

²⁾ *Харьковский Национальный университет им. В. Каразина, г. Харьков, Украина*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛОРИМЕТРИИ

Работа посвящена анализу методов математического моделирования одной из наиболее важных в жизнедеятельности человека – органу зрения, на долю которого приходится более 90% всей поступающей информации о внешнем мире. Человеческий глаз представляет собой уникальный (природный) естественный аппарат. Поэтому принципы его работы издавна привлекали внимание ученых. В основе поставленных в данной работе задач лежали вопросы, тесно связанные с теорией восприятия цвета человеком.

Еще И. Ньютоном была подготовлена почва для создания линейной модели цветового зрения. Впервые одну из таких моделей предложил Т.Юнг. Но Т. Юнга интересовали не столько психофизическая сторона явления, сколько физиологическая, поэтому, с точки зрения психофизики, его результаты выглядят лишь эпизодом. Наиболее последовательным продолжателем идей И. Ньютона был Максвелл, который попытался опытным путем определить конкретный вид весовых функций, характеризующих чувствительность глаза к излучениям с различной длиной волны, получивших название функций спектральной чувствительности глаза. Первая попытка создания аксиоматической теории глаза была предпринята Грассманом. Опираясь на результаты Ньютона и его идею о «нуль-органе», им были сформулированы законы цветового зрения – закон аддитивности, закон трехмерности, закон непрерывности. Отталкиваясь от этих законов, Шредингер попытался чисто формальным путем вывести из них преобразования Ньютона. Однако несовершенство использованных им математического алгоритма и формулировок законов зрения не позволили ему сделать это достаточно корректно. Но в целом исследования Шредингера следует рассматривать как существенный шаг в развитии теории зрения.

Основываясь на анализе существующих математических методов исследования зрения в настоящей работе принята интерпретация входных сигналов в виде гильбертовых пространств. Основная причина подобного в следующем. Как показывают исследования сенсорных систем, описание работы органов чувств приводит нас к линейным функционалам, общий вид которых известен в гильбертовых пространствах или в пространствах типа L_p .

Авторами статьи предлагается метод и устройство для колориметрических измерений. Основным элементом устройства распознавания цветовых оттенков является датчик (сенсор) цвета, в котором для увеличения чувствительности и достоверности измерений, а также упрощения процесса настройки, используется не три, а большее количество (число) фотоприемников.

Ключевые слова: колориметрия, восприятие цвета, сенсорные системы, цветовые координаты, фотоприемник, датчик света.

*Надійшла до редакції
28 вересня 2017 року*

*Рецензовано
11 жовтня 2017 року*

© Khoroshaylo I., Shlyahov V., Yefymenko S., Sotnik S., Kagramanyan A., 2017

УДК 621.757

ДОСЛІДЖЕННЯ КВАЗІДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЗЕРКАЛА КІЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРА З П'ЄЗОКОРЕКТОРОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕРФЕРОМЕТРА БІЛОГО СВІТЛА «РЕЛЬСФ»

Гураль Т. І., Кирилюк М. Є., Овчар М. І., Настіч В. Н.

Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», м. Київ, Україна

E-mail: figur2@ukr.net, kolyakryliuk@gmail.com, nyckolayovch@yandex.ru

Метою даної роботи є дослідження динамічних характеристик (кутових та лінійних зміщень відбивальної поверхні та зміни її форми) дзеркал мембранної конструкції за допомогою інтерферометра білого світла. Дані характеристики дозволяють провести об'єктивний аналіз різноманітних варіантів побудови мембранного дзеркала та оптимізувати його конструкцію. Були проведені дослідження двох типів конструкцій дзеркал: одномембранного та двомембранного. Результати вимірювання параметрів дослідних зразків показали, що відбивальна поверхня зазнає лінійних та кутових зміщень, а також змінює радіус кривизни, а тип конструкції дзеркала має значний вплив на його динамічні характеристики.

Ключові слова: лазерні дзеркала, кільцевий лазер, інтерферометр білого світла.

При застосуванні He-Ne лазерів для метрологічних цілей (спектроскопія, інтерферометрія, голографія, датчики кутової швидкості) важлива стабільність частоти F їх вихідного випромінювання, яка прямо пропорційна стабільності периметра резонатора L : $\Delta F/F = \Delta L/L$ [1]. Для зменшення впливу зовнішніх факторів на периметр лазера, резонатор виготовляється з матеріалу з малим коефіцієнтом термічного розширення (ситал СО-115М або Zerodur). Підстроювання периметра в діапазоні 2...3 мкм здійснюється переміщенням відбивальної поверхні одного або двох дзеркал, що утворюють резонатор. Для цього використовується дзеркало спеціальної мембранної конструкції. На таке дзеркало встановлюється п'єзопривід біморфного типу, який шляхом силового тиску на мембрану дзеркала викликає її переміщення, що дозволяє регулювати периметр резонатора. Нарівні з перевагами такої конструкції дзеркала (компактність, жорсткість, стабільність, суміщення дзеркального покриття з елементом регулювання периметра) в ній присутній ефект динамічного кутового зміщення дзеркальної поверхні. Кутове зміщення дзеркала може призводити до роз'юстування резонатора, що в низці застосувань негативно відбивається на метрологічних характеристиках лазера.

Метою даної роботи є дослідження динамічних характеристик дзеркал мембранної конструкції, а саме: кутових та лінійних змішень відбивальної поверхні та зміни її форми. Дані характеристики дозволяють провести об'єктивний аналіз різноманітних варіантів побудови мембранного дзеркала та оптимізувати його конструкцію. До цього часу подібні вимірювання виконувались тільки непрямыми методами, наприклад, шляхом оцінки зміни добротності кільцевого лазера.

Нами були проведені дослідження двох типів конструкцій дзеркал: одномембранного та двомембранного. Зразки були виготовлені у відповідності з технологічним процесом виготовлення зразків серійного виробництва, а експеримент проводився в тих же умовах, в яких зазвичай працюють кільцеві лазери.

Експериментальні зразки

Було виготовлено два макетних зразка дзеркал. Для проведення досліджень макетні зразки ставились на оптичний контакт на ситаловий блок так, щоб відбивальна поверхня дзеркала і частина його посадкової поверхні залишались відкритими в межах поля зору

інтерферометра білого світла. Для цього в блоці зроблено два отвори. П'єзопривід закріплювався на ситаловий блок з його нижньої сторони. В процесі дослідження на п'єзопривід подавалася напруга в діапазоні від -200 В до $+200$ В від універсального блоку живлення. Загальний вигляд конструкції дзеркала двомембранного типу закріпленої на ситаловому блоці показаний на рис. 1.

Інтерферометр білого світла та його програмне забезпечення

В процесі досліджень нами був використаний інтерферометр білого світла «Рельєф» власної розробки (рис. 2). Окрім можливості контролювати форму та взаємне розташування відбивальної та посадкової поверхонь дзеркала з високою точністю, визначальним фактором є можливість проведення безконтактних вимірювань. Інтерферометр білого світла має поле зору 12×13 мм і роздільну здатність у площині зображення 11 мкм та по висоті до 1 нм.

Інтерферометр був спеціально розроблений для контролю форми лазерних дзеркал і його програмне забезпечення дозволяє вимірювати такі характеристики дзеркал, як радіус кривизни, його відхилення від заданого значення і локальну похибку виготовлення та оцінювати параметри еліптичності форми поверхні. Окрім того, програмне забезпечення приладу має широкий набір інструментів для обробки даних, аналізу зображень і розрахунку характеристик топології поверхонь, що контролюються.

Для розрахунку, обробки та аналізу результатів використовувалось програмне забезпечення Surface та програмний пакет Mathcad. Під час розрахунку відбивальна та посадкова поверхні задавалися моделлю площини, побудованою за трьома рівновіддаленими від центра точками. Пізніше було вирішено задати поверхні моделлю найближчої площини. Нові дані були опрацьовані і результати розрахунку за другою моделлю виявилися більш коректними. Для кращої точності дані були перераховані у вужчому полі зору (500 мкм). В процесі досліджень макетні зразки по черзі закріплювались на предметному столику інтерферометра і виконувалось сканування поверхонь у межах його поля зору у вертикальному напрямі при заданій напрузі живлення п'єзоприводу. Тривимірний вигляд зображення сферичної відбивальної поверхні та частини пласкої посадкової поверхні (в межах технологічного отвору) макета показаний на рис. 3. З рисунків видно, що поверхні мають деяку різновисотність і взаємний нахил.

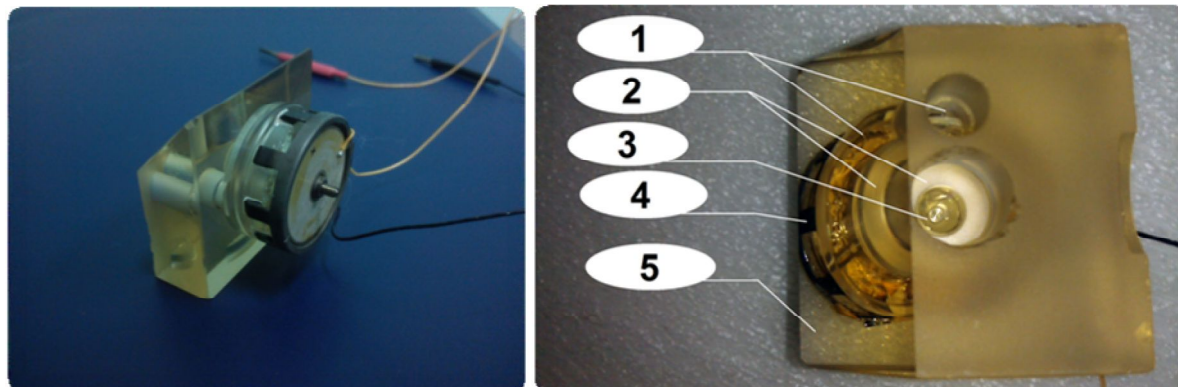


Рис. 1. Загальний вигляд конструкції сферичного дзеркала двомембранного типу, закріпленої на ситаловому блоці, де: 1 – посадкова поверхня дзеркала; 2 – мембрана; 3 – сферична відбивальна поверхня дзеркала; 4 – кріплення п'єзоприводу; 5 – ситаловий блок



Рис. 2. Інтерферометр білого світла «Рельєф»

Результати досліджень

Результати вимірювань параметрів дослідних зразків сферичних дзеркал мембранного типу з радіусом кривизни $R = 4000$ мм показали, що відбивальна поверхня зазнає лінійних та кутових зміщень, а також змінює радіус своєї кривизни. Для відбивальної поверхні двомембранного дзеркала одержали діапазони лінійних та кутових переміщень 1,2 мкм та 14 кут. сек. відповідно і діапазон зміни радіуса її кривизни 140 мм (рис. 4).

Крім того поверхня дзеркала зазнає такої деформації як нахил відбивальної поверхні відносно посадкової поверхні з одночасним її поворотом відносно осі дзеркала (рис. 5)

Результати для одномембранного дзеркала наведені на рис. 6. Діапазон лінійного зміщення сягає 290 нм, а діапазон кутового нахилу сягає 121 кут. сек. Велика розбіжність діапазонів зміщень порівняно з результатами для двомембранного дзеркала пояснюється значно меншою жорсткістю одномембранного дзеркала. Дзеркало

одномембранної конструкції має лише одну поверхню кріплення, тоді як дзеркало двомембранної конструкції має їх дві, чим і забезпечується вища стабільність положення дзеркала в процесі руху. Радіус кривизни змінюється в діапазоні майже 220 мм.

Поворот відбивальної поверхні навколо осі має дещо хаотичний характер, проте діапазон значень кута повороту відбивальної поверхні для двомембранного дзеркала не перевищує 20 градусів, а для одномембранного – 55 градусів (рис. 7).

Якщо порівняти результати вимірювань радіусу кривизни відбивальної поверхні у випадках одномембранного та двомембранного дзеркал, можна переконатися, що для першого сферична форма відбивальної поверхні дзеркала фактично не змінюється (сферичність зберігається, змінюється лише сам радіус кривизни), тоді як для другого окрім зміни радіусу кривизни орушується сферичність і спостерігається еліптичність..

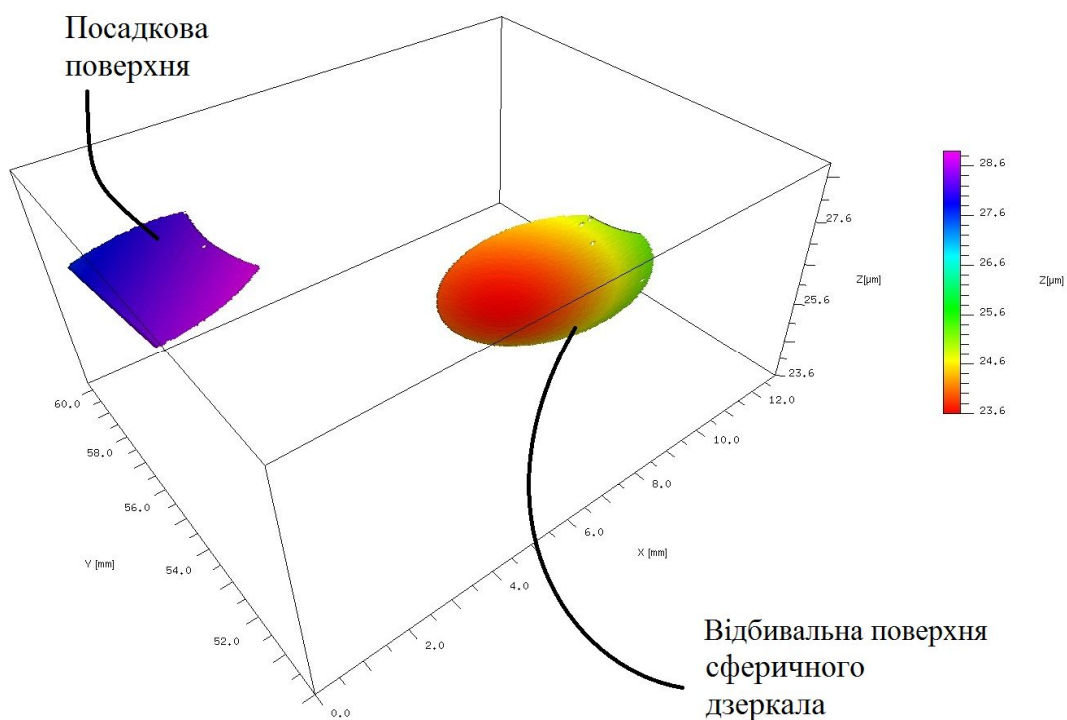
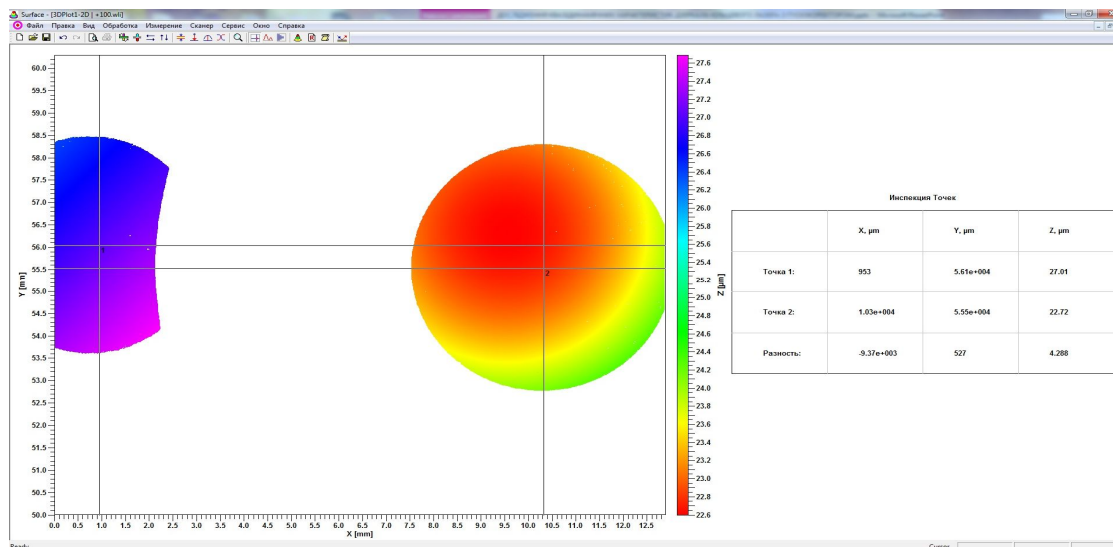


Рис. 3. Вигляд розрахованого зображення сферичної відбивальної поверхні дзеркала та частини плоскої посадкової поверхні

Такі висновки можна зробити, прослідкувавши, як змінюються максимальний та мінімальний радіуси кривизни відносно напруги в обох випадках (рис. 8). Зміна радіуса кривизни зумовлена тиском на поверхню дзеркала. Чим більший тиск (прикладається вища напруга живлення до п'єзоприводу), тим поверхня дзеркала більше вирівнюється, тобто, радіус кривизни стає більший.

Діапазон зміни максимального радіусу кривизни для одномембранного дзеркала сягає майже 224 мм, мінімального – 216 мм. Незначна різниця говорить про збереження поверхнею

сферичності. Для двомембранного дзеркала діапазон зміни максимального та мінімального радіусів кривизни виявився відповідно 160 мм та 134 мм. Порівняно з дзеркалом одномембранного типу радіуси кривизни двомембранного дзеркала мають менший діапазон, але більшу різницю між максимальним і мінімальним радіусом, що пояснюється виникненням еліптичності поверхні, яка в свою чергу може бути пояснена жорсткішою конструкцією дзеркала (має місце більша кількість контактів п'єзодвигуна з поверхнею мембранного дзеркала).

В той же час різниця радіусів кривизни для прямого та зворотного ходів за одного значення напруги у випадку одномембранного дзеркала становить 20 мм для максимального радіусу та 17 мм для мінімального. Незначна відмінність значень також говорить про збереження

сферичності. Для двомембранного ж дзеркала різниця максимальних радіусів кривизни для прямого та зворотного ходів за того ж значення напруги становить 10 мм, а різниця мінімальних радіусів – 54 мм, що також говорить про виникнення еліптичності поверхні.

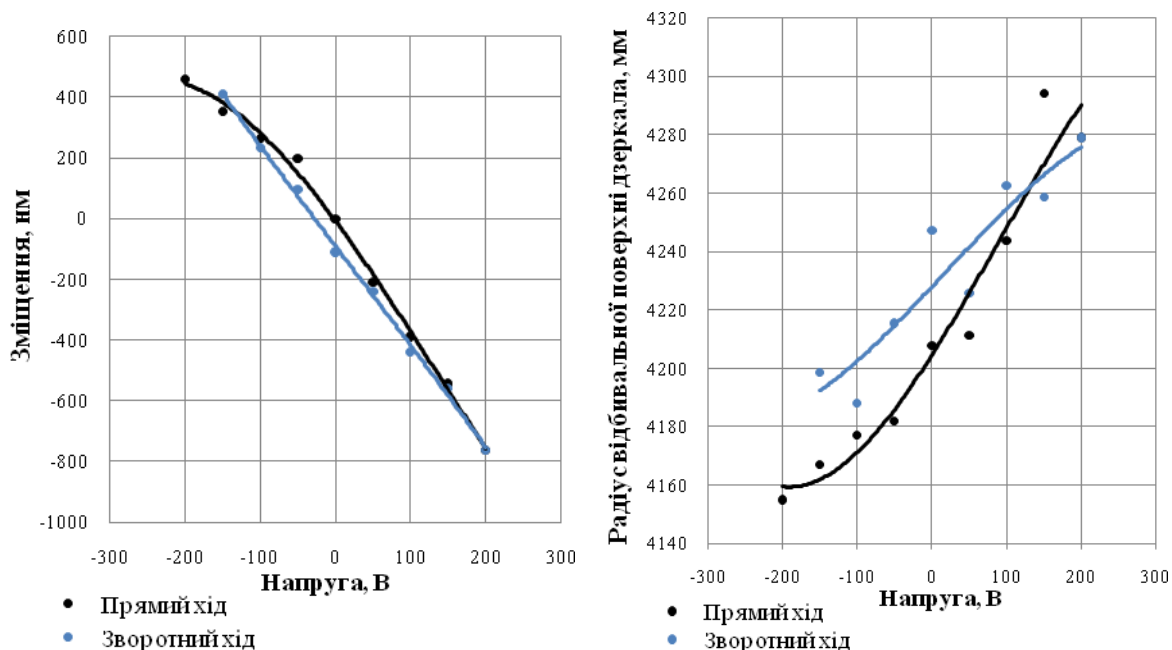


Рис. 4. Залежність зміщення відбивальної поверхні відносно посадкової поверхні від напруги (ліворуч) та залежність середнього радіуса кривизни відбивальної поверхні дзеркала від напруги (праворуч) для випадку двомембранного дзеркала

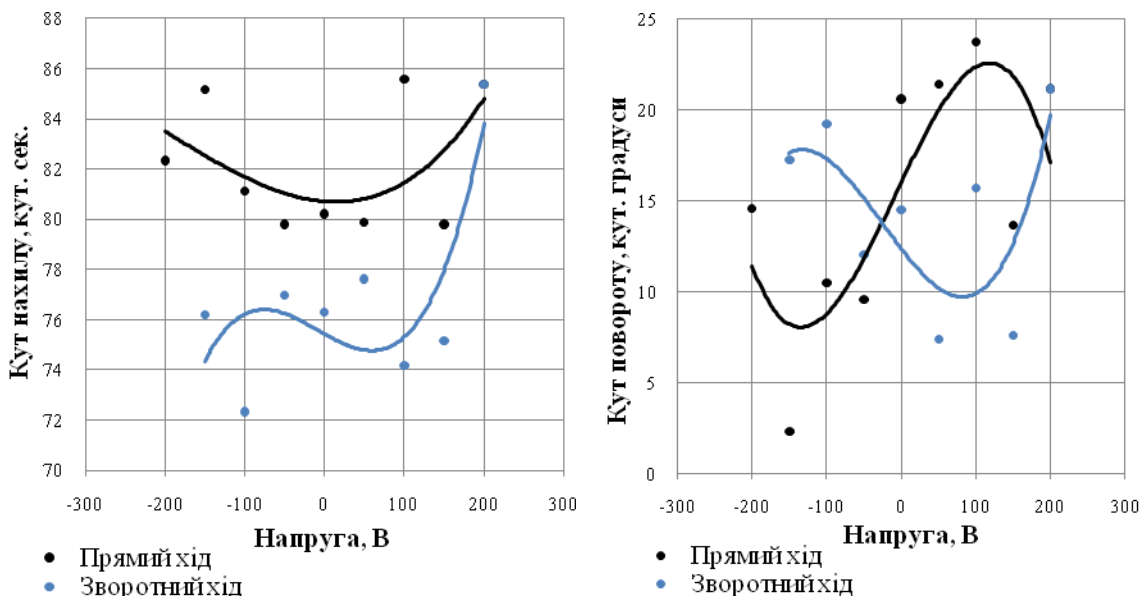


Рис. 5. Залежність кута нахилу відбивальної поверхні до посадкової поверхні від напруги (ліворуч) та залежність кута повороту проєкції нормалі відбивальної поверхні відносно посадкової поверхні від напруги (праворуч) для випадку двомембранного дзеркала

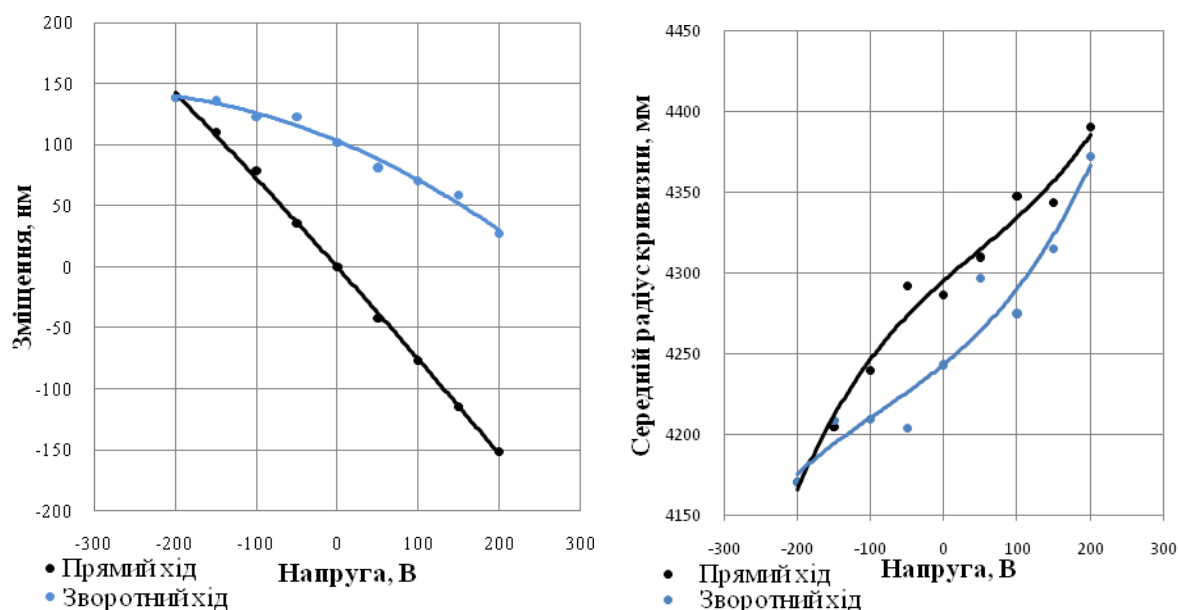


Рис. 6. Залежність зміщення відбивальної поверхні відносно посадкової поверхні від напруги (ліворуч) та залежність середнього радіуса кривизни відбивальної поверхні дзеркала від напруги (праворуч) для випадку одномембранного дзеркала

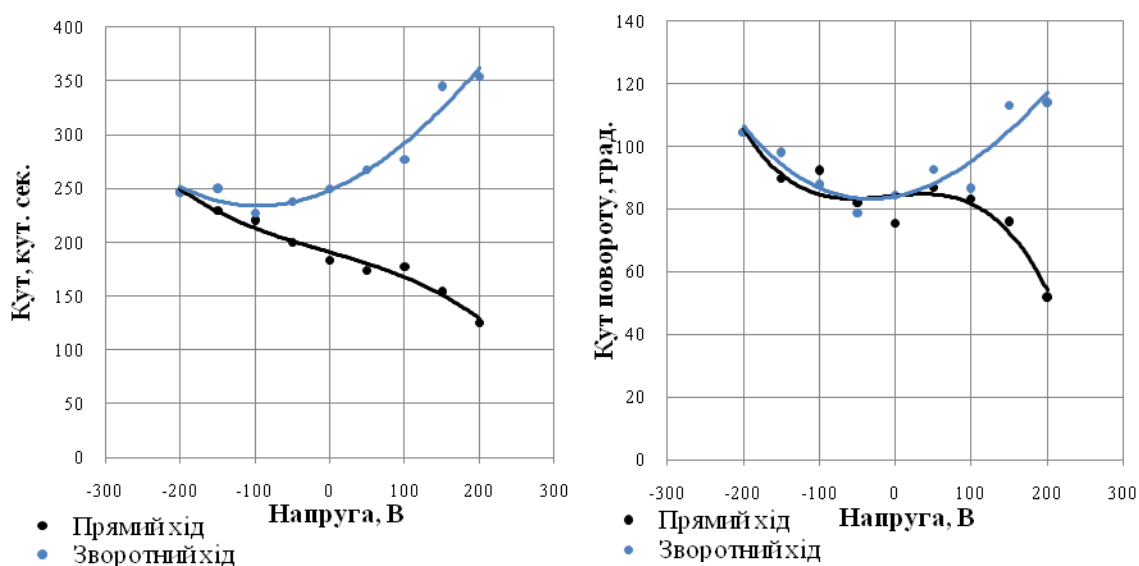


Рис. 7. Залежність кута нахилу відбивальної поверхні до посадкової поверхні від напруги (ліворуч) та залежність кута повороту проєкції нормалі відбивальної поверхні відносно посадкової поверхні від напруги (праворуч) для випадку одномембранного дзеркала

Ті ж висновки можна зробити дослідивши та порівнявши ексцентриситети поверхні обох типів конструкції дзеркал в залежності від прикладеної напруги (рис. 9).

Ексцентриситет – числова характеристика, що показує ступінь відхилення поверхні кінцевого перерізу від сферичності. Для сфери ексцентриситет наближається до нуля, а для еліпса – більше нуля, але менше одиниці. На рис. 9 видно, що значення ексцентриситету поверхні одномембранного дзеркала майже не змінюється

на відміну від двомембранного. Таким чином, форма поверхні одномембранного дзеркала зберігається на відміну від двомембранного, форма якого в залежності від прикладеної напруги витягується в еліпс у більшій чи меншій мірі.

Отже, двомембранна конструкція забезпечує значно вищу стабільність положення нормалі дзеркала. Особливістю одномембранної конструкції виявився великий діапазон переміщення, обумовлений її меншою жорсткістю,

а також збереження сферичності відбивальної

поверхні дзеркала.

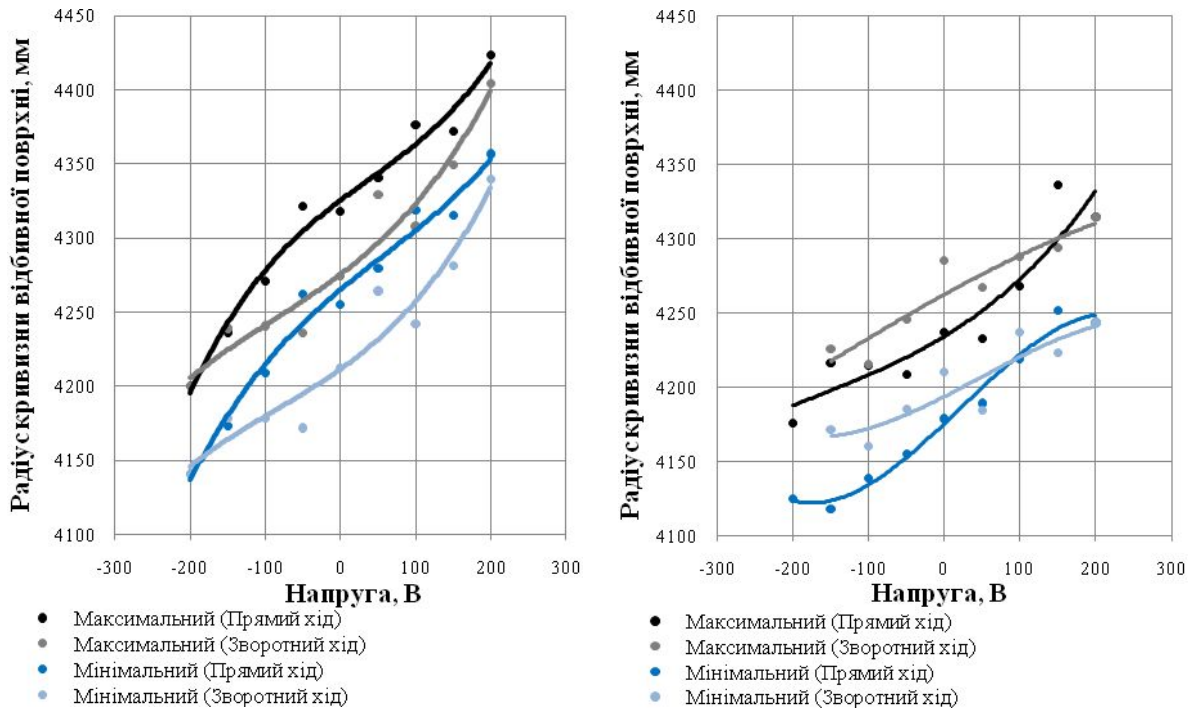


Рис. 8. Залежності максимального та мінімального радіуса кривизни від напруги у випадках одномембранного (ліворуч) та двомембранного (праворуч) дзеркал

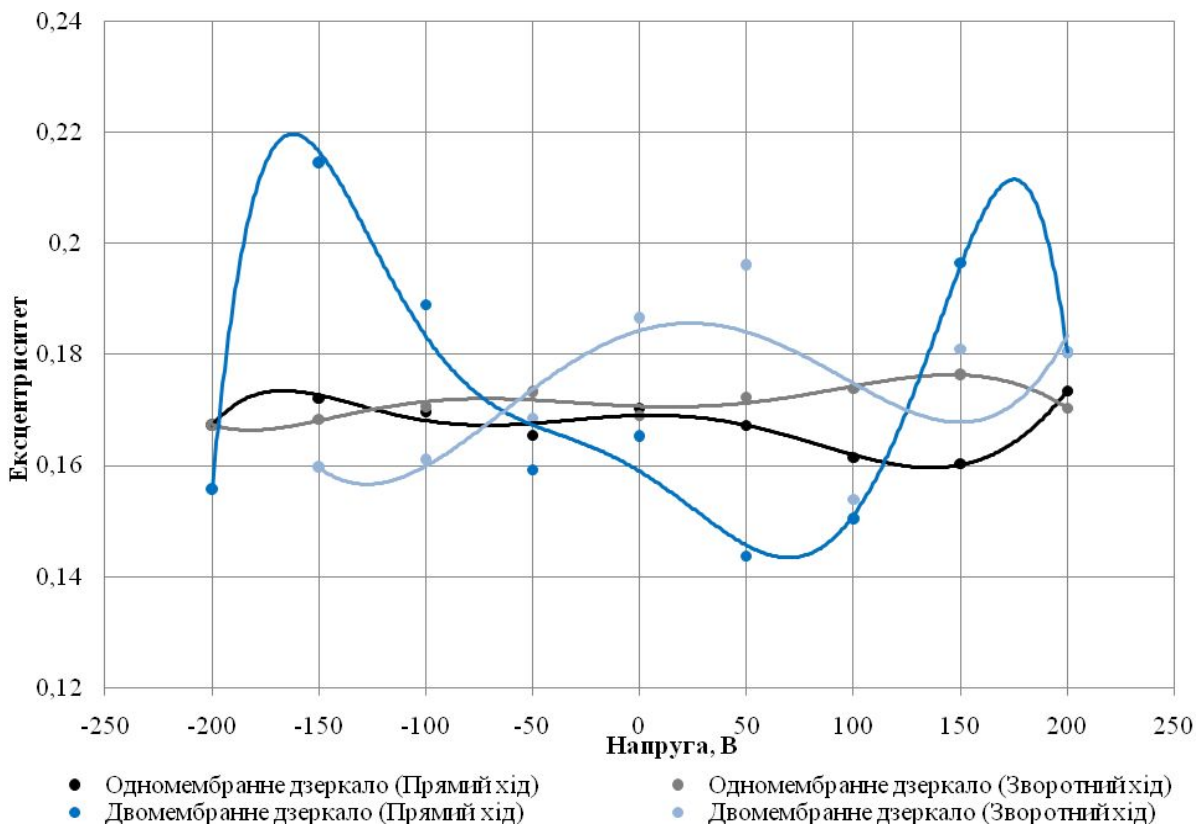


Рис. 9. Порівняльний графік залежності ексцентриситету поверхні дзеркала обох типів конструкції від напруги

Висновки

Виготовлені експериментальні зразки лазерних мембранних дзеркал, на прикладі яких зручно досліджувати їх характеристики. Вперше були проведені вимірювання квазидинамічних характеристик мембранних дзеркал прямим методом. Дані були оброблені, проаналізовані та обговорені

Були запропоновані та перевірені різні моделі розрахунку поверхонь дзеркала.

В процесі переміщення дзеркало зазнає деформації поверхні змінюється радіус кривизни поверхні і виникає нахил відбивальної поверхні дзеркала відносно посадкової поверхні з одночасним її поворотом відносно осі дзеркала.

Аналогічні характеристики були отримані і для одномембранної конструкції дзеркала. Проте двомембранна конструкція забезпечує значно вищу стабільність положення нормалі дзеркала до 15 кут. сек порівняно з одномембранною, яка в тому ж діапазоні зміщень дає нахил нормалі дзеркала до 2 кут. мінут.

В подальших дослідженнях планується дослідити вплив ефектів вібрації на динамічні характеристики дзеркал та їх поверхонь. А також заплановано дослідити прямими методами вимірювання зміну стабільності частоти кільцевого лазера в процесі руху дзеркала.

Література

1. Галутва Г. В. Селекция типов колебаний и стабилизация частоты оптических квантовых генераторов / Г. В. Галутва, А. И. Рязанцев. (под ред. М.Ф. Стельмаха). – М.: Связь, 1972.
2. Gleb V. Vdovin, Nicolas Kugler, Martin Schacht, Membrane deformable mirrors under cw laser load, Proc. SPIE 3762, Adaptive Optics Systems and Technology, 1999.

3. Hung-Tsang Tuan and Sheng-Lung Huang, Analysis of reentrant two-mirror nonplanar ring laser cavity, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 22, Issue 11, pp. 2476-2482, 2005.
4. C. Reinlein, M. Appelfelder, M. Goy, S. Gebhardt, N. Gutzeit, Testing of thermally piezoelectric deformable mirror with buried functionality, SPIE 8978, MEMS Adaptive Optics VIII, 2014.
5. Maud P. Langlois, James Roger P. Angel, Michael Lloyd-Hart, Stephen M. Miller, George Z. Angeli, High-order adaptive optics system with a high-density spherical membrane deformable mirror, Proc. SPIE 3762, Adaptive Optics Systems and Technology, 1999.
6. Brian G. Henderson, Justin D. Mansell, Laser beam shaping with membrane deformable mirrors, Proc. SPIE 7093, Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications VI, 2008.
7. Гнедой С. А. Управление параметрами излучения лазера на парах меди с помощью внутривибрационного адаптивного зеркала / С. А. Гнедой, А. В. Кудряшов, В. В. Самаркин, В. И. Шмальгаузен, В. П. Якунин // Квант. электр. – 1989. – N 9.
8. K.Nemoto, T.Fujii, N.Goto, T.Nayuki, Y.Kanai. Transformation of a laser beam intensity profile by a deformable mirror. Opt.Lett. 21, 1996.
9. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблемы расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979. – 328 с.
10. Кудряшов А.В. Гибкие зеркала на основе биморфного пьезоэлемента для задач адаптивной оптики. Канд. диссер. М.: МГУ, 1988. – 197 с.

УДК 621.757

Т. И. Гураль, Н. Е. Кирилюк, Н. И. Овчар, В. Н. Настич*Казенное предприятие специального приборостроения «Арсенал», г Киев, Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРКАЛА КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРА С ПЬЕЗОКОРРЕКТОРОМ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА БЕЛОГО СВЕТА «РЕЛЬЕФ»**

Объектом исследования являются сферические зеркала одно- и двухмембранной конструкции, которые являются элементами кольцевых лазеров. Такие лазеры используются для различных метрологических целей и изменение формы или положения зеркала резонатора лазера существенно влияет на стабильность частоты исходящего излучения.

Целью данной работы является исследование динамических характеристик (угловых и линейных смещений отражающей поверхности и изменение её формы) зеркал мембранной конструкции с помощью интерферометра белого света. Данные характеристики позволяют провести объективный анализ различных вариантов строения мембранного зеркала и оптимизировать его конструкцию. Были проведены исследования двух типов конструкций зеркал: одномембранного и двухмембранного. Результаты измерения параметров исследуемых образцов показали, что отражающая поверхность испытывает линейных и угловых смещений, а также изменяет радиус кривизны, а тип конструкции зеркала имеет существенное влияние на его динамические характеристики.

Ключевые слова: лазерные зеркала, кольцевой лазер, интерферометр белого света.

T. Hural, M. Kyryliuk, M. Ovchar, V. Nastich*SDP SE «Arsenal», Kyiv, Ukraine***RESEARCH OF QUASIDYNAMIC CHARACTERISTICS OF RING LASER MIRROR WITH PIEZOCORRECTOR USING WHITE LIGHT INTERFEROMETER “RELIEF”**

The object of investigation are spherical mirrors of one- and two-membrane design, which are elements of ring lasers. Such lasers are used for various metrological purposes. Change in a shape or position of the laser cavity mirror substantially affects the stability of the frequency of the emergent radiation.

The aim of this work is researching of the dynamic characteristics of the membrane mirror using white light interferometer. Dynamic characteristics are meant as linear and angular displacements of a reflecting surface and its shape deformation. These characteristics make it possible to carry out an objective analysis of the different variants of membrane mirror design and optimize it.

There were two mirrors design have been researched: one-membrane and two-membrane type.

The results of prototypes parameters measurement have shown that reflecting surface undergoes linear and angular displacements and changes its radius of curvature.

Keywords: laser mirrors, ring laser, white light interferometer.

*Надійшла до редакції
03 липня 2017 року*

*Рецензовано
17 липня 2017 року*

© Гураль Т. І., Кирилюк М. Є., Овчар М. І., Настіч В. Н., 2017

УДК 621.378.5:525.:535.8

**ПІДВИЩЕННЯ ГЛИБИНИ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛУ ЛАЗЕРНОГО
ДОПЛЕРІВСЬКОГО АНЕМОМЕТРА УЗГОДЖЕННЯМ РОЗСІЯНИХ
ХВИЛЬ ЗА ІНТЕНСИВНІСТЮ***Дивнич В. М.**Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна**E-mail: divnym@gmail.com*

В роботі підвищення глибини модуляції сигналу лазерного доплерівського анемометра (ЛДА) та точності вимірювання швидкості пропонується проводити за рахунок забезпечення узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю.

Для цього замість апертурної діафрагми пропонується встановлювати фільтр, що не пропускає до фотоприймача розсіяне випромінювання з низької ступеню узгодження.

Для визначення форми фільтру складена програма за допомогою якої можна за теорією Лоренца-Мі розрахувати складові розсіяних хвиль, значення коефіцієнта амплітудного узгодження та відності доплерівського сигналу.

Представлені форми фільтрів для ЛДА, що випускаються фірмами TSI Inc. та Intelligent Laser Application GmbH ILA GmbH.

Ключові слова: *лазер, анемометр, доплерівський, фільтр, інтенсивність.*

Вступ

В авіаційній, суднобудівній, космічній та інших галузях науки і техніки для дослідження потоків газів та рідин знайшли застосування лазерні доплерівські анемометри (ЛДА), які порівняно із традиційними засобами виміральної техніки мають вищу точність, швидкість дії та чутливість. ЛДА застосовуються для вимірювання швидкості дозвукових та надзвукових аеродинамічних потоків під час дослідження нових типів літальних апаратів та елементів їхньої конструкції, для дослідження

характеристик газових турбін, ударних хвиль, характеру течії рідини у пристінній області та в інших сферах [1].

ЛДА виготовляються рядом фірм, до яких відносяться TSI Inc. [2] (США) та Intelligent Laser Application GmbH ILA GmbH [3] (Німеччина).

Прилади, що пропонується виробниками, призначені для різноманітних застосувань в науці та техніці.

Особливістю роботи ЛДА є те що він безпосередньо вимірює не швидкість потоку, а швидкість мікрочастинки, що рухається одночасно