

03;05;07

## **Определение характеристик колебаний упругой сферической оболочки, заполненной несжимаемой жидкостью, с помощью полупроводникового лазерного автодина**

© Д.А. Усанов, Ан.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин

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

Поступило в Редакцию 12 апреля 2011 г.

Исследована возможность определения характеристик колебаний упругой сферической оболочки под действием внешней нагрузки. Колебания регистрировались полупроводниковым лазерным автодином, по сигналу которого восстанавливали функцию движения участка оболочки. Анализ восстановленной функции позволил получить информацию о динамических свойствах исследуемой оболочки и показать связь характеристик колебаний с внутренним давлением, измеренным по методу Маклакова.

В работе [1] показана возможность определения характеристик колебаний плоской поверхности твердого тела с использованием интерференционного сигнала, полученного от автодинной лазерной системы с ударно возбуждаемым внешним отражателем. Использование полупроводникового лазерного автодина позволило экспериментально определить характеристики колебаний твердотельных элементов бесконтактным способом. Такого рода методика для анализа механических деформаций сферических оболочек под действием внешних сил ранее не применялась. В то же время исследование механических свойств тел, оболочки которых имеют такую форму, относится к классическим задачам теории оболочек, решение которых в подавляющем большинстве случаев ограничивается теоретическим рассмотрением и расчетом с использованием численных методов [2,3]. При решении таких задач приходится делать ряд упрощающих предположений, для оценки применимости которых необходимо сравнение с экспериментом.

Актуальным примером сферической оболочки, заполненной жидкостью, упругие свойства которой важно исследовать, является глазное яблоко. По реакции глаза на механическую нагрузку судят о внутриглазном давлении [4,5]. При этом показания тономера оказываются зависимыми от толщины роговицы, что может рассматриваться как трудно учитываемый источник погрешности измерений. Наиболее распространенными в практике методами измерений внутриглазного давления являются контактные методы. Использование лазерных автодинов для измерений деформации глазного яблока, например под действием воздушной струи, открывает перспективы более широкого применения для этих целей бесконтактных измерений.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование полупроводниковым лазерным автодином механических свойств упругой сферической оболочки, заполненной несжимаемой жидкостью, под действием внешней нагрузки.

В данной работе рассматривается зависимость, связывающая упругие свойства сферической оболочки с величиной прогиба под действием внешней нагрузки. В качестве информационного параметра используется величина прогиба сферической оболочки. Величина прогиба сферической оболочки может быть определена по сигналу полупроводникового лазерного автодина. Нормированная переменная составляющая автодинного сигнала может быть представлена в виде

$$P(t) = \cos \left( \theta + \frac{4\pi}{\lambda_0} Z(t) \right), \quad (1)$$

где  $\theta$  — набег фазы автодинного сигнала,  $\lambda_0$  — длина волны лазерного излучения,  $t$  — интервал времени наблюдаемого автодинного сигнала на различных участках движения,  $Z(t)$  — функция, описывающая продольные перемещения объекта.

Для определения величины прогиба необходимо восстановить функцию движения объекта  $Z(t)$ . Для восстановления функции  $Z(t)$ , по автодинному сигналу полупроводникового лазера, можно воспользоваться методикой, приведенной в [6,7]. Функцию движения объекта  $Z(t)$  можно определить по нормированной переменной составляющей интерференционного сигнала  $P(t)$  с помощью обратной функции, т. е.

$$\theta + Z_0(t) = \pm \arccos(P(t)) + 2\pi n, \quad (2)$$

где  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Для моделирования деформации глазного яблока с разной толщиной роговицы под действием воздушной струи при различном внутриглазном давлении выбирались 3 резиновых шарика, заполненные гелем. Каждый из шариков заполнялся гелем так, что его количество во всех трех образцах было одинаковым. Все макеты были сделаны из одного материала разной толщины. Образцы имели одинаковый диаметр, равный 24 mm.

Для воздействия на анализируемый участок макета использовался компрессор мембранного типа мощностью 2 W, давлением 0.01 МПа с частотой воздушных импульсов 1 Hz, диаметр воздушной струи на расстоянии 10 mm от объекта был равен 3 mm. Тестовое измерение величины внутреннего давления проводилось по методу Маклакова [4] грузом массой 10 g. Измерение диаметра сегмента сплющивания выполняли по отпечаткам с помощью цифрового штангенциркуля [8].

В экспериментальной установке в качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазерный автодин [9], запитываемый от источника тока. На макет воздействовали воздушным импульсом от компрессора. Часть излучения, отраженного от макета упругой сферической оболочки, возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось встроенным фотодетектором. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель на аналого-цифровой преобразователь для обработки в ЭВМ.

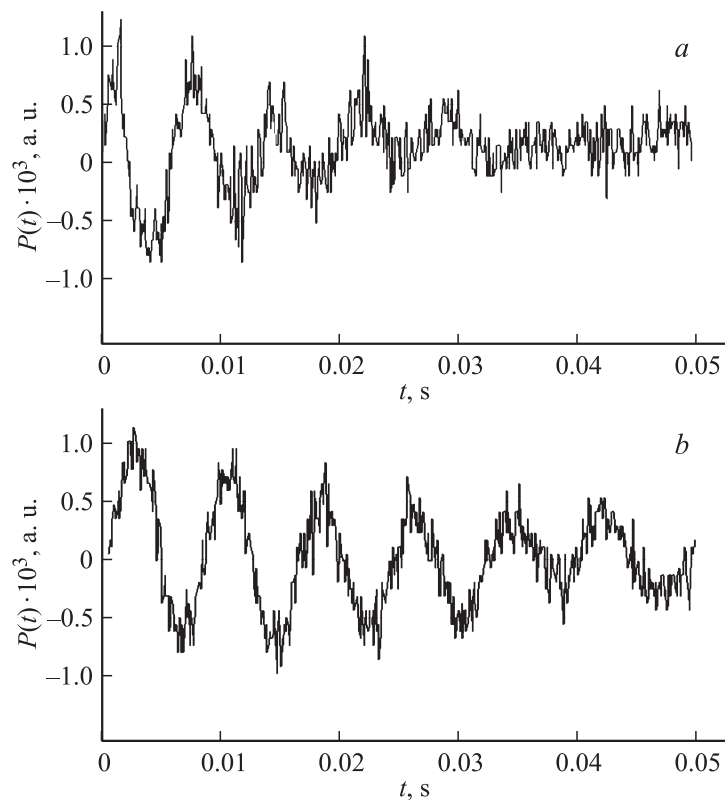
При проведении эксперимента воздушные импульсы от компрессора по гибкому шлангу и пластмассовой трубке направлялись на поверхность одного из макетов, что позволяло создавать нагрузку оболочки извне. Все эксперименты реализовались в условиях, при которых воздушный удар был одной и той же силы.

Движение поверхности макета приводило к изменению величины автодинного сигнала полупроводникового лазера. Измеренные автодинные сигналы от трех макетов приведены на рис. 1, *a, b, c*.

Перед восстановлением функции движения  $Z(t)$  автодинный сигнал был отфильтрован в математическом пакете MathCad. На рис. 2, *a, b, c* показана восстановленная форма движения участка для трех исследуемых образцов.

Результаты тестовых измерений, рассчитанные по сигналу автодинного детектирования для 3 макетов, приведены в таблице.

Из приведенных в таблице результатов эксперимента следует, что под действием ударной воздушной волны поверхность объекта



**Рис. 1.** Измеренный автокорреляционный сигнал при колебаниях участка оболочки: *a* — макет № 1, *b* — макет № 2, *c* — макет № 3.

совершает колебания с затуханием. Анализ затухающих колебаний показал, что все они имеют разную частоту колебаний ( $\nu$ ) и разные коэффициенты затухания ( $c$ ). Значение частот колебаний определялось по спектру автокорреляционного сигнала, полученному в MathCad с помощью быстрого преобразования Фурье. Коэффициент затухания  $c$  определялся как обратная величина времени релаксации  $\tau$ , при котором амплитуда сигнала уменьшалась в  $e$  раз. Точное значение  $\tau$  находили по восстановленной функции движения  $Z(t)$  в результате расчета с использованием компьютера.

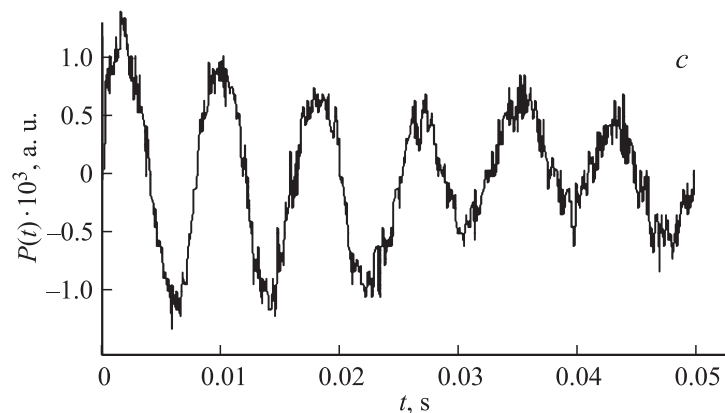


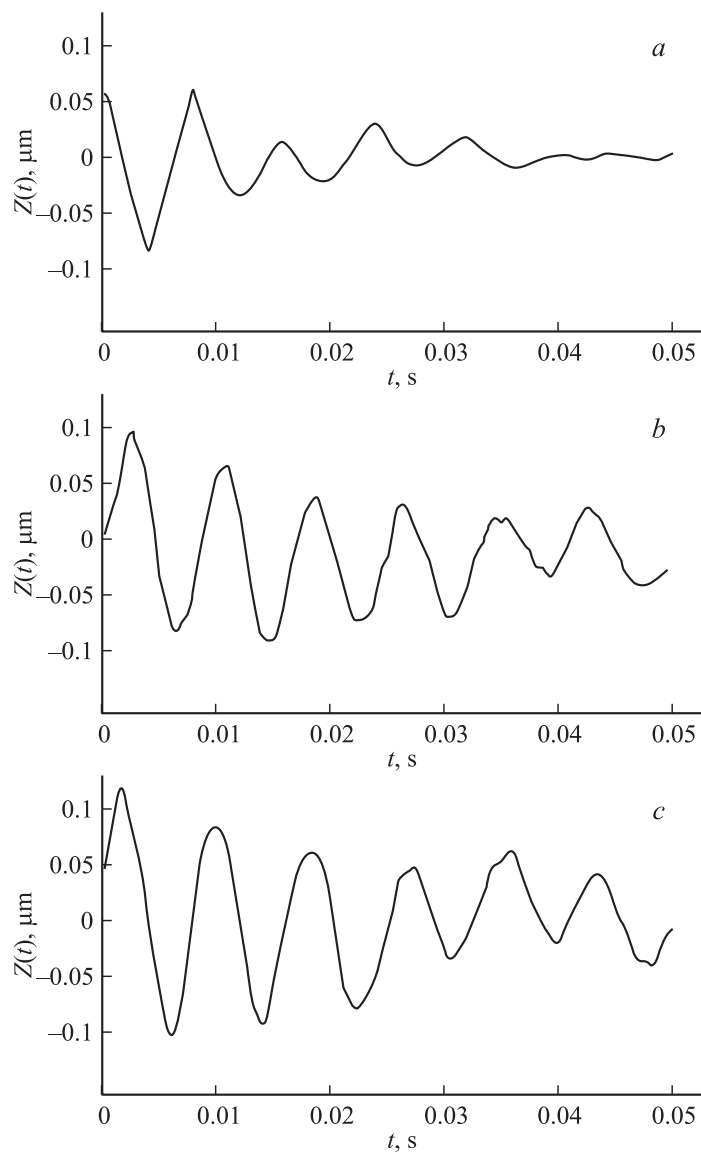
Рис. 1 (продолжение).

Сопоставляя полученные результаты для разных толщин исследуемых образцов, можно заметить, что колебания тонких оболочек затухают медленнее, чем колебания толстых оболочек. При этом отличается и частота колебаний. Частота колебаний толстых оболочек выше.

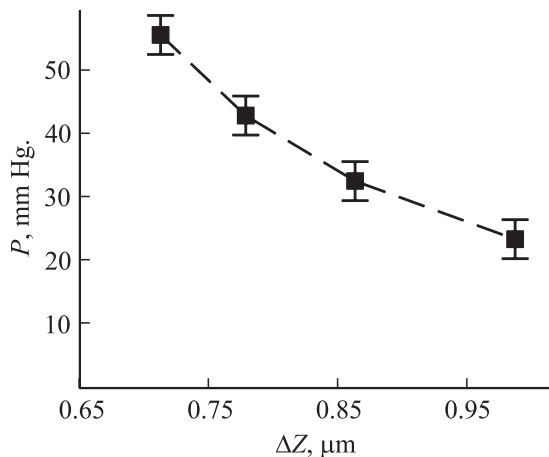
Необходимо отметить, что прогиб сферической оболочки коррелирует с величиной давления внутри макета, определяемый по методу Маклакова. Подобная зависимость была получена авторами [4,5] для внутриглазного давления при разных значениях толщины роговицы.

Другая серия экспериментов по измерению величины прогиба под действием внешней нагрузки была проведена со сферической оболочкой, имеющей толщину, равную 500  $\mu\text{m}$ , но с разными внутренними

№ макета	Толщина оболочки, $\mu\text{m}$	Площадь поверхности соприкосновения тонометра Маклакова и макета, $\text{mm}^2$	Значение давления по данным серии измерений, $\text{mm Hg}$	Частота колебаний, $\text{Hz}$	Коэффициенты затухания, $1/\text{s}$
1	630	22.9	$43 \pm 3.7$	14.2	33
2	550	32.1	$30 \pm 3.3$	12.5	25
3	400	38.4	$20 \pm 3.5$	11.2	22



**Рис. 2.** Восстановленная форма движения отражателя: *a* — макет № 1, *b* — макет № 2, *c* — макет № 3.



**Рис. 3.** Экспериментально полученная зависимость величины прогиба сферической оболочки под действием пневмоимпульсов от величины давления внутри макета.

давлениями. Давление внутри оболочки изменяли путем введения дополнительного объема жидкости, как это было предложено в работе [10]. Как и в предыдущих экспериментах, нагружение осуществлялось воздушным импульсом от компрессора. На рис. 3 показана зависимость величины прогиба оболочки под действием пневмоимпульсов от давления внутри макета.

Полученная зависимость свидетельствует о том, что с увеличением внутреннего давления величина прогиба оболочки монотонно уменьшается. Используя данную зависимость как калибровочную кривую, можно определить давление внутри макета по измеренной величине прогиба.

Таким образом, показана возможность использования полупроводникового лазерного автодина для определения механических свойств упругих сферических оболочек, имеющих внутреннее давление. Полученные результаты могут быть использованы, в частности, для бесконтактного измерения внутриглазного давления *in vivo*. В отличие от известных предложенный метод позволяет определить количественно характеристики колебаний оболочки и получить информацию о ее динамических свойствах.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы (номер ГК П711 от 12 августа 2009 года).

## **Список литературы**

- [1] *Чанилов О.И., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 21. С. 9–16.
- [2] *Вольмир А.С.* Гибкие пластинки и оболочки. М.: Гостехиздат, 1956. 420 с.
- [3] *Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки / Пер. с англ. Изд. 3. М., 2009. 640 с.
- [4] *Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А.* // Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. 2009. № 4. С. 30–33.
- [5] *Астахов Ю.С., Акопов Е.Л., Потемкин В.В.* // Офтальмологические ведомости. 2008. Т. 1. № 1. С. 4–10.
- [6] *Lukianowicz T., Lukianowicz C.* // Proc. SPIE. 1994. V. 2340. P. 415–422.
- [7] *Усанов Д.А., Скрипаль Ан.В., Калинин М.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 2. С. 125–129.
- [8] *Штейн А.А.* // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2010. № 2. С. 12–22.
- [9] *Усанов Д.А., Скрипаль Ан.В., Добдин С.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 21. С. 78–84.
- [10] *Любимов Г.А.* // Глаукома. 2006. № 1. С. 43–49.