

## АДАПТИВНАЯ ОПТИКА С МАГНИТНО-ДЕФОРМИРУЕМЫМ ЗЕРКАЛОМ: ПРИЛОЖЕНИЯ К СИСТЕМАМ КОРРЕКЦИИ ЗРЕНИЯ

**В** данной работе [1] авторы описывают магнитно-деформируемое зеркало MIRAО-52 (МДЗ) с 52 магнитными актюаторами, разработанное для офтальмологии. Оно позволяет детально воспроизводить поверхности, описываемые полиномами Цернике до пятого порядка. Функции влияния МДЗ демонстрируют линейность его характеристик в зависимости от приложенного напряжения и высокую точность формирования поверхности.

Использование адаптивной оптики (АО) для коррекции глаз [2] относится как к изображению на сетчатке, так и к изучению влияния aberrаций на зрение. В первом случае почти все методы офтальмологии использовали АО для улучшения качества и разрешающей способности изображения на сетчатке: улучшения освещенности изображения глазного дна [3,4], сканирующей лазерной офтальмоскопии [5,6], офтальмологической оптической когерентной томографии (ОКТ) [7–10]. АО играла важную роль в последние годы и при исследовании влияния aberrаций в глазу [11–16].

Система АО состоит из двух основных элементов: датчика волнового фронта (ДВФ) и корректирующего устройства, связанного с вычислительным блоком. Хотя для измерения aberrаций были предложены разные методы, датчик Шака-Гартмана (ДВФ-ШГ) [17], применение которого для анализа глаз впервые было описано в работе [18], является одним из наиболее широко используемых [19]. Для коррекции глазных aberrаций были предложены различные устройства, используемые в офтальмологических приложениях.

Первую классификацию этих устройств можно провести, разделив их на две группы на основе физических принципов работы: пространственные модуляторы света на жидких (нематических) кристаллах (ЖК) и деформируемые зеркала. В первой группе модуляция фазы осуществляется изменени-

ем показателя преломления (изменяющего длину оптического пути), возникающим в нематическом ЖК в ответ на изменение приложенного электрического поля [20]. Последнее поколение этих устройств, работающих в отраженном свете, дает ряд преимуществ при использовании их в глазах человека [10,21], учитывая удобство их практической реализации и калибровки, а также повышенную плотность независимых пикселей, которые генерируют требуемые фазовые профили.

Амплитуда, или размах, запрограммированной фазы может быть очень большим. Aberrации высокого порядка, означающие фазовые искажения на высоких пространственных частотах, могут быть аккуратно сгенерированы с помощью ЖК-устройств. Ограничением корректоров на ЖК в офтальмологии является их медленная реакция (порядка 0,25 с). Кроме того, они требуют использования поляризованного света и наличия умеренного поглощения света. При применении полихроматического света в таких устройствах, использующих свертывание фазы, различные длины волн не могут быть промодулированы одновременно.

Другой тип корректоров – деформируемые зеркала – состоят в основном из зеркально отражающей поверхности, форма которой может управляться с помощью актюаторов. Такую поверхность можно составить из независимых (сегментированных) зеркал или использовать непрерывную повер-

## ОБ АВТОРАХ

E.J.Fernandez, enriquej@um.es;  
 Laurent Vabre, lvabre@mesio.g.obspm.fr;  
 Boris Hermann, HermannB@cardiff.ac.uk;  
 Angelika Unterhuber, UnterhuberA@cardiff.ac.uk,  
 Boris Považay, PovazayB@cardiff.ac.uk;  
 Wolfgang Drexler, DrexlerW@cardiff.ac.uk

хность. Сегментированные зеркала имеют недостаток, связанный с потерями энергии, вызванными наличием зазоров между смежными сегментами и перераспределением энергии, вызванным дифракционными эффектами от каждого сегмента. Они, как правило, используются в качестве зеркал астрономических телескопов с очень большим диаметром зеркал. Определенное преимущество сегментированных зеркал (по сравнению с непрерывным зеркалом большого диаметра) – их относительная дешевизна и возможность простой замены в случае повреждения. Для офтальмологических применений предпочтительно использовать непрерывные зеркальные мембраны. Среди этого типа корректоров существуют различные деформируемые зеркала, зависящие от того, как эти мембраны деформируются – то есть какие физические принципы формирования гибкой поверхности используются.

Для глаз наиболее широко используются деформируемые зеркала с электрокерамическими цилиндрическими актюаторами, основанными на пьезоэффекте и расположенными под алюминированной стеклянной поверхностью [3,5,8,22]. Эта технология работает практически без гистерезиса и имеет большую скорость отклика (частоты порядка килогерц). Их эффективный размах 8 мкм, а число актюаторов достигает 100. Эти актюаторы не могут быть установлены плотно, так как имеют относительно большой диаметр (от 40 до 70 мм).

Другие биморфные зеркала, состоящие из пьезокерамического диска, связанного с твердой подложкой, с актюаторами, занимающими достаточно большую площадь, используются для коррекции aberrаций низкого порядка благодаря уменьшенному числу независимых актюаторов (обычно <20) [9,14]. Они обеспечивают большой размах, но ограничены гистерезисом, уменьшающим точность работы устройств.

Для глаз можно использовать и электростатически деформируемые зеркала [2,7,11,13,23–27], которые на сегодня наиболее экономически эффективны. В этом случае актюаторы фактически являются электродами, возбуждающими электростатическую силу давления на деформируемую мембрану. Гистерезис при этом фактически отсутствует, но амплитуда деформации ограничена (обычно <6 мкм). Другими возможными для глаз корректорами могут быть микроэлектромеханически деформируемые зеркала [6,28]. Как и в предыдущем случае, они используют электрические силы для формирования поверхности зеркала, которые механически смещают

актюаторы. Этот подход допускает наибольшую плотность упаковки (до 1000 актюаторов диаметром 3–4 мм). При размахе в 6–8 мкм они демонстрируют высокую линейность, отсутствие гистерезиса и низкую стоимость в расчете на 1 актюатор.

Доступные сегодня на рынке деформируемые зеркала имеют ограниченную возможность коррекции окулярной aberrации даже для нормальных глаз. Это особенно драматично, учитывая распространенность aberrаций низкого порядка: дефокусировки и астигматизма. Кроме того, стоимость этих технологий все еще высока, если задуматься о возможности массового использования АО в коммерческой офтальмологии.

В этой работе представлено новое деформируемое зеркало, использующее магнитные силы для управления формой гибкой мембраны. Эта новая технология имеет ряд преимуществ по сравнению с другими. Мы опишем и продемонстрируем устройство для окулярной оптики. Оно позволяет полностью корректировать aberrации, используя полихроматическое освещение в близкой инфракрасной области, а также одновременно корректировать монохроматическую и хроматическую aberrации (ХА) путем использования МДЗ с линзой ахроматора.

## МЕТОДЫ

## Организация эксперимента

Для тестирования МДЗ была спроектирована оптическая система, позволяющая корректировать окулярные aberrации человека. Организация эксперимента состояла в нужной компоновке линз и сферических зеркал. Система оптически сопрягала выходной зрачок глаза, заданного виртуальным изображением ирисовой диафрагмы через роговицу, с плоскостью МДЗ, ДВФ и линзы ахроматора. Сопряжение достигалось с помощью телескопов. Они формировались двумя положительными линзами или сферическим вогнутым зеркалом и



Рис. 1 Схема системы АО для глаза. Оптически сопряженные плоскости указаны штриховыми линиями

положительной линзой (альтернативный вариант). Вогнутые зеркала не имеют ХА и обратных отражений, но вносят другие aberrации (в основном астигматизм и кому), будучи реализованы как внеосевые. Все линзы – стандартные ахроматические дублеты для работы в ближней ИК-области.

Эта система и ее основные компоненты показаны на рис.1. Сопряженные плоскости помечены буквами P<sub>i</sub>, а направление света показано стрелками. Абсолютные значения усиления помеченных плоскостей с плоскостью глазного дна равны 1, 2 и 0,5 для линзы ахроматора, МДЗ и ДВФ, соответственно. Система воспринимает входной зрачок в плоскости глазного зрачка диаметром 7,3 мм. Две различные подсистемы используются в этой системе для освещения. Гелий-неоновый лазер с длиной волны 632,8 нм используется для юстировки, создавая в системе хорошо коллимированный пучок света фактически без aberrаций. Свет вводится в аппарат через расщепитель пучка (с пропусканием 92%), расположенный перед исследуемым глазом.

Вторая подсистема используется для освещения сетчатки объекта исследования с помощью вышеупомянутого расщепителя, позволяя проводить измерения и коррекцию окулярных aberrаций в системе. Источник света представлен компактным, не содержащим призм Ti-сапфировым лазером с синхронизацией мод. Этот тип лазеров с линзами Керра создает сглаженный сверхширокий спектр (большой мощности и высокого оптического качества) в ближней ИК-области. Он генерирует импульсы с частотой повторения 110 МГц и спектром шириной 130 нм (FWHM), центрированным в точке 800 нм [29]. Свет этого источника вводится в одномодовое оптическое волокно (ОВ) длиной 100 м, чтобы растянуть импульсы. Использование ОВ предохраняет сетчатку от возможного повреждения фемтосекундными импульсами, генерируемыми лазером, обеспечивая дисперсионное растягивание импульса до длины в сотни пикосекунд. Это приводит к снижению пиковой интенсивности импульса на несколько порядков. Благодаря тому, что лазер работает с частотой повторения 110 МГц, генерируемый им свет можно рассматривать как непрерывный [30].

На другом конце ОВ, соединенном с аппаратурой, установлен линзовый триплет, коллимирующий пучок света для освещения тестируемого глаза. Коллиматор монтируется на специальной платформе, допускающей трехмерное позиционирование. Диаметр используемого пучка ограничен 1 мм с помощью диафрагмы, установленной перед коллиматором. Возможных отражений света от роговицы во время эксперимента, влияющих на показания ДВФ, можно избежать путем смещения коллиматора. В системе использовался коммерческий ДВФ-ШГ (HASO 32 OEM, Imagine Eyes) для измерения окулярных aberrаций и управления МДЗ. Этот датчик состыковывался с ПЗС-камерой и массивом (32×32) из микролинз, прикрепленным к камере, что делало прибор компактным. Максимальный диаметр зрачка, воспринимаемый ДВФ,

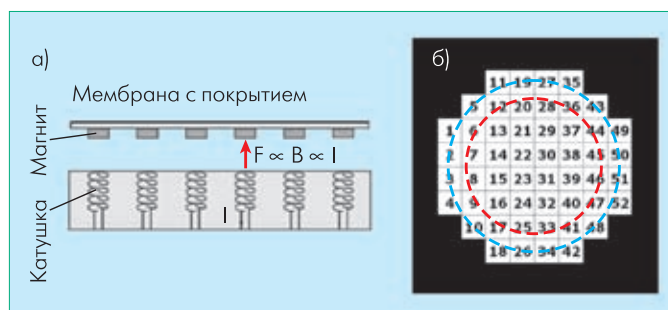


Рис.2 а – Схема МДЗ MIRA0-52. Магниты фиксируются под мембраной МДЗ и вызывают перемещение мембраны вверх и вниз в зависимости от приложенного напряжения; б – распределение актюаторов; штриховая линия имеет диаметр 15 мм, пунктирная – 11,89 мм

равен 3,65 мм, волновой фронт в этом случае собирался 800 микролинзами (размер каждой квадратной линзы составлял 0,114 мм). Калибровка датчика проводилась изготовителем.

### Магнитно-деформируемое зеркало

Новое МДЗ использовалось для коррекции окулярных aberrаций. Активная часть зеркала – гибкая мембрана, деформируемая 52 магнитными актюаторами. Размер такого зеркала (без кабелей и электронного привода) составляет 6,9×6,4×2,8 см. Серебряное покрытие создает высокую отражательную способность как в видимой, так и в ИК-области. На рис.2а представлена схема МДЗ в разрезе. Напряжение, приложенное к обмотке, создает магнитное поле, двигая магнит в направлении, соответствующем знаку приложенного напряжения. Сила, создаваемая между актюатором и мембраной, пропорциональна магнитному полю, созданному внутри катушки, а поле прямо пропорционально току в катушке. Следовательно, сила давления актюатора линейно зависит от тока.

Распределение актюаторов под МДЗ показано на рис.2б. Все 52 актюатора (расстояние между ними 2,5 мм) размещены на площади диаметром 17 мм. Зеркальная поверхность покрывает площадь диаметром ~15 мм, ограниченную синим контуром. Согласно производителю, исходная неровность поверхности МДЗ не превышала 0,1 мкм (СКВ) по всей площади зрачка. Область, используемая для тестирования МДЗ и коррекции окулярных aberrаций, ограничена на рис.2б красным контуром. Ее диаметр соответствует примерно 11,89 мм. Он был выбран так, чтобы некоторый кольцевой набор актюаторов был вне интересующей нас зоны. Это дает возможность краям проектируемого зрачка лучше воспроизводить высокие частоты. Уменьшение управляемой области также уменьшает амплитуду или размах деформаций мембраны. Зеркало приводится в действие двумя электронными приводами. Первый привод получает цифровую информацию (кодирующую величину напряжения) от ПК и преобразует ее в аналоговую величину. Второй (связанный с 52 усилителями) – усиливает и адресует 52 аналоговых напряжения соответствующим катушкам.

Продолжение см. в следующем номере.

