

На правах рукописи



КАМЫШАНСКИЙ АНТОН СЕРГЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ ДВИЖЕНИЙ
ОТРАЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ, В ТОМ ЧИСЛЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ,
ПО АВТОДИННОМУ СИГНАЛУ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
ЛАЗЕРА**

01.04.21 – лазерная физика

03.00.02 – биофизика

Автореферат
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2006

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела
Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Научные руководители:

Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-
математических наук, профессор
Усанов Дмитрий Александрович

доктор физико-математических наук, профессор
Скрипаль Анатолий Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Рябухо Владимир Петрович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Ушаков Николай Михайлович

Ведущая организация:

Институт проблем точной механики
и управления РАН

Защита диссертации состоится 3 июля 2006 г. в 12 час. 00 мин. на за-
седании диссертационного совета Д.212.243.05 по специальностям 01.04.21
– лазерная физика, 03.00.02 – биофизика, по адресу: 410012, г. Саратов, ул.
Астраханская, 83.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке СГУ
Автореферат разослан " 4 " июня 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дербов В.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Методы измерения перемещений занимают важное место в современной науке и находят широкое применение в технике. При определении условий эксплуатации изделий различного рода возникает необходимость проведения исследований их динамических свойств. Такие испытания дают информацию о структуре сложных биологических и механических систем и могут способствовать выявлению новых биофизических эффектов и закономерностей и скрытых дефектов широкого круга изделий различного назначения. Среди методов измерения перемещений, используемых для этих целей, наибольший интерес вызывают методы неразрушающего контроля, когда производимое измерение не оказывает негативного воздействия на объект исследований. К таким методам, прежде всего, относятся оптические методы исследований. Эти методы основаны на анализе интерференционной картины, порождаемой падающей и отраженной исследуемым объектом электромагнитными волнами.

Современный уровень технологии производства полупроводниковых материалов и приборов позволяет создавать сверхкомпактные генераторы когерентного излучения – лазерные диоды на квантоворазмерных структурах. Измерительные системы, построенные на основе полупроводниковых лазерных излучателей, находят все большее применение в различных областях науки и техники.

Открытие автодиинного эффекта в лазерах, наличие в них режима работы, когда автодиинный сигнал аналогичен интерференционному позволило создать измерительные системы, аналогичные интерференционным системам с развязкой от источника излучения, но обладающие по сравнению с ними рядом преимуществ. Автодиинные системы вообще и, в частности, автодины на полупроводниковых лазерах, отличаются компактностью, в них отсутствует разделение светового луча на опорный и измерительный и не требуется юстировка опорного и измерительного плечей, вследствие их совмещенности.

Пороговые характеристики регистрируемых амплитуд и перемещений для абсолютных методов связаны с длиной волны интерферирующих волн, поэтому при использовании волн из видимого диапазона спектра задача контроля сверхмалых скоростей и нанометровых перемещений объекта представляется затруднительной и была мало изучена применительно к гомодинным интерферометрам. Одна из областей техники, где требуется проведение такого рода измерений, – машиностроение. При производстве изделий различного назначения нередко возникает задача контроля скорости теплового расширения металлических сплавов. Характер интерференции для такого типа движений отражателя в гомодинной системе на основе полупроводникового лазера ранее не исследовался. Методы измерения характеристик движения отражателя по интерференционному сигналу в гомодинной системе для этого случая разработаны не были.

В автодиинной системе часть излучения возвращается в активную область резонатора, при этом режим, в котором автодиинный сигнал аналогич-

чен интерференционному, возможен при строго определенных уровнях обратной связи. При увеличении уровня обратной связи происходит искажение автодинного сигнала в отличие от случая, когда интерференция происходит в системе, отделенной от источника сигнала развязывающим элементом. При очень малых уровнях обратной связи визуальный контроль изменения формы автодинного сигнала затруднителен, поэтому представляет интерес исследование возможности использования хорошо разработанной интерференционной теории для анализа автодинного сигнала при различных уровнях обратной связи.

Вследствие бесконтактности автодинной схемы исследований и использования лазерного излучения малой мощности с длиной волны, соответствующей видимой части спектра, представляется перспективным ее использование для проведения неразрушающих измерений биологических объектов. Одним из таких применений может, например, быть измерение амплитуды колебаний барабанной перепонки, при воздействии на нее звуковым сигналом. Известные методы, позволяющие проводить такого рода измерения, либо основывались на использовании интерферометров, с помощью которых возможно было проводить измерения только *in vitro* вследствие сложной формы слухового прохода, либо в основе методов лежало применение контактирующих с биообъектом механических приспособлений, что приводило к высокому уровню трудно учитываемых погрешностей измерения. Применение автодинной измерительной системы на основе полупроводникового лазера для контроля амплитуды колебаний барабанной перепонки открывает перспективу проведения неинвазивных исследований характеристик колебаний барабанной перепонки.

Таким образом, актуальными задачами, решаемыми в настоящей работе, являются:

1. Исследование влияния уровня оптической обратной связи на низкочастотный спектр автодинного сигнала при гармонических колебаниях внешнего отражателя;
2. Исследование возможности контроля сложных механических движений со сверхмалыми скоростями по спектру автодинного сигнала;
3. Исследование возможности применения лазерных автодинных измерительных систем для контроля динамических свойств барабанной перепонки.

На основании вышеизложенного была сформулирована цель диссертационной работы: исследование влияния уровня оптической обратной связи на низкочастотный спектр автодинного сигнала при гармонических колебаниях внешнего отражателя и возможности использования полупроводникового лазера, работающего в автодинном режиме, для контроля характеристик сложных движений отражающих объектов, в том числе биологических.

Новизна исследований, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, состоит в следующем:

1. Разработан метод качественной оценки уровня обратной связи по тангенсу угла наклона прямой, аппроксимирующей результаты определения амплитуды колебаний отражателя по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала;
2. Предложена методика переноса информативной низкочастотной составляющей автодинного сигнала в более высокочастотную область путем наложения на поступательное движение объекта дополнительных механических колебаний. Разработан новый метод регистрации скоростей перемещений объекта, величины которых составляют десятки нанометров в секунду;
3. Разработана экспериментальная установка для регистрации теплового расширения объектов с использованием полупроводникового лазера, работающего в автодинном режиме;
4. Предложена новая методика решения обратной задачи по определению амплитуды колебаний объекта с использованием двух соседних составляющих спектра автодинного сигнала полупроводникового лазера;
5. Разработана экспериментальная установка для измерения амплитудно-частотных характеристик барабанной перепонки *in vivo* с использованием лазерного излучателя, работающего в автодинном режиме;
6. Впервые получена амплитудно-частотная характеристика барабанной перепонки с использованием лазерного полупроводникового излучателя, работающего в автодинном режиме;
7. При возбуждении звуковых колебаний в барабанной перепонке обнаружено ее продольное смещение как целого, увеличивающееся с ростом интенсивности звукового воздействия.

Достоверность полученных теоретических результатов обеспечивается строгостью используемых математических моделей, сходностью вычислительных процессов с искомым решением, соответствием результатов численного и натурального экспериментов. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением стандартной измерительной аппаратуры, высокой степенью автоматизации процесса регистрации экспериментальных данных, а также соответствием результатов, полученных в ходе определения параметров движения отражателя с помощью автодинной интерференционной системы, результатам, полученным с помощью альтернативных способов измерения параметров вибраций объектов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

1. Предложен новый алгоритм восстановления параметров сложного движения объекта по интерференционному сигналу лазерной автодинной системы, основанный на определении фазы автодинного сигнала при последовательном Фурье – анализе отдельных участков сигнала;

2. Показана возможность по сигналу автодинной измерительной системы, полученному при тепловом расширении образца, определения сверхмалой скорости движения отражателя;
3. Предложены пути повышения точности нахождения параметров движения, определяемых из анализа автодинного сигнала, зафиксированного с помощью разработанной установки;
4. Экспериментально показана возможность определения амплитуды колебаний барабанной перепонки по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Качественную оценку уровня обратной связи в полупроводниковом лазере можно провести по тангенсу угла наклона прямой, аппроксимирующей результаты определения амплитуды колебаний отражателя по различным наборам спектральных составляющих автодинного сигнала в полупроводниковом лазере;
2. При условии возбуждения в измеряемом объекте дополнительных колебаний, совершаемых по гармоническому закону, можно измерять нанометровые смещения и сверхмалые скорости теплового расширения твердых тел, ограниченные временным интервалом измерений;
3. По спектральной картине амплитудного отклика барабанной перепонки на звуковую нагрузку различной интенсивности диагностируется нарушение механических свойств звукопроводящей цепи среднего уха;
4. При звуковом воздействии наблюдается продольное смещение колеблющейся барабанной перепонки как целого, увеличивающееся с ростом интенсивности звукового воздействия;
5. С ростом интенсивности звукового гармонического воздействия на барабанную перепонку в ее механических колебаниях могут возникать субгармонические составляющие.

Апробация работы.

Результаты работы представлены на:

1. II-ой международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Самара, 7–13 сентября 2003 г.
2. Федеральной итоговой научно-технической конференции творческой молодежи России по естественным, техническим, гуманитарным наукам. Москва, МИЭМ, 2003 г.
3. Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications. Саратов, 2004г.
4. III-ей международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» 6-12 сентября 2004г. Волгоград.
5. Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЕП-2004), 15-16 сентября 2004г., Саратов. Саратовский государственный технический университет.

Публикации. По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, опубликовано 14 работ, в том числе 7 статей в реферируемых журналах, 3 тезисов докладов международных конференций, получено 2 патента на изобретение, 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора в этих работах выразился в теоретической разработке и практической реализации метода измерения сверхмалых скоростей и нанометровых смещений объекта путем наложения на поступательное движение объекта гармонической вибрации, в теоретической разработке и практической реализации метода определения нанометровых вибраций механических и биологических объектов с использованием двух соседних гармоник спектра автодинного сигнала полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах, теоретическом анализе возможности проведения вычислений с использованием гармоник автодинного сигнала в случае, когда величины коэффициента внешней оптической связи находятся в пределах от 0.1 до 1 и возможности качественной оценки величины данного коэффициента по спектру полупроводникового лазера, работающего в автодинном режиме, участия в формулировании научных положений и выводов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 102 страницы машинописного текста, включая 46 рисунков. Список литературы содержит 107 наименований и изложен на 12 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель диссертационной работы, определена новизна исследований, обсуждена практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание диссертации.

В первом разделе приведен анализ современного состояния исследований параметров сложных движений механических и биологических объектов, рассмотрены гетеродинные, гомодинные и автодинные методы определения параметров движений объектов, рассмотрены некоторые анатомические и физиологические особенности строения слухового аппарата, приведен критический анализ современных методов определения параметров движений барабанной перепонки.

Во втором разделе представлены результаты исследования влияния уровня оптической обратной связи на низкочастотный спектр автодинного сигнала при гармонических колебаниях внешнего отражателя.

Переменную нормированную составляющую автодинного сигнала можно представить в виде

$$P = \cos(\omega(t) \cdot \tau(t)), \quad (1)$$

где $\tau(t)$ — время обхода лазерным излучением расстояния L до внешнего отражателя, изменяющееся при изменении расстояния до отражателя, $\omega(t)$

— частота излучения полупроводникового лазера, определяемая фазовым уравнением:

$$\omega_0 \tau = \omega \tau + C \cdot \sin(\omega \tau + \psi), \quad (2)$$

где $\psi = \arctg(\alpha)$, $\omega \cdot \tau$ — набег фазы волны во внешнем резонаторе для лазера с обратной связью, $C = \tau \cdot z \cdot \sqrt{1 + \alpha^2}$ — уровень внешней оптической обратной связи.

В случае движения объекта по гармоническому закону время обхода лазерным излучением внешнего резонатора изменяется по закону:

$$\tau(t) = \tau_0 + \tau_a \cdot \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad (3)$$

где τ_0 — время обхода лазерным излучением внешнего резонатора с неподвижным отражателем, $\tau_a = 2\xi/c$ — амплитудное значение, ε — начальная фаза, ξ и Ω — амплитуда и частота колебаний отражателя лазерного излучения. На рис. 1 приведены спектры автодинных сигналов для амплитуды колебаний 600 нм при различном уровне внешней оптической обратной связи, относительно спектра автодинного сигнала, построенного в предположении $C \ll 1$.

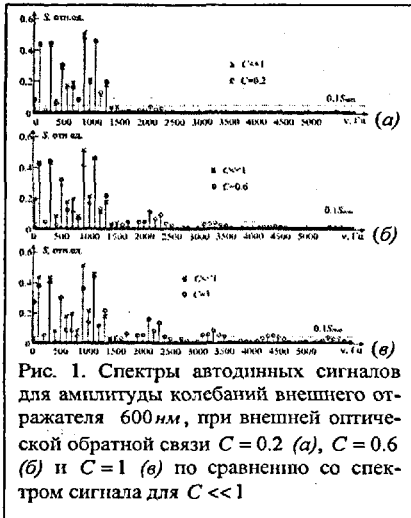


Рис. 1. Спектры автодинных сигналов для амплитуды колебаний внешнего отражателя 600 нм , при внешней оптической обратной связи $C = 0.2$ (а), $C = 0.6$ (б) и $C = 1$ (в) по сравнению со спектром сигнала для $C \ll 1$

динного сигнала (обратной задачи).

Для определения амплитуды вибрации отражателя получено выражение, основанное на использовании четырех соседних гармоник спектра автодинного сигнала:

$$\xi^2 = \frac{\lambda^2}{\pi^2} \frac{6(c_n + c_{n+1})}{(c_n + c_{n+2})(c_{n-1} + c_{n+1})}, \quad (4)$$

где λ — длина волны лазерного излучения, коэффициенты c_n определяются из спектра автодинного сигнала.

На рис. 2 представлены результаты расчета амплитуды колебаний внешнего отражателя по набору $(n, n+1, n+2, n+3)$ гармоник спектра автодинного сигнала с использованием соотношения (4) в зависимости от n для различных значений уровня внешней оптической обратной связи и амплитуд колебаний внешнего отражателя. На графиках отмечено также истинное значение амплитуды колебаний отражателя (сплошной горизонтальной линией) и уровни погрешности определения амплитуды, составляющие 10% от истинного значения (пунктирные горизонтальные линии).

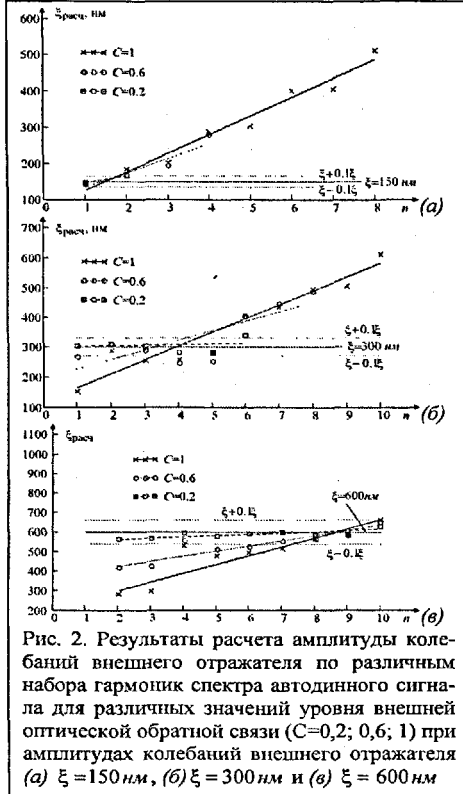


Рис. 2. Результаты расчета амплитуды колебаний внешнего отражателя по различным набору гармоник спектра автодинного сигнала для различных значений уровня внешней оптической обратной связи ($C=0,2; 0,6; 1$) при амплитудах колебаний внешнего отражателя (а) $\xi = 150$ нм, (б) $\xi = 300$ нм и (в) $\xi = 600$ нм

та по спектру автодинного сигнала, заключающийся в наложении на поступательное движение объекта дополнительных гармонических вибраций. При этом переменную нормированную автодинного сигнала можно представить в виде:

$$P(t) = \cos(\theta(t) + \sigma \cdot \sin(\Omega \cdot t + \epsilon)), \quad (5)$$

где $\theta(t) = \frac{4\pi}{\lambda}(L_0 + \vartheta \cdot t)$ — набег фазы автодинного сигнала, несущий информацию о медленной подсистеме связанной с нанометровыми перемещениями, $\sigma = 4\pi\xi/\lambda$.

Если для анализа автодинного сигнала (5) использовать набор ограниченных во времени участков сигнала, то в пределах каждого участка («окна») можно считать, что автодинный сигнал не зависит от медленно изменяющейся компоненты $\theta(t)$. При таком предположении анализ сигнала сводится к определению фазы автодинного сигнала для гармонически колеблющегося объекта в пределах указанных участков. Используя выражения для определения набег фазы автодинного сигнала, позволяющие решать обратную задачу, то есть задачу восстановления фазы автодинного сигнала по четырем коэффициентам c_n с последовательными номерами n , определяемыми по результатам измерений:

$$\theta_{2n} = \arctg \sqrt{\frac{(2n+1)(c_{2n+3} + c_{2n+1})c_{2n+1}}{(2n-1)(c_{2n+2} + c_{2n})c_{2n+2}}}, \quad (6)$$

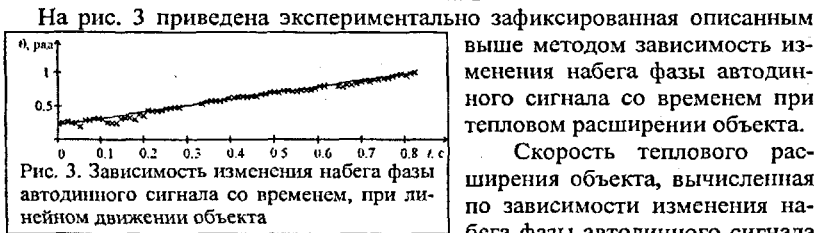
или

$$\theta_{2n-1} = \arctg \sqrt{\frac{(2n+1)(c_{2n+1} + c_{2n-1})c_{2n+1}}{2n(c_{2n+2} + c_{2n})c_{2n}}}. \quad (7)$$

При этом соотношение (6) применяется, когда используются четыре коэффициента c_n , начиная с четного номера, а (7) — начиная с нечетного номера.

Перемещая «окно» выбранного временного интервала, в пределах которого проводится анализ исходного сигнала, по оси времени и вычисляя набег фазы автодинного сигнала для каждого «окна», можно получить медленноменяющуюся зависимость $\theta(t)$, из которой для известного времени выборки Δt определяется скорость движения объекта, усредненная в пределах интервала Δt :

$$\vartheta(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\Delta\theta}{\Delta t}. \quad (8)$$



со временем, приведенной на рис. 3, с использованием соотношения (8), составила 50 нм/сек.

В четвертом разделе диссертационной работы исследована возможность применения автодинной измерительной системы для контроля ха-

рактических сложных движений биологических объектов, на примере определения параметров движений барабанной перепонки. Одним из возникающих затруднений при контроле вибрационных характеристик барабанной перепонки по спектру сигнала полупроводникового лазерного диода, работающего в автодином режиме, является малая амплитуда колебаний барабанной перепонки на частотах воздействия, отстоящих от резонансных, при умеренных уровнях воздействия. Для определения амплитуды колебаний барабанной перепонки на частотах воздействия, отстоящих от резонансных, необходимо использовать метод, обладающий максимальной чувствительностью.

Используя две первые гармоники спектрального ряда автодинного сигнала

$$\begin{aligned} c_1 &= 2AJ_1(\sigma)\sin\theta, \\ c_2 &= 2AJ_2(\sigma)\cos\theta. \end{aligned} \quad (9)$$

можно получить уравнение относительно двух неизвестных ξ и A

$$\frac{c_1^2}{J_1^2\left(\frac{4\pi}{\lambda}\xi\right)} + \frac{c_2^2}{J_2^2\left(\frac{4\pi}{\lambda}\xi\right)} = 4A. \quad (10)$$

Амплитудный множитель A можно исключить, выполнив нормировку автодинного сигнала, используя соотношение:

$$P(t) = \frac{2P_A(t) - (A_{\max} + A_{\min})}{A_{\max} - A_{\min}}, \quad (11)$$

где A_{\max} и A_{\min} – максимальное и минимальное значение переменной составляющей автодинного сигнала, для случая, когда амплитуда колебаний отражателя $\xi > \lambda/4$.

После проведения нормировки амплитудный множитель A становится равным единице.

Описанными выше методами проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных зависимостей (АЧХ) барабанной перепонки с присоединенными слуховыми косточками и барабанной перепонки с нарушением связи между слуховыми косточ-

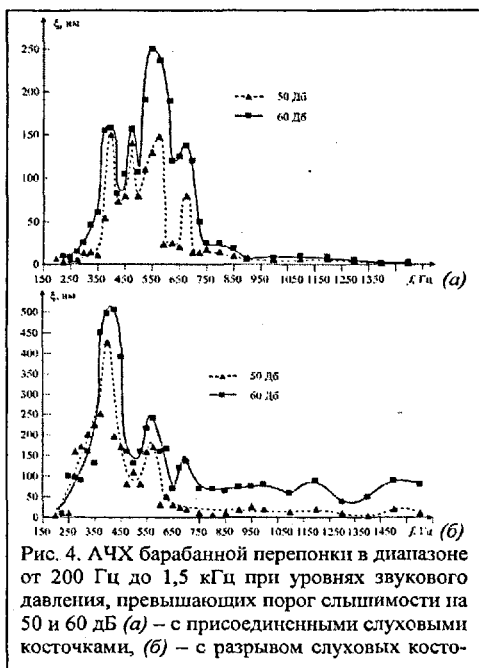


Рис. 4. АЧХ барабанной перепонки в диапазоне от 200 Гц до 1,5 кГц при уровнях звукового давления, превышающих порог слышимости на 50 и 60 дБ (а) – с присоединенными слуховыми косточками, (б) – с разрывом слуховых косточ-

ками – наковальной и молоточком, при различных уровнях звукового давления. Результаты определения АЧХ в диапазоне от 200 Гц до 1,5 кГц приведены на рис. 4.

Из сопоставления АЧХ барабанной перепонки для случая целостного слухового аппарата и случая с разрывом в цепи «барабанная перепонка – слуховые косточки» можно сделать вывод, что по спектральной картине амплитудного отклика барабанной перепонки на звуковую нагрузку различной интенсивности возможно диагностирование нарушения передаточной функции в цепи «барабанная перепонка – слуховые косточки». Амплитудный отклик контролировался по спектру сигнала полупроводникового лазерного излучателя на квантоворазмерных структурах, работающего в автодинном режиме.

Кроме того, можно предположить возможность диагностирования изменения эластичности и ороговения тканей барабанной перепонки при понижении слуховой функции пациента, что проявится в снижении регистрируемых величин амплитудного отклика на соответствующую звуковую нагрузку, исчезновении ярко выраженных максимумов АЧХ барабанной перепонки и изменения их частотного положения.

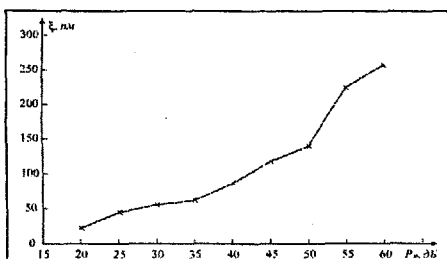


Рис. 5. Зависимость амплитуды колебаний барабанной перепонки от интенсивности звукового воздействия

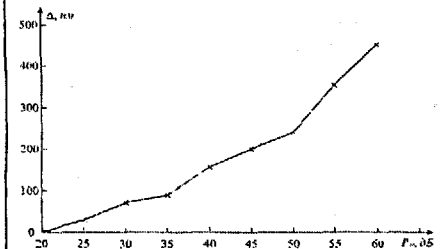


Рис. 6. Зависимости величины продольного смещения барабанной перепонки от интенсивности звукового воздействия

В соответствии с результатами анализа акустических измерений, которые показали, что давление звуковой волны у входа в наружный слуховой проход почти вдвое превышает давление, которое было в свободном звуковом пространстве, можно сделать вывод о наличии у барабанной перепонки продольного сдвига от положения равновесия при увеличении уровня звукового давления. Для проверки сделанного вывода была использована изложенная выше методика определения нанометровых перемещений отражателя по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера.

При проведении измерений на частоте звукового воздействия 550 Гц уровень звукового давления равномерно повышался от 20 до 60 дБ и с помощью АЦП автодинный сигнал непрерывно фиксировался в виде файла. Далее зафиксированный файл был

обработан в соответствии с выбранной методикой решения обратной задачи.

На рис. 5 приведена экспериментально зафиксированная зависимость амплитуды колебаний барабанной перепонки от величины звукового давления излучателя звуковых волн в дБ.

Информация о величине продольного смещения барабанной перепонки получалась из найденных в результате решения обратной задачи значе-ний стационарного набега фазы автодишного сигнала. На рис. 6 приведена

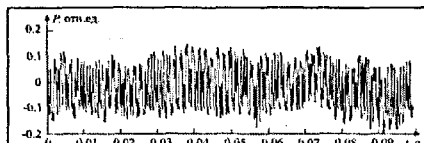


Рис. 7. Автодишный сигнала для пациента при частоте звукового воздействия 600 Гц, при уровне звукового давления 70 дБ

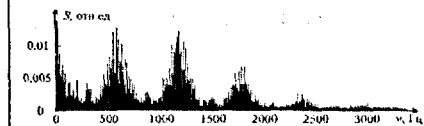


Рис. 8. Спектр автодишного сигнала, показанного на рис. 7

рассчитанная зависимость продольного смещения барабанной перепонки от величины звукового давления излучателя звуковых волн в дБ.

Таким образом, экспериментально установлено, что с увеличением интенсивности звукового воздействия на барабанную перепонку происходит не только увеличение амплитуды ее колебаний, но и ее продольное смещение как единого целого.

Для исследования поведения барабанной перепонки при высоких уровнях звукового давления анализировался спектральный

состав автодишного сигнала при различных интенсивностях воздействия. На рис. 7 приведена запись автодишного сигнала для пациента при частоте звукового воздействия 600 Гц, при уровне звукового давления 70 дБ. На рис. 8 приведен спектр автодишного сигнала, показанного на рис. 7. Как

видно из рис. 8 в спектре автодишного сигнала, наряду со спектральными составляющими, кратными частоте возбуждающего звукового воздействия, наблюдаются спектральные составляющие на частотах, кратных половине частоты возбуждающего звукового воздействия. Пороговая величина возникновения субгармонических колебаний была индивидуальна для каждого пациента и превышала порог слыш-

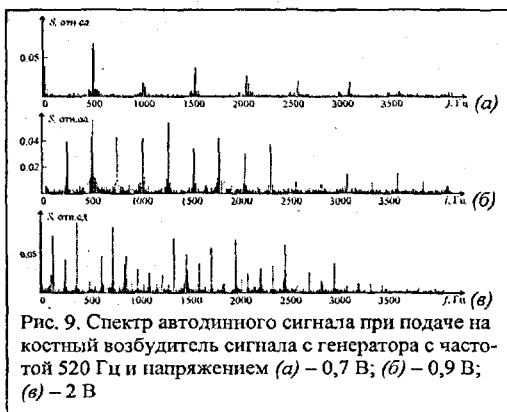


Рис. 9. Спектр автодишного сигнала при подаче на костный возбудитель сигнала с генератора с частотой 520 Гц и напряжением (а) — 0,7 В; (б) — 0,9 В; (в) — 2 В

мости от 65 до 75 дБ.

Дополнительно были проведены исследования возможности возникновения субгармонических колебаний барабанной перепонки на препарированном слуховом аппарате свиньи. Для возбуждения колебаний барабанной перепонки использовался костный возбудитель, применяемый в аудиометрических клинических исследованиях, на который подавался гармонический сигнал с частотой 520 Гц различной амплитуды. Спектры зарегистрированных автодинных сигналов приведены на рис. 9, из которого следует, что при увеличении интенсивности звукового гармонического воздействия на барабанную перепонку с частотой ω в ее механических колебаниях могут возникать субгармоники на частотах $\omega/2$ и $\omega/4$. Проведенные исследования позволяют установить условия возбуждения нормальных колебаний барабанной перепонки и порога адекватного восприятия звукового сигнала.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, которые заключаются в следующем:

1. При амплитудах колебаний внешнего отражателя, близких к длине волны лазерного излучения, нарушение условия малости внешней оптической связи ($C \ll 1$) можно определить визуально по спектру автодинного сигнала. Оно выражается в специфическом уширении спектра автодинного сигнала. При амплитудах колебаний внешнего отражателя, близких к длине волны лазерного излучения, увеличение уровня внешней оптической связи вплоть до значений 0.2–0.3 приводит к погрешности определения амплитуды вибрации внешнего отражателя, не превышающей 10%. Нарушение условия незначительности уровня внешней оптической обратной связи ($C \ll 1$) можно установить, проведя расчет амплитуды колебаний отражателя и построив график зависимости расчетной амплитуды колебаний от номера набора гармоник, используемых для расчета.

2. Теоретически обосновано и экспериментально показано, что при изменении теплового расширения твердых тел в ограниченном временном интервале, когда частота переменной составляющей автодинного сигнала наблюдается в низкочастотной области спектра, сверхмалые скорости могут быть измерены путем наложения на медленное поступательное движение отражателя дополнительных колебаний, совершаемых по гармоническому закону. При этом анализ сигнала сводится к определению фазы автодинного сигнала для гармонически колеблющегося объекта, с учетом предположения о стационарности набега фазы в пределах ограниченных во времени участков сигнала.

3. Разработан новый метод решения обратной задачи определения абсолютной амплитуды колебаний отражателя с использованием двух соседних гармоник спектрального ряда сигнала полупроводникового лазерного излучателя на квантоворазмерных структурах, работающего в автодинном режиме, не требующий знания стационарного набега фазы составного лазерного резонатора. Экспериментально показано, что в качестве внешнего отражателя автодинной системы может выступать биологический объект –

барабанная перепонка, что позволило зафиксировать амплитудно-частотную характеристику вибрационных перемещений исследуемого объекта при различных уровнях звукового воздействия на него.

4. По полученным амплитудно-частотным зависимостям барабанной перепонки удалось установить, что при нарушении целостности соединения слуховых косточек основной максимум АЧХ барабанной перепонки смещается в более низкочастотную область, а его амплитуда значительно возрастает, что позволяет использовать полученные выводы для диагностирования нарушения целостности слуховых косточек без хирургического вмешательства.

5. Показано, что при увеличении интенсивности звуковой гармонической нагрузки на барабанную перепонку происходит продольное смещение колеблющейся перепонки как целого.

6. Установлено, что при увеличении интенсивности звукового воздействия на барабанную перепонку в спектре автодинного сигнала происходит появление субгармонических составляющих на частоте равной половине частоты звукового воздействия.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С. Измерение скорости нанометровых перемещений по спектру автодинного сигнала лазера на квантоворазмерных структурах // Письма в ЖТФ. 2004. №7. С.77-82.

2. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С. Измерение скорости движения объекта по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах // Микросистемная техника. 2004. №2. С. 19-23.

3. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Камышанский А.С. Измерение амплитуды колебаний барабанной перепонки по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2004. №8-9. С.94-97.

4. Скрипаль А. В., Чанилов О. И., Усанов Д. А., Камышанский А. С. Восстановление негармонической функции движения объекта по сигналу полупроводникового лазера, работающего в автодином режиме // Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2005. № 1. С. 79 – 87.

5. Чанилов О. И., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Камышанский А. С. Всвлет – анализ лазерного интерференционного сигнала при ударном возбуждении отражателя // Письма в ЖТФ. 2005. Т.31. №21. С. 9-16.

6. Usanov D.A., Skripal A.V., Mashkov D.A., Kamyshanskiy A.S. Autodyne measurements of micro and nano vibrations by the low-frequency spectrum of diode laser // Proc. SPIE Vol. 5503. 2004. P.551-558.

7. Mashkov D.A., Kamyshanskiy A.S., Skripal A.V., Usanov D.A. Autodyne measurements of vibrations in focused beams // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5475. P. 141- 148.

8. Патент на изобретение РФ №2247395. Способ измерения скорости движения объекта / Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С. Оpubл. 27.02.2005. Бюл. №6

9. Патент на полезную модель РФ №38442. Устройство для измерения амплитуды колебаний барабанной перепонки / Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Камышанский А.С. Оpubл. 20.06.2004. Бюл. №17.

10. Патент РФ №2258462. Способ измерения амплитуды колебаний барабанной перепонки / Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль Ан.В, Феклистов В.Б., Камышанский А.С. Оpubл. 20.08.2005. Бюл. №23.

11. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Постельга А.Э., Камышанский А.С. СВЧ и оптические полупроводниковые измерители параметров перемещений и вибраций. / Физика и технические приложения волновых процессов: Мат. докл. III Междуна. н.-т. конф.– 6-12 сентября 2004г. Волгоград: НП ИДП «Авторское перо», с. 72-81.

12. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Мареев Г.О., Камышанский А.С., Баженов В.А. Лазерная диагностика амплитуды колебаний барабанной перепонки // Материалы II Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии " Медицинская физика – 2005", Москва, 21-24 июня 2005 г. С.376-377.

13. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Постельга А.Э., Камышанский А.С. Полупроводниковые СВЧ и оптические автодины и их применение // Тез. докл. II-ой Междуна. н.-т. конф. «Физика и технические приложения волновых процессов». г. Самара, 7–13 сентября 2003 г. С. 44.

14. Машков Д.А., Камышанский А.С., Чанилов О.И., Постельга А.Э. Лазерная и СВЧ автодиновая интерферометрия вибраций // Федеральная итоговая научно-техническая конференция творческой молодежи России по естественным, техническим, гуманитарным наукам: материалы конф. – М., 2003. – С. 52 – 54.

КАМЫШАНСКИЙ АНТОН СЕРГЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ ДВИЖЕНИЙ
ОТРАЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ, В ТОМ ЧИСЛЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ, ПО
АВТОДИННОМУ СИГНАЛУ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА**

01.04.21 – лазерная физика
03.00.02 – биофизика

Автореферат
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 01.06.06. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл.-печ. л. 1.0
Тираж 100 экз. Заказ № 84.

Типография Издательства Саратовского университета.
410012, Саратов, Астраханская, 83.