Отзыв

официального оппонента на диссертацию Александрова Андрея Анатольевича на тему «Особенности распространения и дифракции волн в слоистых фононных кристаллах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела.

Актуальность темы диссертации обусловлена большим вниманием исследователей, уделяемым в последние три десятилетия к изучению динамических свойств функциональных материалов (акустических метаматериалов, фононных кристаллов). Необходимость разработки адекватных математических и компьютерных моделей, описывающих волновую динамику слоистых термоэлектроупругих периодических структур, вызвана активным развитием технологий для создания таких структур и возможностями их применения в различных сенсорах, фильтрах и генераторах сигналов.

Целью диссертационной работы является создание математических и компьютерных моделей связанных волновых, электрических и тепловых процессов в фононных кристаллах с пьезоэлектрическими, пироэлектрическими, функционально-градиентными слоями, распределенными микродефектами, анализ особенностей распространения волн в фононных кристаллах, учитывающих наноразмерные эффекты.

Степень достоверности и обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректностью постановок краевых задач, применением строгих математических методов при анализе краевых задач динамической теории термоэлектроупругости, сопоставлением полученных численных результатов с результатами других авторов, полученными другими методами.

Среди результатов, определяющих **научную новизну** работы, следует отметить разработку полуаналитического метода для расчёта волновых полей в периодическом композите, введенную классификацию частотных диапазонов разрешенных и запрещенных зон, полученную оценку влияния функционально-градиентных прослоек, стохастически распределенных микротрещин, наноразмерных эффектов и температуры.

Теоретическая ценность и практическая значимость работы. В работе приведена нелокальная теория для тонких пластин толщиной в несколько нанометров, появившаяся сравнительно недавно и вносящая некоторые особенности в волновые явления. Рассмотрены фононные кристаллы с нарушением адгезии при склейке или напылении слоёв. Приведена подробная классификация волновых явлений, сделан параметрический анализ, разработан устойчивый метод вычисления волновых полей в слоистых периодических структурах. Выделение двух типов разрешенных и двух типов запрещенных зон даёт более полное представление о фильтрационных свойствах фононного кристалла. Полученные в

работе результаты могут найти непосредственное применение в проектировании и разработке различных функциональных устройств.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, дан обзор состояния научных проблем, связанных с тематикой исследования, представлены положения, выносимые на защиту и научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость. Здесь же указаны методы, которые используемые при моделировании периодических структур.

Первая глава посвящена постановке задач динамической теории термоэлектроупругости. В первом разделе рассматриваются уравнения движения и состояния, описывается нелокальная теория для тонких пластин, в которой дано интегральное представление компонент упругих напряжений, вводится понятие характеристики межатомных связей. Во втором разделе описываются основные типы механических, электрических и тепловых граничных условий.

Во второй главе описывается постановка краевых задач и методы их решения. Среди них предлагается метод матриц переноса, и полуаналитический метод расчёта волновых полей. Рассматриваются функционально-градиентные ячейки и ячейки с неоднородностями. В первом разделе приведена постановка задачи для однородного слоистого фононного кристалла конечной толщины. Во втором разделе представляются законы распределения характеристик для функционально-градиентных прослоек. Приводится математическая модель для стохастически распределенных микротрещин. Метод матриц переноса описан в третьем разделе, в четвертом разделе полуаналитический метод для расчёта волновых полей, устойчивый для любого количества ячеек. В пятом разделе представлены дисперсионные соотношения для бесконечного фононного кристалла.

В третьей главе приводятся основные численные результаты для слоистых фононных кристаллов с однородными слоями, а также приводится классификация разрешенных и запрещенных зон. В первом разделе выделяются запрещенные зоны первого и второго типа, а так же разрешенная зона и разрешенная зона низкого прохождения. Во втором разделе рассматривается влияние геометрии структуры на волновые явления. В третьем, четвертом и пятом разделах рассматривается влияние на волновые эффекты пьезоэлектрических, диэлектрических констант, с учетом температурных воздействий. В шестом разделе для наномасштабных слоистых структур рассмотрена нелокальная теория и проведён анализ волновых эффектов в зависимости от характеристики межатомных связей.

Четвертая глава посвящена численным результатам для функционально-градиентных прослоек и распределённых микродефектов. Функционально-градиентные прослойки моделируются разбиением на более тонкие слои. Распределенные микродефекты моделируются пружинными граничными условиями. Упругие и пьезоэлектрические функционально-градиентные прослойки

рассмотрены в первом и втором разделах. В четвертом и пятом разделах рассмотрены слои с ослабленной адгезией.

В **заключении** представлены выводы диссертационного исследования.

По тексту автореферата имеется ряд замечаний:

1. На с. 7 допущена опечатка в слове «термоэлектроупругость» (6 абзац, 3 строка).
2. На той же с. 7 вектор электрической индукции **D** называется «электрическим перемещением», хотя его общепринятое название «электрическое смещение». В тексте диссертации также часто чередуются названия «электрическое перемещение» и «электрическое смещение», например, на с. 19, 20.
2. В формуле 4 на с. 8, также как и в формуле 2.1 в тексте диссертации, пределы изменения указаны только для одного из двух индексов.
3. В рисунках 4 с.16, 5 с.17 содержатся ошибки в указании размерностей по осям ординат для коэффициента прохождения: на осях указан натуральный логарифм, в тексте – десятичный.
4. На рис. 7, 8 с. 20 по оси частот указана нормированная величина частоты $\omega H/c$, в тексте указывается только круговая частота ω.
5. В списке опубликованных работ под номером 5 с. 26 пропущено название статьи.

Ряд замечаний имеется по тексту диссертации:

1. На рисунках 2.1. с.23 и 2.2 с. 33 в постановочной части изображена двухслойная ячейка, а в работе в общем случае рассматривается М - слойная ячейка.
2. На с. 41, 2-й абзац в первой строке пропущено слово «рисунок». В конце этого же абзаца формула содержит опечатку в индексах.
3. В формуле 1.3 на с. 17 пропущен член с плотностью свободных зарядов.
4. В формуле 1.31 с. 22 в правой части пропущен минус.
5. Формулы 2.3, 2.4 с. 24 получены с помощью матриц поворота, вид которых не указывается.
6. В формуле 2.36 на с. 33 допущена опечатка в индексах матрицы **I**.
7. На оси частот рисунка 3.2 на с. 39 указана частота fH/V, равная $\omega/2\pi$. В комментарии к рисунку на с 39 речь идет только об ω без деления на 2π, что может привести к путанице.
8. На рисунках 3.5-3.8, с. 42-45 в окрестности нулевой частоты поведение дисперсионных кривых неясно, поскольку они обрываются при приближении к нулю.
9. На с. 82, 83 вводится понятия «ассиметричный степенной закон» и «симметричный степенной закон», однако содержание этих законов не поясняется.

10. В диссертации не приводится объяснения и подробного анализа выявленных эффектов, связанных с влиянием температуры и характеристик межатомных связей на формирование запрещенных зон и появление частот отсечки.

Сделанные замечания имеют редакционный характер и не влияют на общую положительную оценку работы Александрова А.А.

Заключение.

Диссертация Александрова А.А., представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой. Полученные автором результаты представляются достоверными, выводы и заключения – в достаточной степени обоснованными. Основное содержание диссертации опубликовано в ведущих научных изданиях. Работа была апробирована на Всероссийских и международных научных конференциях. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.04.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Александрова А.А. «Особенности распространения и дифракции волн в слоистых фононных кристаллах» соответствует всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Александров Андрей Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент, доктор физико-
математических наук, в.н.с.,
лаборатория математики и механики,
Федеральное государственное бюджетное
учреждении науки «Федеральный
исследовательский центр Южный научный
центр Российской академии наук»

Сыромятников Павел Викторович

Адрес: 344006, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41;

Тел. 8-863-250-98-10. E-mail: syromyatnikov_pv@mail.ru

Подпись Сыромятникова П.В. заверяю,
Ученый секретарь ЮНЦ РАН, к.б.н. _____ Булышева Н.И.