

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317, 535.015

## СИНТЕЗ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2013 г. А. П. Грамматин, доктор техн. наук; Е. А. Цыганок, канд. техн. наук;  
Д. И. Егоров, аспирант

СПбНИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: llenal@mail.ru

Проведено исследование возможности создания объективов для спектральной оптической когерентной томографии в области спектра 1260–1360 нм. Показано, что одиночный киноформ не может выступать в качестве объектива с заведомо известным значением хроматизма положения в данной области спектра. Поставленная задача может быть решена только в “гибридных” схемах, содержащих линзовые и киноформные элементы.

**Ключевые слова:** оптическая когерентная томография, объективы микроскопов, объективы с киноформным элементом.

Коды OCIS: 170.4500, 170.6960.

Поступила в редакцию 29.04.2013.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) – неразрушающий и высокоточный метод исследования поперечного среза исследуемых тканей с помощью интерференционного сканирующего микроскопа – была разработана в Массачусетском технологическом университете в конце 80–х годов XX века и нашла применение во многих отраслях медицины.

Сканирование по глубине объекта осуществлялось в интерференционном микроскопе по схеме академика В.П. Линника путем осевого перемещения зеркала, расположенного в опорном плече, а “интерференционная картина определяла отражающую способность исследуемой точки среза” [1]. Механическое сканирование может быть заменено спектральным, путем использования лазера с перестраиваемой длиной волны и объектива объектного канала, обладающего большим хроматизмом положения. В этом случае “при изменении длины волны в пределах спектрального диапазона излучения наблюдаются полосы равного хроматического порядка (так называемый “канавчатый спектр”), частота которых пропорциональна оптической разности хода. В случае объемного отражения

от неоднородной среды канавчатые спектры для слоев среды суммируются и результирующий спектр содержит информацию о неоднородности среды, т.е. распределении степени отражения излучения по глубине среды.”[1] Преимуществом спектральной интерферометрии является отсутствие необходимости в перемещении опорного зеркала интерферометра.

Для реализации спектрального оптического когерентного микроскопа, выполненного по схеме академика Линника В.П., необходима разработка парных объективов с одинаковыми фокусными расстояниями, числовой апертурой, линейными полями и одинаковыми спектральными диапазонами. При этом объектив в объектном плече, как было указано выше, должен обладать большим хроматизмом положения. Назовем такую коррекцию гиперхроматической. Разработки гиперхроматических объективов авторам неизвестны. Объектив опорного плеча должен иметь планахроматическую коррекцию. Один из вариантов схемы предполагает использование объективов с фокусными расстояниями  $f' = 16$  мм, числовыми апертурами 0,4, полем предмета 1 мм и лазером с перестраиваемой ча-

стотой в интервале длин волн 1260–1360 нм. При этом глубина сканирования должна составлять 1 мм в среде с показателем преломления  $n = 1,47$  и примерно 0,7 мм в воздухе.

Трудность создания объектива объектного канала заключается в том, что для большинства стекол коэффициент дисперсии  $\nu$  в этом диапазоне длин волн, находится в интервале 350–500. Использование инфракрасных стекол группы ИКС в объективах микроскопа недопустимо из-за срезания ими видимой области спектра, принимая во внимание, что юстировка и контроль качества сборки осуществляют визуально.

В таблице представлены минимальный и максимальный коэффициенты дисперсии групп стекол и некоторых оптических материалов в заданном спектральном диапазоне. В качестве основной принята длина волны 1310 нм.

В объективе опорного плеча целесообразно использование пары флюорит ( $\nu = 871,5$ ) и селенид цинка ( $\nu = 290$ ). Ахроматизация при использовании этой пары достигается при

$$\varphi = \nu_{\kappa} / (\nu_{\kappa} - \nu_{\phi}) = 1,5, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – относительная оптическая сила флюоритовой линзы,  $\nu_{\kappa}$  – коэффициент дисперсии флюорита,  $\nu_{\phi}$  – коэффициент дисперсии селенида цинка. Оптическая схема разработанного объектива опорного плеча с дифракционным качеством изображения представлена на рис. 1. Число Штреля для осевой точки равно 0,84, для внеосевой – 0,78. Было принято решение использовать одиночный киноформный элемент, который представляет собой круговую фазовую дифракционную решетку

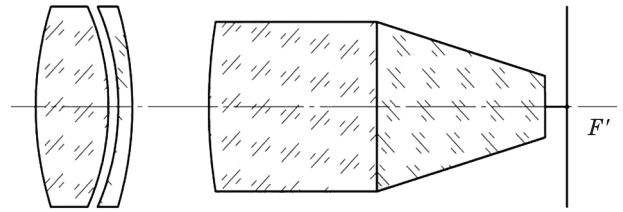


Рис. 1. Объектив для опорного пучка с  $f' = 16$  мм,  $A = 0,4$ ,  $2y = 1$  мм.

ку с переменным шагом в качестве объектива. Ранее киноформ использовали в качестве компенсатора вторичного спектра оптических систем [2, 3]. Были изготовлены опытные образцы объектива микроскопа и фотографического объектива. Относительная оптическая сила киноформной линзы в этих случаях не превышала 0,17.

Так как киноформный элемент представляет собой дифракционную решетку, то его коэффициент дисперсии равен

$$\nu = \lambda / \Delta\lambda, \quad (2)$$

где  $\Delta\lambda$  и  $\lambda$  – заданный спектральный диапазон и основная длина волны соответственно. Для рассматриваемого диапазона длин волн  $\Delta\lambda = 100$  нм и  $\lambda = 1310$  нм, по формуле (2)  $\nu = 13,1$ . Хроматизм положения определяется формулой

$$S'_{(2-1)} = f' / \nu, \quad (3)$$

где  $f'$  – фокусное расстояние оптического элемента. Требуемый хроматизм 0,7 мм в среде достигается при  $f' = 9,2$  мм.

Минимальный и максимальный коэффициенты дисперсии для диапазона длин волн 1260–1360 нм и  $\lambda_0 = 1310$  нм

Группа стекол	Коэффициент дисперсии	Группа стекол	Коэффициент дисперсии
ЛК	388 – 500	Ф	410 – 446
ФК	430 – 502	ТФ	392-434
К	399 – 487	ОФ	349 – 413
БК	436 – 493	ОК	614 – 628
ТК	433 – 524	СТФ	345 – 386
СТК	412 – 506	ИКС	154 – 250
КФ	420 – 433	Кварц	410
БФ	418 – 509	Селенид цинка	290
ТБФ	400 – 480	Сапфир	450
ЛФ	400 – 473	Флюорит	871,5

Как показали испытания опытных образцов в объективах с киноформным элементом, работающих в широкой области спектра, происходит существенное снижение контраста изображения за счет возникновения побочных изображений для дополнительных длин волн высших порядков дифракции. В рассматриваемом случае объектив создает мгновенное изображение в монохроматическом свете.

Таким образом, для обеспечения заданного гиперхроматизма объектива с фокусным расстоянием 16 мм можно использовать киноформную линзу. При этом заданная глубина сканирования будет превышена в 1,74 раза. Для достижения заданной глубины можно в соответствующее количество раз сузить спектральный диапазон.

Проанализируем возможность использования одиночного киноформа в качестве объектива объектного плеча интерферометра. С помощью компьютерного моделирования установлено, что одиночный киноформ позволяет идеально исправить волновую сферическую aberrацию при заданных числовой апертуре и фокусном расстоянии, но величина отступления от условия изопланатизма велика и принципиально неустранима. Покажем это на рис. 2. Очевидно, что

$$\operatorname{tg} \sigma' = m / f', \quad (4)$$

где  $m$  – высота апертурного луча на зрачке.

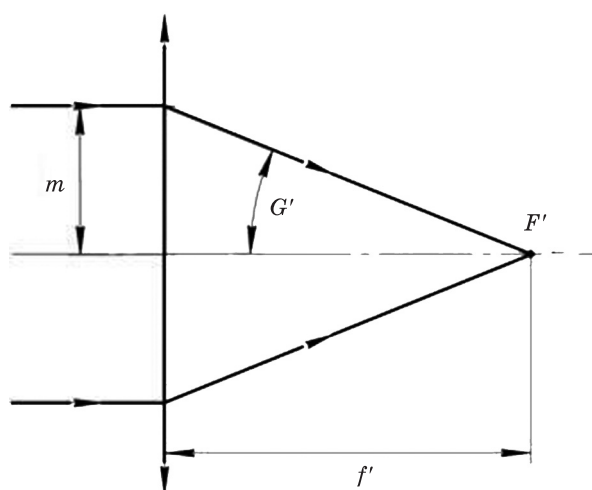


Рис.2. Ход апертурного луча в киноформном элементе с исправленной сферической aberrацией.

Следовательно, у киноформа с исправленной сферической aberrацией выполняется закон тангенсов. Для устранения комы необходимо выполнение закона синусов

$$\sin \sigma' = m / f'_0, \quad (5)$$

где  $f'_0$  – параксиальное фокусное расстояние. С учетом формул (4) и (5), отклонение от условий изопланатизма будет определяться выражением

$$\eta = \Delta f' / f'_0 = (f' - f'_0) / f'_0 = f' / f'_0 - 1 = (m / \operatorname{tg} \sigma') (\sin \sigma' / m) - 1.$$

В итоге имеем

$$\eta = \cos \sigma' - 1, \quad (6)$$

где  $\cos \sigma'$  – косинус апертурного угла.

При заданной числовой апертуре  $\sin \sigma' = 0,4$   $\eta = 9\%$ , что неприемлемо. Определим числовую апертуру, при которой отступление от условия изопланатизма имеет допустимое значение. Из практики расчета объективов микроскопа за такое значение можно принять  $\eta = 0,008$ . Нетрудно определить, что соответствующий  $\sin \sigma' = 0,04$ . В рассматриваемом случае радиус входного зрачка объектива  $m = 16 \times 0,4 = 6,4$  мм. Следовательно, фокусное расстояние киноформа составит  $f' = 6,4 / 0,04 = 160$  мм. Хроматизм положения при этом будет равен  $S'_{(2-1)} = 160 / 13,1 = 12,2$  мм. За киноформом необходимо поставить оптическую систему с продольным увеличением  $Q = 0,7 / 12,2 = 0,057$  и линейным увеличением  $V = Q(1/2) = 0,239(x)$ .

В результате получим объектив с глубиной сканирования 0,7 мм, фокусным расстоянием  $f' = 160 \times 0,239 = 38,24$  мм и числовой апертурой  $\sin \sigma = 0,04 / 0,0239 = 0,167$ . Из приведенных вычислений нетрудно заключить, что при сужении спектрального диапазона до 1280–1340 нм фокусное расстояние “гибридного” объектива составит требуемую величину 16 мм, а числовая апертура – 0,4.

## Выводы

1. Создание объектива для объектного плеча с вышеуказанными характеристиками и требуемым хроматизмом положения, выполненного из материалов прозрачных в видимой области, нереально.

2. Использование одиночного киноформа в качестве объектива для объектного плеча с апертурой большей 0,04 неосуществимо.

3. Поставленная задача может быть решена с применением “гибридных” схем, содержащих линзовые элементы и киноформ.

\* \* \* \* \*

#### *ЛИТЕРАТУРА*

1. *Гуров И.П.* Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы. В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики/ Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С.6–30.
  2. *Грамматин А.П., Ган М.А., Первеев А.Ф., Ларина Р.М., Горбунова В.А., Иванова В.М.* Объективы микроскопа с киноформным элементом// Труды ГОИ. т.74. вып.208. с.65–72.
  3. *Волосов Д.С., Ган М.А., Богатырева И.И.* Телеобъектив – апохромат// Описание изобретения к авторскому свидетельству SU 1151905 А.
-