

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОЕКЦИОННЫХ И ФОКУСИРУЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ДИФРАКЦИОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Один из путей повышения характеристик оптических систем состоит в использовании для их построения элементов различных типов: однородных рефракционных линз, дифракционных линз, а также линз, выполненных из материалов с градиентом показателя преломления. Использование элементов различных типов позволяет существенно расширить возможности коррекции аберраций систем и в то же время, эффективно реализуя достоинства каждого из элементов, снизить негативное влияние недостатков и ограничений, связанных с несовершенством существующей технологии изготовления таких элементов.

У наиболее широко используемых однородных линз со сферическими преломляющими поверхностями недостатки прежде всего связаны с практической невозможностью устранения сферической аберрации и весьма ограниченными возможностями коррекции полевых аберраций при выполненном условии Петцваля и приемлемой апертуре. У дифракционных линз недостатком является сильный хроматизм, а несовершенство имеющейся технологии изготовления ограничивает дифракционную эффективность при высокой апертуре. У градиентных линз существующая технология ограничивает возможность получения заданных профилей показателя преломления и требуемых для эффективной коррекции аберраций перепадов показателя преломления.

При построении оптических систем на базе однородных рефракционных и дифракционных линз решение задачи коррекции полевых аберраций с учетом требований к хроматизму приводит к схемам двух типов [1]. В первой из них силовой компонент является чисто рефракционным, а дифракционные элементы выступают в роли корректо-

ров аберраций. В этом случае, т.е. при небольшой оптической силе дифракционных линз, входящих в состав комбинированной схемы, их хроматизм будет одного порядка с хроматизмом рефракционных линз, а дифракционная эффективность даже при существующей технологии может достичь ~90%. В то же время низкая оптическая сила дифракционной линзы не препятствует управлению ее сферической аберрации, которое является эффективным методом коррекции аберраций системы в целом.

Примером простейшей схемы такого типа является дублет, включающий рефракционную линзу и дифракционную асферику, т.е. дифракционную линзу с нулевой оптической силой. В таком дублете дифракционной асферикой устраняется сферическая аберрация, а выбором формы рефракционной линзы и воздушного промежутка между элементами корректируются полевые аберрации. В результате задача коррекции аберраций дублета сводится к коррекции полевых аберраций однородной рефракционной линзы с вынесенным зрачком. Как известно, у такой линзы имеются определенные возможности коррекции первичных полевых аберраций [2]. Так, в ней при произвольном увеличении могут быть одновременно устранены любые две или три из четырех первичных аберраций (за исключением комбинации, включающей астигматизм, кривизну Петцваля и дисторсию). Однако высокий уровень остаточных полевых аберраций высших порядков ограничивает возможности использования дублета, включающего рефракционную линзу и асферику, в качестве проекционного объектива. Поэтому схемы высокоразрешающих широкопольных оптических систем, в состав которых входят дифракционные элементы с малой оптиче-

ской силой, содержат, как правило, несколько однородных рефракционных линз.

Схемы оптических систем другого типа включают одну дифракционную линзу с большой оптической силой, однородные рефракционные линзы используются в качестве корректоров aberrаций. Эти схемы рассчитаны на работу только с монохроматическим излучением, но зато в них даже при относительно простой конструкции удается хорошо скорректировать полевые aberrации. Это объясняется прежде всего тем, что при одной и той же оптической силе и примерно одинаковом уровне первичных монохроматических aberrаций уровень aberrаций высших порядков дифракционных линз значительно ниже уровня соответствующих aberrаций однородных рефракционных линз, поскольку aberrационное разложение плоской дифракционной линзы обладает лучшей сходимостью. Существенным также является и то, что у дифракционной линзы совпадают численные значения ряда коэффициентов полевых aberrаций. Например, в третьем порядке малости автоматически выполняется условие Петцваля, а во все семнадцать коэффициентов монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков входят в различных комбинациях лишь десять величин, обращение которых в нуль обеспечивает полное устранение aberrаций обоих порядков. Примером простейшей системы такого типа является дублет, состоящий из оптически сильной положительной дифракционной линзы и отрицательного мениска [3]. В этом дублете можно при заданном (заведомо низком) уровне остаточной кривизны поля полностью устранить сферическую aberrацию, кому и астигматизм третьего порядка, причем по уровню остаточных aberrаций, включая и aberrации высших порядков, такой комбинированный дублет эквивалентен проекционному объективу, состоящему из четырех-шести однородных рефракционных линз.

На базе дублета, включающего оптически сильную дифракционную линзу, может быть скомпонован симметричный трехлинзовый репродукционный объектив с относительно высокими оптическими характеристиками. При компоновке такого объектива дифракционные линзы дублетов помещаются в одну плоскость и заменяются единым элементом, а рефракционные лин-

зы представляют собой мениски с равными радиусами, расположенными вблизи плоскостей предмета и изображения [4].

Завершая анализ путей построения комбинированных систем на основе однородных рефракционных и дифракционных линз, отметим, что общим недостатком, по крайней мере, простейших систем такого типа, является трудность одновременной коррекции астигматизма и кривизны поля в нескольких aberrационных порядках. От этого недостатка в значительной мере свободны комбинированные оптические системы, в которых рефракционные линзы выполнены из неоднородных материалов с заданным профилем показателя преломления. В таких системах даже при относительно несложной конструкции удается одновременно устранить все монохроматические aberrации третьего и пятого порядков и минимизировать остаточные aberrации седьмого и более высоких порядков.

Примером простейших системы такого типа является дублет, состоящий из линзы, имеющей радиальный градиент показателя преломления и дифракционной линзы. Если градиентная линза выполнена в виде стержня с плоскопараллельными торцами, то в комбинации с дифракционной асферической она образует апланатический компонент, который при устранении астигматизма третьего порядка свободен во всех порядках aberrационного разложения, по крайней мере, от сферической aberrации и комы. Совершенно очевидно, что такой компонент может использоваться в качестве высокоапертурного фокусирующего объектива либо в качестве проекционного для построения стигматического изображения на сферической поверхности. Коррекционные возможности дублета существенно расширятся, если градиентная линза будет ограничена сферическими преломляющими поверхностями. В этом случае в рассматриваемом дублете вместе с перечисленными выше aberrациями удастся устранить кривизну Петцваля. В результате дублет может уже использоваться в качестве проекционного объектива, формирующего стигматическое изображение на плоской поверхности. И, наконец, дисторсия такого комбинированного дублета может быть скорректирована, если дифракционному оптическому элементу придать оптическую силу.

В результате получаем объектив, способный формировать ортоскопическое изображение с высоким разрешением по большому полю [5]. При этом оба элемента дублета оказываются положительными и, следовательно, его высокая апертура достигается при сравнительно небольшой оптической силе каждого из элементов в отдельности. Благодаря этому, во-первых, перепад показателя преломления градиентной линзы невелик и вполне достижим при использовании существующих методов изготовления оптических материалов с градиентом пока-

зателя преломления [6, с. 19], а, во-вторых, размер минимального элемента структуры дифракционной линзы таков, что она может быть изготовлена на существующем оборудовании с многоуровневым профилем штриха, что обеспечит высокую дифракционную эффективность [1].

Таким образом, в работе рассмотрены пути построения оптических систем с использованием элементов различных типов, продемонстрированы коррекционные возможности таких комбинированных систем.

### Л и т е р а т у р а

1. Б о б р о в С.Т., Г р е й с у х Г.И., Т у р к е - в и ч Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. - Л.: Машиностроение, 1986. - с. 223.
2. Р у с и н о в М.М. Техническая оптика. - Л.: Машиностроение, 1979. - 323 с.
3. Г р е й с у х Г.И. - Опт. и спектр., 1978, т. 44, вып. 1, с. 168-172.
4. А.с. № 1176281 (СССР). Бюл. изобр. и откр. № 32 от 30.08.85.
5. Б у т у с о в М.М., Г р е й с у х Г.И., С т е п а - н о в С.А. - Опт. и спектр., 1984, т. 56, вып. 4, с. 752-754.
6. Е ф и м е н к о И.М. Градиентные оптические системы. М., 1981.