

## Модифицированный квазиполевого метод расчета характеристик встречно-штыревых преобразователей поверхностных акустических волн

С.Г. Сучков,\* Д.С. Сучков,† В.А. Николаевцев,‡ А.В. Россошанский§  
 Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,  
 ИТЦ «Микро- и наноэлектроника», Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83  
 (Статья поступила 16.11.2014; Подписана в печать 06.12.2014)

Предложен модифицированный квазиполевого метод расчета электрических характеристик встречно-штыревых преобразователей (ВШП) поверхностных акустических волн (ПАВ), не использующий феноменологических параметров. Он позволяет с высокой точностью и оперативно производить расчет перспективных приборов на ПАВ в СВЧ диапазоне для любых конфигураций электродов ВШП с учетом конечной толщины электродов, в том числе с учетом слоистой структуры электродов, включающей адгезионный подслои. Результаты, полученные данным методом, хорошо согласуются с описанными в литературе экспериментальными данными.

PACS: 77.65.Dg

УДК: 621.382

Ключевые слова: акустоэлектроника, поверхностная акустическая волна, встречно-штыревой преобразователь, СВЧ, пьезоэффект, амплитудно-частотная характеристика, радиофизика.

### ВВЕДЕНИЕ

В устройствах обработки сигнала на поверхностных акустических волнах (ПАВ) часто применяют неоднородные электродные структуры, в частности, встречно-штыревые преобразователи (ВШП) с наклонными штырями [1] (веерные ВШП) и неоднородные (слоистые) подложки, например, ZnO/Алмаз/Si [2–5]. Также применяются так называемые однонаправленные ВШП (ОВШП), имеющие как сигнальные и заземленные штыри, так и штыри с плавающим потенциалом [6]. Использование таких и более сложных структур позволяет значительно улучшить характеристики фильтров на ПАВ, в том числе, приблизить коэффициент формы амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) к единице, снизить влияние отраженных волн, снизить вносимые потери, повысить диапазон используемых частот и т. п.

При расчетах фильтров на ПАВ, использующих такие структуры, применяют методы эквивалентных схем, основанные на эквивалентной схеме Мэзона [7]. Такой подход предусматривает замену процесса распространения и взаимодействия четырехмодовой неоднородной поверхностной волны с электродами ВШП распространением некой одномодовой объемной поперечной или продольной волны через систему преобразователей соответствующей объемной волны, каждый из которых моделируется шестиполлюсной эквивалентной схемой Мэзона. При этом скорость объемной волны считается равной скорости ПАВ, а эффективность преобразования определяется коэффициентом трансформации в искусственно вводимом акустоэлектри-

ском трансформаторе схемы Мэзона. При столь значительных приближениях получение расчетных результатов близкими к экспериментальным достигается подгонкой различных параметров, например, для ST-X — среза кварца вместо расчетного значения коэффициента электромеханической связи  $k^2 = 0,012$  используют значение  $k^2 = 0,016$ , которое хорошо соответствует получаемому в квазиполевого методе [8] значению  $k^2 = 0,0154$ .

Имея возможность точно рассчитывать все фазовые и амплитудные характеристики ПАВ в однородной или многослойной кристаллических подложках, можно точно рассчитать распределение объемного заряда, переносимого ПАВ. На этой основе можно наглядно и физично описать электрические процессы в ВШП при прохождении через него ПАВ и построить более простую и физически непротиворечивую эквивалентную схему [8], которую можно назвать «квазиполевого» в связи с использованием точного полевого расчета характеристик ПАВ по алгоритму, описанному в [9]. Метод расчета позволяет с не меньшей, чем полевого метод, точностью рассчитывать электрические характеристики ВШП, не требуя больших вычислительных мощностей, однако содержит один феноменологический параметр, определяемый из сравнения расчетных и экспериментальных значений вносимых потерь. В данной работе предлагается модификация метода, не имеющая феноменологических параметров.

### 1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАВ С ВШП

#### А. Взаимодействие ПАВ с ВШП в квазиполевого модели

Рассмотрим прохождение монохроматической ПАВ с плоским фронтом, возбужденной неким входным преобразователем, под электродами выходного ВШП

\*E-mail: suchkov.s.g@mail.ru

†E-mail: suchkovds@ya.ru

‡E-mail: nikolaevcev@ya.ru

§E-mail: nova@sgu.ru

сколь угодно сложной структуры. «Поверхностный» волновой вектор ПАВ  $k_s = (k_x, k_y)$ , вообще говоря, может быть направлен под произвольным углом к оси ВШП, совпадающей с осью  $x$ , а координатная ось  $z$  перпендикулярна поверхности кристалла и направлена в вакуум.

Распространяясь в пьезокристаллической подложке, ПАВ порождает волну связанного с ней объемного электрического заряда, в основном сосредоточенного вблизи поверхности. По своей структуре этот заряд представляет собой чередующиеся полосы положительного и отрицательного объемного заряда. Проходя под электродами  $n$ -ой секции, области объёмного заряда ПАВ наводят в электродах заряды противоположного знака ( $Q_n$ ) (рис. 1).

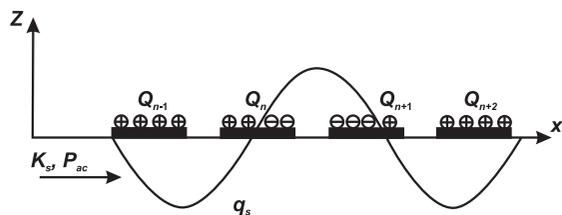


Рис. 1: Модель взаимодействия ПАВ с ВШП и образования наведенного заряда на его электродах

Таким образом, ток заряда электродов генерируется полем ПАВ (идеальным источником тока, подключенным параллельно межэлектродной емкости  $C_n$ ), проходит через активное и индуктивное сопротивление электродов (импеданс)  $Z_n$  и складывается с токами от других параллельно включенных секций на нагрузке  $Z_L$ . Этот процесс для ВШП со штырями произвольной формы, например, в виде зигзагообразного аналога веерного ВШП (рис. 2а), можно представить определенной эквивалентной схемой (рис. 2б). В этой схеме каждый источник тока соответствует зазору между соседними штырями.

Для расчета межэлектродных емкостей будем приближенно считать, что заряд на электроде сосредоточен в его центре (без этого предположения задача значительно усложняется и формулируется в виде системы интегральных уравнений). Тогда, следуя [10], можно записать, пренебрегая краевыми эффектами, выражение для межэлектродной емкости штырей номеров  $n$  и  $n + 1$

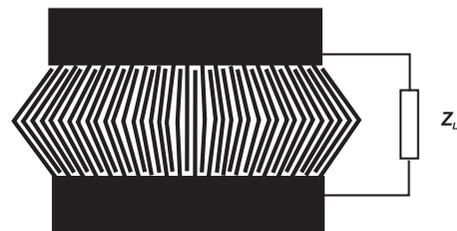
$$C_n = \varepsilon_0 \frac{1 + \varepsilon_p}{2} \frac{K(q_n)}{K(q'_n)}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_p = \sqrt{\varepsilon_{11}\varepsilon_{33} - \varepsilon_{13}^2}$  — эффективная относительная диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика,  $K(q)$  — эллиптический интеграл первого рода от функций

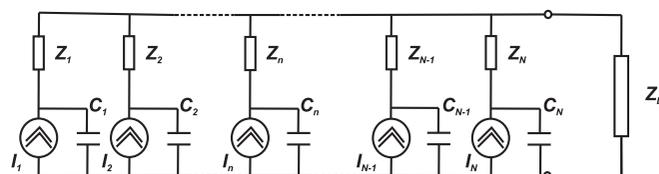
$$q_n = \sin\left(\frac{\pi D_n}{2 \Delta_n}\right), \quad q'_n = \sqrt{1 - q_n^2}, \quad (2)$$

зависящих от ширины электродов  $D_n$  и расстояния между их центрами  $\Delta_n$ ,  $W_n$  — перекрытие  $n$  и  $(n +$

1)-го электродов. Для расчета емкости между непараллельными электродами, последние разбиваются на множество малых участков вдоль длины электродов, на которых границы электродов считаются параллельными, и для каждого малого участка применяются формулы (1) и (2). Полная межэлектродная емкость вычисляется как сумма емкостей малых участков.



а)



б)

Рис. 2: Встречно-штыревой преобразователь ПАВ произвольной структуры (а) и его квазиполевая эквивалентная схема (б)

При расчете квазиполевым методом [8], проведя полное решение задачи о ПАВ, необходимо было вычислить объемную плотность связанного с ПАВ заряда  $q_s(x, y, z, t)$ , определяемую по формуле

$$q_s(x, y, z, t) = -\text{div}P = -e_{ijk} \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i \partial x_k}, \quad (3)$$

где  $P$  — вектор электрической поляризации,  $e_{ijk}$  — тензор пьезомодулей кристалла,  $U_j$  — упругие смещения четырехкомпонентной ПАВ.

При этом упругие смещения четырехмодовой ПАВ  $U_j$  и электрические потенциалы зависят от трех координат и времени и определяются в результате строгого решения краевой задачи по методу, описанному в [9].

Далее необходимо было проинтегрировать выражение (3) по координате  $z$  вглубь кристалла на расстояние  $H$  и по площади электрода  $S_n$ , который может иметь произвольную форму и расположение, чтобы получить заряд ПАВ, находящийся под  $n$ -ым электродом в слое толщиной  $H$ . Этот заряд ПАВ наводит на электроде заряд противоположного знака, то есть:

$$Q_n(t) = - \int_{-H}^0 \left( \iint_{S_n} q_s(x, y, z, t) dx dy \right) dz.$$

Далее из общих соображений в [8] предполагалось, что наведенный на электроде заряд меньше всего заря-

да ПАВ, находящегося под электродом ( $H = \infty$ ). Поэтому глубина интегрирования  $H$  являлась феноменологическим параметром, который определялся из условия равенства расчетного и экспериментального уровня вносимых потерь. Этот параметр был единственным феноменологическим параметром теории.

## В. Модификация модели взаимодействия ПАВ с ВШП

В данной работе предлагается заменить расчет плотности объемного заряда под электродом  $q_s(x, y, z, t)$  и последующее его интегрирование по координате  $z$  использованием граничного условия для индукции электрического поля, которое отбрасывалось и не использовалось при расчете характеристик ПАВ в кристалле с металлизированной поверхностью методом [9]. При наличии на границе пьезоэлектрического полупространства металлизации нормальная компонента индукции электрического поля на границе пьезокристалл-металл терпит разрыв, который сопровождается присутствием на границе некоторой плотности поверхностного заряда

$$\sigma = -D_n,$$

где  $D_n$  — компонента напряженности электрического поля в кристалле на границе пьезокристалл-металл, нормальная к границе.

Зная плотность заряда на границе с электродом, можно от интегрирования по трем координатам объемной плотности заряда в кристалле перейти к интегрированию по двум координатам поверхностной плотности заряда на границе с электродом

$$Q_n(t) = \iint_{S_n} \sigma(x, y, t) dx dy. \quad (4)$$

Теперь модифицированная квазиполевая теория не содержит ни одного феноменологического параметра.

## 2. КВАЗИПОЛЕВАЯ ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ВШП

Далее, вычисляя величину зарядов на двух соседних электродах по новой формуле (4), беря зависимость от времени в виде  $\exp(i\omega t)$  и учитывая, что ток через  $n$ -й зазор есть половина тока, текущего в  $n$ -м и  $(n+1)$ -м электродах (кроме крайних электродов), найдем ток, который генерируется в  $n$ -м зазоре между электродами ВШП:

$$I_n(t) = \frac{1}{2} \frac{d(Q_{n+1} - Q_n)}{dt} = \frac{i\omega}{2} (Q_{n+1} - Q_n).$$

Этот ток протекает по обращенным друг к другу краям соседних электродов, имеющих в сумме импеданс  $Z_n$ , и разветвляется на ток через общую нагрузку  $Z_L$  и токи через остальные секции. В комплексном импедансе электродов  $Z_n = R_n + i\omega L_n$  учитываются активное сопротивление  $R_n$  и индуктивность  $L_n$  электродов. Таким образом, эквивалентная схема ВШП (рис. 2б) значительно проще эквивалентной схемы Мэзона [7] и не требует введения не имеющих строгих обоснований приближений. Она состоит из ветвей, содержащих источник тока  $I_n$ , межэлектродную емкость  $C_n$  и импеданс электрода  $Z_n$ , а сами ветви соединены параллельно друг с другом и с импедансом нагрузки  $Z_L$ . Следовательно, ток, протекающий в нагрузке  $I_L$ , определяется как

$$I_L(t) = \sum_{n=1}^N \frac{I_n(t)}{\left(1 + \frac{Z_L}{Z'_n}\right) (1 + i\omega C_n Z''_n)}, \quad (5)$$

где  $Z'_n = \left( \sum_{m \neq n} \frac{i\omega C_m}{1 + i\omega C_m Z_m} \right)^{-1}$  — суммарный импеданс  $(N-1)$  секций ВШП, исключая  $n$ -ю секцию,  $Z''_n = Z_n + \frac{Z'_n Z_L}{Z'_n + Z_L}$ .

Тогда напряжение на шинах ВШП вычисляется, используя значение тока (5), по формуле  $U_T = I_L Z_L$ , а сопротивление излучения определяется известным соотношением

$$R_a = \frac{|U_T|^2}{2P_{ac}},$$

где  $P_{ac} = T_x$  — поток энергии, приносимый ПАВ к ВШП, также определяется с помощью метода, описанного в [9]. Для определения полного комплексного импеданса излучения

$$Z_a(f) = R_a(f) + iX_a(f)$$

используют преобразование Гильберта [7], связывающее вещественную ( $R_a$ ) и мнимую ( $X_a$ ) части аналитической функции  $L_a$

$$X_a(f) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_a(f')}{f' - f} df',$$

где несобственный интеграл вычисляется численно в системе Mathematica с введением малой мнимой добавки в знаменатель подынтегральной функции.

В соответствии с определением АЧХ ВШП вычисляется как отношение мощности выходного электрического сигнала  $P_E$  к мощности входного акустического сигнала  $P_{ac}$ , т. е.

$$S(f) = 10 \cdot \lg \left( \frac{P_E}{P_{ac}} \right),$$

$$\text{где } P_E = \frac{1}{2} |I_L|^2 Z_L.$$

### 3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Для проверки построенного модифицированного квазиполевого метода расчета было проведено сравнение рассчитанной данным методом и измеренной АЧХ для фильтра на ST-X-срезах кварца, разработанного Д. А. Бариновым в ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон». Этот фильтр состоял из входного неаподизованного ВШП, содержащего  $N_1 = 1352$  расщепленных штырей и «взвешиванием» с помощью удаления электродов, и выходного ВШП, аподизованного функцией Кайзера ( $a=4$ ), с  $N_2 = 1550$  расщепленных штырей. Толщина электродов была равна 150 нм. Кроме того данные результаты сравниваются (рис. 3) также и с результатами расчета квазиполевым методом [8] при подобранном значении параметра  $H = 0,19\lambda_S$ .

Достижение подбором феноменологического параметра  $H$  совпадения рассчитанной квазиполевым методом и экспериментальной АЧХ по вносимым потерям на центральной частоте сопровождается почти полным совпадением теоретической и экспериментальной АЧХ в полосе пропускания, а вне ее небольшие отличия связаны с прямым прохождением сигнала в экспериментальном фильтре. Вносимые потери, рассчитанные модифицированным квазиполевым методом, превышают экспериментальные вносимые потери на 3 дБ во всей полосе пропускания.

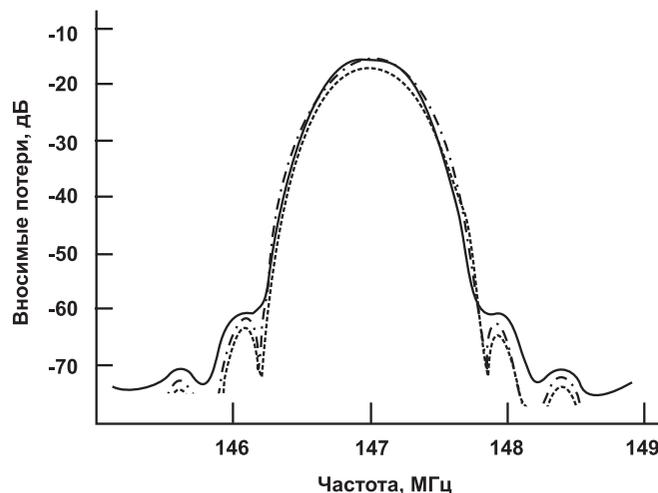


Рис. 3: Сравнение экспериментальной (сплошная кривая) и посчитанной квазиполевым методом расчета при подобранном значении параметра  $H = 0,19\lambda_S$  (штрихпунктирная кривая) и модифицированным квазиполевым методом расчета (штриховая кривая) АЧХ фильтра на ПАВ на основе кварца

Кроме того было проведено сравнение рассчитанной данным методом и измеренной АЧХ настроенного катушкой индуктивности и ненастроенного

фильтра 9secВ с однонаправленными ВШП на основе  $Y+128^\circ$ -среза  $\text{LiNbO}_3$ , исследуемых профессором В. П. Плесским, Швейцария [6]. ВШП данного фильтра имеют по 9 базовых SPUDT-элементов. При расчете было допущено приближение, в котором пренебрегалось активным сопротивлением электродов с плавающим потенциалом в направлении распространения ПАВ вследствие того, что оно намного меньше сопротивления в перпендикулярном движении ПАВ направлении, поскольку апертура штыря значительно превышает его ширину.

Наблюдается (рис. 4) полное совпадение экспериментальной АЧХ ненастроенного фильтра и расчетной АЧХ в полосе пропускания фильтра. Вносимые потери настроенного фильтра меньше. Данное обстоятельство объясняет расхождение на 3 дБ значений вносимых потерь для фильтра на основе кварца (рис. 3), поскольку в эксперименте осуществлялась его настройка катушкой индуктивности, а метод расчета дает АЧХ фильтра без учета импеданса внешней нагрузки.

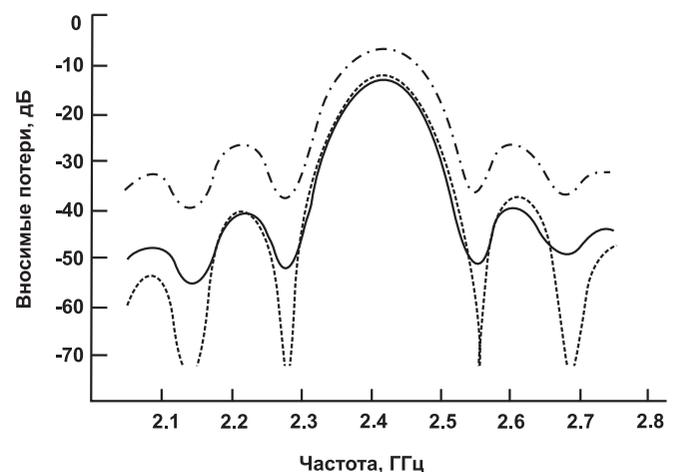


Рис. 4: Сравнение экспериментальных АЧХ фильтра на основе  $\text{LiNbO}_3$ , ненастроенного (сплошная кривая), настроенного катушкой индуктивности (штрихпунктирная кривая) и АЧХ, посчитанной модифицированным квазиполевым методом расчета (штриховая кривая)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный метод позволяет с точностью, близкой к точности полевых методов [11], вычислить функцию передачи (АЧХ) и полный комплексный импеданс излучения ВШП, но, в отличие от них, допускает расчет систем со значительно большим количеством штырей (более 100). Причем различной формы и расположения, что позволяет рассчитывать преобразователи со сколь угодно сложной электродной структурой.

Этим методом также могут рассчитываться АЧХ и сопротивление излучения ВШП как на слоистых подложках, например, в такой перспективной структуре

как ZnO/Алмаз/Si [2–5], так и в тонких пластинах

По сравнению с квазиполевым методом [8], новый модифицированный квазиполевым методом расчета характеристик ВШП не имеет феноменологического параметра, поэтому позволяет рассчитывать характеристики встречно-штыревых преобразователей поверхност-

ных акустических волн и не требует сравнения с экспериментом.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Правительства Российской Федерации № 11.G34.31.0030 и №14.574.21.0061, а также стипендии президента РФ.

- 
- [1] *Yatsuda H.* IEEE Trans. on UFFC. **44**, N2. P.453. (1997).
- [2] *Hachigo A., Nakahata H., Itakura K., Fujii S., Shikata S.* in Proc. IEEE Int. Ultrasonics Symp. P.325. (1999).
- [3] *Kirsch P., Assouar M. B., Elmazria O., Alnot P.* in Proc. IEEE Int. Ultrasonics Symp. P.2293 (2006).
- [4] *Iriarte G. F., Engelmark F., Katardjiev I. V., Plessky V.* IEEE Trans. on UFFC. **50**, N11. P.1542. (2003).
- [5] *Kawano S., Umeda T., Fujii S.* in Proc. 29th Ultrasonic Electronics. P.259. (2007).
- [6] *Lehtonen S., Plessky V. P., Hartmann C. S., Salomaa M. M.* IEEE Trans. on UFFC. **51**, N12. P.1697. (2004).
- [7] *Морган Д. М.* Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. (М.: Радио и связь, 1990).
- [8] *Сучков С.Г., Сучков Д. С., Чайковский Д. С.* Радиотехника и электроника. **52**, N2. С.251. (2007).
- [9] *Казачкова Т.И., Лазерсон А.Г., Сучков С.Г.* Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. N6. С.712. (1979).
- [10] *Иоссель Ю.Я., Коганов Э.С., Струнский М.Г.* Расчет электрической емкости. (Л.: Энергоиздат. Ленинградское отд., 1981).
- [11] *Мэтьюз Г. М.* Фильтры на поверхностных акустических волнах. (М.: Радио и связь, 1981).

## Modification of Quasifield Simulation Method of Surface Acoustic Waves Interdigital Transducers Characteristics

**S.G. Suchkov<sup>a</sup>, D.S. Suchkov<sup>b</sup>, V.A. Nikolaevtsev<sup>c</sup>, A.V. Rossoshansky<sup>d</sup>**

*Science and Technology Center of Saratov State University, Saratov 410012, Russia*  
*E-mail: <sup>a</sup>suchkov.s.g@mail.ru, <sup>b</sup>suchkovds@ya.ru, <sup>c</sup>nikolaevcev@ya.ru, <sup>d</sup>nova@sgu.ru*

A modified quasifield method of surface acoustic waves (SAW) interdigital transducers (IDT) electrical characteristics simulation without any phenomenological parameters was proposed. It allows simulating with high accuracy and operatively of the perspective SAW devices on the microwave frequency band for any IDT electrodes configurations with the consideration of the finite thickness of the electrodes, including taking into account of the layered structure of the electrodes with the adhesive sublayer. The results obtained by this method are in good agreement with the experimental data that were described in the literature.

PACS: 77.65.Dq

Keywords: acoustoelectronics, surface acoustic wave, interdigital transducer, microwave, piezo effect, frequency response, radiophysics.

Received 16.11.2014.

### Сведения об авторах

1. Сучков Сергей Германович — докт. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, руководитель НТЦ; тел.: (927) 621-86-28, e-mail: suchkov.s.g@mail.ru.
2. Сучков Дмитрий Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, зам. руководителя НТЦ; тел.: (927) 221-66-21, e-mail: suchkovds@ya.ru.
3. Николаевцев Виктор Андреевич — канд. физ.-мат. наук, инженер; тел.: (960) 357-92-97, e-mail: nikolaevcev@ya.ru.
4. Россошанский Андрей Владимирович — канд. полит. наук, директор; тел.: (8452) 51-44-34, e-mail: nova@sgu.ru.