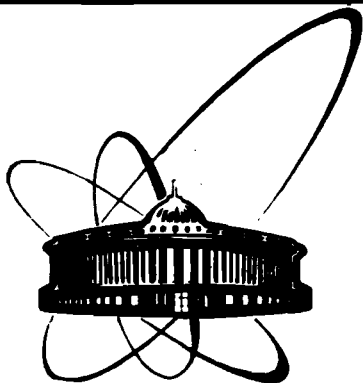


89-549



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

С 655

Д13-89-549

Л.М. Сороко

ИЗОПЛАНАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
В МЕЗООПТИКЕ

Направлено на Оптическую конференцию
(Эрнст Аббе-конференцию), Иена, ГДР, 1989г.

1989

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что для подавления aberrаций типа комы необходимо выполнить условие синусов Аббе^{/1,2,6/} или эквивалентные условия косинусов^{/3,7/}. С этой целью оптимизируют толщину и профили одиночной линзы, параметры вынесенного зрачка, а также других элементов сложной изображающей системы. В голографии для этой цели изменяют форму носителя голографической линзы^{/4-6/}, вводят рефракционно-дифракционные элементы^{/16/}, а также оптимизируют параметры вынесенного зрачка в системе с голографической линзой на сферическом носителе^{/8/}. Оптимальную форму носителя голограмм в самом общем случае задает теорема Уэльфорда^{/5,15/}.

Проблема подавления aberrаций типа комы возникает также и в мезооптике. Так, например, в мезооптическом фурье-микроскопе /МФМ/ для ядерной фотоэмульсии, характеристики которого описаны в^{/9/}, aberrации типа меридиональной комы ограничивают диаметр поля зрения МФМ^{/11/}. В данной работе обсуждается проблема подавления aberrаций типа комы в оптике, голографии и мезооптике. После краткого введения в теорию aberrаций типа комы в оптике излагается теорема Уэльфорда, как обобщение условия синусов Аббе на голографию, а также описывается характерный пример использования теоремы Аббе - Уэльфорда при создании безабберационного голографического объектива с большой числовой апертурой и большим полем зрения^{/10/}. Затем обсуждаются aberrации типа меридиональной комы в МФМ^{/11/} и формулируется проблема построения изопланатической системы в мезооптике. Описываются типичные мезооптические элементы^{/9,12-14/} и конструкции двух изопланатических мезооптических изображающих систем: мезооптический элемент с кольцевым откликом и мезооптический объектив-аксикон для трековых камер в физике частиц высоких энергий.

2. КОМА

На рис. 1 показан ход лучей в безабберационном объективе, образующем точечное изображение бесконечно удаленного точечного объекта, для случая, когда объект и его изображение лежат на оптической оси объектива. Главный и боковые лучи света пе-

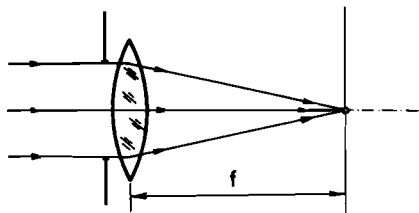
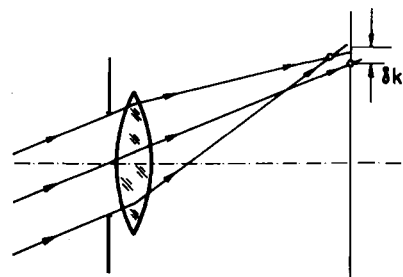


Рис.1. Схема образования изображения точечного объекта, расположенного на бесконечности, на оптической оси тонкой безабберационной линзы.

Рис.2. Ход лучей света, идущих от точечного объекта, не расположенного на оптической оси тонкой безабберационной линзы. Точка пересечения боковых лучей света в пространстве изображения не находится на главном луче света.



ресекаются в одной точке. Если направление на бесконечно удаленный объект не совпадает с оптической осью объектива, то главный луч не проходит через точку пересечения двух боковых лучей света. В результате этого изображение размывается. Отрезок δk на рис.2 является мерой меридиональной комы^{/7/}. Чтобы уменьшить величину комы, необходимо выполнить условие синусов Аббе^{/1,2,3,7/}, которое можно записать в виде

$$M = \frac{n \sin \alpha}{n' \sin \alpha'} , \quad /1/$$

где M - линейное увеличение изображающей системы, n и n' - показатели преломления света в предметном пространстве и в пространстве изображений, α и α' - передний и задний апертурные углы. Если предмет находится на бесконечности, то условие синусов Аббе принимает вид

$$h = f' \sin \alpha' , \quad /2/$$

где h - прицельный параметр коаксиальных лучей света на входной преломляющей поверхности, а f' - заднее фокусное расстояние объектива. Закон синусов Аббе должен быть выполнен с тем большей точностью, чем больше числовая апертура объектива. Существует несколько методов выполнения условий синусов Аббе в оптике^{/3,7/}.

3. АБЕРРАЦИИ В ГОЛОГРАФИИ

Аберрации в голографии возникают из-за того, что длина волны света на стадии записи голограммы отличается от длины волны света на стадии восстановления волнового фронта, а также из-за того, что положение источника света на стадии восстановления не совпадает с положением источника света, создающего опорную волну света на стадии получения голограммы. В^{/6/} было показано, что для случая плоской голограммы существует единственное взаимное расположение опорной и предметной волн света, при котором аберрации типа комы становятся минимальными. Для этого достаточно, чтобы точечный объект и точка, в которой сходится опорный пучок света, были зеркальными отражениями друг друга относительно плоской голограммы /рис.3/. Во всех других конфигурациях величина аберраций становится недопустимо большой. В^{/6/} также показано, что для подавления аберраций типа комы при произвольном расположении источников опорной и предметной волн света относительно голограммы необходимо, чтобы носителем голограммы была сферическая поверхность, при этом радиус кривизны носителя голограммы R задается уравнением /теорема Уэльфорда/:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} , \quad /3/$$

где l_1 и l_2 - расстояния от источника опорного пучка до голограммы и от голограммы до источника предметного пучка света соответственно, причем знаки l_1 и l_2 выбираются в соответствии с известным правилом в оптике /рис.4/. Если $l_2 \rightarrow \infty$, то

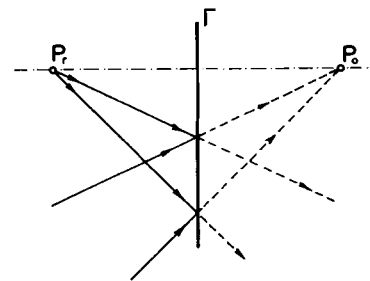
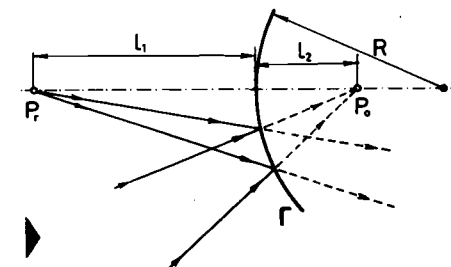


Рис.3. Апланатическая конфигурация предметного и опорного пучков света, образующих голограмму на плоском носителе.

Рис.4. Апланатический сферический носитель голограммы для произвольного расположения предметного и опорного пучков света относительно голограммы.



то $R \rightarrow l_1$, и радиус кривизны носителя голограммы равен расстоянию от голограммы до источника опорного пучка света. Если $l_1 = -l_2$, то $R = \infty$, и, следовательно, носитель голограммы должен быть плоским. Наконец, если $l_2 \gg l_1$, то $R \approx l_1$. Анализ aberrации в голографической линзе на сферическом носителе с вынесенным зрачком приведен в [8].

4. БЕЗАБЕРРАЦИОННЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТИВ

В [10] описана конструкция безабберационного голографического объектива с большой числовой апертурой. На рис.5 показана стадия восстановления для плоской голографической линзы. Видно, что здесь имеет место соотношение

$$h = f' \operatorname{tg} \alpha', \quad /4/$$

которое показывает, что условие синусов Аббе [2] не соблюдается. Чтобы получить безабберационный голографический объектив, необходимо носитель голограммы сделать сферическим [рис.6].

$$h = f' \sin \alpha', \quad /5/$$

т.е. имеет место условие синусов Аббе.

На рис.7 схематично показано изменение величины aberrаций при переходе от плоской голограммы [сплошная кривая] к голограмме на сферическом носителе [пунктирная кривая] для голографического объектива с числовой апертурой $A = 0,5$. Видно,

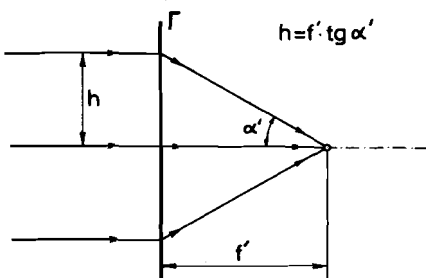


Рис.5. Ход лучей света в голографическом объективе на плоском носителе на стадии восстановления.

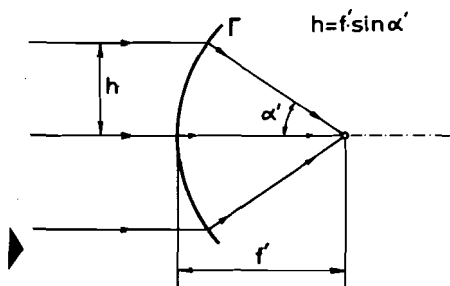


Рис.6. Безабберационный голографический объектив на сферической подложке.

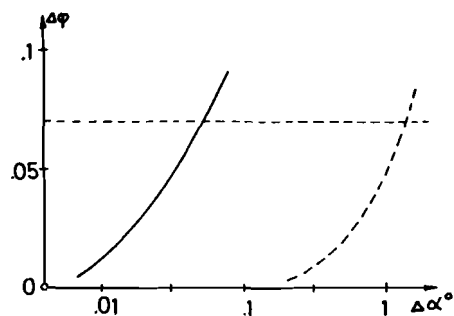


Рис.7. Зависимость величины aberrации от угла между главным лучом света и оптической осью объектива для голограммы на плоской подложке [сплошная кривая] и для голограммы на сферической подложке [пунктир] с числовой апертурой $A = 0,5$.

что поле зрения голографического объектива увеличивается с $0,05^\circ$ до 1° , т.е. в 20 раз.

5. АБЕРРАЦИИ В МЕЗООПТИКЕ

На рис.8 показан ход лучей света в меридиональном сечении мезооптического фурье-микроскопа [МФМ] для ядерной фотоэмульсии [9,11]. Сходящийся пучок 2 освещает прямой след частицы 3, находящийся в предметном пространстве 1 и ориентированный перпендикулярно плоскости чертежа.

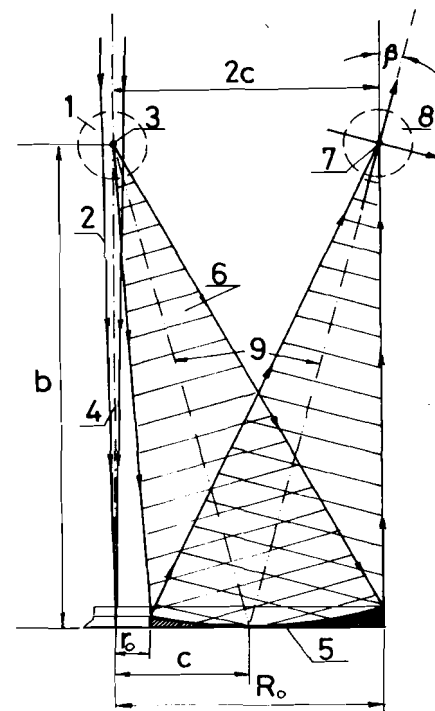


Рис.8. Ход лучей света в мезооптическом фурье-микроскопе [МФМ] в меридиональном сечении: 1 - предметное пространство, 2 - сходящийся пучок света, 3 - прямой след частицы, 4 - оптическая ось МФМ, 5 - мезооптическое зеркало с кольцевым откликом, 6 - дифрагированные лучи света, 7 - мезооптическое изображение прямого следа частицы, 8 - пространство изображений, 9 - побочная оптическая ось МФМ, β - угол между оптической осью МФМ и его побочной оптической осью.

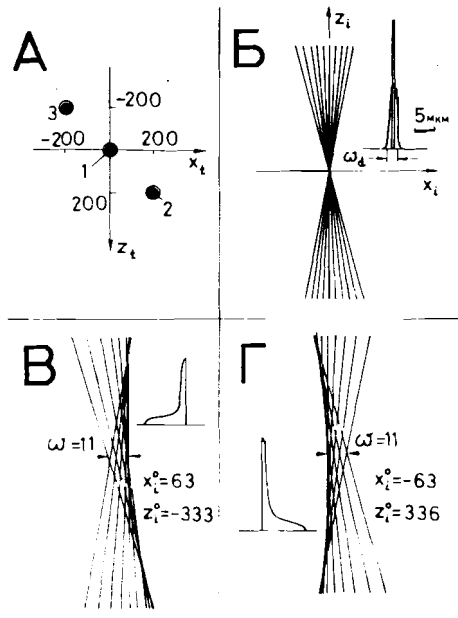


Рис.9. Ход лучей света, образующих одно из двух мезооптических изображений прямого следа частицы в МФМ, для трех положений прямого следа частицы относительно первого фокуса образующей мезооптического зеркала с кольцевым откликом: на А показаны три положения следа частицы, на Б - ход лучей света в области формирования мезооптического изображения для положения 1, В - для положения 2 и Г - для положения 3.

ном плоскости чертежа, составляет в реальной конструкции МФМ около $100 \text{ мкм}^2/9$. Одно из двух мезооптических изображений прямого следа частицы 3 формируется в точке 7

в пределах пространства изображений 8 и ориентировано перпендикулярно плоскости чертежа.

На рис.9 показаны лучи света в месте расположения мезооптического изображения прямого следа частицы для трех положений прямого следа частицы /рис.9А/: для следа частицы 1 /рис.9Б/, для следа частицы 2 /рис.9В/ и для следа частицы 3 /рис.9Г/. Видно, что в положениях прямого следа частицы 2 и 3 возникает каустика, характерная для меридиональной комы. В^{11/} было показано, что величина меридиональной комы не превышает 1 мкм, если следы частиц не выходят за пределы квадрата размером $0,4 \times 0,4 \text{ мм}$. Наличие в МФМ aberrаций типа меридиональной комы не позволяет уменьшить диаметр мезооптического зеркала с кольцевым откликом со 160 мм до 80 мм.

Ниже будет показано, что теорема Уэльфорда для кривизны носителя голограммы позволяет уменьшить указанные aberrации МФМ и тем самым уменьшить габаритные размеры мезооптического элемента с кольцевым откликом. Теорему Уэльфорда можно применить к МФМ потому, что aberrации в МФМ являются по своей природе меридиональной комой. В сагитальном сечении^{13/} МФМ представляет собой одномерную камеру обскура и не содержит никаких изображающих элементов. Поэтому, чтобы уменьшить aberrации в МФМ, достаточно изменить форму носителя мезооптической голо-

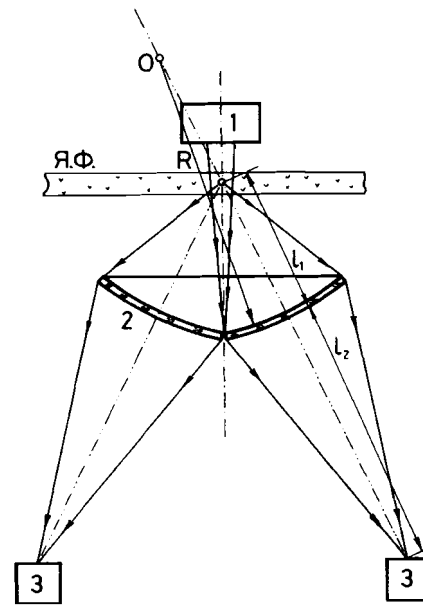


Рис.10. Апланатическая голограмма с кольцевым откликом в МФМ: 1 - источник сходящегося пучка света, 2 - апланатическая голограмма на неплоском носителе, 3 - система наблюдения мезооптических изображений прямого следа частицы, идущего перпендикулярно плоскости чертежа, ЯФ - ядерная фотоэмульсия, $R^{-1} = \ell_1^{-1} + \ell_2^{-1}$, где ℓ_1 и ℓ_2 берутся с учетом знака, 0 - точка в меридиональном сечении на побочной оптической оси МФМ, где находится центр окружности радиуса R.

граммы и сделать его таким, чтобы образующая в меридиональном сечении МФМ имела вид дуги окружности, радиус которой выбран из условия /3/, а центр окружности находился на побочной оптической оси МФМ /рис.10/. Отрезки ℓ_1 и ℓ_2 имеют тот же смысл, что и на рис.4.

Чтобы получить достаточно высокое геометрическое увеличение в меридиональном сечении МФМ, необходимо взять $\ell_2 \gg \ell_1$. В этом случае $R \approx \ell_1$, и поэтому центр окружности, являющейся образующей носителя мезооптической голограммы, практически совпадает с положением прямого следа частицы. На рис.11 показан поперечный разрез мезооптического элемента с кольцевым откликом в виде голограммы на сферическом носителе. Центр сферы находится в медианной плоскости ядерной фотоэмульсии. Aberrации типа меридиональной комы здесь сведены практически к минимуму, а габаритные размеры мезооптического элемента могут быть уменьшены до $35 \div 45 \text{ мм}$.

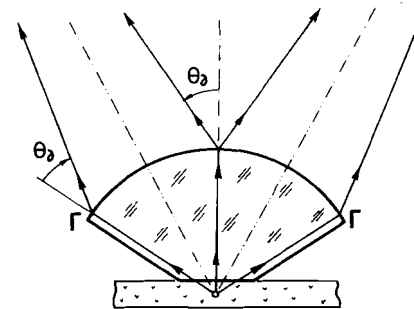


Рис.11. Схема мезооптического элемента с кольцевым откликом в виде голограммы на сферической подложке при $\ell_2 \gg \ell_1$.

6. БЕЗАБЕРРАЦИОННЫЙ ОБЪЕКТИВ-АКСИКОН

В [12] описан аксикон, изготовленный в виде киноформа на плоском носителе. Недостаток такого киноформа как мезооптического элемента с линейным откликом состоит в том, что он имеет очень малое рабочее поле зрения и его нельзя поэтому использовать в качестве объектива. Между тем подобный объектив весьма необходим для многих исследователей, в частности, для решения проблемы глубины резкости в физике частиц высоких энергий [14].

Чтобы уменьшить aberrации типа комы, необходимо изменять форму носителя киноформа с линейным откликом. Поясним принцип действия киноформа-аксикона на неплоском носителе. Для этого рассмотрим ход лучей в голографическом объективе на сферическом носителе (см. рис. 6). Видно, что вторичные лучи света, создаваемые такой голограммой, идут всегда перпендикулярно касательной к образующей носителя голограммы. Чтобы выполнить это условие в киноформе-аксиконе, достаточно в качестве носителя голограммы выбрать конусную поверхность, образующая которой перпендикулярна вторичным лучам света, создающим протянутое мезооптическое изображение точечного объекта на оптической оси аксикона (рис. 12). При этом входная поверхность носителя голограммы остается плоской. Лучи света, идущие от бесконечно удаленного точечного объекта, преломляются на второй поверхности раздела сред и отклоняются в сторону от оптической оси. Период кольцевой структуры голограммы-аксикона определяется из условия, чтобы лучи света, образующие первый порядок дифракции, были перпендикулярны образующей конического носителя безабберационного объектива-аксикона, как это показано на рис. 12.

На рис. 13 дана схема безабберационного объектива-аксикона, в который входит также оптический коллиматор, а также показано взаимное расположение безабберационного объектива-аксикона,

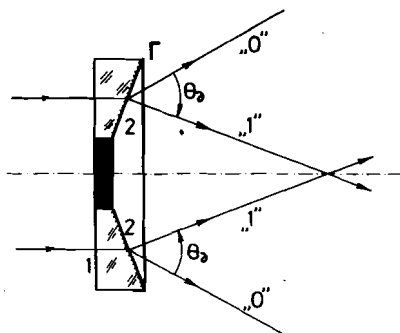


Рис. 12. Изопланатический объектив-аксикон: 1 - плоскоконусный носитель голограммы, 2 - кольцевая дифракционная решетка - голограмма на коническом носителе.

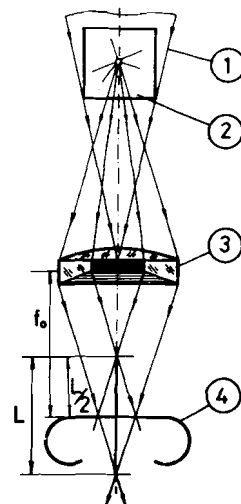


Рис. 13. Пример использования изопланатического объектива-аксикона с большой глубиной резкости и большим полем зрения в фоторегистраторе трековой камеры: 1 - сходящийся пучок света, 2 - рабочий объем трековой камеры, 3 - объектив-аксикон, 4 - фотопленка, f_0 - среднее фокусное расстояние системы, L - требуемая глубина резкости.

и фотопленки 4. Глубина фокуса объектива-аксикона L не зависит от дифракции света [13] и задается глубиной рабочего объема трековой камеры 2.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что применение теоремы Аббе - Уэльфорда к мезооптическим элементам позволяет уменьшить aberrации типа меридиональной комы, увеличить поле зрения мезооптической системы или уменьшить габаритные размеры мезооптических элементов при заданных размерах поля зрения системы или рабочего объема трековой камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lummer O., Reiche F. - Die Lehre von der Bildentstehung in Microscop von Ernst Abbe. Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn, 1910.
2. Ghatak A.K., Thyagarajan K. - Contemporary Optics. Plenum Press, New York and London, 1978.
3. Conrady A.E. - Applied Optics and Optical Design. Part I. Oxford University Press, 1929.
4. Welford W.T. - Optics Commun., 1971, v.3, p.1-6.
5. Welford W.T. - Optics Commun., 1975, v.15, p.45-49.
6. Welford W.T. - Aplanatism and Isoplanatism. In: Progress in Optics, ed. E.Wolf, North-Holland, Amsterdam, 1976, v.XIII, p.267-292.
7. Чуриловский В.Н. - Теория оптических приборов. М.: Машиностроение, 1966, с.116, 484.

8. Мустафин К.С., Саттаров Ф.А. - Оптика и спектроскопия, 1979, т.47, вып.6, с.1204.
9. Astakhov A.Ya. et al. - Preprint of JINR, E13-88-892, Dubna, 1988.
10. Tatsuno K., Kataoka K., Yonezawa S. - U.S.Patent, No. 4.688.880. Int.C1⁴ G02B 5/32, Aug. 25, 1987.
11. Бенце Д., Сороко Л.М. - Сообщение ОИЯИ, P13-86-659, Дубна, 1986.
12. Koronkevich V.P. et al. - Optik, 1984, v.67, p.257.
13. Soroko L.M. - Axicons and Mesooptical Imaging Devices. In: Progress in Optics, ed.E.Wolf, North-Holland, Amsterdam, 1989, v.27, p.109-160.
14. Сороко Л.М. - ЭЧАЯ, 1989, т.20, вып.1, с.155-197.
15. Welford W.T. - Journ. Photogr.Science, 1975, v.23, No.2, p.84-87.
16. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. - Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986.

Сороко Л.М.

D13-89-549

Изопланатические системы в мезооптике

Обсуждается проблема подавления аберрации типа комы в оптике, голографии и мезооптике. Дается краткий обзор условия синусов Аббе в голографии. Затем формулируется проблема построения изопланатических систем в мезооптике. Ее решение дается в виде обобщенного условия синусов Аббе и условия Уэльфорда на форму носителя голограммы. Приводятся конструкции изопланатических мезооптических систем: мезооптического фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии и мезооптического объектива для трековых камер в физике высоких энергий.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод авторов

Soroko L.M.

D13-89-549

Isoplanatic Systems in Mesooptics

The problem of the coma aberration suppression in optics, holography and mesooptics is discussed. A short review of the Abbe sine condition in the holography is given. Then the problem of the isoplanatic system construction in mesooptics is formulated. Its solution in the form of the generalised Abbe sine condition and the Welford theorem concerning the form of the hologram backing is presented. The design of two isoplanatic mesooptical systems: the Mesooptical Fourier-Transform Microscope for nuclear research emulsion and the Mesooptical Axicon Objective for track chambers in the high energy physics are described.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 1989 года.