# ГИБКИЕ МАТРИЧНЫЕ МЭМС-ЗЕРКАЛА ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

**Д. В. Козлов*, И. П. Смирнов**

*АО «Российские космические системы», Москва, Россия*
**E-mail: risc3@mail.ru*

В современных оптических системах формирования изображений широко применяются системы адаптивной оптики, позволяющие качественно влиять на визуальную чёткость и точность регистрируемых данных. Ключевым элементом таких систем является отражающая поверхность, способная изменять свою форму – так называемые деформируемые зеркала (ДЗ) – благодаря им волновой фронт излучения корректируется, нивелируя искажения атмосферы, оптических элементов и других возмущающих факторов. В зависимости от конкретного применения ДЗ могут быть выполнены на основе актюаторов различной физической природы: пьезоэлектрические, электротермические, электромагнитные, электростатические и пр. Наиболее распространёнными являются пьезоэлектрические зеркала ввиду их универсальности и масштабируемости под различные размеры поверхности. Однако для случаев, когда критичны минимальный отклик, размеры, энергопотребление и максимальная плотность, количество управляемых элементов, наилучшим образом подходят электростатические устройства. Такие ДЗ изготавливают по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), используя классические производственные линейки полупроводниковых приборов, с той лишь особенностью, что процессы изготовления носят скорее объемный характер обработки пластин-заготовок, чем поверхностный. За рубежом подобные изделия выпускают уже больше 20 лет такие фирмы, как Boston Micromachines и Iris AO (США) [1, 2]. На отечественном рынке серийная реализация данной технологии отсутствует. При этом, помимо устройств адаптивной оптики, возможные сферы применения подобных изделий включают телекоммуникационное оборудование (переключатели, коммутаторы, элементы фазированных решеток), системы многолучевой записи информации, а также научные и медицинские аналитические приборы (спектроскопия, цитометрия и пр.).

В рамках работ по созданию системы адаптивной оптики для наземного телескопа в диапазоне длин волн 0.5–0.95 мкм нами был разработан технологический образец матричных электростатически управляемых зеркал с изменяемой кривизной поверхности, 25 локальными зонами управления размером 0.45 мм каждая. Изготовление таких зеркал основано на «жертвенной» технологии обработки кремниевых пластин с относительно не высоким требованием к топологической норме (не хуже 1.5 мкм), что позволяет применить данный процесс на многих отечественных предприятиях. В качестве материала «жертвенного» слоя (технологический материал, формируемый в зазоре под зеркальной поверхностью и удаляемый в ходе изготовления устройства) выбран оксид кремния, легированный фосфором (ФСС). Зеркальная поверхность представляет собой тонкий слой поликремния (3 мкм) с нанесённым на него отражающим покрытием алюминия и защитным слоем оксида кремния.

Изготовленные образцы в результате тестирования показали возможность управления кривизной отражающей поверхности; вертикальная деформация локальных зон достигала 1.78 мкм при управляющем напряжении, не превышающем 119 В. По результатам работы сформулированы приоритетные направления исследований, а именно: увеличение размера матрицы микрозеркал до 12 × 12, увеличение вертикальной деформации до 3.5–5 мкм, снижение шероховатости отражающей поверхности до значений среднего арифметического отклонения профиля ниже 15 нм, разработка варианта сегментированных матриц микрозеркал, а также расширение рабочего диапазона длин волн.

**Литература**

1. *Zhou Y., Bifano T.* Characterization of contour shapes achievable with a MEMS deformable Mirror, Manufacturing Engineering Department, Boston University // SPIE. 2006. Vol. 6113. P. 123–130.

2. *Zamkotsian F., Lanzoni P., Barette R., Helmbrecht M., Marchis F. and Teichman A.* Operation of a MOEMS Deformable Mirror in Cryo: Challenges and Results // Micromachines. 2017. Vol. 8. P. 233. https:// doi.org/10.3390/mi8080233

## MATRIX MEMS DEFORMABLE MIRRORS FOR ADAPTIVE OPTICS

**D.V. Kozlov*, I. P. Smirnov**

*JSC «Russian Space Systems», Moscow, Russia*
**E-mail: risc3@mail.ru*

In modern optical imaging systems, adaptive optics systems are widely used, enabling a significant improvement in visual clarity and the accuracy of recorded data. A key element of such systems is a reflecti e surface capable of changing its shape, called deformable mirrors (DMs). Thanks to these mirrors, the wavefront of radiation is corrected, compensating for atmospheric distortions, optical element imperfections, and other perturbing factors. Depending on the specific application, DMs can be based on actuators of various physics: piezoelectric, electrothermal, electromagnetic, electrostatic, etc. The most common are piezoelectric mirrors due to their versatility and scalability to different surface sizes. However, for applications where minimal response time, compact size, low power consumption, and maximum density and number of controllable elements are critical, electrostatic devices are best suited. Such DMs are fabricated using microelectromechanical system (MEMS) technology, employing standard semiconductor manufacturing lines, fabrication processes are more bulk micromachining of wafers than surface micromachining. Such products have been manufactured for over 20 years by Boston Micromachines and Iris AO (USA). In the Russia, serial implementation of this technology is absent. Moreover, beyond adaptive optics devices, potential application areas for such products include telecommunications equipment (switches, routers, phased array elements), multi-channel data recording systems, and scientific and medical analytical instruments (spectroscopy, cytometry, etc.)

As part of the work to develop an adaptive optics system for a ground-based telescope in the wavelength range of 0.5–0.95 μm, we have designed a technological prototype of electrostatically controlled matrix mirror with variable surface curvature, featuring 25 local control zones, 0.45 mm in size. The fabrication of such mirrors is based on a sacrificial-layer technology for processing silicon wafers with a relatively low topological linewidth requirement (no worse than 1.5 μm), allowing this process to be implemented at many Russia manufacturing facilities. Phosphorus-doped silicon oxide (PSG) was chosen as the sacrificial layer material (a technological material formed in the gap beneath the mirror surface and removed during device fabrication). The mirror surface consists of a thin layer of polysilicon (3 μm) coated with an aluminum reflective layer and a protective silicon oxide layer.

Testing of the fabricated prototypes demonstrated the ability to control the curvature of the reflective surface, with vertical deformation of local zones reaching 1.78 μm at a control voltage not exceeding 119 V.

Based on the results of this work, priority research directions have been identified, specifically: increasing the micro-mirror array size to 12 × 12, increasing vertical deformation to 3.5–5 μm, reducing reflective surface roughness to an arithmetic mean deviation of the profile below 15 nm, developing a segmented micro-mirror array design, and expanding the operational wavelength range.