

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Вороновой Натальи Владимировны

«Акустические свойства тонких пьезоэлектрических пластин при воздействии вязких и электропроводящих жидкостей», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Датчики на акустических волнах имеют потенциальные возможности для множества применений, поэтому потребность в них стремительно возрастает. Совершенствование датчиков на основе акустических волн является своевременным и актуальным.

**Научная новизна.** Исследованы новые типы волн в структурах монокристаллических пластин с толщиной, составляющей доли и единицы длины волны. Ранее такие объекты не представляли большого практического интереса, но потребности в измерениях вязкости жидкостей выросли, поэтому выбор в данной работе именно таких структур для исследования распространения и применения акустических волн обуславливает бесспорную научную и практическую новизну результатов.

Исследование в работе параметров нормальных волн в кристаллических пластинах, включая однослойные и двухслойные структуры, проведено впервые. Также, впервые установлены не всегда очевидные особенности поведения температурных коэффициентов нормальных волн в зависимости от относительных размеров пластин, номеров волн, и анизотропных свойств ТКЛР. Исследованы пока недостаточно изученные волны, носящие имя И.В. Анисимкина.

В работе предложены новые подходы к проведению измерений и интерпретации результатов, позволяющие на основе одновременного испытания нескольких микропроб определять ряд важнейших физических

параметров: вязкость, температуру, проводимость и даже осуществлять идентификацию исследуемых жидких материалов.

Такая полнота объема данных, полученных и проанализированных в работе, является новой, так как опубликованные ранее работы других авторов ограничивались лишь волнами, интересными для конкретных применений этих авторов.

**Теоретическая значимость** работы отражена в обработке большого объема расчетных данных о параметрах нормальных волн в пластинах, позволившей осуществить выбор конкретных ориентаций монокристаллических материалов и выбора комбинаций материалов и слоистых структур для различных вариантов измерений. Также, теоретический интерес представляет проведенное в работе подробное изучение особенностей одновременно применяемых волн И.В. Анисимкина и других типов нормальных волн в пластинах.

В работе продемонстрировано глубокое понимание теоретических основ и расчетных возможностей свободно распространяемого программного обеспечения, разработанного группой Адлера-Фарнелла, и искусное владение приемами, позволяющими использовать все возможности этого высококачественного научного продукта для досконального исследования всех типов волн, представленных в диссертации.

**Практическая значимость** диссертации подкрепляется двумя патентами РФ, защищающим права авторов на конструкцию чувствительного элемента и методики измерений для акустического жидкостного сенсора.

Экспериментальная проверка результатов расчетов, и поверка численными методами аналитических выкладок подтверждают обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Диссертация состоит из введения четырех глав и заключения.

*Во введении* представлены сведения о работе в целом, о структуре диссертации, об актуальности, новизне и других наукометрических параметрах представленного труда.

*Первая глава* диссертации дает обзор известных сведений и работ, опубликованных ранее по тематике акустических датчиков. В главе обсуждается выбор типов волн в качестве основы для создания чувствительных элементов беспроводных датчиков параметров жидкостей и выбирается круг вопросов, наиболее важных для развития этого направления. Достаточно подробно описываются принципы работы и конструкции датчиков на разных типах волн, чем обосновывается последующий выбор предмета исследований, описанных в последующих главах.

*Во второй* главе автор дает подробное описание метода расчета акустических волн с помощью открытого программного обеспечения. Ценность авторского текста состоит в отлично дидактически структурированном изложении приемов работы с этой программой, которая имеет недостаточно подробное описание, и в демонстрации примеров ее применения для всех типов волн, относящихся к данной работе. Проведены расчеты волн в пьезоэлектрических пластинах различных ориентаций и в структурах, состоящих из нескольких слоев, и находящихся в акустическом контакте с различными жидкостями. Глава содержит описание экспериментальных методик с использованием нормальных волн для исследования свойств жидкостей с различной вязкостью.

*Третья глава* – содержит расчеты и обсуждение параметров возбуждения и распространения волн в пластинах наиболее распространенных пьезоэлектрических кристаллов, перспективных для применения в датчиках параметров жидкостей. Расчеты типов волн произведены для множества ориентаций подложек, для всех волн в пластинах включая горизонтально-поперечные волны, волны Лэмба различного порядка, а также

квазипродольные волны и волны И.В. Анисимкина. Обнаружены любопытные особенности, например, «веерообразность» (согласно терминологии автора) распространения мод высших порядков. В работе дано весьма полезное сравнение волн в пластине кремния с различными пленками ZnO и AlN. Интересны данные, полученные по этим структурам с относительно малыми толщинами несущей подложки из кремния. Особенно интересны экспериментальные результаты измерения трехслойных структур. Тщательный анализ возможных комбинаций волн, проведенный в этой главе, представляет достаточно возможностей для выбора конструкций датчиков параметров жидких сред. Проведенные исследования впечатляют выполненным объемом расчетов, а также подробностью и тщательностью обсуждения деталей обнаруженных свойств исследованных волн.

*В четвертой главе* обсуждаются вопросы, непосредственно относящиеся к распространению всех вышеописанных типов волн в пластинах в условиях контакта с вязкой жидкостью, обладающей различной плотностью, различной скоростью акустических волн, различной вязкостью и различной проводимостью, притом, что все эти параметры, как и параметры самих волн зависят от температуры. В этой главе приводится полезная формула для ТКЧ волн в пластинах, позволяющая на основе материальных констант вычислять этот важный параметр для исследованных типов волн.

Здесь же описаны оригинальные подходы к постановке экспериментов, экспериментальные результаты по измерению параметров жидкостей, как проводящих, так и диэлектрических, особенности разных вариантов датчиков, индивидуально сконструированных для исследуемых в работе объектов. Сравнение результатов измерений с расчетными параметрами показало справедливость расчетных подходов для анализа свойств жидкостей, чем подтверждается достоверность данных расчетов и рекомендаций, изложенных в диссертации. Весьма привлекательна и

достаточно убедительно обоснована возможность идентификации жидких сред на основе одиночного измерения одиночных микропроб.

Диссертационная работа выглядит логично спланированным и завершенным исследованием. Она хорошо структурирована и содержит дидактические приемы, которые обуславливают ее полезность в усвоении материала ее будущими читателями. Особенно привлекательными представляются четкие выводы по каждому параграфу. Работа представляет собой результат огромного, тщательно выполненного, многолетнего труда.

Публикации автора достаточно полно отражают достижения этой работы.

***К недостаткам работы можно отнести следующее:***

1. Излишне подробное изложение множества частных примеров.
2. Огромный объем материала обуславливает некоторый разноречивый в изложении, для одних материалов/структур подробнее описываются одни свойства для других материалов/структур другие.
3. Не рассматриваются вопросы влияния дифракции волн на результаты измерений свойств жидкостей.
4. Не обсуждается влияние акустических свойств металла ВШП и металлических покрытий в измерительной области датчиков на результаты измерений параметров жидкостей.
5. Предположение о возможности судить о «вкусе» жидкого вещества по физическим свойствам жидкости является слишком сильным, так как не включает в себя химическую природу вкусовых ощущений.
6. Выбор конкретных материалов для демонстрации принципов в работе обуславливался их доступностью, а не какими-то другими выдающимися свойствами.
7. Рукопись содержит некоторое количество опечаток, в основном орфографического характера.

Однако отмеченные недостатки несущественно снижают достоинства и высокий уровень диссертационной работы в целом. Диссертация Вороновой Н.В. «Акустические свойства тонких пьезоэлектрических пластин при воздействии вязких и электропроводящих жидкостей» соответствует специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» и удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, автореферат отражает содержание диссертации полностью. Считаю, что Воронова Наталья Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

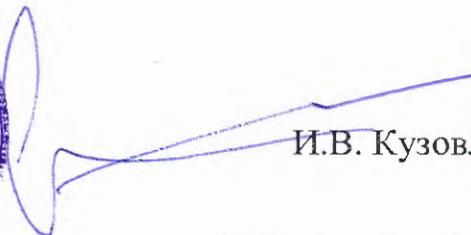
Жгун Сергей Александрович Заведующий научной лабораторией на кафедре основ радиотехники Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», кандидат технических наук по специальности 05.12.01 «Теоретические основы радиотехники», старший научный сотрудник

«28» 12 2018 г.

 /Жгун Сергей Александрович/

Телефон +7 (495) 362-72-12, электронная почта [zhgoon@gmail.com](mailto:zhgoon@gmail.com), [zhgoon@mpei.ru](mailto:zhgoon@mpei.ru)

Подпись Жгуна С.А. удостоверено  
Ученый секретарь  
Ученого совета «НИУ «МЭИ»

 И.В. Кузовлев

Организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”»; 111250, Москва, Красноказарменная ул. дом 14: +7 (495) 362-70-01; [www.mpei.ru](http://www.mpei.ru); [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru)