



ИЗМЕРЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО АВТОДИНА СМЕЩЕНИЯ БАРАБАННОЙ ПЕРЕПОНКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УРОВНЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, К.С. Авдеев

Приведены результаты измерений продольного смещения барабанной перепонки на фоне вибраций, возбуждаемых периодическим звуковым воздействием. Экспериментально установлено наличие продольного смещения барабанной перепонки при увеличении интенсивности звукового воздействия. По спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера с использованием «оконного метода» по изменению фазы автодинного сигнала во времени определены величины этого смещения для различных уровней звукового воздействия.

Для диагностики параметров колебаний барабанной перепонки *in vivo* нашли применение автодинные измерители на полупроводниковом лазере. В работе [1] была показана возможность измерения медленных нанометровых перемещений объекта по спектру автодинного сигнала лазера на квантово-размерных структурах. В [2] были приведены результаты измерений подобным методом амплитуды колебаний барабанной перепонки, происходящих при ее возбуждении звуковым сигналом. Метод измерений, описанный в [1], позволяет, наряду с переменной составляющей отклика барабанной перепонки на звуковое возбуждение, определить имеется ли изменение ее положения «в среднем», характерное для того или иного звукового давления и, если оно имеется, какова его величина. Такого рода измерения, насколько нам известно, ранее не проводились [3, 4]. Таким образом, целью настоящей работы являлось исследование возможности регистрации продольного смещения барабанной перепонки на фоне вибраций, возбуждаемых звуковым сигналом.

Переменная нормированная составляющая автодинного сигнала при наличии продольного смещения объекта определяется выражением

$$P(t) = \cos(\theta(t)). \quad (1)$$

Здесь $\theta(t)$ – фаза автодинного сигнала, несущая информацию о нанометровых продольных перемещениях медленной подсистемы

$$\theta(t) = \frac{4\pi}{\lambda}(L_0 + Vt), \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения лазера, L_0 – начальное расстояние до отражателя, V – скорость перемещения объекта, t – время.

Форма переменной нормированной составляющей автодинного сигнала при наличии одновременного продольного смещения объекта и его периодических движений может быть описана следующим выражением:

$$P(t) = \cos(\theta(t) + \sigma \sin(\Omega t + \varepsilon)), \quad (3)$$

где $\sigma = 4\pi\xi/\lambda$, ξ – амплитуда колебаний объекта, Ω – частота колебаний, ε – начальная фаза колеблющегося объекта.

Согласно «оконному методу» [5], используем для анализа автодинного сигнала (3) набор ограниченных во времени участков сигнала. Можно считать, что в пределах каждого участка-«окна» автодинный сигнал не зависит от медленно изменяющейся компоненты $\theta(t)$. При таком предположении анализ сигнала сводится к определению фазы автодинного сигнала в пределах указанных участков. В пределах каждого из анализируемых участков переменная составляющая автодинного сигнала, учитывая предположение о независимости ее от изменения фазы, будет совпадать по виду с переменной составляющей автодинного сигнала для гармонически колеблющегося объекта.

В качестве примера на рис. 1 приведены два участка одного автодинного сигнала, для которых выполняется условие постоянства фазы автодинного сигнала, в пределах анализируемого участка, но при различных значениях фазы для этих участков. Приведенные сигналы соответствуют модели описанного процесса, заключающегося в медленном изменении расстояния до отражателя с наложением дополнительных колебаний, совершаемых по гармоническому закону.

Для определения величины продольного смещения перепонки по полученному виду переменной нормированной составляющей автодинного сигнала рассчитывается и фиксируется его спектр. С использованием найденных значений амплитуд спектральных составляющих c_{2n-1} и c_{2n} [2] определяются значения θ

$$\theta_{2,n} = \arctg \left[\sqrt{\frac{(2n+1)(c_{2n+3} + c_{2n+1})c_{2n+1}}{(2n-1)(c_{2n+2} + c_{2n})c_{2n+2}}} \right], \quad (4)$$

$$\theta_{2,n-1} = \arctg \left[\sqrt{\frac{(2n+1)(c_{2n+1} + c_{2n-1})c_{2n+1}}{2n(c_{2n+2} + c_{2n})c_{2n}}} \right], \quad (5)$$

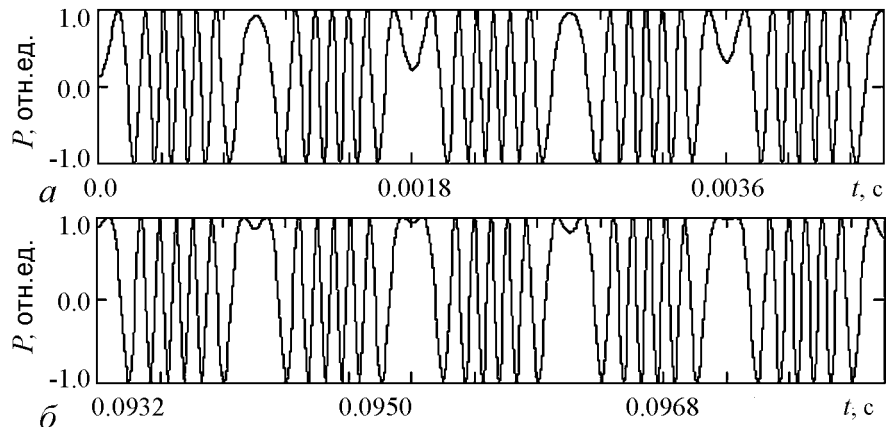


Рис. 1. Два участка одного автодинного сигнала, для каждого из которых выполняется условие постоянства фазы автодинного сигнала

где c_{2n+3} , c_{2n+2} , c_{2n+1} – амплитуды соответствующих спектральных составляющих, нижние индексы обозначают порядковый номер спектральной составляющей, при этом соотношение (4) применяется, когда используются четыре коэффициента c_n , начиная с четного номера, а (5) – начиная с нечетного номера. Определяя таким образом величину θ для двух значений времени t_1 и t_2 , можно рассчитать величину продольного сдвига барабанной перепонки Δ относительно положения равновесия

$$\Delta = \frac{\lambda}{4\pi} [\theta_1(t_1) - \theta_2(t_2)]. \quad (6)$$

Для проведения измерений смещения барабанной перепонки *in vivo* была собрана измерительная установка, схема которой приведена на рис. 2. Исследования проводились в изолированной комнате. Исследовалось возбуждение барабанной перепонки в свободном звуковом поле, создаваемом громкоговорителем, питаемом от генератора звукового сигнала. Уровень звукового давления в наружном слуховом проходе регистрировался при помощи измерительной аппаратуры «Bruel & Kjaer», которая выдает абсолютные значения звукового давления в дБ. При проведении измерений в качестве активного элемента автодинного генератора использовался лазерный диод RLD-650(5), длина волны 652 нм. На частоте звукового воздействия 550 Гц уровень звукового давления равномерно повышался с 20 до 60 дБ и с помощью аналого-цифрового преобразователя автодинный сигнал непрерывно фиксировался в виде дискретной последовательности. Далее зафиксированная дискретная последовательность обрабатывалась в соответствии с описанной методикой решения обратной задачи.

Измерения смещения перепонки проводились также на препаратах *in vitro*. Из анализа автодинного сигнала было обнаружено только увеличение амплитуды колебаний барабанной перепонки. Смещения барабанной перепонки с ростом уровня звукового давления не наблюдалось. В связи с этим можно высказать предположение о том, что смещение барабанной перепонки связано с защитной реакцией организма на увеличение уровня звукового давления, внешне выражающейся в смещении барабанной перепонки.

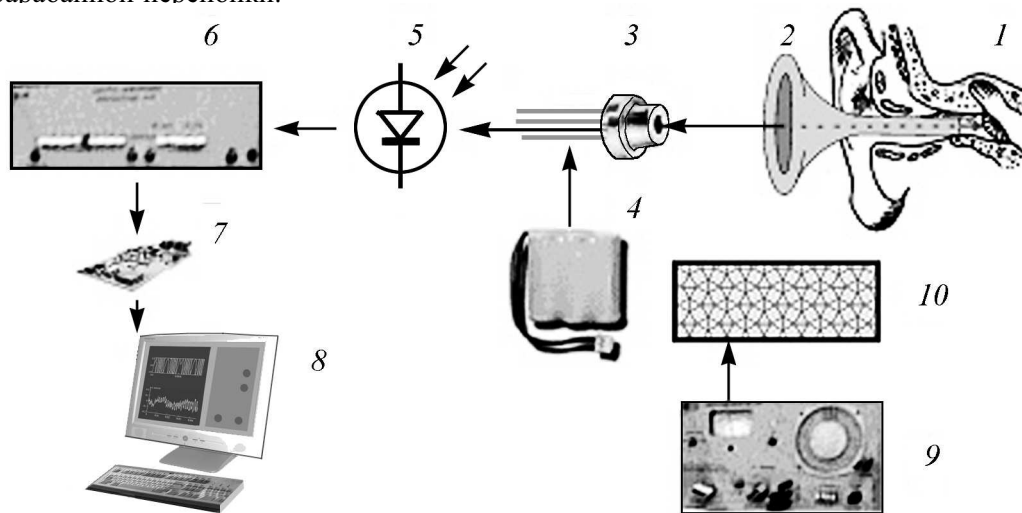


Рис. 2. Схема измерительной установки: 1 – барабанная перепонка; 2 – расширительная воронка; 3 – лазерный диод на квантоворазмерных структурах; 4 – источник тока лазерного диода; 5 – фотоприемник; 6 – широкополосный усилитель, содержащий фильтр переменного сигнала; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – компьютер; 9 – генератор звуковых колебаний; 10 – излучатель звуковых волн

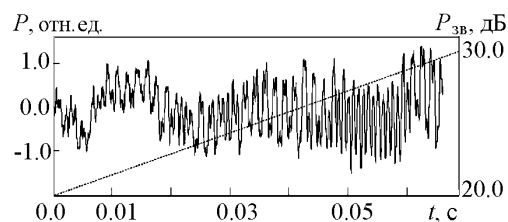


Рис. 3. Участок автодинного сигнала полупроводникового лазера P при увеличении интенсивности звукового воздействия на барабанную перепонку $P_{зв}$

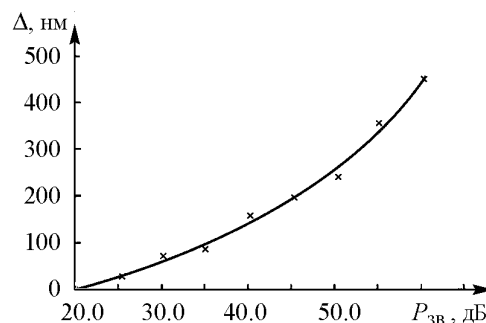


Рис. 4. Зависимость величины продольного смещения барабанной перепонки от интенсивности звукового воздействия: \times экспериментальные результаты; — аппроксимационная кривая

На рис. 3 приведены участки зафиксированного автодинного сигнала полупроводникового лазера при увеличении интенсивности звукового воздействия на барабанную перепонку пациентов *in vivo*. Информация о величине продольного смещения барабанной перепонки получалась из найденных значений фазы автодинного сигнала. Предложенный в [1] метод определения нанометровых перемещений позволяет определять только относительные перемещения внешнего отражателя составного автодинного резонатора, поэтому величина продольного смещения отсчитывалась от положения барабанной перепонки при уровне звукового давления в 20 дБ.

На рис. 4 приведена рассчитанная по формулам (6) зависимость продольного смещения барабанной перепонки от величины звукового давления излучателя звуковых волн в дБ. Как видно из рис. 4, при увеличении звукового давления от 25 до 60 дБ величина продольного смещения барабанной перепонки изменялась от 30 до 470 нм. При уровне звукового давления ниже 20 дБ смещения перепонки не были зафиксированы, так как измерения становятся соизмеримыми с уровнем шума.

Таким образом, показано, что с увеличением интенсивности звукового воздействия, наряду с колебательным движением, происходит продольное смещение барабанной перепонки. Смещение может быть зарегистрировано с помощью полупроводникового лазерного излучателя, работающего в автодинном режиме.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства образования и науки РФ и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 05-08-17924а.

Библиографический список

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.
2. 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.
3. Нейман Л.В. Анатомия, физиология и патология органов слуха и речи. М., 1977. 320 с.
4. Кобрак Г.Г. Среднее ухо. Москва: Гос. изд-во мед. литературы, 1963. 456 с.

5. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: Солон-Р, 2002. 448 с.

Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

Поступила в редакцию
После доработки

19.05.2008
24.11.2008

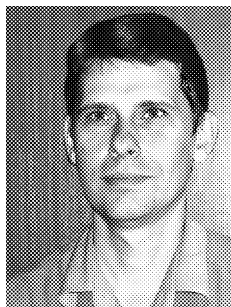
LASER AUTODYNE MEASUREMENTS OF EAR-DRUM DISPLACEMENT CAUSED BY CHANGE OF SOUND PRESSURE LEVEL

D.A. Usanov, A.V. Skripal, K.S. Avdeev

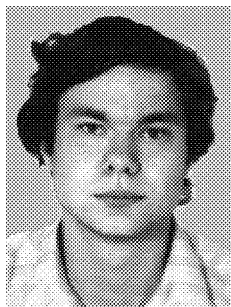
The results of measurements of ear-drum longitudinal displacement against vibrations excited by periodical sound pressure have been results. The existence of ear-drum longitudinal displacement with the increase of sound pressure intensity has been experimentally proved. By spectrum of autodyne signal of semiconductor laser, using the window method of semiconductor laser analysis, by changes of phase of autodyne signal in time the values of such displacement for different levels of sound pressure has been determined.



Усанов Дмитрий Александрович – родился в 1943 году, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по НИР СГУ, заведующий кафедрой физики твердого тела, академик МАН ВШ, РАЕН. Область научных интересов: твердотельная, микро- и нанoeлектроника, радиофизика, медицинская физика. Опубликовал более 200 статей по указанным выше направлениям.



Скрипаль Анатолий Владимирович – родился в 1960 году, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики СГУ. Область научных интересов: биомедицинская физика, лазерная физика, физика магнитных жидкостей, нанотехнологии. Опубликовал более 100 статей по указанным выше направлениям.



Авдеев Кирилл Сергеевич – родился в Саратове (1983), окончил Саратовский госуниверситет (2005). Аспирант третьего года. Научные интересы: твердотельная электроника, в частности, полупроводниковые лазеры. Автор ряда работ по исследованию автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах.