

УДК 681.7.062  
EDN: VGTXLА

PACS: 42.79.Bh



## Сравнительный анализ современных корректоров волнового фронта для адаптивных оптико-электронных систем (обзор)

П. Ц. Люй, Д. Г. Денисов, А. А. Сахаров, И. В. Животовский, В. Е. Карасик

*Проведены обзор и анализ существующих корректоров волнового фронта оптического излучения. Приведены основные преимущества и недостатки различных корректоров волнового фронта. Проведено сравнение различных видов корректоров по типовым характеристикам для решения различных задач современной оптоэлектроники и фотоники.*

*Ключевые слова:* адаптивная оптика, корректор волнового фронта, адаптивное зеркало.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-6-593-

### Введение

Атмосфера в общем случае является неоднородной [1]. Когда оптическое излучение проходит сквозь среду, которая характеризуется показателем преломления, зависящим от пространственных координат и времени, траектории световых лучей изменяются, а следовательно, изменяется форма волновых фронтов. Флуктуации показателя преломления атмосферы зависят от ветра, тепловых конвекционных токов воздуха, гравитационного поля Земли, влажности и т. д. Эти факторы затрудняют передачу лазерного излучения через слой атмосферы, искажая излучение, нарушая его когерентность и уменьшая видимое разрешение объектов наблюдения.

Люй Петр Цзяншэнович, аспирант.

E-mail: luypetr@activeoptics.ru

Денисов Дмитрий Геннадьевич, доцент, к.т.н.

E-mail: denisov\_dg@mail.ru

Сахаров Алексей Александрович, старший преподаватель.

Животовский Илья Владимович, доцент, к.т.н.

Карасик Валерий Ефимович, профессор, д.т.н.

МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 17 октября 2022 г.

© Люй П. Ц., Денисов Д. Г., Сахаров А. А.,  
Животовский И. В., Карасик В. Е., 2022

С целью частичного устранения данных эффектов на сегодняшний день в мировой практике применяют адаптивные оптико-электронные системы, представляющие из себя контур обратной связи, в котором взаимосвязаны детектор оптического сигнала и корректор излучения.

Корректоры излучения являются важнейшим компонентом адаптивных систем, который в зависимости от своих характеристик выбирается согласно поставленной задаче. Они представляют собой узлы оптических систем, способные изменять волновой фронт проходящего или отражающегося от них излучения и характеризующиеся характерными габаритами, размерами корректирующих элементов, скоростью работы, особенностями при эксплуатации и другими параметрами. Авторами данной работы поставлена цель провести обзор существующих на сегодняшний день образцов современных видов корректоров волнового фронта, применение которых в оптико-электронных системах адаптивной оптики представляется возможным.

### Корректоры волнового фронта оптического излучения

В качестве корректора волнового фронта наиболее часто используют различные конфи-

гурации адаптивных зеркал с разными технологиями их реализации и управления параметрами волнового фронта оптического излучения. Зеркала могут быть как с сегментированной [2], так и со сплошной отражающей поверхностью [3]. Сегментированное представляет собой толстую пластину, к которой монтируются управляющие актюаторы, после чего к обратной стороне каждого из актюаторов приклеивается маленькое зеркало. При использовании подобных фазовых корректоров с сегментированной отражающей поверхностью компенсация искажений волнового фронта происходит при помощи небольших управляющих элементов, которые двигаются независимо друг от друга. У корректоров волнового фронта со сплошной зеркальной поверхностью управляющие элементы расположены по определенной геометрии под отражающей подложкой. Подача управляющих сигналов на актюаторы позволяет получить необходимую форму поверхности подложки.

Современные адаптивные зеркала по принципу действия можно разделить на следующие виды: механические [4], мембранные [5], микроэлектромеханические (МЭМС) [6], магнитострикционные [7], термомодеформируемые [8] и биморфные [9].

Механическое деформируемое зеркало состоит из жесткого основания, в котором установлены механические актюаторы. К обратной стороне актюаторов приклеивается тонкая отражающая подложка. Принцип работы механических зеркал заключается в том, что необходимая форма отражающей поверхности создается деформацией зеркала в области расположения актюатора с помощью небольших шаговых электродвигателей и специальных механических конструкций. Основными достоинствами этих корректоров является большой динамический диапазон деформации подложки, низкий гистерезис. После выставления актюаторов в необходимые позиции напряжение или ток не нужно поддерживать, что является преимуществом по сравнению с пьезоэлектрическими зеркалами. Главным же недостатком такого типа корректоров является низкая рабочая скорость порядка 1 Гц, из-за чего невозможно их применение для коррекции искажений излучения от атмосферной турбулентности. Подобные

зеркала широко используются для коррекции статических и медленноменяющихся аберраций мощных лазеров [4].

Зеркала мембранного типа состоят из силиконовой мембраны, покрытой с двух сторон нитридом кремния. На мембрану наносится алюминиевое или золотое отражающее покрытие, под мембраной на небольшом расстоянии устанавливаются управляющие актюаторы. Форма поверхности зеркала изменяется путем прикладывания напряжений к электродам за счет электростатического притяжения заземленного отражающего покрытия. Преимуществами являются малый размер апертуры с относительно большой плотностью управляющих элементов и невысокая стоимость таких зеркал, что позволяет использовать их для задач атмосферной оптики и исправления аберраций оптических систем. Недостатками же являются крайняя хрупкость конструкции, необходимость прикладывать напряжения смещения с различным знаком и низкий порог разрушения подложки под действием лазерного излучения (не более 100 Вт).

МЭМС-зеркало состоит из кремниевой подложки, на поверхности которой нанесены электроды по определенной маске, затем послойно наносится матрица актюаторов. После этого формируется мембранная подложка с отражающим покрытием [6]. Форма зеркала изменяется посредством электростатического притяжения между электродами под напряжением и электрически заземленной мембраной (рис. 1). Среди преимуществ конструкции стоит отметить очень высокое пространственное разрешение управляющих элементов, отсутствие гистерезиса и низкая стоимость конечного изделия по сравнению с остальными деформируемыми зеркалами. Однако существуют следующие недостатки: низкая надежность конструкции, невозможность изготовления зеркал с большой апертурой и ограниченная амплитуда деформации поверхности. С учетом особенностей возможно их применение в большинстве видов задач адаптивной оптики.

На данный момент разрабатываются корректоры волнового фронта на основе постоянных магнитов – магнитострикционные зеркала. Они представляют собой сплошную мембранную подложку небольшой толщины, к кото-

рой с неотражающей стороны приклеиваются постоянные магниты. Поверхность зеркала деформируется посредством магнитного поля, изменяющего расстояния между актюаторами и катушками, на которые подаются управляющие сигналы. Магнитострикционные зеркала широко применяются для астрономических задач, а также для коррекции aberrаций волнового фронта в задачах офтальмологии. Преимуществами таких зеркал являются высокая надежность, возможность заменить испорченные актюаторы, очень высокая точность воспроизведения волнового фронта и временную стабильность при работе. Однако повсеместное использование таких деформируемых зеркал затруднено высоким энергопотреблением, сложностью изготовления, непрочностью отражающей подложки и относительно высокой стоимостью.

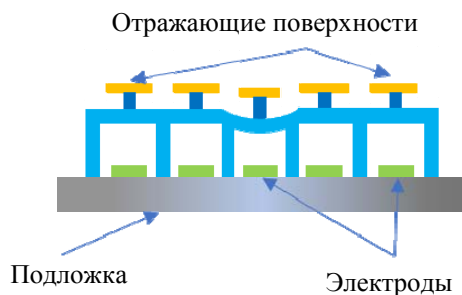


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции МЭМС-зеркал

Принцип действия термдеформируемых зеркал основан на тепловом расширении резисторов, прикрепленных к гибкой подложке, под действием управляющего тока [8]. К преимуществам зеркала относятся простота изготовления и разнообразие исполнительных элементов. Недостатками являются низкое

быстродействие системы, невысокая точность позиционирования и низкая ремонтпригодность. Возможно применение в задачах коррекции медленноменяющихся процессов с относительно небольшой требовательностью к точности.

Перспективными в настоящее время являются биморфные адаптивные зеркала. Под таким названием в научной литературе принято называть ряд зеркал: униморфные, биморфные, симметричные биморфные, «кооперативные» биморфные (рис. 2). Униморфные состоят из одной активной пьезопластины, соединенной с пассивной отражающей подложкой. Биморфные зеркала состоят из двух противоположно действующих слоев пьезоэлемента. Симметричные биморфные состоят из двух слоев пьезоэлемента, зажатых между двумя пассивными слоями. «Кооперативные» биморфные зеркала имеют два слоя пьезоматериала, действующих в одном направлении. На внешней поверхности пьезопластины размещена сетка электродов, при подаче напряжений на которые под действием обратного пьезоэлектрического эффекта пьезокерамическая пластина расширяется или сжимается и происходит деформация поверхности зеркала [9]. Среди преимуществ стоит отметить высокую скорость работы и высокая точность при воспроизведении aberrаций низших порядков (шаг деформации порядка  $0,01\lambda$  для длины волны  $\lambda = 650$  нм), что позволяет применять такой тип зеркал для задач астрономической оптики, коррекции лазерного излучения и фокусировки оптического излучения. Недостатками являются относительно узкий динамический диапазон и гистерезис при эксплуатации пьезокерамики.

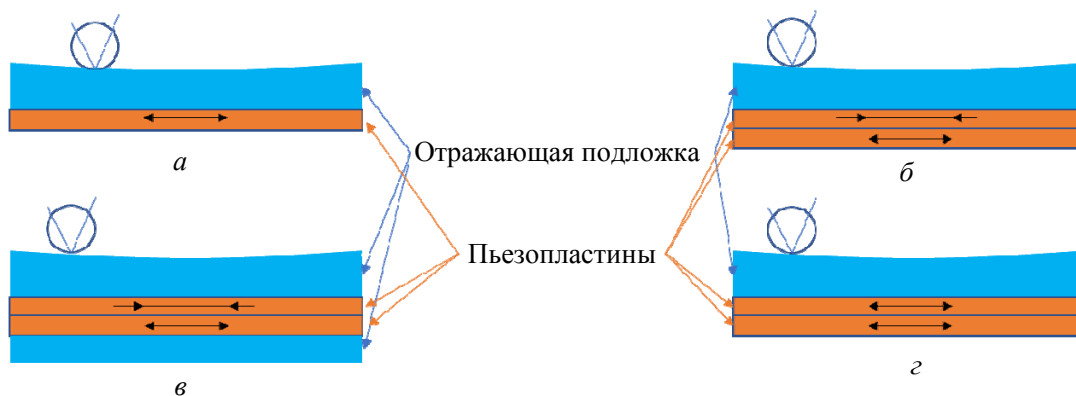
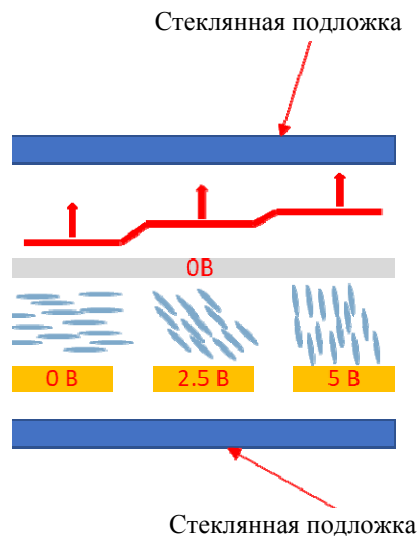


Рис. 2. Различные виды биморфных деформируемых зеркал: а – униморфные; б – биморфные; в – симметричные биморфные; г – «кооперативные» биморфные

Стоит отметить применение жидкокристаллических модуляторов оптического излучения в качестве модуляторов волнового фронта. Принцип действия подобных устройств основан на фазовой задержке, вносимой жидкими кристаллами при их переориентации от определенного напряжения [10]. Когда направление поляризации входного света параллельно направлению молекул жидких кристаллов, то изменяется показатель преломления жидких кристаллов, вследствие этого происходит фазовая модуляция оптического сигнала (рис. 3). Достоинствами ЖК-модуляторов света являются высокое пространственное разрешение управляющих элементов, простота эксплуатации, низкая потребляемая мощность. Недостатками стоит признать нелинейность, низкое время отклика и высокую зависимость от поляризации входного излучения, а из-за диапазона смещения фазы излучения в пределах  $2\pi$  ЖК-модуляторы невозможно использовать для коррекции больших величин искажений волнового фронта в задачах атмосферной оптики. За счет этих особенностей ЖК-модуляторы стали одним из самых популярных корректоров волнового фронта для управления лазерным излучением.



**Рис. 3.** Принцип действия жидкокристаллического модулятора света

Также существует ряд менее распространенных корректоров волнового фронта. Одним из таких устройств является устройство с матрицей микрзеркал (Digital Micromirror

Device – DMD). Впервые данная технология была представлена в конце 80-х годов XX века. Каждый пиксель DMD является оптомеханическим элементом, который способен отражать свет в двух стабильных направлениях на угол  $+12$  или  $-12$  градусов в зависимости от поданного напряжения к каждому микрзеркалу, что позволяет управлять падающим лазерным излучением [11]. Несмотря на высокое пространственное разрешение управляющих элементов и относительную простоту изготовления подобное устройство имеет ряд неоспоримых недостатков: невозможность работы с мощным лазерным излучением, потеря части излучения из-за эффектов дифракции.

Немецкими учеными было разработано пневматическое зеркало для формирования выпуклой или вогнутой формы отражающей поверхности [12]. Принцип действия этого корректора волнового фронта основан на приложении пневматического или гидравлического давления к обратной стороне зеркальной подложки, которая представляет собой тонкую мембрану из кварцевого стекла с высоким отражающим покрытием. Она приклеивается к кольцу на краях для увеличения жесткости конструкции. Затем эта конструкция устанавливается на латунном основании, в котором находится пневматический электрически контролируемый клапан. Максимальное значение радиуса кривизны поверхности, полученное при помощи такого зеркала, лежало в диапазоне от минус  $0,7$  до плюс  $0,3 \text{ м}^{-1}$ .

Одним из перспективных устройств по управлению и коррекции лазерного излучения является адаптивная линза. Впервые принципиальная схема была показана в работе российских исследователей в 1999 г. [13]. Разработанная активная линза состоит из стеклянной линзы, тонкой стеклянной пластинки с приклеенным к ее поверхности пьезокерамическим кольцом и помещенной между ними иммерсионной жидкости. Использование иммерсионной жидкости в конструкции увеличивает величину изменения волнового фронта пучка, прошедшего через линзу.

Также разрабатываются устройства для управления оптическим излучением с применением различных принципов, которые сочетают в себе достоинства других корректоров волнового фронта. Например, учеными из

Германии в 2013 г. было разработано термодеформируемое пьезоэлектрическое зеркало. Принцип его действия построен на использовании элемента Пельтье для управления общей кривизной поверхности зеркала и пьезоэлектрических актюаторов для коррекции высших аббераций лазерного излучения. Под действием падающего лазерного излучения происходит нагрев отражающей поверхности, что приводит к локальной кривизне зеркальной подложки, подача напряжения на активную опрау с элементом Пельтье вызывает изменение кривизны поверхности зеркала в обратную сторону из-за охлаждения подложки, позволяя компенсировать крупномасштабные абберации волнового фронта [14]. Активная апертура зеркала составляла 20 мм с толщиной подложки 200 мкм, сделанной из низкотемпературной совместно обжигаемой керамики. Недостатком данного типа корректоров, как и термодеформируемых зеркал, является невозможность коррекции лазерного излучения в реальном времени из-за большого времени отклика элементов Пельтье при подаче электрического тока.

### Заключение

На сегодняшний день существует большое число различных видов корректоров волнового фронта с разными характеристиками. Деформируемые адаптивные зеркала в целом характеризуются удобством управления, относительно простой зависимостью деформации рабочей поверхности от управляющего сигнала, возможность создавать смещение фазы волнового фронта больше чем на  $2\pi$ . В частности, биморфное адаптивное зеркало обладает сплошным профилем отражающей поверхности, перекрытием соседних зон деформации от работы одиночных электродов и малым шагом деформации на поверхности порядка  $0,01\lambda$  для  $\lambda = 650$  нм.

За счет своих характеристик одни корректоры волнового фронта больше подходят для одних задач, другие – для других. Для задачи фокусировки лазерного излучения подходят корректоры, устойчивые к лазерному излучению: в большей степени механические деформируемые зеркала и ЖК-модуляторы све-

та, в меньшей степени зеркала МЭМС и бифорфные. Для задач атмосферной оптики подходят зеркала мембранного типа, МЭМС, магнитострикционные и биморфные. Для задач, требующих высокое пространственное разрешение, подходят или медленные, но надежные ЖК-модуляторы, или быстрые, но менее надежные МЭМС-зеркала, или надежные, точные, но сложные в изготовлении магнитострикционные зеркала, или мало распространённые устройства с матрицей микрозеркал.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолаева Е. В., Зверев В. А., Филатов А. А. Адаптивная оптика. – СПб: НИУ ИТМО, 2012.
2. Glecker A., Markason D., Ames G. Pamela // Active and Adaptive Optical Components. 1991. Vol. 1543. P. 176.
3. Wizinowich P. // IEEE Instrumentation and measurement magazine. 2005. Vol. 8(2). P. 12.
4. Lefaudeux N., Levecq X., Dovillaire G., Ballesta J., Lavergne E., Sauvageot P., Escolano L. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2011. Vol. 653(1). P. 164.
5. Yellin M. // Proc. SPIE. 1976. Vol. 75. P. 97.
6. Bifano T. // Nature Photon. 2011. Vol. 5. P. 21.
7. Salinari P., Del Vecchio C., Biliotti V. "A study of an adaptive secondary mirror", Proceedings of the ICO-16 (International Commission for Optics) Satellite Conference on Active and adaptive optics, p. 247, 1993.
8. Lück H., Müller K.-O., Aufmuth P., Danzmann K. // Optics Communications. 2020. Vol. 175(4-6). P. 275. doi:10.1016/s0030-4018(00)00468-5
9. Samarkin V., Alexandrov A., Jitsuno T., Romanov P., Rukosuev A., Kudryashov A. // Quantum Electronics. 2015. Vol. 45. № 12. P. 1086.
10. Ivanova N. L., Onokhov A. P., Chaika A. N., Resnichenko V. V., Yeskov D. N., Gromadin A. L., Feoktistov N. A., Beresnev L. A. Pape D. R. // Advances in Optical Information Processing VII. 1996. Vol. 2754. P. 180.
11. Introduction to  $\pm 12$  Degree Orthogonal Digital Micromirror Devices (DMDs). <http://www.ti.com/lit/an/dlpa008b/dlpa008b.pdf>
12. Piehler Stefan, Dietrich Tom, Wittmüss Philipp, Sawodny Oliver, Marwan Abdou Ahmed, Graf Thomas // Opt. Express. 2017. Vol. 25. P. 4254.
13. Kudryashov A. V., Kulakov V. B., Kotsuba Ye. V., Novikova L. V., Panchenko V. Ya., Samarkin V. V. // Proc. SPIE 3688, 6th International Conference on Industrial Lasers and Laser Applications '98, (20 January 1999).
14. Reinlein Claudia, Appelfelder Michael, Goy Matthias, Ludewigt Klaus, Tünnermann Andreas // Appl. Opt. 2013. Vol. 52. P. 8363.

## Comparative analysis of modern wavefront correctors for adaptive optoelectronic systems (a review)

*P. Ts. Liui, D. G. Denisov, A. A. Sakharov, I. V. Zhivotovskii and V. E. Karasik*

Bauman Moscow Technical University  
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia  
E-mail: luypetr@activeoptics.ru, denisov\_dg@mail.ru

*Received October 17, 2022*

***The review and analysis of the existing correctors of the wavefront of optical radiation is carried out. The main advantages and disadvantages of various wavefront correctors are given. Different types of correctors are compared according to typical characteristics for solving various problems of modern optotechnics and photonics.***

*Keywords:* adaptive optics, wavefront corrector, active mirror.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-6-593-598

### REFERENCES

1. E. V. Ermolaeva, V. A. Zverev and A. A. Filatov, *Adaptivnaya optika*. (ITMO University, Saint Petersburg, 2012).
2. A. Glecker, D. Markason and G. Ames. Pamela, *Active and Adaptive Optical Components* **1543**, 176 (1991).
3. P. Wizinowich, *IEEE Instrumentation and measurement magazine* **8(2)**, 12 (2005).
4. N. Lefaudeux, X. Levecq, G. Dovillaire, J. Ballesta, E. Lavergne, P. Sauvageot and L. Escolano, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **653(1)**, 164 (2011).
5. M. Yellin, *Proc. SPIE* **75**, 97 (1976).
6. T. Bifano, *Nature Photon* **5**, 21 (2011).
7. P. Salinari, C. Del Vecchio and V. Biliotti, V. "A study of an adaptive secondary mirror", *Proceedings of the ICO-16 (International Commission for Optics) Satellite Conference on Active and adaptive optics*, p. 247 (1993).
8. H. Lück, K.-O. Müller, P. Aufmuth and K. Danzmann, *Optics Communications* **175(4-6)**, 275 (2000). doi:10.1016/s0030-4018(00)00468-5
9. V. Samarkin, A. Alexandrov, T. Jitsuno, P. Romanov, A. Rukosuev and A. Kudryashov, *Quantum Electronics* **45** (12), 1086 (2015).
10. N. L. Ivanova, A. P. Onokhov, A. N. Chaika, V. V. Resnichenko, D. N. Yeskov, A. L. Gromadin, N. A. Feoktistov, L. A. Beresnev and D. R. Pape, *Advances in Optical Information Processing VII* **2754**, 180 (1996).
11. Introduction to  $\pm 12$  Degree Orthogonal Digital Micromirror Devices (DMDs). <http://www.ti.com/lit/an/dlpa008b/dlpa008b.pdf>
12. Stefan Piehler, Tom Dietrich, Philipp Wittmüss, Oliver Sawodny, Marwan Abdou Ahmed and Thomas Graf, *Opt. Express* **25**, 4254 (2017).
13. Alexis V. Kudryashov, V. B. Kulakov, Ye. V. Kotsuba, L. V. Novikova, Vladislav Ya. Panchenko and Vadim V. Samarkin, *Proc. SPIE* **3688**, 6th International Conference on Industrial Lasers and Laser Applications '98, (20 January 1999).
14. Claudia Reinlein, Michael Appelfelder, Matthias Goy, Klaus Ludewigt, and Andreas Tünnermann, *Appl. Opt.* **52**, 8363 (2013).