

Сопоставительный анализ хроматизма склеенного нанокompозитного компонента и дифракционной линзы

Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, О. А. Захаров, С. В. Казин

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Успехи в области синтеза нанокompозитных оптических пластмасс позволили сблизить дисперсионные характеристики двухлинзового рефракционного склеенного компонента и дифракционной линзы. В настоящем докладе приводятся результаты сопоставительного анализа хроматизма положения и сферохроматизма такого компонента и дифракционной линзы. Показано, что при компоновке склеенного компонента из реальных нанокompозитов DIAM_PMMA и ITO_PMMA в видимом спектральном диапазоне ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм), а тем более в расширенном спектральном диапазоне ($0,486 \leq \lambda \leq 0,9$ мкм), можно говорить лишь о некотором подобии склеенного компонента и дифракционной линзы. Степень подобия тем ближе, чем меньше фокусное расстояние дифракционной линзы, по сравнению с фокусным расстоянием склеенного нанокompозитного компонента.

Ключевые слова: Нанокompозитная оптическая пластмасса, Дифракционная линза, Хроматизм положения, Сферохроматизм.

Цитирование: Грейсух, Г. И. Сопоставительный анализ хроматизма склеенного нанокompозитного компонента и дифракционной линзы / Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, О. А. Захаров, С. В. Казин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 29–35.

Введение

Известно, что одиночная дифракционная линза (ДЛ) с небольшой оптической силой, включаемая в схему рефракционно-линзового объектива, позволяет достичь высокой степени коррекции хроматизма, необходимой для получения высококачественного цветного изображения, даже используя ограниченный набор оптических материалов, позволяющих изготавливать преломляющие поверхности прецизионной штамповкой [1–3]. В то же самое время зависимость дифракционной эффективности ДЛ от длины волны и угла падения излучения на ее микроструктуру в совокупности с технологическими сложностями, сопровождающими подавление вышеуказанной зависимости, по-прежнему остается главной проблемой, препятствующей широкому использованию ДЛ в изображающих оптических системах [4]. Поэтому успехи в области создания новых оптических материалов не редко рассматриваются в том числе с точки зрения возможной альтернативы ДЛ. Наиболее перспективными в этом направлении представляются новейшие нанокompозитные оптические пластмассы и, в частности, описанные в работах [5, 6].

Ранее самими разработчиками нанокompозитных пластмасс и авторами настоящего доклада было продемонстрировано, что эти материалы открывают не имеющие себе равных возможности в области подавления спектральной зависимости дифракционной эффективности ДЛ [7, 8]. В работе же [9] разработчиками нанокompозитных пластмасс склеенный компонент из таких материалов рассматривается уже как альтернатива ДЛ.

1. Условие эквивалентности хроматизма положения бесконечно тонкого склеенного рефракционного компонента (СРК) и ДЛ

Следуя работе [9] покажем при каких условиях продольный хроматизм бесконечно тонкого СРК с плоскими наружными преломляющими поверхностями (см. рисунок 1) и ДЛ будет строго совпадать. Оптическая сила компонента на расчетной длине волны λ_0 (за которую обычно принимается центральная длина волны рабочего спектрального диапазона) описывается выражением:

$$\frac{1}{f(\lambda_0)} = \frac{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)}{r} . \quad (1)$$

На произвольной же длине волны оптическая сила равна

$$\frac{1}{f(\lambda)} = \frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{r} = \frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)} \frac{1}{f(\lambda_0)} . \quad (2)$$

Отсюда

$$\frac{f(\lambda_0)}{f(\lambda)} = \frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)} . \quad (3)$$

У ДЛ соответствующее отношение имеет вид:

$$\frac{f_D(\lambda_0)}{f_D(\lambda)} = \frac{\lambda}{\lambda_0} . \quad (4)$$

Приравнивая правые части выражений (3) и (4), получаем искомое условие эквивалентности хроматизма положения бесконечно тонкого СРК и ДЛ:

$$\frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)} = \frac{\lambda}{\lambda_0} . \quad (5)$$

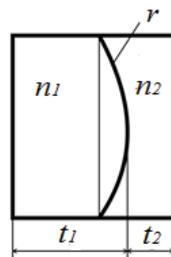


Рис. 1. СРК с плоскими наружными преломляющими поверхностями.

В бесконечно тонком варианте $t_1 = t_2 = 0$

Если бы в склеенном компоненте, представленном на рисунке 1, границей раздела сред служила бы не преломляющая поверхность, а дифракционная пилообразная микроструктура, то условие независимости ее дифракционной эффективности от длины волны имело бы вид:

$$h(n_2(\lambda) - n_1(\lambda)) = \lambda , \quad (6)$$

где h — глубина рельефа, равная

$$h = \frac{\lambda_0}{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)}. \quad (7)$$

Подстановка формулы (7) в (6) приводит к формуле (5) из чего следует, что условие эквивалентности хроматизма положения бесконечно тонкого СРК и ДЛ точно совпадает с условием стопроцентной дифракционной эффективности двухслойной однорельефной микроструктуры.

В видимом спектральном диапазоне ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм) ни одна из известных пар оптических материалов строго не удовлетворяет условию (5), а наилучшее приближение обеспечивает пара нанокompозитных пластмасс Diamond in PMMA (Diam_PMMA) и ITO in PMMA (ITO_PMMA) [9]. Чтобы оценить потенциальные возможности СРК, которые могли бы быть достигнуты, если бы удалось синтезировать идеальную пару нанокompозитных пластмасс, строго удовлетворяющую условию (5), авторы доклада использовали, как это было предложено в работах [7] и [8], в паре с нанокompозитной пластмассой Diam_PMMA математическую модель оптического материала ITO_PMMA_MM. Показатель преломления $n_{mn}(\lambda)$ модельного материала при замене на него показателя преломления $n_2(\lambda)$ обеспечивал строгое выполнение условия (5).

2. Результаты исследования

Сопоставительный анализ хроматизма СРК и ДЛ выполнялся с использованием программы оптического проектирования Zemax13 [10]. При этом преломляющие поверхности СРК моделировались поверхностями типа «Standard», дисперсионные формулы используемых материалов, представленные, в частности, в работах [7, 8], включались в каталог MISC программы Zemax13. ДЛ моделировалась поверхностью типа «Binary 2», а продольный хроматизм оценивался функцией «Chromatic Focal Shift», имеющей вид:

$$\Delta f(\lambda) = f(\lambda) - f(\lambda_0). \quad (8)$$

На первом этапе анализировался бесконечно тонкий СРК с плоскими наружными преломляющими поверхностями, скомпонованный из реальной нанокompозитной пластмассы и математической модели оптического материала. Он подтвердил, что при равных фокусных расстояниях на расчетной длине волны, функции «Chromatic Focal Shift» СРК и ДЛ строго совпадают.

Что касается сферохроматизма, то его соотношение зависит от ширины рабочего спектрального диапазона и других условий сравнения. Так, в частности, при $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм, расположении предмета на бесконечности, фокусном расстоянии СРК и ДЛ на $\lambda_0=0,55$ мкм, равном 40 мм и световом диаметре 5 мм, сферохроматизм СРК примерно в 5 раз выше, чем у ДЛ.

В области же монохроматических aberrаций принципиальным отличием СРК от ДЛ является неустранимость кривизны Петцваля. Если у ДЛ радиус поверхности Петцваля всегда бесконечен, то у СРК [9]:

$$R_{Petz} = -n_1(\lambda_0)n_2(\lambda_0)f(\lambda_0). \quad (9)$$

Увеличить R_{petz} путем перехода от плоских наружных преломляющих поверхностей к сферическим невозможно, так как это приводит к нарушению эквивалентности СРК и ДЛ по продольному хроматизму.

Практическое использование СРК невозможно без перехода к конечным толщинам пары склеенных линз. Анализ показал, что достижение хотя бы минимально допустимой толщины фронтальной DIAM_ПММА линзы при сохранении характера кривой функции «Chromatic Focal Shift» и величины ее максимального размаха требует дополнительного включения радиусов двух наружных преломляющих поверхностей и резкого увеличения толщины второй линзы. В результате СРК с приемлемыми толщинами можно получить только при очень большом диафрагменном числе $F\# \geq 13$. Ограничение $F\#$ снизу обусловлено острым краем тонкой линзы СРК. Это ограничение можно преодолеть только путем асферизации одной или обеих поверхностей тонкой линзы.

Завершался сопоставительный анализ оценкой сегодняшних возможностей СРК, компонуемых из предложенной в [9] пары нанокompозитных пластмасс Diam_ПММА и ИТО_ПММА.

Этот анализ показал, что:

- в бесконечно тонком варианте как с плоскими, так и со сферическими (асферическими) наружными преломляющими поверхностями эквивалентность функций «Chromatic Focal Shift» СРК и ДЛ, имеющих одинаковую оптическую силу, недостижима;

- при использовании для сближения функций «Chromatic Focal Shift» СРК и ДЛ трех радиусов кривизны поверхностей и обеих толщин (с ограничениями на толщины обеих линз $0,15 \leq t \leq 0,20$ мм) та или иная степень подобия может быть достигнута только если фокусное расстояние ДЛ меньше фокусного расстояния СРК. Само же соотношение фокусных расстояний зависит прежде всего от выбора рабочего спектрального диапазона. Так в F-d-C спектральном диапазоне ($0,486 \leq \lambda \leq 0,656$ мкм) фокусные расстояния должны различаться как минимум в 2,5 раз, а в расширенном спектральном диапазоне F-d-0,9 ($0,486 \leq \lambda \leq 0,9$ мкм) – в 1,8 раза (см. рисунки 2–5).

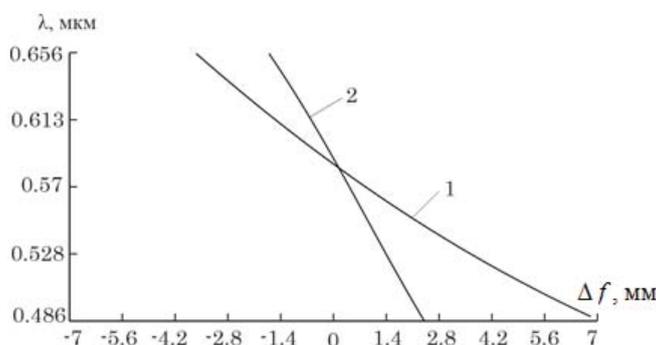


Рис. 2. Кривые $\Delta f(\lambda)$ для ДЛ и СРК при $f(\lambda_0) = 35$ мм в спектральном диапазоне F-d-C:

1 — для ДЛ, $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 10,97$ мм ; 2 — для СРК, $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 4,09$ мм

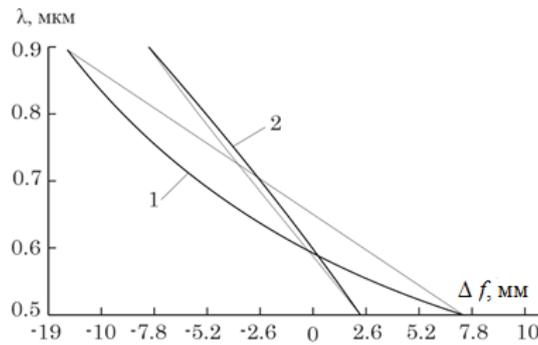


Рис. 3. Кривые $\Delta f(\lambda)$ для ДЛ и СРК при $f(\lambda_0) = 35$ мм в спектральном диапазоне F-d-0,9:
 1 – для ДЛ, $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 19,49$ мм ; 2 – для СРК, $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 10,71$ мм

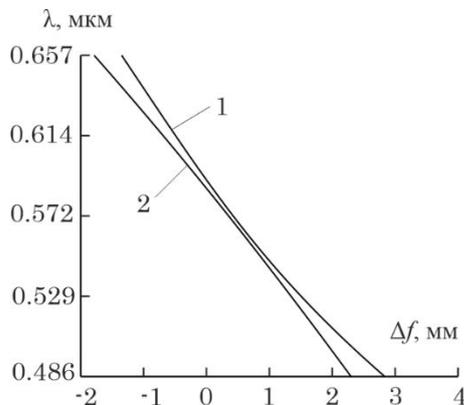


Рис. 4. Кривые $\Delta f(\lambda)$ для ДЛ при $f(\lambda_0) = 13$ мм (1) и СРК при $f(\lambda_0) = 35$ мм (2) в спектральном диапазоне F-d-C; $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 4,08$ мм

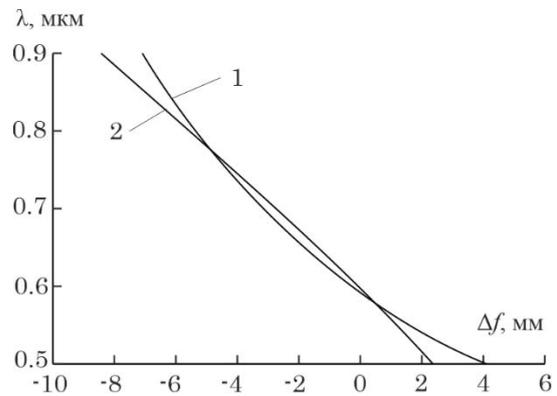


Рис. 5. Кривые $\Delta f(\lambda)$ для ДЛ при $f(\lambda_0) = 19,3$ мм (1) и СРК при $f(\lambda_0) = 35$ мм (2) в спектральном диапазоне F-d-0,9; $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 10,71$ мм

Кривые на рисунках 3, 5 наглядно демонстрируют, что в расширенном спектральном диапазоне кривые $\Delta f(\lambda)$ для ДЛ и СРК отличаются не только размахом, но и формой: кривая для ДЛ вогнутая, а для СРК – выпуклая. Кривые на рисунках 3, 4 кроме того показывают, что при фокусных расстояниях, обеспечивающих равенство размахов кривых $\Delta f(\lambda)$ СРК и ДЛ, кривые, соответствующие ДЛ, сдвинуты по оси абсцисс вправо. Отсюда следует, что в коротковолновой части рабочего спектрального диапазона хроматизм положения ДЛ превалирует над хроматизмом СРК, а в длинноволновой – наоборот.

Заключение

В видимом спектральном диапазоне (при $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм) при приемлемых толщинах линз СРК ($0,15 < t < 1,5$ мм) этот компонент и ДЛ можно с достаточной степенью точности считать эквивалентными с точки зрения продольного хроматизма при нижеследующих условиях:

- компонент состоит из реального нанокompозита и математической модели (например, DIAM_PMMA и ITO_PMMA_MM);
- диафрагменное число $F \geq 13.4$ (Это ограничение обусловлено острым краем тонкой линзы СРК. Его можно преодолеть путем асферизации фронтальной поверхности тонкой линзы).

При компоновке СРК из реальных нанокompозитов DIAM_PMMA и ITO_PMMA в видимом спектральном диапазоне, а тем более в расширенном спектральном диапазоне ($0,486 \leq \lambda \leq 0,9$ мкм), можно говорить лишь о некотором подобии СРК и ДЛ. Степень подобия тем ближе, чем меньше фокусное расстояние ДЛ, по сравнению с фокусным расстоянием СРК.

Таким образом, простая эквивалентная замена в оптической системе ДЛ на нанокompозитный СРК скорее всего невозможна. В то же время уникальные дисперсионные свойства нанокompозитных пластмасс DIAM_PMMA и ITO_PMMA позволяют надеяться на существенное повышение эффективности коррекции хроматизма чисто рефракционных пластмассово-линзовых оптических систем.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

Список источников

- [1] Greisukh G. I. et al. Design of achromatic and apochromatic plastic micro-objectives // Applied Optics. – 2010. – Т. 49. – №. 23. – С. 4379-4384.
- [2] Greisukh G. I. et al. Design of plastic diffractive–refractive compact zoom lenses for visible–near-IR spectrum // Applied Optics. – 2013. – Т. 52. – №. 23. – С. 5843-5850.
- [3] Greisukh G. I. et al. Layout and calculation of a refractive-diffraction objective of a periscope type for a mobile communication device // J Opt Techn. – 2016. – Т. 83. – №. 11. – С. 687-691.
- [4] Greisukh G. I. et al. Single-layer kinoforms for cameras and video cameras of mobile communication devices // Computer Optics. – 2017. – Т. 41. – №. 2. – С. 218-226.
- [5] Werdehausen D. et al. Design rules for customizable optical materials based on nanocomposites // Optical Materials Express. – 2018. – Т. 8. – №. 11. – С. 3456-3469.
- [6] Werdehausen D. et al. Dispersion-engineered nanocomposites enable achromatic diffractive optical elements // Optica. – 2019. – Т. 6. – №. 8. – С. 1031-1038.
- [7] Isaevich G. G. et al. Potential opportunities of sawtooth diffraction microstructure with two layers and single relief // Journal of Optics. – 2020. – Т. 22. – №. 8. – С. 085604.
- [8] Greisukh G. I. et al. Limiting spectral and angular characteristics of multilayer relief–phase diffraction microstructures // Quantum Electronics. – 2020. – Т. 50. – №. 7. – С. 623.
- [9] Seesselberg M., Werdehausen D. How to replace diffractive optical elements for color correction by refractive lenses from specific materials // International Optical Design Conference. – Optical Society of America, 2021. – С. 120780K.
- [10] Zemax [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zemax.com/products/opticstudio>

Comparative analysis of chromatism of a glued nanocomposite component and a diffractive lens

G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, O.A. Zakharov, S.V. Kazin

Penza State University of Architecture and Construction Penza, Russia

Advances in the field of synthesis of nanocomposite optical plastics have made it possible to bring the dispersion characteristics of a two-lens refractive glued component and a diffractive lens closer together. This report presents the results of a comparative analysis of the longitudinal chromatism

and spherochromatism of such component and the diffractive lens. It is shown that when a glued component is assembled from real DIAM_PMMA and ITO_PMMA nanocomposites in the visible spectral range ($0.4 \leq \lambda \leq 0.7 \mu\text{m}$), and even more so in the extended spectral range ($0.48 \leq \lambda \leq 0.9 \mu\text{m}$), one can only speak of some similarity between the glued component and a diffractive lens. The degree of similarity is the closer, the smaller the focal length of the diffractive lens, compared to the focal length of the glued nanocomposite component.

Keywords: Nanocomposite optical plastic, Diffractive lens, Longitudinal chromatism, Spherochromatism.