

На правах рукописи

Кузнецова Анастасия Сергеевна

АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В СТРУКТУРАХ, СОДЕРЖАЩИХ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И
НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ СЛОИ

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Саратов 2012

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Саратовский филиал¹.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Зайцев Борис Давыдович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Анисимкин Владимир Иванович
доктор физико-математических наук,
профессор Сучков Сергей Германович

Ведущая организация: Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «16» марта 2012 в 15.30 час. на заседании диссертационного совета Д.212.243.01 в Саратовском государственном университете им.

Н.Г.Чернышевского по адресу: 410012, Саратов, ул.Астраханская, 83

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке СГУ.

Автореферат разослан « » 2012.

Ученый секретарь диссертационного совета

Аникин В.М.

¹ С 10.01.2012 г. название организации изменено на Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН, Саратовский филиал

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из традиционных направлений исследований в акустике твердых сред является изучение характеристик акустических волн в многослойных структурах. В различное время исследовались такие волны как поверхностные акустические волны Лява, волны Стоунли, волны Сезава, щелевые волны, приповерхностные объемные волны и т.д. Рассматривались структуры, содержащие пьезоэлектрики, диэлектрики, жидкости, проводящие или вязкоупругие материалы и т.д. В настоящее время интерес к исследованию многослойных акустических структур с использованием как известных, так и новых материалов только усиливается. Это связано с необходимостью создания различных датчиков и устройств обработки сигналов, обладающих заданными характеристиками, необходимостью создания различных покрытий, характеризующихся полным поглощением зондирующего излучения и т.д.

В настоящее время характеристики акустических волн в тонких (по сравнению с длиной волны) пьезоэлектрических пластинах достаточно полно исследованы. Было обнаружено, что свойства поперечно-горизонтальных волн нулевого порядка (SH_0) существенно отличаются от свойств поверхностных акустических волн (ПАВ) в том же самом материале. Например, было показано, что указанные волны обладают значительно большим коэффициентом электромеханической связи (K^2), чем ПАВ в том же самом материале. Было обнаружено, что их температурный коэффициент задержки несколько меньше, чем для ПАВ и что существует возможность эффективного управления углом между фазовой и групповой скоростью этих волн при помощи электрического закорачивания поверхности пластины. Следует отметить также, что поперечно-горизонтальные волны могут распространяться в контакте с жидкостью без значительных радиационных потерь, в отличие от ПАВ Рэлея. Таким образом, на основании проведенных ранее исследований был сделан вывод о перспективности использования указанных волн для создания различных устройств обработки сигналов и акустоэлектрических датчиков на их основе.

Однако вопросы повышения чувствительности к массовой нагрузке и термостабильности разрабатываемых устройств являются по-прежнему актуальными. В этом плане представляет интерес исследование многослойных структур, основанных на пьезоэлектрических пластинах и содержащих слои из новых нанокompозитных полимерных материалов. Анализ акустических волн, распространяющихся в подобных структурах, ранее не проводился. К настоящему времени были только измерены акустические и электрические характеристики указанных материалов.

На основании всего вышесказанного можно сделать вывод об актуальности исследования акустических волн в структурах, содержащих пьезоэлектрические, диэлектрические, металлические и нанокompозитные полимерные слои.

Целью диссертационной работы является исследование характеристик акустических волн нулевого порядка в структурах, содержащих пьезоэлектрические, диэлектрические, металлические, нанокompозитные полимерные слои, а также жидкости, для разработки новых методов управления температурным коэффициентом задержки указанных волн и способов согласования пьезоэлектрических материалов с газом и жидкостью.

Научная новизна работы

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

1. Показано, что акустические волны нулевого порядка в пластинах обладают большей чувствительностью к массовой нагрузке, чем ПАВ Рэлея и SH ПАВ в одном и том же материале.
2. Показано, что с уменьшением диэлектрической проницаемости материала массовой нагрузки чувствительность акустических волн нулевого порядка в пластинах к массовой нагрузке возрастает.
3. Впервые показано, что при распространении акустической волны в структуре «пьезоэлектрическая пластина – нанокompозитный полимерный слой» при определенных значениях толщины слоя возникает резонансное затухание волны. При этом резонансная толщина слоя при фиксированной частоте волны не зависит ни от толщины пьезоэлектрической пластины, ни от ее материала, что позволяет использовать этот эффект для измерения акустических свойств слоя.
4. Предложен новый метод управления температурным коэффициентом задержки (TCD) акустических волн в пьезоэлектрических пластинах. Он основан на использовании контакта с жидкостью, характеризующейся определенной зависимостью ее диэлектрической проницаемости от температуры. Свойства используемой жидкости зависят от типа волны, а также от материала и толщины пьезоэлектрической пластины. На примере SH₀ волны в пластине Y-X ниобата лития, контактирующей с бутилацетатом, продемонстрирована возможность снижения TCD на порядок при сохранении значения коэффициента электромеханической связи $K^2=30\%$.
5. Впервые найден закон изменения диэлектрической проницаемости контактирующей среды от температуры, обеспечивающий нулевое значение температурного коэффициента задержки SH₀ волны в структуре «нанокompозитный полимерный слой – вакуумный зазор – пластина ниобата лития».
6. Предложен новый принцип управления температурным коэффициентом задержки волн в структуре «диэлектрический слой – вакуумный зазор – пьезоэлектрическая пластина» путем изменения вакуумного зазора при изменении температуры.
7. Найден закон изменения величины вакуумного зазора от температуры, обеспечивающий нулевое значение температурного коэффициента задержки SH₀ волны, когда в качестве диэлектрического слоя и пластины используются нанокompозитный полимерный слой и ниобат лития, соответственно. Впервые показано, что с увеличением диэлектрической проницаемости слоя величина необходимого для термостабилизации фазы относительного увеличения зазора между этим слоем и пьезоэлектрической пластиной уменьшается.

Достоверность полученных в настоящей диссертации теоретических результатов определяется корректностью постановки всех граничных задач, использованием апробированных вычислительных методов, а также количественным и качественным соответствием полученных в работе теоретических результатов экспериментальным данным и данным других авторов.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Чувствительность акустических волн Лэмба и поперечно-горизонтальных акустических волн нулевого порядка в пьезоэлектрических пластинах к массовой нагрузке в 2-7 раз больше, чем для ПАВ Рэлея и SH ПАВ в одном и том же материале.
2. Для управления температурным коэффициентом задержки акустических волн в пьезоэлектрических пластинах можно использовать контакт с жидкостью, характеризующейся определенной зависимостью ее диэлектрической проницаемости от температуры. Свойства используемой жидкости зависят от типа волны, материала

и толщины пьезоэлектрической пластины. На примере SH_0 волны в пластине Y-X ниобата лития, контактирующей с бутилацетатом, продемонстрирована возможность снижения температурного коэффициента задержки практически до нуля при сохранении значения коэффициента электромеханической связи $K^2=30\%$.

3. При удалении диэлектрической среды от пьезоэлектрической пластины по определенному закону фаза акустического сигнала может оставаться неизменной в широком интервале температур. С увеличением диэлектрической проницаемости среды величина необходимого для термостабилизации фазы относительного увеличения зазора между этой средой и пьезоэлектрической пластиной уменьшается.

4. При создании излучателей/приемников акустических волн в жидкости на основе A_0 волн Лэмба в пьезоэлектрических пластинах использование промежуточного слоя из нанокompозитного полимерного материала с плотностью ~ 1300 кг/м³, продольным и поперечным модулями упругости $\sim 20 \times 10^8$ Па и $\sim 2 \times 10^8$ Па, соответственно, и продольным и поперечным коэффициентами вязкости ~ 20 Па \times с и ~ 1.5 Па \times с может улучшить эффективность излучения примерно на 1 дБ/λ по мощности при соотношении толщин слоя и пластины ниобата лития $d/h \sim 0.15$ и при частоте ~ 1.3 МГц.

Практическая ценность результатов заключается в следующем:

1. Впервые предложено для создания эффективного приемника/излучателя акустической волны в газовой среде использовать трехслойное согласующее устройство, содержащее в качестве крайних слоев различные комбинации нанокompозитных материалов на основе полиэтилена высокого давления. При этом материал среднего согласующего слоя должен обладать существенно большими значениями модуля упругости и плотности по сравнению с материалами крайних слоев. Например, в качестве согласующего среднего слоя можно использовать металлы, кристаллы, керамику и некоторые виды стекол. Подобная структура позволяет увеличить амплитуду излучаемой волны в газ на 2-3 порядка по сравнению с известными преобразователями.

2. Впервые предложено при создании излучателей/приемников акустических волн в жидкость на основе A_0 волн Лэмба в пьезоэлектрических пластинах использовать слой из нанокompозитного полимерного материала на основе матрицы полиэтилена высокого давления с наночастицами сульфида кадмия 30%. Это может улучшить эффективность излучения примерно на 1 дБ/λ по мощности при соотношении толщин слоя и пластины ниобата лития $d/h=0.154$ и при частоте $f=1.3$ МГц.

3. Предложены и опробованы новые принципы уменьшения температурного коэффициента задержки в слоистых средах, содержащих пьезоэлектрическую пластину.

Апробация работы: Работа выполнена в лаборатории СФ-9 Саратовского филиала института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН в период 2005-2011 гг. Изложенные в диссертации результаты докладывались на *Ultrasonic International (Beijing, China, 2005; Vienna, Austria, 2007; Santiago, Chile, 2009)*, *IEEE International Ultrasonic Symposium (Delft, The Netherlands, 2005; Beijing, China, 2008; San-Diego, USA, 2010)*, *Int. Conf. "Wave Electronics and its Appl. In Information and Telecom. Systems" (S.-Peterburg, Russia, 2005, 2006, 2007)*, Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, Россия, 2007, 2008, 2009, 2010), *Int. Conf. AMAAV'09 (Cairo, Egypt, 2009)*, *1st Int. Conf. On Nanostructured Materials and Nanocomposites*

(Kottayam, India, 2009), на конкурсе молодых ученых им.И.В.Анисимкина (Москва, Россия, 2008), на научных семинарах Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 30 печатных работ, из которых 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК, 11 статей в трудах конференций, 13 тезисов докладов.

Личный вклад автора. Результаты, представленные в диссертации, отражают личный вклад автора в работу: автор принимала непосредственное участие в постановке задачи и разработке математических моделей, самостоятельно разработала расчетные программы и выполнила все теоретические исследования. Автор также принимала непосредственное участие в анализе полученных результатов и формулировке выводов.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 114 наименований, в том числе 30 работ автора. Объем работы составляет 154 страницы текста, включая 57 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследования, научная новизна и практическая ценность, изложено краткое содержание диссертации, а также определены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена теоретическому исследованию чувствительности акустических волн Лэмба (A_0 , S_0) и поперечно-горизонтальных (SH_0) волн нулевого порядка в тонких, по сравнению с длиной волны, пьезоэлектрических пластинах к массовой нагрузке. Для анализа выбраны пластины танталата лития, который широко используется при разработке различных акустических устройств и характеризуется достаточно высокой пьезоактивностью. В качестве материала нагрузки выбраны слои из алюминия, серебра и золота, а также SiO_2 и KI . Выбор материалов для массовой нагрузки был обусловлен различной их плотностью, а ориентация подложки определялась из условия максимальной пьезоактивности рассматриваемой волны: A_0 волна ($128^\circ Y-X$), S_0 волна ($X-Y+25^\circ$) и SH_0 волна ($Y-X$). Приведены исходные уравнения, описывающие волны в подобных структурах, методы их решения и результаты численного анализа для указанных выше материалов. Анализ показал, что чувствительность акустических волн к массовой нагрузке в общем случае имеет сложную частотную зависимость, а также зависит от толщины пластины, и от материала нагрузки. Поэтому для определения этой чувствительности введен уточненный параметр - нормированная на частоту чувствительность к массовой нагрузке. Данный параметр в большинстве случаев слабо зависит от частоты волны при малых значениях толщины нагрузки и позволяет проводить сравнение указанной чувствительности для разных типов волн.

Было показано, что в большинстве случаев массовая нагрузка, как из металлических, так и из диэлектрических материалов приводит к уменьшению скорости акустических волн нулевого порядка в пьезоэлектрических пластинах, хотя существуют противоположные ситуации. Например, скорость A_0 волны в структурах «слой Al – пластина $LiTaO_3$ » и «слой SiO_2 – пластина $LiTaO_3$ » с ростом толщины слоя увеличивается для всех значений параметра hf . Аналогичное поведение проявляют ПАВ Рэлея в аналогичных структурах. Кроме того, анализ показал, что для

каждой подложки должен существовать такой материал нагрузки, который практически не влияет на скорость A_0 волны. Было также обнаружено, что с уменьшением нормированной толщины пластины, чувствительность акустических волн нулевого порядка к массовой нагрузке увеличивается, а с уменьшением диэлектрической проницаемости материала массовой нагрузки указанная чувствительность акустических волн нулевого порядка в пластинах возрастает. В целом был сделан вывод о том, что акустические волны нулевого порядка в пластинах обладают в 2 -7 раз большей чувствительностью к массовой нагрузке, чем ПАВ Рэлея и SH ПАВ в одном и том же материале.

В этой же главе было теоретически исследовано влияние жидкости на чувствительность акустических волн в пластинах к диэлектрической массовой нагрузке. Было показано, что для некоторых материалов массовой нагрузки присутствие жидкости приводит к существенному увеличению указанной чувствительности. Например, для структуры «слой SiO_2 – пластина LiTaO_3 » чувствительность SH_0 волны при $hf = 500$ м/с в присутствии воды возрастает примерно в 40 раз. В то время как в присутствии материалов с меньшим акустическим импедансом и большим значением диэлектрической проницаемости, например, KI, присутствие жидкости приводит к некоторому уменьшению чувствительности SH_0 волны.

В целом полученные результаты говорят о возможности разработки более чувствительных гравиметрических датчиков на основе акустических волн нулевого порядка в пьезоэлектрических пластинах.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому анализу влияния новых нанокompозитных полимерных материалов с наночастицами металлов и их соединений на характеристики акустических волн с поперечно-горизонтальной поляризацией в пьезоэлектрических пластинах. Решение граничной задачи проводилось численным методом, поскольку, широко используемая теория возмущений дает некорректные результаты в случае волн с большим коэффициентом электромеханической связи.

Вначале была рассмотрена структура «пьезопластина – слой нанокompозитного материала». В качестве пьезоэлектрической пластины рассматривались пластины YX ниобата лития и YX танталата лития. В качестве нанокompозитных слоев использовались материалы с различной концентрацией наночастиц железа и сульфида кадмия, внедренных в матрицу полиэтилена высокого давления. В результате проведенных расчетов были получены скорость и затухание SH_0 волн, распространяющихся в вышеуказанных структурах. Анализ показал, что при определенных значениях толщины пленки возникает резонансное затухание акустической волны (рис. 1), которое не зависит ни от толщины пьезоэлектрической пластины, ни от ее материала. В этом случае пленка выступает как акустический резонатор, одна сторона которого жестко закреплена, а вторая механически свободна. Этот эффект может быть использован для измерения акустических свойств пленки. Что касается скорости исследуемых волн, то ее зависимость от соотношения толщин слоя и пластины вблизи резонансной толщины коррелирует с аналогичным поведением фазы колебания резонатора вблизи резонансной частоты. Показано также, что величина затухания исследуемых волн в случае пластины LiNbO_3 существенно выше, чем для пластин LiTaO_3 .

Было также исследовано влияние металлизации пластины со стороны свободной от слоя. Как и следовало ожидать, в этом случае скорость SH_0 волны уменьшается, а ее квадрат коэффициента электромеханической связи в области

малого затухания равен 32% и 12% в случае ниобата лития и танталата лития, соответственно. Что касается затухания, то в случае металлизации пластины его максимальная величина становится несколько меньше. Полученные в результате расчетов зависимости позволяют выбирать такие соотношения толщин слоя и пластины, при которых акустическая волна практически не затухает в присутствии нанокompозитного полимерного слоя, несмотря на его вязкость. Кроме того, присутствие наночастиц в полимерной пленке приводит к сужению области резонансного затухания и к соответствующему увеличению диапазонов толщин и частот, в которых затухание волны практически отсутствует. При этом коэффициент электромеханической связи волны остается достаточно большим. Это открывает перспективы создания невозмущающих подложек из нанокompозитных материалов для тонких пьезоэлектрических пластин.

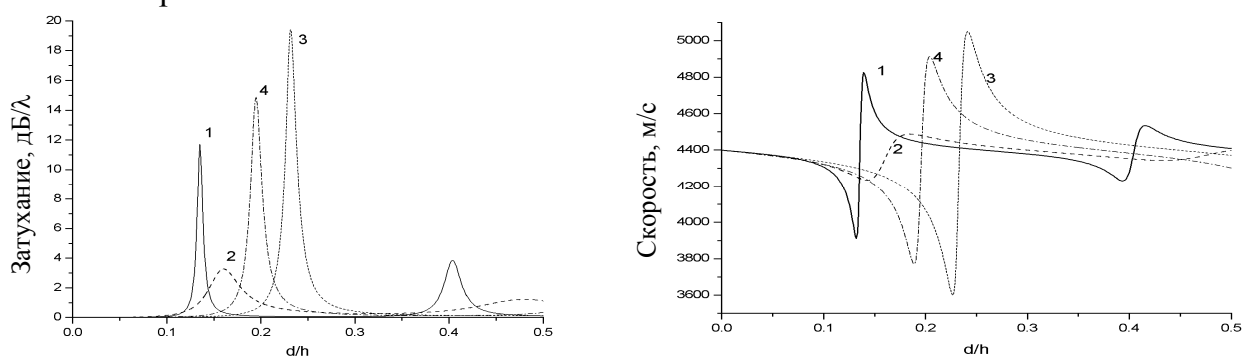


Рис.1. Зависимости затухания и скорости SH_0 волны, распространяющейся в структуре «пластина $YX LiNbO_3$ - нанокompозитная полимерная пленка с наночастицами CdS » от отношения d/h при параметрах $hf=500$ м/с. 1 – 0%, 2 – 5%, 3 – 10%, 4 – 30%.

В этой же главе рассмотрены характеристики SH_0 волн в структуре «нанокompозитный слой – вакуумный зазор – пьезопластина». При расчетах использовались вышеуказанные материалы. В результате были получены зависимости скорости и коэффициента электромеханической связи указанной волны от величины зазора. Обнаружено, что с удалением нанокompозитного слоя от пьезоэлектрической пластины скорость волны увеличивается. Показано также, что при размещении нанокompозитного слоя вблизи пьезоэлектрической пластины коэффициент электромеханической связи волны несколько уменьшается, однако его величина достаточно велика. Обнаружено также, что в подобной структуре полностью отсутствует затухание волны, что подтверждает сделанное выше предположение о физической природе резонанса, возникающего при контакте пленки с пьезоэлектрической пластиной.

Третья глава диссертации посвящена исследованию влияния температуры на характеристики SH_0 волн в структурах, содержащих пьезопластину и жидкость или нанокompозитный слой. Аналогично первым двум главам были записаны уравнения, описывающие волны в подобных структурах и соответствующие механические и электрические граничные условия. Вначале было исследовано влияние температуры на скорость указанных волн в пластине ниобата лития без контакта с жидкостью. Были построены зависимости скорости, коэффициента электромеханической связи, температурного коэффициента фазовой скорости (TCV) и температурного коэффициента задержки (TCD) SH_0 волны, распространяющейся вдоль наиболее пьезоактивного направления YX ниобата лития, от параметра hf (h – толщина пластины, f – частота волны) для электрически открытой и электрически замкнутой поверхности пластины. Анализ полученных зависимостей показал, что

скорость SH_0 волны в пластине ниобата лития с ростом температуры уменьшается, как в случае электрически открытой, так и в случае электрически закороченной поверхности пластины.

Затем было проанализировано распространение SH_0 волны в структуре «пьезоэлектрическая пластина – невязкая и непроводящая жидкость». В качестве жидкости использовались вода, этиловый спирт, хлорбензол, метилацетат, бензол и бутил ацетат. Проведенный анализ показал, что скорость SH_0 волны в основном зависит от диэлектрической проницаемости жидкости и практически не зависит от ее упругих свойств. Это позволило построить зависимости скорости и коэффициента электромеханической связи SH_0 волны, распространяющейся в электрически открытой и электрически закороченной с противоположной стороны от жидкости пластине $YX LiNbO_3$ ($hf=500$ м/с), от относительной диэлектрической проницаемости жидкости. Оказалось, что с ростом диэлектрической проницаемости жидкости, прилегающей к пластине ниобата лития, скорость SH_0 волны в пластине уменьшается. Если же одна сторона пластины электрически закорочена, то, как и следовало ожидать, зависимость скорости от диэлектрической проницаемости жидкости практически отсутствует. Что касается коэффициента электромеханической связи, то с ростом диэлектрической проницаемости он уменьшается. Анализ также показал, что присутствие невязкой жидкости не приводит к заметному радиационному затуханию SH_0 волны.

Далее было теоретически и экспериментально исследовано влияние температуры на характеристики SH_0 волны в структуре «пьезоэлектрическая пластина – невязкая и непроводящая жидкость». Как известно, диэлектрическая проницаемость большинства жидкостей уменьшается с ростом температуры. Следовательно, используя структуру, содержащую жидкость с определенной температурной зависимостью диэлектрической проницаемости, можно добиться значительного уменьшения TCD SH_0 волны. В результате проведенных расчетов были построены зависимости TCV и TCD SH_0 волны в YX пластине ниобата лития, которая контактировала с одной стороны со всеми перечисленными выше жидкостями, от параметра hf . Анализ показал, что при электрически открытой поверхности пластины существует такое значение параметра hf , при котором величина TCD исследуемой волны становится равной нулю (рис.2). При этом в исследуемой структуре величина K^2 остается достаточно высокой. Например, для структуры «пластина $YX LiNbO_3$ - бутилацетат» величина K^2 составляет ~30% вместо ~36% в случае контакта пластины с вакуумом. Было также обнаружено, что при выбранной жидкости величиной TCD можно управлять путем изменения параметра hf . Проведенный эксперимент полностью подтвердил выводы теории.

Следует отметить, что вышеуказанный способ управления TCD не совсем удобен с технологической точки зрения. В связи с этим в данной главе был проведен поиск материала, характеризующегося специфической зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры. Исследования показали, что в качестве такого материала могут быть использованы нанокompозитные полимерные пленки с различным содержанием наночастиц железа.

Таким образом, в данной главе проведен также анализ влияния температуры на скорость SH_0 волны в структуре, содержащей тонкую пьезоэлектрическую пластину ниобата лития и нанокompозитные полимерные слои с различной концентрацией наночастиц железа. В результате проведенных расчетов были получены зависимости температурного коэффициента задержки, скорости и затухания SH_0 волны

в вышеуказанной структуре. Анализ полученных зависимостей показал, что изменение TCD SH₀ волны в исследуемой структуре зависит от концентрации наночастиц железа и толщины пленки и все это приводит к уменьшению указанного параметра. Однако, для достижения большей степени управления температурным коэффициентом задержки, необходимо использовать материалы с более сильной зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры.

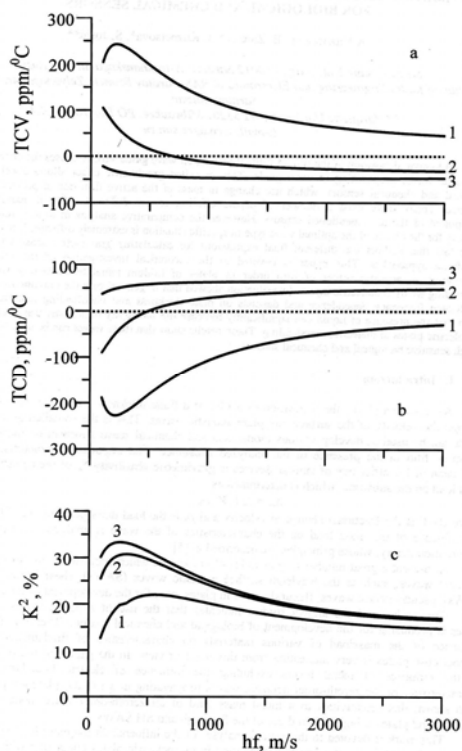


Рис2. Зависимости TCV (a), TCD (b) и K² (c) SH₀ волны в структуре «пластина YX LiNbO₃ – жидкость» от параметра hf. 1- этиловый спирт, 2-бутилацетат, 3-бензол

закону $\Delta\epsilon/\epsilon = -0.023\Delta T$ ($[\Delta T] = \text{град C}$). С другой стороны, можно подобрать такую температурную зависимость изменения зазора между нанокompозитным материалом и пластиной, при которой фаза выходного акустического сигнала при изменении температуры меняться не будет, т.е. температурный коэффициент задержки будет равен нулю. В этом отношении нанокompозитный материал является наиболее предпочтительным, поскольку его диэлектрическая проницаемость в отличие от других диэлектриков достаточно мала и изменение зазора может быть достаточно большим.

В результате расчетов были получены зависимости изменения фазы волны от температуры при $h=167$ мкм и $f = 3$ МГц ($hf=500$ м/с) для различных значений диэлектрической проницаемости полубезграничной среды. Анализ полученных результатов показал, что во всех рассмотренных случаях удаление диэлектрической среды от пьезоэлектрической пластины по определенному закону может оставить фазу сигнала неизменной в широком интервале температур. Обнаружено также, что угол наклона полученных зависимостей уменьшается с ростом диэлектрической проницаемости полубезграничной среды. Это означает, что с увеличением диэлектрической проницаемости среды величина необходимого для термостабилизации фазы относительного увеличения зазора уменьшается. В данной главе пред-

Следует также отметить, в случае акустического контакта полимерного материала с пьезоэлектрической пластиной волна обладает затуханием ($\sim 1\text{dB}/\lambda$), которое связано с вязкостью полимерной пленки. В связи с этим было предложено использовать структуру, содержащую зазор между полимерным слоем и пластиной.

Проведенный анализ влияния температуры на SH₀ волну, распространяющуюся в структуре «нанокompозитная пленка с 15% наночастиц Fe – вакуумный зазор – YX пластина LiNbO₃», показал, что TCD и в данном случае уменьшается незначительно. В связи с этим был проведен поиск величины необходимого изменения диэлектрической проницаемости нанокompозитного материала для достижения нулевого значения TCD. Было обнаружено, что нулевое значение TCD SH₀ волны в такой структуре может быть достигнуто, если при увеличении температуры T диэлектрическая проницаемость нанокompозита ϵ будет уменьшаться по за-

ложен вариант термостабильной структуры, основанный на предложенном принципе.

Представленная в данной главе методика создания акустоэлектронных устройств, основанных на тонких пьезоэлектрических пластинах, с нулевым коэффициентом задержки может быть использована для любых пьезоэлектрических материалов и диапазонов частот.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию возможности применения нанокompозитных материалов для согласования пьезоэлектрических излучателей/приемников с газом и жидкостью с целью создания первичных элементов расходомеров. Вначале рассмотрены принципы действия известных ультразвуковых расходомеров. Затем записаны соответствующие уравнения, граничные условия и описан метод решения задачи. Был проведен анализ согласующего устройства, состоящего из одного, двух и трех слоев. Показано, что однослойные или двухслойные согласующие устройства не дают существенного выигрыша по согласованию. Существенный выигрыш получается, когда число слоев равно трем, причем материал среднего согласующего слоя должен обладать значительной величиной модуля упругости, и достаточно высокой плотностью, нежели материалы в остальных двух слоях. Это означает, что целесообразно использовать в качестве согласующего среднего слоя «тяжелый» материал (металлы, кристаллы, некоторые виды стекол и пластиков), а в качестве двух других слоев – различные комбинации нанокompозитных материалов на основе полиэтилена высокого давления. Расчеты показали, что подобное согласующее устройство позволит увеличить амплитуду излучаемой волны в газ на 2-3 порядка. Дальнейшее увеличение числа слоев не дает существенного улучшения эффективности преобразования.

В этой же главе исследована возможность использования нанокompозитных материалов для согласования пьезоэлектрических излучателей/приемников с жидкостью. Вначале был проведен анализ влияния нанокompозитных полимерных слоев на эффективность излучения антисимметричной волны Лэмба нулевого порядка в жидкость. В качестве пьезоэлектрической пластины использовался 128YX ниобат лития, а в качестве слоя использовались нанокompозитные полимерные материалы с различной концентрацией наночастиц железа и сульфида кадмия. В результате теоретического анализа были получены зависимости относительного изменения скорости $\Delta V/V$ для A_0 волны в пластине 128YX LiNbO_3 от нормированной толщины нанокompозитного полимерного слоя при различных значениях hf (300 м/с, 650 м/с и 1500 м/с) и для различных концентраций наночастиц (Fe и CdS). Анализ полученных результатов показал, что использование в качестве промежуточного слоя нанокompозитного полимерного материала на основе матрицы полиэтилена высокого давления с наночастицами сульфида кадмия 30% с плотностью 1277 кг/м^3 , продольным и поперечным модулями упругости $20 \times 10^8 \text{ Па}$ и $1.9 \times 10^8 \text{ Па}$, соответственно, и продольным и поперечным коэффициентами вязкости $20 \text{ Па} \times \text{с}$ и $1.5 \text{ Па} \times \text{с}$ может улучшить эффективность излучения примерно на 1 дБ/λ по мощности при соотношении толщин слоя и пластины $d/h=0.154$ и при $f=1.3 \text{ МГц}$. Этот вывод следует исходя из следующих расчетных данных. Как уже говорилось выше затухание для A_0 волны в структуре «128YX пластина-жидкость» составляет 1.4 дБ/λ, а для структуры с нанокompозитным слоем эта величина равна 2.94/λ. При этом для $hf=650 \text{ м/с}$ и $d/h=0.154$ нанокompозитный слой с наночастицами CdS 30%, контактирующий с 128YX пластиной ниобата лития, за счет своей вязкости приводит к

возникновению затухания A_0 волны, величина которого составляет 0.46 дБ/л. Теоретически предсказанный вывод был качественно подтвержден экспериментально.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований было получено следующее:

1. Показано, что акустические волны нулевого порядка в пластинах обладают большей чувствительностью к массовой нагрузке, чем ПАВ Рэлея и SH ПАВ в одном и том же материале.
2. В большинстве случаев массовая нагрузка, как из металлических, так и из диэлектрических материалов приводит к уменьшению скорости акустических волн нулевого порядка в пьезоэлектрических пластинах, хотя существуют противоположные ситуации. Например, скорость A_0 волны в структурах «слой Al – пластина LiTaO_3 » и «слой SiO_2 – пластина LiTaO_3 » с ростом толщины слоя увеличивается для всех значений параметра hf . Аналогичное поведение проявляют ПАВ Рэлея в аналогичных структурах. Кроме того, анализ показывает, что для каждой подложки должен существовать такой материал нагрузки, который практически не влияет на скорость A_0 волны.
3. С уменьшением нормированной толщины пластины и диэлектрической проницаемости материала массовой нагрузки чувствительность акустических волн нулевого порядка к ней увеличивается.
4. Для структуры «слой SiO_2 – пластина LiTaO_3 » присутствие воды приводит к значительному увеличению чувствительности SH_0 волн. Например, для SH_0 волны при $hf = 500$ м/с чувствительность возрастает примерно в 40 раз. В случае слоя KI присутствие жидкости приводит к некоторому уменьшению чувствительности SH_0 волны.
5. При распространении акустической волны в структуре «пьезоэлектрическая пластина – нанокompозитный полимерный слой» при определенной толщине слоя возникает резонансное затухание волны. При этом резонансная толщина слоя при фиксированной частоте волны не зависит ни от толщины пьезоэлектрической пластины, ни от ее материала.
6. Присутствие наночастиц в нанокompозитном полимерном слое приводит к сужению области резонансного затухания и к соответствующему увеличению диапазонов толщин и частот, в которых затухание волны практически отсутствует. Это позволяет выбирать такие соотношения толщин пленки и слоя, при которых акустическая волна практически не затухает в присутствии пленки.
7. Для управления температурным коэффициентом задержки (TCD) акустических волн в пьезоэлектрических пластинах можно использовать контакт с жидкостью, характеризующейся определенной зависимостью ее диэлектрической проницаемости от температуры. Тип используемой жидкости зависит от типа волны, материала и толщины пьезоэлектрической пластины. На примере SH_0 волны в пластине Y-X ниобата лития, контактирующей с бутилацетатом, продемонстрирована возможность снижения TCD на порядок при сохранении значения коэффициента электро-механической связи $K^2=30\%$.
8. Нулевое значение температурного коэффициента задержки SH_0 волны в структуре «нанокompозитный полимерный слой – вакуумный зазор – пластина ниобата лития» может быть достигнуто, если при увеличении температуры T диэлектриче-

ская проницаемость нанокompозита ε будет уменьшаться по закону $\Delta\varepsilon/\varepsilon = -0.023\Delta T$ ($[\Delta T] = \text{град С}$).

9. Путем изменения зазора между диэлектрической средой и пьезоэлектрической пластиной по определенному закону можно стабилизировать фазу акустического сигнала при изменении температуры в широком интервале.

10. С увеличением диэлектрической проницаемости среды величина необходимого для термостабилизации фазы относительного увеличения зазора между этой средой и пьезоэлектрической пластиной уменьшается.

11. Для создания эффективного приемника/излучателя акустической волны в газ можно использовать согласующее устройство, состоящее из трех слоев. При этом материал среднего согласующего слоя должен обладать значительной величиной модуля упругости, и достаточно высокой плотностью, нежели материалы в остальных двух слоях. Это означает, что целесообразно использовать в качестве согласующего среднего слоя «тяжелый» материал (металлы, кристаллы, некоторые виды стекол и пластиков), а в качестве двух других слоев – различные комбинации нанокompозитных материалов на основе полиэтилена высокого давления. Подобная структура позволяет увеличить амплитуду излучаемой волны в газ на 2-3 порядка по сравнению с известными образцами.

12. При создании излучателей/приемников акустических волн в жидкость на основе A_0 волн Лэмба в пьезоэлектрических пластинах использование слоя из нанокompозитного полимерного материала на основе матрицы полиэтилена высокого давления с наночастицами сульфида кадмия 30% с плотностью 1277 кг/м^3 , продольным и поперечным модулями упругости $20 \times 10^8 \text{ Па}$ и $1.9 \times 10^8 \text{ Па}$, соответственно, и продольным и поперечным коэффициентами вязкости $20 \text{ Па}\cdot\text{с}$ и $1.5 \text{ Па}\cdot\text{с}$, может улучшить эффективность излучения примерно на 1 дБ/л по мощности при соотношении толщин слоя и пластины ниобата лития $d/h=0.154$ и при частоте $f=1.3 \text{ МГц}$.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Teplykh A.A., Joshi S.G., Kuznetsova A.S. Power flow angle (PFA) of acoustic waves in thin piezoelectric plates // Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr.-2008.-V.55.-N9.-1984-1991.
2. Джоши С.Г., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Кузнецова А.С. Гравиметрическая чувствительность акустических волн в пьезоэлектрических пластинах // Радиотехника и электроника, 2005, т.50, №6, с.707-711
3. Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Джоши С.Г., Кузнецова А.С. Гравиметрическая чувствительность акустических волн в тонких пьезоэлектрических пластинах в присутствии жидкости // Письма в ЖТФ, 2006, т.32, вып.16, с.84-89
4. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G., Kuznetsova A.S. New method of change in temperature coefficient delay of acoustic waves in thin piezoelectric plates // Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr., 2006, v.53, no.11, pp.2113-2120
5. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Kuznetsova A.S. Acoustics waves in structure “piezoelectric plate-polymeric nanocomposite film” // Ultrasonics.- 2008.- V.48.- N6-7.- P.587-590
6. Кузнецова А.С., Шихабудинов А.М. Влияние температуры на характеристики акустических волн в структуре «пьезоэлектрическая пластина – нанокompозитная полимерная пленка»// Нелинейный мир, 2009, т.7, №6, с.483-484
7. Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Бородина И.А., Кузнецова А.С. Новый способ изменения температурного коэффициента задержки акустических волн в тонких пьезоэлектрических пластинах // Сб. научн. тр. «Информационные технологии в науке, производстве и социальной сфере». Саратов: Научная книга, 2005, с. 242-247.

8. Kuznetsova A.S., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G. The refraction surfaces of zero order acoustic waves in thin piezoelectric plates // Proceed. of IX Int.Conf. "Wave Electronics and its Appl. in Information and Telecommun. Systems, Non-Destructive Testing, Security and Medicine", 9-11 Oct., 2006, St.-Peterburg, Russia, 4 pages.
9. Кузнецова А.С. Поверхности рефракции акустических волн нулевого порядка в пьезоэлектрических пластинах // Материалы I конф. молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 28-30 сент.2006 г., Саратов. Изд-во ЗАО ПЦ «ИППО-ЛиТ-99», 2006. с.19-20
10. Kuznetsova A.S., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G. Gravimetric Sensitivity of Plate Acoustic Waves for Biological and Chemical Sensors // Proceed. of VIII Int.Conf. "Wave Electronics and its Appl. in Information and Telecommun. Systems", 4-8 Sept., 2005, St.-Peterburg, Russia, S2-17
11. Кузнецова А.С. Характеристики акустических волн в структуре «пьезоэлектрическая пластина – металлический/диэлектрический слой» // Сборник материалов школы-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2005». Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2005. с.28-31
12. Kuznetsova I.E., Joshi S.G., Zaitsev B.D., Kuznetsova A.S. Gravimetric Sensitivity of Fundamental Acoustic Waves in Piezoelectric Plates for Metal and Dielectric Massloading Layers // WCU/UI'05, 28 Aug. – 1 Sept.,2005, Beijing, China. Program and Abstracts, p.15
13. Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Ушаков Н.М., Кузнецова А.С. Акустические волны в структуре «пьезоэлектрическая пластина – полимерная нанокompозитная пленка с наночастицами CdS» // Труды XIX сессии РАО, 24-28 сентября 2007 г., г.Нижний Новгород, т.2, с.69-72
14. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Kuznetsova A.S. Influence of polymeric nanocomposite film on acoustic waves in piezoelectrics// Proceed. of Acoustics'08, June 29 –July 4, 2008, Paris, France, p.6053-6058
15. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Ushakov N.M., Kuznetsova A.S. Acoustic waves in structure "piezoelectric plate – polymeric nanocomposite film" // ICU'2007, April 9-12, 2007, Vienna, Austria, Book of Abstracts, p.166
16. Kuznetsova A.S., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E. Acoustic Waveguides Based on Thin Piezoelectric Plates and Nanocomposite Polymeric Films for Biological and Chemical Sensors // X Int.Conf. "Wave Electronics and its Appl. in Information and Telecom. Syst., Non-Destruct. Testing, Security and Medicine", 2-7 July., 2007, St.-Peterburg, Russia, Abstracts, p.52
17. Кузнецова А.С., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Акустические волны в структуре «пьезоэлектрическая пластина – металлсодержащая нанокompозитная полимерная пленка» // Материалы II конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 14-17 мая 2007, г. Саратов: Изд-во Колледж, с.62.
18. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Kuznetsova A.S. Acoustic waves in structures consist of polymeric nanocomposite material and piezoelectric plate // Int. Conf. AMAAV'09, Jan. 4-6, 2009, Cairo, Egypt, Book of Abstracts, p.12
19. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Shikhabudinov A.M., Kuznetsova A.S. Physical properties of nanocomposite polymeric materials and possibility of their applications in acoustoelectronics// 1st Int. Conf. on Nanostructured Materials and Nanocomposites (ICNM – 2009): April 6-8, 2009, Kottayam, Kerala, India. Program and Abstracts, p.49
20. Kuznetsova A.S., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E. The characteristics of fundamental shear-horizontal acoustic waves in structure "nanocomposite polymeric film-vacuum gap-piezoelectric plate" // ICU'2009, Jan. 11-17, 2009, Santiago, Chile. Program and Abstracts, p.21
21. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Joshi S.G., Kuznetsova A.S. New method of change in temperature coefficient delay of acoustic waves in thin piezoelectric plates // Proceedings of IEEE Ultrasonics Symp., 2005, pp.1272-1275

22. Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Кузнецова А.С. Влияние температуры на характеристики акустических волн в структуре «пьезоэлектрическая пластина – нанокompозитная полимерная пленка» // Труды XX сессии РАО, 27-31 октября 2008г., г. Москва, т.2, с.61-64
23. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Kuznetsova A.S., Shikhabudinov A.M. Development of temperature stable acoustic line based on piezoelectric plate and nanocomposite polymeric film // Proceedings of IEEE Ultrasonics Symp., 2008, Nov. 2-5, 2008, Beijing, China, pp.920-923
24. Кузнецова А.С., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Влияние температуры на характеристики акустических волн в структуре «нанокompозитная пленка – пьезоэлектрическая пластина»// Материалы III конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 25-27 июня 2008, г. Саратов, с.81-84.
25. Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Кузнецова А.С. Новый способ изменения температурного коэффициента задержки акустических волн в структуре, содержащей пьезоэлектрическую пластину// Труды XXII сессии РАО, 15-17 июня 2010г., г. Москва, т.1, с.1-8
26. Кузнецова А.С., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Бородин И.А. Новый способ изменения температурного коэффициента задержки акустических волн в структуре, содержащей пьезоэлектрическую пластину// Материалы V конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 6-8 сентября 2010, г. Саратов, с.145-147
27. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Kuznetsova A.S. New Method of the Change of TCD of Acoustic Waves in Structure Containing Piezoelectric Plate // Proceedings of IEEE Ultrasonics Symp., 2010, Oct. 11-13, 2010, San-Diego, USA, pp.2219-2222
28. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Kuznetsova A.S., Shikhabudinov A.M., Teplykh A.A., Borodina I.A. The use of nanocomposite polymeric materials for optimization of acoustic gas flowmeter parameters// ICU'2009, Jan. 11-17, 2009, Santiago, Chile. Program and Abstracts, p.20.
29. Кузнецова А.С., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Оптимизация излучателя/приемника акустических волн ультразвуковых расходомеров газа// Материалы IV конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 7-9 сентября 2009, г. Саратов, с.54-56
30. Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Бородин И.А., Кузнецова А.С. Антисимметричные волны Лэмба нулевого порядка в структуре «пьезоэлектрическая пластина – нанокompозитный слой – жидкость»// Труды XXIV сессии РАО, 12-15 сентября 2011 г., г. Саратов, т.1, с.70-73

Кузнецова Анастасия Сергеевна

АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В СТРУКТУРАХ, СОДЕРЖАЩИХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ СЛОИ

Автореферат

Подписано в печать формат 60×84 1/16

Уч. -изд. л. 1,0 Тираж 100. заказ

Типография Издательства Саратовского университета.

410012, Саратов, Астраханская, 83