Оглавление.

1.Введение. ................................................................................................................2

2.Обзор литературы. .................................................................................................5

3.Физические механизмы возбуждения поверхностных акустических волн в твердом теле. .............................................................................................................6

4.Теоретическое описание акустических волн на поверхности твердого тела. ....9

4.1 Волны Рэлея. ........................................................................................................9

4.2 Распространение ПАВ на шероховатых поверхностях и в мелкомасштабных периодических структурах. ............................................15

5.Экспериментальная техника лазерной оптоакустики и методика измерения акустического отклика. .......................................................................................... 22

6.Наносекундная лазерная система для исследования поверхностных акустических волн. .................................................................................................26

7.Экспериментальные результаты. ........................................................................28

8.Заключение. .........................................................................................................35

9.Список литературы. ............................................................................................37

**ВВЕДЕНИЕ.**

Специфическим эффектом, обусловленным взаимодействием лазерного излучения с веществом, является возбуждение акустических волн при импульсном лазерном воздействии. С точки зрения физики взаимодействия излучения с веществом, акустический отклик содержит информацию о переходных процессах, происходящих в области облучения, за времена порядка длительности лазерного импульса. Прикладная ценность оптоакустического (ОА) метода состоит в том, что оптически возбуждаемые акустические импульсы могут быть использованы как для определения параметров поглощающей среды (например, коэффициентов теплового расширения, теплопроводности, и др.), а так же для исследования неоднородностей в твердом теле и на его поверхности. Перечисленные возможности импульсной лазерной оптоакустики позволили активно использовать этот метод в дефектоскопии, микроскопии и томографии образцов. Оптико-акустическая микроскопия, так же как и любая другая микроскопия, представляет собой способ получения изображения неоднородностей поверхности с достаточно большим разрешением [3]. В отличие от традиционной микроскопии на отражение или пропускание ОА-микроскопия позволяет выявить приповерхностные дефекты в оптически непрозрачных образцах. Следует отметить, что очень часто используется оптическая регистрация акустических импульсов [2,4,6], что позволяет сделать метод бесконтактным и дистанционным. В ходе проводимых научных исследований в области оптоакустики было обнаружено многообразие механизмов ответственных за формирование акустического отклика среды при поглощении лазерного излучения. Важнейшими механизмами генерации звуковых волн являются термоупругий механизм, электрострикция, радиационное давление, диэлектрический пробой, испарение вещества и абляция материала мишени [1]. Кроме перечисленных в определенных условиях проявляются и другие механизмы. Так для диэлектриков существенным может быть возбуждение звука через механизм деформационного потенциала, а для пьезоактивных кристаллов возможно эффективное возбуждение акустических волн за счет обратного пьезоэффекта. Соотношение перечисленных механизмов и эффективность оптоакустического преобразования зависит от параметров лазерного излучения, а так же оптических и тепловых параметров среды.

Аналитическое описание процесса лазеро-индуцированной генерации акустических волн в твердом теле представляет собой достаточно сложную задачу, требующую решения системы неоднородных дифференциальных уравнений в частных производных. Даже без учета нелинейного взаимодействия электромагнитного излучения с веществом не всегда удается найти аналитическое решение и строго описать акустический отклик. Наиболее просто процесс лазерной генерации звука описывается в модели изотропной среды в линейном приближении.

В последнее время существенно возрос интерес к применению импульсной лазерной оптоакустики в физике твердого тела. В том числе широкое использование устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) поставило задачу о необходимости тщательного анализа процессов возбуждения, распространения и рассеяния ПАВ неоднородностями и искусственными дефектами на поверхности твердого тела.

В основе функционирования большинства устройств обработки сигналов на ПАВ лежит взаимодействие последних с различного рода управляющими неоднородностями в виде выступов, канавок, поверхностных электродов, обьемных включений, ребер клиньев и волноведущих структур [8]. Некоторые неоднородности могут носить и случайный характер, типа шероховатостей и искривлений границ, влияние которых так же необходимо учитывать при расчетах ряда устройств. Приборы на ПАВ позволяют формировать и обрабатывать радиосигналы в широком диапазоне частот (10 МГц-6ГГц). С их помощью можно получать характеристики, недостижимые в устройствах на других физических принципах. Это обусловлено физическими свойствами поверхностных волн. Первым и наиболее важным свойством является чрезвычайно низкая скорость их распространения, составляющая 10-5 скорости распространения электромагнитных волн. Это свойство акустических волн делает их удобными для использования в линиях задержки большой длительности. Вследствие низкой скорости распространения акустические волны обладают так же очень малыми длинами волн по сравнению с электромагнитными волнами той же частоты. Это уменьшение длины волны также порядка 10-5 и зависит от используемого материала. Поэтому устройства на акустических волнах имеют значительно меньшие размеры и вес по сравнению с электромагнитными устройствами. Кроме того устройства на ПАВ располагаются на поверхности кристалла, что делает их более прочными и надежными [10].

Естественное расширение функциональных возможностей устройств на ПАВ и повышение требований к их характеристикам приводят к необходимости поиска и отработки различных методов исследования распространения ПАВ на неоднородных поверхностях. Лазерное возбуждение и детектирование акустических волн (АВ) позволяет осуществить бесконтактное измерение важных параметров среды.

В данной работе была отработана методика экспериментального исследования лазеро-индуцированной ПАВ бесконтактным оптическим методом.

**Обзор литературы.**

Оптико-акустический эффект, открытый А. Беллом еще в 1880 году, до создания лазеров использовался только в ИК спектроскопии газов. Развитие лазерной техники наметило основные пути развития импульсной оптоакустики: лазерное возбуждение акустических видеоимпульсов в жидкости и твердых телах, полупроводниках, лазерное возбуждение гиперзвуковых и рэлеевских волн. Впервые лазерная генерация ПАВ была описана в работе Р. М. Уайта и Р. Е. Ли [13]. Рэлеевская волна возбуждалась при поглощении одиночного импульса лазера с модуляцией добротности в алюминиевой пленке, напыленной на исследуемую поверхность. В качестве подложки использовались различные материалы - керамика, кристаллический и плавленый кварц. В работе [14] так же возбуждались широкополосные видеоимпульсы рэлеевских волн, при этом было проведено одновременное измерение скорости продольной, поперечной и рэлеевской волн. Полученные величины совпадают с измеренными другими методами. Преимущества этого метода в возможности проведения измерений с образцами малых размеров и простых форм в широком диапазоне температур и давлений, оперативность получения данных. Регистрация акустических импульсов производилась контактным методом при помощи пьезопреобразователей. В более поздних работах все чаще используется метод бесконтактной оптической регистрации ПАВ. В работе [4] были использован метод оптической регистрации, определены скорости продольной и поперечной волн на поверхности плавленого кварца покрытого двухслойной металлической пленкой (Cr и Au), отмечены возможности использования этого метода для определения упругих констант и толщины пленки. Распространение ПАВ по более сложной структуре (плавленый кварц с напыленными на его поверхности золотыми полосками) исследовано в работе [6].

**Физические механизмы возбуждения поверхностных акустических волн в твердом теле.**

Поглощение лазерного излучения в твердом теле и последующая релаксация фотовозбуждения приводят к деформации кристаллической решетки, что проявляется в виде упругих волн распространяющихся из области фотовозбуждения. При этом возбуждение акустических волн в среде возможно за счет различных механизмов. Их можно разделить на два класса - линейный и квадратичный по амплитуде электромагнитного поля. Линейные по полю механизмы - пьезоэлектрический и пьезомагнитный - приводят к возбуждению звука той же частоты, что и электромагнитная волна. При этих механизмах происходит фактически в квазистационарном поле. Поэтому при воздействии лазерного излучения на вещество возбуждение звука происходит за счет квадратично-нелинейных по полю эффектов: электро- и магнитострикции, теплового эффекта и деформационного механизма [1,9]. В этом случае акустические колебания возбуждаются не на частоте световой волны, а на частоте модуляции интенсивности, которая уже попадает в акустический диапазон. Фактически электрострикция может быть существенна только в прозрачных средах и на высоких ультразвуковых частотах. В области звуковых и ультразвуковых частот основным механизмом возбуждения звука является тепловой. Исключения из этого правила возможны в тех случаях, когда поглощенная световая энергия преобразуется в тепловую не сразу либо не полностью. Длительная задержка между моментом поглощения света и моментом, когда поглощенная энергия полностью преобразуется в тепловое движение среды, может реализоваться если энергии оптических квантов достаточно для отрыва валентных электронов от атомов. Это связано с тем, что рождающийся свободный электрон может длительное время не возвращаться в равновесное состояние. Отрыв электронов приводит к изменению сил взаимодействия между атомами. В случае твердых тел это должно повлечь за собой изменение плотности вещества, совершенно не связанное с его нагревом. Такой механизм оптической генерации звука называется деформационным. При использовании лазеров видимого и инфракрасного диапазонов длин волн данный механизм оптико-акустического эффекта может играть важную роль в полупроводниковых материалах. Числовые оценки [11] показывают, что в таких полупроводниках как Ge, Si, GaAs деформационный механизм на порядок эффективнее, чем тепловой. Однако в общем случае насыщение роста концентрации фотовозбужденных носителей может приводить к существенному преобладанию теплового механизма. Уровень оптико-акустического сигнала пропорционален переменной части светового потока. Поскольку лазеры импульсного действия позволяют получать существенно более высокие интенсивности света, чем лазеры непрерывного действия, для лазерной оптоакустики является типичным возбуждение широкого акустического спектра- звуковых видеоимпульсов. В конечном итоге рассмотренные выше механизмы приводят к генерации продольных и поперечных волн. В продольной волне, или волне сжатия-разряжения смещение частиц происходит вдоль волнового вектора. Распространение такой волны сопровождается изменением расстояния между частицами среды и, как следствие, локальным изменением плотности среды. Существование поперечных волн в твердом теле обусловлено деформацией сдвига, т.е. деформацией кристалла без изменения объема. Следует отметить, что для ограниченной среды уравнения движения должны рассматриваться совместно с граничными условиями для механических и электрических величин. В частности, для свободной поверхности граничное условие заключается в отсутствии механических напряжений. Граничным условием для вектора электрической индукции является непрерывность его нормальных составляющих в отсутствии поверхностных зарядов [7].

На поверхности твердого тела могут распространяться акустические волны более сложной структуры. Одной из таких поверхностных волн является волна Рэлея. В простом случае изотропного твердого тела эта волна содержит продольную и поперечную компоненты, сдвинутые по фазе на p/2 и лежащие в плоскости, определяемой волновым вектором и нормалью к поверхности. Таким образом, в общем случае рэлеевская волна является эллиптически поляризованной. Толщина слоя вещества, приводимого в движение волной Рэлея составляет величину порядка длины волны l. Поскольку рэлеевские волны локализованы вблизи поверхности, они очень чувствительны к поверхностным дефектам кристалла.

На поверхности полубесконечной пьезоэлектрической среды возможно распространение поперечной поверхностной волны, поляризованной параллельно поверхности, и с глубиной проникновения тем меньшей, чем сильнее пьезоэлектрические свойства среды. Это так называемые акустоэлектрические волны или волны Гуляева-Блюштейна. По сравнению с рэлеевскими волнами, глубина проникновения волны Гуляева-Блюштейна вглубь образца существенно больше и может превышать величину 100l. Для существования поверхностной акустоэлектрической волны кроме выполнения механических и электрических граничных условий должны быть выполнены условия определенного расположения элементов симметрии кристалла относительно саггитальной плоскости.

**Теоретическое описание акустических волн на поверхности твердого тела.**

**Волны Рэлея.**

Как уже отмечалось ранее на поверхности твердого тела могут существовать волны различных типов. Волна Рэлея на свободной поверхности состоит из продольной волны сжатия-растяжения и поперечной волны сдвига. Вторым важным типом поверхностных акустических волн является волна Гуляева-Блюштейна (ВГБ), которая так же может существовать на свободной поверхности твердого тела, но в отличие от рэлеевской волны существование ВГБ возможно только на определенных срезах и в определенных направлениях пьезоэлектрических кристаллов. В системе полупространство-слой чисто механическое возмущение границы приводит к образованию сдвиговой волны Лява. Волны Лява находят некоторое применение на практике в лабораторных исследованиях. В теории эти волны часто используют в качестве простейшей модели поверхностных волн, так как расчеты для волн Лява существенно проще, чем для волн Рэлея. Так же следует отметить случай, когда на поверхности имеются неровности. Приповерхностная жесткость в такой системе меньше за счет наличия канавок, что приводит к образованию сдвиговых поверхностных волн (СПВ). Скорость волны в приповерхностной области уменьшается, так как волна как бы обегает выступы, проходя при этом больший путь. В данной работе проводится исследование распространения рэлеевской волны по поверхности твердого тела, которая имеет как случайные неоднородности (шероховатая поверхность) так и искусственные дефекты представляющие из себя наноразмерную периодическую структуру.

Z

Y

uX

q

0

uZ

X

Рис.1. Система координат к вопросу о распространении рэлеевской волны.

При описании волн Рэлея [7], распространяющихся вдоль границы изотропного упругого полупространства (рис.3), смещение  удобно выражать через скалярный j и векторный ****потенциалы:

****  (1)

причем такое представление возможно при любой пространственной структуре волновых полей и соответствует разделению волны на волну сжатия (j) и волну сдвига (****). Уравнения для j и **** независимы и записываются в виде:

, , (2)

где D-оператор Лапласа, и  -скорости продольной и поперечной акустических волн соответственно. При распространении волны вдоль оси x (рис.1) и векторе смещения, лежащем в плоскости xz, векторный потенциал имеет одну компоненту  , отличную от нуля. При этом смещения  и  даются формулами:

, . (3)

Используя эти выражения и закон Гука для изотропного тела, можно записать отличные от нуля компоненты тензора напряжений:

,

,

, (4)

,

где и  -постоянные Ламе, причем , 

( -плотность упругого тела).

Решения уравнений (2), описывающие поверхностную акустическую волну, имеют вид:

, (5)

,

где и - частота и волновое число волны,  и  - амплитуды двух компонент волны, и  -коэффициенты, описывающие спадание волн сжатия и сдвига в глубь поверхности.

Из уравнений движения (2) следует, что

, , **>** ,

где , - волновые числа продольной и сдвиговой объемных волн.

На свободной границе полупространства z=0 должны выполняться условия отсутствия напряжений . Из выражений (4) при этом следует:

, (6)

.

Выражение в квадратных скобках преобразуется к виду , после чего система (6) записывается в виде:

, (7)

.

Из условия существования ненулевых решений этой линейной системы уравнений получается уравнение Рэлея

. (8)

Вводя скорость волны Рэлея   , легко видеть, что  не зависит от частоты, т.е. волны Рэлея в классическом упругом теле

бездисперсны и отношение  определяется отношением , т.е. зависит только от коэффициента Пуассона .

Амплитуды потенциалов и линейно связаны уравнениями (7), поэтому решения (5) можно представить в виде:

, (9)

.

Значения смещений и вычисляются по формулам (3); в частности, для амплитуды смещения  на поверхности имеем:

 , (10)

соответственно дается формулой:

. (11)

Из этих формул видно, что смещение частиц среды в волне Рэлея происходит по эллипсам, причем на «гребнях» волны частицы движутся в направлении, противоположном направлению распространения волны.

Поток энергии в волне Рэлея в расчете на единицу ширины акустического пучка с использованием формул (9) можно представить формулой:

, (12)

где поток энергии  представлен в Вт/см, частота в ГГц, плотность  в г/см, амплитуда в , - функция коэффициента Пуассона, скорость  в см/с.

Приведенные соотношения позволяют рассчитать все основные характеристики волны Рэлея в изотропном твердом теле.

Распространение ПАВ на шероховатых поверхностях и в мелкомасштабных периодических структурах.

Далее перейдем к рассмотрению распространения волны Рэлея на шероховатой поверхности. Основными явлениями на таких поверхностях являются затухание и дисперсия ПАВ обусловленные взаимодействием с двумерными и трехмерными шероховатостями. Рассмотрим теоретический подход к расчету затухания и дисперсии.

Пусть на выступ или выемку, находящиеся на гладкой поверхности, падает поверхностная волна, характеризуемая амплитудами смещений  . В результате взаимодействия с неоднородностью полное поле в упругой среде будет отличаться от поля падающей волны, принимая значение .Получим интегральное уравнение, определяющее рассеянное поле . Полное поле  в ограниченной упругой среде вдали от источников должно удовлетворять уравнению движения:

 , (13)

замыкаемому линеаризованным уравнением состояния:

, (14)

где - плотность среды, - компоненты тензора упругих напряжений, - компоненты линеаризованного тензора деформаций, - упругие постоянные;

и однородным граничным условием на свободной поверхности:

, (15)

где - вектор единичной нормали к поверхности.

Тогда для описания рассеяния волны на неоднородностях поверхности используется интегральное уравнение:

, (16)

где точка находится внутри контура С, а точка  лежит на С, - тензор Грина для смещений, П – скалярный дифференциальный оператор.

Физический смысл данного уравнения состоит в том, что оно описывает рассеянное поле, возникающее в результате действия на поверхность С2, С1/, С3 (рис.2) ненулевых напряжений, обусловленных наличием препятствий.

Ограничиваясь рассмотрением только изотропных твердых тел, для которых , перейдем к уравнению в потенциалах  и **.**

Если рассматривать смещения только в плоскости xz, то векторный потенциал  будет иметь лишь одну компоненту и соответствующее уравнение для вектора **Ф**примет вид:

, (17)

индекс m принимает значения x и z, - оператор возмущений.

Для малых препятствий наиболее простым методом решения данного уравнения является итерационный метод, в котором за нулевое приближение к решению выбирается поле падающей волны . Последующие приближения получаются подстановкой низших приближений в интеграл уравнения. В результате решение представляется в виде итерационного ряда (борновский ряд)

, (18)

Условие применимости борновского приближения накладывает ограничения на размеры и форму препятствий. В данном случае оно имеет вид:

<< 1, (19)

где функция описывающая дефект на плоской поверхности,- максимальная глубина дефекта, - производная по функции описывающей профиль дефекта, , , - длина рэлеевской волны.

Можно произвести соответствующие оценки для фазового сдвига, связанного с увеличением пути, проходимого рэлеевской волной при огибании ею искривленной поверхности препятствия.

n

C1

C3

u0i

u0i

C2

h

2a

C1/

X

C4

Z

б)

а)

Рис.2.

Если функция, описывающая неровность имеет вид  при  и равна нулю при >,то сдвиг фазы рэлеевской волны DQ оценивается формулой:

, (20)

при этом величину можно интерпретировать как кажущееся относительное замедление фазовой скорости волны относительно плоской поверхности ,

. (21)

Аналогичные оценки для треугольного препятствия:

. (22)

Для того чтобы рассчитать обусловленное шероховатостью затухание рэлеевской волны в борновском приближении, достаточно предположить, что участок шероховатой поверхности ограничен (имеет размеры ) и относительно мал, так что вызываемое им рассеяние может рассматриваться как слабое. Относя полную мощность акустических волн , рассеянных участком поверхности площадью , в объемные продольные, поперечные и рэлеевские волны, соответственно; к мощности падающей волны , проходящей через указанный участок (~), в соответствии с законом сохранения энергии получим следующее выражение для пространственного коэффициента затухания по мощности: . Поскольку ~, а ~, то очевидно, что  не зависит от размеров шероховатого участка. Коэффициент затухания по амплитуде при этом определяется как .

Следует отдельно рассмотреть распространение ПАВ вдоль поверхности, на которой имеются периодические системы неоднородностей в виде, например вытравленных мелких канавок, полосок металла, штырьков и т. п. Такие периодические структуры, расположенные на пути распространения волны, являются основой ряда устройств на ПАВ. Дело в том, что для получения требуемых характеристик устройств необходимо иметь возможность управлять распространением волны: отражать волну с малыми потерями, изменять направление распространения волн, рассеивать волны и т. д. Эти операции, как правило невыполнимы при помощи единичного (локального) рассеивающего элемента и только большое число периодически (или квазипериодически) расположенных возмущений на поверхности позволяет реализовать требуемое управление распространением ПАВ. При этом каждый отдельный элемент может мало влиять на распространение волны, но совокупное их действие оказывается значительным.

Характер рассеяния ПАВ на периодически расположенных системах неоднородностей определяется интерференцией волн, рассеянных на отдельных элементах системы, и, значит существенно зависит от соотношения между периодом структуры и длиной волны. В рамках борновского приближения можно считать, что падающая на структуру волна в области расположения неоднородностей не удовлетворяет граничным условиям, и в этих областях возникают напряжения, порождающие рассеянные волновые поля. Эти сторонние напряжения можно представить в виде набора гармоник с волновыми числами (- волновое число падающей волны, - волновое число периодической структуры, -период структуры, -волновое число гармоник напряжений, создаваемых на поверхности, ( ). Если одна из гармоник поверхностных напряжений имеет волновое число, равное или близкое к волновому числу одной из собственных волн системы, происходит интенсивное (резонансное) возбуждение соответствующей волны. Пусть длина волны больше удвоенного периода структуры ( >, < ). В этом случае поверхностные напряжения расположены слишком часто (или, что то же самое, волновые числа ,  и т.д. слишком велики по модулю) и не могут возбуждать волн в системе. Таким образом, при распространении ПАВ по мелкомасштабной ( <<) периодической системе неоднородностей рассеянных волн не возникает. Гармоники напряжений с волновыми числами вызывают приповерхностные колебания, амплитуда которых много меньше амплитуды ПАВ, если возмущение поверхности мало. Учет этих колебаний приводит лишь к небольшому изменению скорости волны Рэлея. При уменьшении длины волны первая пространственная гармоника поверхностных напряжений совпадает по модулю с волновым числом ПАВ, бегущей в противоположном направлении: , . При этом интенсивно генерируется отраженная волна. Эффект можно описать и как сложение в фазе волн, отраженных отдельными канавками. Действительно, из  следует, что . Поэтому падающая волна, проходя расстояние  между канавками, меняет фазу на , и отраженная от канавки волна, проходя в обратном направлении расстояние , оказывается в фазе  с волной, отраженной от предыдущей канавки.

**Экспериментальная техника лазерной оптоакустики и методика измерений акустического отклика.**

В настоящее время разработаны многочисленные экспериментальные методы исследования физических свойств твердых тел, использующих фотоакустический эффект. Как было показано выше принцип лазерной генерации упругих волн заключается в возбуждении пространственно неоднородных напряжений при поглощении лазерного излучения, которые распространяются из области поглощения света в виде волн. Достижения последнего времени в области физики и техники генерации нано-, пико- и фемтосекундных лазерных импульсов существенно расширили возможности лазерной оптоакустики. Возбуждение акустических волн, обусловленное воздействием на твердое тело сверхкоротких лазерных импульсов позволило экспериментально расширить спектральный диапазон оптоакустического преобразования до частот в сотни гигагерц. Первая экспериментальная работа, в которой были зарегистрированы акустические импульсы субнаносекундной длительности, возбуждаемые лазерными импульсами с длительностью 500 пикосекунд в тонкой стальной пластине, принадлежит А. Таму [12]. Было предложено использовать наблюдавшуюся последовательность эхо-сигналов, связанных с отражением акустического импульса от границ образца, для точного измерения толщины тонких пленок, скорости распространения и коэффициентов затухания гиперзвука в исследуемой среде. Для детектирования акустических импульсов использовался пленочный пьезопреобразователь из ZnO. Дальнейшее совершенствование этой экспериментальной установки позволило исследовать сложные слоистые структуры, в частности, свойства тонких покрытий напыляемых на подложку. В последующих экспериментах неоднократно подчеркивалась прикладная ценность оптоакустического метода с использованием сверхкоротких акустических импульсов, т. к. пространственное разрешение пропорционально длительности акустического импульса и определяется величиной tс (где с-скорость продольной звуковой волны).

В настоящее время продолжаются интенсивные как экспериментальные так и теоретические исследования по генерации сверхкоротких импульсов деформации, а также исследования поверхностей с использованием ПАВ. Теоретический анализ проблем направлен на выяснение оптимальных условий ОА преобразования и изучение физических процессов, определяющих длительность акустического отклика при сверхкоротком лазерном воздействии и преобразования акустического импульса неоднородностями на поверхности. Акустические методы исследования обладают многообещающими спектроскопическими возможностями. Поскольку пространственная протяженность акустического импульса длительностью 10 пс. составляет величину порядка @50 ангстрем, что всего лишь на порядок превышает характерный размер ячейки кристаллической решетки [5,6], то дальнейшее развитие физики сверхкоротких акустических импульсов представляет определенный интерес для акустической спектроскопии и диагностики.

В настоящее время актуальной проблемой является создание компактных лазерных систем, использующих оптоакустический эффект для экспресс-анализа физических параметров исследуемого объекта.

Совершенствование экспериментальной техники отражается и на методах регистрации широкополосного акустического сигнала в поглощающей среде. Кроме контактных методов регистрации с помощью пьезоэлектрических преобразователей, активно используются бесконтактные оптические методы детектирования объемных и поверхностных акустических волн [2,3,5]. Именно этот метод отрабатывается в данной работе. Схема данного эксперимента представлена на рисунке 3.

В основе оптических схем регистрации ПАВ лежит детектирование пробным лазерным лучом локальных искажений поверхности (смещение поверхности, наклон, кривизна, скорость смещения поверхности), индуцированных распространяющимися на поверхности акустическими волнами. Поверхностный рельеф, связанный с распространением волны, можно сравнительно просто обнаружить по изменению угла отражения пробного луча. Для измерения смещения поверхности и скорости смещения поверхности эффективными оказываются также и интерферометрические методы.

**5**

**3**

**4**

**1**

**2**

**6**

Рис.3. Схема лазерной наносекундной установки:

1-импульсный Nd-YAG лазер; 2-He-Ne лазер пробного излучения;

3-исследуемый образец; 4-фотодиод; 5-высокочастотный усилитель;

6-цифровой осциллограф.

Наносекундная лазерная система для исследования поверхностных акустических волн .

В данной работе для возбуждения и исследования ПАВ использовалась импульсная лазерная система, основные компоненты которой изображены на рисунке 4. Источником лазерных импульсов (которыми возбуждалась поверхностная волна) длительностью 20 наносекунд является твердотельный лазер на стекле с неодимом. Энергия одиночного импульса на выходе в одномодовом режиме генерации @ 10 мДж. В оптической схеме возможно осуществлять генерацию второй гармоники в нелинейном кристалле KDP. Таким образом в данной установке импульсное излучение лазера с длиной волны l=1.06 мкм ( hn=1.17 эВ ) легко может быть преобразовано в излучение второй ( l=0.53 мкм, hn=2.34 эВ ) гармоники. Телескопический расширитель луча составленный из линз Л4, Л5 и диафрагмы Д3 используется для формирования лазерного пучка накачки с определенными геометрическими параметрами, которые, при необходимости, можно варьировать. Цилиндрическая линза Л6 фокусирует световой луч в прямолинейную полоску длиной примерно 5 мм и шириной <50 мкм, поэтому фронт ПАВ приближенно можно считать плоским. Фотоприемник ФП1 используется для синхронизации акустического импульса с лазерным. Для регистрации ПАВ используется He-Ne лазер с длиной волны 0,632 мкм. Линзы Л1, Л2 а так же диафрагмы Д1, Д2 используются для получения пучка с гауссовым профилем. Линза Л3 фокусирует пробный луч на образец. Система регистрации отраженного луча состоит из линз Л7, Л8, Л9, ножа Фуко и фотоприемника ФП2. Нож Фуко используется как интерференционный прибор, позволяющий преобразовать малейшие изменения фазовых соотношений в отраженном луче в амплитудные, которые могут быть зарегистрированы фотодиодом.

- YAG- Nd

HE-NE

Кристалл KDP

Л1

ФП 1

(синхронизация)

Д 1

Л2

Л4

Д 3

Д2

Л5

Л3

Зеркало

Л6

нож Фуко

Л9

Л8

Л7

ФП 2

образец

YAG лазер: длительность импульса 20 нс., длина волны 532 нм., лазер HE-NE длина волны 632,8 нм.

Экспериментальные результаты.

Экспериментальные исследования проводились с целью обнаружения, предсказываемых теорией, затухания и замедления волны Рэлея при распространении по шероховатым поверхностям и мелкомасштабным периодическим структурам. Эксперименты проводились на трех образцах, имеющих различную структуру неоднородностей на поверхности.

Во-первых исследовалась структура состоящая из наноразмерных кластеров кремния на поверхности кристаллического кремния. Данная структура была получена посредством лазеро-индуцированного осаждения Si из газовой фазы (LCVD метод), при разложении газа SiF4 в фокусе непрерывного перестраиваемого по длине волны CO2 лазера. LCVD производилось при комнатной температуре, поэтому поверхность имеет кластерную структуру сложной морфологии. Изучение структуры на атомно-силовом микроскопе (рис.5) показало, что средний размер неоднородности составляет ~1500 нм., а высота неровностей порядка 450 нм.. Пользуясь формулами (21) и (22) можно оценить ожидаемое замедление рэлеевской волны на шероховатой поверхности, по сравнению с волной на гладкой поверхности. В приближении неровности, описываемой функцией (формула (21)) [7], получаем, что скорость волны уменьшается в среднем на величину 198 м/с., а расчетное замедление волны при использовании модели треугольной неровности (формула (22)) [7] составляет 135 м/с. Экспериментально полученные профили волн для на неоднородной поверхности кремния представлены на рисунке 6. Профили акустических импульсов сдвинуты, т. е. наблюдается замедление рэлеевской волны, которое в данном случае составляет 161 м/с. Амплитуда импульса на гладкой поверхности (профиль 1) меньше, чем амплитуда импульса на неоднородной поверхности (профиль 2), это связано с тем, что возбуждение

Рис.5.Фотографии поверхности полученные на атомно-силовом микроскопе.

В.

2

1

Рис.6 Профили ПАВ на поверхности кремния. 1- гладкая поверхность, 2-неоднородная поверхность.

нс.



В.

нс.

2

1



Рис.7. Профили акустических импульсов на поверхности стекла покрытого загрубленной серебряной пленкой .

акустической волны оказывается эффективнее на такой поверхности, вследствие лучшего поглощения лазерного излучения.

Так же проводились исследования ПАВ на поверхности стекла покрытого тонкой загрубленной серебряной пленкой толщиной примерно 50 нм., наблюдалось затухание волны, связанное с рассеянием на неоднородностях поверхности, профили импульсов 1 и 2 (рис.7) в данном случае получены для различных расстояний между точками возбуждения и регистрации (профиль 1 регистрировался на расстоянии 2 мм от точки возбуждения, профиль 2 на расстоянии 4 мм от точки возбуждения). Так же при распространении волны наблюдалось искажение ее профиля, что может быть связано с дифракцией волны на неоднородностях пленки и рассеянием в объемные волны.

Исследование распространения ПАВ по периодической структуре проводилось на образце, который изображен на рисунке 8, периодическая структура на его поверхности была получена следующим образом. На стеклянную подложку напыляют золотую пленку толщиной порядка 50 нм. Затем, образец погружают в емкость с глицерином (рис.8), на поверхности которого плавают поллистироловые шарики диаметром 500 нм. Далее пластинку вытягивают таким образом, что на поверхности золотой пленки образуется монослой из шариков, в промежутки между которыми снова напыляется золото, причем время напыления в данной фазе изготовления образца равно времени напыления пленки, поэтому средняя высота неоднородностей также составляет 50 нм. После чего производится отжиг поллистирола и получается периодическая структура, состоящая из призмочек с вогнутыми гранями (длина грани 100 нм., расстояние между объектами порядка 500 нм.). На рисунках 9 и 10 представлены профили рэлеевских волн на поверхности стекла с тонкой золотой пленкой на которой сделана наноразмерная периодическая структура, описанная выше. Профиль 1 (рис.9) получен при возбуждении волны в точке А (рис.8) и регистрации в точке Б, т. е. акустический импульс проходит по поверхности гладкой пленки. Импульс 2 получен при возбуждении в точке А/ и регистрации в точке Б/ (импульс проходит через периодическую структуру). Профили сдвинуты относительно друг друга, это связано с замедлением волны 2.

Д

С

Б/

А/

Б

С/

А

Д/

шарики

d~500 нм.

500 нм.

глицерин.

Рис.8. Образец с наноразмерной структурой и схема нанесения поллистироловых шариков на поверхность пластинки.

В.

нс.

2

1

-0.01

0.01

-0.01

0.01

0

0

400

800

1800

1600

1400

1200

1000



Рис.9. Профили ПАВ. 1- тонкая золотая пленка, 2- пленка с наноразмерной структурой.

В.

-0,01

-0,01

0,01

0,01

2

1

нс.

0

0

1300

1200

1100

1000

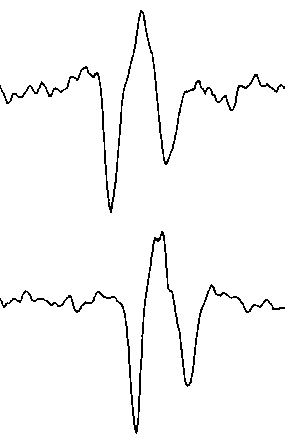


Рис.10. Профили ПАВ. 1- золотая пленка, 2- наноразмерная структура.

Профили волн на рисунке 10 также сдвинуты (наблюдается замедление рэлеевской волны), при этом волна 1 возбуждалась в точке С (волна 2 в точке С/), а регистрировалась в точке Д (волна 2 в точке Д/), т. е. волна 1 распространялась на гладкой поверхности, а волна 2 по периодической наноразмерной структуре (при этом волна 2 возбуждалась и регистрировалась на этой структуре). Импульс 2 приходит с задержкой 20 нс., что составляет замедление скорости порядка 50 м/с. В данном случае длина ПАВ составляла 100 мкм., при размере дефекта периодической структуры порядка 100 нм., т. е. длина волны много больше периода системы, поэтому не наблюдалось брэгговского отражения волны, а периодическая система работает, как неоднородная поверхность (шероховатая пленка).

**Заключение.**

Целью данной работы являлось исследование взаимодействия ПАВ Рэлея с наноразмерными неоднородностями на поверхности твердого тела. Для этого была отработана методика исследования ПАВ при помощи бесконтактного оптического зондирования. В ходе работы были рассчитаны параметры оптической системы, позволяющей исследовать форму ПАВ, распространяющейся на поверхности твердого тела. В данной установке для оптической генерации поверхностной волны использовался импульсный YAG лазер ( длительность импульса 20 нс.), луч HE-NE лазера использовался для зондирования поверхности, для регистрации электрического сигнала использован широкополосный (полоса пропускания порядка 1ГГц.) высокочастотный усилитель и электронный осциллограф, позволяющий разрешать импульсы длительностью 10 нс., сопряженный с компьютером. Экспериментально стабилизированы параметры оптической системы и электронных схем.

Экспериментально было показано, что имеет место дисперсия и затухание рэлеевской поверхностной волны, которые обусловлены взаимодействием с неоднородностями, проведено сравнение результатов с теоретическими расчетами [7].

Исследования проводились на поверхности кремния с нанесенными на нее кластерами, было обнаружено замедление ПАВ, по сравнению с волной на гладкой поверхности, которое составило 161м/с. Кластерная структура на поверхности имеет сложную морфологию для которой нельзя вывести точные теоретические оценки, но можно воспользоваться моделями для треугольной и косинусоидальной неоднородностей. Расчеты для треугольной неоднородности дают результат замедления скорости 135 м/с., для косинусоидальной 198 м/с. Таким образом данные модели могут применяться, но при этом следует рассматривать при расчетах не форму профиля неоднородности, а форму зависимости плотности вещества на поверхности.

Также исследовалось взаимодействие ПАВ с наноразмерной периодической структурой зафиксированное при этом замедление волны составило 75 м/с., при этом не наблюдалось брэгговского отражения волны.

В ходе исследований наблюдалось изменение формы импульса связанное с его дифракцией на неоднородностях и уменьшение его амплитуды с увеличением длины пройденного пути вдоль неоднородной серебряной пленки.

Таким образом данная система может быть эффективно использована в импульсной лазерной оптоакустике для исследования состояния границы между твердым телом и воздухом.

На первом этапе работы ставилось целью отработка методики наблюдения взаимодействия ПАВ с неоднородностью границы. Для этого была выбрана более простая схема, использующая наносекундный лазер. При этом длина акустического импульса составляла порядка 100 мкм, что не является оптимальным для изучения нанообъектов на поверхности твердого тела. Для более точных исследований границ раздела твердое тело-воздух необходимо использовать сверхкороткие акустические импульсы. С этой целью предполагается использовать лазерное излучение с длительностью импульса 20 пикосекунд.

**Список литературы.**

**1.** Гусев В.Э., Карабутов А.А. «Лазерная оптоакустика». Москва: Наука, 1991.

**2.** Andaloro R.V., Simon H.J., and Deck R.T. «Temporal pulse reshaping with surface waves» .Appl. Opt. **33**, 6340-6347 (1994).

**3.** Takayuki Okamoto and Ichirou Yamaguchi, «Surface plasmon microscope with an electronic angular scanning». Optics Communications **93**, 265-270 (1992).

**4.** Oing Shen, Akira Harata, and Tsuguo Sawada, «Analysis of metallic multilayers using hypersonic surfase waves induced by transient reflecting gratings». Appl. Phys. **32**, 3628-3632 (1993).

**5.** Proklov V.V., Surov S.P., Sychugov V.A., and Titarenko G.V. «Diffraction of weakly decaying surface electromagnetic waves by surfase acoustic waves». Opt. Spektrosk. **65**, 753-756 (1988).

**6.** Lin H.-N., Maris H.J., and Freund L.B. «Study of vibrational modes of gold nanostructures by picosecond ultrasonics». Appl. Phys. **73**, 37-45 (1993).

**7.** Гуляев Ю.В., Крылов В.В., Бирюков С.В., Плесский В.П. «Поверхностные акустические волны в неоднородных средах». Москва: Наука, 1991.

**8. «**Поверхностные акустические волны». Под редакцией А.Олинера, Москва : Мир 1981.

**9.** Лямшев Л.М. «Лазерное термооптическое возбуждение звука», Москва: Наука 1989.

**10.** Дьелесан Э.,Руайе Д. «Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов», Пер. с франц. Под ред. Леманова. Москва: Наука, 1982.

**11.** Avanesyan S. M., Gusev V. E., Zheludev N. I. //Appl. Phys. A., 1986. V. 40. P. 163.

**12.** Tam A. C. «Pulsed-laser generation of ultrashort acoustic pulsed: Application for thin-film ultrasonic measurements». Appl. Phys. Lett. 1984, V.45, n5, 510-512.

**13.** Lee R. E., White R. M. //Appl. Phys. Lett. 1968. V. 12. P. 12.

**14.** Ledbetter A. M., Moulder J. C.// J. Acoust. Soc. Am. 1979. V. 65. P. 840.