

ОТЗЫВ

официального оппонента В.М. Левина на диссертационную работу Недоспасова Ильи Александровича “Особенности распространения обратных и прямых акустических волн в изотропных и анизотропных пластинах и структурах на их основе”, представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа И.А. Недоспасова посвящена развитию ряда актуальных направлений современной акустики твердого тела, так или иначе связанных с наличием в спектре упругих возбуждений областей с противоположными направлениями групповых и фазовых скоростей – т.н. обратных волн.

В последние десятилетия пристальный интерес исследователей вызывают волновые явления, связанные с различием направлений фазовой и групповой скорости для упругих возбуждений в твердых телах. В акустике твердого тела этот интерес первоначально был связан с особенностями распространения упругих колебаний в кристаллической среде, прежде всего, с явлениями т.н. фононной фокусировки – преимущественного распространения энергии упругих возмущений вдоль определенных кристаллографических направлений. Другим объектом интереса оказались упругие среды с аномальной дисперсией, для которых в ультразвуковом спектре возникают частотные диапазоны, в которых направления фазовой и групповой скоростей упругих возбуждений оказываются противоположными – т.н. обратные волны. С существованием обратных волн связан целый класс физических явлений – отрицательное преломление и т.д.; представляющих, помимо фундаментального, значительный практический интерес.

Обратные волны в акустике обычно связываются с распространением упругих возбуждений в композитных средах с периодической пространственной структурой. В таких средах происходит кардинальная перестройка ультразвуковых спектров – возникает зонная структура, в спектрах появляются участки с падающей зависимостью частоты от волнового вектора, которые и соответствуют областям существования обратных волн. В то же время существует класс упругих возбуждений, которые не требуют создания особых сред для наблюдения обратных волн. Речь идет о волноводных модах различного типа. Уже для лэмбовских волн в изотропных пластинах существуют моды с падающими участками в частотном спектре. Значительно большее разнообразие обратных волновых возбуждений возникает для мод в анизотропных пластинах, в других волноводных системах. В настоящее время интерес к изучению обратных волн в пластинах и других волноводных системах

возрастает. Исследуются условия возникновения аномальной дисперсии для волноводных мод в изотропных и анизотропных пластинах. Для анизотропных пластин исследуется вопрос об оптимальной форме поверхности медленности и выборе ориентации среза для наблюдения обратных волн. Особой проблемой оказывается возбуждение и, главное, прием обратных волн и их экспериментальное исследование и использование. Однако, несмотря на значительный прогресс в изучении обратных волн в волноводных системах остаются неисследованными многие важные детали возникновения таких мод, особенностей их распространения и эффектов, возникающих с участием таких волн. Решению части этих проблем и посвящена диссертационная работа И.А. Недоспасова.

Диссертация состоит из введения, трех глав основного текста, краткого заключения с основными результатами и выводами, списка работ автора по теме диссертации, состоящего из 15-ти наименований, и списка цитированной литературы, включающего 113 наименований.

Введение содержит формулировку проблем, решаемых в рамках диссертационной работы и обзор литературы по результатам теоретических исследований в области аномальной дисперсии упругих волн в волноводных системах, теоретических и экспериментальных исследований особенностей распространения обратных волн в таких объектах. Введение также включает стандартные пункты, характеризующие цель и задачи работы, ее научную новизну, научную и практическую значимость работы, список основных положений, выносимых на защиту, данные об апробации диссертации и публикациях. Вкратце дается структура диссертации и содержание отдельных глав.

1-ая глава диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию особенностей распространения волноводных мод в анизотропной пьезопластине. Исследования проводились для пьезоактивных лэмбовских волн в пластине УХ среза ниобата лития. Пьезоэффект использовался автором для возбуждения волноводных мод с применением встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Из численно рассчитанных дисперсионных зависимостей показано, что для одной из пьезоактивных лэмбовских мод 1-го порядка существует диапазон частот, соответствующих обратным волнам. На основе результатов расчета было проведено экспериментальное исследование возбуждения колебаний этой моды на ВШП с различным пространственным периодом и показано наличие областей аномальной дисперсии в спектре этой моды.

Особо хочется отметить основные оригинальные результаты, полученные И.А. Недоспасовым, для вытекающих обратных мод в пластинах, погруженных в жидкость. Для прямых волн особенности распространения волны в погруженной пластине хорошо

известны. В жидкости со скоростью звука меньшей скорости волноводной моды, распространяющееся возбуждение формирует звуковую волну, уходящую от пластины в направлении, задаваемым периодичностью на поверхности пластины. За счет утечки энергии возникает специфическое затухание волноводной моды вдоль направления ее распространения, а амплитуда вытекающей в жидкости волны нарастает в направлении от пластины. Для обратных волн диссертантом на основе энергетических соотношений показано, что в отличие от прямых волн, обратные волноводные моды затухают вдоль пластины в направлении, противоположном волновому вектору, а амплитуда волны утечки уменьшается с расстоянием от пластины, а не нарастает как в случае прямой волны.

Из тех же энергетических вычислений диссертантом получен другой важный результат – полный поток энергии вдоль направления распространения вытекающей моды равен нулю, т.к. перенос энергии в жидкости вдоль направления распространения компенсирует перенос в обратном направлении в пластине за счет отрицательной групповой скорости волноводной моды.

Во **2-ой главе** диссертации исследуются особенности распространения сдвиговых волноводных мод в кристаллических пьезопластинах. В качестве объекта исследования выбраны пластины ниобата калия – ромбического кристалла, для которого в направлениях, лежащих в XU плоскости, возможно распространение сдвиговых волн с векторами поляризации вдоль оси Z . В пластине, вырезанных перпендикулярно осям X и Y , рассмотрены чисто сдвиговые волноводные моды – вдоль оси Y для X -среза и вдоль оси X для Y – среза. Выведены дисперсионные уравнения и получены дисперсионные зависимости для этих мод, найдены соответствующие поля смещений и электрического потенциала для указанных срезов и направлений распространения. Показано, что чисто сдвиговые моды являются прямыми модами в пластинках Y ориентации и обратными модами в пластинках X -среза. Важным результатом является выявленная связь между характером распространения волноводных мод и топологией поверхности медленности для сдвиговых волн в материале пластин. Показано, что существование обратных волн тесно связано с наличием участков отрицательной кривизны (вогнутости) на этой поверхности. Показано, что при наличии участков вогнутости фазовые и групповые скорости сдвиговых парциальных волн, образующих волноводную моду, могут быть разнонаправленными по отношению к направлению распространения самой волноводной моды и обуславливать ее обратный характер.

В главе рассматривается вопрос о поведении импульсов сдвиговой волноводной моды, формируемых в частотном интервале, где обращается в нуль групповая скорость волноводной моды и происходит переход от обратной моды к прямой. Такой импульс

оказывается захваченным, его эволюция определяется эффектами расщепления. Предлагается использовать волноводные моды с такими параметрами для создания ультразвуковых резонаторов с ВШП возбуждением.

Интересным представляется полученный И.А. Недоспасовым результат о зависимости аномальной дисперсии в спектрах сдвиговых мод от металлизации и поверхностной проводимости. Им показано, что эти факторы сильно влияют на характер дисперсионных зависимостей для тех мод, для которых характерно наличие участков с отрицательной групповой скоростью. В частности, показано, что для электрически закороченной пластины волноводные моды могут терять участки спектра с отрицательной скоростью и трансформироваться в прямую волну.

Глава 3 посвящена изучению достаточно нового типа упругих возбуждений, т.н. клиновых волн, представляющих собой волноводные моды, распространяющиеся вдоль одномерных протяженных структур – клиньев, кромок, ребер. В диссертации рассматриваются одномерные волноводные моды в неисследованных ранее конфигурациях – вдоль ребер составных клиньев, в т.ч. вдоль кромки составного полупространства, и вдоль свободного края усеченного составного клина.

Задача о распространении клиновых мод решается численным образом в 2-ух постановках – в виде задачи о собственных одномерных модах в перечисленных конфигурациях и в виде задачи о возбуждении таких мод гармоническим распределенным источником. Для решения поставленных задач используется вариационный подход. Записывается лагранжиан системы с учетом граничных условий; при этом, условия на бесконечности заменяются контактом с идеально согласованными слоями. Варьирование лагранжиана дает систему линейных уравнений; ее решение определяет область существования клиновых мод, их скорость распространения и распределение полей смещений для клиновых мод в объеме изучаемой конфигурации. Важную роль для физики клиновых волн играет определение областей значений геометрических и механических параметров структуры, для которых эти волны существуют. Диссертантом такие области существования исследованы для рассматриваемых им составных волноводов сложной формы. Для сопряжения в полупространстве или клине изотропных сред определены области существования клиновых мод в зависимости от величины отношений плотностей и упругих параметров сред, образующих клин или полупространство. Показано, что размер, занимаемый такой областью, зависит от углов раскрытия в составном клине или от угла сопряжения сред в полупространстве. С ростом углов область существования клиновых мод сужается, оставаясь внутри областей для меньших углов сопряжения. Расчет определены

скорости распространения в реальных одномерных волноводах - однородных и составных клиньях, в зависимости от угла раскрытия клина и углов сочленения в нем.

Расчеты показывают, что клиновые моды могут быть вытекающими. Такой случай рассмотрен в диссертации для составного клина из акустически контрастных материалов; показывается сильная зависимость, как скорости распространения, так и величины вытекания в зависимости от углов раскрытия составляющих клиньев. Особый интерес представляет исследование волноводных мод в усеченном клине, составленном из 2-ух остроугольных клиньев и срединного параллелепипеда. В этом случае появляется геометрический параметр с размерностью длины – толщина срединного параллелепипеда; и, соответственно, возникает дисперсия фазовой скорости. В работе, по-видимому, впервые рассчитываются дисперсионные кривые для одномерных волноводных мод вдоль среза клина, и исследуется структура волновых полей для таких мод с учетом явления утечки волны в объем срединного слоя.

Наконец, в последнем разделе этой главы совсем кратко рассматриваются примеры возникновения отрицательных групповых скоростей у одномерных волноводных мод. Существование обратных волн требует сильной дисперсии, которая возникает только при наличии у рассматриваемых волноводов геометрического параметра с размерностью длины. Такой параметр возникает в структурах, составленных из боковых клиньев или четверть-пространств с зажатым между ними промежуточным слоем, в виде толщины этого слоя. В диссертации теоретически показывается существование обратных мод, распространяющихся вдоль торца акустически мягкого промежуточного слоя, зажато между 2-мя жесткими четверть-пространствами. Приводятся рассчитанные дисперсионные кривые, демонстрирующие наличие падающих участков в зависимости модовой частоты от ее волнового вектора для одномерных волноводных мод на торце слоя между жесткими прямоугольными клиньями.

В целом, диссертация И.А. Недоспасова включает оригинальные результаты анализа особенностей волноводного распространения упругих колебаний в пластинах и одномерных волноводах. Исследованные особенности связаны со сложной геометрией волновода, с возможностью переизлучения волноводных мод в окружающую среду в виде волн утечки и с возможностью возникновения за счет сильной пространственно-временной дисперсии обратных волноводных мод с отрицательной групповой скоростью и противоположными направлениями переноса фазы и энергии волны. Следует подчеркнуть, что математические сложности, возникающие при описании этих явлений, изначально требуют применения численных методов. В связи с этим диссертант продемонстрировал не только виртуозное

владение различными методами численных расчетов, но и высококвалифицированное умение интерпретации результатов этих расчетов, основанное на глубоком понимании диссертантом физической сущности анализируемых явлений.

Большинство особенностей волноводного распространения упругих колебаний, исследованных в диссертации, определяет физические явления, представляющие интерес не только для развития фундаментальных представлений в области физики ультразвука, но и для практического применения при создании и применении ультразвуковых резонаторов и волноводов.

Высоко оценивая работу в целом, позволю сделать несколько критических замечаний.

1. При анализе сдвиговых волноводных мод в пьезопластинках (§1 главы 2) рассматривается случай, когда групповая скорость таких мод имеет минимум (стр.55-56 диссертации). Автор утверждает, что, поскольку 2-ая производная $\partial^2\omega/\partial^2k^2$ обращается в нуль, то волновой пакет с несущей частотой, соответствующей этому минимуму, будет распространяться без расплывания. Однако, из Рис. 2.3 видно, что производная $\partial^2\omega/\partial^2k^2$ имеет, по крайней мере, для первых мод A1 и S1, очень крутой наклон. Казалось, он и должен определять характер изменения формы волнового пакета. Из-за большой крутизны наклона это изменение формы может быть заметным уже при сравнительно небольших смещениях пакета.
2. Результаты, приводимые диссертантом в гл.3 при анализе одномерных волноводных мод основываются исключительно на числовых расчетах и не имеют простой физической интерпретации. В этой ситуации важно простое и ясное изложение схемы расчета. В диссертации эта схема приводится в расчете на специалиста, работающего в области математического моделирования волновых процессов. В результате опущены многие детали, необходимые для понимания схемы учеными, далекими от модельных расчетов. В частности это касается и самих принципов расчета (§1 главы 3). Они выполнялись, очевидно, в рамках вариационного подхода, однако использование вариационных принципов при описании процедуры расчета даже не упоминается.
3. Спутана нумерация литературных ссылок на стр.103. Там содержатся ссылки на статьи [111] - [113] и несуществующий пункт [114] с обзором. По крайней мере, ссылки [112] и [113] не имеют никакого отношения к проблемам, обсуждаемым на этой странице.
4. К сожалению, крайне небрежно написан 4-ый, последний, параграф главы 3 “Обратные акустические волны на краю пластины и в системе из 3-ех изотропных тел”. Остается непонятным, почему на подписях к рисункам 3.12 – 3-14, на которых явно отображены дисперсионные зависимости фазовой скорости (Рис. 3.12) и собственной частоты (Рис. 3-13,

3-14) от обезразмеренного волнового вектора kd (d – толщина промежуточного слоя), пишется “о величине квадрата вектора смещения у поверхности среды 3 ...”. Это же замечание относится и к предшествующим рисункам 3.9 и 3.10 с дисперсионными кривыми для волноводных мод в усеченном клине.

5. Из приведенных на Рис. 3-13 дисперсионных кривых ясно следует, что падающий участок $\omega(k)$ -зависимости, соответствующий обратным волнам, приходится на область небольших значений волнового вектора $0.5 \leq kd \leq 1$; при больших kd ($kd \geq 1$) возникает переход к положительной групповой скорости. В то же время текст прямо над рисунком гласит прямо противоположное: “... при малых kd моды имеют положительную групповую скорость. С другой стороны, при больших значениях kd в спектре наблюдаются моды с отрицательной скоростью переноса энергии (Рис. 3-13)”.

Отмеченные недостатки не снижают общего положительного впечатления от работы. Диссертационная работа И.А. Недоспасова носит глубокий и пионерский характер. Она вводит в оборот научных и практических фактов новые представления о характере волноводных мод в двумерных и одномерных волноводных системах. Результаты работы будут, безусловно, востребованы при создании и применении ультразвуковых резонаторов и волноводов.

Работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершенное научное исследование. Существенным достоинством диссертации следует отнести совмещение теоретических и экспериментальных исследований – диссертант подтверждает результаты теоретического анализа достаточно тонкими экспериментами. Автор показал обширные и основательные знания в области акустики и физики ультразвука, свободное владение сложной техникой математических расчетов и моделирования волновых процессов, важное умение придавать физическую интерпретацию результатам расчетов. Хочется отметить широкую эрудицию автора, его свободное владение современными математическими методами и техникой ультразвукового эксперимента.

Объем представленных результатов, значение сделанных выводов, эрудиция автора удовлетворяют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Указанные выше замечания ни в коей мере не снижают ценности работы.

Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 15 научных публикациях, в том числе в виде 5-ти публикаций в журналах, входящих в список ВАК, и 4-ех публикаций в ведущих зарубежных научных журналах. Результаты также представлялись на многочисленных научных конференциях, российских и международных.

Работа И.А. Недоспасова удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертационной работы.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией Института биохимической
физики им. Н.М. Эмануэля РАН
тел.: 8 (499) 137 83 47
e-mail: levin1943@gmail.com

В.М. Левин

Подпись к.ф.-м.н. В.М. Левина заверяю.
Ученый секретарь ИБХФ РАН им. Н.М. Эмануэля
кандидат биологических наук



С.И. Скалацкая

16 сентября 2019 г.