

УДК 681.45

ГИБРИДНЫЙ МИКРООБЪЕКТИВ ДЛЯ ОПТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

В. Н. Васильев,

член-корр. РАН, доктор техн. наук, профессор

И. Л. Лившиц,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

М. Б. Сергеев,

доктор техн. наук, профессор

Е. А. Соколова,

доктор техн. наук, старший научный сотрудник

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Рассматриваются вопросы создания гибридных оптических систем, содержащих комбинацию рефракционных и дифракционных элементов. Сочетание таких элементов является средством повышения информативности опτικο-информационных систем комбинационного рассеяния. Это достигается благодаря улучшению коррекции хроматических аберраций микрообъектива в расширенном спектральном диапазоне. При этом не используются проблемные для комбинационного рассеяния оптические материалы.

Ключевые слова — повышение информативности системы, комбинационное рассеяние, микрообъектив, спектральный диапазон, хроматические аберрации.

Введение

Явление комбинационного рассеяния широко используется при создании различных датчиков для опτικο-информационных систем, работающих, например, в области биотехнологий. Повышение информативности таких систем, основной частью которых является микрообъектив, существенно и определяет точность и результативность их функционирования.

Важным аспектом увеличения информативности микрообъектива является коррекция хроматических аберраций в широком спектральном диапазоне, которая при реализации микрообъектива для других приложений решается за счет использования различных сортов оптического стекла для изготовления линз. Однако в случае приложений для комбинационного рассеяния есть ограничения на использование большинства сортов оптических стекол. Причину этих ограничений можно объяснить, если представить спектроскопию комбинационного рассеяния упрощенно как процесс, в котором фотон света взаи-

модельствует с образцом для инициирования рассеянного излучения различных длин волн (примерно только 10^{-7} падающих фотонов преобразуются в комбинационное рассеяние).

Разработка соответствующего объектива является ключом к обеспечению успешного измерения комбинационного рассеяния, поскольку она определяет объем материала, с которого собирается рассеянное излучение, а также эффективность этого сбора.

Современные объективы содержат несколько оптических элементов и тщательно оптимизированы для максимальной компенсации аберраций, поскольку известно, что степень их коррекции в микрообъективах ограничена пределом дифракционного разрешения.

Для повышения светопропускания и подавления паразитного отражения на линзы наносятся просветляющие покрытия. В ряде случаев такие линзы не подходят для измерения комбинационного рассеяния, так как покрытие может обладать свойствами комбинационного рассеяния или флуоресценции и создавать ложные частот-

ные полосы в измеряемых спектрах. Для наиболее чувствительных измерений даже собственное комбинационное рассеяние оптического стекла может вызывать проблемы.

Для микроскопии/спектроскопии комбинационного рассеяния сигнал, получаемый от линз, может быть сильнее, чем сигнал от образца (например, при диагностике кожи человека или других биологических материалов). Это, во-первых, ограничивает перечень оптических сред, которые могут быть использованы в микрообъективах для этого приложения. Во-вторых, ряд минералов, например CaF_2 , ZnS (Cleartran) и ZnSe являются дорогостоящими, часто не используются из-за трудности изготовления из них линз или ограничений, связанных с требованиями охраны труда. К тому же замена дорогих микрообъективов для подобных применений в случае их повреждения, как правило, занимает много времени. Поэтому из материалов, которые могут быть использованы, только плавленый кварц является относительно не дорогим, технологичным и применяется всеми производителями объективов.

Другой путь коррекции хроматических aberrаций — включение в оптические схемы гибридных дифракционно-рефракционных элементов [1–11]. Такая коррекция основана на физическом явлении, состоящем в том, что хроматические aberrации, возникающие при преломлении света на рефракционной и дифракционной поверхностях, имеют противоположные знаки. Можно ожидать, что комбинация дифракционных и рефракционных поверхностей позволит достичь компенсации хроматических aberrаций с использованием оптических элементов, сделанных из одного и того же сорта стекла, вместо применения линз из различных оптических материалов.

В большинстве существующих оптических систем линзы производятся из различных материалов, включая пластмассы, из которых изготовление дифракционных структур технологически проще. Обычно эти системы включают в себя асферические поверхности. В литературе найден лишь один пример [10] использования дифракционной поверхности в объективе микроскопа. Линзы этого объектива изготовлены из различных сортов оптического стекла, а сам он кроме дифракционной содержит асферические поверхности. Контроль последних является сложной процедурой, которая часто требует проектирования и изготовления специального оборудования (голограммы), что имеет смысл только для массового производства.

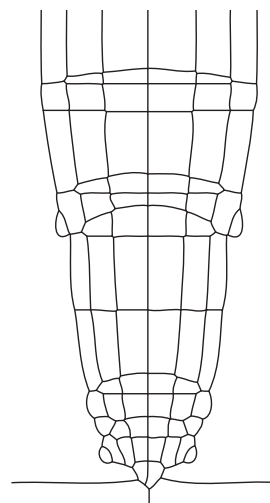
Объективы, все линзы которых изготовлены из одного и того же материала, предпочтительно плавленого кварца, и не содержат асферических поверхностей, могут решить проблему повыше-

ния информативности системы в приборах комбинационного рассеяния, которые обычно выпускаются небольшими сериями и имеют ограничения на использование большинства сортов стекол.

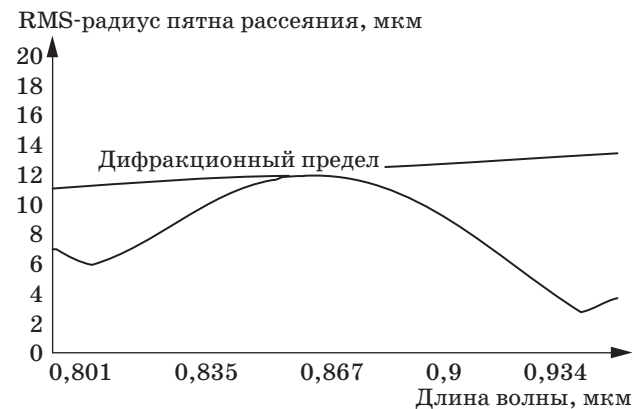
Классический конфокальный микрообъектив для микроскопии/спектроскопии комбинационного рассеяния

Одной из форм оценки информативности цифровых камер оптико-информационных систем является их моделирование с помощью специализированного программного обеспечения для проектирования оптических систем. С помощью соответствующих расчетов определяются aberrации оптической системы — конфокального микрообъектива.

В качестве примера рассмотрим конфокальный микрообъектив (рис. 1), содержащий линзы из



■ Рис. 1. Конфокальный микрообъектив для спектрометра комбинационного рассеяния



■ Рис. 2. Спектральная зависимость RMS-радиуса пятна рассеяния конфокального микрообъектива

разных сортов оптических материалов (одним из которых является ZnS), позволяющие обеспечить достаточно высокое качество его абберационной коррекции. Следует отметить, что представленная оптическая схема не была специально разработана для увеличения апертуры микрообъектива.

Для представленного конфокального микрообъектива, используемого с фокусирующим дублетом и имеющего фокусное расстояние 100 мм для рабочего диапазона длин волн, генерированный на компьютере график спектральной зависимости RMS-радиуса пятна рассеяния представлен на рис. 2. Здесь радиус RMS — это среднеквадратическое отклонение радиальных координат падающих на поверхность изображения лучей.

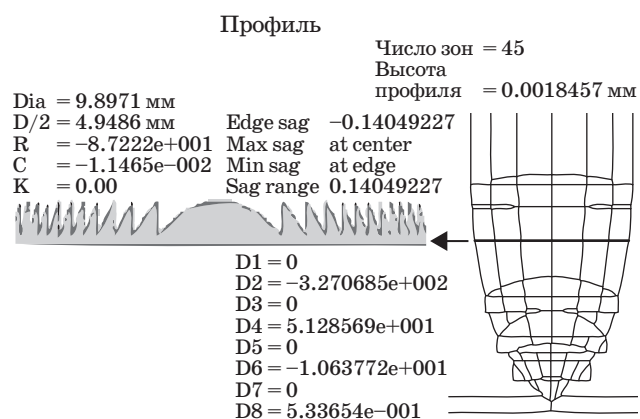
Оптимизация микрообъектива

В процессе оптимизации различные оптические материалы, использованные для изготовления линз объектива, представленного на рис. 1, были постепенно заменены плавленым кварцем, а дифракционная структура нанесена на одну из поверхностей линз. Результирующая оптическая схема и параметры дифракционной линзы представлены на рис. 3.

Коэффициенты D_n — это фазовые коэффициенты в радианах, нормированные к половине диаметра дифракционной поверхности. Эти коэффициенты равны бинарным коэффициентам, используемым в программе ZEMAX для случая, когда радиус нормализации равен половине диаметра бинарной поверхности, которая добавляет фазу в соответствии с полиномом [12]:

$$\Phi = M \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i}. \quad (1)$$

Здесь M — порядок дифракции; N — количество полиномиальных коэффициентов в разложении; A_i — коэффициент степени $2i$ нормализованной радиальной координаты ρ .



■ Рис. 3. Результирующая оптическая схема

В программе CODEV фазовый профиль в радианах описывается [13] уравнением

$$\Phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \right) \sum C_n r^{2n}, \quad (2)$$

где C_n — полиномиальные коэффициенты; r — ненормированная радиальная координата.

Чтобы пересчитать коэффициенты ZEMAX A_i в коэффициенты CODEV C_n , надо сначала пересчитать их к нормализационному радиусу 1 мм, после чего использовать соотношение [14]

$$A_i = C_n 2\pi / \lambda, \quad (3)$$

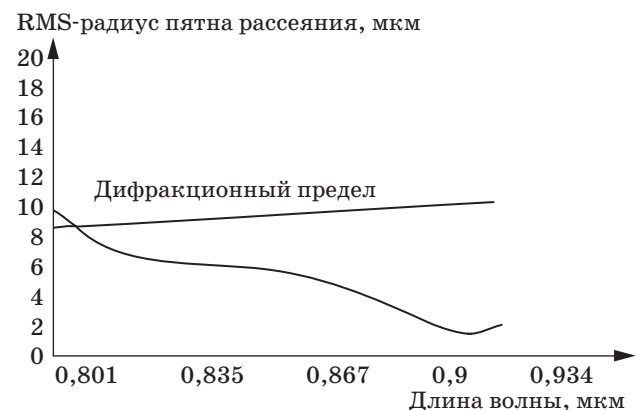
где $i = n$.

На компьютере генерирован график (рис. 4) спектральной зависимости RMS-радиуса пятна для рабочего диапазона длин волн оптимизированного гибридного микрообъектива (см. рис. 3), содержащего дифракционную линзу.

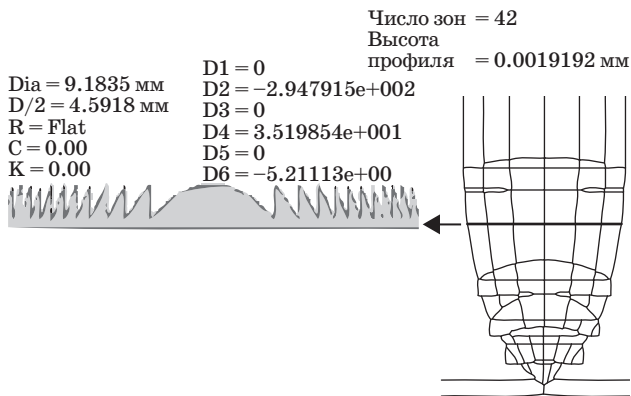
Радиус RMS в обоих случаях меньше, чем дифракционный предел. Это означает, что замена рефракционного объектива, содержащего линзы из разных оптических материалов, гибридным дифракционно-рефракционным объективом, все линзы которого изготовлены из плавленого кварца, произведена успешно.

Поскольку изготовление дифракционной линзы проще и дешевле на плоской поверхности, чем на сферической, был разработан еще один вариант гибридного дифракционно-рефракционного объектива (рис. 5).

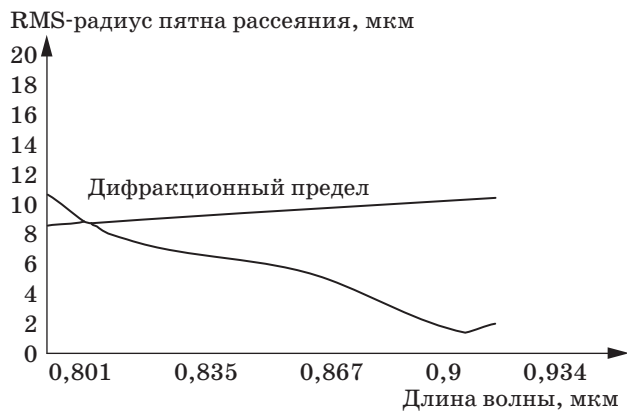
Данный объектив содержит на одну линзу больше, чем объектив, представленный на рис. 3, однако стоимость его изготовления ниже. Генерированный на компьютере график спектральной зависимости RMS-радиуса пятна рассеяния для данного объектива приведен на рис. 6.



■ Рис. 4. Спектральная зависимость RMS-радиуса пятна рассеяния конфокального оптимизированного гибридного микрообъектива



■ Рис. 5. Оптическая схема гибридного дифракционно-рефракционного объектива с дифракционной линзой на плоской поверхности



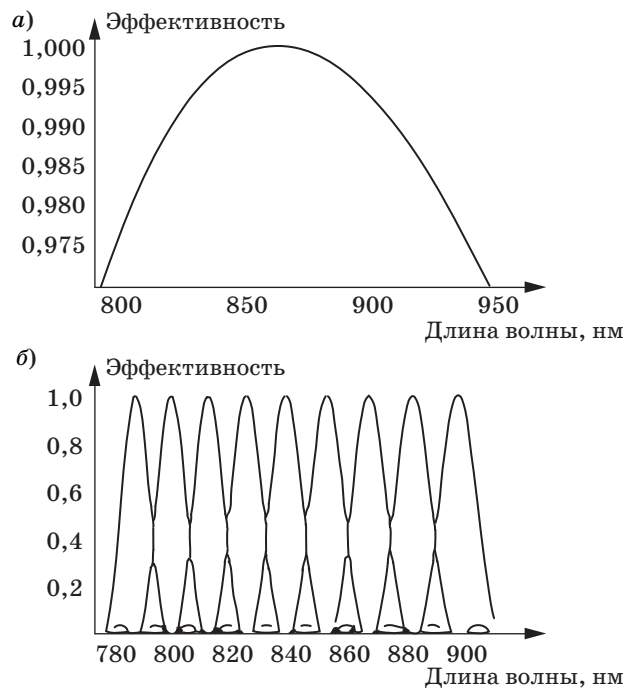
■ Рис. 6. Спектральная зависимость RMS-радиуса пятна рассеяния оптимизированного гибридного микрообъектива с дифракционной линзой на плоской поверхности

Дифракционная эффективность объектива, представленного на рис. 5, для рабочего диапазона длин волн была рассчитана с использованием формулы [15]

$$E = \left| \frac{\sin \left[\pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) \right]}{\pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)} \right|, \quad (4)$$

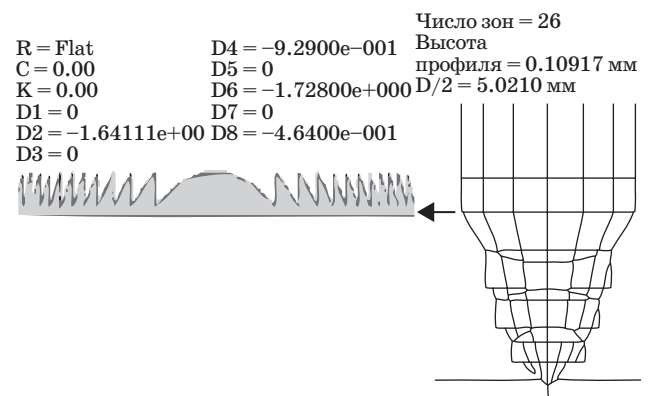
где λ_0 — длина волны, для которой дифракционная эффективность максимальна; λ — текущая длина волны. График зависимости эффективности от длины волны показан на рис. 7, а.

Для некоторых приложений спектроскопии комбинационного рассеяния необходимо регистрировать сигнал в нескольких узких спектральных диапазонах. В этом случае целесообразно использование дифракционной линзы, работающей в нескольких порядках [15, 16]. Такой объектив имеет высокую дифракционную эффективность только для ряда дискретных спек-



■ Рис. 7. Дифракционная эффективность линзы: а — в рабочем диапазоне длин волн; б — работающей в порядках 56–64

тральных диапазонов. В случае объектива для микроскопии/спектроскопии комбинационного рассеяния порядки могут быть выбраны таким образом, что объектив будет эффективным именно для спектральных интервалов, интересных для того или иного приложения. Например, для ряда приложений, связанных с измерением параметров кожи, наиболее интересны узкие полосы вблизи длин волн 837 нм (60-й порядок), 866 нм (58-й порядок), 881 нм (57-й порядок) и 897 нм (56-й порядок). При этом 64-й порядок используется для длины волны лазерного возбуждения 785 нм.



■ Рис. 8. Оптическая схема гибридного дифракционно-рефракционного объектива с дифракционной линзой на плоской поверхности, работающей в высоких порядках спектра



■ **Рис. 9.** Спектральная зависимость RMS-радиуса пятна рассеяния для объектива, представленного на рис. 8

График дифракционной эффективности линзы, которую можно использовать для этого приложения, показан на рис. 7, б.

Качество изображения, полученного при помощи объектива с дифракционной линзой, работающей в высоких порядках (рис. 8), будет хорошим только для тех же узких дискретных спектральных полос (рис. 9), и большая часть излучения длин волн вне этих полос не пройдет через конфокальную точечную диафрагму. Объектив, работающий с фокусирующим дублетом и имеющий фокусное расстояние 100 мм, в этом случае будет также играть роль дополнительного фильтра.

Заключение

Проведенные исследования и результаты моделирования подтверждают, что для рассмотренного в данной работе приложения гибридной дифракционно-рефракционной оптической системы все характеристики качества изображения по крайней мере не хуже, а некоторые — даже лучше, чем для чисто рефракционного прототипа.

Теоретическая дифракционная эффективность, что особенно важно для комбинационного рассеяния, также достаточно высока. Реальная эффективность дифракции будет зависеть от технологии изготовления, которая в данной работе не рассматривалась.

Возможность изготовления эффективной гибридной дифракционно-рефракционной линзы для конфокального микрообъектива уже подтверждена двумя потенциальными изготовителями.

На основании вышеизложенного авторы рекомендуют использовать рассмотренный подход к созданию гибридных оптических систем для повышения информативности оптико-информационных систем в целом.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта 11.519. 11.6014.

Литература

1. Swanson G. J., Scott M. Lens / zone plate combination for chromatic dispersion. US Patent 5442480, 1995.
2. Faklis D., Morris G. M. Polychromatic diffractive lens. US Patent 5589982, 1996.
3. Kreitzer M. H. Color corrected projection lenses employing diffractive optical surfaces. US Patent 6529336, 2003.
4. Ogawa H. Optical system having a diffractive optical element, and optical apparatus. US Patent 6825979, 2004.
5. Huang Y-C. Hybrid lens system. US Patent 6741403, 2004.
6. Huang Y-C. Hybrid lens system. US Patent 6490102, 2002.
7. Maruyama K. Triplet lens system with diffractive lens features. US Patent 6101035, 2000.
8. Foo L. D. Objective lens system utilizing diffractive optical element. US Patent 5880879, 1999.
9. Chen C. W. Athermalized and achromatized optical systems employing diffractive optical... . US Patent 5691847, 1997.
10. Liang C. Miniature microscope objective for an array microscope. US Patent 6950241, 2005.
11. O'Shea D. C., Suleski T. J., Kathman A. D., Prather D. W. Diffraction Optics: Design, Fabrication and Test. — Bellingham: SPIE Press, 2003. — 260 p.
12. ZEMAX 12 Optical Design Program User's Manual / Radiant Zemax LLC. May 10, 2012. P. 298.
13. Advanced topics in CODE V Training / Optical Research associates. Aachen, Germany, 2002. P. HOE-26.
14. Kalikmanov V. I., Sokolova E. A. Ill-posed inverse problem in diffractive optics. Tolerance analysis of diffractive lenses and gratings // JOSA. 2006. Vol. 23. N 2. P. 497.
15. Sweeney D. W., Sommargren G. E. Harmonic diffractive lenses // Applied Optics. 1995. Vol. 34. N 14. P. 2469.
16. Faklis D., Morris G. M. Spectral properties of multi-order diffractive lenses // Applied Optics. 1995. Vol. 34. N 14. P. 2462.