

Проект

Акустические поверхностные волны для определения физико-механических свойств слоистых нано структур

1. Введение

Растущие потребности микроэлектроники и других областей современной технологии требуют внедрения и развития методов неразрушающего анализа многослойных материалов. В основном, эти методы основаны на либо на акустических волнах, либо на тепловых или электромагнитных волн (включая волны рентгеновского спектра). Освоение и использование крайне высоких частот в акустике позволяет анализировать как свойства весьма тонких слоев, так и внутренние дефекты в многослойных материалах. Экспериментальные акустические установки, применяемые в лабораториях, позволяют генерировать акустические волны, имеющие частоты порядка $1 - 10 \text{ GHz}$ ($10^9 - 10^{10} \text{ Hz}$), что позволяет исследовать физико-механические свойства многослойных структур, содержащих до $5 - 7$ анизотропных слоев с толщинами порядка $0.1 - 1$ микрон ($10^{-7} - 10^{-6} \text{ м}$). Экспериментальное освоение частотного диапазона $0.1 - 1 \text{ THz}$ ($10^{11} - 10^{12} \text{ Hz}$) открывает перспективы исследования многослойных сред, содержащих до 50 анизотропных слоев с толщиной слоя $10 - 100$ нанометров ($10^{-8} - 10^{-7} \text{ м}$).

Замечания. А) Здесь надо отметить, что увеличение частот акустических *объемных* волн сверх $4 - 5 \text{ THz}$ оказывается невозможным по принципиальным соображениям, – при этих значениях частот длины акустических объемных волн для большинства материалов, применяемых в микроэлектронике оказываются соизмеримыми с расстоянием между соседними атомами.

Обычно определение физико-механических свойств слоев в акустических методах исследования связано с измерением скоростей распространения и поляризации соответствующих акустических волн. Эти измерения позволяют затем строить дисперсионные соотношения, связывающие между собой фазовую скорость волны с частотой. Сравнение экспериментально определенных дисперсионных соотношений с найденными теоретически, позволяет определить свойства внутренних слоев, недоступных для прямых методов исследования. Естественно, что для проведения подобного анализа, необходима разработка адекватного теоретического метода.

Как показано ниже, имеющиеся теоретические методы по анализу распространения поверхностных волн в слоистых средах ограничены либо изотропными слоями контактирующими с изотропным полупространством при относительно большом числе слоев (но обычно не превышающем пяти), либо трансверсально-изотропными или ортотропными слоями и аналогичным субстратом

при 1 – 3 слоях. Имеется еще группа методов, связанных с изучением волн в периодических слоистых средах, но эти методы неприменимы для задач идентификации свойств отдельных слоев.

В то же время, потребности современной микроэлектроники требуют разработки методов и соответствующих численных алгоритмов, пригодных для анализа распространения поверхностных волн в системах имеющих 10 – 20 анизотропных слоев, контактирующих с анизотропным субстратом (обычно в роли последнего выступает монокристалл кремния). Здесь уместно отметить, что аналогичная проблема возникает и в сейсмологии, правда в этом случае используются частоты не превышающие 1 КHz. Однако, и в сейсмологии разработка теоретических методов, позволяющих анализировать распространение поверхностных волн в системах, состоящих из большого числа слоев, является весьма актуальной.

2 Современное состояние проблемы

В слоистых упругих средах могут распространяться следующие основные типы поверхностных волн: волны Лэмба, распространяющиеся в отдельных слоях и имеющие эллиптическую поляризацию в сагиттальной плоскости (так называется плоскость, образованная нормалью к волновому фронту и нормалью к поверхности слоя); волны Рэлея, распространяющиеся в полупространстве, имеющие такую же поляризацию, как и волны Лэмба и затухающие по глубине; волны Стоунли; распространяющиеся по границе двух контактирующих полупространств, имеющие сагиттальную эллиптическую поляризацию и затухающие по глубине в полупространствах; а также волны Лява, распространяющиеся в системе слой (слои) и контактирующее полупространство и имеющие поляризацию, ортогональную сагиттальной плоскости.

Для применений в микроэлектронике наибольшее значение имеют волны Лэмба и Лява, как обладающие дисперсионными свойствами (зависимостью частоты колебаний от фазовой скорости), и позволяющие по соответствующим дисперсионным кривым восстанавливать физико-механические свойства отдельных слоев в многослойных системах. В отличие от этих волн, волны Рэлея и Стоунли в значительно меньшей степени пригодны для целей неразрушающей диагностики, поскольку не обладают дисперсионными свойствами.

2.1 ВОЛНЫ ЛЯВА

Эти волны имеют горизонтальную поперечную поляризацию и распространяются в системе упругий слой (слои) – полупространство, при этом для существования волны в полупространстве требуется выполнение условия затухания по глубине. Впервые описанные в работе [46], эти волны затем интенсивно исследовались как теоретически [7, 24], так и экспериментально. Несмотря на относительно простую структуру (волны Лява состоят из одной парциальной волны в полупространстве и двух парциальных волн в слое), соответствующая теория для описания волн Лява в анизотропном слое и контактирующем с ним анизотропном

полупространстве еще не завершена (2003г.). Эти волны играют важную роль в проведении неразрушающих методов, благодаря их дисперсионным свойствам.

Волны Лява в одиночном изотропном слое с шероховатой свободной границей и лежащим на изотропном полупространстве, исследовались в [27, 52]. В [56] был предложен теоретический метод исследования распространения волн Лява в многослойной изотропной среде путем редукции задачи к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с кусочно-постоянными коэффициентами.

В сейсмологии волны Лява регулярно регистрируются при сейсмической активности, см. [20, 55] и подземных взрывах [59, 66, 73]. Эти волны используются для идентификации свойств осадочных горных пород [32, 33, 84]. Надо отметить, что в большинстве исследований по волнам Лява предполагается, что как слой, так и полупространство упруго изотропны или трансверсально изотропны. Между тем, для использования этих волн в современных методах неразрушающей диагностики требуется развить существующие методы для возможности учета упругой анизотропии контактирующих материалов.

2.2 ВОЛНЫ ЛЭМБА

Эти волны, впервые описанные в работе Лэмба [46, 47] для изотропного упругого слоя со свободными граничными плоскостями, в отличие от волн Лява, как правило, состоят из нескольких парциальных волн, имеющих различную поляризацию. Волны Лэмба широко используются при неразрушающих методах исследования, благодаря их дисперсии и незначительному затуханию. Одной из первых работ, посвященных применению волн Лэмба для неразрушающей диагностики, является монография [1], где проведен подробный анализ дисперсионных соотношений, выявлена структура этих волн и обнаружено существование нескольких ветвей в спектре этих волн. В [8] исследована корреляция волн Лэмба с, так называемой, несущей волной, распространяющейся в мембранах.

По-видимому, впервые уравнения для описания распространения волн Лэмба в многослойной пластине со свободными граничными плоскостями и состоящей из контактирующих между собой различных (но изотропных) слоев, получены в [80]. В дальнейшем этот метод, названный методом Трансформирующих матриц, применялся также и для анализа волн Лэмба в слоистых пластинах с анизотропными слоями. Альтернативный подход, называемый методом Глобальной матрицы, также предназначенный для анализа волн Лэмба в слоистых пластинах, предложен в [56] и подробно исследован в [54].

Здесь уместно отметить, что хотя с принципиальной точки зрения оба метода позволяют исследовать волны в среде, содержащей любое, но конечное число слоев, практические трудности, связанные с реализацией этих методов на ЭВМ, не позволяют эффективно исследовать волны в средах содержащих более 5 – 7 слоев (2003 г.). Связано это с весьма высокой чувствительностью этих методов к ошибкам округления. Можно показать, что, вообще говоря, точность вычисления дисперсионных зависимостей для волн Лэмба и Лява экспоненциально убывает с ростом числа слоев.

Акустические поверхностные волны для определения физико-механических свойств слоистых нано структур

Одной из первых публикаций по теоретическим исследованиям распространения волн Лэмба в анизотропных слоях является работа [48]. В дальнейшем аналогичными методами анизотропные пластины исследовались в [60, 64]. Много позже в [10] был предложен прием, сводящий задачу о волне Лэмба в многослойной анизотропной пластине к системе алгебраических уравнений, см. также [11, 28] и публикацию [84], где получено аналитическое уравнение для описания распространения волны Лэмба в многослойной пластине с анизотропными слоями, правда, при введении упрощающих гипотез, аналогичных гипотезам Кирхгоффа – Лява в теории изгиба пластин.

В большинстве случаев учет упругой симметрии анизотропных слоев позволяет упростить анализ волн Лява, см. [22, 23, 50, 51], где получены аналитические выражения для уравнения, описывающего дисперсионные зависимости волн Лэмба. В [57, 63] для исследования комбинированных волн Лэмба – Рэлея, распространяющихся в системе анизотропный слой – полупространство, предложен численно аналитический метод. Исследования распространения волн Лэмба в средах с произвольной упругой анизотропией начаты лишь недавно, см. [43, 72].

В одной из первых работ по исследованию волн Лэмба в периодических слоистых композитах [83] применялся шестимерный комплексный формализм, ранее использовавшийся только для анализа волн Рэлея. В [71] на основе частных решений Флоке исследовались поперечные поверхностные волны в периодической слоистой пластине. Эвристический прием для анализа волн Лэмба в периодической слоистой структуре, основанный на осреднении, предложен в [65], см. также [67], где осуществлена экспериментальная верификация этого алгоритма осреднения. Полученный в [67] результат весьма интересен, – результирующая волна в осредненной среде представляет собой волну Рэлея, тогда как в каждом из слоев – это волна Лэмба.

2.3 ВОЛНЫ РЭЛЕЯ

Как отмечалось выше, волны Рэлея распространяются в упругом полупространстве, затухают по глубине и не имеют дисперсии. Тем не менее, эти волны играют важную роль при проведении неразрушающих испытаний многослойных систем, поскольку наряду с волнами Лэмба и Лява возникают в контактирующем со слоями полупространстве.

Начиная с работы Рэлея [77], в которой получены основные уравнения, описывающие распространение упругих поверхностных волн в однородном изотропном полупространстве, во всех последующих исследованиях поверхностных волн предполагалось, что такая волна состоит из трех парциальных волн

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^3 Z_k \mathbf{u}_k(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^3 Z_k \mathbf{m}_k e^{ir(\gamma_k \mathbf{v} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{n} \cdot \mathbf{x} - ct)} \quad (1)$$

Акустические поверхностные волны для определения физико-механических свойств слоистых нано структур

где \mathbf{u} - поле смещений в волне Релея; \mathbf{u}_k - поле смещений вызванное k -ой парциальной волной, Z_k - комплексные коэффициенты, определяемые с точностью до скалярного множителя из граничных условий, \mathbf{m}_k - векторные, в общем случае, комплексные амплитуды, определяемые из уравнения Кристоффеля, γ_k - корни уравнения Кристоффеля, r - волновое число, \mathbf{v} - вектор единичной внешней нормали к граничной плоскости $\Pi_{\mathbf{v}}$ рассматриваемого полупространства, $\mathbf{n} \in \Pi_{\mathbf{v}}$ - вектор волновой нормали, лежащий в граничной плоскости и задающий направление распространения фронта волны, c - фазовая скорость. Для существования волны Релея необходимо, чтобы все составляющие ее поверхностные волны имели одно и то же волновое число и одинаковую фазовую скорость.

Замечания а) Затухание с глубиной (при $\mathbf{v} \cdot \mathbf{x} < 0$) рэлеевской волны может быть достигнуто, если все корни γ_k в представлении (1) имеют отрицательную мнимую часть, – это предполагается выполненным в дальнейшем;

б) В случае, когда действительная часть $\text{Re}(\gamma_k)$ отлична от нуля, соответствующая волна называется обобщенной рэлеевской волной.

Необходимо отметить, что в то время как полиномиальное уравнение для определения скорости поверхностной волны, распространяющейся в изотропном полупространстве, было получено Релеем [77], аналитическое выражение для скорости, определяющее скорость как функцию упругих параметров и плотности, было получено лишь недавно [2, 68]. Ранее для этих целей применялись приближенные дробно-линейные формулы, см. [1, 7, 61].

Представление (1) использовалось также [24, 70] при исследовании волн Релея, распространяющихся в плоскостях упругой симметрии и направлениях кристаллографических осей кубических и тетрагональных кристаллов. На основе этих исследований был доказан принципиальный результат о не существовании для волны Рэлея запрещенных направлений, совпадающих с направлениями кристаллографических осей в кубических, орторомбических и тетрагональных кристаллах.

Численные исследования распространения волн Релея в кристаллах различных сингоний осуществлялись в [29] на основе трехмерного комплексного формализма, основанного на представлении (1). В ходе этих исследований запрещенные направления обнаружены не были, за исключением случаев, когда рэлеевская волна вырождалась в поперечную объемную волну.

В [76] для описания перемещения линейных дислокаций в анизотропных средах был разработан шестимерный комплексный формализм, в последствии примененный для анализа распространения поверхностных волн в анизотропных средах, см. [13-15, 18, 19, 81, 82]. Соответствующие аналитические и численные результаты подтвердили отсутствие запрещенных направлений для волн Релея вида (1). Заметим, что в [14], а затем и в [18] была доказана следующая теорема существования для рэлеевских волн: при любой анизотропии упругой среды и любом направлении

распространения существует либо истинная рэлеевская волна, затухающая при $\mathbf{v} \cdot \mathbf{x} < 0$, либо соответствующая рэлеевская волна вырождается в поперечную объемную волну. Таким образом вопрос о запрещенных направлениях казался бы получил однозначное решение. Тем не менее, в как показано в недавних публикациях [42, 44, 81] запрещенные направления для канонических рэлеевских волн (1) существуют. Более того, запрещенные направления могут совпадать с направлениями кристаллографических осей кубических кристаллов. Однако, в этих случаях вместо волны Рэлея (1) распространяется также затухающая по глубине волна более сложной структуры, см. [41]. В заключение остается отметить, что при определенных видах упругой анизотропии для канонических рэлеевских волн могут существовать не только отдельные запрещенные направления, но и запрещенные плоскости [42]. Аналогичные направления и плоскости могут быть и у канонических волн Лэмба, см. [43].

2.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Растущие потребности микроэлектроники и других областей современной технологии требуют развития и применения точных и неразрушающих методов определения свойств многослойных материалов. В основном, неразрушающие методы, применяемые в микроэлектронике, базируются на генерировании и регистрации акустических, тепловых и электромагнитных волн (последние включают рентгеновские волны).

Акустические измерения особенно важны, поскольку они могут использоваться для непосредственного измерения механических свойств материалов, а использование сверхвысоких частот позволяет определять свойства тонких пленок и микродефектов. Обычно, при акустических исследованиях, используемых для анализа свойств материалов, регистрируют скорости, частоты и поляризацию соответствующих волн. Затем, используя сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическими, удается определить физико-механические свойства материалов.

Как правило, в микроэлектронике при проведении акустических исследований используют микро нагрев материала точечным импульсным лазерным источником, так что в окрестности пятна нагрева материал испытывает практически мгновенный температурный перепад. Это пятно нагрева служит центром дилатации и источником распространения акустических волн. Часто для этих целей используют Nd-YAG линейный импульсный лазер, основанный на Q-переходах. С помощью такой техники удастся создать акустические волны весьма малой длины ($\sim 0.1 - 10$ микрометров), что позволяет использовать эти волны для анализа свойств тонких пленочных покрытий толщиной до 10 нанометров, см. [25]. В зависимости от геометрии изделия, длительности лазерного импульса, величины пятна нагрева, генерируются как объемные, так и поверхностные акустические волны, причем использование прецизионной измерительной техники (как правило, это интерферометры Фабри-Перо или Майкельсона) позволяет вычлнить различные виды акустических волн по соответствующим перемещениям на свободной границе, см. [12, 34-38]. В некоторых случаях для фильтрации нежелательных волн на свободной поверхности наносят

Акустические поверхностные волны для определения физико-механических свойств слоистых нано структур

систему гребенчатых фильтров, позволяющую отсеять ненужные моды поверхностных волн, см. [9, 62].

2.5 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО ПРИМЕНЕНИЮ АКУСТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Как показывает обзор литературы, в настоящее время основные исследования в области создания теоретических моделей для описания распространения поверхностных волн в слоистых средах с произвольной упругой анизотропией, в основном завершены:

- Разработаны весьма эффективные подходы (трехмерный [29] и шестимерный [18, 13-15, 41, 76] комплексные формализмы) для получения решений и доказательства существования и единственности канонических волн Рэлея и Лэмба, предложены обобщения для описания и исследования свойств неканонических поверхностных волн [43, 44, 81].
- Разработаны методы (Трансформирующих матриц [80] и Глобальной матрицы [56]) для описания распространения поверхностных волн в слоистых средах, содержащих произвольное (конечное) число слоев.

В экспериментальной технике в основном отработаны приемы возбуждения, регистрации и фильтрации акустических волн, необходимые для анализа свойств многослойных тонкопленочных покрытий, в частности:

- Созданы точечные импульсные лазерные источники (Nd-YAG линейные импульсные лазеры, основанные на Q-переходах) с пятном контакта менее 0.1 микрометра и длительностью импульса, измеряемого в пикосекундах, позволяющие генерировать поверхностные акустические волны с частотами до $10^{10} - 10^{11}$ Hz, пригодными для анализа многослойных систем, содержащих слои с толщинами до 100 нанометров.
- Разработана техника применения конфокальных интерферометров Фабри-Перо, содержащих пьезодатчики для прецизионного управления зеркалом, и позволяющих регистрировать поверхностные волны с амплитудами до 10 нанометров и длиной волны того же порядка.
- Имеются гребенчатые фильтры для акустических волн, получаемые относительно дешевыми методами литографии, и имеющие разрешение до 100 нанометров, а также более прецизионные фильтры с разрешением до 10 нанометров, получаемые электрографическими методами.

Таким образом, анализ имеющихся данных, позволяет наметить основные направления в исследованиях поверхностных волн для применения в неразрушающих методах диагностики тонкопленочных материалов микроэлектроники:

Акустические поверхностные волны для определения физико-механических свойств слоистых нано структур

- Получение и исследование уравнений, описывающих неканонические волны Лява и Лэмба, распространяющиеся в анизотропных средах с кубической, орторомбической и тетрагональной сингонией.
- Создание модифицированных алгоритмов Трансформирующих матриц и Глобальной матрицы, обеспечивающих численную устойчивость и позволяющих исследовать среды, содержащие большое (>10) число слоев.
- Развитие импульсной лазерной техники, нацеленной на создание импульсных полупроводниковых лазеров, обеспечивающих пятно нагрева ~ 10 нанометров и длительность импульса порядка 1 пикосекунды, при сохранении (или увеличении) достигнутой энергии импульса.

3 Теоретические исследования по акустическим волнам в ИПМ РАН

На протяжении ряда лет в ИПМ РАН проводятся теоретические исследования распространения поверхностных волн в анизотропных средах, в частности:

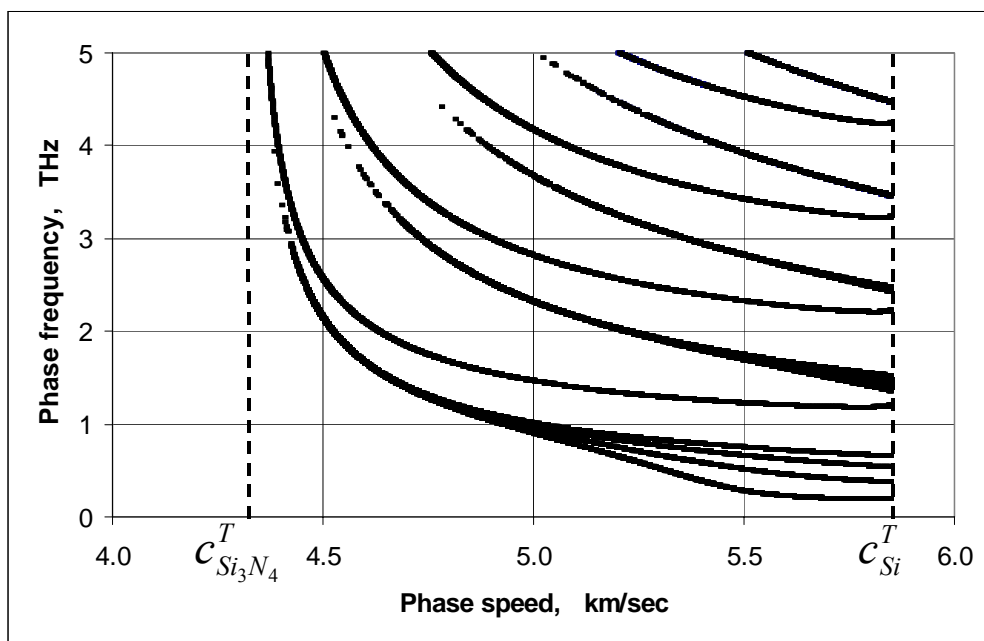
- Для волн Рэлея получено конструктивное доказательство возможности существования жордановых блоков второго ранга в уравнениях, описывающих спектральные свойства поверхностных волн. Установлено, что уравнения Кристоффеля для поверхностных волн допускают полупростое вырождение не более чем при трех значениях фазовой скорости. Доказана невозможность существования подповерхностных волн Рэлея при произвольной упругой анизотропии. Исследованы неканонические волны Рэлея и условия их появления.
- Для волн Лэмба получено конструктивное доказательство существования экспоненциально затухающих поверхностных волн неканонического типа, отличающихся от волн Лэмба наличием полиномиальных множителей. Выяснены условия, накладываемые на константы упругости некоторых кристаллов, при которых в среде появляются поверхностные волны неканонического типа. Для конкретных видов упруго анизотропных сред исследованы спектральные характеристики волн неканонического типа, определена поляризация парциальных волн и их фазовые параметры.
- Для волн Лява получено конструктивное доказательство существования экспоненциально затухающих поверхностных волн неканонического типа, отличающихся от волн Лява наличием полиномиальных множителей. Выяснены условия, накладываемые на константы упругости кубических и тетрагональных кристаллов, при которых в среде появляются поверхностные волны неканонического типа. Для конкретных видов упруго анизотропных сред исследованы спектральные характеристики волн неканонического типа, определена поляризация парциальных волн и их фазовые параметры.
- Разработаны программные комплексы (1) по определению фазовых скоростей, поляризации и энергии волн Рэлея, распространяющихся в

Акустические поверхностные волны для определения физико-механических свойств слоистых nano структур

средах с произвольной упругой анизотропией; (2) по определению дисперсионных соотношений волн Лява, распространяющихся в многослойных средах, содержащих слои с моноклинной сингонией.

В настоящее время в ИПМ РАН проводятся численные эксперименты по анализу распространения волн Лява в многослойных средах, содержащих 10 – 20 упруго анизотропных nano слоев с толщиной слоя 10 – 100 nano метров.

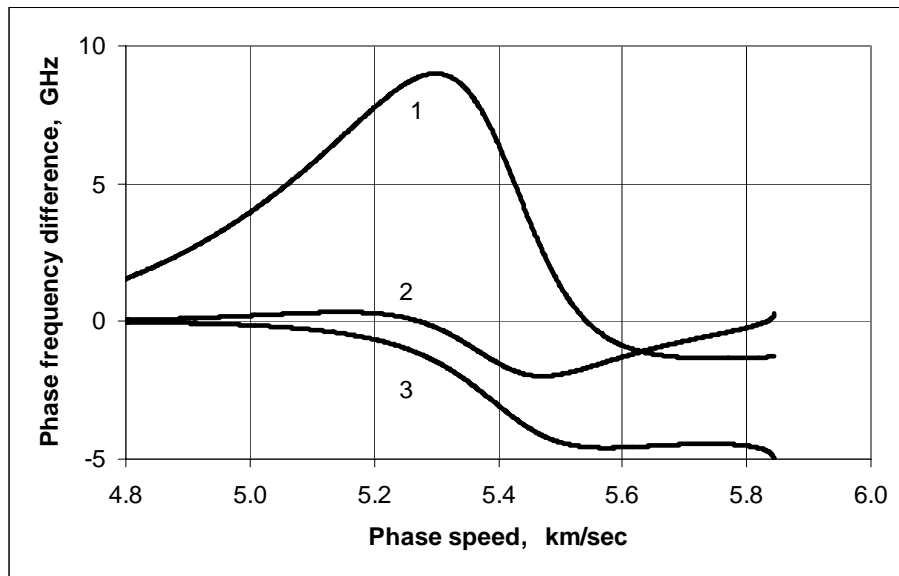
На фиг. 1 показаны дисперсионные кривые для многослойной системы, содержащей 10 чередующихся упруго изотропных nano слоев SiC и Si₃N₄ толщиной 10 нанометров каждый, покоящихся на трансверсально изотропном монокристалле кремния Si [1-0-0].



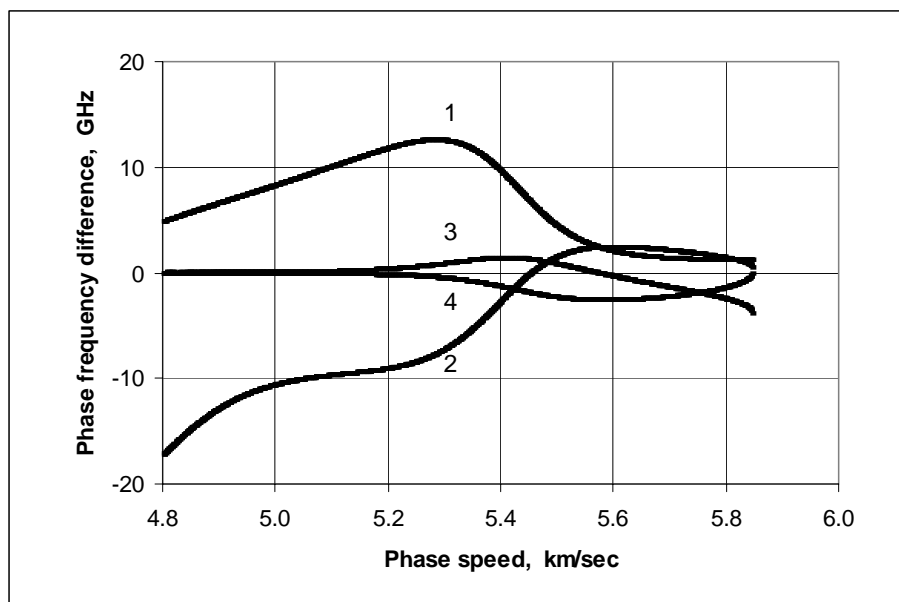
Фигура 1. Дисперсионные кривые для 10-слойного композита SiC -Si₃N₄, покоящегося на субстрате Si

На фиг.2 приведены графики, характеризующие изменение нижней дисперсионной ветви (как наиболее удобной при проведении экспериментальных исследований) при увеличении толщины k -го слоя на 10% (остальные параметры слоев остаются фиксированными). Аналогичные зависимости, характеризующие изменение нижней ветви дисперсионных кривых при одновременном изменении сдвиговых модулей и плотности k -го слоя на 10% построены на фиг. 3.

Акустические поверхностные волны для определения физико-механических свойств слоистых nano структур



Фиг. 2. Изменение нижней ветви дисперсионной кривой при увеличении на 10% толщины: 1) 7-го слоя; 2) 9-го слоя; 3) 10-го слоя.



Фиг. 3. Изменение нижней ветви дисперсионной кривой при одновременном увеличении на 10% сдвигового модуля и плотности: 1) 7-го слоя; 2) 9-го слоя; 3) 10-го слоя, 4) полупространства.

Приведенные на фиг.2 и 3 зависимости показывают, что с помощью анализа нижней ветви дисперсионных кривых, оказывается возможным выявлять как

Акустические поверхностные волны для определения физико-механических свойств слоистых нано структур

изменение геометрии глубинных слоев, так и изменение их физико-механических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бреховских Л.М., Волны в слоистых средах// М. Наука, 1973.
2. Викторов И.А., Волны Рэлея и Лэмба// М. Наука, 1967.
3. Гришин А.С., Рэлеевские волны в изотропной среде. Аналитические решения и аппроксимации// *Изв. РАН. МТТ*, 2001, No.1, pp. 48 - 52.
4. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в упругих телах// Киев, Наукова Думка, 1981.
5. Карлов Н.В., Кириченко Н.А., Колебания, волны, структуры// М. Физматлит, 2003.
6. Кольский Г. Волны напряжения в упругих телах// М. ИЛ, 1955.
7. Achenbach D., Wave Propagation in Elastic Solids// Amsterdam: North-Holland, 1975.
8. Achenbach D., Lamb waves as thickness vibrations superimposed on a membrane carrier wave// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **103**, pp. 2283 – 2286.
9. Addison R.C. and McKie A.D.W., Generation and Detection of Single Mode Lamb Waves using Laser Ultrasound// *Review of Progress in QNDE*, 1995, **14** pp. 521 – 528.
10. Adler E.L., Matrix methods applied to acoustic waves in multilayers// *IEEE Trans.*, 1990, UFFC **37**, pp. 485 - 490.
11. Adler E.L., Slaboszewicz J., Farnell G.W., and Jen C.K., PC software for SAW propagation in anisotropic multilayers// *IEEE Trans.*, 1990, UFFC **37**, pp. 215 - 223.
12. Alleyne D. and Cawley P., The practical excitation of Lamb waves using piezoelectric transducers// *Review of Progress in QNDE*, 1994, **13** pp. 181-188.
13. Barnett D.M. and Lothe J., Synthesis of the sextic and the integral formalism for dislocations, Green's functions, and surface waves in anisotropic elastic solids// *Phys. Norv.*, 1973, **7**, pp. 13 -19.
14. Barnett D.M. and Lothe J., Consideration of the existence of surface wave (Rayleigh wave) solutions in anisotropic elastic crystals// *J. Phys. Ser. F*, 1974, **4**, pp. 671 - 678.

15. Barnett D.M. and Lothe J., An image force theorem for dislocations in anisotropic bicrystals// *J. Phys. Ser. F*, 1974, **4**, pp. 1618 - 1635.
16. Blake R.J. and Bond L.J., Rayleigh wave scattering from surface features: wedges and down-steps// *Ultrasonics*, 1990, **28**, pp. 214 -227.
17. Castagnede W. and Sachse W., Optimized determination of elastic constants of anisotropic solids from wavespeed measurements// *Rev. Progress in QNDE*, 1988, pp. 1855-1862.
18. Chadwick P. and Smith G.D., Foundations of the theory of surface waves in anisotropic elastic materials// *Adv. Appl. Mech.*, 1977, **17**, pp. 303 - 376.
19. Chadwick P. and Jarvis D.A., Surface waves in a prestressed elastic body// *Proc. Roy. Soc. London., Ser. A*, 1979, **366**, pp. 517 - 536.
20. Chastel Y.B. and Dawson P.R., Anisotropic convection with implications for the upper mantle// *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**, pp. 757 - 771.
21. Chimenti D. E., Lamb waves in microstructured plates// *Ultrasonics*, 1994, **32**, pp. 255 - 260.
22. Dayal V. and Kinra V.K., Leaky Lamb waves in an anisotropic plate. 1. An exact solution and experiments// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989, **85**, pp. 2268 - 2276.
23. Dayal V. and Kinra V.K., Leaky Lamb waves in an anisotropic plate. 2. Nondestructive evaluation of matrix cracks in fiber-reinforced composites// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991, **89**, pp. 1590 - 1598.
24. Dieulesaint E. and Royer D., Elastic waves in solids//1980, N.Y.: Wiley, 143p.
25. Doxbeck M.A., Hussain M.A., Rama J., Abate A., and Frankel J., An algorithm for the determination of coating properties from laser generated and detected Rayleigh waves using wavelet analysis// *Review of Progress in QNDE*, 2002, **21**, pp. 292-299.
26. Drescher-Krasicka E., An interferometric approach to residual stress determination// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, pp. 453 - 464.
27. Elbahrawy A., Guided modes in a layered elastic half-space with doubly corrugated surfaces// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1994, **96**, pp. 3155 - 3166.
28. Fahmi A.H. and Adler E.L., Propagation of acoustic surface waves in multilayers: A matrix description// *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**, pp. 495 - 497.
29. Farnell G.W., Properties of elastic surface waves// *Phys. Acoust.*, 1970, **6**, pp. 109 - 166.
30. Hosten B., Deschamps M., and Tittmann B.R., Inhomogeneous wave generation and propagation in lossy anisotropic solids: Application to the characterization of viscoplastic composite materials// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1987, **85**, pp. 1763-1770.
31. Karim M., Mal A. and Bar-Cohen Y., Inversion of leaky Lamb wave data by simplex algorithm// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990, **88**, pp. 482-491.

32. Kennett B.L.N., Approximations for surface-wave propagation in laterally varying media// *Geophys. J. Int.*, 1995, **122**, pp. 470 - 478.
33. Kennett B.L.N., Guided waves in 3-dimensional structures// *Geophys. J. Int.*, 1998, **133**, pp. 159 - 174.
34. Kline R.A., *Nondestructive Characterization of Composite Media*// Technomic, Lancaster, PA, 1991.
35. Kline R.A. and Chen Z.T., Ultrasonic Technique for Global Anisotropic Property Measurement in Composite Materials, In: *Materials Evaluation*// 1988, pp. 986-992.
36. Kline R., Jiang L. and Drescher-Krasicka E., Application of scanning acoustic microscopy to residual stress analysis: Theory vs. Experiment// *Rev. Progress in QNDE*, 1995, pp. 1907-1914.
37. Kline, R.A., Green, R.E., and C. H. Palmer, Acoustic Emission Waveforms from Stress Corrosion Cracking of 4340 Steel// *Journal of Applied Physics*, pp. 141-147, 1981.
38. Kline, R.A., Green, R.E., and C. H. Palmer, A Comparison of Optically and Piezoelectrically Sensed Acoustic Emission Signals// *Journal of the Acoustical Society of America*, 1978,**64**, pp. 1633-1637.
39. Kuznetsov S.V., Direct boundary integral equation method in the theory of elasticity// *Quart. Appl. Math.*, 1995, **53**, pp. 1 – 8.
40. Kuznetsov S.V., Fundamental solutions for equations of harmonic vibrations in the theory of elasticity// *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1996, **322**, ser. II.b, pp. 871 – 878.
41. Kuznetsov S.V., Non-Rayleigh surface waves in cubic crystals// *J. Multiscale Comp. Eng.*, 2002, **1**, No.1, pp. 57 – 65.
42. Kuznetsov S.V., “Forbidden” planes for Rayleigh waves// *Quart. Appl. Math.*, 2002, **60**, pp.87 – 97.
43. Kuznetsov S.V., Subsonic Lamb waves in anisotropic plates// *Quart. Appl. Math.*, 2002, **60**, pp.587 – 597.
44. Kuznetsov S.V., Surface waves of Non-Rayleigh type// *Quart. Appl. Math.*, 2003, **61**, pp.575 – 582.
45. Kuznetsov S.V., Love waves in stratified monoclinic media// *Quart. Appl. Math.*, 2004, **62** (to appear).
46. Lamb H., On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid// *Phil. Trans. Roy. Soc., Lond.*, 1904, **A203**, pp.1 – 42.
47. Lamb H., On waves in an elastic plate// *Proc. Roy. Soc.*, 1917, **A93**, pp. 114 – 128.
48. Lekhnitskii S.G., *Anisotropic plates*// N.Y.: Gordon & Breach, 1949.
49. Li Y., Thomson R.B., Influence of anisotropy on the dispersion characteristics of guided ultrasonic plate modes// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990, **87**, pp. 1911 – 1931.

50. Lin W. and Keer L.M., A study of Lamb waves in anisotropic plates// *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1992, **92**, pp. 888 – 894.
51. Liu G.R., Tani J., Watanabe K., and Ohyoshi T., Lamb wave propagation in anisotropic laminates// *J. Appl. Mech.*, 1990, **57**, pp. 923 – 929.
52. Lobkis O.I. and Chimenti D.E., Elastic guided-waves in plates with surface-roughness 1. Model calculation// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, **102**, pp. 143 – 149.
53. Love A.E.H., A treatise on the mathematical theory of elasticity// Cambridge: Univ. Press, 4th ed., 1927.
54. Lowe M.J.S., Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered structures// *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1995, **42**, pp. 525 – 542.
55. Mal A.K., Attenuation of Love wave in the low period range near Volcanic Island margin// *Geophys. P.E. Appl.*, 1962, **51**, pp. 47 – 58.
56. Mal A.K., and Knopoff L., A Differential equation for surface waves in layers with varying thickness// *J. Math. Anal. App.*, 1968, **21**, pp. 431 – 441.
57. Mallah M., Philippe L., and Khater A., Numerical computations of elastic wave propagation in anisotropic thin films deposited on substrates// *Comp. Mater. Sci.*, 1999, **15**, pp. 411 – 421.
58. Maximenko A., Olevsky E., Kline R., Waters R., and Aklufi M., Finite Element Characterization of MEMS Assemblies, in Proceedings ICCM –9, San Diego, 2002 (in press).
59. McLaughlin K.L., Barker T.G., Day S.M., Shkoller B., and Stevens J.L., Effects of subduction zone structure on explosion-generated Rayleigh waves: 3-D numerical simulations// *Geophys. J. Int.*, 1992, **111**, pp. 291 – 308.
60. Mindlin R.D., Waves and vibrations in isotropic, elastic plates. In: Structural Mechanics (ed. Goodier & Hoff)// N.Y.: Pergamon, 1960, pp. 199 – 232.
61. Mozhaev V.G., Approximate analytical expressions for the velocity of Rayleigh waves in isotropic media and on the basal plane in high symmetry crystals// *Soviet Physics Acoustics*, 1991, **37**, pp. 186 – 189.
62. Nagata, Y., Huang, J., Achenbach, J.D. and Krishnaswamy, S., Lamb Wave Tomography using Laser Based Ultrasonics// *Review of Progress in QNDE*, 1995, **14** pp 561 – 568.
63. Nakahata M. and others, Theoretical study of SAW characteristics of layered structures including a diamond layer// *IEEE Trans.*, 1995, UFFC **42**, 362 – 375.
64. Newman E.G. and Mindlin R.D., Vibrations of monoclinic crystal plate// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1957, **29**, pp. 1206 - 1218.
65. Park J., Surface waves in layered anisotropic structures// *Geophys. J. Int.*, 1996, **126**, pp. 173 – 183.

66. Penttila E., Report on the 1960 and 1961 explosion seismic investigation of the Earth's crust in Finland// *Geophysica*, 1960, p.7.
67. Potel C. et al., Experimental verification of the theory of multilayered Rayleigh waves// *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**, pp. 1128 – 1135.
68. Rahman M. and Barber J.R., Exact expression for the roots of the secular equation for Rayleigh waves// *Trans. ASME. J. Appl. Mech.*, 1995, **62**, pp. 250 – 252.
69. Rokhlin S.I. and Wang W., Critical angle measurement of elastic constants in composite material// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989, **79**, pp. 1876 – 1882.
70. Royer D. and Dieulesaint E., Rayleigh wave velocity and displacement in orthorhombic, tetragonal, and cubic crystals// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985, **76**, No. 5, pp. 1438 – 1444.
71. Safaeinili A., Chimenti D.E., Auld B.A., and Datta S. K., Floquet analysis of guided-waves propagating in periodically layered composites// *Composites Engineering*, 1995, **5**, pp. 1471 – 1476.
72. Shuvalov A.L., On the theory of wave propagation in anisotropic plates// *Proc. Roy. Soc.*, 2000, **A456**, pp. 2197 – 2222.
73. Simons F., Zielhuis A., and van der Hilst, The deep structure of the Australian continent from surface wave tomography// *Lithos*, 1999, **48**, pp. 17 – 43.
74. Spies M., Green's tensor function for Lamb's problem: the general anisotropic case// *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, **102**, pp. 2438 – 2441.
75. Stoneley R., The propagation of surface elastic waves in a cubic crystal// *Proc. Roy. Soc.*, 1955, **A232**, pp. 447 – 458.
76. Stroh A.N., Steady state problems in anisotropic elasticity// *J. Math. Phys.*, 1962, **41**, pp. 77 – 103.
77. Strutt J.W. (Lord Rayleigh), On wave propagating along the plane surface of an elastic solid// *Proc. London Math. Soc.*, 1885, **17**, pp. 4 – 11.
78. Synge J.L., Elastic waves in anisotropic media// *J. Math. Phys.*, 1956, **35**, pp.323 – 334.
79. Tanuma K., Surface impedance tensors for transversely isotropic elastic materials// *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 1996, **49**, pp. 29 – 48.
80. Thomson W.T., Transmission of elastic waves through a stratified solid medium// *J. Appl. Phys.*, 1950, **21**, pp. 89 – 93.
81. Ting T.C.T., Surface waves in anisotropic elastic materials for which the matrix $N(\nu)$ is extraordinary degenerate, degenerate, or semisimple// *Proc. R. Soc. Lond.*, 1997, **A453**, pp. 449 – 472.
82. Ting T.C.T. and Barnett D. M., Classifications of surface waves in anisotropic elastic materials// *Wave Motion*, 1997, **26**, pp. 207 – 218.

Акустические поверхностные волны для определения физико-механических свойств слоистых нано структур

83. Ting T.C.T. and Chadwick P., Harmonic waves in periodically layered anisotropic elastic materials, In: ASME Symp. Wave Propagation in Structural Composites (ed. Mal & Ting)// 1988, **90**, pp. 69 – 79.
84. Yang W. and Kundu T., Guided-waves in multilayered plates for internal defect detection// *J. Eng. Mech. ASCE*, 1998, 124, pp. 311 – 318.
85. Zhang Y.-S. and Tanimoto T., Global Love wave phase velocity variation and its significance to plate tectonics// *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1991, **66**, pp. 160 – 202.