. Ю.В.Гуляева. – М.: Радиотехника, 2012. – 571 с.
12. Физические величины. Справочник / ред. И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов. – М.: Энергоиздат, 1991. – 1231 с.

13. С.Г. Сучков, С.А. Никитов, А.А. Пиловец, С.В. Комков, В.А. Николаевцев, А.Н. Литвиненко, Д.С. Сучков. Многодиапазонная радиочастотная метка на поверхностных акустических волнах для антиколлизийных систем идентификации // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016, N12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec16/5/text.pdf>
14. V. Plessky, L. Reindl. Review on SAW RFID Tags // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, V. 57. No. 3. P. 654-668, 2010. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1462>

Для цитирования:

Сучков С.Г., Николаевцев В.А., Сучков Д.С. О возможности создания эффективных устройств на поверхностных акустических волнах на частотах выше 6 ГГц // Журнал радиоэлектроники. – 2024. - №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.10>