

07;12

Исследование упругих свойств сферической оболочки с помощью полупроводникового лазерного автодина

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Т.Б. Усанова, С.Ю. Добдин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012, г. Саратов, Россия

(Поступило в Редакцию 22 ноября 2011 г.)

Исследована возможность применения полупроводникового лазерного автодина для оценки упругих свойств сферической оболочки, моделирующей глазное яблоко. Оценка проводилась в результате определения параметров движения участка сферической оболочки под действием пневмоимпульса. Полученные результаты позволили установить, что отношение величины прогиба и ускорения оболочки является постоянной величиной, слабо зависящей от давления пневмоимпульсов и расстояния от их источника до оболочки.

Изучение упругих свойств тел, оболочки которых имеют сферическую форму, является классической задачей теории оболочек. При решении такого рода задач чаще всего ограничиваются теоретическим рассмотрением или расчетом с использованием численных методов [1,2]. Представляет интерес экспериментальное исследование рассматриваемых теоретических случаев, например для определения применимости к практике принимаемых в теории упрощающих предположений. Примером сферической оболочки, упругие свойства которой важно знать, является глазное яблоко. Знание упругих свойств оболочки глазного яблока может быть использовано при определении внутриглазного давления (ВГД). Для проверки применимости разработанных теоретических подходов к такого рода сложным объектам необходимо сопоставление результатов расчетов эксперименту. Для проведения измерений механических деформаций таких оболочек можно использовать полупроводниковые лазеры в режиме автодинного детектирования. До настоящего времени такая возможность применительно к деформациям упругих оболочек исследована не была.

В работе [3] была показана возможность использования полупроводникового лазерного автодина для измерения механических деформаций моделей глазного яблока. Построенная модель позволила экспериментально определить связь внутреннего давления сферической оболочки и величины ее деформации под действием пневмоимпульсов. Ограничивающим фактором при использовании в качестве информационного параметра о внутреннем давлении, например величины прогиба оболочки, явилось то, что при проведении измерений требовалось, чтобы давление воздушных импульсов, которыми воздействовали на поверхность глазного яблока, было при измерениях неизменным. Неконтролируемое изменение силы воздействия или расстояния между источником пневмоимпульсов и оболочкой может привести к неконтролируемой погрешности измерений и, таким образом, повлиять на точность измерения ВГД. Такое изменение может быть связано с изменением мощности генератора воздушных импульсов или расстояния

до оболочки. Постоянство последнего особенно сложно обеспечить при измерении *in vivo*.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование полупроводниковым лазерным автодином упругих характеристик моделей глазного яблока и поиск параметра, позволяющего проводить оценку внутреннего давления независимо от давления воздушных импульсов или расстояния от генератора этих импульсов до поверхности модели.

Ранее было показано [3], что о внутреннем состоянии исследуемого объекта, можно судить по величине прогиба и по характеристикам движения оболочек (скорости и ускорения), но все они являются величинами, зависящими от силы воздушного удара. Поэтому желательно использовать другой параметр, по которому можно оценить внутреннее давление, независимо от величины мощности генератора воздушных импульсов и расстояния между ним и объектом. Нами сделано предположение, что подобным параметром может быть отношение величины смещения (деформации) оболочки и ускорения.

Величина прогиба оболочки макета 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 θ — набег фазы автодинного сигнала, λ_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 смещения необходимо восстановить функцию движения объекта $Z(t)$. Для восстановления функции $Z(t)$ по автодинному сигналу полупроводникового лазера, можно воспользоваться методикой, приведенной в [4]. Функцию движения объекта $Z(t)$ можно определять по нормированной переменной составляющей интерференционного сигнала $P(t)$ с

Таблица 1.

№	Ускорение $a, 10^{-2} \text{ m/s}^2$	Смещение $\Delta Z, 10^{-6} \text{ m}$	Отношение $\Delta Z/a, 10^{-4} \text{ s}^2$	Давление струи $p, \text{ Pa}$	Внутреннее давление макета, mm Hg
1	0.93	1.71	1.823	0.018	
2	1.28	2.35	1.827	0.082	16
3	1.67	3.05	1.823	0.158	
4	1.07	1.53	1.430	0.018	
5	1.49	2.15	1.442	0.082	20
6	1.95	2.80	1.435	0.158	
7	1.04	1.30	1.252	0.018	
8	1.57	1.95	1.254	0.082	24
9	2.07	2.60	1.258	0.158	
10	1.06	1.12	1.047	0.018	
11	1.68	1.76	1.044	0.082	30
12	2.31	2.43	1.048	0.158	
13	1.01	0.95	0.932	0.018	
14	1.71	1.59	0.929	0.082	33
15	2.48	2.31	0.93	0.158	

помощью обратной функции, т. е.

$$\theta + \frac{4\pi}{\lambda_0} Z(t) = \pm \arccos(P(t)) + 2\pi n, \quad (2)$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Для определения ускорения можно использовать метод, предложенный в работах [5,6]. Неизвестный параметр ускорения a определяется из решения обратной задачи, получающегося в результате нахождения минимума функционала (3), определяемого как сумма квадратов отклонений экспериментальных P_{expt} и теоретических P_{theor} величин автодинного сигнала (1) для различных временных интервалов

$$S(\theta, a) = \sum_i [P_{\text{expt}}(t_i) - P_{\text{theor}}(t_i, \theta, a)]^2. \quad (3)$$

При нахождении минимума функционала (3) определялась область глобального минимума, точное значение которого находили по методу спуска по искомым параметрам θ и a .

Для моделирования деформации глазного яблока под действием воздушной струи был использован резиновый шарик, заполненный гелем, с разным внутренним давлением. Давление внутри шарика изменяли путем введения дополнительного объема геля. Образец имел диаметр, равный 24 mm.

Были проведены экспериментальные исследования по определению величины деформации и ускорения оболочки шарика под действием пневмоимпульса. Для воздействия на анализируемый участок такого макета глаза использовался компрессор типа Roteri RCC-90 мощностью 120 W. При проведении экспериментов использовались различные режимы работы компрессора. С помощью внешнего источника питания изменялось давление воздушных импульсов. Для измерения деформаций макета

глаза, использовался полупроводниковый лазерный диод RLD-650 с мощностью излучения до 1 mW. Тестовое измерение величины внутреннего давления проводилось по методу Маклакова [7] грузом массой 10 g.

На рис. 1 приведена блок-схема экспериментальной установки. Излучение полупроводникового лазера 1, стабилизированного источником тока 3, направлялось на анализируемый участок макета глаза. Воздушные импульсы от компрессора 2, запитанного источником тока 4, по гибкому шлангу и пластмассовой трубке направлялись на освещаемую лазером поверхность. Часть излучения, отраженного от макета, возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось встроенным фотодетектором 5. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель 6 на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 7. Цифровой сигнал с АЦП для последующей обработки сохраняли в памяти ЭВМ (8).

Экспериментальные исследования проводились при трех различных силах воздействия и пяти различных внутренних давлениях (ВД). Деформация поверхности макета приводила к изменению величины автодинного сигнала полупроводникового лазера. Смещение и параметры движения при этом определялись по автодинному сигналу по методикам, приведенным выше. Измерен-

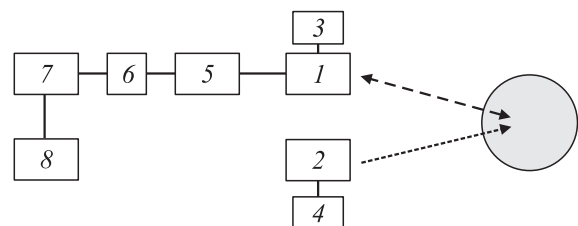


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

Таблица 2.

№	$\Delta x, \text{mm}$	Ускорение $a, 10^{-2} \text{m/s}^2$	Смещение $\Delta Z, 10^{-6} \text{m}$	Отношение $\Delta Z/a, 10^{-4} \text{s}^2$	Внутреннее давление макета, mm Hg
1	5	1.63	2.98	1.824	16
2	10	1.07	1.95	1.823	
3	15	0.70	1.32	1.825	
4	5	1.95	2.80	1.435	20
5	10	1.22	1.75	1.433	
6	15	0.84	1.21	1.432	
7	5	2.04	2.55	1.251	24
8	10	1.14	1.43	1.255	
9	15	0.65	0.82	1.253	
10	5	2.23	2.34	1.047	30
11	10	1.65	1.72	1.044	
12	15	1.08	1.13	1.048	
13	5	2.41	2.25	0.932	33
14	10	1.73	1.61	0.929	
15	15	1.12	1.04	0.93	

ные автодинные сигналы, полученные при отражении от поверхности макета глаза с внутренним давлением 24 mm Hg, показаны соответственно на рис. 2, *a–c*.

Фильтрация полученных сигналов проводилась с использованием встроенной функции математического пакета MathCad-supsmooth.

Анализ полученных сигналов показал, что значения величины прогиба и ускорения, с которым движется оболочка, увеличиваются с ростом давления воздушных импульсов. Результаты расчета величин прогиба оболочки ΔZ , ускорения a и отношения $\Delta Z/a$, полученные для 3 разных давлений воздушной струи и разных ВД-макета, приведены в табл. 1, из которой видно, что отношение смещения и ускорения оболочки с ВД 24 mm Hg изменяется следующим образом: для $p_1 = 0.01873$ Pa отклонение от среднего значения составило 0.207%, для $p_2 = 0.08272$ Pa — 0.047%, для $p_3 = 0.15806$ Pa — 0.27%. Подобные результаты были получены в случае ВД-макета 16 и 20 mm Hg. Таким образом, можно сделать вывод о том, что отношение $\Delta Z/a$ слабо зависит от давления воздушной струи (рис. 2).

Были проведены также измерения ΔZ и a при разных расстояниях между источником пневмоимпульсов и объектом (Δx). Измерения величины прогиба и ускорения оболочек проводились для 3 разных расстояний: 5, 10 и 15 mm. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Полученные результаты (табл. 2) свидетельствуют о том, что при изменении расстояния между источником пневмоимпульсов и объектом исследований, в пределах одного давления, величина $\Delta Z/a$ также изменяется слабо.

Полученные особенности могут быть использованы для исключения возможных ошибок, связанных с непостоянством давления, которое создает воздушная струя при пневмоударе. Кроме того, не потребуется построение множества калибровочных кривых, описывающих

зависимость прогиб–внутреннее давление [3]. Для этих целей можно будет использовать универсальную зависимость $\Delta Z/a = f(P)$ (рис. 3).

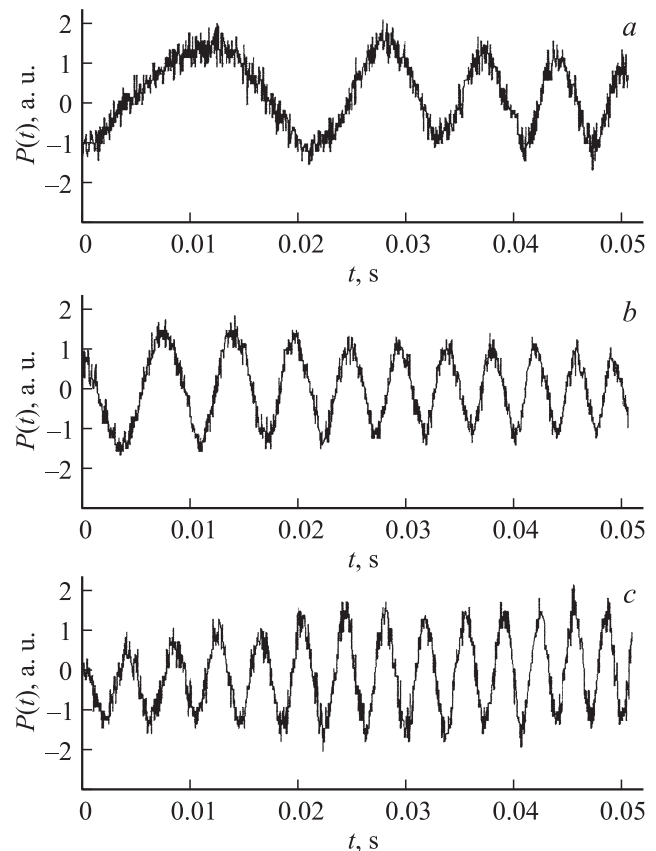


Рис. 2. Измеренные автодинные сигналы: *a* — $p_1 = 0.01873$ Pa, *b* — $p_2 = 0.08272$ Pa, *c* — $p_3 = 0.15806$ Pa (внутреннее давление — 24 mm Hg).

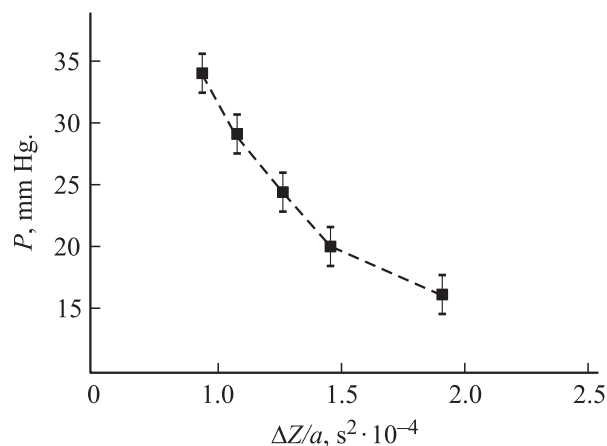


Рис. 3. Экспериментально полученная зависимость отношения величины прогиба к ускорению $\Delta Z/a$, под действием пневмоимпульсов, от величины давления внутри макета P .

Таким образом, показана возможность применения полупроводникового лазерного автодина для измерения параметров движения оболочек, по форме, близкой к форме глазного яблока, под действием пневмоимпульса. Установлено, что отношение величины прогиба и ускорения оболочки слабо зависит от давления пневмоимпульсов и расстояния от их источника до оболочки. В то же время наблюдается однозначная связь этого отношения с величиной давления внутри оболочки. Данную особенность можно использовать для исключения возможных ошибок, связанных с непостоянством пневмодавления и расстояния до глаза, тем самым повысить точность проводимых с помощью полупроводникового автодина измерений ВГД.

Список литературы

- [1] Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1956. 420 с.
- [2] Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки / Пер. с англ. Изд. 3-е. М., 2009. 640 с.
- [3] Усанов Д.А., Скрипаль Ан.В., Добдин С.Ю. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 18. С. 65–72.
- [4] Усанов Д.А., Скрипаль Ан.В., Калинин М.Ю. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 2. С. 125–129.
- [5] Усанов Д.А., Скрипаль Ан.В., Добдин С.Ю. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 22. С. 78–84.
- [6] Усанов Д.А., Скрипаль Ан.В., Добдин С.Ю. // Нано- и микросистемная техника. 2010. Вып. 10. С. 51–54.
- [7] Любимов Г.А. // Глаукома. 2006. Вып. 1. С. 43–49.