



УДК 535.317

МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТИВОВ ПО ЧАСТЯМ**Н.Д. Зорич^а, И.Л. Лившиц^а, С.Г. Окишев^а, Е.А. Сомова^а, Р.В. Анитропов^а, М.В. Летуновская^а**^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская ФедерацияАдрес для переписки: nenadz@corp.ifmo.ru**Информация о статье**

Поступила в редакцию 17.01.17, принята к печати 20.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-234-241

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Зорич Н.Д., Лившиц И.Л., Окишев С.Г., Сомова Е.А., Анитропов Р.В., Летуновская М.В. Метод проектирования сложных объективов по частям // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 234–241. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-234-241

Аннотация

Представлен метод проектирования ультрафиолетового объектива для оптической литографии. Подход к проектированию подобного объектива заключается в разделении сложного объектива на два более простых. У первого, фронтального объекта предмет расположен на конечном расстоянии, а изображение – в бесконечности. Вторая (приемная) часть литографического объектива представляет собой обычный фотообъектив. Простые объективы рассчитываются отдельно, а затем объединяются в один сложный объектив с последующей «сквозной» оптимизацией параметров. Стыковка двух частей литографического объектива выполняется в плоскости апертурной диафрагмы. Оба объектива проектируются по схеме с вынесенным входным зрачком. При выборе исходных оптических систем простых объективов использована программа с элементами искусственного интеллекта SYNOPSIS, OSD. Предложенный метод описывает шаги получения желаемой исходной оптической схемы и решает проблемы оптимизации системы с высокой апертурой. Продемонстрирован пример расчета литографического бителецентрического объектива. Объектив оптимизирован как дифракционно-ограниченная система для спектрального диапазона 362–368 нм с основной длиной волны 365 нм. Число Штреля на основной длине волны 365 нм на краю поля 0,989. Объектив имеет длину 630 мм, состоит из 18 линз с 4 асферическими поверхностями, увеличение 0,2, дисторсия менее 1%. Размер изображения составляет 22×22 мм². Для положительных линз использованы стекла S-FPL53, S-FPL51Y, BAL15Y, а для отрицательных линз – PBM2Y, PBL25Y. Расчетное значение коэффициента пропускания при наличии просветляющего покрытия 43%.

Ключевые слова

литография, проектирование оптических систем, сложные объективы, ультрафиолетовое излучение, искусственный интеллект, исходная оптическая схема

Благодарности

Работа выполнена при поддержке People Programme (Marie Curie Actions) Седьмой рамочной программы Европейского Союза (FP7/2007-2013), грант REA, соглашение № PITN-GA-2013-608082 «ADOPSYS». Авторы выражают благодарность мистеру Дональду Дилворсу, президенту компании SYNOPSIS, OSD за ценные советы и многочисленные консультации.

DESIGN METHOD FOR COMPLEX LENSES BY DIVIDING THEM INTO PARTS**N.D. Zoric^а, I.L. Livshits^а, S.G. Okishev^а, E.A. Somova^а,
R.V. Anitropov^а, M.V. Letunovskaya^а**^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian FederationCorresponding author: nenadz@corp.ifmo.ru**Article info**

Received 17.01.17, accepted 20.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-234-241

Article in Russian

For citation: Zoric N.D., Livshits I.L., Okishev S.G., Somova E.A., Anitropov R.V., Letunovskaya M.V. Design method for complex lenses by dividing them into parts. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 234–241 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-234-241

Abstract

The paper deals with a method of ultraviolet objective design for optical lithography. The approach to such complex lens design is to split the complex objective into the two simpler ones. The front objective has the object at the finite distance and

the image placed at the infinity. The second (receiver) part of lithographic lens acts as an ordinary photographic objective. The separate parts of complex objective have been calculated independently and combined into a single complex lens with the subsequent cross-cutting optimization of parameters. The two independent parts of lithographic lens are combined in an aperture stop plane. The both lenses are designed according to the scheme with an external entrance pupil. In order to generate starting points of optical systems, we have used the elements of artificial intelligence in lens design software, SYNOPSIS, OSD. The proposed method describes the steps of obtaining feasible starting points and solves the typical optimization challenges within the systems with high aperture. The calculations of characteristics are explained on an example of bi-telecentric lithographic objective. The objective is optimized as a diffraction-limited system for the spectral range from 362 to 368 nm where the principal color is 365 nm. The Strehl ratio at the principal color of 365 nm at the edge of the field is equal to 0.989. The objective has a total track of 630 mm, consists of the 18 lenses with 4 aspherical surfaces. The total magnification is 0.2, with the distortion less than 1 %. The image size is $22 \times 22 \text{ mm}^2$. We have used S-FPL53, S-FPL51Y, BAL15Y glass material for the positive lenses and PBM2Y, PBL25Y for the negative lenses. The simulated internal transmission after the adding of antireflection coating is equal to 43 %.

Keywords

lithography, optical design, composite lens, UV, artificial intelligence, starting point

Acknowledgements

The research leading to these results has received funding from the People Programme (Marie Curie Actions) of the European Union's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under REA grant agreement no. PITN-GA-2013-608082 'ADOPSYS'. The authors would like to express special thanks to Mr. Donald Dilworth, CEO of SYNOPSIS, OSD for the numerous and valuable advice.

Введение

Один из самых сложных этапов в проектировании оптических систем – выбор исходной оптической схемы. Разработчики программного обеспечения для проектирования оптических систем в последнее время начинают предлагать пользователю возможности по автоматизированному выбору исходной схемы [1]. С того момента, как для проектирования оптических систем стали использовать компьютеры, скорость расчета хода лучей через оптическую систему увеличилась в тысячи раз, но скорость создания новых оптических схем возросла незначительно, лишь в 2–3 раза [2]. По этой причине проблема поиска, а затем выбора лучших оптических схем является весьма актуальной, особенно для сложных оптических систем, в том числе объективов для литографии. Оптическая литография основывается на получении изображения на кремниевых пластинах для производства полупроводников. До сих пор не существует альтернативы оптической литографии, поэтому требуется постоянное усовершенствование оптических систем [3]. В одной из публикаций известного разработчика объективов для литографии Давида Шафера было сказано: «Делать больше меньшими усилиями и затратами, по сути, означает, что для повышения уровня производительности не всегда требуется повышение стоимости или сложности проектирования. Зачастую возможно получить более высокие характеристики за счет изменения допусков в самом начале проектирования» [4]. Эффективную методику выбора исходной оптической схемы предоставляет теория композиции М.М. Русинова [5].

Авторы настоящей работы активно используют такой подход при проектировании сложных объективов [1, 5]. В настоящей работе мы развиваем этот подход применительно к построению проекционной оптической системы для литографии, спецификой которой являются жесткие технические требования: рабочая длина волны 365 нм, размер изображения 22 мм, линейное увеличение $0,2\times$, aberrации должны быть исправлены до дифракционного предела.

Основная идея предлагаемого решения

Принципиальная схема сложной проекционной оптической системы для литографии показана в работе [1]. Источником ультрафиолетового света является лазер, от которого луч проходит через осветитель, который расширяет, гомогенизирует и направляет пучок лучей в конденсорную линзу. Далее лучи проходят через фотомаску, проекционный объектив и попадает на пластину, покрытую светочувствительной пленкой [6].

Улучшение характеристик литографических систем связано с уменьшением длины волны и увеличением числовой апертуры, однако возможные решения ограничены такими противоречивыми требованиями, как дифракционный предел, габариты системы, минимальное количество оптических элементов, наличие необходимых материалов, ограничения по углам падения главного луча на матрицу и т.д. [7]. Мы предлагаем упростить проектирование литографических объективов на этапе выбора исходной оптической схемы за счет разделения всей системы на две части. На рис. 1 показана схема литографического би-телецентрического объектива, которая иллюстрирует идею разделения сложного объектива на части.

В общем виде литографический объектив работает с конечного на конечное расстояние с требуемым увеличением. Представим эту оптическую систему как сумму двух более простых объективов – двух фотографических объективов, каждый из которых работает как бесконечности на конечное расстояние. При этом фронтальный объектив при установке его в окончательную схему повернут на 180° , т.е. в

своем рабочем состоянии имеет предмет на конечном расстоянии и изображение в бесконечности, а вторая (приемная) часть литографического объектива представляет собой обычный фотообъектив (рис. 1). Стыковка частей, составляющих литографический объектив, происходит в плоскости апертурной диафрагмы (АД), поэтому оба объектива должны быть спроектированы по схеме с вынесенным входным зрачком (рис. 2).

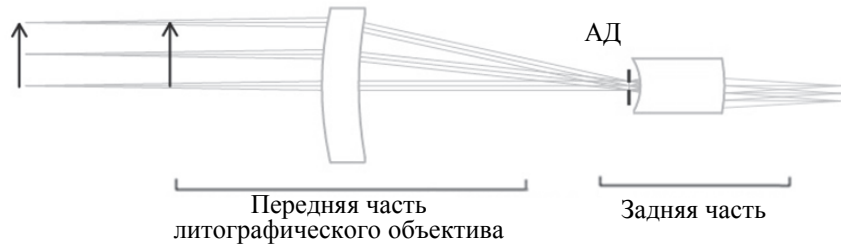


Рис. 1. Схема литографического би-телецентрического объектива

Расчет компонентов литографического объектива

Преимуществом предлагаемого подхода является то, что каждый объектив проектируется достаточно стандартным образом, что обеспечивает быстроту и простоту проектирования. Таким образом, определение технических характеристик каждого объектива состоит из стандартных этапов:

1. выбор фокусного расстояния;
2. определение светосилы;
3. определение углового поля;
4. выбор положения апертурной диафрагмы;
5. выбор исходной оптической схемы;
6. расчет исходной оптической схемы;
7. оптимизация;
8. оценка качества изображения по критериям дифракционно-ограниченных оптических систем (число Штреля, критерий Рэлея).

Исходные оптические схемы для обоих компонентов литографической системы получены с помощью функции искусственного интеллекта (AI), имеющегося в программном обеспечении SYNOPSIS, этот процесс подробно описан в публикации [1]. Особенности расчета отдельных объективов представлены ниже.

Задний объектив. Выбор фокусного расстояния объектива задней части $f=100$ мм определяет его основные технические характеристики, представленные в табл. 1.

Характеристика	Значение
Расстояние до объекта	бесконечность
Высота объекта в угловой мере	5,69°
Высота апертурного луча, $DN/2$	41,67 мм
FN (диафрагменное число)	1,25
Угловое поле, ω	5,69°
Фокусное расстояние, f	100 мм
Размер изображения в плоскости Гаусса, y'	10 мм
Расстояние до изображения (задний фокальный отрезок)	22 мм

Таблица 1. Характеристики исходной оптической схемы

Апертура заднего объектива определяется из табл. 1 и совпадает с задней апертурой всего объектива. Угловое поле определяется по формуле (1) при заданном значении размера изображения, которое также берется из технического задания (табл. 1).

$$\omega = \arctan\left(\frac{y'}{f'}\right) = \arctan\left(\frac{9,96}{100}\right) = 5,69, \tag{1}$$

$$FN = \frac{f}{DN} \rightarrow DN = \frac{f}{FN} = \frac{100}{1,2} = 83,33. \tag{2}$$

Апертура объектива (половина номинального диаметра DN) получена по формуле (2). По этой причине фокусное расстояние задней части, равное 100 мм, было выбрано с целью обеспечения разумных габаритов литографического объектива [8]. Очень важным является требование по обеспечению телецентричности главного луча в пространстве изображений. Объектив, имеющий телецентрический ход главного луча в пространстве изображений, обладает важным свойством – размер его изображения оста-

ется неизменным с перемещением объекта в пределах определенного диапазона, который называют «глубина резкости» или «диапазон телецентричности». Это достигается установкой апертурной диафрагмы точно в фокальной плоскости передней оптической группы: входящие лучи направлены на входной зрачок, который практически перемещается в бесконечность.

Для отсутствия параллакса в объективе для фотолитографии главный луч должен падать строго по нормали к поверхности изображения. Наиболее удобна для этих целей схема объектива с вынесенным вперед входным зрачком (рис. 2). Ее особенностью является то, что ее апертурная диафрагма вынесена вперед и совпадает с входным зрачком объектива. Если совместить точку пересечения плоскости входного зрачка с точкой переднего фокуса объектива (F), все главные лучи будут иметь телецентрический ход в пространстве изображений. Условие телецентричности будет соблюдаться для любых углов падения главного луча. Однако из практики известно, что при углах падения более 30° следует учитывать аберрации в зрачках соответствующей части оптической системы.

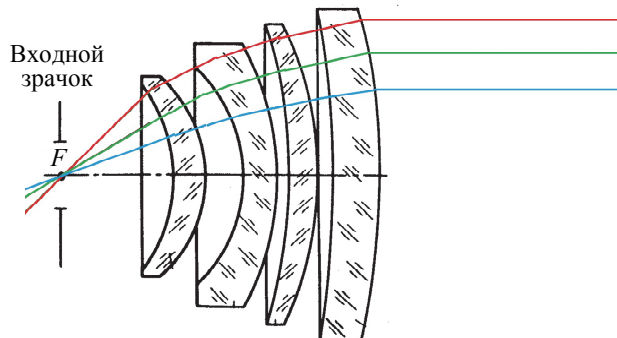


Рис. 2. Схема объектива с вынесенным вперед входным зрачком, расположенным в точке его переднего фокуса F

Передний объектив. Вычисление фокусного расстояния переднего объектива через заданное фокусное расстояние заднего производится по формуле

$$f_1' = f_2' \cdot V,$$

где f_1' – фокусное расстояние переднего объектива; f_2' – фокусное расстояние заднего объектива; V – линейное увеличение проекционного литографического объектива. Выбирая $V=5^\times$, получаем $f_1'=500$ мм.

Относительное отверстие переднего объектива рассчитывается из соображения, что обе части объектива должны стыковаться в плоскости апертурной диафрагмы. Диаметр апертурной диафрагмы определяется при условии, что задано фокусное расстояние заднего объектива (100 мм) и его задняя апертура. Угловое поле на выходе переднего объектива равно величине углового поля заднего объектива и рассчитывается по формуле

$$\text{tg}w' = y' / f',$$

где f' – фокусное расстояние заднего объектива; y' – половина диагонали изображения заднего объектива; w' – угловое поле заднего объектива.

Характеристика	Значение
Расстояние до объекта	бесконечность
Высота объекта	$5,69^\circ$
Высота апертурного луча, $DN/2$	41,67 мм
FN (диафрагменное число)	6
Угловое поле, ω	$5,69^\circ$
Фокусное расстояние, f'	500 мм
*Размер изображения в плоскости Гаусса, y'	50 мм
*Расстояние до изображения	150 мм

Примечание. Характеристики, помеченные знаком (*), относятся к исходной оптической схеме переднего объектива, работающего в этом случае как «прямой фотообъектив», когда его объект находится на бесконечности и размер предмета определяется в угловой мере, а его изображение находится на конечном расстоянии и его размеры выражены в единицах длины.

Таблица 2. Характеристики оптической схемы переднего объектива

Для корректной состыковки компонентов литографического объектива выходной зрачок переднего объектива должен быть расположен в точке заднего фокуса переднего объектива по аналогии с определением положения входного зрачка заднего объектива [1]. Выходной зрачок переднего объектива совпадает с апертурной диафрагмой, которая, в свою очередь, совпадает с входным зрачком и апертурной диафраг-

мой заднего объектива. Учитывая, что входной зрачок переднего объектива в инвертированном виде должен быть расположен в точке его переднего фокуса, при синтезе переднего объектива для $f'_1=500$ мм было получено расстояние от последней линзы переднего объектива до плоскости выходного зрачка, равное 128,75 мм.

В табл. 2 приведены технические характеристики переднего объектива.

Окончательный синтез объектива

Две части оптической системы, разработанные независимо друг от друга, требуют дополнительной оптимизации после их стыковки. Для этого нами выбран программный продукт SYNOPSIS [9], позволяющий производить оптимизацию многокомпонентных оптических систем в реальном времени с точностью до дифракционного предела. Окончательная проверка и коррекция аберраций, а также оптимизация функции частотно-контрастной характеристики проекционного литографического объектива в сборе были сделаны с использованием программного обеспечения ZEMAX Optics Studio [10].

Сочетая две части объектива в одну оптическую систему, необходимо учитывать положение апертурной диафрагмы в точке, одновременно совпадающей с точками фокуса переднего и заднего объективов. Такое расположение делает проекционный объектив афокальным, при этом его входной и выходной зрачки расположены в бесконечности, что обеспечивает телецентричность. Этапы соединения показаны на рис. 3. В нашем случае задняя часть объектива должна быть обращена и определена как фокальная, в противном случае по умолчанию в программном обеспечении SYNOPSIS она может остаться афокальной, в результате чего расчет аберраций будет выполнен неверно [11].

Инверсированная передняя часть литографического объектива была обращена и связана с задней частью с помощью команд искусственного интеллекта REVERSE и COMBINE (рис. 3).

Следует учитывать, что в синтезированной системе каждый из составляющих объективов работает в условиях, отличных от условий предварительного расчета. В исходном состоянии для каждого объектива предметная плоскость располагалась в бесконечности, и на входной зрачок падал идеальный плоский волновой фронт. В объединенной системе первый объектив работает в обратном ходе, т.е. на вход поступает идеальный сферический волновой фронт. Плоскость изображения для него лежит в бесконечности и является предметной плоскостью для второго объектива. Однако поступающий на второй объектив волновой фронт уже нельзя считать плоским. Искажения вносят аберрации первого.

На предварительной стадии расчета (каждого объектива в отдельности) удобно выдерживать телецентричность программно, а положение входного зрачка контролировать с тем, чтобы он не попадал внутрь одной из линз и не имел слишком большого удаления (т.е. предлагается практически соблюдать условие вынесенного входного зрачка для обеих частей объектива на стадии их стыковки).

Учитывая последующее объединение объективов, можно несколько ослабить требования к коррекции нечетных аберраций (комы, дисторсии и хроматизма увеличения), так как в объединенной системе они будут частично компенсированы. Не следует также допускать большой сферической аберрации входного зрачка, поскольку в окончательной системе на месте входного зрачка будет располагаться реальная апертурная диафрагма, и эта аберрация вызовет нарушение телецентричности – функция $\omega'(y') \neq 0$. В этой связи одной из особенностей предлагаемого метода являются некоторые сложности при стыковке двух частей и их последующей совместной оптимизации [12, 13]. Однако эту проблему можно преодолеть, и она не снижает ценности и простоты предлагаемой идеи.

Начальная предварительная компоновка с симметричным распределением оптических элементов в соответствии со знаками их оптических сил в пространстве вокруг апертурной диафрагмы (+ – + или – + –) может быть более перспективной, чем несимметричная. Как уже было отмечено в [1], для поиска исходной оптической схемы литографического объектива был применен макрос DSEARCH SYNOPSIS, OSD, который имеет один существенный недостаток – невозможность управлять положением диафрагмы. Однако сдвиг апертурной диафрагмы может быть подходящим параметром для управления аберрациями комы, дисторсии и астигматизма в нашей квазисимметрической системе [14]. Причем воздействие на дисторсию более эффективно, чем на астигматизм. При этом разумеется, нарушается функция $\omega'(y') \neq 0$. По этой причине этот сдвиг не должен быть чрезмерным.

Окончательная коррекция дисторсии выполняется введением асферических поверхностей. Используя информацию, представленную на рис. 4 – распределение коэффициентов Зейделя в литографическом объективе, можно заметить, что наиболее сильное влияние на дисторсию оказывают компоненты переднего объектива, поэтому именно их параметры следует включать в число параметров, обеспечивающих коррекцию дисторсии [15]. По этой причине мы добавили 4 асферические поверхности в переднюю часть литографического объектива на заключительных этапах проекта, пытаясь получить дисторсию менее чем 1%.

Мы провели несколько циклов моделирования в SYNOPSIS, чтобы определить оптимальное положение апертурной диафрагмы, обеспечивающее наилучшую коррекцию астигматизма и дисторсии. Результаты показывают, что лучшим положением реальной апертурной диафрагмы является положение 2 (рис. 5).

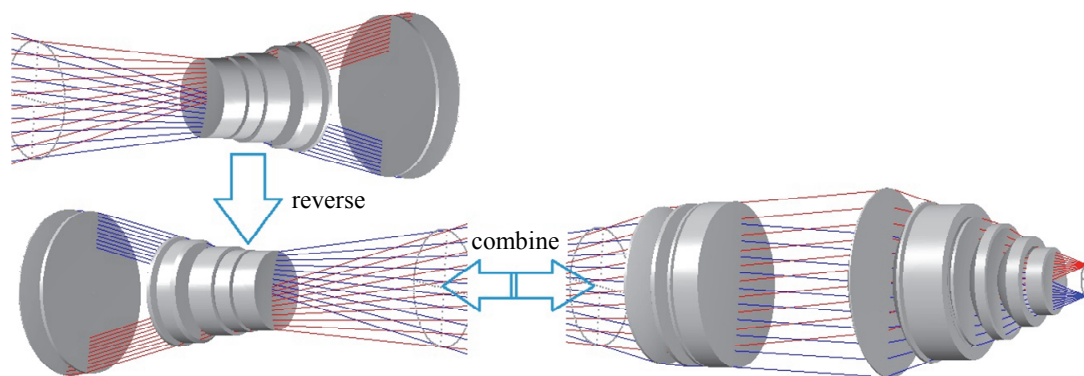


Рис. 3. Схема стыковки обеих частей объектива в общую схему (команды программного обеспечения: reverse – обратить; combine – соединять)

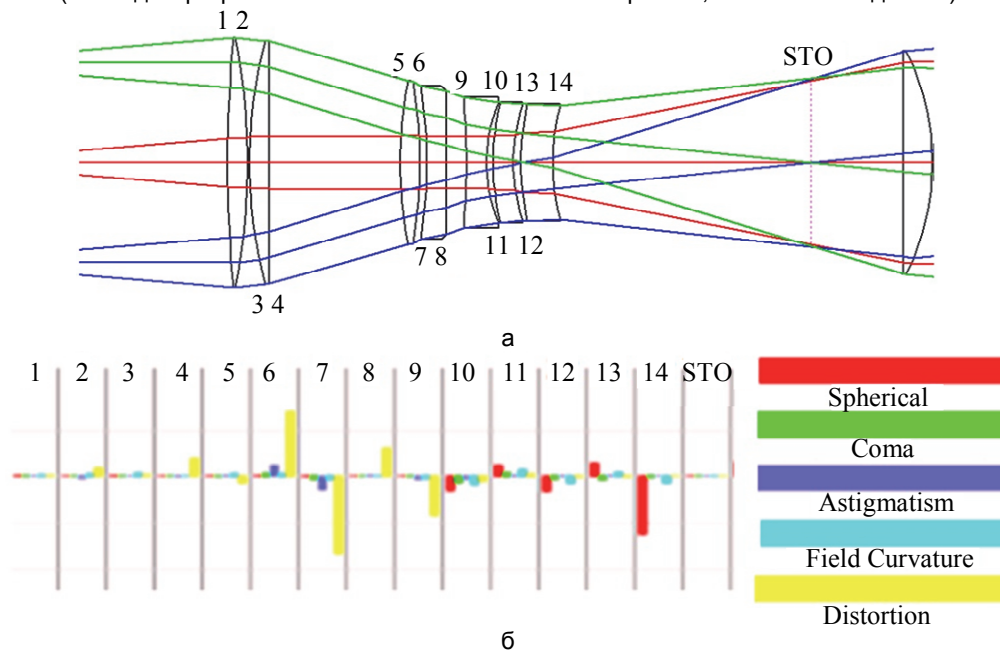


Рис. 4. Распределение коэффициентов Зейделя в литографическом объективе: нумерация поверхности линз в передней части литографского объектива, STO – апертурная диафрагма (а); графически представлены коэффициенты Зейделя: сферические aberrации (Spherical), кома (Coma), астигматизм (Astigmatism), кривизна поля (Field curvature), дисторсия (Distortion) (б)

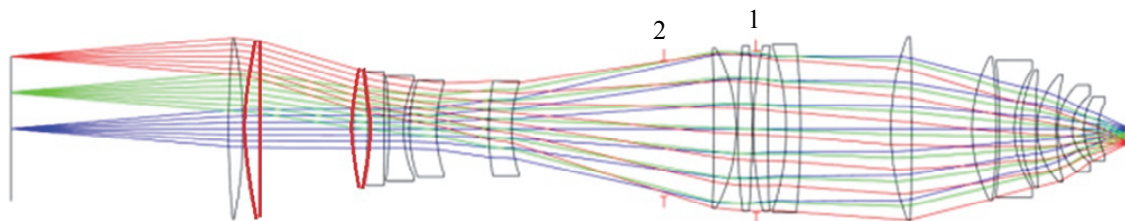


Рис. 5. Литографический объектив со смещенной диафрагмой: 1 и 2 положения апертурной диафрагмы

Проблема оптимизации литографических объективов является одной из самых сложных задач при оптимизации оптических систем. Современные ультрафиолетовые литографические объективы имеют более двадцати компонентов с асферическими поверхностями, что дает более ста переменных при оптимизации. Наиболее важными требованиями, помимо собственно качества изображения, являются кратность увеличения, общее количество лучей и обеспечение требуемых значений телецентричности при сохранении общей длины системы [16, 17]. В связи с вышеперечисленными причинами оптимизация оптических систем с высокой числовой апертурой является сложной проблемой, которая может быть решена, например, с помощью предлагаемого метода.

Разработанный на базе научно-технической лаборатории автоматизированного проектирования оптико-информационных и энергосберегающих систем Университета ИТМО ультрафиолетовый литогра-

фической объектив (рис. 5) был оптимизирован в программе SYNOPSIS с помощью оценочной функции, которая включает, в числе прочих, матрицу для оптимизации лучей в сагиттальной плоскости (GSR) и требования по минимизации оптической разности хода (GNO), а также имеет ограничения для телецентричности главного луча, рабочего FN – диафрагменного числа и кратности увеличения.

Поскольку литографические объективы должны быть дифракционно-ограниченными, прежде всего необходимо минимизировать оптическую разность хода для всех точек поля. Заключительный шаг – оптимизация системы по критерию непосредственно MTF частотно-контрастных характеристик (ЧКХ), которая была проведена на программном обеспечении ZEMAX с использованием более чем 80 переменных.

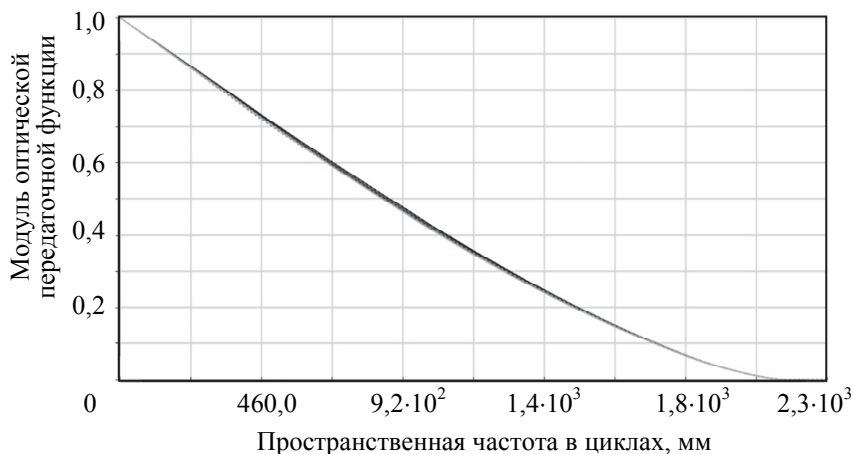


Рис. 6. Частотно-контрастная характеристика литографического объектива

На рис. 6 представлены полихроматические ЧКХ проектируемого литографического объектива, который был оптимизирован как дифракционно-ограниченная система для спектрального диапазона 362–368 нм с основной длиной волны 365 нм. Расчетная ЧКХ практически не отличается от идеальной теоретической (дифракционной). Число Штреля для 365 нм на краю поля составляет 0,989 [18].

Разработанный литографический объектив имеет общую длину 630 мм, состоит из 18 линз с 4 асферическими поверхностями, увеличение – 0,2 и дисторсию менее 1%. Четыре асферических поверхности отмечены красным цветом. Для положительных линз были использованы следующие материалы стекла: S-FPL53, S-FPL51Y, BAL15Y, в то время как для отрицательных линз были использованы PBM2Y и PBL25Y. Расчетное значение коэффициента пропускания литографического объектива для 365 нм составляет 43% после добавления просветляющего покрытия на все поверхности.

Заключение

В настоящей работе предложен метод проектирования ультрафиолетовых литографических объективов путем разделения сложного объектива на части для облегчения выбора исходной оптической системы. Применяв метод выбора начальной компоновки литографической системы с использованием макроса Dsearch в программном обеспечении SYNOPSIS, мы показали, что разработчик оптических систем может полагаться на программное обеспечение на ранних этапах проектирования.

Проанализировано влияние aberrаций в зрачках, дисторсии, телецентричности, представлен способ работы с противоречивыми ограничениями, предъявляемыми к оптической системе. Метод может быть использован для упрощения нескольких этапов компоновки литографической оптической системы или любой подобной сложной оптической системы.

Литература

1. Zoric N., Livshits I., Dilworth D., Okishev S. Design of an ultraviolet projection lens by using a global search algorithm and computer optimization // *Advanced Optical Technologies*. 2016. V. 6. N 1. P. 31–38. doi: 10.1515/aot-2016-0058
2. Livshits I. L., Sal'nikov A.V., Cho U. Choosing the starting system for designing objectives // *Journal of Optical Technology*. 2007. V. 74. N 11. P. 783–786.
3. Harriott L.R. Limits of lithography // *Proceedings of the IEEE*. 2001. V. 89. N 3. P. 366–374. doi: 10.1109/5.915379
4. Shafer D.R. Doing more with less // *Proceedings of SPIE*. 1995. V. 2537. P. 2–12.
5. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.

References

1. Zoric N., Livshits I., Dilworth D., Okishev S. Design of an ultraviolet projection lens by using a global search algorithm and computer optimization. *Advanced Optical Technologies*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 31–38. doi: 10.1515/aot-2016-0058
2. Livshits I. L., Sal'nikov A.V., Cho U. Choosing the starting system for designing objectives. *Journal of Optical Technology*, 2007, vol. 74, no. 11, pp. 783–786.
3. Harriott L.R. Limits of lithography. *Proceedings of the IEEE*, 2001, vol. 89, no. 3, pp. 366–374. doi: 10.1109/5.915379
4. Shafer D.R. Doing more with less. *Proceedings of SPIE*, 1995, vol. 2537, pp. 2–12.
5. Rusinov M.M. *Kompozitsiya Opticheskikh Sistem* [Composition of Optical Systems]. Leningrad,

6. Rothschild M. Projection optical lithography // *Materials Today*. 2005. V. 8. N 2. P. 18–24. doi: 10.1016/S1369-7021(05)00698-X
7. Levinson H.J. *Principles of Lithography*. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2005. 438 p.
8. Livshits I.L., Zoric N. A concept of ultraviolet lithography system and design of its rear part using artificial intelligence for starting design // *Proc. 4th Int. Conf. on Photonics, Optics and Laser Technology*. Rome, Italy, 2016. P. 82–86.
9. SYNOPSIS™ Optical Systems Design, Inc.
10. Zemax OpticStudio_14.1 SP1. Radiant Zemax LLC, 2015.
11. Dilworth D.C., Shafer D. Man versus machine: a lens design challenge // *Proceedings of SPIE*. 2013. V. 8841. Art. 88410G. doi: 10.1117/12.2022871
12. Bociort F., van Turnhout M. Saddle points reveal essential properties of the merit-function landscape // *SPIE Newsroom*. 2008. doi: 10.1117/2.1200811.1352
13. Cagan J., Grossman I.E., Hooker J.N. A conceptual framework for combining artificial intelligence and optimization in engineering design // *Research in Engineering Design - Theory, Applications, and Concurrent Engineering*. 1997. V. 9. N 1. P. 20–34.
14. Bentley J.L., Olson C., Youngworth R.N. In the era of global optimization, the understanding of aberrations remains the key to designing superior optical systems // *Proceedings of SPIE*. 2010. V. 7849. Art. 78490C. doi: 10.1117/12.871720
15. Livshits I.L., Bronchtein I.G., Vasiliev V.N. Information technologies in CAD system for lens design // *Proceedings of SPIE*. 2009. V. 7506. Art. 75060C. doi: 10.1117/12.837544
16. Thibault S., Gauvin J., Doucet M., Wang M. Enhanced optical design by distortion control // *Proceedings of SPIE*. 2005. V. 5962. N 2. Art. 596211. doi: 10.1117/12.625151
17. Mack C. *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. NY: Wiley, 2007. 534 p.
18. Born M., Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. 7th ed. Cambridge University Press, 1999. 952 p.

Авторы

Зорич Нэнэд Джуро – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, nenadz@corp.ifmo.ru
Лившиц Ирина Леонидовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ecenter-optical10@yandex.ru
Окишев Сергей Григорьевич – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, okishev.sergey@yandex.ru
Сомова Евгения Александровна – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, evgeniyasomova@yahoo.com
Анитропов Роман Викторович – аспирант, ведущий программист, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, romananitropov@gmail.com
Летуновская Марина Валерьевна – кандидат технических наук, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mletunovskaya@gmail.com

Authors

Nenad Zoric – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, nenadz@corp.ifmo.ru
Irina L. Livshits – PhD, Senior scientific researcher, Laboratory head, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ecenter-optical10@yandex.ru
Sergey G. Okishev – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, okishev.sergey@yandex.ru
Evgeniya A. Somova – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, evgeniyasomova@yahoo.com
Roman V. Anitropov – postgraduate, principal software engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, romananitropov@gmail.com
Marina V. Letunovskaya – PhD, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mletunovskaya@gmail.com