

08

Бифуркации удвоения периода колебаний барабанной перепонки при увеличении звукового давления

© Д.А. Усанов, О.В. Мареев, А.В. Скрипаль, Г.О. Мареев,
А.С. Камышанский

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: usanovda@info.sgu.ru
Саратовский государственный медицинский университет

Поступило в Редакцию 26 марта 2007 г.

Показана возможность применения лазера на квантово-размерных структурах для исследования амплитудно-частотных характеристик барабанной перепонки. Показано, что с ростом величины звукового давления в спектре механических колебаний барабанной перепонки могут возникать субгармоники на частотах, равных одной второй и одной четвертой от частоты возбуждающего звукового воздействия, т. е. наблюдается бифуркация удвоения периода колебаний.

PACS: 43.58.-e, 42.62.Be

Введение. Для определения характеристик нановибраций могут быть успешно использованы полупроводниковые лазеры, работающие в автодинном режиме [1–3]. Было показано, в частности, что может быть определена амплитуда колебаний барабанной перепонки (в том числе *in vivo*) по набору спектральных составляющих автодинного сигнала отраженного от нее лазерного излучения. Отмечалось, что при изменении уровня звукового воздействия изменяется спектральный состав низкочастотного протектированного автодинного сигнала, что обуславливает применение того или иного наиболее подходящего для каждого конкретного случая метода его обработки [4,5], используемого для нахождения характеристик вибраций.

Представляет интерес исследовать изменения динамических характеристик барабанной перепонки в условиях, когда ее отклик на линейно возрастающую нагрузку может носить нелинейный характер.

Экспериментальная установка. Экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) барабанной перепонки

проводилось с использованием автодинной измерительной системы [1], в состав которой входил лазерный диод RLD-650 (5) на квантово-размерных структурах с мощностью излучения 5 mW на длине волны 652 nm. На барабанную перепонку направляли когерентное излучение от лазерного диода. Для обеспечения прямой видимости барабанной перепонки использовали расширительную воронку. Отраженное от барабанной перепонки лазерное излучение регистрировалось с помощью фотоприемника, сигнал с которого поступал через широкополосный усилитель, содержащий фильтр переменного сигнала, на вход аналого-цифрового преобразователя персонального компьютера. Для возбуждения колебаний барабанной перепонки использовался излучатель звуковых волн, работающий от генератора звуковых колебаний.

Для возбуждения колебаний барабанной перепонки использовался костный возбудитель, применяемый в аудиометрических клинических исследованиях. В процессе измерений регистрировалась АЧХ барабанной перепонки в низкочастотной области спектра от 200 до 1.5 kHz. Для обеспечения достоверности полученных результатов была проведена предварительная калибровка генератора сигналов звуковой частоты и излучателя звуковых волн. В ходе калибровки было установлено, что в выбранном диапазоне частот АЧХ используемых приборов имеет линейный горизонтальный (равномерный) характер, что исключает необходимость приведения полученных АЧХ в соответствие с АЧХ измерительного оборудования. Использование в установке широкополосного усилителя переменного сигнала обеспечило отсутствие искажения спектра автодинного сигнала. Это позволило проводить измерения в выбранном диапазоне частот без последующей нормировки полученных результатов, что уменьшило погрешность измерений и повысило их достоверность.

Исследования АЧХ барабанной перепонки *in vitro*. Исследования АЧХ барабанной перепонки проводились на препарированном слуховом аппарате свиньи. Для этого извлекалась пирамида височной кости, содержащая барабанную полость и часть височной кости с улиткой [6]. Вскрывался ушной проход для обеспечения прямой видимости барабанной перепонки и возможности контроля фокусировки лазерного излучения, при этом герметичность улитки не нарушалась, что позволило получить данные о АЧХ барабанной перепонки *in vitro*.

Для исследования характера колебаний барабанной перепонки с изменением уровня звукового давления анализировалось соответствующее изменение спектрального состава автодинного сигнала. На рис. 1, а

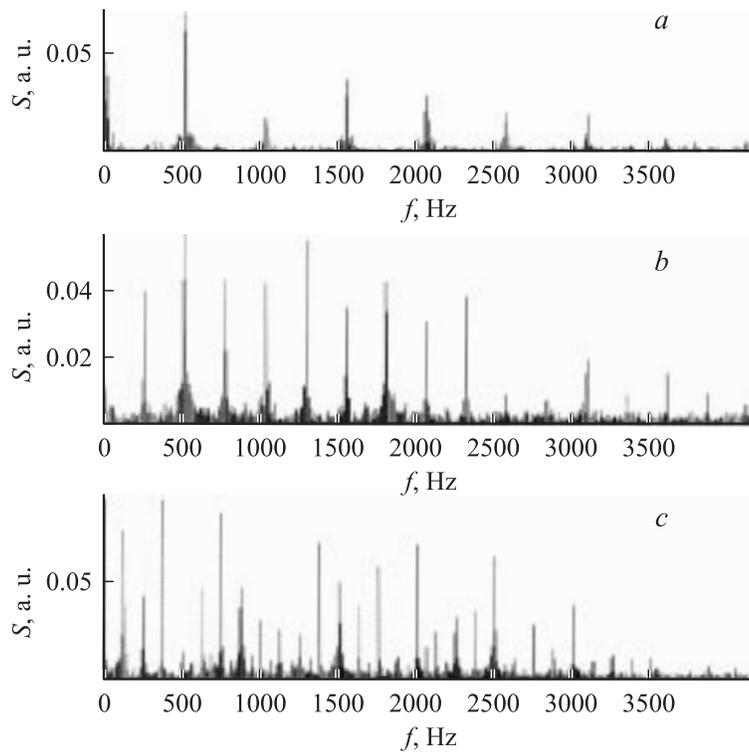


Рис. 1. Спектр мощности автодинного сигнала при подаче на костный возбудитель сигнала с генератора с частотой 520 Hz и напряжением: *a* — 0.7 V, *b* — 0.9 V, *c* — 2 V.

приведен спектр мощности автодинного сигнала в относительных единицах при подаче на костный возбудитель сигнала с генератора с частотой 520 Hz и напряжением 0.7 V. При увеличении напряжения подаваемого сигнала до величины 0.9 V в спектре автодинного сигнала наблюдались субгармонические составляющие на частотах, кратных половине частоты подаваемого сигнала (рис 1, *b*).

При дальнейшем увеличении напряжения подаваемого сигнала до величины 2 V в спектре мощности автодинного сигнала наблюдались дополнительные субгармонические составляющие на частотах, кратных

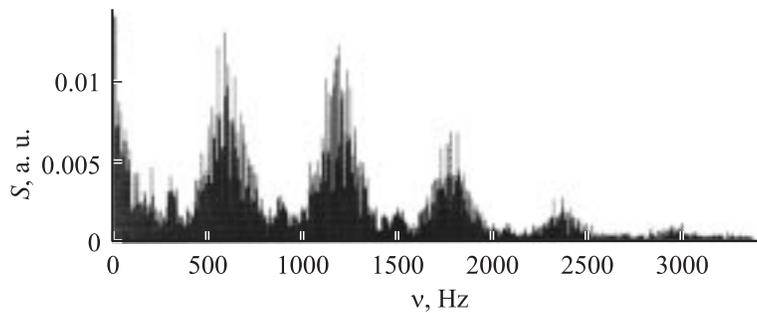


Рис. 2. Спектр мощности автодинного сигнала для пациента при частоте звукового воздействия 600 Hz, при уровне звукового давления 70 dB.

четверти частоты подаваемого сигнала (рис. 1, *с*). Таким образом, при увеличении звукового давления наблюдались бифуркации удвоения периода колебаний барабанной перепонки.

Исследования АЧХ барабанной перепонки *in vivo*. Исследовалось также изменение спектра автодинного сигнала при увеличении звукового давления на барабанную перепонку человека *in vivo*. До значений звукового давления 65 dB наблюдалось изменение спектра сигнала, характерное для линейного увеличения амплитуды колебаний барабанной перепонки. При уровне звукового давления 70 dB и выше в спектре автодинного сигнала наблюдалось появление субгармонических составляющих механических колебаний барабанной перепонки. На рис. 2 приведен спектр мощности автодинного сигнала для пациента при частоте звукового воздействия 600 Hz и уровне звукового давления 70 dB.

Как видно из рис. 2, в спектре мощности автодинного сигнала, наряду со спектральными составляющими, кратными частоте возбуждающего звукового воздействия, наблюдаются спектральные составляющие на частотах, кратных половине частоты возбуждающего звукового воздействия. Это позволило сделать вывод о возникновении в гармонических колебаниях барабанной перепонки дополнительной субгармоники на половинной частоте основных колебаний. Пороговая величина возникновения субгармонических колебаний была индивидуальна для каждого пациента и превышала порог слышимости на величинах от 65 до 75 dB. У некоторых пациентов пронаблюдать возникновение

субгармонических колебаний не удалось вследствие того, что при повышении звукового давления оно достигало значений, при которых возникали неприятные ощущения.

Таким образом, установлено, что при увеличении интенсивности звукового гармонического воздействия на барабанную перепонку с частотой f в ее механических колебаниях может возникать субгармоника на частоте $f/2$. При механическом возбуждении гармонических колебаний барабанной перепонки с помощью электромеханического возбудителя, используемого для проведения клинических исследований, посредством костной проводимости, удалось зафиксировать появление второй субгармоники на частоте $f/4$, т.е. при увеличении звукового давления наблюдались две бифуркации удвоения периода колебаний барабанной перепонки. Проведенные исследования свидетельствуют о возможности установления порога адекватного восприятия человеком звукового сигнала и успешного применения полупроводниковых лазеров на квантово-размерных структурах.

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

Список литературы

- [1] Усанов Д.А., Скрипаль А.В. // Письма в ЖТФ. 2003. В. 9. С. 51–57.
- [2] Usanov D.A., Skripal A.V., Mashkov D.A., Kamyshanskyi A.S. // Proc. SPIE. 2004. V. 5503. P. 551–558.
- [3] Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003. 312 с.
- [4] Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Камышанский А.С. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2004. № 8–9. С. 94–97.
- [5] Willemijn J.-F., Khanna S., Dandliker R. // Acta Oto-Laryngologica. 1989. V. 467. P. 35–42.
- [6] Кобрак Г.Г. Среднее ухо. М.: Медгиз, 1963. 456 с.