

01.04.07 ЭЛС
7-21

На правах рукописи

ЭЛС

Голубев Евгений Валерьевич

**ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ВОЛН РЭЛЕЯ
В ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛАХ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ КЮРИ**

Специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

**Челябинск
2004**

Работа выполнена на кафедре общей и экспериментальной физики Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
ГУРЕВИЧ Сергей Юрьевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
БУЧЕЛЬНИКОВ Василий Дмитриевич;
кандидат физико-математических наук, доцент
НИКИШИН Юрий Алексеевич.

Ведущая организация — Институт физики металлов УрО РАН,
г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится 20 октября 2004 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.04 при Южно-Уральском государственном университете: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, конференц-зал № 1.

Ученый совет университета: тел. (3512) 67-91-23, факс (3512) 63-95-56.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук, профессор



Гельчинский Б.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

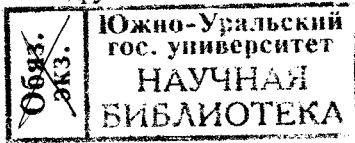
С момента создания оптических квантовых генераторов значительное внимание уделяется исследованию взаимодействия мощного лазерного излучения с конденсированными средами, которое сопровождается генерацией акустических колебаний.

Лазерный (оптико-акустический) метод генерации звука основан на преобразовании энергии электромагнитного излучения оптического диапазона, модулированного во времени, в тепловую энергию. Температурные колебания в среде приводят к возникновению акустических волн. Этот метод, как это следует из названия, находится на стыке важнейших областей физики: акустики, оптики и теплофизики. Лазерный метод генерации ультразвуковых колебаний является наиболее перспективным, экологически чистым и безопасным из числа бесконтактных методов. К достоинствам этого метода следует отнести возможность возбуждения ультразвука с большого расстояния и возможность ввода энергии в любой точке поверхности образца.

Большой интерес к лазерному методу вызван, в первую очередь, уникальными характеристиками возбуждаемых импульсов упругих волн, которые определяются параметрами оптического излучения и свойствами среды. Малая длительность акустических импульсов и непрерывный спектр в достаточно широком диапазоне частоты позволяет использовать их для определения упругих постоянных, дисперсии скорости и затухания, выявления и идентификации неоднородностей, проведения исследований конденсированных сред. Использование данного метода, например в ультразвуковой дефектоскопии, позволяет контролировать изделия с грубой необработанной поверхностью. Также возможен контроль металлоконструкций в процессе эксплуатации, изделий, нагретых до высоких температур или находящихся под воздействием радиации.

Ферромагнитные металлы составляют достаточно большую область материалов, используемых в современном производстве и при проведении научных исследований. Изучение особенностей явления оптической генерации звука в ферромагнитных металлах в высокотемпературной области, содержащей магнитный фазовый переход, позволяет получить новые научные данные о механизмах оптико-акустического преобразования в условиях резкого изменения свойств среды. Поскольку передел металла происходит при температуре, близкой к температуре Кюри, результаты такого исследования будут способствовать созданию и развитию методов неразрушающего высокотемпературного контроля, применение которых на ранних стадиях производства приведет к значительному экономическому эффекту.

Важное место в изучении физики поверхностных явлений, в физике разрушения и ультразвуковых методах неразрушающего контроля, занимают методы, использующие поверхностные акустические волны (ПАВ, волны Рэлея). Это объясняется особенностями, которые отделяют ПАВ от других типов волн: большая



концентрация акустической энергии в приповерхностном слое и быстрое уменьшение амплитуды с глубиной, отсутствие дисперсии и малое затухание при распространении. Поскольку ПАВ избирательно реагируют на дефекты в зависимости от глубины их залегания, с их помощью можно выявлять поверхностные и околоповерхностные дефекты, проводить оценку остаточных напряжений, контролировать состояние, определять термические и механические свойства поверхностного слоя металла. При лазерном возбуждении на долю поверхностных волн приходится большая часть акустической энергии. Характеристики возбуждаемых акустических импульсов определяются пространственно-временной структурой падающего излучения, которой достаточно легко управлять.

Как показывает анализ литературных источников, проведенный автором, к настоящему моменту завершены исследования по лазерной генерации объемных акустических волн в ферромагнитных металлах, находящихся при температуре, близкой к температуре магнитного фазового перехода (точка Кюри). Однако аналогичного исследования для ПАВ проведено не было.

С практической точки зрения исследование параметров ПАВ в ферромагнитных металлах при высоких температурах позволит сделать высокотемпературный контроль универсальным. Станет возможным контролировать изделия любой формы и размеров на различных стадиях производства. Кроме того, для определения упругих постоянных и прочностных характеристик твердых тел акустическими методами, исследования физических свойств твердых тел и дефектоскопии необходимо комплексное использование объемных волн и ПАВ.

Таким образом, возникает задача определения теоретических и экспериментальных особенностей процесса бесконтактной оптико-акустической генерации поверхностных акустических волн в ферромагнитном металле при магнитном фазовом переходе, соответствующем точке Кюри. Решение этой задачи имеет существенное значение для физики конденсированного состояния и практики, и, следовательно, тема настоящей диссертационной работы представляется актуальной.

Цель работы и задачи исследований

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование особенностей явления оптической генерации поверхностных акустических волн в ферромагнитных металлах и выработка рекомендаций для методов акустического контроля.

Для достижения цели были поставлены и решались следующие задачи

1. Разработать элементы теории процесса лазерной термооптической генерации импульсов волн Рэлея в ферромагнитных металлах в высокотемпературной области, содержащей магнитный фазовый переход второго рода (т. Кюри).
2. Разработать методику проведения экспериментальных исследований лазерной генерации поверхностных акустических волн в ферромагнитных металлах. Разработать программу, реализующую автоматическую обработку данных, получаемых при экспериментальном исследовании.

3. Экспериментально исследовать зависимости параметров акустических импульсов поверхностных волн, возбуждаемых излучением импульсного лазера в ферромагнитном металле, от энергии оптических импульсов и температуры.

4. Обосновать возможность использования полученных результатов для целей акустического контроля изделий из ферромагнитных металлов.

Научная новизна

1. Впервые теоретически решена задача лазерного термоакустического преобразования для поверхностных акустических волн в ферромагнитных металлах с учетом температурной зависимости коэффициента теплового расширения ферромагнитного металла и конечного значения времени релаксации теплового потока.

2. Рассчитаны характеристики возбуждаемых акустических импульсов поверхностных волн (волн Рэлея) для ферромагнитных металлов, обладающих аномалиями теплового расширения различных типов.

3. Установлено, что наибольшее изменение амплитуды и спектральной функции происходит при приближении температуры ферромагнитного пространства к точке Кюри.

4. Разработаны стенд для проведения экспериментальных исследований высокотемпературной лазерной генерации волн Рэлея в ферромагнитном металле и новая методика сбора и анализа экспериментальных данных, использующая видеокамеру и вычислительную технику.

5. Экспериментально определены параметры импульсов поверхностных акустических волн в ферромагнитном металле в широком температурном интервале, содержащем магнитный фазовый переход (точку Кюри).

Практическая значимость

Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых и усовершенствования существующих методов высокотемпературного ультразвукового контроля металлоизделий с использованием импульсного лазерного излучения. Учет нелинейного характера процесса возбуждения упругих импульсов, обусловленного изменением теплофизических параметров ферромагнитного металла в зоне поглощения оптического излучения может служить основой для уменьшения погрешности определения параметров дефектов и характеристик поверхности.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Физическая модель процесса лазерной генерации импульсов поверхностных акустических волн в ферромагнитном металле в высокотемпературной области, содержащей магнитный фазовый переход второго рода (точка Кюри), учитывающая температурную зависимость коэффициента теплового расширения и конечное значение времени релаксации теплового потока. Выражения для компонент вектора смещений, соответствующих вкладу поверхностных акустических

волн (волн Рэлея) в акустическое поле, возбуждаемое импульсным лазерным излучением в ферромагнитном металле.

2. Результаты расчета зависимости амплитуды и спектральных характеристик возбуждаемых импульсов для ферромагнитных металлов, обладающих аномалиями теплового расширения различных типов, от температуры среды и параметров падающего оптического излучения. Показано, что наибольшее влияние тепловой нелинейности на параметры возбуждаемых импульсов ПАВ наблюдается при температуре ферромагнетика, близкой к температуре Кюри, что обусловлено аномалиями теплового расширения в соответствующей области температуры.

3. Методика проведения эксперимента, сбора и анализа данных. Для ферромагнитного сплава 32НКД экспериментально зафиксирован нелинейный рост амплитуды акустических импульсов при увеличении энергии возбуждающих оптических импульсов и различное относительное изменение амплитуды с температурой при различных значениях энергии оптических импульсов, что согласуются с данными расчета, основанными на реальной температурной зависимости коэффициента теплового расширения образца.

4. Показана необходимость учета тепловой нелинейности при разработке и усовершенствовании методик высокотемпературного неразрушающего контроля ферромагнитных изделий, что может уменьшить погрешность в определении характеристик поверхности и параметров дефектов.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях

1) XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика», г. Санкт-Петербург, 2002 г.

2) XXI Уральской региональной конференции «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами», г. Тюмень, 2003 г.

3) XXIII Российской школе по проблемам науки и технологий, г. Миасс, 2003 г.

4) XXX Международной зимней школе физиков-теоретиков «Коуровка», г. Кыштым, 2004 г.

5) XXII Уральской конференции по неразрушающему контролю «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами», г. Челябинск, 2004 г.

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 6 статьях и 4 тезисах докладов, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 149 источников. Полный объем диссертации 150 страниц, включая 46 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи диссертации, характеризуется новизна, научная и практическая значимость результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту и дана краткая характеристика основных разделов.

Первая глава представляет собой обзор работ, посвященных термооптическому возбуждению ультразвука в металлах, состоящий из трех частей. В первой части литературного обзора анализируется состояние теоретических и экспериментальных исследований по термооптической генерации ультразвука в немагнитных и ферромагнитных металлах, находящихся при комнатных температурах, в рамках теплового механизма, связанного с нестационарным нагревом среды, температура которой остается ниже температуры плавления. Показано, что теоретические исследования оптико-акустического эффекта в металлах базируются на динамической теории термоупругости. Отмечается, что теоретические представления развиты для случая, когда теплофизические параметры среды не изменяются в процессе поглощения оптического импульса и генерации ультразвука. Основные черты теплового механизма оптической генерации звука в металлах описываются в рамках линейной модели, в которой интенсивность оптоакустических источников пропорциональна повышению температуры в области поглощения оптического излучения. При увеличении энергии лазерного импульса становятся заметными изменения теплофизических параметров среды и процесс преобразования электромагнитной энергии в акустическую становится нелинейным даже в рамках теплового механизма, когда температура в области поглощения оптического импульса остается ниже температуры плавления вещества.

Во второй части главы приведен обзор ряда работ, посвященных нелинейным режимам возбуждения ультразвуковых волн лазерным импульсом в металлах. Показано, что в неферромагнитных металлах наибольшее влияние на характеристики возбуждаемых акустических импульсов объемных волн обусловлено изменением коэффициента отражения электромагнитного излучения при изменении температуры металла. При возбуждении импульсов объемных упругих волн в ферромагнитном металле вблизи высокотемпературного магнитного фазового перехода с помощью лазерных импульсов определяющей является температурная зависимость коэффициента теплового расширения металла.

Третья часть обзора литературы по лазерной генерации акустических волн в металлах посвящена исследованиям процесса оптоакустического преобразования в поверхностные акустические волны, а также приложению лазерно-возбуждаемого ультразвука к неразрушающему контролю, акустической микроскопии и определению физических свойств упругих твердых тел. Показано, что нелинейные режимы генерации поверхностных акустических волн в случае ферромагнитных металлов не исследованы.

В результате проведенного анализа сделаны выводы, приводящие к формулировке цели и постановке основных задач настоящей диссертации.

Вторая глава посвящена разработке элементов теории процесса лазерной термооптической генерации импульсов волн Рэлея в ферромагнитных металлах в высокотемпературной области, содержащей магнитный фазовый переход второго рода (точка Кюри).

В начале главы формулируются положения физической модели лазерной генерации звука, происходящей за счет термоупругого эффекта. Рассматривается однородное ферромагнитное полупространство, на границе которого происходит поглощение оптического импульса. Предполагается, что в материале не происходит фазовых превращений, сопровождающихся выделением или поглощением энергии. Если температура полупространства превышает температуру магнитного фазового перехода, то полупространство становится парамагнитным и аномальность термоупругих свойств среды в окрестности точки Кюри учитывается температурной зависимостью коэффициента теплового расширения. Задача генерации упругих волн в твердом теле сводится к несвязанной задаче динамической теории термоупругости: определить вектор деформации для поверхностных акустических волн по заданному закону распределения тепловых источников и известной температурной зависимости коэффициента теплового расширения среды.

Для возбуждения ультразвука обычно используют импульсные лазеры, излучающие оптические импульсы длительностью порядка 10^{-8} с и меньше. Поскольку глубина проникновения электромагнитного излучения значительно меньше глубины проникновения температурного поля за время действия оптического импульса, то можно считать, что поглощение энергии происходит непосредственно на облучаемой поверхности металла.

Первый этап решения задачи о генерации импульсов ПАВ сводится к расчету температурного поля в ферромагнетике. Была выбрана цилиндрическая система координат, в которой ось z направлена по нормали к поверхности вглубь среды, r – расстояние от оси z . Введены следующие обозначения для параметров среды: A – коэффициент поглощения оптического излучения, a – коэффициент теплопроводности, λ_q – теплопроводность среды, t_r – время релаксации теплового потока. Распределение температуры $T(r, z, t)$ в полупространстве удовлетворяет уравнению теплопроводности

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{t_r}{a} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (1)$$

и граничному условию

$$-\lambda_q \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = A \left(I(r, t) + t_r \frac{\partial I(r, t)}{\partial t} \right), \quad (2)$$

где $I(r, t)$ – распределение интенсивности в лазерном пучке, t – время.

Для вектора деформации было использовано представление Ламэ через потенциалы упругих смещений. В рассматриваемом случае осесимметричной деформации для проекций вектора деформации получаем

$$u_r = \frac{\partial \Phi}{\partial r} - \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad u_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\psi}{r}, \quad (3)$$

где Φ – скалярный потенциал, ψ – скаляр, представляющий собой отличную от нуля компоненту векторного потенциала.

Для определения потенциалов решается система уравнений:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = f(r, z, t), \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\psi}{r^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0, \quad (5)$$

где $f(r, z, t) = (3 - 4\gamma^2)\alpha_T(T_0 + T) \cdot T(r, z, t)$, $\gamma = c_2/c_1$, c_1 , c_2 – скорости распространения продольных и поперечных волн соответственно, T_0 – равновесная температура, $\alpha_T(T)$ – коэффициент теплового расширения.

Система уравнений (4) и (5) дополняется граничными условиями, задающими механические напряжения σ_{ik} на свободной поверхности полупространства ($z = 0$) и условиями ограниченности потенциалов на бесконечности:

$$\sigma_{zz}|_{z=0} = \sigma_{rz}|_{z=0} = 0, \quad \Phi|_{z \rightarrow \infty} = \psi|_{z \rightarrow \infty} = 0. \quad (6)$$

Решение системы уравнений термоупругости, получаемое с помощью интегрального преобразования Фурье–Бесселя, представляет собой суперпозицию волн разных типов. Рассматривается только вклад, соответствующий волнам Рэлея, распространяющихся вдоль границы полупространства:

$$U_r(r, t) = -\frac{\sqrt{c_2^2 - c_R^2}}{\pi c_2^3 c_R^3 R'} \int_{-\infty}^{\infty} [J_1(\omega r/c_R) S(\omega)] \exp(i\omega t) d\omega, \quad (7)$$

$$U_z(r, t) = \frac{2c_2^2 - c_R^2}{2\pi c_2^4 c_R^3 R'} \int_{-\infty}^{\infty} [J_0(\omega r/c_R) S(\omega)] \exp(i\omega t) d\omega, \quad (8)$$

где c_R – скорость распространения волн Рэлея, ω – круговая частота, J_0 и J_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков соответственно,

$$R' = 8c_R^{-1}(2c_R^{-2} - c_2^{-2}) - \frac{4[4c_R^{-4} - 3c_R^{-2}(c_1^{-2} + c_2^{-2}) + 2c_1^{-2}c_2^{-2}]}{c_R \sqrt{(c_R^{-2} - c_1^{-2})(c_R^{-2} - c_2^{-2})}} \quad (9)$$

и

$$S(\omega) = \omega^2 \int_0^{\infty} \tilde{f}^*(\omega/c_R, z, \omega) \exp(-z \frac{\omega}{c_R} \sqrt{1 - c_R^2/c_1^2}) dz \quad (10)$$

– функция, связывающая спектр импульса ПАВ с пространственно-временной формой оптического импульса и зависимостью коэффициента теплового расширения от температуры. Действительная часть полученных выражений (7) и (8), описывает нелинейный поверхностный отклик среды на действие импульса оптического излучения.

В третьей главе приведены численные исследования процесса оптико-акустического преобразования поверхностных акустических волн в ферромагнитных металлах. Рассмотрен практически важный случай распределения интенсивности в лазерном импульсе в виде функции Гаусса:

$$I(r, t) = \frac{W}{\pi \sqrt{\pi} R_0^2 t_0} \exp(-r^2/R_0^2 - t^2/t_0^2), \quad (11)$$

где W – энергия импульса, t_0 – длительность лазерного импульса, R_0 – радиус лазерного пятна на поверхности.

Для анализа выражений, полученных во второй главе, с помощью ЭВМ и методов численного интегрирования были построены графики зависимости амплитуды (размах) возбуждаемых акустических импульсов от величины энергии оптических импульсов и температуры ферромагнитной среды. Также исследовались параметры спектральной плотности.

Расчет параметров возбуждаемых акустических импульсов в металлах проведен для четырех возможных случаев температурной зависимости: постоянное значение коэффициента теплового расширения (алюминий), монотонный рост без особенностей в районе точки Кюри (32НКД) и зависимости, имеющие характерные «ферромагнитные» аномалии теплового расширения противоположных знаков (никель и железо).

Показано, что учет изменения коэффициента теплового расширения приводит к отклонению от прямой пропорциональности между амплитудой и энергией оптического импульса. На рис. 1 представлены расчетные зависимости амплитуды (размах) от величины среднего теплового потока Q , которая рассчитывалась по формуле

$$Q = \frac{W}{2\pi R_0^2 t_0}, \quad (12)$$

где $t_0 = 15$ нс. Расчет основан на реальной температурной зависимости коэффициента теплового расширения образца из сплава 32НКД, который был использован при проведении экспериментальных исследований. Спектр возбуждаемого акустического импульса, по сравнению с результатом расчета в линейном приближении, расширяется, максимум спектральной функции смещается в область более высоких частот, что соответствует уменьшению длительности акустического импульса. Это объясняется следующим образом. Интенсивность оптико-акустических источников, в случае учета тепловой нелинейности, пропорциональна не повышению температуры T (и ее градиенту) в зоне поглощения, а определяется произведением $\alpha_T T$. При монотонном росте коэффициента теплового расширения с температурой эффективный радиус зоны возбуждения уменьшается, а при монотонном убывании – увеличивается. Это объясняет смещение максимума спектральной функции и появление высокочастотных спектральных компонент в акустических импульсах, возбуждаемых в ферромагнитном сплаве 32НКД. В случае никеля и железа линейная теория хорошо предсказывает характеристики возбуждаемых акустических импульсов, если металлы находятся при температуре ниже или выше точки Кюри. Максимальное расчетное отклонение от результатов, полученных с помощью линейной теории, не превышает 25% по амплитуде. В окрестности магнитного перехода особенности зависимости коэффициента теплового расширения вносят значительный вклад в параметры импульсов поверхностных акустических волн.

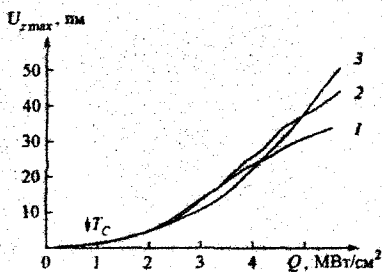


Рис. 1. Расчетные зависимости амплитуды z -составляющей вектора деформации от величины среднего теплового потока (32НКД, $T_0 = 300$ К) для различных R_0 : 1 – 0,5; 2 – 0,75; 3 – 1,0

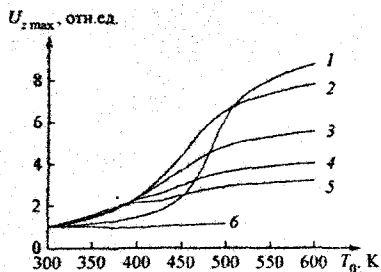


Рис. 2. Расчетные температурные зависимости относительной амплитуды z -составляющей вектора деформации при различных величинах среднего теплового потока (32НКД, $R_0 = 1,0$ мм): 1 – 0,1; 2 – 1,1; 3 – 1,5; 4 – 2,2; 5 – 2,6; 6 – 5,3 MBT/cm^2

На рис. 2 приведены температурные зависимости амплитуды импульсов волн Рэлея для сплава 32НКД для различных значений энергии поглощаемых оптических импульсов. При малых значениях энергии оптических импульсов температурные зависимости амплитуды упругих импульсов следуют ходу кривой $\alpha_T(T_0)$,

где T_0 – температура среды. При увеличении энергии, особенности, соответствующие температуре фазового перехода, смещаются в область более низких температур. При достаточно больших энергиях оптического импульса температурные зависимости приобретают более сглаженный вид. Этот эффект объясняется следующим образом. Наибольшее изменение коэффициента теплового расширения соответствует точке Кюри ферромагнетика. Особенности функции распределения источников звука располагаются в окрестности изотермы, соответствующей температуре магнитного фазового перехода, которая в случае большой энергии быстро перемещается по зоне возбуждения, не создавая значительного вклада в возбуждаемое акустическое поле. Амплитуда сигнала, в этом случае, определяется «средним» значением коэффициентом теплового расширения за время действия оптического импульса.

В конце третьей главы, на основе анализа результатов расчета, делается вывод о целесообразности проведения экспериментальной проверки положений теории на образце из сплава 32НКД. Выбор обусловлен низким значением температуры Кюри (220 °С) и значительным изменением коэффициента теплового расширения при нагревании ферромагнетика, что позволяет наблюдать эффект влияния величинности данного типа без маскировки эффектами, связанными с изменением других теплофизических параметров металла с температурой.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям оптико-акустического преобразования ПАВ в ферромагнитном металле.

В первой части главы представлена схема экспериментальной установки, дано описание используемого оборудования и методики обработки экспериментальных данных. Возбуждение акустических импульсов осуществлялась с помощью излучения импульсного YAG: Nd³⁺-лазера, работающего в режиме активной модуляции добротности, излучающего световые импульсы длительностью 30 нс с частотой следования 12,5 Гц. Длина волны лазерного излучения составляет 1,06 мкм, максимальная энергия импульса 300 мДж. Мощность лазерного излучения регулировалась оптическим аттенуатором и контролировалась измерителем мощности ИМО-2Н. Аттенуатор выполнен в виде набора параллельных стеклянных пластин, расположенных под небольшим углом к лучу лазера. Размер лазерного пучка задавался набором диафрагм с диаметрами отверстий от 0,5 до 6,0 мм. Исследуемый образец, моделирующий свойства ферромагнитных металлов при их нагревании, был выполнен из инвара 32НКД. Образец представлял собой прямоугольную пластину размерами 270x60 мм и толщиной 10 мм. Температура ферромагнетика вблизи места возбуждения ПАВ измерялась стандартной хромель-алюмелевой термопарой, соединенной с цифровым прибором для измерения температуры Digi-Temper 3527 TDS TSU-RGA. Нагрев образца осуществлялся плоским электронагревателем мощностью 300 Вт, который располагался на неосвещаемой поверхности образца. Импульсы ПАВ регистрировались приемником ультразвуковых колебаний, усиливались и снимались с осциллографа С1-75 на видеокамеру. Для регистрации ПАВ был изготовлен специальный широкополосный клиновый поверхностно-возбуждаемый толстый пьезопреобразователь

(КПВТП) и широкополосный электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМАП) поверхностных волн. Для обработки видеоизображения, содержащего электрический импульс и цифровую индикацию, была составлена программа, которая позволяла извлекать форму импульса и распознавать значение параметра. Видеокамера в данном случае использовалась в качестве самописца, фиксирующего параметры акустического импульса (амплитуду, длительность, спектральные характеристики) для соответствующей температуры ферромагнетика.

Во второй части главы представлены результаты экспериментального исследования параметров наблюдаемых электрических импульсов, соответствующих импульсам рэлеевских волн при увеличении энергии лазерных импульсов. На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости амплитуды (размах) от величины среднего теплового потока. Каждая точка на рис. 3 является средним значением амплитуды для 40–60 импульсов. Для каждого значения приведены доверительные интервалы, в которые попадает 95% значений амплитуды при данной интенсивности оптического излучения. Из представленных графиков видно, что увеличение интенсивности падающего проникающего излучения приводит к отклонениям от прямой пропорциональности в зависимости амплитуды от энергии оптического импульса. Коэффициент поглощения электромагнитной энергии растет с температурой, и это тоже может привести к увеличению амплитуды акустических импульсов. Для того, чтобы сделать окончательный вывод о том, какой тип нелинейности доминирует в ферромагнитном металле, были проведены эксперименты по регистрации акустических сигналов при увеличении температуры ферромагнитной среды.

Согласно результатам расчета (см. рис. 2), меньшее значение энергии падающего на поверхность образца оптического импульса при увеличении температуры образца из сплава 32НҚД соответствует большему относительному изменению амплитуды акустического импульса. На рис. 4 и 5 приведены температурные зависимости амплитуды электрических импульсов, полученные при различных интенсивностях падающего излучения при диаметре освещенного пятна на поверхности образца 1,5 мм. На рис. 4 для температуры 230 °С показаны доверительные интервалы, в пределы которых попадает 95 % значений нормированной амплитуды импульсов, пропорциональных нормальной составляющей скорости упругих смещений. Аналогичные интервалы приведены и на рис. 5 для температуры 270 °С. Из представленных данных следует, что при увеличении величины

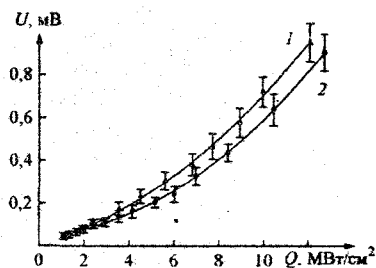


Рис. 3. Зависимость амплитуды электрических импульсов от плотности теплового потока (32НҚД, КПВТП, $T_0 = 293$ К) для различных диаметров падающего лазерного пучка: 1 – 1,5 мм; 2 – 2 мм

средней плотности падающего теплового потока от 1,2 до 12 МВт/см² наблюдается устойчивое уменьшение максимального относительного изменения амплитуды от 4,5 до 1, что согласуется с выводами теории. Значение падающего теплового потока 12 МВт/см² соответствует границе теплового механизма для исследуемого образца при используемом способе обработки поверхности.

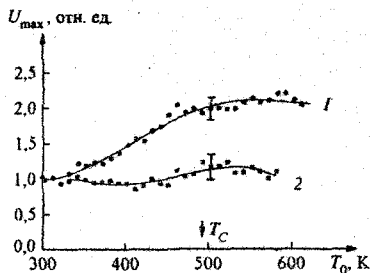


Рис. 4. Зависимость относительной амплитуды сигнала от температуры: 1 - 6; 2 - 12 МВт/см². Приемник - ЭМАП. Диаметр - 1,5 мм

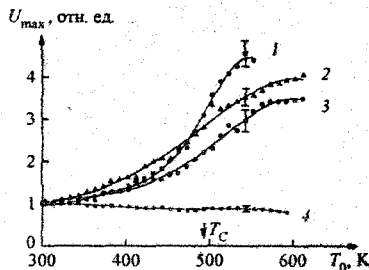


Рис. 5. Зависимость относительной амплитуды сигнала от температуры: 1 - 1,2; 2 - 2,1; 3 - 2,5; 4 - 50 МВт/см². Приемник - КЛВТП. Диаметр - 1,5 мм

В пятой главе обосновывается возможность использования полученных результатов для целей неразрушающего контроля изделий из ферромагнитных металлов. Показана необходимость учета нелинейных эффектов, происходящих при поглощении оптического излучения и генерации упругих колебаний, для определения оптимальных параметров источника ультразвука и проведения корректного анализа отраженных от дефекта акустических импульсов.

Первая часть главы посвящена выявлению связи размеров области освещенной зоны и спектральными характеристиками возбуждаемых импульсов. Как показано в главах 2 и 3, при поглощении оптического импульса наносекундной длительности на поверхности ферромагнетика, вид спектральной функции возбуждаемых импульсов ПАВ определяется пространственно-временным распределением интенсивности в лазерном импульсе и температурной зависимостью коэффициента теплового расширения материала. Для сред с $\alpha_T = \text{const}$ теория предлагает достаточно простой способ управления длительностью возбуждаемых импульсов ПАВ - изменение размеров освещенного пятна на поверхности полупроводника.

На практике обычно используют акустические импульсы, энергия которых заключена в частотном интервале 0,5-10 МГц. Более высокие спектральные компоненты быстро затухают при распространении звука в металле. Для возбуждения ультразвуковых ПАВ в указанном частотном диапазоне необходимо использовать импульсное оптическое излучение с радиусом пятна освещения 0,2-3 мм. Резуль-

таты расчета значений частоты, соответствующей максимуму спектральной плотности, от радиуса представлены для сплава 32НҚД на рис. 6. Как видно из рисунка, в случае постоянного значения коэффициента теплового расширения среды должна наблюдаться линейная зависимость в координатах частота- R_0^{-1} . Отклонения от прямой пропорциональности наблюдается при учете тепловой нелинейности. Частота, соответствующая максимуму спектральной плотности вклада нелинейных источников, выше в 1,5–3 раза соответствующей частоты вклада источников, интенсивность которых пропорциональна избыточной температуре. При изменении коэффициента теплового расширения, сравнимом с его значением, вклад нелинейных источников доминирует, и центр тяжести спектральной функции смещается в сторону более высоких частот. Рис. 6 показывает, что существенные изменения в акустическом спектре происходят при превышении температуры в зоне возбуждения над значением температуры Кюри ферромагнетика.

Во второй части главы рассмотрены спектральные характеристики падающих и отраженных акустических импульсов от модели дефекта, в виде неглубокой прямоугольной канавки.

На простом и практически важном примере продемонстрировано, что, если параметры возбуждаемых ультразвуковых ПАВ в ферромагнитном металле оценивать с помощью линейной теории, тогда данные наблюдений (особенно при использовании резонансного приемника) могут быть интерпретированы неверно, что приведет к увеличению доли отбракованных изделий или неверной оценке физических параметров материала исследуемого образца.

Показана необходимость использования нелинейной теории термооптического возбуждения звука в ферромагнитном металле для расчета параметров возбуждаемых, падающих и отраженных импульсов. Это увеличит надежность результатов анализа информации, получаемой при проведении процедуры контроля.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе физической модели процесса лазерной генерации звука, происходящей за счет термоупругого эффекта и учитывающей температурную зависимость коэффициента теплового расширения и конечность значения времени релаксации теплового потока, методами интегральных преобразований решена ди-

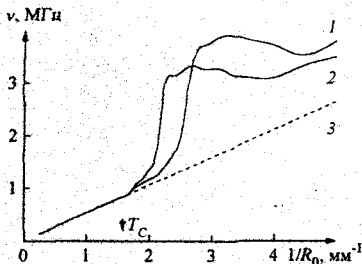


Рис. 6. Зависимость частоты, соответствующей максимуму спектральной функции, от величины $1/R_0$ (32НҚД, $T_0 = 300$ К): 1 — $W = 0,2$ мДж; 2 — $W = 0,3$ мДж; 3 — $\alpha(T) = \text{const}$. Стрелкой обозначено значение $R_0^{-1} = 1588$ м $^{-1}$ ($W = 0,3$ мДж), при котором максимальная температура поверхности равна температуре Кюри

намическая задача термоупругости для полупространства и найдены выражения для компонент вектора смещений в волнах Рэлея.

2. Рассчитаны параметры возбуждаемых акустических импульсов для следующих металлов и сплавов: железо, никель и железоникелевый сплав 32НҚД. Показано, что наибольшее влияние тепловой нелинейности на параметры возбуждаемых импульсов ПАВ наблюдается при температуре ферромагнетика, близкой к температуре Кюри, что обусловлено аномалиями теплового расширения в соответствующей области температуры.

3. Разработана и собрана установка для проведения экспериментальных исследований по высокотемпературной лазерной генерации и приему ультразвуковых поверхностных волн с помощью широкополосных пьезопреобразователя и ЭМАП поверхностных волн. Разработана новая методика сбора и анализа экспериментальных данных, которая основана на использовании видеокамеры и вычислительной техники. С ее помощью зафиксированы видеоимпульсы, регистрируемые пьезопреобразователем и ЭМАП поверхностных волн в ферромагнитном металле при различных температурах, а также определены амплитуды и рассчитаны спектральные функции наблюдаемых импульсов.

4. Проведены эксперименты по определению параметров ультразвуковых импульсов поверхностных волн, возбуждаемых импульсным лазерным излучением в ферромагнитном металле. Образцом, моделирующим свойства ферромагнитных металлов при нагревании, служил железоникелевый сплав инварного состава 32НҚД. Экспериментально зафиксирован нелинейный рост амплитуды акустических импульсов при увеличении энергии возбуждающих оптических импульсов и различное относительное изменение амплитуды с температурой при различных значениях энергии оптических импульсов. Полученные при экспериментальном исследовании зависимости параметров импульсов волн Рэлея (амплитуда, спектральная функция) от температуры ферромагнетика и энергии оптического импульса согласуются с данными расчета, основанными на реальной температурной зависимости коэффициента теплового расширения образца.

5. Показано, что учет зависимости коэффициента теплового расширения от температуры при расчете параметров акустических импульсов, возбуждаемых с помощью лазера, при разработке и усовершенствовании методик высокотемпературного неразрушающего контроля ферромагнитных изделий может уменьшить погрешность в определении характеристик поверхности и параметров дефектов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. Голубев Е.В. Лазерное возбуждение волн Рэлея в ферромагнетиках // XXIII Российская школа по проблемам науки и технологий. Краткие сообщения. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – С. 79–80.

2. Голубев Е.В. Возбуждение волн Рэлея лазерным импульсом в ферромагнитном металле // Труды XXIII Российской школы по проблемам науки и технологий. Серия «Итоги диссертационных исследований» – М.: РАН, 2003. – С. 111–118.

3. Голубев Е.В., Гуревич С.Ю., Петров Ю.В. Лазерная генерация поверхностных акустических волн в ферромагнитном металле // ФММ. – 2004. – Т. 97. – № 2. – С. 8–12.

4. Гуревич С.Ю., Голубев Е.В. Лазерное возбуждение поверхностных акустических волн в ферромагнетике при тепловом механизме // Вестник ЮУрГУ, Серия «Математика, физика, химия». – 2003. – №8(24). – С. 54–59.

5. Гуревич С.Ю., Петров Ю.В., Голубев Е.В. Экспериментальные исследования по лазерной генерации поверхностных акустических волн в ферромагнетиках // Дефектоскопия. – 2004. – №2. – С. 47–52.

6. Исследование поверхностных акустических волн, возбуждаемых лазерным импульсом в ферромагнетиках при температуре магнитного фазового перехода / С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров, Е.В. Голубев, К.Б. Хабиров // Вестник ЮУрГУ, Серия «Математика, физика, химия». – 2002. – №3(12). – С. 71–73.

7. Исследование поверхностных акустических волн, возбуждаемых лазерным импульсом в ферромагнетиках при температуре магнитного фазового перехода / С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров, Е.В. Голубев, К.Б. Хабиров // Сборник трудов XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика». – Санкт-Петербург, 2002. – С. 8–9.

8. Гуревич С.Ю., Петров Ю.В., Голубев Е.В. Лазерная генерация поверхностных акустических волн в ферромагнетиках вблизи магнитного фазового перехода // Тезисы докладов XXIII Российской школы по проблемам науки и технологий. – Миасс: МСНТ, 2003. – С. 24.

9. Гуревич С.Ю., Голубев Е.В. Параметры импульсов волн Рэлея при термооптическом возбуждении в ферромагнитных металлах // Тезисы докладов XXX Международной зимней школы физиков-теоретиков «Жоуровка». – Екатеринбург–Челябинск, 2004. – С. 85-В.

10. Голубев Е.В., Гуревич С.Ю., Петров Ю.В. Лазерная генерация волн Рэлея в ферромагнетике при магнитном фазовом переходе // Тезисы докладов XXII Уральской конференции по неразрушающему контролю «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами». – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2004. – С. 7

Голубев Евгений Валерьевич

**ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ВОЛН РЭЛЕЯ
В ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛАХ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ КЮРИ**

Специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

ИД № 00200 от 28.09.1999. Подписано в печать 30.08.2004. Формат 60x84 1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ 266/316.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76.