



УДК 378.14

Ю.И. Бохан, В.И. Жидкевич, Ф.П. Коршиков, Н.К. Толочко

## Многослойные пьезокерамические высокочастотные элементы на поверхностных акустических волнах

Проблема детектирования ультразвуковых волн привлекает внимание со времен открытия способов их использования для целей дефектоскопии. При этом основное внимание уделяется переходу на более высокие частоты с целью повышения разрешающей способности приборов. Однако использование основных колебаний (мод) пьезопреобразователей наталкивается на серьезные трудности ввиду уменьшения толщины приемника. Так, для детектирования сигналов с частотой от 1 до 25 МГц требуются пластины толщиной 500–50 мкм. Такие приемники представляют технологическую трудность при их изготовлении. Поэтому ищутся способы использования толстых пьезопреобразователей (ТП), которые работают на гармониках колебаний пластины и позволяют повысить частоту сигнала при сохранении приемлемых размеров. Другим способом является создание пьезопреобразователей, использующих другие методы увеличения частоты сигнала и полосы пропускания. К ним относятся: неравномерно поляризованные, поверхностно возбуждаемые объемные преобразователи (НПВОП); неравномерно поляризованные, поверхностно возбуждаемые толстые преобразователи (НПВТП); поверхностно возбуждаемые толстые преобразователи (ПВТП). Еще одним методом является использование в качестве пьезоприемника фильтра на поверхностных акустических волнах с изменением (сдвигом) резонансной частоты путем возбуждения поверхностных волн Рэлея. Аналогами, в какой-то мере, таких приемников могут служить монолитные трансверсальные фильтры.

В представленной работе предлагается конструкция и метод расчета пьезоприемника на поверхностных акустических волнах. Среди датчиков акустического типа наибольшее распространение получили устройства на поверхностных акустических волнах Рэлея (ПАВ). Малая глубина локализации (~ 10 мкм) делает эти волны особенно чувствительными к массовой нагрузке поверхности. Поэтому изменение свойств пленки, находящейся на пути распространения волны, вызывает изменение ее скорости, фазы и амплитуды, которые фиксируются на выходе устройства как вариации частоты или напряжения. Частотный вид отклика выгодно отличает акустические датчики от устройств иного типа, поскольку обеспечивает высокую точность измерений и простое совмещение с цифровыми системами обработки информации. На рис. 1. представлена схема пьезоприемника высокочастотного (50–150 МГц) акустического сигнала, основанная на смещении резонансной частоты трансверсального фильтра под действием импульса давления.



Рис. 1. Принципиальная схема высокочастотного пьезоприемника.

Усиление ПАВ электрическим током в слоистых структурах пьезоэлектрик-полупроводник наблюдалось впервые в работах К. Иошиды и М. Ямениши, К.Ф. Куэйта, Дж.Г. Коллинза, К.М. Лэйкина, Г.М. Жерара и Дж.Г. Шо, К. Фишлер и С. Яндо, Ю.В. Гуляева, А.М. Кмиты, И.М. Котелянского, А.В. Медведя, Ш.С. Турсунова и др. [1–5]. Детальная теория поглощения и усиления ПАВ, а также акустоэлектрического эффекта в пьезоэлектрических полупроводниках и слоистых структурах пьезоэлектрик-полупроводник представлена в [2]. Поверхностная акустическая волна распространяется вдоль поверхности твердого тела с относительно малой скоростью и доступна в любой точке на пути ее распространения. Таким образом, с сигналом в виде ПАВ можно контактировать, влиять на него, преобразовывать, усиливать, отводить часть энергии и т.д. Так как длина волны ПАВ примерно в  $10^5$  раз меньше длины электромагнитной волны той же частоты, вся обработка сигнала в виде ПАВ происходит на расстояниях в несколько сантиметров и даже миллиметров. Подбирая соответствующим образом амплитуды и фазы отведенных сигналов, можно построить, в принципе, любую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) такого пьезопреобразователя. Для формирования требуемой АЧХ приемника можно применить вариацию длины перекрытия электродов гребенок в встречно штыревом пьезоприемнике (ВШП), так называемую «аподизацию». В идеальном случае АЧХ такого ВШП есть Фурье-преобразование от перекрытия электродов как функции координаты вдоль пути распространения в ПАВ.

Для расчета параметров пьезопреобразователя запишем систему эквивалентного шестиполюсника. Внешняя сила, приложенная к пьезоэлектрическому резонатору на поверхности, равна  $F = -AT$ , где  $A$  – площадь преобразователя,  $T$  – внутреннее напряжение, определяемое как  $T = c^d S - hD$ ,  $h$  – постоянная передачи, определяемая как  $h = e/\epsilon^s$ ,  $c^d = c^e(1 + e^2/c^e\epsilon^e)$ . Используя стандартные методы сведения системы уравнений, запишем основную систему в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} F^1 \\ F^2 \\ V^3 \end{bmatrix} = -j \begin{pmatrix} Z_c \operatorname{ctg} \beta_a l & Z_c \operatorname{csc} \beta_a l & h/\omega \\ Z_c \operatorname{csc} \beta_a l & Z_c \operatorname{ctg} \beta_a l & h/\omega \\ h/\omega & h/\omega & 1/\omega C \end{pmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ I_3 \end{bmatrix},$$

где  $F^1 = F(-l/2)$ ,  $F^2 = F(l/2)$ ,  $V^3 = \int_{-l/2}^{l/2} Edz$ ,  $\beta_a$  – постоянная распространения вол-

ны,  $v_1, v_2 = v(+/-1/2)$ ,  $I_3 = j\omega AD$ ,  $Z_c$  - акустический импеданс пьезопреобразователя. Представленная система уравнений шестиполюсника эквивалентна схеме Рэдвуда, в которой представлена Т-образной цепью с элементами  $Z_{ji}$  эквивалентной схемы Мэсона в виде линии передачи с импедансом  $Z_c$ . Предложенная методика расчета переходных процессов в пьезопреобразователях позволяет определить импульс тока  $I(t)$ , протекающего через сопротивление нагрузки пьезоэлемента в режиме приема. По этой методике преобразование Лапласа применяется к волновому уравнению, граничным условиям и уравнениям пьезоэффекта. Для контактного совмещенного НТП с твердотельной УЛЗ между пьезоэлементом и контролируемым изделием выражение для амплитуды тока имеет вид

$$I_m = yGU_0,$$

где  $y$  – экспериментальный коэффициент, учитывающий влияние контактной смазки, длительность зондирующего импульса и шероховатость поверхности контролируемого изделия,  $G = 2(h_{33}C_0)^2 Z_2 K_{23} \exp(-2\alpha H) / S(Z + Z_2)^2$ ;  $U(t)$  – электрическое напряжение, возбуждающее НТП в режиме приема;  $Z, Z_2, Z_3$  – характеристические импедансы преобразователя, иммерсионной жидкости и внешней среды соответственно;  $K_{23} = (Z_3 - Z_2) / (Z_3 + Z_2)$  – коэффициент отражения по давлению на границе раздела иммерсионная жидкость – внешняя среда;  $\alpha$  – коэффициент затухания УЗ волн в иммерсионной жидкости;  $S$  – площадь электрода;  $H$  – расстояние между НТП и внешней средой. Вычисление функции  $u_a(x, z, t)$ , т.е. расчет акустического поля в режиме приема, сводится к решению двумерного волнового уравнения без правой части при соответствующих граничных условиях. Эти граничные условия означают, что преобразователь свободен по всем границам, кроме одной ( $z = 0$ ), на которую действует внешнее акустическое давление  $P(x, t)$ .

В то же время представляется возможным создание многослойного пьезоэлемента на диапазон высоких частот по технологии производства монокристаллических конденсаторов. В этом случае имеем систему связанных пьезопластин, взаимодействующих друг с другом посредством ПАВ. Нанеся соответствующим образом решетку электродов на каждый слой керамической пленки получим квазиобъемную систему, в которой условия распространения ПАВ будут зависеть от волны в смежных пластинах. Длительное время нормальные моды в пластинах не находили практического применения, поскольку считалось, что для их возбуждения необходимы слишком толстые образцы с  $h/X > 1$  ( $h$  – толщина пластины,  $X$  – длина волны). Однако недавние исследования [3–5] продемонстрировали, что такое утверждение справедливо лишь для изотропных и слабоанизотропных материалов, тогда как в сильноанизотропных пьезоэлектриках число мод может достигать нескольких десятков даже при  $h/X \sim 1$ . Более того, нормальные моды пьезопластин намного разнообразнее, чем в изотропных телах, а поскольку их энергия распределена по всей толщине пластины, они незначительно поглощаются и могут использоваться для ее детектирования через верхнюю и нижнюю поверхности.

Особый интерес представляет собой планарный резонатор, емкость которого может изменяться под действием внешнего электрического поля. Как правило, планарный конденсатор состоит из трех слоев: диэлектрическая подложка, сегнетоэлектрический слой и планарные электроды (металлические или сверхпроводниковые).

В системах беспроводной радиосвязи используются фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ). По назначению устройства на поверхностных акустических волнах можно разделить на несколько классов: полосовые фильтры для обработки сигналов на промежуточных частотах, линии задерж-

ки, резонаторы, фильтры с малыми потерями для входных цепей приемников, антенные дуплексы для связных приемников, в том числе систем AMPS, GSM, CDMA. В новом поколении сотовой телефонии IMT-2000 предполагается осуществить разделение доступа с помощью акустоэлектронного конвольвера. Дуплексы – это двухканальные фильтры, которые осуществляют разделение по частоте тракта передачи и тракта приема. Дуплексор имеет один вход, соединенный с антенной, и два выхода, присоединенных к выходу передающего тракта и ко входу приемного тракта, соответственно. При этом частотные характеристики в передающем и приемном трактах имеют специальные характеристики для обеспечения максимальной развязки между трактом приема и передачи. Конвольвер – это шестиполосник, формирующий свертку двух сигналов: входного и опорного, – используя нелинейные свойства среды распространения упругих волн.

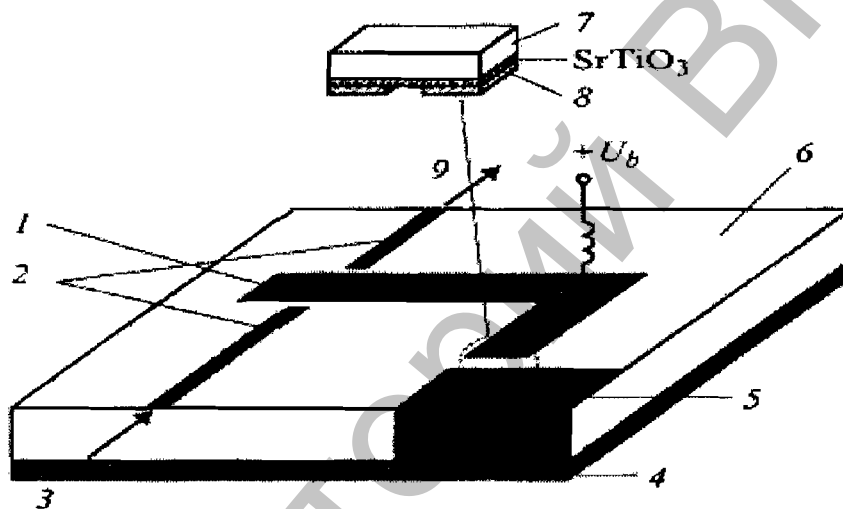


Рис. 2. Общий вид измерительного микрополоскового резонатора:  
 1 – микрополосковый резонатор, 2 – подводящие линии, 3 – вход СВЧ,  
 4 – земляной проводник, 5 – заземленная площадка, 6 – подложка (поликор),  
 7 – сапфир, 8 – электроды (Си), 9 – выход СВЧ. На вставке показан исследуемый планарный конденсатор.

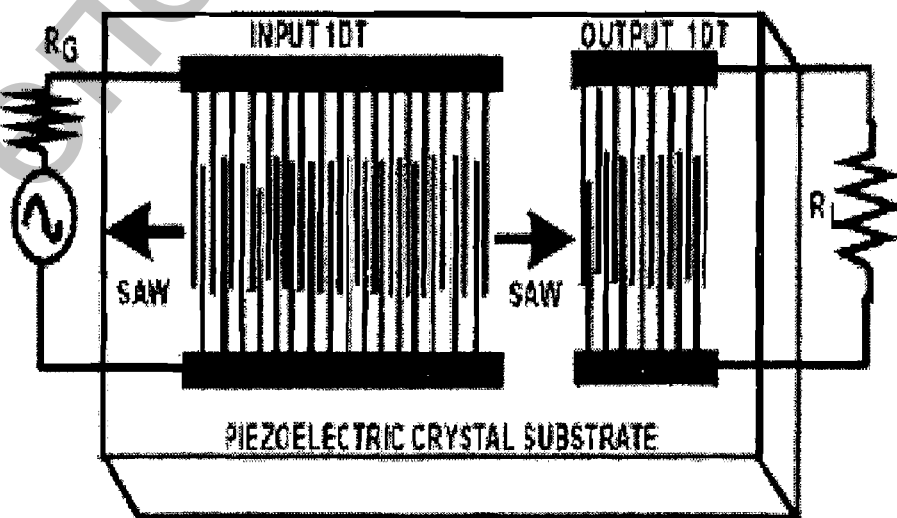


Рис. 3. Структура ПАВ с ВШП на пьезоэлектрической подложке.

Большинство преимуществ ПАВ-устройств обусловлено непосредственно их физической структурой: малым весом и габаритами; линейной (или определяемой требованиями) фазой; фактором формы, приближающимся к единице (очень высокая прямоугольность); исключительным внеполосным подавлением; температурной стабильностью. Поскольку центральная частота и форма частотной характеристики определяются топологией, они не требуют сложной настройки в аппаратуре и не могут расстроиться в процессе эксплуатации. ПАВ радиочастотные метки используются для идентификации широкой гаммы багажа или коммерческих транспортных средств и контейнеров. ПАВ инспекционная схема работает следующим образом. Передатчик посылает импульс радиосигнала высокой частоты (например, в 1000 МГц) на ПАВ радиочастотной метки на изделии, которое подлежит идентификации. ПАВ радиочастотная метка является пассивным элементом в виде кодированного встречно-штыревого преобразователя (ВШП) поверхностных акустических волн. При этом может быть выбран определенный код, соответствующий только данному изделию, любой разрядности (например, 128 бит). ПАВ радиочастотные метки имеют ряд преимуществ, по сравнению со штриховым кодом оптического типа, в первую очередь, малые размеры, благодаря чему их практически невозможно визуально обнаружить, а также скрытность, поскольку они могут находиться внутри транспортного контейнера.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля* / под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986.
2. *Кантор, В.М.* Монолитные пьезоэлектрические фильтры / В.М. Кантор. – М.: Связь, 1977.
3. *Кайно, Г.* Акустические волны / Г. Кайно. – М.: Мир, 1990.
4. *Орлов, В.С.* Фильтры на поверхностных акустических волнах / В.С. Орлов, В.С. Бондаренко. – М.: Радио и связь, 1984.
5. *Речицкий, В.И.* Акустоэлектронные радиокомпоненты / В.И. Речицкий. – М.: Радио и связь, 1987.
6. *Викторов, И.А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Виктор. – М.: Наука, 1981.
7. *Томашпольский, Ю.Я.* Пленочные сегнетоэлектрики / Ю.Я. Томашпольский. – М.: Радио и связь, 1984.
8. *Бохан, Ю.И.* Конструкция и метод расчета высокочастотного пьезоприемника на поверхностных акустических волнах / Ю.И. Бохан // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы IV Междунар. научн.-техн. конф., Новополоцк, 25–26 мая 2006 г. / Полоцкий гос. ун-т. – Новополоцк, 2006. – С. 193–196.
9. *Бохан, Ю.И.* Метод расчета многослойных керамических планарных конденсаторов для микроэлектроники / Ю.И. Бохан // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы IV Междунар. научн.-техн. конф., Новополоцк, 25–26 мая 2006 г. / Полоцкий гос. ун-т. – Новополоцк, 2006. – С. 197–200.

## S U M M A R Y

*In the article the brief review of technological application of the MICROWAVE of fields for processing materials is presented. Scopes are divided on temperatures of processing from -30 up to +1500°C. Possible methods and ways of processing of organic substances, ceramic materials are analyzed. Physical mechanisms of influence of the MICROWAVE of fields on various materials are considered.*

*Поступила в редакцию 14.11.2006*