



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-53-57>

УДК 53.043

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ КВАРЦЕВОЙ ДВОЯКОВЫПУКЛОЙ ЛИНЗЫ ПРИ ВАКУУМНОМ КРЕПЛЕНИИ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

И. В. ХОДЯКОВ, И. О. МАКАРЦОВ

ОАО «Планар» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Современные проекционно-оптические системы, такие как DUV-литография и высокоапертурные объективы, требуют высокой точности обработки поверхностей, что делает учет механических деформаций оптических элементов особенно важным. В статье представлены результаты компьютерного моделирования деформации кварцевой двояковыпуклой линзы диаметром 195 мм под воздействием вакуума. Исследование выполнено в программных комплексах CAE (Computer-aided engineering) с различными алгоритмами расчетов. Использовалась модель линзы, спроектированная в системе CAD (Computer-aided design). Материал линзы – кварцевое стекло с модулем Юнга 72 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,17. Установлено, что рабочий перепад давления 15 кПа вызывает неравномерную деформацию поверхности линзы с максимальными значениями от 22,59 до 23,24 нм в зависимости от алгоритма расчета. Расхождение между результатами составило 2,8 %. Установлена линейная зависимость деформации от перепада давления: при изменении перепада с 0 до 18 кПа деформация возрастает от 0,75 до 27,74 нм. Наибольшее искажение поверхности наблюдается в центральной зоне линзы, что критично для интерферометрических измерений, требующих точности в нанометровом диапазоне. Результаты подчеркивают необходимость корректировки параметров вакуумного крепления для минимизации деформаций и повышения качества обработки оптических поверхностей.

Ключевые слова: метод конечных элементов, механические напряжения, интерферометрический анализ, программный комплекс CAE, система CAD, интерферометрия, вакуумное крепление, нанометровая деформация, гибридная адаптация сетки, кривизна поверхности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ходяков, И. В. Компьютерное моделирование деформации кварцевой двояковыпуклой линзы при вакуумном креплении в интерферометре / И. В. Ходяков, И. О. Макарец // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 53–57. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-53-57>.

COMPUTER-BASED SIMULATION OF DEFORMATION OF A QUARTZ BICONVEX LENS DURING VACUUM MOUNTING IN AN INTERFEROMETER

ILYA V. KHADZIAKOU, IVAN O. MAKARTSOV

Open Joint-Stock Company “Planar” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Modern projection optical systems, such as DUV lithography and high-numerical-aperture objectives, require extremely high surface machining accuracy, making the consideration of mechanical deformations of optical elements particularly critical. This paper presents the results of a computer simulation of the deformation of a 195 mm diameter fused silica biconvex lens under vacuum. The study was performed in CAE (Computer-aided engineering) software suites employing different calculation algorithms. A lens model designed in a CAD (Computer-aided design) system was used. The lens material is fused silica with a Young's modulus of 72 GPa and a Poisson's ratio of 0.17. It was established that an operational pressure differential of 15 kPa causes non-uniform deformation of the lens surface, with maximum values ranging from 22.59 to 23.24 nm, depending on the calculation algorithm. The discrepancy between the results was 2.8 %. A linear dependence of deformation on the pressure differential was established: as the pressure differential changes from 0 to 18 kPa, the deformation increases from 0.75 to 27.74 nm. The greatest surface distortion is observed

in the central zone of the lens, which is critical for interferometric measurements requiring nanometer-level accuracy. The results underscore the necessity of adjusting vacuum mounting parameters to minimize deformations and improve the quality of optical surface machining.

Keywords: finite element method, mechanical stresses, interferometric analysis, CAE software, CAD system, interferometry, vacuum mounting, nanometer-scale deformation, hybrid mesh adaptation, surface curvature.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Khadziakou I. V., Makartsou I. O. (2025) Computer-Based Simulation of Deformation of a Quartz Biconvex Lens During Vacuum Mounting in an Interferometer. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 53–57. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-53-57> (in Russian).

Введение

Сверхточные и сверхгладкие поверхности критически важны для некоторых высокопроизводительных оптических систем. Например, полировка деталей методом ионно-лучевого травления [1, 2] – стандартный метод финального высокоточного формирования оптических поверхностей высокого класса [3].

Для контроля поверхности полученных деталей используются методы интерферометрии [4]. Интерферометры широко применяются в науке и промышленности для измерения прецизионных смещений, изменений показателя преломления и неровностей поверхности. В большинстве интерферометров свет от одного источника разделяется на два луча, проходящих по разным оптическим путям, которые затем снова объединяются для создания интерференционной картины. Результирующие интерференционные полосы дают информацию о разнице в оптических длинах пути. Высокая точность интерферометров позволяет измерять длины и формы оптических компонент до нанометра.

Крепление оптических деталей в интерферометре может происходить путем зажатия линзы с трех сторон. Альтернативный вариант – размещение детали на специальном приспособлении с вакуумной фиксацией. Вакуумное крепление удерживает линзу за счет разности ΔP атмосферного давления и разрежения, созданного под линзой, и является наиболее универсальным видом крепления, используемым в интерферометрах. С его помощью можно закрепить большое количество разнообразных оптических деталей без необходимости разработки специализированных креплений. В большинстве интерферометров максимальный допустимый диапазон ΔP лежит пределах от 0 до 40 кПа, а рекомендуемый рабочий диапазон – 10–18 кПа.

Однако в вакуумных креплениях есть существенный недостаток – это деформация оптических деталей под действием вакуума, что негативно сказывается на получаемой интерферограмме и последующей обработке детали. Предполагается, что зависимость деформации от ΔP является линейной, что требует проверки методами САЕ (Computer-aided engineering). Современные САЕ-программы обеспечивают детальную визуализацию распределения напряжений и деформаций по всей поверхности линзы. Кроме того, моделирование предоставляет возможность варьировать параметры в широком диапазоне, что ускоряет поиск оптимальных решений для минимизации деформаций [5]. В статье рассматривается влияние ΔP на механическую деформацию кварцевой линзы.

Методика моделирования

Для анализа механического воздействия вакуума на деформацию оптической детали была взята двояковыпуклая линза диаметром 195 мм с радиусами кривизны 295,1 и 1564,6 мм. Линза фиксировалась при помощи крепления диаметром 80 мм, представляющего собой полый цилиндр, подключенный к вакуумной системе для удержания детали на торце за счет силы прижатия, возникающей из-за разности между атмосферным давлением и низким давлением в полости цилиндра. Данный тип крепления широко используется для фиксации линз диаметром более 150 мм в измерительных приборах. Геометрическая модель линзы (рис. 1) построена в системе САД (Computer-aided design).

Для моделирования линзы был выбран материал Fused Quartz со следующими параметрами:

- модуль Юнга – (~ 72) ГПа;
- коэффициент Пуассона – 0,17;
- плотность – 2200 кг/м³.

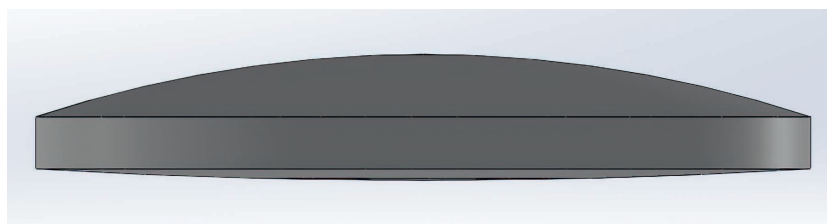


Рис. 1. Модель линзы
Fig. 1. Lens model

Также учитывалось гравитационное ускорение $9,81 \text{ м/с}^2$ как внешняя сила. Исходя из габаритов линзы, выбран перепад давления $\Delta P = 15 \text{ кПа}$. Для моделирования деформации модель линзы была разбита на полигональную сетку, состоящую из треугольников с размерами в диапазоне от $0,00037$ до $0,00370 \text{ мм}$.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты моделирования деформации кварцевой линзы при использовании вакуумного крепления. Из рисунков видно, что деформация линзы распределена неравномерно, с наибольшими изменениями в центральной части линзы, где наблюдается ярко выраженное кольцо повышенной деформации, точно повторяющее геометрию края вакуумного крепления. В этом месте находится область разности давления, создаваемая вакуумным креплением. Полученная модель подтверждает, что использование вакуумного крепления вызывает значительные механические деформации, особенно в области, не поддерживаемой опорой.

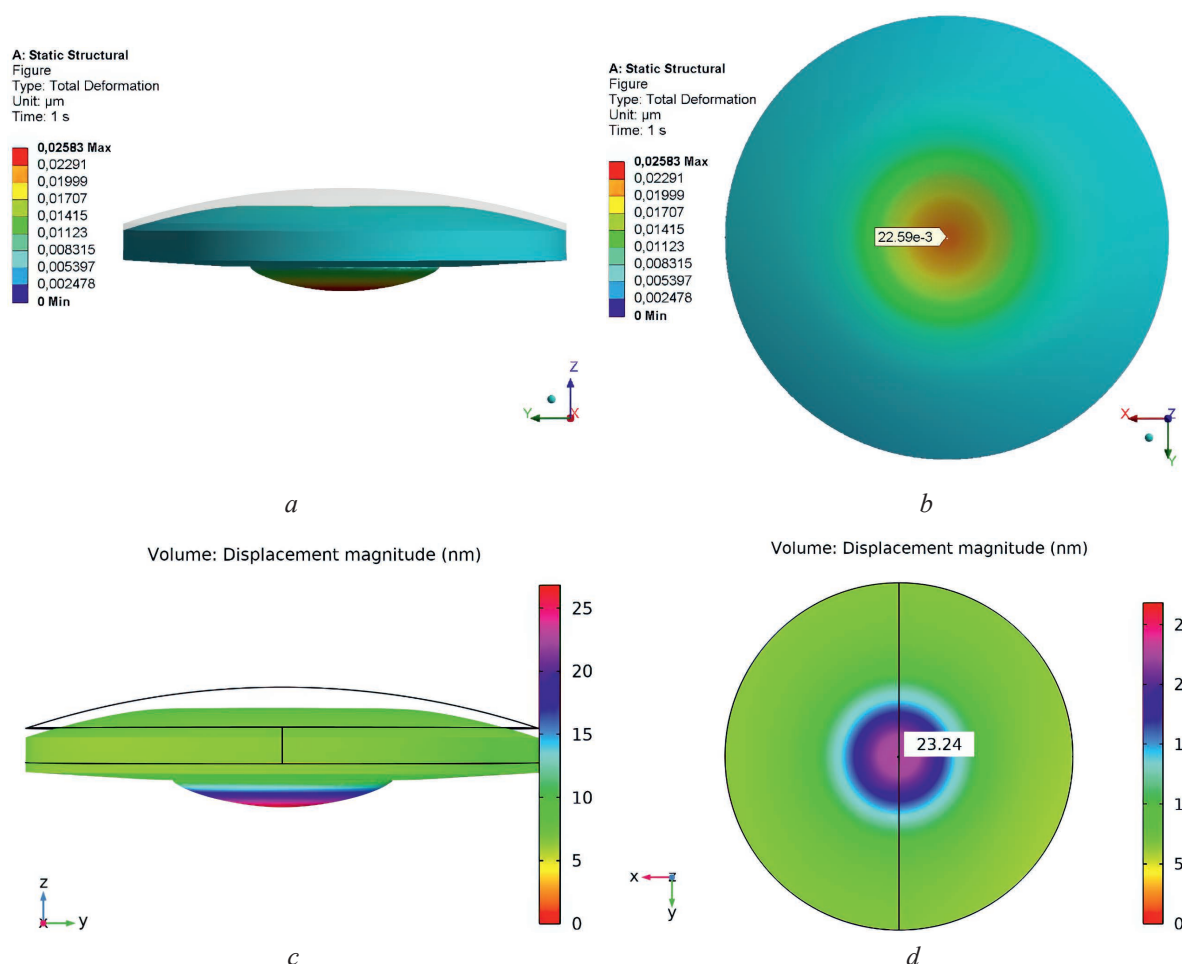


Рис. 2. Моделирование деформации линзы в различных программных комплексах CAE:
 a, c – вид сбоку; b, d – вид сверху

Fig. 2. Simulation of lens distortion in diverse CAE programs: a, c – side view; b, d – top view

Из рис. 2, *b* видно, что значение максимальной деформации линзы составило 22,59 нм, для рис. 2, *d* – 23,24 нм. Относительное расхождение между результатами – 2,8 %. Несмотря на расхождения, результаты демонстрируют сопоставимый порядок величин, что подтверждает корректность моделей. Незначительная разница полученных значений может быть обусловлена различными алгоритмами дискретизации в системах автоматизации проектных работ: для рис. 2, *a*, *b* применялся модифицированный метод Ньютона – Рафсона [6, 7], для рис. 2, *c*, *d* – гибридный подход с адаптацией сетки.

Зависимость деформации поверхности линзы от перепада давления ΔP изображена на рис. 3.

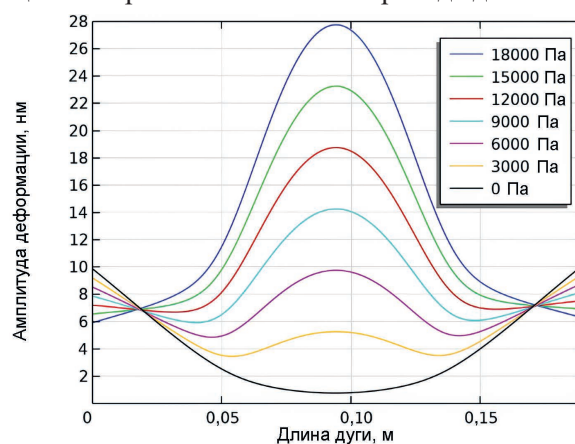


Рис. 3. Зависимость деформации поверхности линзы от перепада давления

Fig. 3. The impact of vacuum on the curvature of the lens

По оси абсцисс представлена радиальная координата, характеризующая положение точек на поверхности линзы в меридиональном сечении от оптического центра к периферии. По оси ординат отображена амплитуда деформации, обусловленная механическими напряжениями. Из графиков видно, что с увеличением ΔP деформация линзы возрастает. Такая зависимость критична, поскольку деформация вызывает расхождение между данными о поверхности, измеренными интерферометром, и ее реальной формой. Поэтому для высокоточных измерительных оптических систем деформация линзы под вакуумом является значительным источником вносимой погрешности.

По полученным данным можно сделать вывод о прямой зависимости увеличения деформации линзы от роста ΔP . Увеличение ΔP приводит к росту механических деформаций, максимальные значения которых наблюдаются в центральной зоне линзы с наибольшей кривизной. Деформация линзы при $\Delta P = 0$ обусловлена наличием гравитационного ускорения как внешней силы в модели. Результаты моделирования можно использовать для последующей коррекции ΔP , что позволяет сократить необходимость ресурсоемких экспериментальных испытаний при выборе оптимального значения ΔP для достижения достоверной интерференционной картины.

Заключение

1. Результаты исследования демонстрируют значительное влияние перепада давления, создаваемого вакуумным креплением, на механическую деформацию кварцевой линзы. Полученная деформация при заданных параметрах составила 23,24 нм, что может быть критичным для оптических систем, требующих высокой точности обработки поверхностей в нанометровом диапазоне. Это подчеркивает необходимость учета механических деформаций при проектировании и полировке оптических деталей, например, в проектах типа DUV-литографии, где требования к RMS могут быть менее 1,00 нм. В таком контексте деформация 23,24 нм становится неприемлемой.

2. Представленное исследование открывает возможность для дальнейшего изучения методов компенсации деформаций линзы, вызванных внешними силами, что может быть полезно для повышения точности интерферометрических измерений и улучшения качества обработки оптических поверхностей.

Список литературы

1. Morphology Evolution of Fused Silica Surface During Ion Beam Figuring of High-Slope Optical Components / W. Liao [et al.] // Applied Optics. 2013. Vol. 52, No 16. P. 3719–3720. DOI: 10.1364/AO.52.003719.

2. Correction of High Spatial Frequency Errors on Optical Surfaces by Means of Ion Beam Figuring / M. Ghigo [et al.] // *Optical Manufacturing and Testing VII*. 2007. Vol. 6671. DOI: 10.1117/12.734273.
3. Ion Beam Figuring System for Ultra-Precise Optics / Z. Yuan [et al.] // *Key Eng. Mater.* 2012. Vol. 516. P. 19–24. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.516.19.
4. Интерферометрия, как высокоточный инструмент для контроля оптических элементов прецизионной оптики / Е. Е. Майоров [и др.] // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2023. Вып. 11. С. 192–196. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-192-196.
5. Ядровская, М. В. К вопросу о компьютерном моделировании / М. В. Ядровская // *Advanced Engineering Research*. 2020. Т. 20, № 3. С. 332–345. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345.
6. Polyak, B. T. Newton's Method and Its Use in Optimization / B. T. Polyak // *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 181. P. 1086–1096. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.06.0.
7. Meza, J. C. Newton's Method / J. C. Meza // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 2010. Vol. 3. P. 75–78. DOI: 10.1002/wics.129.

Поступила 24.04.2025

Принята в печать 16.09.2025

References

1. Liao W., Dai Y., Xie X., Zhou L. (2013) Morphology Evolution of Fused Silica Surface During Ion Beam Figuring of High-Slope Optical Components. *Appl Opt.* 52 (16), 3719–3720. DOI: 10.1364/AO.52.003719.
2. Ghigo M., Canestrari R., Spiga D., Novi A. (2007) Correction of High Spatial Frequency Errors on Optical Surfaces by Means of Ion Beam Figuring. *Optical Manufacturing and Testing VII*. 6671. DOI: 10.1117/12.734273.
3. Yuan Z., Dai Y. F., Xie X. H., Zhou L. (2012) Ion Beam Figuring System for Ultra-Precise Optics. *Key Eng. Mater.* 516, 19–24. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.516.19.
4. Maiorov E. E., Kurlov V. V., Borodyansky Y. M., Dagaev A. V., Tayurskaya I. S. (2023) Interferometry as a High-Precision Tool for Control of Optical Elements in Precision Optics. *Bull. Tul. State Univ. Tech. Sci.* 11, 192–196. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-192-196 (in Russian).
5. Yadrovskaya M. V. (2020) On the Issue of Computer Modeling. *Adv. Eng. Res.* 20 (3), 332–345. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345 (in Russian).
6. Polyak B. T. (2007) Newton's Method and Its Use in Optimization. *European Journal of Operational Research*. 181, 1086–1096. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.06.0.
7. Meza J. C. (2010) Newton's Method. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 3, 75–78. DOI: 10.1002/wics.129.

Received: 24 April 2025

Accepted: 16 September 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Ходяков И. В., инж.-техн. ОАО «Планар», магистрант каф. электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Макарцов И. О., инж. ОАО «Планар», магистрант каф. электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220033, Республика Беларусь,
Минск, просп. Партизанский, 2, корп. 2
ОАО «Планар»
Тел.: +375 29 331-72-46
E-mail: hodyakov12@gmail.com
Ходяков Илья Витальевич

Information about the authors

Khadziakou I. V., Process Engineer of OJSC “Planar”, Master's Student at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Makartsov I. O., Engineer of OJSC “Planar”, Master's Student at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220033, Republic of Belarus,
Minsk, Partizansky Ave., 2, Bld. 2
OJSC “Planar”
Tel.: +375 29 331-72-46
E-mail: hodyakov12@gmail.com
Khadziakou Ilya Vitalievich