

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Недоспасова Ильи Александровича “Особенности распространения обратных и прямых акустических волн в изотропных и анизотропных пластинах и структурах на их основе”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 -физика конденсированного состояния.

Актуальность

Диссертационная работа И.А. Недоспасова посвящена исследованию обратных и прямых акустических волн в изотропных и анизотропных пластинах и структурах на их основе. В последние годы, в связи с появлением новых материалов и развитием современной измерительной техники, обратные акустические волны вновь стали объектом активных научных исследований. Изучение свойств этих волн имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение. На их основе возможно развитие нового класса устройств обработки сигналов. Например, предложено использовать эти волны для создания таких устройств, как резонатор на волнах с нулевой скоростью, как суперлинза на обратных волнах Лэмба и т.д. Особенно интересно исследование эффектов аномальной дисперсии для пьезоэлектрических материалов с необычными свойствами. Все вышесказанное позволяет утверждать, что заявленная тема диссертации является актуальной.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитированной литературы. Диссертация содержит 129 страниц машинописного текста, включая 43 рисунка, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 113 наименований. Основные результаты диссертации изложены в 15 научных публикациях.

Научная новизна. Исследован один из интереснейших классов акустических волн в ограниченных средах - обратные акустические моды в пластинах. Новизной работы является теоретическое и экспериментальное исследование свойств этих волн, распространяющихся в пьезоэлектрических пластинах. Исследовано влияние электрических граничных условий на поверхности пьезоэлектрических пластин на характеристики сдвиговых обратных волн. Впервые была показана возможность управлять как величиной электрического потенциала, связанного с акустической волной, так и амплитудой смещения частиц по толщине пластины изменяя электрические граничные условия на поверхности пьезоэлектрической пластины. Большое внимание в диссертации уделено изучению локализованных волн на границе клиновидных структур. Впервые численными методами обнаружены обратные акустические волны в подобных структурах.

Во введении приведен обзор литературы по исследуемой тематике, представлены сведения о структуре диссертации и наукометрических показателях работы. Описана актуальность темы диссертации и новизна полученных результатов.

Первая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию обратных и прямых акустических волн в анизотропных и пьезоэлектрических пластинах и структурах на их основе. В первом параграфе описан численный метод расчета спектра акустических мод в анизотропных пластинах, основанный на сведении изначальной общей постановки проблемы к задаче на собственные значения, компоненты векторов которой состояются из проекций смещений и элементов тензора напряжений. При помощи этого метода был рассчитан спектр акустических волн в пластине YX ниобата лития, и было показано существование в нем обратной моды. На основе этих теоретических расчетов во втором параграфе предложена новая экспериментальная методика возбуждения и детектирования обратных акустических волн Лэмба в пьезоэлектрических пластинах, базирующаяся на использовании набора резонаторов на встречно-штыревых преобразователях с различным пространственным периодом. Для каждой системы ВШП на установке снимались зависимости действительной и мнимой части импеданса по частоте. Затем по характерному изменению положения пиков по частоте у действительной части импеданса для разных периодов ВШП определялся тип данной волны. Дополнительно в третьем параграфе было проведено моделирование аналогичного набора резонаторов с соответствующими пространственными периодами методом конечных элементов, которое дало хорошее согласование с экспериментом.

В заключительном параграфе диссертантом была рассмотрена задача об обратных вытекающих акустических волнах Лэмба в изотропных пластинах, погруженных в жидкость. Изучены основные энергетические характеристики данных волн, такие как поток энергии и скорость переноса энергии. Аналитически показана любопытная особенность равенства нулю усредненного по времени и интегрального по толщине потока энергии для вытекающих обратных волн Лэмба. Диссертантом предложена полезная процедура вычисления скорости переноса энергии для этого необычного случая, основанная на ограничении области интегрирования величины горизонтальной проекции усредненного по времени потока энергии только толщиной пластины. Дополнительно, автором получены аналитические выражения для коэффициентов затухания в общем случае для пластины, погруженной в жидкость.

Во второй главе исследованы сдвиговые акустические волны в пьезоэлектрических пластинах. В первом параграфе И.А. Недоспасов в явном аналитическом виде получил точные дисперсионные соотношения для случаев распространения волн в пластинах

ниобата калия, граничащих с вакуумом. Основываясь на них, им был численно рассчитан спектр чисто сдвиговых волн в пластинах Y- и X- среза ромбического кристалла ниобата калия, который, как известно, является сильным пьезоэлектриком. Показано, что в данном спектре для пластины XY ниобата калия существуют широкие частотные диапазоны с обратными акустическими волнами, которые отсутствуют в спектре пластины YX ниобата калия. Кроме того, обнаружено, что с увеличением номера моды эти частотные диапазоны - уширяются. Во втором параграфе получено их приближенное описание, основанное на разложении изначальных точных секулярных уравнений для сдвиговых мод в ряды Тейлора по малым значениям волнового числа вблизи точек зарождения мод. Показано, что такое разложение адекватно описывает дисперсионную зависимость сдвиговых волн в пластине ниобата калия вблизи толщинных резонансов. В третьем параграфе основываясь на данном представлении диссертант показал, что каждый член разложения имеет определенный физический смысл, таким образом, был описан вклад всех физических механизмов возникновения обратных волн. Им было отмечено, что основной вклад в существование обратных сдвиговых волн вносят коэффициенты при квадратичных членах разложений, которые пропорциональны величине кривизны сечения поверхности медленности для сдвиговых объемных волн. Из этого вывода следует, что при направлении отрицательной вогнутости в сторону к поверхности пластины, например, случай пластины XY ниобата калия, возникает разнонаправленность проекций вдоль горизонтальной оси фазовой и групповой скоростей парциальных сдвиговых волн, что приводит к аномальной дисперсии в спектре. Дополнительно отмечено, что коэффициент при линейном члене описывает отрицательное смещение лучей объемных сдвиговых волн при наклонном отражении от поверхности в пьезокристаллах, что дает незначительный вклад в существование обратных волн.

В последнем параграфе второй главы также теоретически исследовано влияние электрических граничных условий на дисперсионные кривые поперечно-горизонтальных акустических волн и на распределения их акустических и электрических полей по толщине пластины. Продемонстрировано сильное влияние электрических граничных условий на данные характеристики. Интересной особенностью данного влияния заключается в отключении аномальной дисперсии для первой моды при металлизации двух сторон пластины.

Третья глава посвящена исследованию локализованных акустических волн на общих границах сложных волноводов, состоящих из краев и клиньев. В первом параграфе для вычислений автором самостоятельно реализован и запрограммирован полуаналитический метод конечных элементов, учитывающий наличие силовых источников и идеально

согласованных слоев. Диссертантом описан более общий аналог волн Рэлея-Стоунли с наклонной границей. В этих геометриях во втором параграфе для случаев пуассоновских сред были оценены диапазоны существования данных локализованных волн в волноводах в виде полупространства состоящего из двух клиньев, и композитного клина, состоящего из двух сред. Диссертантом показаны тенденции изменения скоростей мод при вариации общего угла системы. Были рассчитаны зависимости фазовой скорости волн композитного клина из изотропных сред как функции одного из углов этой структуры при учете внешнего источника, а также обнаружены интересные свойства вытекающих волн в данных композитных структурах. В третьем параграфе была исследована дисперсионная зависимость и модовый состав в волноводах клиново-кромочного типа, имеющих вид усеченного клина, состоящего из трех сред. Для этой структуры аналогично решалась задача при учете внешнего источника, и были исследованы вытекающие вглубь центральной среды волны.

В последнем параграфе третьей главы показано, что в волноводах сложной формы в виде клина выполненного из силикона с закрепленными границами, а также в аналогичном волноводе, но граничащего с двумя четверть пространствами из оргстекла могут распространяться моды с аномальной дисперсией.

Для оптимизации и верификации расчетов полуаналитический метод конечных элементов был проверен с помощью метода функций Лаггера в результате чего было показано их хорошее соответствие, что позволило подобрать оптимальные параметры для выбора сетки.

Сказанное выше подтверждает научную новизну результатов, полученных в диссертации.

Теоретическая значимость. Работа в основном является теоретической, но с большой экспериментальной частью. Положительным моментом является применение как численных, так и аналитических методов, которые согласуются друг с другом.

В работе автором продемонстрировано глубокое понимание теоретических методов как аналитических, так и численных, при решении задач распространения волн в волноводах. Автор использует как реализованные самостоятельно программы, так и коммерческое программное обеспечение.

Практическая значимость диссертации заключается в возможном применении обратных волн для создания устройств акустоэлектроники. В обзоре литературы подробно описаны возможные применения данных волн, например, резонатор на волнах с нулевой

групповой скоростью. Что касается клиново-кромочных волноводов, то они могут найти применение для описания мод возникающих на интерфейсе устройств, состоящих из двух контактирующих сред, скрепленных промежуточным слоем.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждается использованием надежных теоретических методов и их верификация с другими подходами. В работе используются хорошо известные материалы с проверенными материальными константами. Все результаты работ опубликованы в авторитетных рецензируемых научных изданиях и доложены на ряде отечественных и международных профильных конференциях. В случае, когда расчеты получены одним методом, то в работе они проверяются дополнительно другими методами.

В качестве недостатков к диссертационной работе следует отнести следующие:

1. Работа содержит некоторое количество опечаток, в основном они касаются орфографического и пунктуационного характера.
2. Автор в разных главах использует одинаковое обозначение для разных величин, что иногда вводит в заблуждение. Например, потенциал электрический и потенциал колебаний в жидкости, или вектор электрической индукции и оператор дифференцирования.
3. Автор в тексте диссертации ссылается не на все свои публикации,
4. Автор не обсудил влияния вязкости в среде на нулевые значения потока энергии вытекающих обратных волн.
5. В обзоре недостаточно рассмотрен вопрос об обратных волнах в цилиндрах, трубах и оболочках.
6. Не указана величина коэффициента электромеханической связи для кристалла ниобата калия, который в статье упоминается как сильный пьезоэлектрик.

Однако эти замечания не снижают высокой оценки рассматриваемой диссертации. Она представляет собой завершённое научное исследование, выполненное на высоком теоретическом и экспериментальном уровне и содержит решение актуальных задач о свойствах обратных и прямых акустических волн в анизотропных и изотропных пластинах и структурах на их основе.

Основные результаты, полученные в диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных научных изданиях, а также были представлены и доложены на ряде Российских и международных профильных научных конференциях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа И.А. Недоспасава является законченным научным исследованием и содержит принципиально новые важные результаты.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям и Илья Александрович Недоспасов безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.06 – акустика,

Профессор кафедры акустики физического факультета

МГУ им. М.В. Ломоносова

А.И. Коробов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Физический факультет, кафедра акустики

тел.: +7(495)939-1821

e-mail: aikor42@mail.ru

Подпись доктора физико-математических наук, профессора Коробова А.И. удостоверяю.

Декан физического факультета Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова,

Профессор

« 17 » сентября 2019 г.



Н.Н. Сысоев