

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

OPTICAL ENGINEERING

УДК 681.7.023.7

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-773-779

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАВЕДЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОДЛОЖЕК ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЗЕРКАЛ

П.Ю. Лобанов^a, И.С. Мануйлович^a, О.Е. Сидорюк^a, В.Г. Семенов^b

^a АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, 117342, Российская Федерация

^b Московский физико-технический институт (МФТИ), Долгопрудный, 141701, Российская Федерация

Адрес для переписки: O.E.Sidoryuk@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.09.20, принята к печати 29.10.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Лобанов П.Ю., Мануйлович И.С., Сидорюк О.Е., Семенов В.Г. Использование наведенных механических напряжений при формообразовании сферических поверхностей подложек интерференционных зеркал // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 773–779. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-773-779

Аннотация

Предмет исследования. Предложена методика формообразования поверхностей полированных подложек для интерференционных зеркал газовых лазеров, в частности, датчиков лазерных гироскопов. Основное внимание уделено изготовлению деталей из оптического ситалла марки СО-115М с заданной кривизной центральной области и плоской поверхностью периферийного кольца, предназначенной для установки на моноблочный корпус лазерного резонатора посредством оптического контакта. **Метод.** Требуемый результат формообразования достигался посредством шлифовки и полировки изделий в присутствии дозированных локальных механических напряжений, прикладываемых к мембране в центральной зоне подложки. При этом параметры профиля контролировались с применением методик интерферометрии управляемого фазового сдвига. Экспериментальные результаты сопоставлялись с данными математического моделирования с использованием инженерной программы конечно-элементного анализа. **Основные результаты.** Установлены характерные зависимости радиусов кривизны сферических поверхностей, получаемых в рассматриваемой технологии, при различных значениях механических нагрузок и геометрических параметров мембран. Особое внимание уделено рассмотрению величин максимального напряжения в образцах и их сопоставлению с предельными прочностными характеристиками материала. Показано, что рассмотренный технологический подход может оказаться эффективным при изготовлении подложек с параметрами, характерными для интерференционных зеркал резонаторов газовых лазеров, в том числе датчиков лазерных гироскопов. Кроме того, описанная технология может использоваться при изготовлении асферических поверхностей подложек. **Практическая значимость.** Рассмотренный в работе метод позволяет повысить производительность обработки оптических деталей в условиях массового производства.

Ключевые слова

полировка, сферическая поверхность, механические напряжения, ситалл, лазерная фазосдвигающая интерферометрия

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-773-779

APPLICATION OF INDUCED MECHANICAL STRESSES IN FORMATION OF SPHERICAL SURFACES OF INTERFERENCE MIRROR SUBSTRATES

P.Yu. Lobanov^a, I.S. Manuylovich^a, O.E. Sidoryuk^a, V.G. Semenov^b

^a POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow, 117342, Russian Federation

^b The Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, 141701, Russian Federation

Corresponding author: O.E.Sidoryuk@gmail.com

Article info

Received 24.09.20, accepted 29.10.20

Article in Russian

For citation: Lobanov P.Yu., Manuylovich I.S., Sidoryuk O.E., Semenov V.G. Application of induced mechanical stresses in formation of spherical surfaces of interference mirror substrates. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 773–779 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-773-779

Abstract

Subject of Research. The work deals with the technique for shaping of the polished substrate surfaces for interference mirrors of gas lasers, laser gyro sensors, in particular. The main attention is paid to the manufacture of parts from optical SO-115M sital with a given curvature of the central zone and a flat surface of the peripheral ring, designed for installation on a laser resonator monoblock body by means of an optical contact. **Method.** The required shaping result was achieved by grinding and polishing of products in the presence of metered local mechanical stresses applied to the membrane in the central zone of the substrate. At this, the profile parameters were monitored using phase shifting interferometry technique. The experimental results were compared with the data of mathematical modeling by applying an engineering program for finite element analysis. **Main Results.** The main dependences of the curvature radii of spherical surfaces obtained in the technology under consideration are specified for various values of mechanical loads and geometric parameters of membranes. Particular attention is paid to consideration of the maximum stress values in the samples and their comparison with the ultimate strength characteristics of the material. It is shown that the considered technological approach can be effective in the manufacture of substrates for interference mirrors of gas laser resonators, including sensors of laser gyroscopes. In addition, the described technology can be used to manufacture aspherical substrate surfaces. **Practical Relevance.** The method considered provides for increase of the optical parts processing productivity in conditions of mass production.

Keywords

polishing, spherical surface, mechanical stress, sital, laser phase-shifting interferometry

Введение

Обеспечение заданных параметров профиля поверхности полированных деталей является одной из важных задач оптического производства, которая часто решается в рамках традиционной технологии механической обработки изделий на этапах шлифовки и полировки поверхностей на полировальниках соответствующей формы. Но данным подходом не ограничиваются современные возможности формообразования оптических деталей [1, 2]. Существенными дополнениями являются показавшие эффективность прецизионные технологии магнитореологической полировки [3–5], ионного травления [5–7] и методы формообразования посредством осаждения неравнотолщинных покрытий [8–10]. В основном эти технологии используют после механической полировки на этапе финишной корректировки оптических деталей, решения задач по созданию асферических или иных поверхностей со сложным профилем.

Тонкая регулировка профиля оптических поверхностей возможна также с использованием методик традиционной механической полировки, дополненных применением дозированных нагрузок, пространственно распределенных специальным образом. Преимуществом такого подхода является достижение результата без применения дорогостоящего оборудования. В частности, если предварительно нагрузить нужным образом заготовку зеркала и получить обычной механической обработкой сферическую поверхность, то при снятии нагрузки форма детали упруго деформируется в желаемую асферическую [11, 12].

Такой метод оказывается эффективным в решении разнообразных задач формообразования [13–17]. Однако каждый отдельный тип детали в данном производстве требует специальной настройки технологического процесса с предварительным тестированием режимов обработки и ее результатов. Изначально применяемый при изготовлении в основном крупногабаритных оптических изделий, способ может быть распространен на небольшие образцы при определенном относительном соответствии их геометрических параметров.

Настоящая работа посвящена анализу возможностей использования наведенных механических напряжений при формообразовании сферических поверхностей подложек интерференционных зеркал, применяемых в малоапертурных газовых лазерах и датчиках лазерных гироскопов.

Образцы для исследований и принцип формообразования их поверхности

В качестве образцов рассмотрены оптические детали из ситалла марки СО-115М в виде дисков диаметром 30 мм и толщиной 5 мм. Цель формообразования — изготовление подложек для зеркал газовых лазеров с заданной кривизной в центральной части и плоской поверхностью периферийного кольца.

Последнее требование необходимо в случае их использования в составе моноблочного резонатора с установкой на его плоские грани посредством оптического контакта (в частности, в кольцевом резонаторе датчика лазерного гироскопа [18, 19]). Существенно, что для указанных применений требуются подложки зеркал с относительно большими радиусами кривизны (2–10 м), для формирования которых достаточен локальный микроскопичный съем материала, который может быть обеспечен нормированным изгибом детали при ее производстве.

В работе использована технология формообразования сферических поверхностей заданного радиуса кривизны с использованием плоского полировальника и планшайбы. Последовательность операций представлена на рис. 1. В исходной заготовке (1) выполняется цилиндрическая проточка, формирующая мембрану диаметром d и толщиной h (2). Деталь приклеивается на планшайбу напротив отверстия для подачи в образовавшуюся полость жидкости от гидравлической системы (3). Нагнетаемое давление P выгибает полученную мембрану, формируя выпуклую сферическую поверхность (4).

После этого нагруженная поверхность шлифуется и полируется плоским полировальником до достижения требуемого качества обработки (5)–(6). При снятии нагрузки мембрана упруго деформируется,

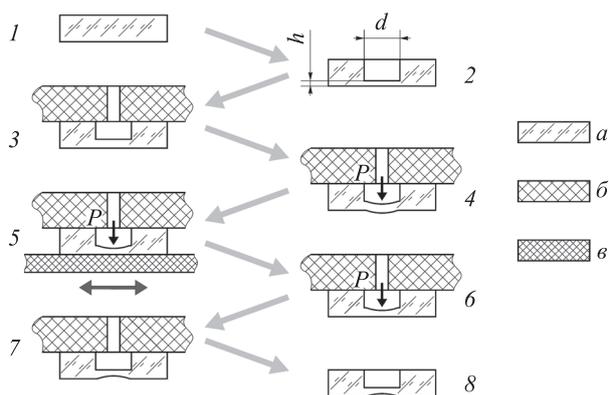


Рис. 1. Функциональная схема технологического процесса: образец (а); планшайба (б); полировальник (в)

формируя основу для вогнутого сферического зеркала (7). По окончании процесса готовая деталь деблокируется (8).

Пример состояния поверхности изначально плоской мембраны под давлением с внутренней стороны представлен на рис. 2, а. Реконструкция рельефа в 3D-формате выполнена с помощью лазерного фазосдвигающего интерферометра [20] для мембраны диаметром $d = 14$ мм и толщиной $h = 1$ мм при давлении $P = 1,0$ МПа.

Экспериментально подтверждено, что радиус кривизны поверхности центральной зоны готовой детали (рис. 2, б) по абсолютной величине равен радиусу кривизны для того же образца под нагрузкой до выполнения шлифовки-полировки. Этим свойством можно пользоваться для обеспечения контроля кривизны, если применять заготовки, имеющие изначально плоские полированные поверхности (с качеством предварительной полировки). В центральной области готовой детали можно получать сферические поверхности, радиусы кривизны которых задаются набором параметров: диаметром проточки, толщиной мембраны и величиной приложенного давления.

Кроме того, достижение необходимого результата может быть обеспечено с помощью выбора техноло-

гических параметров на основе математического моделирования.

Математическое моделирование формообразования

Известно, что прогноз результатов обработки оптических деталей при воздействии пространственно распределенных механических напряжений дает обычно хорошие результаты на основе анализа математической модели образца. С достаточной точностью может быть предсказан профиль поверхности, выработаны требования к величинам и распределению нагрузок, необходимых на разных этапах технологического процесса, указаны предельные параметры, достижимые для данного материала в отсутствие механических разрушений.

В настоящей работе математическое моделирование формообразования поверхности с использованием наведенных механических напряжений производилось с помощью инженерной программы конечно-элементного анализа программного пакета Ansys® Academic Research Mechanical [21].

При этом образец считался линейно упругим, а деформации малыми.

Наличие жесткого крепления оптической детали на планшайбе определяло граничное условие посредством задания равными нулю величин возможного смещения для всех точек поверхности тыльной стороны исследуемой модели. Остальные границы образца считались свободными.

Использовались значения физических констант материала, указанные в сертификате¹ производителя ситалла СО-115М: модуль упругости $E = 90,2$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,28$ и плотность $\rho = 2,46$ г/см³.

Пример анализа детали в условиях нагруженной мембраны диаметром $d = 14$ мм и толщиной $h = 1$ мм при давлении $P = 1,4$ МПа представлен на рис. 3.

¹ Стеклокристаллический материал СО-115М. Стекла специальные. Каталог продукции АО ЛЗОС. Лыткарино. 2019.

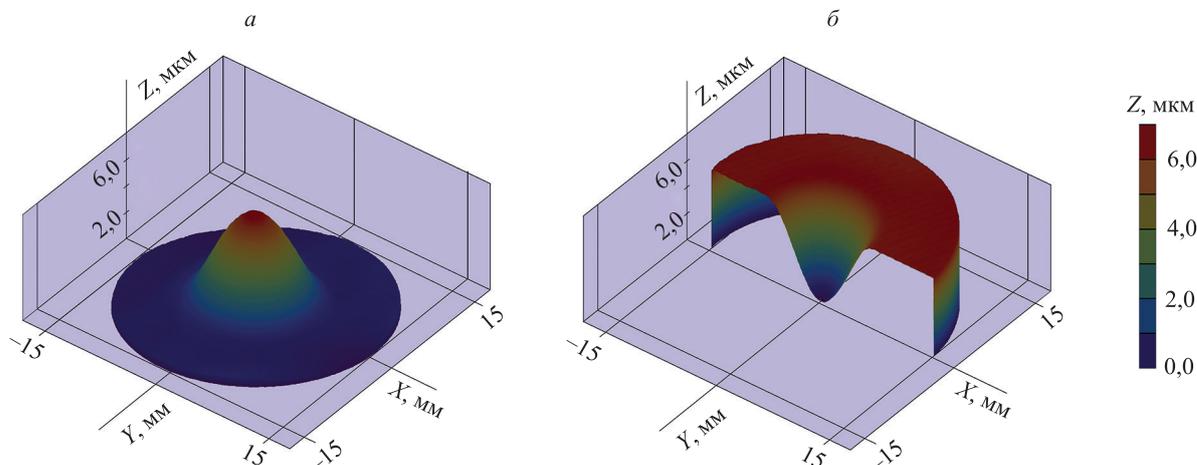


Рис. 2. Изгиб мембраны диаметром $d = 14$ мм и толщиной $h = 1$ мм при давлении $P = 1,0$ МПа (а); поверхность образца после полировки и снятия механических напряжений (б)

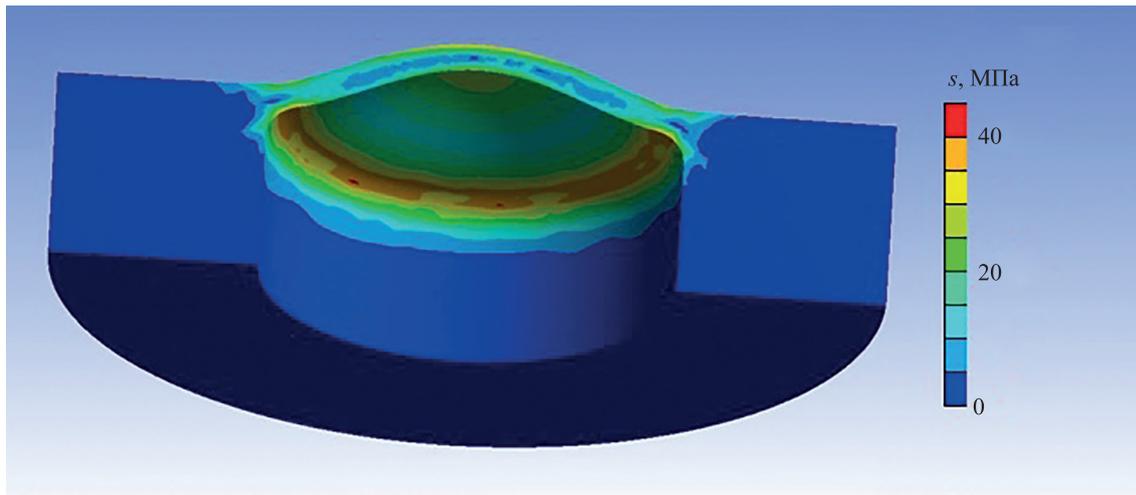


Рис. 3. Результат математического моделирования изгиба мембраны (s — величины расчетных механических напряжений)

Расчеты показывают, что для данного образца зависимость радиуса кривизны изгиба мембраны R от величины давления P может быть представлена кривой 2 на рис. 4.

В рамках рассматриваемых задач для каждой из мембран величины возникающих в центральной части деформаций пропорциональны напряжениям и нагнетаемому давлению. Соответственно, радиусы кривизны R при условии $R \gg z(x_0, y_0)$ оказываются обратно пропорциональными P . В то же время зависимости $z(x_0, y_0)$ от толщины h и диаметра d мембраны являются нелинейными. Если величины d задаются конструктивными особенностями деталей, то выбор h производится с целью достижения требуемых значений R из набора зависимостей от P , получаемых численными методами с помощью программного комплекса Ansys®. В частности, для $d = 14$ мм, как видно из рис. 4, полный набор величин R (от 2 до 10 м) для подложек, востребованных в резонаторах лазерных гироскопов, может быть обеспечен при h от 1,0 до 1,6 мм.

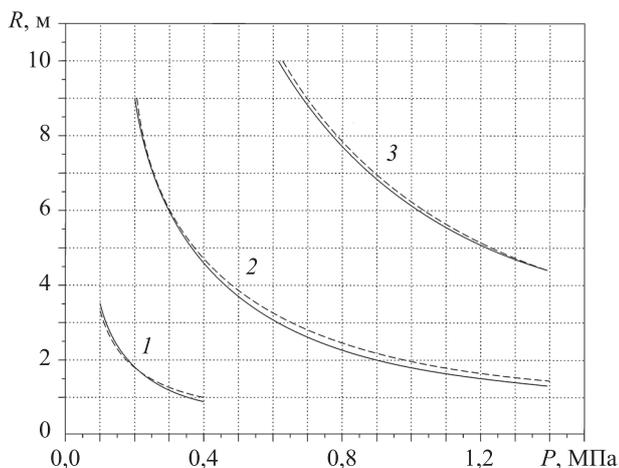


Рис. 4. Зависимость радиуса кривизны поверхности от давления для образцов с мембраной диаметром $d = 14$ мм и толщинами: $h_1 = 0,5$ мм (1); $h_2 = 1,0$ мм (2); $h_3 = 1,6$ мм (3). Сплошными линиями представлены результаты численного моделирования, пунктиром — экспериментальные данные

Заметим, что при изгибе мембраны окружающая ее область, предназначенная для посадки на корпус моноблочного лазерного резонатора посредством оптического контакта, также претерпевает изменения. В большей степени это может вызывать опасения в случае толстых мембран. Однако расчеты показывают, что даже при $h = 1,6$ мм максимальные отклонения от плоскостности для поверхности внешнего кольца шириной 6 мм не превышают 50 нм для $P = 1,5$ МПа. Из практики известно, что это не критично для качества оптического контакта. Погрешности такого порядка легко компенсируются изгибами при нажатии на деталь в операциях сборки лазерных резонаторов.

Особого внимания заслуживает рассмотрение величин максимального напряжения в образцах и их сопоставление с предельными прочностными характеристиками материала. Превышение допустимых нагрузок может приводить к разрушению образца. Это накладывает принципиальное ограничение на радиус кривизны поверхности, который может быть достигнут на образце соответствующей геометрии.

На рис. 5 представлены характерные расчетные значения предельных механических напряжений S в рассматриваемых образцах в зависимости от геометрических параметров и давления. Установлено, что найденные соотношения могут быть положены в основу достоверных прогнозов вероятности разрушения образцов в условиях чрезмерных нагрузок.

Испытания на разрыв мембран ряда образцов показали, что величина максимально допустимых механических напряжений в условиях использованных технологий механической обработки образцов составляет порядка 80–90 МПа. Это ниже возможностей используемого материала, однако, объяснимо в рамках известных представлений о негативной роли поверхностных дефектов, оставшихся от механической обработки [22]. При необходимости они могут быть удалены химическим травлением нарушенного слоя с соответствующим повышением прочности мембран [23].

Одновременно в ходе математического моделирования установлено, что положительным фактором является наличие закруглений в глубине проточки, об-

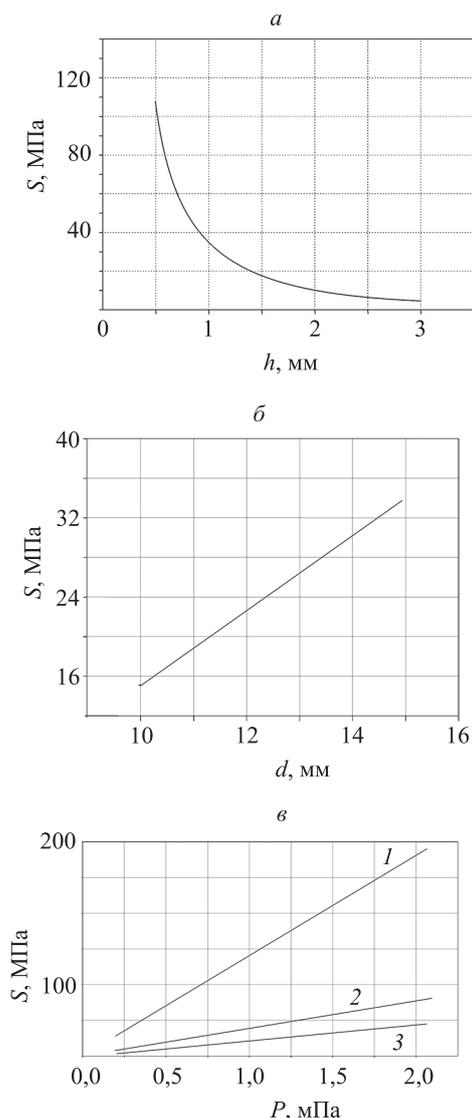


Рис. 5. Расчетные значения максимальных механических напряжений S в образцах с мембранами: диаметром $d=15$ мм при $P=0,8$ МПа (а); толщиной $h=1$ мм при $P=0,8$ МПа (б); в зависимости от давления P при толщинах: $h_1=0,5$ мм (1), $h_2=1,0$ мм (2) и $h_3=1,5$ мм (3) для $d=15$ мм (в)

разующей мембрану. Таким образом, величина максимального напряжения в образце дополнительно может быть снижена на 5–12 % (в зависимости от геометрии детали).

Результаты анализа готовых изделий

Зависимости радиусов кривизны центральной зоны образцов с мембраной диаметром 14 мм как функции гидростатического давления на ее обратной стороне во время механической шлифовки и полировки представлены на рис. 4. При этом остальные условия технологического процесса соответствовали стандартным правилам [24].

Наблюдается хорошее соответствие параметров экспериментальных образцов и результатов математического моделирования. Важное условие его достиже-

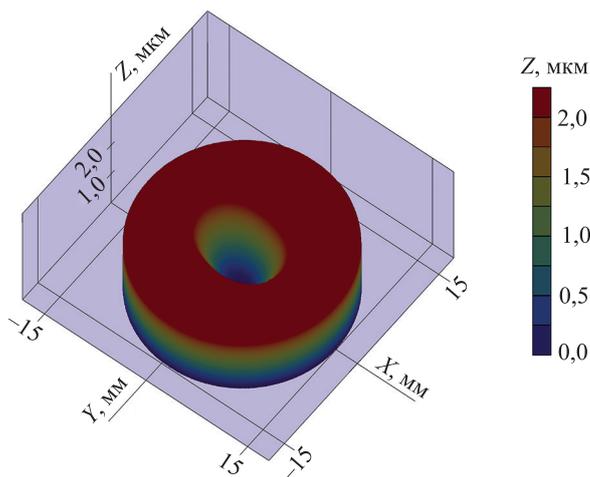


Рис. 6. Образец с эллиптической мембраной

ния — выполнение очевидного требования к величине давления на полировальник во время механической обработки. Оно составляло 0,002–0,008 МПа, т. е. было существенно меньше создаваемого локально с целью планируемого формообразования. Незначительные отличия достигнутых параметров от прогнозируемых, скорее всего, обусловлены недостатками точности в описании реальной формы мембраны по ее периметру и ошибками в определении радиусов закруглений на краях формирующей ее проточки.

Кроме того, описанная технология может использоваться при изготовлении асферических поверхностей подложек. Зеркала с различной кривизной поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях могут быть востребованы в лазерных резонаторах с отсутствием осевой симметрии [25]. Пример такого образца представлен на рис. 6. Мембрана толщиной $h=1,3$ мм с ортогональными осями 10 и 16 мм при полировке испытывала давление $P=1,5$ МПа, в результате была получена асферическая поверхность с радиусами кривизны $R_x=6,2$ м и $R_y=3,7$ м.

Заключение

Исследования технологических возможностей формообразования с использованием локальных механических напряжений показали перспективность описанного подхода при производстве подложек лазерных зеркал с заданной кривизной центральной области и плоской периферией. Достигнутые параметры профиля и точность его воспроизводства соответствуют требованиям, предъявляемым к ним в резонаторах ряда газовых лазеров, в том числе лазерных гироскопов.

Достоинством описанной технологии является возможность выполнения полировки рабочей поверхности в одном процессе, в то время как традиционный подход состоит из двух независимых последовательных операций по изготовлению плоского периферийного кольца и центральной сферы на разных полировальниках. В традиционной методике детали с каждой конкретной кривизной требуют в производстве отдельных полировальников, что сопряжено с материальными и временными затратами, которые исключены в предложенной

технологии. В описанном методе, при необходимости, в одном процессе могут быть получены подложки с различной кривизной поверхности. Для этого достаточно на каждом образце при обработке обеспечить соответствующее расчетному локальное гидростатическое давление. Применение во всех случаях только одного плоского полировальника облегчает задачу достижения высоких параметров шероховатости и оптической чистоты обрабатываемых поверхностей.

Преимуществом метода является сопутствующее увеличение точности центрировки сферы в производи-

мых деталях, поскольку она определяется только операцией фрезеровки проточки, формирующей мембрану. Этот факт является важным при сборке моноблочных резонаторов датчиков лазерных гироскопов, когда возможности дополнительных процедур по юстировке крайне ограничены.

Использование заготовок с неосесимметричной проточкой позволяет изготавливать детали, имеющие различную кривизну поверхности центральной области во взаимно перпендикулярных направлениях.

Литература

1. Каширин В.И. Основы формообразования оптических поверхностей: курс лекций. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. 254 с.
2. Jacobs S.D. International innovations in optical finishing // *Proceedings of SPIE*, 2004. V. 5523. P. 264–272. doi: 10.1117/12.557274
3. Худoley А., Городкин Г., Глеб Л., Александронец А., Высокоточная обработка поверхностей материалов магнетореологическими жидкостями // *Наука и инновации*. 2015. № 6(148). С. 20–23.
4. Sugawara J., Maloney Ch. Manufacturing aspheric mirrors made of zero thermal expansion cordierite ceramics using magnetorheological finishing (MRF) // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9912. P. 99120L. doi: 10.1117/12.2231165
5. Peng X., Yang C., Hu H., Dai Y. Measurement and algorithm for localization of aspheric lens in magnetorheological finishing // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. V. 88. N 9-12. P. 2889–2897. doi: 10.1007/s00170-016-9001-x
6. Черезова Л.А. Ионно-лучевые методы в оптической технологии: учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 151 с.
7. Cherezova L.A., Mikhailov A.V., Zhevlakov A.P. Shaping the surface of multiphase optical materials by ion etching // *Journal of Optical Technology*. 2006. V. 73. N 11. P. 812–814. doi: 10.1364/JOT.73.000812
8. Lee Ch.-Ch., Wan D.-Sh., Jaing Ch.-Ch., Chu Ch.-W. Making aspherical mirrors by thin-film deposition // *Applied Optics*. 1993. V. 32. N 28. P. 5535–5540. doi: 10.1364/AO.32.005535
9. Потелов В.В., Сенюк Б.Н. Асферизация высокоточных оптических элементов методом вакуумного напыления // *Оптический журнал*. 2004. Т. 71. № 12. С. 14–19.
10. Dorofeeva E.V., Lobanov P.Yu., Manuilovich I.S., Meshkov M.N., Sidoryuk O.E. Surface relief forming on optical ceramic articles by laser pyrolysis of organosilicon materials // *Glass and Ceramics*. 2017. V. 73. N 11–12. P. 400–405. doi: 10.1007/s10717-017-9898-z
11. Lubliner J., Nelson J.E. Stressed mirror polishing. 1: A technique for producing nonaxisymmetric mirrors // *Applied Optics*. 1980. V. 19. N 14. P. 2332–2340. doi: 10.1364/AO.19.002332
12. Nelson J.E., Gabor G., Hunt L.K., Lubliner J., Mast T.S. Stressed mirror polishing. 2: Fabrication of an off-axis section of a paraboloid // *Applied Optics*. 1980. V. 19. N 14. P. 2341–2352. doi: 10.1364/AO.19.002341
13. Jedamzik R., Kunisch C., Westerhoff Th. ZERODUR® for stress mirror polishing // *Proceedings of SPIE*. 2011. V. 8126. P. 812606. doi: 10.1117/12.894421
14. Everhart E. Making corrector plates by schmidt's vacuum method // *Applied Optics*. 1966. V. 5. N 5. P. 713–715. doi: 10.1364/AO.5.000713
15. Li Ch., Lei B., Han Y. The advancement of the high precision stress polishing // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9683. P. 96831F. doi: 10.1117/12.2243234
16. Hugot E., Ferrari M., Hadi K., Vola P., Gimenez J.L., Lemaitre G.R., Rabou P., Dohlen K., Puget P., Beuzit J.L., Hubin N. Active optics: stress polishing of toric mirrors for the VLT SPHERE adaptive optics system // *Applied Optics*. 2009. V. 48. N 15. P. 2932–2941. doi: 10.1364/AO.48.002932
17. Lemaitre G. New procedure for making Schmidt corrector plates // *Applied Optics*. 1972. V. 11. N 7. P. 1630–1636. doi: 10.1364/AO.11.001630
18. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И. Зеemanовские лазерные гироскопы // *Квантовая электроника*. 2015. Т. 45. № 2. С. 171–179.

References

1. Kashirin V.I. *Optical Surface Shaping Basics*. Yekaterinburg, UrFU, 2006, 254 p. (in Russian)
2. Jacobs S.D. International innovations in optical finishing. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5523, pp. 264–272. doi: 10.1117/12.557274
3. Khudoley A., Gorodkin G., Gleb L., Aleksandronets A. The high-precision surfacing with magnetorheological fluids. *The Science and Innovations*, 2015, no. 6(148), pp. 20–23. (in Russian)
4. Sugawara J., Maloney Ch. Manufacturing aspheric mirrors made of zero thermal expansion cordierite ceramics using magnetorheological finishing (MRF). *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9912, pp. 99120L. doi: 10.1117/12.2231165
5. Peng X., Yang C., Hu H., Dai Y. Measurement and algorithm for localization of aspheric lens in magnetorheological finishing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, no. 9-12, pp. 2889–2897. doi: 10.1007/s00170-016-9001-x
6. Cherezova L.A. *Ion-Beam Methods in Optical Technology*. St. Petersburg, ITMO, 2007, 151 p. (in Russian)
7. Cherezova L.A., Mikhailov A.V., Zhevlakov A.P. Shaping the surface of multiphase optical materials by ion etching. *Journal of Optical Technology*, 2006, vol. 73, no. 11, pp. 812–814. doi: 10.1364/JOT.73.000812
8. Lee Ch.-Ch., Wan D.-Sh., Jaing Ch.-Ch., Chu Ch.-W. Making aspherical mirrors by thin-film deposition. *Applied Optics*, 1993, vol. 32, no. 28, pp. 5535–5540. doi: 10.1364/AO.32.005535
9. Potelov V.V., Senik B.N. Aspherization of high-accuracy optical elements by the vacuum-deposition method. *Journal of Optical Technology*, 2004, vol. 71, no. 12, pp. 814–818. doi: 10.1364/JOT.71.000814
10. Dorofeeva E.V., Lobanov P.Yu., Manuilovich I.S., Meshkov M.N., Sidoryuk O.E. Surface relief forming on optical ceramic articles by laser pyrolysis of organosilicon materials. *Glass and Ceramics*, 2017, vol. 73, no. 11–12, pp. 400–405. doi: 10.1007/s10717-017-9898-z
11. Lubliner J., Nelson J.E. Stressed mirror polishing. 1: A technique for producing nonaxisymmetric mirrors. *Applied Optics*, 1980, vol. 19, no. 14, pp. 2332–2340. doi: 10.1364/AO.19.002332
12. Nelson J.E., Gabor G., Hunt L.K., Lubliner J., Mast T.S. Stressed mirror polishing. 2: Fabrication of an off-axis section of a paraboloid. *Applied Optics*, 1980, vol. 19, no. 14, pp. 2341–2352. doi: 10.1364/AO.19.002341
13. Jedamzik R., Kunisch C., Westerhoff Th. ZERODUR® for stress mirror polishing. *Proceedings of SPIE*, 2011, vol. 8126, pp. 812606. doi: 10.1117/12.894421
14. Everhart E. Making corrector plates by schmidt's vacuum method. *Applied Optics*, 1966, vol. 5, no. 5, pp. 713–715. doi: 10.1364/AO.5.000713
15. Li Ch., Lei B., Han Y. The advancement of the high precision stress polishing. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9683, pp. 96831F. doi: 10.1117/12.2243234
16. Hugot E., Ferrari M., Hadi K., Vola P., Gimenez J.L., Lemaitre G.R., Rabou P., Dohlen K., Puget P., Beuzit J.L., Hubin N. Active optics: stress polishing of toric mirrors for the VLT SPHERE adaptive optics system. *Applied Optics*, 2009, vol. 48, no. 15, pp. 2932–2941. doi: 10.1364/AO.48.002932
17. Lemaitre G. New procedure for making Schmidt corrector plates. *Applied Optics*, 1972, vol. 11, no. 7, pp. 1630–1636. doi: 10.1364/AO.11.001630
18. Azarova V.V., Golyaev Y.D., Savelyev I.I. Zeeman laser gyroscopes. *Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, no. 2, pp. 171–179. doi: 10.1070/QE2015v045n02ABEH015539

19. Тихменев Н.В., Закурнаев С.А., Озаренко А.В., Быстрицкий В.С., Мягков С.А., Столяров Р.А., Чечетов К.Е., Коршунов С.Е. Влияние методов обработки и очистки поверхности ситалла CO-115M на прочность оптического контакта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 613–619. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-613-619
20. Schreiber H., Bruning J.H. Phase Shifting Interferometry // *Optical Shop Testing* / ed. by D. Malacara. John Wiley & Sons, Inc., 2007. P. 547–655.
21. Lee H.-H. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2019. SDC Publications, 2019. 614 p.
22. Hartmann P., Leys A., Carré A., Kerz F., Westerhoff Th. ZERODUR® - Bending strength data for etched surfaces // *Proceedings of SPIE*. 2014. V. 9151. P. 91512Q. doi: 10.1117/12.2055801
23. Döhring Th., Thomas A., Jedamzik R., Kohlmann H., Hartmann P. Manufacturing of lightweighted ZERODUR® components at SCHOTT // *Proceedings of SPIE*. 2007. V. 6666. P. 666602. doi: 10.1117/12.733770
24. Ефремов А.А., Законников П.Н., Быков Б.З. Технология обработки оптических деталей / под ред. М.Н. Семибратова. М.: Машиностроение, 1975. 208 с.
25. Collins S.A. Analysis of optical resonators involving focusing elements // *Applied Optics*. 1964. V. 3. N 11. P. 1263–1275. doi: 10.1364/AO.3.001263
19. Tikhmenev N.V., Zakurnaev S.A., Ozarenko A.V., Bystritsky V.S., Myagkov S.A., Stolyarov R.A., Chechetov K.E., Korshunov S.E. Influence of surface treatment and purification methods of CO-115M glass-ceramics on optical contact strength. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 613–619. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-613-619
20. Schreiber H., Bruning J.H. Phase Shifting Interferometry. *Optical Shop Testing*. Ed. by D. Malacara. John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 547–655.
21. Lee H.-H. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2019*. SDC Publications, 2019, 614 p.
22. Hartmann P., Leys A., Carré A., Kerz F., Westerhoff Th. ZERODUR® — Bending strength data for etched surfaces. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9151, pp. 91512Q. doi: 10.1117/12.2055801
23. Döhring Th., Thomas A., Jedamzik R., Kohlmann H., Hartmann P. Manufacturing of lightweighted ZERODUR® components at SCHOTT. *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6666, pp. 666602. doi: 10.1117/12.733770
24. Efremov A.A., Zakonnikov P.N., Bykov B.Z. *Optical Parts Processing Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 208 p. (in Russian)
25. Collins S.A. Analysis of optical resonators involving focusing elements. *Applied Optics*, 1964, vol. 3, no. 11, pp. 1263–1275. doi: 10.1364/AO.3.001263

Авторы

Лобанов Петр Юрьевич — ведущий инженер, АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, 117342, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-8034-7773, lobanoff_p@mail.ru

Мануйлович Иван Сергеевич — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, 117342, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-1737-3554, ivan.manuylovich@gmail.com

Сидорюк Олег Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории, АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, 117342, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-9641-4667, O.E.Sidoryuk@gmail.com

Семенов Валерий Геннадьевич — аспирант, Московский физико-технический институт (МФТИ), Долгопрудный, 141701, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-3470-5012, valerii.semenov.g@gmail.com

Authors

Peter Yu. Lobanov — Leading Engineer, POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow, 117342, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-8034-7773, lobanoff_p@mail.ru

Ivan S. Manuylovich — D.Sc., Senior Researcher, POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow, 117342, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-1737-3554, ivan.manuylovich@gmail.com

Oleg E. Sidoryuk — PhD, Laboratory Head, POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow, 117342, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-9641-4667, O.E.Sidoryuk@gmail.com

Valery G. Semenov — Postgraduate, The Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, 141701, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-3470-5012, valerii.semenov.g@gmail.com