

3. Donald C. O'Shea et al. Diffractive optics: design, fabrication, and test. – SPIE tutorial texts. – 2004. – p. 245.
4. Бобров С. Т. Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г. И. Грейсук, Ю. Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. – 1986. – 223 с.
5. Дифракційна теорія оптичних систем / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 140 с.
6. Welford W. T. Aberrations of optical systems. – Hilger, Bristol, 1986. – 284 p.
7. Колобродов В. Г. Визначення узагальнених характеристик когерентних спектроаналізаторів / В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик, К. А. Нгуєн // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – № 5. – С. 102 – 108.

*Надійшла до редакції  
12 березня 2013 року*

© Колобродов В. Г., Тимчик Г. С., Нгуєн К. А., 2013

УДК 535.317

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОЗЕРКАЛЬНЫХ СХЕМ ИЗ ДЕЦЕНТРИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ

*Артюхина Н. К.*

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Представлена схемотехника композиций многозеркальных схем из децентрированных элементов. Выполнена классификация по типу схемных решений; даны параметрические характеристики модулей.*

*Разработана систематизация поиска новых композиций зеркальных систем, моделирование которых развивает расчетно-методическую базу оплотехники. Определена структура и содержание элементов, позволяющих повысить функциональные возможности и оптические характеристики новых оптических и оптико-электронных приборов, работающих в УФ и ИК областях спектра, космической и рентгеновской оптике.*

*Ключевые слова: оплотехника, зеркальные системы, коррекция аберраций, оптимизация, обновление компьютерных программ, расчет оптических схем, анастигматический объектив, объектив, сводка основных параметров системы, качество изображения.*

### **Введение. Постановка проблемы**

В зеркальных системах главная роль в образовании изображения отводится отражающим поверхностям, не вносящим хроматических аберраций при любых апертурах и фокусных расстояниях. Достоинства таких систем общеизвестны: высокое разрешение в широком оптическом спектральном диапазоне; отсутствие селективной непрозрачности; отсутствие ограничений на апертуры, связанные с размерами заготовок; небольшие габариты, меньшая длина, выигрыш по весу (особенно для объективов диаметрами больше 200 мм); а также экономичность материалов.

Зеркальные системы исследуются и используются в астрономической оптике, оптико-электронной аппаратуре дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и ряде других приложений; область применения непрерывно расши-

ряется; им предъявляются все более высокие требования [1]. Известны различные схемы и концепции создания зеркальных схем.

Серьезный недостаток зеркальной оптики – центральное экранирование [2,3]; недостаток устраняется за счет поворота или смещения зеркал, но при этом возникают неэлементарные аберрации четных порядков [4].

Разработан ряд базовых зеркальных модулей без экранирования с высокими характеристиками и хорошим качеством изображения, где применяют децентрировку входного зрачка (ДЗ) или работу внеосевым полем (РВП) за счет внеосевых частей зеркал. Наибольшую известность, как базовые, получили внеосевые схемы Кассегрена, Камишеля, а также афокальные системы из параболических зеркал [5]. Проектирование в области децентрированных систем значительно расширилось благодаря новым способам компьютерных расчетов и накопленному потенциалу в области оплотехники.

Реально для устранения центрального экранирования используется либо один из известных способов децентрировки, либо их комбинация в зависимости от схемного решения и ее коррекционных возможностей [6].

### **Цель работы**

В работе [7] представлен аналитический обзор децентрированных трехзеркальных систем, принципы их построения, даны параметрические характеристики различных композиций. Децентрированные системы из двух и трех зеркал не всегда удовлетворяют современным конструктивным требованиям и коррекционным возможностям. Возможность реализации таких схем с высокими оптическими характеристиками и хорошим качеством изображения обусловлена применением внеосевых зеркал с асферическими поверхностями высоких порядков. Устранение деформации поверхностей является актуальной задачей моделирования, но приводит к увеличению количества зеркальных поверхностей.

Цель настоящей работы – представить анализ схмотехники композиций многозеркальных схем из децентрированных элементов, включая классификацию с определением параметрических характеристик различных модулей, позволяющих улучшить функциональные возможности оптико-электронных приборов, работающих в широкой области спектра.

Рассмотрим зеркальные композиции из четырех и более децентрированных зеркал.

### **Децентрированные системы из четырех зеркал**

Системы нашли широкое применение при проектировании схем, формируемых двумя частями в концепции двухступенчатой оптики (ДО): первая ступень обеспечивает создание промежуточного изображения, которое имеет необходимое угловое поле, но недостаточно хорошее качество по всему полю, вторая обеспечивает коррекцию полевых аберраций и строит действительный выходной зрачок. Примером систем является телескоп

«Квадрион» с отражающим корректором волнового фронта (рис. 1, а). Фокусное расстояние объектива 30 м, относительное отверстие 1: 8, поле зрения 20', увеличение в зрачках 1: 5. Корректор КЗ имеет кольцевую форму и работает на отражение [8].

В схеме телескопа Хаббла с системой коррекции ошибок ГЗ COSTAR [9] двухзеркальный корректор изображения состоит из полевого сферического зеркала ПЗ (рис. 1, б) и коррекционного зеркала КЗ, профиль которого описывается асферической поверхностью 4-го порядка. ПЗ формирует изображение главного зеркала (входного зрачка) телескопа на поверхность зеркала-корректора, асферический профиль которого непосредственно корректирует по заданному полю зрения сферическую абберацию изготовленного с ошибкой главного зеркала. Двухзеркальная система коррекции строится для каждого инструмента в отдельности и имеет большое увеличение в зрачках – 150<sup>x</sup>. Все коррекционные зеркала телескопа изготовлены из плавленого кварца.

Схема зеркального коронографа Лио [10] представляет собой систему с параллельным ходом лучей после зеркала  $M_2$  (рис. 1, в, г), где установлена вторичная перестраивающая система. Если первичное зеркало является сферическим, то вторичное для исправления сферической абберации должно быть гиперболоидом. ПЗ строит изображение входного зрачка на диафрагме Лио, после которой можно установить узкопольный интерференционный фильтр или фильтр с монохроматором; в качестве вторичной системы может быть применена любая, смещенная с оси, центрированная зеркальная схема.

Система (рис. 1, в) имеет следующие характеристики:  $f' = 1197$  мм,  $D = 100$  мм; децентрировка входного зрачка порядка 100 мм, вторичная перестраивающая система (третье и четвертое зеркала) смещена с оси на 50 мм. Главное и четвертое зеркала являются сферическими. Система с  $f' = 13,34$  м (рис. 1, г) более децентрирована: при  $D = 500$  мм ДВЗ равна 750 мм; в схеме используется построение вторичной перестраивающей системы из внеосевых зеркальных поверхностей 2-го порядка.

В работе [11] описаны схемы из сферических зеркал. Анастигматы, предложенные Д. Шафером, состоят из четырех сферических зеркал. Повернутая на 180° система Боуэна дает концентрическую систему с мнимым изображением, в совокупности с парой из сферических зеркал, получен четырехзеркальный анастигмат (рис. 1, д).

Классическая система Боуэна, объединенная с его реверсивной схемой, дающей мнимое изображение, создает зеркальный анастигмат из четырех сферических зеркал (рис. 1, е), причем существуют варианты без экранирования. Объективы являются перспективными для астрономических приборов и космической оптики, поскольку они просты в изготовлении и имеют хорошую коррекцию аббераций, за исключением кривизны изображения.

Четырехзеркальная схема Д. Шафера для фотолитографии [12] формирует изображение отражающего фотооригинала на полупроводниковой подложке (рис. 1, ж) и содержит три децентрированных элемента. Первые два зеркала в системе асферические: гиперболическое выпуклое зеркало и эллиптическое вогнутое; они имеют относительно большие размеры, т.к. образуют ступень с большим увеличением и смещены от оптической оси на относительно большое расстояние, поэтому их кривизна значительна. Сферическое выпуклое зеркало осесимметрично, а сферическое вогнутое зеркало формирует относительно большое однородное поле освещения на подложке, причем размеры поля освещения могут быть увеличены при небольшом наклоне зеркал или их незначительном смещении относительно оптической оси системы.

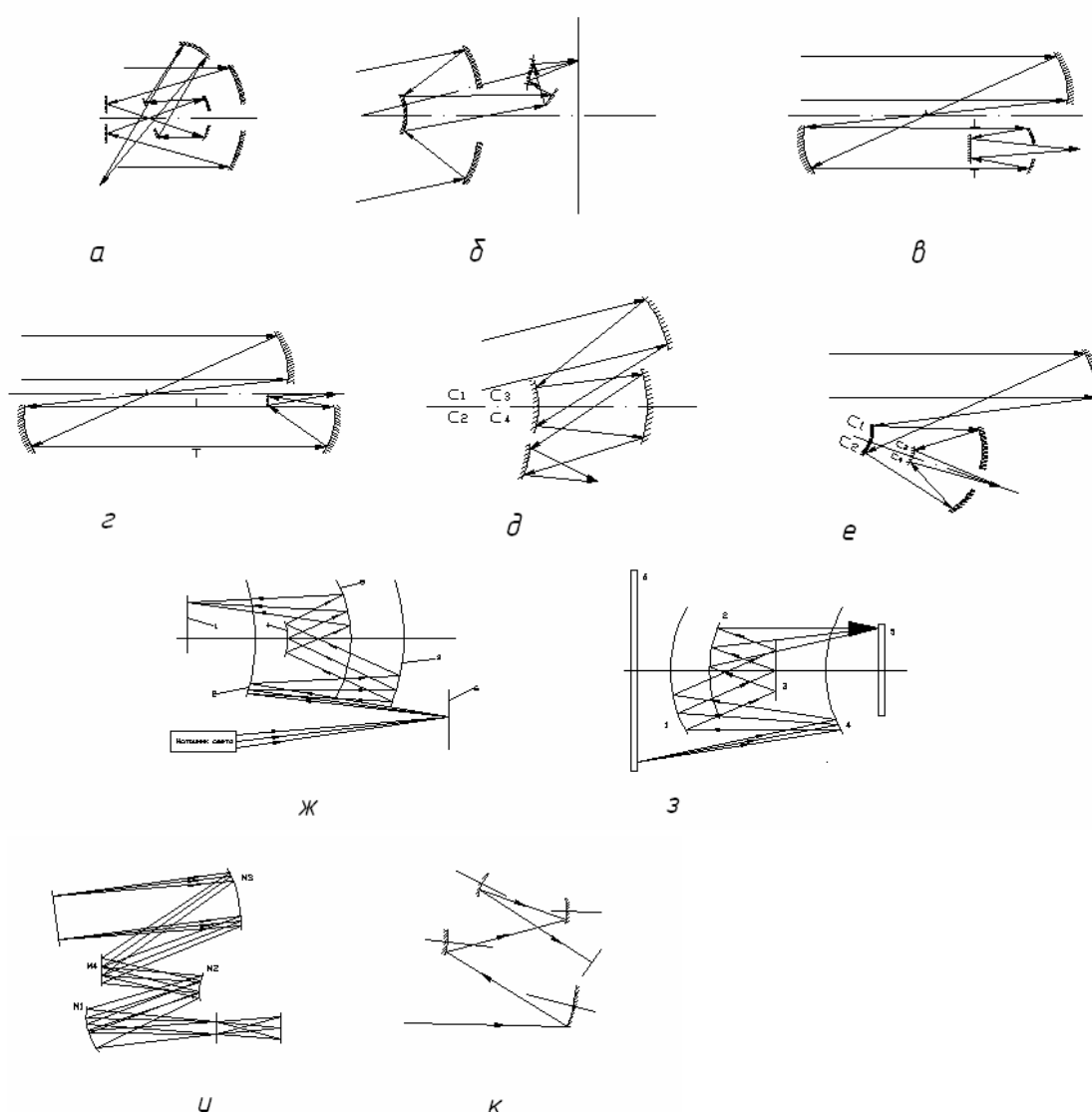


Рис.1. Четырехзеркальные децентрированные системы: а – телескоп «Квадрион»; б – объектив Хаббла; в, г – схемы С. Чупракова; д, е, ж, з – объективы Д. Шафера.; и – анастигмат Л. Кука; к – система для телескопа

Аналогичная система того же автора для крайней УФ области [13] содержит четыре отражающих элемента (рис. 1, з), проецирующих рисунок маски на подложку. Система позволяет увеличить размеры щелей, используемых в кольцевых растровых системах, повысить производительность установок при обработке подложек и может найти применение в литографии. Схемы Д. Шафера при расположении апертурной диафрагмы на третьем зеркале хорошо сбалансированы, но требование телецентричности главных лучей задает близкую к параболоиду форму четвертого зеркала, что сокращает число свободных параметров для оптимизации; они устраняют недостаток трехзеркальных схем расположения плоскостей предмета и изображения по одну сторону от зеркал [14].

Широкоугольная система обзора [15] содержит выпуклое сферическое зеркало и вогнутые зеркала с асферикой 5-го порядка, схема аналогична системе [12], но работает с бесконечно удаленным объектом. Объектив имеет длину, равную двум фокусным расстояниям  $l = 2f'$  и позволяет получить изображение кольцевого поля  $100\text{--}120^\circ$  без центрального экранирования на плоской или сферической поверхности. Для характеристик  $f' = 100$  мм, 1: 2,5 пятно рассеяния около 0,04 мм.

На рис. 1, и показан анастигмат Л. Кука с тремя внеосевыми зеркалами и КЗ [16], которое имеет номинально плоскую поверхность, но изменяет ход лучей из-за асферики высшего порядка. При установке КЗ между входной частью объектива и промежуточным изображением можно значительно увеличить смещение поля изображения и получить внеосевой анастигмат для формирования изображений в ИК спектральной области.

Система для телескопа, не создающая силуэта [17], собрана на основе четырех осесимметричных зеркал (рис. 1, к), ее структурная схема позволяет устранить искажения типа астигматизма и комы, а также апертурные эффекты при размерах поля изображения диаметром свыше 100 мм.

### **Многозеркальные децентрированные системы**

Попытки избавиться от асферических поверхностей, что особенно актуально в связи с внеосевыми зонами зеркал, приводят к увеличению количества зеркальных поверхностей в децентрированных системах.

Катоптрическая система формирования изображения с переключаемым полем зрения Л. Кука [18] содержит две группы зеркал (рис. 2, а).

Группа из отображающих зеркал установлена на некотором расстоянии от оптической оси системы, совпадающей с осью входного пучка; группа отклоняющих зеркал может быть установлена в одно из двух положений.

Уникальная схема крупногабаритной катоптрической системы Шмидта без экранирования, разработанная по заказу Ромского НИЦ ВВС США на фирме JPL [9], представлена на рис. 2, б. Особенность системы, выполненной в концепции ДО, заключается в том, что размеры planoидного зеркала

существенно уменьшены за счет переноса его функции во 2-ю малую ступень системы и размещения маломасштабного образца корректора в его сопряженной плоскости.

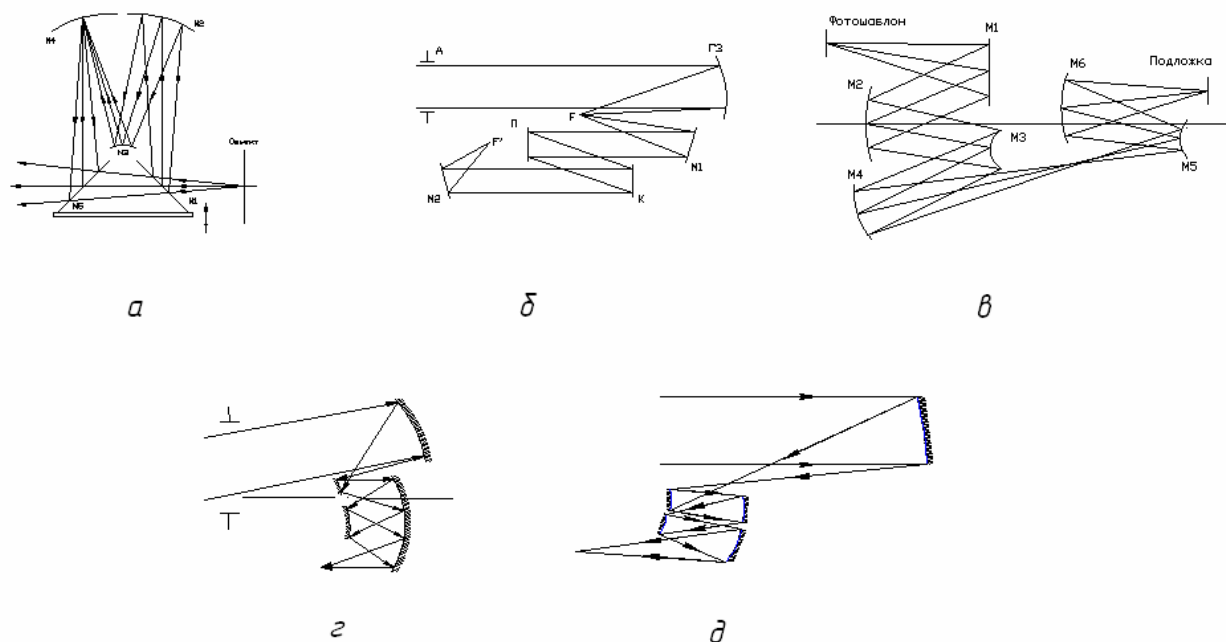


Рис. 2. Многозеркальные децентрированные системы: *а* – система Л. Кука с переключаемым полем зрения; *б* – «виртуальный» триплет Шмидта; *в* – проекционная система Р. Худыма; *г* – объектив Д. Шафера; *д* – пятикомпонентная система Д. Шафера из сферических зеркал

Единственным крупногабаритным элементом системы является главное сферическое зеркало (ГЗ), ошибки которого корректируются другим корректором 2-й ступени, располагаемым в сопряженной плоскости ГЗ. Система строится как бы из трех объективов Шмидта («виртуальный» триплет Шмидта): главного ГЗ – полевого F в первой ступени и двух коррекционных (первого зеркала – планоида П и корректора ошибок К – второго зеркала), расположенных каскадно, с увеличением 1/4 во 2-й ступени. При относительном отверстии объектива 1: 3 размеры поля зрения  $10 \times 0.2^\circ$ . Размер технологически сложного планоида выбран равным 1/3 диаметра апертурной диафрагмы. Кривизна изображения не исправлена (радиус кривизны 1 м), виньетирование – менее 24 %. Качество изображения вполне приемлемо благодаря использованию незранированной апертуры; MTF на средней пространственной частоте 10 циклов/мм обеспечивает контраст порядка 0,3–0,45. Все силовые поверхности – сферические, что дает технологические преимущества схемы, причем малые зеркала К с асферикой высшего порядка, близкой к плоскости, могут изготавливаться как металлические зеркала

алмазним точением. Обьектив с меньшей светосилой (1: 4) допускает асферику второго порядка для планоида и корректора ГЗ.

Наиболее полно задача построения зеркальной проекционной системы для фотолитографии решается с помощью шестизеркальной схемы, которая позволяет достичь числовой апертуры 0,28 для длины хорды дугового поля 26 мм при ширине дуги до 2,5 мм. Наличие шести зеркал дает простор для создания различных вариантов компоновки. Шестизеркальная проекционная система с большой числовой апертурой и кольцевым полем зрения, представлена в патенте [19]. Она содержит источник УФ излучения и фотошаблон, изображение которого проецируется на подложку (рис. 2, в). Система рассчитана так, чтобы угол падения главного луча на пять зеркал из шести не превышал  $12^\circ$ . Отклонение волнового фронта пучка от сферической поверхности при отражении от каждой отражающей поверхности не более 16 мкм. В системе имеется высокоапертурная часть (вогнутое шестое зеркало и выпуклое пятое), промежуточное изображение между четвертым и пятым зеркалами. Схема имеет наилучшую конфигурацию, когда удается минимизировать углы падения лучей в высокоапертурной части и уменьшить ее поперечные габариты, варианты представлены патентами [20, 21]. Запатентованы схемы шестизеркальных систем с большими поперечными размерами [22].

Обьективы Д. Шафера состоят из пяти сферических зеркал, причем два зеркала могут быть объединены в одну поверхность [23]. В системе, показанной на рис. 2, з, третье и пятое зеркала объединены и отсутствует затенение рабочего пучка, что достигается большим выносом входного зрачка и РВП. В ГОИ (РФ) на базе этой схемы построены длиннофокусные светосильные обьективы ( $D/f' = 1: 3$ ) с качеством изображения, близким к дифракционному в ИК области спектра. Система имеет промежуточное изображение и увеличенный задний фокальный отрезок, позволяющий развести каналы. Недостатком является большая длина, равная  $l = 2f'$ . В работе [24] рассмотрена пятикомпонентная система Д. Шафера, состоящая только из сферических зеркал (рис. 2, д) с исправленной кривизной изображения и дисторсией. В пятизеркальных системах введение дополнительного плоского зеркала преобразует их к известным шестизеркальным [25].

Дальнейшее увеличение числовой апертуры достигается увеличением количества зеркал до восьми. Известные восьмизеркальные схемы можно рассматривать как развитие оптимальной шестизеркальной схемы, показанной выше. Существует два варианта усложнения такой шестизеркальной схемы [26, 27]. В первой схеме конфигурация высокоапертурной части из первых четырех зеркал полностью повторяет характерные черты компоновки шестизеркальной схемы; два дополнительных зеркала вносят изломы траектории пучка и обеспечивают лучшую коррекцию aberrаций. Во второй схеме добавлена двухзеркальная оборачивающая система, причем апертурная диафрагма

располагается на первом зеркале. Восьмизеркальная система позволяет достичь числовой апертуры 0,4 при радиусах дугового поля изображения 55 и 56 мм и ширине кольца 1 мм. Дальнейшее развитие схем направлено на улучшение формы поля изображения и параметров качества за счет использования неосесимметричных поверхностей и введения смещений и наклонов зеркал для перехода от поля зрения в виде дуги к полю зрения в виде прямой полосы.

### **Выводы**

1. Представлен анализ композиций многозеркальных децентрированных оптических схем. Рассмотрены общие закономерности синтеза и параметрического моделирования; выделены и структурно определены инженерные составляющие базовых модулей, таких как коэффициент сложности, зависящий от экранирования, вынос плоскости изображения, оптимальное соотношение конструктивных параметров и др. Определена перспективность разработки зеркальных композиций с двумя степенями- компонентами в концепции ДО.

2. Проектирование в области децентрированных систем значительно расширилось благодаря новым способам компьютерной оптимизации. Созданы многозеркальные системы без экранирования, которые обладают высокими оптическими характеристиками и хорошим качеством изображения, этому способствует развитие технологической базы изготовления и контроля асферических зеркал [28]. Разработка новых алгоритмов моделирования децентрированных зеркальных систем позволит увеличивать накопленный потенциал в области оптотехники.

3. Возможность реализации систем без экранирования с высокими оптическими характеристиками и хорошим качеством изображения обусловлена применением внеосевых зеркал с асферическими поверхностями высоких порядков. Устранение асферики является актуальной задачей моделирования, но приводит к увеличению количества зеркальных поверхностей в децентрированных схемах.

4. Определена структура и содержание зеркальных децентрированных элементов, позволяющих повысить функциональные возможности и технические характеристики новых оптических и оптико-электронных приборов, работающих в УФ и ИК областях спектра, космической и рентгеновской оптике.

Такие элементы эффективно и целесообразно использовать, как в качестве самостоятельных базовых модулей, так и в составе сложных оптических систем (адаптивной оптики, панорамных систем, зеркальных систем для трансформирования лазерных пучков и т.д.).

### **Литература**

1. Современные оптико-электронные комплексы как результат внедрения достижений в области оптики / М.М.Мирошников [и др.] // Оптика XXI век: материалы 6-го Межд. оптического конгресса, Санкт-Петербург, 18-21 окт. 2010: в 3 т. / ОО им. Д.С. Рождественского; редкол.: В.М. Арпишкин [и др.]. – СПб., 2010. – Ч.1. – С. 2 – 6.
2. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: моногра-



- фия / Н.К. Артюхина, БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.
3. Smith, W. J. *Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems* – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2000. – 617 p.
  4. Русинов, М.М. Композиция нецентрированных оптических систем / М.М. Русинов. – СПб.: СПбГУ ИТМО - Ива, 2004. – 252 с.
  5. Артюхина, Н.К. Анализ схемных решений децентрированных двухзеркальных систем / Н.К. Артюхина // *Вестник БНТУ*. – 2010. – № 4. – С. 36 – 39.
  6. Трубка, С.И. Методика расчета зеркальных телескопов без центрального экранирования / С.И. Трубка, Г.И. Лебедева, А.А. Гарбуль // *Оптико-механическая промышленность*. – 1988. – № 2. – С. 21 – 23.
  7. Артюхина, Н.К. Системный анализ принципов проектирования децентрированных трехзеркальных систем / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик // *Журнал «Вестник НТУУ «КПИ»». Серия «Приборостроение»*. – Киев, 2012. – Вып. № 43. – С. 23 – 29.
  8. Внеатмосферные адаптивные телескопы (направления развития) / Б.Э. Еськов [и др.] // *Оптический журнал*. – 1995. – № 10. – С. 13 – 16.
  9. Рябова, Н.В. Концепция двухступенчатой оптики для крупных телескопов / Н.В. Рябова // *Оптический журнал*. – 1995. – № 10. – С. 4 – 12.
  10. Чупраков, С.А. Варианты оптических схем коронографа Лио на основе внеосевых зеркальных систем / С.А. Чупраков // *Оптический журнал*. – 1997. – № 12. – Р. 16 – 28.
  11. Попов, Г.М. Современная астрономическая оптика / Г.М. Попов. – Л.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит. 1988. – 192 с.
  12. Четырехзеркальная проекционная система для фотолитографии с использованием дальнего УФ-излучения: пат. 6142641 США, МКИ G02B 17/00 / С.И. Кохеп, Д.Р. Шафер. – № 099571. – 18. 06. 98.
  13. Катопротическая система формирования изображения: пат. 6014252 США, МКИ G02B 17/00 / Д.Р. Шафер. – № 027282. – 20. 02. 98.
  14. Состояние и перспективы развития оптики для рентгеновской литографии / Е.В. Гаврилов [и др.] // *Прикладная оптика-2008: материалы 7-й Междунар. конф., г. Санкт-Петербург, 16–20 октября 2008: в 3-х т.* / ОО им. Д.С.Рожественского, ГОИ им. С.И. Вавилова; редкол.: В.М. Арпишкин [и др.]. – СПб., 2008. – Т. 3. – С. 30 – 38.
  15. Catadioptric projection system for 157 nm lithography projection objective: pat. 7237915 USA, МКИ G02B 5 /08 / R. Hudyma; assignee Carl Zeiss SMT AG. – № 10/771, 986; filed 03.12.04// *United States Patent*. – 03. 07.2 007.
  16. Анастигмат с тремя внеосевыми зеркалами и корректирующим зеркалом: пат. 6016220 США, МКИ G02B 17/00 / Л.Г. Кук; заявитель Raytheon Company. – № 629714. – 09.04.96.
  17. DE 4314499 A1 Bundersrepublik Deutschland, G02B 17/08 – *Offenlegungstag*. – 10.11.1994.
  18. Полностью отражательная система формирования изображения с переключаемым полем зрения: пат. 6084727 США, МКИ G02B 17/00 / Л.Г. Кук; заявитель Raytheon Company. – № 301059. – 28. 04. 99.
  19. Проекционная система с большой числовой апертурой и кольцевым полем зрения для фотолитографии с использованием крайнего УФ – излучения: пат. 99270127 США, МКИ G02B 17/00 / Р. Худыма. – № 270127. – 15. 03. 99.
  20. Mirror projection objective: pat. 7177076 USA, МКИ G02B 17/00 / 08 / H.J. Mann, W. Ulrich; assignee Carl Zeiss SMT AG. – № 10/418, 515; filed 18.04.03// // *United States Patent*. – 13. 02. 2007.
  21. Projection optical system, exposure apparatus and device fabricating method: pat. 7324269 USA, МКИ G02B 17/00 / Sasaki, Takahiro // *United States Patent*. – 29. 01. 2008.
  22. Mirror projection system for a scanning lithographic projection apparatus comprising such a system: pat. 6396067 USA, МКИ G02B 17/00 / Braat, I.M Josephus // *United States Patent*. – 27. 11. 2004.

23. Shafer, D.R. Four-mirror unobscured anastigmatic telescopes with all spherical surfaces / D.R. Shafer // Appl. Opt. – 1978. – Vol. 17, No 7. – P. 1072 – 1074.
24. Burch, C.R. Application of the plate diagram to reflecting telescope design / C.R. Burch // Opt. Acta. – 1979. – Vol. 26, No 4. – P. 493 – 504.
25. Mirror projection system for a scanning lithographic projection apparatus comprising such a system: pat. 6386715 USA, MKI G02B 17/00 / Braat, J.M Josephus // United States Patent. – 03. 09. 2004.
26. 8-mirror microphotography projection objective: pat. 7372624 USA, MKI G02B 17/00 / Mann [et al.] // United States Patent. – 05. 05. 2008.
27. Catoptric objectives and system using catoptric objectives: pat. 7414781 USA, MKI G02B 17/00 / Mann [et al.] // United States Patent. – 26. 06. 2008.
28. Горшков, В.А. Автоматизированное формообразование высокоточных асферических поверхностей / В.А. Горшков [и др.] // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 12. – С. 5 – 9.

*Надійшла до редакції  
27 січня 2013 року*

© Артюхина Н.К., 2013

УДК 621.378.325

## СТАБИЛИЗАЦІЯ ЕНЕРГІЇ ГЕНЕРАЦІЇ СИСТЕМ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Колобродов В.Г., Мурга Е.В.*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
г. Киев, Украина*

*Рассмотрен метод стабилизации энергии излучения твердотельных лазеров в лазерных системах зондирования. Проанализированы условия, позволяющие увеличить коэффициент полезного действия лазера в широком диапазоне энергии, подводимой к лампе накачки. Показано, что использование сложных импульсов накачки обеспечивает стабилизацию энергии генерации лазера и повышает точность определения координат объекта системами дистанционного зондирования.*

*Проведенные экспериментальные исследования на действующей локационной станции показали увеличение выходной энергии импульса в 1,25 – 1,3 раза и уменьшения расходимости лазерного пучка в 1,5 раза.*

**Ключевые слова:** *лазерная система зондирования, система накачки, стабилизация излучения лазера.*

### **Вступлення**

Системы лазерного зондирования находят широкое применение в различных отраслях в качестве лазерных дальномеров, измерителей скорости, системах слежения за космическими объектами и других [1]. Энергетические параметры передающих устройств систем лазерного зондирования оказывают существенное влияние на эффективность лазерной локации и измерения дальности.

Одним из направлений повышения эффективности лазерных систем зондирования есть использование различных режимов накачки лазера. Вопрос опти-