

УДК 535 (075.8) + 539.1 (275.8)

ИЗУЧЕНИЕ КИНОФОРМНОЙ ЛИНЗЫ КАК ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ

Г. И. Зайцев, Г. И. Колесников

STUDY OF KINOFORM LENS AS A ZONE PLATE

G. I. Zaitsev, G. I. Kolesnikov

Описанная в статье лабораторная работа посвящена изучению в университетах одного из современных оптических элементов – дифракционной линзы. Приводится описание самой работы и методические указания к ее выполнению.

The described laboratory work is devoted to studying one of modern optical elements – diffractive lens – at universities. The description of the work and guidance for its implementation are provided.

Ключевые слова: зоны Френеля, зонная пластинка, киноформная линза, фокусное расстояние.

Keywords: Fresnel zone, zone plate, kinoform lens, focal length.

В настоящее время широкое распространение получили оптические элементы, работа которых основана на дифракции света. Этот класс дифракционных оптических элементов (ДОО) включает в себя дифракционные решетки для спектральных исследований, фокусаторы лазерного излучения, концентрирующие его в тонкие линии или в заданные области пространства, расщепители световых пучков и т. д. Благодаря уникальным фокусирующим и абберационным свойствам ДОО используются в головках для записи и считывания в оптических приводах CD и DVD-форматов, для построения объективов телескопов, микроскопов и фотокамер для видимого и ИК-диапазонов. ДОО применяются также в проекционной аппаратуре, прожекторах и автомобильных фарах.

Для ознакомления с принципом действия и устройством ДОО нами была разработана и поставлена на кафедре физики КузГТУ лабораторная работа [2] по изучению фазовой зонной пластинки (ЗП) с целью определения ее фокусного расстояния.

Во время подготовки к работе студенты знакомятся с принципом Гюйгенса – Френеля и способом разбиения волнового фронта световой волны на зоны Френеля, учатся выводить формулу для радиуса внешней границы m -й зоны, сравнивают действие амплитудной и фазовой ЗП. В практической части работы студенты измеряют фокусное расстояние ЗП двумя различными способами, строят положение нулевого фокуса и фокальных точек высшего порядка и рассчитывают размер первой зоны Френеля.

В методическом пособии к работе указана цель работы, конкретные номера параграфов в списке рекомендуемой литературы и что нужно освоить в результате проработки учебного материала. Контрольные вопросы приведены не в конце методички, как это обычно делается, а в ее начале, чтобы студенты заранее знали, что от них требуется при выполнении работы. Там же изложена теория амплитудной и фазовой ЗП и пластинки с параболическим профилем толщины зон под названием киноформной линзы (КЛ). Затем описан порядок проведения эксперимента для определения фокусного расстояния. Так как у студен-

тов часто возникают проблемы с написанием заключительного вывода, то в описании работы даны рекомендации как его сделать так, чтобы он отражал физическое содержание проведенного опыта.

ЗП по своему действию подобна линзе (точнее говоря, сразу нескольким линзам, «вложенным» в одну апертуру). Если направить на ЗП монохроматический свет с длиной волны λ от точечного источника, находящегося на расстоянии a от пластинки, то на экране, расположенном на расстоянии b , будет наблюдаться ярко освещенная точка – изображение источника. Это объясняется тем, что вторичные световые волны от соседних прозрачных зон Френеля придут в данное место с разностью хода в λ и усилят друг друга. Относительное расположение ЗП, источника и его изображения связаны с радиусами зон Френеля r_m и их номерами $m = 1, 2, 3, \dots$ формулой:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} m\lambda. \quad (1)$$

Ее нетрудно преобразовать к виду:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}, \quad (2)$$

где

$$F = \frac{r_m^2}{m\lambda}. \quad (3)$$

Формула (2) аналогична формуле тонкой линзы, и величину F можно считать фокусным расстоянием, а саму ЗП – дифракционной линзой. Характерной особенностью ЗП по сравнению с линзой является то, что фокусное расстояние F сильно зависит от длины волны (хроматизм). Фокусирующее действие ЗП будет наблюдаться и тогда, когда разность хода между лучами из прозрачных зон равна 3λ , 5λ , ..., т. е. в каждом светлом кольце будет по 3, 5 и т. д. зон Френеля. Следовательно, для каждого монохроматического све-

та ЗП имеет несколько фокусов. Это аналогично существованию максимумов различных порядков у дифракционных решеток. Правда, интенсивность света в фокусах высшего порядка сильно убывает с ростом номера порядка фокуса.

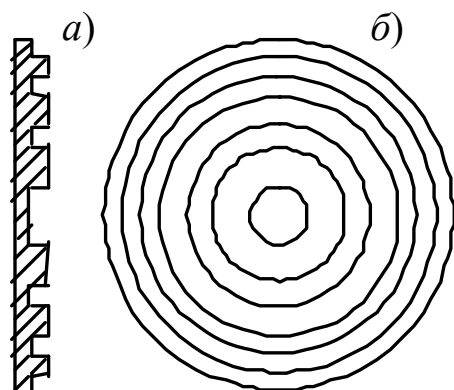


Рис. 1. Фазовая зонная пластинка: вид сбоку (а), вид спереди (б)

ЗП можно усовершенствовать, заставив «работать в фазе» четные и нечетные зоны Френеля.

Для этого нужно каким-либо образом ввести для каждой четной зоны дополнительный фазовый набег, равный π . Можно изготовить профилированную (фазовую) ЗП, имеющую разную толщину четных и нечетных колец (рис. 1). В этом случае яркость изображения увеличится примерно в 4 раза. Еще лучше изготавливать ЗП, у которых фаза выходящей световой волны в пределах каждой зоны изменяется плавно [1, 3, 5]. Тогда устраняются вторичные фокусы и, как следствие этого, существенно повышается яркость в основном фокусе. Этой цели удовлетворяет ЗП с криволинейным (параболическим) профилем толщины зон, показанный на рис. 2. Такая ЗП, называемая киноформной линзой (КЛ), собирает весь падающий на нее свет в точку (точнее, в малой окрестности этой точки).

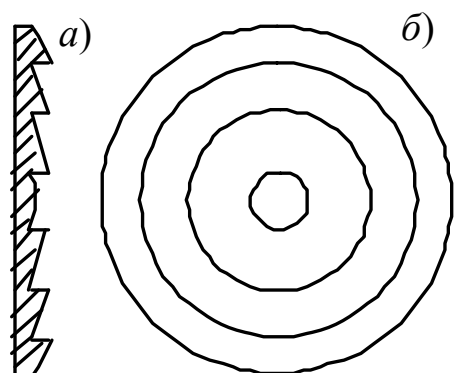


Рис. 2. Фазовая зонная пластинка с криволинейным профилем (киноформная линза): вид сбоку (а), вид спереди (б)

В работе используется киноформная линза, выштампованная из органического стекла так, что фазовый профиль ее зон близок к параболическому. Уста-

новка для исследования КЛ включает в себя светодиод в качестве источника монохроматического света, КЛ на подставке (рейтере) и экран, на котором наблюдают изображение светящегося светодиода. Измерения выполняются на оптической скамье, вдоль которой могут перемещаться рейтеры с киноформной линзой, экраном и светодиодом. Расстояния между деталями оптической системы измеряют с помощью рулетки. Наводка изображения на резкость производится на глаз. Чтобы уменьшить роль возникающих при этом неточностей, измерения в каждом случае рекомендуется выполнять несколько раз, а результаты – усреднять.

Фокусное расстояние КЛ можно определять различными способами [4]. 1. F определяют, исходя из формулы (2). Для этого нужно измерить расстояния a от светодиода до КЛ и b от КЛ до его изображения на экране.

При измерениях на одном конце оптической скамьи устанавливают рейтер со светодиодом, на другом – рейтер с экраном. Перемещая КЛ вдоль скамьи, получают на экране четкое изображение светодиода, и с помощью рулетки отсчитывают расстояния a и b . Затем изменяют расстояние между светодиодом и экраном и вновь повторяют измерения. Рекомендуется три измерения выполнить при увеличенном и три – при уменьшенном изображении. По результатам измерений вычисляют фокусное расстояние F , его среднее значение и погрешности.

Студентам предлагается проверить совместимость полученных результатов. Для этого нужно построить график, по осям которого отложить значения $1/a$ и $1/b$. Если результаты опыта описываются формулой (2), то все точки должны лечь на прямую, отсекающую на обеих осях отрезки, равные $1/F$. По графику тоже находится среднее значение фокусного расстояния.

2. Если расстояние между светодиодом и экраном превышает $4F$, то всегда найдутся два таких положения КЛ, при которых на экране получают отчетливые изображения светодиода: в одном случае (I) – увеличенное, в другом (II) – уменьшенное (рис. 3).

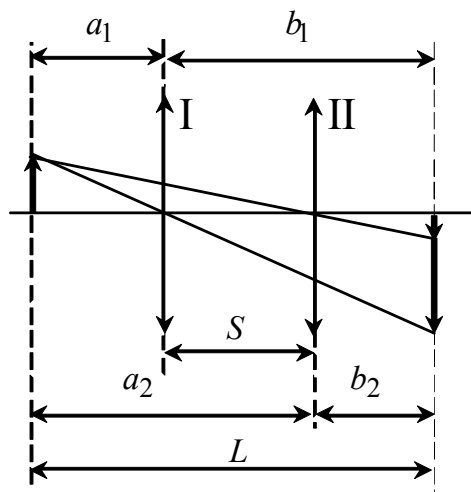


Рис. 3. Измерение фокусного расстояния киноформной линзы по методу «смещения»

Из соображений симметрии ясно, что $a_1 = b_2$ и $a_2 = b_1$. Обозначая расстояние между светодиодом и экраном через L , а расстояние между двумя положениями КЛ через S , получим $L = a_1 + b_1$ и $S = b_1 - b_2 = a_2 - a_1$. Отсюда

$$a_1 = \frac{L - S}{2} \quad \text{и} \quad b_1 = \frac{L + S}{2}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в формулу (2), найдем после несложных преобразований:

$$F = \frac{L^2 - S^2}{4L}. \quad (5)$$

Таким образом, для определения фокусного расстояния достаточно измерить расстояние L между светодиодом и экраном и расстояние S между двумя положениями КЛ, при которых на экране получаются четкие изображения. Опыт проводится при трех расстояниях L . Найденное при усреднении результатов

фокусное расстояние следует сравнить с значением, полученным при измерениях первым способом.

Зная фокусное расстояние КЛ, можно по формуле (3) определить радиус ее первой зоны. Следует отметить [6], что для киноформной линзы радиус первой зоны в $\sqrt{2}$ раз больше, чем для зонной пластинки, поскольку разность хода от краев двух соседних зон здесь λ , а не $\lambda/2$ как для ЗП. С учетом этого формула (3) дает для радиуса первой ($m = 1$) зоны выражение:

$$r_1 = \sqrt{2F\lambda}. \quad (6)$$

При расчете по этой формуле нужно положить, что длина волны излучения светодиода равна $\lambda = 0,5$ мкм.

В выводе студентам предлагается обсудить совпадение или расхождение результатов измерения фокусного расстояния киноформной линзы разными способами и ответить на вопрос – какой способ точнее.

Литература

1. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика: учебник. М.: Изд. Моск. ун-та, 1998. 656 с.
2. Зайцев Г. И. Практикум по оптике и квантовой физике. Кемерово: КузГТУ, 2014. 148 с.
3. Ландсберг Г. С. Оптика: учеб. пособие для студентов физических специальностей вузов. 6-е изд., стереотип. М.: Физматлит, 2003. 848 с.
4. Трофимова Т. И. Курс физики: учебное пособие. М.: Академия, 2005. 560 с.
5. Шредер Г., Трайберг Х. Техническая оптика. М.: Техносфера, 2006. 422 с.

Информация об авторах:

Зайцев Геннадий Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики КузГТУ, geniz@kemcity.ru.

Gennady I. Zaitsev – Candidate of Physics and Mathematics, Assistant Professor at the Department of Physics, Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev.

Колесников Геннадий Иванович – кандидат физико-математических наук, профессор, советник при ректорате Кемеровского государственного сельхозинститута, ksai@ksai.ru.

Gennady I. Kolesnikov – Candidate of Physics and Mathematics, Professor, Advisor to the Rector of Kemerovo State Agricultural Institute.

Статья поступила в редколлегию 30.01.2015 г.