

УДК 681.7.08

Исследование оптических свойств линз после лазерной модификации

Сырицкий Антони Борисович^(*)

syritsky@bmstu.ru

SPIN-код: 5750-4426

Иванова Варвара Андреевна

brodylo@bk.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено влияние лазерной модификации на оптические свойства линз. Перечислены и охарактеризованы ключевые оптические параметры, определяющие работу линз в различных сферах. Среди них рассматриваются фокусное расстояние, относительное отверстие, коэффициент преломления, коэффициент пропускания. Изучены методы измерения фокусного расстояния согласно ГОСТ 13095–82. Для каждого метода описаны принципы работы, схемы установки, точность измерений. Особое внимание уделено ограничениям применения каждого метода, также рассмотрены практические аспекты использования методов измерения в лабораториях различного уровня оснащения.

Ключевые слова: лазерная модификация линз, фокусное расстояние, измерение фокусного расстояния, метод увеличения, метод Фабри — Юдина, угломерный метод

Investigation of the optical properties of lenses after laser modification

Syritsky Anthony Borisovich^(*)

syritsky@bmstu.ru

SPIN-code: 5750-4426

Ivanova Varvara Andreevna

brodylo@bk.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The influence of laser modification on the optical properties of lenses has been examined. The key optical parameters that determine lens performance in various applications are listed and characterized. These include focal length, relative aperture, refractive index, and transmittance. Methods for measuring focal length according to GOST 13095–82 have been studied. For each method, the operating principles, setup schemes, and measurement accuracy are described. Special attention is given to the application limitations of each method, and practical aspects of using these measurement methods in laboratories with different levels of equipment are also considered.

Keywords: laser modification of lenses, focal length, focal length measurement, magnification method, Fabry — Yudin method, goniometric method

Введение. Развитие технологий лазерной обработки материалов открыло новые возможности для модификации оптических элементов, включая линзы. Основные преимущества использования лазерных технологий при создании

модифицированных областей — возможность управления размерами и формой области посредством управления энергетическими характеристиками, формирующего модифицированных областей излучения, а также бесконтактное воздействие и высокая воспроизводимость результатов [1]. Изменение их оптических характеристик может привести к созданию более эффективных и специализированных оптических систем, применяемых в медицине, промышленности и науке. В связи с этим исследование свойств линз после лазерной модификации представляет актуальную задачу.

Оптические свойства линз определяют их работу в различных приложениях и включают в себя несколько ключевых параметров. Величина фокусного расстояния является одной из основных оптических характеристик систем. Фокусное расстояние любой оптической системы — это расстояние от главной задней точки до заднего фокуса оптической системы [2]. Оно характеризует оптическую силу линзы и определяет ее способность собирать или рассеивать свет. Чем меньше фокусное расстояние, тем сильнее преломляющая способность линзы, что важно для систем с высокой степенью увеличения. Показатель преломления материала линзы определяет, насколько изменяется скорость света при прохождении через оптический элемент. Величина показателя преломления характеризует оптическую плотность прозрачных веществ. Чем больше показатель преломления среды, то есть чем более оптически плотной является среда, тем меньше скорость распространения света в ней [3]. Световая энергия, пройдя какую-либо среду, может уменьшиться вследствие отражения от встречающихся поверхностей, поглощения и рассеяния средой. Отношение светового потока, вышедшего из данной среды, к световому потоку, направляющемуся в данную среду, или, точнее говоря, падающему на ее пограничную поверхность, называется коэффициентом пропускания [4]. Высокий коэффициент пропускания важен для применения линз в точных измерительных приборах и медицинских устройствах, где потери света должны быть минимизированы.

Материалы и методы. Все три параметра (фокусное расстояние. Показатель преломления коэффициент пропускания) являются взаимосвязанными и оказывают влияние на характеристики линзы после лазерной модификации, что делает их изучение важным. На текущем этапе исследования особое внимание уделяется измерению фокусного расстояния, так как оно является ключевым параметром, определяющим эффективность линзы. Так как положение главной задней точки установить с достаточной точностью сложно, методы измерения фокусного расстояния являются косвенными. В основном для этого используют оптические скамьи и специальные приборы — фокометры [2]. В работе рассматриваются три метода измерения фокусного расстояния в соответствии с требованиями ГОСТ 13095–82 [5].

Результаты. Метод увеличения, основанный на сравнении размеров изображения объекта при разных положениях линзы (рис. 1). Испытуемый объектив (7) закрепляют в держателе. В задней фокальной плоскости коллиматора (6) устанавливают штриховую (5) шкалу, равномерно освещенную

источником света (1). Чтобы выделить расчетную длину волны, между источником и шкалой помещают светофильтр (4), соответствующий техническим условиям измеряемого объектива. Микроскоп (8) настраивают на резкое изображение штриховой шкалы (5), затем перекрестие микроскопа поочередно совмещают со штрихами i и k , фиксируя отсчеты по шкале окуляр-микрометра (n_i, n_k) и шкале поперечного перемещения (N_i, N_k). Каждое измерение повторяют не менее трех раз.

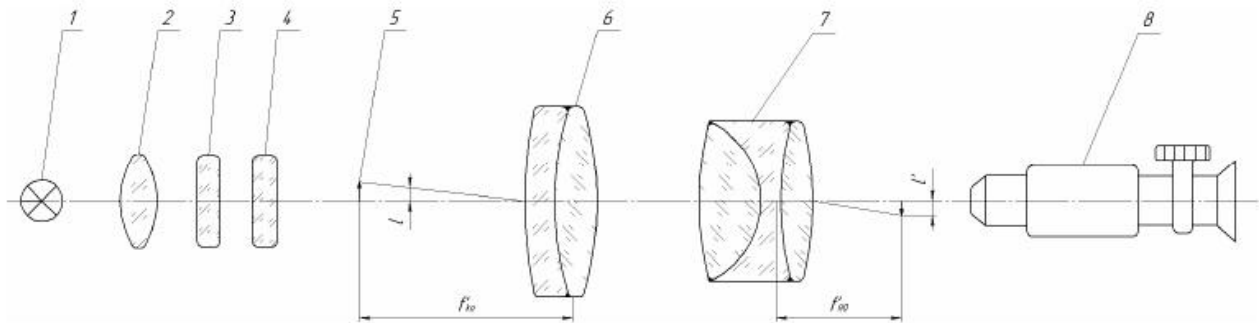


Рис. 1. Схема установки для измерения по методу увеличения:

1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — молочное (опаловое) стекло; 4 — светофильтр; 5 — штриховая шкала; 6 — объектив коллиматора; 7 — испытуемый объектив; 8 — микроскоп с окуляр-микрометром или микрометрическим поперечным перемещением

Фокусное расстояние испытуемого объектива при использовании окуляр-микрометра микроскопа определяют по формуле (1):

$$f'_{н.о} = f'_{к.о} \cdot \beta = f'_{к.о} \frac{l'}{l} = f'_{к.о} \frac{a(n_i - n_k)}{l} = K_1(n_i - n_k), \quad (1)$$

где $f'_{к.о}$ — фокусное расстояние объектива коллиматора, мм; β — линейное увеличение; l — расстояние на штриховой шкале между штрихами i и k (размер объекта), мм; l' — расстояние между изображениями штрихов i и k (размер изображения объекта), мм; a — цена деления шкалы барабана окуляр-микрометра, определяемая в предметной плоскости микроскопа с помощью объект-микрометра, мм; n_i, n_k — отсчеты по шкале барабана окуляр-микрометра; K_1 — постоянный коэффициент для штриховой шкалы данного коллиматора и используемого микрообъектива, заранее определенный по формуле (2):

$$K_1 = \frac{f'_{к.о} \cdot a}{l}. \quad (2)$$

Фокусное расстояние испытуемого объектива при использовании поперечного микрометрического перемещения микроскопа определяют по формуле (3):

$$f'_{н.о} = f'_{к.о} \frac{(N_i - N_k)}{l} = K_2(N_i - N_k), \quad (3)$$

где N_i, N_k — отсчеты по шкале поперечного перемещения микроскопа; K_2 — постоянный коэффициент для данной штриховой шкалы и коллиматора, заранее определенный по формуле (4):

$$K_2 = \frac{f_{\text{к.о.}}}{1}. \quad (4)$$

2. Метод Фабри — Юдина, использующий интерференционные явления для определения фокусного расстояния (рис. 2). Источник света (1) устанавливают так, чтобы щель коллиматора (3) находилась в центре светового пучка, а коллиматор (4) проверяют на бесконечность. Затем зрительную трубу разворачивают в горизонтальной плоскости и наклоняют коллиматор в вертикальной плоскости, чтобы изображение щели коллиматора оказалось в центре поля зрения. Окуляр зрительной трубы (7) настраивают на резкое изображение нитей винтового микрометра (8), после чего испытуемый объектив (6) помещают в объективодержатель. Далее выбирают пару щелей диафрагмы (5) в зависимости от размера измеряемого фокусного расстояния, добиваясь максимального расстояния между центрами пучков лучей в фокальной плоскости объектива зрительной трубы. Изображение щели коллиматора устанавливают параллельно вертикальной нити микрометра. Для определения расстояния между следами изображений пары щелей вертикальную нить окуляр-микрометра наводят на середину правого и левого следов, фиксируя отсчеты ($n_{\text{пр}}$, $n_{\text{лев}}$). Наведение выполняют не менее пяти раз, затем вычисляют среднее арифметическое. Для повышения точности измерение повторяют с другой парой щелей. Расстояние между следами изображений вычисляют по формуле (5):

$$d = k(n_{\text{пр}} - n_{\text{лев}}), \quad (5)$$

где k — цена деления окуляр-микрометра.

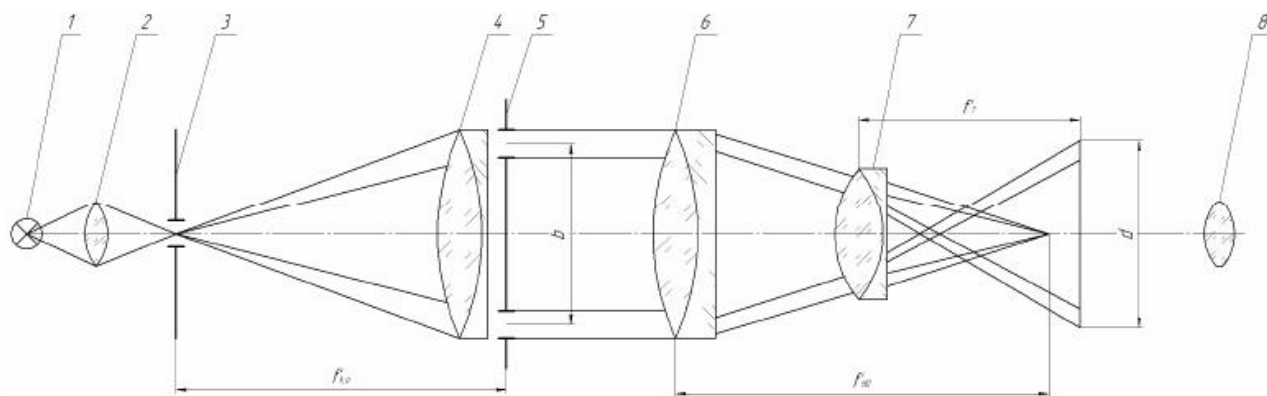


Рис. 2. Схема установки для измерения по методу Фабри — Юдина:

1 — источник света; 2 — конденсор, 3 — щель коллиматора; 4 — объектив коллиматора; 5 — диафрагма с набором пар щелей; 6 — испытуемый объектив; 7 — объектив зрительной трубы; 8 — окуляр микрометра

Фокусное расстояние объектива определяют по формуле (6):

$$f'_{\text{н.о.}} = \frac{b \cdot f'_T}{d}, \quad (6)$$

где b — расстояние между щелями, мм; f'_T — фокусное расстояние зрительной трубы, мм; d — расстояние между следами изображения выбранной пары щелей, измеренное окуляр-микрометром, мм.

3. Угломерный метод, при котором измеряется отклонение светового пучка, проходящего через линзу (рис. 3). Процесс начинается с установки начального отсчета δ_0 на угломерном устройстве (2), соответствующего положению, когда опорный торец объективодержателя (5) перпендикулярен визирной оси автоколлимационной трубы (10). Испытуемый объектив (4) закрепляют в объективодержателе первой линзой к зрительной трубе (1), а затем совмещают плоскость входного зрачка объектива с вертикальной осью поворотного устройства (6). Это достигается путем перемещения объективодержателя до тех пор, пока изображение входного зрачка не перестанет смещаться в выходном зрачке зрительной трубы при наблюдении. Далее устанавливают измерительную шкалу (7) на направляющие и перемещают ее до получения резкого изображения центрального штриха шкалы, контролируя это зрительной трубой, настроенной на бесконечность. Шкалу выставляют перпендикулярно автоколлимационной трубе в положении, соответствующем начальному отсчету δ_0 , и проверяют, чтобы при развороте поворотного устройства изображения штрихов шкалы не смещались по высоте в поле зрения зрительной трубы. В этом же положении нулевой штрих шкалы совмещают с перекрестьем зрительной трубы, перемещая шкалу параллельно фокальной плоскости. Перекрестье зрительной трубы совмещают с изображением нулевого штриха шкалы и фиксируют отсчет σ_0 на угломерном устройстве. Затем рычаг поворачивают до совмещения перекрестья со штрихом, соответствующим точке поля зрения объектива $+y'_i$, и снимают отсчет $\sigma_{+y'_i}$. Аналогично выполняют измерение для точки $-y'_i$, фиксируя отсчет $\sigma_{-y'_i}$. Эти действия повторяют для нескольких точек поля зрения объектива, указанных в технических условиях, и проводят не менее трех серий измерений для обеспечения точности результатов.

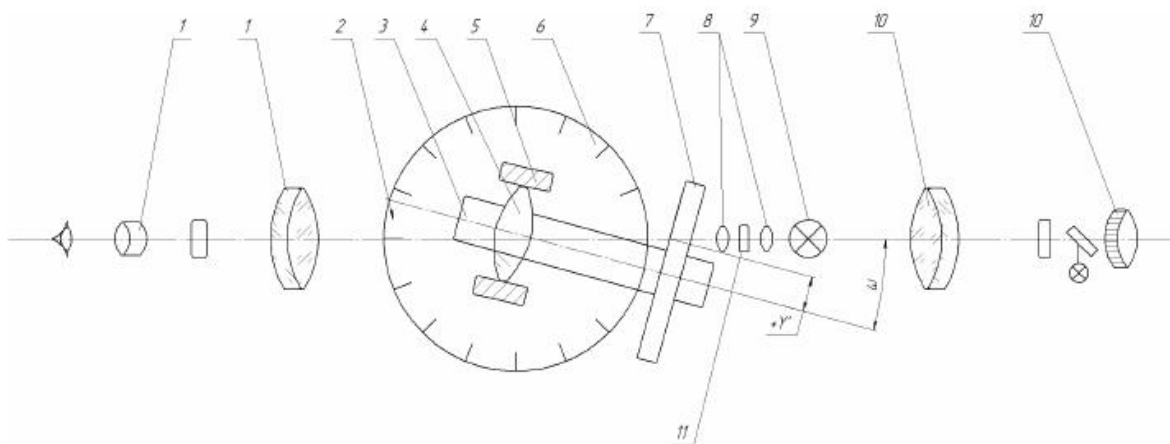


Рис. 3. Схема установки для измерения по угломерному методу:

1 — зрительная труба; 2 — угломерное устройство; 3 — направляющие; 4 — испытуемый объектив; 5 — объективодержатель; 6 — поворотное устройство; 7 — измерительная шкала; 8 — конденсор; 9 — источник света; 10 — автоколлимационная труба; 11 — светофильтр

Вычисляют фокусные расстояния для зон поля y_i' по формуле (7):

$$f_{y_i'}' = \frac{d_{+y_i'}' + d_{-y_i'}'}{\operatorname{tg}|\bar{\sigma}_{+y_i'}' - \bar{\sigma}_0| + \operatorname{tg}|\bar{\sigma}_{-y_i'}' - \bar{\sigma}_0|}, \quad (7)$$

где $d_{+y_i'}'$, $d_{-y_i'}'$ — расстояния на измерительной шкале между нулевым штрихом и симметричными от него штрихами в зоне поля зрения объекта за $\pm y_i'$.

Обсуждение полученных результатов. Рассмотренные три метода: метод увеличения, метод Фабри — Юдина, угломерный метод позволяют измерить фокусные расстояния с погрешностью не более 0,5 %, 0,4 %, 0,2 % соответственно.

У каждого из рассмотренных методов есть свои ограничения. Для метода увеличения фокусное расстояние объектива коллиматора должно быть не менее чем в 3 раза больше фокусного расстояния испытуемого объектива. В методе Фабри — Юдина измеряемое фокусное расстояние находится в пределах от 100 до 2000 мм. В угломерном методе результат рассчитывается, как среднее арифметическое двух значений фокусного расстояния, полученных с двумя точками поля зрения.

С финансовой точки зрения наиболее доступным является метод увеличения, требующий минимальных вложений и подходящий для учебных и малобюджетных лабораторий. Автоколлимационный метод Фабри — Юдина требует более дорогого оборудования, но обеспечивает хорошее соотношение точности и затрат, что делает его оптимальным для научных центров и производств с регулярным контролем линз. Угломерный метод отличается самой высокой стоимостью приборов и обслуживания, поэтому экономически оправдан только в высокоточной промышленности и НИИ, где критична максимальная точность измерений.

Заключение. Целью данной работы является комплексное изучение влияния лазерной модификации на фокусное расстояние линз, а также определение наиболее точного и надежного метода его измерения. Это необходимо для обеспечения высокой точности и воспроизводимости результатов при создании новых оптических элементов с заданными характеристиками. Достижение данной цели позволит оценить, как именно лазерная обработка изменяет оптические свойства линз, а также выявить закономерности, влияющие на их фокусирующую способность. В дальнейшем это может способствовать разработке более эффективных методов контроля качества оптических систем и созданию технологий по управлению параметрами линз для специализированных приложений в науке, медицине и промышленности.

Результаты работы поддержаны в рамках выполнения государственного задания номер FSN-2025-0009.

Список источников

- [1] Заколдаев Р.А., Сергеев М.М., Костюк Г.К., Яковлев Е.Б. Лазерное формирование волноводных структур в объеме пластин пористого стекла, пропитанного водным раствором глицерина. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2014, № 6, с. 41–46.
- [2] Смирнова Е.В., Егоров Г.В. Оценка результатов косвенных измерений фокусных расстояний линз. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2006, № 11, с. 160–165.
- [3] Гоголева Е.М., Фарафонтова Е.П. *Прикладная оптика*. Екатеринбург, Уральский университет, 2016, 6 с.
- [4] Тиходеев П.М. *Световые измерения в светотехнике*. Москва, Государственное энергетическое издательство, 1962, гл. 3, 464 с.
- [5] ГОСТ 13095–82. *Объективы. Методы измерения фокусного расстояния*. Москва, Издательство стандартов, 1988.