

Дмитерко Руслан Алексеевич,

кандидат физико-математических наук.

доцент кафедры ОПД

Московское высшее общевойсковое командное училище

Россия, г. Москва

Страхов Андрей Александрович,

преподаватель кафедры ОПД

Московское высшее общевойсковое командное училище

Россия, г. Москва

ЖИДКОСТНЫЕ ЛИНЗЫ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ИСПРАВЛЕННЫМ ВТОРИЧНЫМ СПЕКТРОМ

***Аннотация:** В статье рассмотрены варианты создания объективов с уменьшенным вторичным спектром с использованием жидкостей с «особым» ходом дисперсии. Выявлены оптимальные оптические и иные характеристики жидкостей для их использования в составе оптических систем. Дана оценка влияния чисел Аббе совместимых стекол на коррекцию сферической аберрации. Приведены варианты оптических схем объективов с использованием жидкостных линз с «особой» дисперсией по типу «особых» кронов и флинтов. Дана сравнительная характеристика этих схем.*

***Ключевые слова:** жидкостная линза, особая дисперсия, вторичный спектр, число Аббе.*

Dmiterko Ruslan Alekseevich

*Doctor of Philosophy (Ph.D) in physics and mathematics
associate Professor of OPD Department Moscow higher arms command school
Russia, Moscow*

Strakhov Andrei Alexandrovich

*teacher of the OPD Department Moscow higher arms command school
Russia, Moscow*

THE LIQUIDS IN THE OPTICAL SYSTEMS WITH CORRECTED SECONDARY SPECTRUM

Annotation: *The article considers options for creating lenses with a reduced secondary spectrum using liquids with an anomalous dispersion course. Optimal optical and other characteristics of liquids for their use in optical systems are revealed. The influence of Abbe numbers of compatible glasses on the correction of spherical aberration is estimated. Variants of optical schemes of lenses using liquids with anomalous dispersion by the type of ED-crowns and kurtz-flints are given. A comparative characteristic of these schemes is given.*

Keywords: *liquid lens, anomalous dispersion, secondary spectrum, Abbe number.*

Оптические и оптоэлектронные приборы получили широкое распространение в различных сферах деятельности человека. К этим приборам предъявляются весьма жесткие требования по качеству изображения, надежности, массо-габаритным характеристикам. Немаловажное значение имеет их стоимость, которая остается высокой из-за сложности этих приборов.

Сложность современных преломляющих оптических систем объясняется, с одной стороны, необходимостью коррекции геометрических и хроматических aberrаций в широком спектральном диапазоне, а, с другой стороны,

ограниченными коррекционными возможностями классических оптических сред.

Классическим способом коррекции хроматизма положения является комбинация двух линз, изготовленных из стекол, имеющих различную дисперсию. Так можно исправить продольную хроматическую aberrацию для двух длин волн, то есть, применительно к видимой области спектра, свести в один общий фокус лучи с длинами волн C (красная линия водорода) и F (голубая линия водорода). В результате получается ахроматическая система, в которой, однако, есть остаточная хроматическая aberrация, известная как вторичный спектр. В преломляющих оптических системах вторичный спектр часто является aberrацией, ограничивающей качество изображения. [1].

Коррекция вторичного спектра требует введения в оптическую систему дополнительных элементов и тщательного подбора марок оптических стекол. Основными показателями оптических стекол, влияющими на качество коррекции вторичного спектра, являются их числа Аббе и относительные частные дисперсии.

Для большинства оптических стёкол зависимость относительных частных дисперсий от коэффициента дисперсии близка к линейной, и такие стекла располагаются на диаграмме Аббе вдоль так называемой «нормальной прямой».

Однако существуют оптические материалы, которые отстоят от нормальной прямой на некоторые расстояния [3]. При этом стёкла с незначительным отклонением хода частных дисперсий, находящиеся вблизи нормальной прямой считают «нормальными», а расположенные на бóльшем удалении - «особыми».

Учёт хода относительных дисперсий на этапе выбора стёкол, позволяет в дальнейшем значительно уменьшить вторичный спектр.

Для практики наиболее важны - частная дисперсия для синего участка спектра $n_g - n_F$ где n_g - показатель преломления для фиолетовой g -линии ртути и соответствующая ей относительная частная дисперсия P_{gF} , поскольку в пределах

именно этого участка показатель преломления материалов изменяется с длиной волны наиболее значительно. Общеизвестно, что для эффективной коррекции хроматизма положения в диапазоне 435-700нм на уровне, не более 1/8000 фокусного расстояния (апохроматическая коррекция), необходимо использовать оптические материалы с особым ходом дисперсии. Большинство из них относятся к двум типам, объединённым собирательными терминами «ланг-кроны» (кроны с увеличенными относительными частными дисперсиями) и «курц-флинты» (флинты с уменьшенными частными дисперсиями). К первой категории относятся отечественные стекла ОК-1 и ОК-4, а также стекла фирм Schott (N-PK51, N-PK52A, N-FK51A) и Ohara (S-FPL51 и S-FPL55). Ко второй категории относятся отечественные стекла ОФ-1, ОФ-4, ОФ-6 и N-KZFS2, N-KZFS6 фирмы Schott.

Оптические кристаллы (CaF_2 и BaF_2) имеют схожий с ланг-кронами ход частных дисперсий. Ланг-кроны и оптические кристаллы, несмотря на наибольшие отклонения их частных дисперсий от нормальной прямой и, следовательно, на наилучшие коррекционные возможности, имеют целый ряд существенных недостатков: низкий показатель преломления, низкую твердость, высокий удельный вес, высокий коэффициент термического расширения и высокую стоимость. Все это сильно ограничивает возможности применения этих материалов в оптических системах с коррекцией вторичного спектра.

Что же касается «курц-флинтов», то отклонения их частных дисперсий от «нормальной прямой», как правило, невелики, что, наряду с высокой стоимостью этих материалов, делает их применение не достаточно эффективным.

Коррекция вторичного спектра с помощью «нормальных» стекол принципиально возможна [2], однако такие оптические системы (в частности, объективы) получаются громоздкими в силу необходимости использования больших воздушных промежутков между компонентами (триалиты), сложными в юстировке и достаточно дорогими. Кроме того, величина остаточного

хроматизма положения в таких системах обычно не лучше $1/3000$ фокусного расстояния объектива [5].

В связи с указанными выше недостатками классических оптических материалов, в том числе и с особым ходом дисперсии, разработчики оптических систем с исправленным вторичным спектром начали поиски альтернативных материалов. В первую очередь, их внимание привлекли жидкости. К преимуществам оптических узлов, содержащих жидкостные элементы можно отнести следующие:

- они легче и компактнее, за счет отказа от тяжелых оптических материалов и возможности изготавливать жидкостную линзу сверхтонкой;
- имеют меньше потерь на отражение за счет уменьшения количества переходов воздух-оптическая среда;
- они устойчивее к разъюстировкам;
- дешевле за счет: а) замены дорогих «особых» стекол на дешевые жидкостные элементы, б) уменьшения количества просветляемых поверхностей, в) упрощения конструкции оправы.

Оказалось, что некоторые жидкости обладают оптическими свойствами, весьма подходящими для использования их в системах с исправленным вторичным спектром. Так, например, перфтордекалин ($C_{10}F_{18}$) обладает аномальной дисперсией по типу особых кронов с числом Аббе $\nu_d = 95$.

В ГОИ было изготовлено несколько опытных образцов объектива-апохромата на базе перфтордекалина (ПФД). Объектив был собран по схеме триплета СТКЗ - ПФД - ОФ6 с жидкостным элементом в центре (см. рис.1).

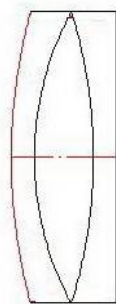


Рис.1. Объектив-триплет с жидкостным элементом из ПФД.

Однако некоторые физические свойства ПФД [6] не позволили в полной мере реализовать в данной конкретной конструкции преимущества жидкостных оптических сред, в частности, объем жидкостной линзы составил 226см^3 , что сравнимо с объемами двух стеклянных линз, 324 и 313см^3 соответственно. Такое соотношение объемов наряду с низкой вязкостью и большим коэффициентом температурного расширения ПФД отрицательно сказывается на температурном балансе объектива и способствует развитию локальных температурных неоднородностей в жидкостной линзе за счет конвекционных потоков, что в свою очередь ведет к появлению сложного астигматизма.

К другим недостаткам приведенной конструкции следует отнести: необходимость использования совместно с жидкостным элементом из ПФД весьма дорогих оптических стекол (СТКЗ, ОФ6); низкий показатель преломления ПФД ($n=1,3$, что приводит к крутым внутренним радиусам и, как следствие, - к трудностям коррекции сферической аберрации); относительно высокий удельный вес ПФД ($1,9\text{ г/см}^3$) и стекла СТКЗ ($3,91\text{ г/см}^3$); малую температуру замерзания (-5°C) [6].

Из приведенного примера можно сделать вывод о том, что для успешного проектирования оптических систем с использованием жидкостных элементов необходимо учитывать не только оптические характеристики жидкостей, но и ряд других физических свойств, влияющих на работоспособность системы в целом.

При проектировании линзовой системы с исправленным вторичным спектром, включающей жидкостной элемент (или элементы) для использования в окружающей среде, где температура непостоянна, жидкость, должна оставаться прозрачной и не должна формировать кристаллы, которые могут рассеивать свет или иначе ухудшать изображение, во всем рабочем диапазоне температур. Еще одним важным требованием, предъявляемым к жидкостям, является то, что они должны быть достаточно вязкими, чтобы устранить тепловые потоки конвекции, которые могли бы привести к локальным

изменениям коэффициента преломления жидкости.

Кроме того, чтобы минимизировать монохроматические аберрации (особенно сферическую), желательно, чтобы оптические силы отдельных элементов системы были настолько малыми, насколько это возможно (то есть, оптические поверхности элементов системы должны иметь как можно меньшую кривизну), для этого необходимо, чтобы элемент (или элементы) системы с особой дисперсией были высоко дисперсионными и обладали большими показателями преломления.

Как показала практика, некоторые жидкости, разработанные изначально как иммерсионные, обладают «особой» дисперсией и отвечают всем выше перечисленным требованиям к жидкостным элементам оптических систем с коррекцией вторичного спектра. [4].

По оптическим характеристикам, наиболее полно удовлетворяют требованиям проектировщиков жидкости Cargille [4], так как они обладают наименьшими числами Аббе (высокой средней дисперсией) при достаточно высоких показателях преломления и наиболее удалены от «нормальной прямой» для оптических стекол, т.е. обладают ярко выраженными «особыми» свойствами.

Жидкости с высокой дисперсией имеют высокую вязкость при комнатной температуре, поэтому в оптическом элементе, изготовленном на базе этих жидкостей не развиваются неоднородности показателя преломления, вызванные тепловыми потоками конвекции в пределах эксплуатационного температурного диапазона для большинства оптических инструментов (- 25°C ... +20°C). Кроме того, эти жидкости имеют подобную стеклу структуру, будучи охлажденными до температур ниже их температуры перехода. Таким образом, жидкости Cargille остаются прозрачными, то есть, они не кристаллизуются при уменьшении температуры окружающей среды.

триплета с применением особого крона вместо жидкостного элемента составила бы около 5кг. Таким образом, применение высоко дисперсионных жидкостных элементов позволяет сократить массу объектива примерно в 2,5 раза по сравнению с аналогами на стекле.

График остаточного хроматизма положения в диапазоне от 435 до 700нм приведен на рис. 3, а волновые aberrации объектива – на рис.4.

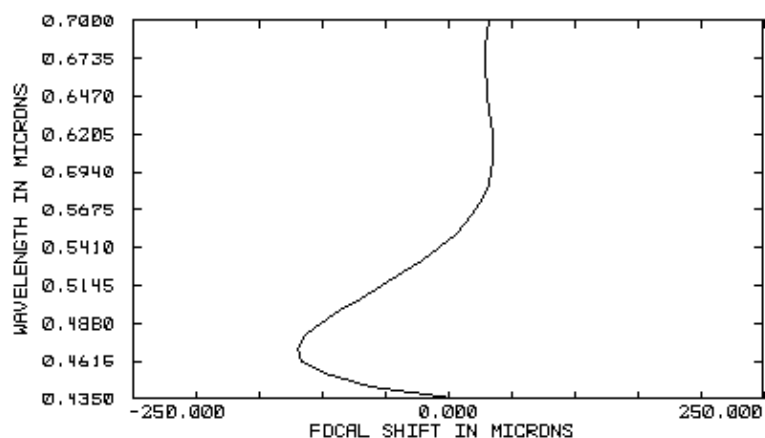


Рис.3. График остаточного хроматизма положения.

Максимальное изменение величины заднего фокусного отрезка в диапазоне 435-700нм составляет величину 160мкм, т.е. 1/8438 часть фокусного расстояния объектива, что соответствует апохроматической коррекции.

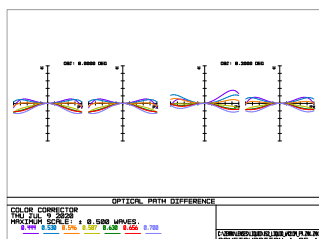


Рис. 4. Волновые aberrации объектива.

Волновые aberrации объектива на оптической оси не превышают 0,2 длины волны (см. Рис.4).

В заключении отметим, что в предложенном объективе использованы дешевые, технологичные марки стекол. Себестоимость производства подобных объективов оказывается существенно ниже, чем апохроматов, выполненных по классической схеме с использованием стекол с особым ходом дисперсии или «триалитов» на стеклах с нормальным ходом дисперсии. При этом качество изображения объектива не уступает традиционным схемам с эквивалентными оптическими характеристиками. Полученные решения могут представлять интерес для разработчиков и производителей серийных оптических систем различного назначения.

Список литературы:

1. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л., Машиностроение, 1968.
2. C.G. Wynne, Opto Acta, 25 (1978), p. 627.
3. Schott. Оптическое стекло. Каталог, 2014.
4. Cargille Optical Liquids. R. P. Cargille Lab., Inc., N.J., USA, 2009.
5. Грамматин А.П., Цыганок Е.А. Особенности вторичного спектра объективов коллиматоров, работающих в диапазоне длин волн 400-900нм.//Изв. Вузов. Приборостроение, 2011. Т.54, №9.
6. Перфтордекалин ПФД ТУ95-1233-92.
7. ZEMAX 13 R2 SP4x64. Optical Design Program. 2013.