

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P13-86-659

Д. Бенце, Л. М. Сороко

**ГЕОМЕТРО-ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МЕЗООПТИЧЕСКОГО ФУРЬЕ-МИКРОСКОПА
В МЕРИДИОНАЛЬНОМ СЕЧЕНИИ**

1986

1. ВВЕДЕНИЕ

Мезооптический фурье-микроскоп (МФМ) предназначен для быстрого обнаружения прямых следов частиц, ядерных взаимодействий и актов распада короткоживущих элементарных частиц в ядерной фотоэмульсии. Принцип действия МФМ изложен в^{1/}. Основным элементом МФМ является мезооптическое зеркало, которое формирует мезооптические сигналы прямого следа частицы в ядерной фотоэмульсии, при этом положение указанных сигналов относительно фокальной окружности однозначно связано с ориентацией и положением прямого следа частицы в пространстве. Понятие "мезооптика" и сущность мезооптических систем объяснены в^{2/}. В^{3,4/} исследованы метрические характеристики МФМ в меридиональном сечении. Мезооптические сигналы от реальных следов частиц в ядерной фотоэмульсии были впервые зарегистрированы авторами^{4,5/}. В работах^{6,7/} были исследованы изображающие свойства МФМ для ядерной фотоэмульсии и дан теоретический анализ основных параметров МФМ, а в^{8,9/} построены алгоритмы поиска событий по сигналам на выходе МФМ. Первые полуавтоматические измерения прямых следов частиц в ядерной фотоэмульсии при помощи МФМ описаны в^{10/}.

После того как было доказано экспериментально^{11/}, что разрешение по радиальной координате в МФМ составляет 1,5 мкм и обусловлено дифракцией света на конечной апертуре мезооптического зеркала МФМ, возникла проблема более тщательного анализа структуры мезооптических сигналов на выходе МФМ. Необходимо было оценить геометро-оптические aberrации оптических и мезооптических элементов МФМ, самого слоя ядерной фотоэмульсии, оптических иммерсионных подложки и конденсоров. Надо было точно определить геометрическое место мезооптических изображений, геометро-оптическое размытие мезооптических сигналов, а также оценить максимально допустимый диаметр поля зрения при заданных значениях толщины слоя ядерной фотоэмульсии, диаметра и числовой апертуры мезооптического зеркала МФМ.

Чтобы получить ответы на перечисленные вопросы, были исследованы геометро-оптические характеристики МФМ. В работе дан анализ геометро-оптических aberrаций в меридиональном сечении для ядерной фотоэмульсии без оптической подложки, со сферической иммерсионной подложкой, с плоской иммерсионной подложкой, а также с иммерсионным конденсором. Последний имеет вид сферической иммерсионной подложки с вынесенным центром сферы. Най-

дено распределение интенсивности света в области мезооптических изображений прямых следов частиц в ядерной фотоэмульсии. Показано, что наличие геометрических aberrаций в меридиональном сечении не позволяет уменьшить диаметр мезооптического зеркала МФМ при данной его оптической конструкции ниже 150-200 мм и что при компьютерном анализе мезооптических сигналов на выходе МФМ необходимо учитывать эффекты, связанные с геометро-оптическими характеристиками МФМ. Анализ лучей света в сагитальном сечении, которые определяют угловое разрешение МФМ, в данной работе не проводится.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Принципиальная схема МФМ с использованием мезооптического зеркала была приведена на рис. 2 в работе^{4/}. На рис. 1 показано меридиональное (радиальное) сечение МФМ и мезооптического зеркала справа от оптической оси. Слой ядерной фотоэмульсии, находящийся в предметном пространстве 1, просвечивают сходящимся пучком света от лазера 2. Если прямой след частицы 3, идущий перпендикулярно плоскости чертежа, находится на оптической оси МФМ 4 и в центре предметного пространства 1 и совпадает с первым фокусом эллипса, являющегося образующей мезооптического зеркала 5, то дифрагированные лучи света 6 фокусируются в точку 7 пространства изображений 8, которая совпадает со вторым фокусом указанного эллипса. Образующаяся таким образом одно мезооптическое изображение прямого следа частицы имеет вид короткой дуги фокальной окружности. Второе мезооптическое изображение того же прямого следа частицы лежит слева

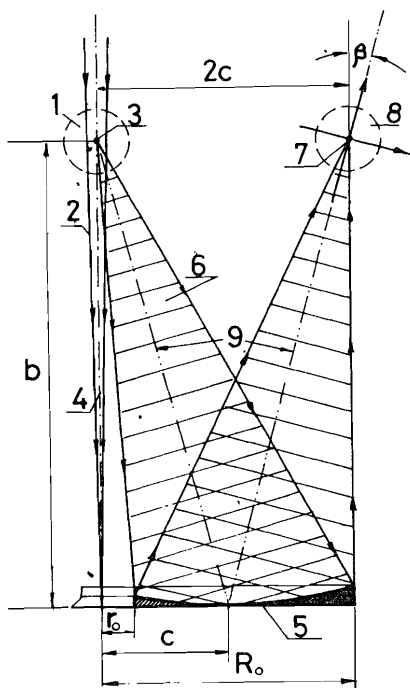
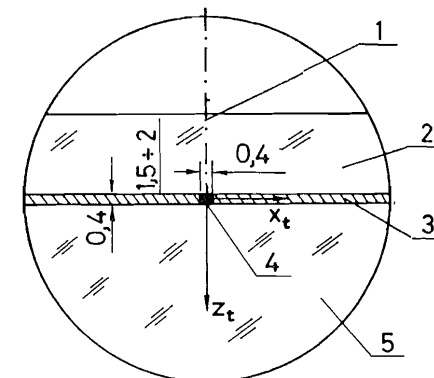


Рис. 1. Поперечный разрез МФМ в меридиональном сечении справа от оптической оси: 1 - предметное пространство, 2 - сходящийся пучок света, 3 - прямой след частицы, 4 - оптическая ось МФМ, 5 - мезооптическое зеркало, 6 - дифрагированные лучи света, 7 - мезооптическое изображение прямого следа частицы, 8 - пространство изображений, 9 - ось мезооптической системы, формирующей мезооптическое изображение прямого следа частицы.

Рис. 2. Предметное пространство МФМ: 1 - оптическая ось МФМ, 2 - стеклянная подложка, 3 - слой ядерной фотоэмульсии, 4 - поле зрения, освещенное сходящимся пучком света, 5 - иммерсионная подложка.



от оптической оси МФМ. На рис. 1 показаны ось мезооптической системы 9, вдоль которой формируется мезооптическое изображение 7 прямого следа частицы 3, система координат x_t, z_t в предметном пространстве и система

координат x_1, z_1 в пространстве изображений. Геометрические параметры мезооптического зеркала с образующей в виде эллипса равны: $b = 150$ мм, $c = 40$ мм, $r_0 = 10$ мм, $R_0 = 80$ мм, $\beta = 14,93^\circ$.

На рис. 2 показано предметное пространство 1 из рис. 1. Здесь 1 - оптическая ось МФМ, 2 - стеклянная подложка ядерной фотоэмульсии, 3 - слой ядерной фотоэмульсии, 4 - поле зрения, освещаемое сходящимся пучком света, 5 - оптическая подложка, находящаяся в иммерсионном контакте со слоем ядерной фотоэмульсии 3 и обращенная в сторону мезооптического зеркала. Оси x_t и z_t образуют систему координат в предметном пространстве. Оптическая подложка 5 необходима для того, чтобы убрать нежелательное рассеяние света на матовой поверхности слоя ядерной фотоэмульсии, а также полное внутреннее отражение дифрагированного света.

Идеальное отображение получается в том случае, если прямой след частицы, имеющий поперечные размеры менее 1 мкм, находится в первом фокусе эллипса и дает мезооптическое изображение во втором фокусе эллипса с координатами $x_t = z_t = 0$, а показатели преломления света всех оптических компонент одинаковы. В этих условиях лучи дифрагированного света образуют гомоцентрический пучок с фокусом в точке $x_1 = z_1 = 0$. Если же прямой след частицы находится в точке с координатами $x_t \neq 0, z_t \neq 0$, то лучи света, дифрагированные на прямом следе частицы под действием рефракции теряют свойство гомоцентричности. Возникает эффект каустики, в результате чего размер мезооптического изображения прямого следа частицы в меридиональном сечении становится конечным. Указанный эффект показан на рис.3 для случая, когда показатели преломления света для всех оптических элементов одинаковы. На рис.3а имеются три прямых следа частицы, идущих перпендикулярно плоскости чертежа и находящихся в точках с координатами:

$x_t^{(1)} = z_t^{(1)} = 0, x_t^{(2)} = -0,2$ мм, $z_t^{(2)} = -0,2$ мм и $x_t^{(3)} = 0,2$ мм, $z_t^{(3)} = 0,2$ мм. На рис. 3б, в, г приведены ход лучей света

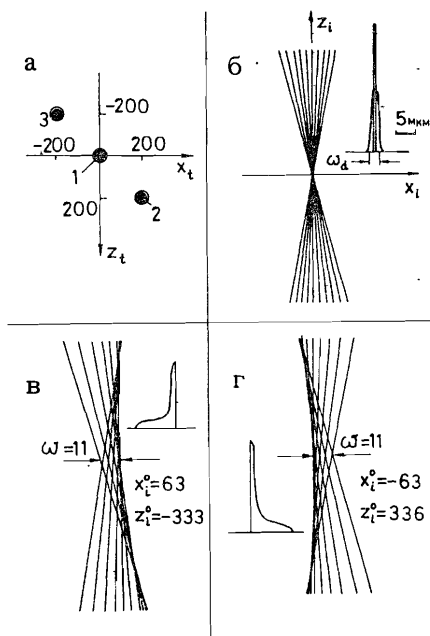


Рис. 3. Эффект каустики для трех положений прямого следа частицы: 1, 2 и 3, а также картины распределения интенсивности света внутри области каустики. Значения координат x_t и z_t , а также полные ширины области каустики приведены в мкм.

в области каустики, а также распределение интенсивности света в пределах каустики. На рис. 3б дано также распределение интенсивности света от дифракции на половине мезооптического зеркала. Ширина на полувысоте дифракционного размытия равна

$$w_d = \lambda \frac{b}{R_0 - r_0} \approx 1,3 \text{ мкм. (1)}$$

Для исследования геометро-оптических характеристик МФМ в меридиональном сечении были проведены расчеты на ЭВМ с использованием геометро-оптического метода построения лучей света. Конечная цель этих расчетов состояла в том, чтобы найти истинное положение центра мезооптического изображения прямого следа частицы и размеры этого изображения в различных условиях.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

А. Отображающие свойства мезооптического зеркала. Если показатели преломления слоя ядерной фотоэмульсии, оптической подложки и внешней среды одинаковы, то можно применить модель, в которой след частицы "висит" в воздухе. В этом случае все aberrации связаны с мезооптическим зеркалом, которое захватывает углы дифракции вплоть до $\approx 25^\circ$. Результаты расчетов для этих условий приведены на рис. 4. Были выбраны 25 различных положений прямого следа частицы, которые заполняют квадрат размером 2 x 2 мм. Обведенный пунктирной линией малый квадрат $abcd$ на рис. 4а имеет размеры 0,4 x 0,4 мм и соответствует "рабочему" полю зрения. На рис. 4б показаны положение центров соответствующих 25 мезооптических изображений и малый квадрат $a'b'c'd'$. На рис. 4а приведено семейство изолиний равной ширины, на которых ширина мезо-

Рис. 4. Трансформация 25 прямых следов частиц из предметного пространства (а) в пространство изображений (б) для случая $n = 1$.

оптического изображения имеет размеры, указанные вблизи каждой изолинии в микрометрах. Так, например, ширина мезооптического изображения прямого следа частицы в положении №19 с координатами $x_t = +0,5$ мм, $z_t = +0,5$ мм, дающего мезооптическое изображение в точке с координатами $x_i = -0,371$ мм, $z_i = 0,773$ мм, равна 28 мкм.

Результаты проведенных расчетов позволяют ответить на вопрос, как отображаются прямые следы частиц, которые в плоскости рис. 4а лежат на одной прямой, например, следы 1-7-13-19-25. Было установлено, что на краях большого квадрата размером 2 x 2 мм отклонение от прямой в пространстве изображений составляет 50 мкм, а на краях малого квадрата $abcd$ размером 0,4 x 0,4 мм величина отклонения равна всего 2-3 мкм, т.е. меньше ширины изображения соответствующих прямых следов частиц.

Б. Сферическая иммерсионная подложка. Чтобы уменьшить aberrации, обусловленные преломлением лучей света при выходе из слоя ядерной фотоэмульсии, вводят иммерсионную стеклянную подложку в виде сферы, центр которой совпадает с центром предметного пространства (рис.5). Результаты расчетов, которые были выполнены для сферы радиуса $r_s = 15$ мм с показателем преломления $n = 1,515$, приведены на рис.6. Они аналогичны резуль-

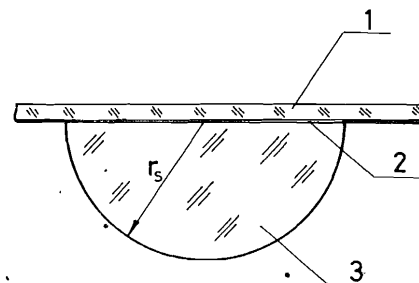
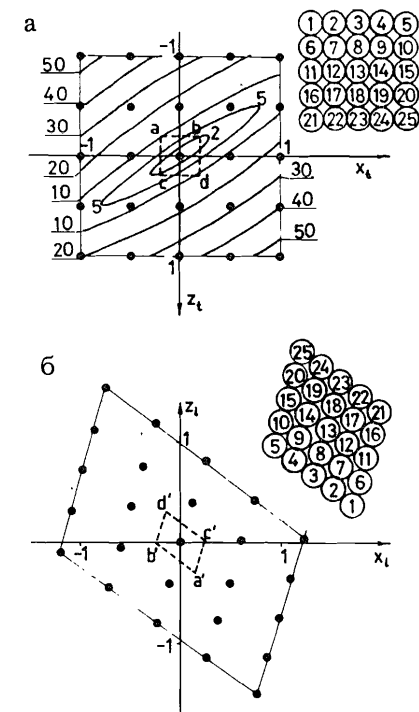


Рис. 5. Схема конструкции сферической иммерсионной подложки: 1 - стеклянная подложка, 2 - слой ядерной фотоэмульсии, 3 - сферическая иммерсионная подложка радиусом $r_s = 15$ мм.



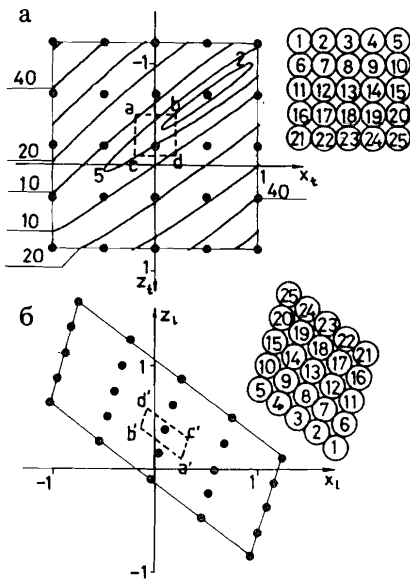


Рис. 6. Трансформация 25 прямых следов частиц из предметного пространства (а) в пространство изображений (б) для сферической иммерсионной подложки.

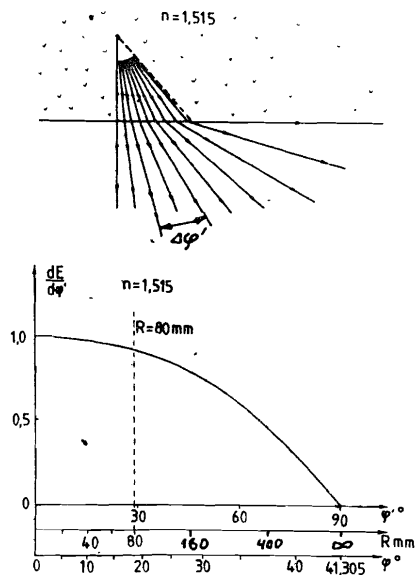


Рис. 8. Ход лучей света в плоской иммерсионной подложке (а) и распределение интенсивности света по углу ϕ (б).

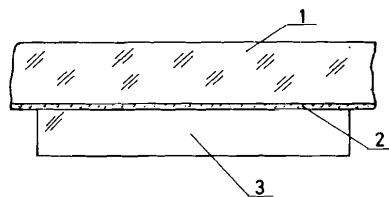


Рис. 7. Схема конструкции плоской иммерсионной подложки: 1 - стеклянная подложка, 2 - слой ядерной фотоэмульсии, 3 - плоская иммерсионная подложка толщиной 1,8 мм.

результатам, представленным на рис.4, но отличаются масштабом предметного пространства, который изменился в n раз. Поэтому расстояние от центра мезооптического изображения до точки с координатами $x_i = z_i = 0$, а также ширина этого изображения возросли в $\approx 1,5$ раза. Как и в случае А, максимальный угол дифракции составляет $\approx 25^\circ$.

В. *Плоская иммерсионная подложка.* Плоскую иммерсионную подложку (рис.7) применяют для того, чтобы устранить эффект неровности наружной поверхности слоя ядерной фотоэмульсии. Однако при этом возникают нежелательные эффекты. Под действием преломления света на наружной плоскости иммерсионной подложки интенсивность света E спадает к периферии мезооптического зеркала (рис. 8):

$$\frac{dE}{d\phi} = \text{const} \frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \phi}}{\cos \phi} = \text{const} \frac{\cos \phi'}{\sqrt{1 - \sin^2 \phi' / n^2}}, \quad (2)$$

где ϕ - угол дифракции, а ϕ' - угол выхода луча света из плоской подложки, равный $\phi' = \text{arc sin}(n \sin \phi)$. Если ввести расстояние x от оптической оси до рассматриваемой точки на мезооптическом зеркале так, что $x = b \text{tg } \phi'$, то

$$\frac{dE}{dx} = \text{const} (1 + x^2/b^2)^{-1} [1 + (1 - 1/n^2) x^2/b^2]^{-1/2}. \quad (3)$$

Кривая, описывающая соотношение (3), приведена на рис.8б. Соответствующий угол дифракции, захватываемый мезооптическим зеркалом, составляет всего $\approx 15^\circ$.

Если для сферической иммерсионной подложки дифрагированные лучи света остаются гомоцентрическими, то для плоской иммерсионной подложки гомоцентричность теряется для любой точки предметного пространства. При этом мнимое изображение перестает быть точечным и смещается относительно истинного положения предмета. Результаты расчетов, выполненные для плоской иммерсионной подложки толщиной 1.8 мм, показаны на рис. 9. Видно, что отображение сопровождается минимальными искажениями для такого положения предмета, когда мнимое изображение предмета находится вблизи фокуса эллипса, а изолинии равной ширины мезооптического изображения сдвинуты относительно положения для случая $n = 1$ (рис.4). Это свойство, которое вызвано противоположными по знаку аберрациями оптической подложки

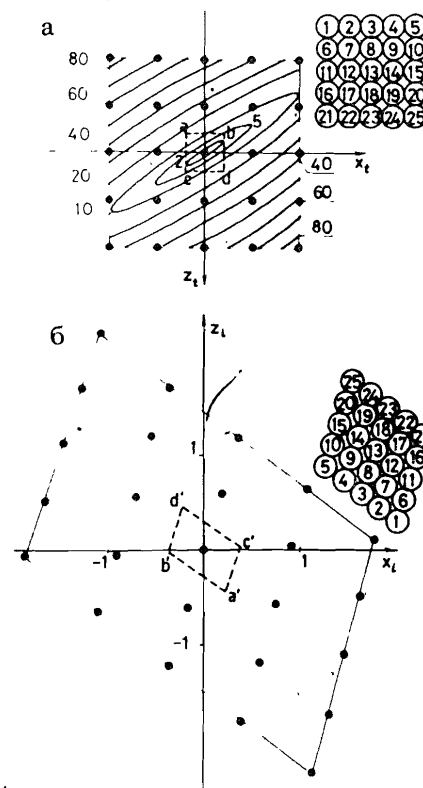


Рис. 9. Трансформация 25 прямых следов частиц из предметного пространства (а) в пространство изображений (б) для плоской иммерсионной подложки.

и мезооптического зеркала, необходимо учитывать при выборе оптимального положения рабочего участка, ограниченного малым квадратом $abcd$.

Г. Иммерсионный конденсор в виде сферы с вынесенным центром сферы. В^{12/} было показано, что если наружная поверхность иммерсионного конденсора имеет вид сферы радиуса R , центр которой расположен на оптической оси МФМ на расстоянии от точки с координатами $x_t = z_t = 0$, равном R/n , то в широком диапазоне углов дифрагированные лучи света на выходе из иммерсионного конденсора остаются практически гомоцентрическими, а эффективная числовая апертура МФМ увеличивается. Вид иммерсионного конденсора указанной конструкции и ход лучей в нем показаны на рис. 10. Угол дифракции, эффективно захватываемый мезооптическим зеркалом, равен 40° . Результаты расчетов, выполненных для $r_c = 15$ мм, $d_c = 10$ мм, $n = 1,515$, приведены на рис. 11. На рис. 11а показаны предметное пространство и изолинии равной ширины для полного мезооптического зеркала с $r_0 = 10$ мм и $R_0 = 80$ мм, а на рис. 11б - для мезооптического зеркала с уменьшенной апертурой с $r_0 = 10$ мм и $R'_0 = 55$ мм, когда угол дифракции совпадает с углом дифракции для сферической иммерсионной подложки ($\approx 25^\circ$).

Как и следовало ожидать, область оптимального отображения сильно смещена ($z_t = 13,4$ мм), и одновременно возросли aberrации. В заштрихованной области на рис. 11а и б они имеют недопустимо большую величину. Так же, как и в случае плоской оптической подложки, масштаб вдоль оси z_t уменьшился, и подобно случаю сферической иммерсионной подложки уменьшились масштабы вдоль осей x_t и z_t .

Д. Распределение интенсивности света в пределах каустики изображения прямого следа частицы. Так как мезооптическое изображение прямого следа частицы расположено в области каустики, то распределение интенсивности в нем не является ни равномерным, ни плавным, а содержит узкие пики и спады. На рис. 12,13 приведены распределения интенсивности света внутри мезооптических изображений в меридиональном сечении для пяти положений прямого следа частицы в пределах рабочего участка для случая $n = 1$ (рис. 12) и для плоской иммерсионной подложки (рис.13). Пунктиром на рис. 12 показано дифракционное размытие мезооптического изображения для точки с $x_t = z_t = 0$. Видно, что внутри области каустики наблюдаются как одиночные, так и сдвоенные пики на фоне плавного распределения интенсивности света, при этом для рабочего участка в виде квадрата размером $0,4 \times 0,4$ мм ширина пиков каустики соизмерима с шириной дифракционного размытия. После дискриминации фотоэлектрических сигналов на выходе МФМ по амплитуде указанные сигналы будут содержать одиночные пики шириной около

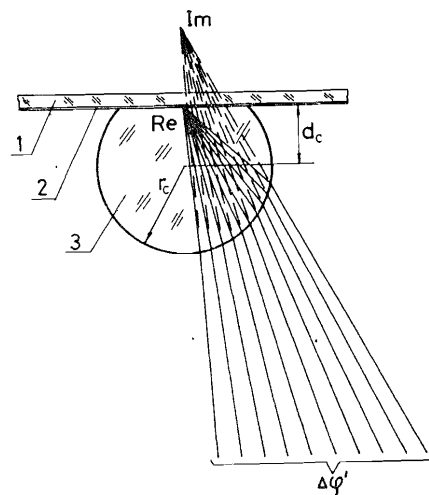


Рис. 10. Схема конструкции иммерсионного конденсора в виде сферы с вынесенным центром сферы и ход лучей света в нем: 1 - стеклянная подложка, 2 - слой ядерной фотоэмульсии, 3 - иммерсионный конденсор.

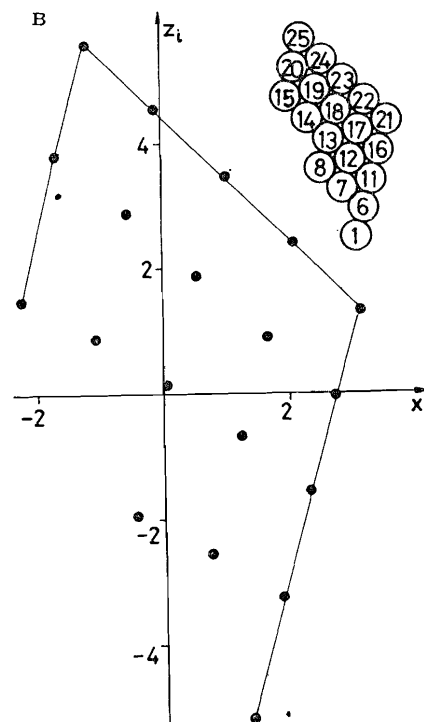
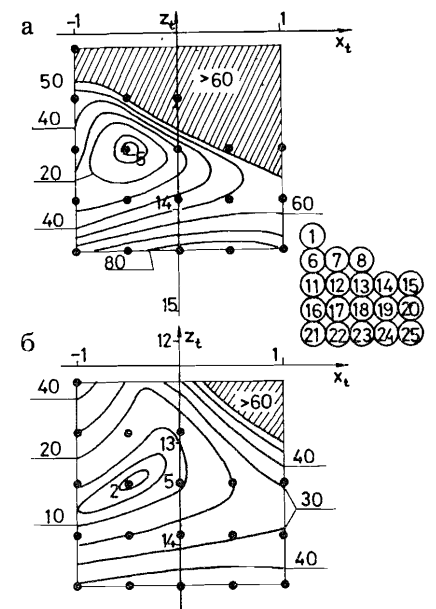


Рис. 11. Иллюстрация процесса трансформации 25 прямых следов частиц из предметного пространства в пространство изображений для иммерсионного конденсора. Показано предметное пространство для полного мезооптического зеркала с $R_0 = 80$ мм (а) и для мезооптического зеркала с уменьшенной апертурой с $R'_0 = 55$ мм (б). Пространство изображений дано на рис. 11в в указанном масштабе.

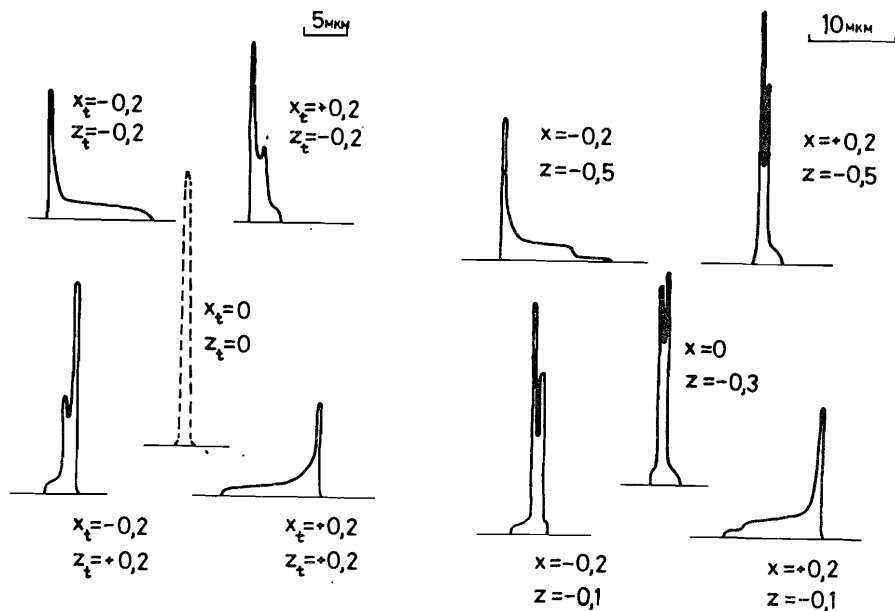


Рис. 12. Распределение интенсивности света внутри области каустики мезооптического изображения в меридиональном сечении для пяти положений прямых следов частиц на краях рабочей области в виде квадрата размером 0,4 x 0,4 мм для случая $n = 1$.

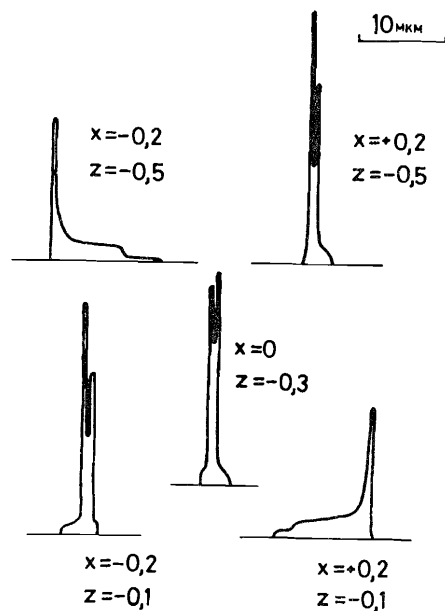


Рис. 13. То же, что и на рис. 12, но для плоской иммерсионной подложки.

1 мкм. На рис. 14 и 15 показаны распределения интенсивности света вблизи мезооптического изображения прямого следа частицы в ядерной фотоэмульсии, расположенного в центральной точке с координатами $x_t = z_t = 0$, для плоской иммерсионной подложки и для полного мезооптического зеркала. Глубина резкости в этих условиях составляет около 30 мкм.

Рис. 14. Распределение интенсивности света в области каустики мезооптических изображений прямого следа частицы в точке $x_t = z_t = 0$ при различных расстояниях от перетяжки каустики для плоской иммерсионной подложки. Плоскости 1+7 пересекают ось z_1 в точках: 1- $z_1^0 + 60$ мкм, 2- $z_1^0 + 30$ мкм, 3- $z_1^0 + 15$ мкм, 4- z_1^0 , 5- $z_1^0 - 15$ мкм, 6- $z_1^0 - 30$ мкм, 7- $z_1^0 - 60$ мкм.

Рис. 15. Ход лучей света в области каустики для трех масштабов мезооптических изображений прямого следа частицы в точке $x_t = z_t = 0$ для плоской иммерсионной подложки.

Возникает естественный вопрос, можно ли уменьшить размеры мезооптической системы МФМ. Проведенные в данной работе расчеты позволяют сделать вывод о том, что при геометрически подобном уменьшении размеров мезооптической системы размер рабочей области соответственно увеличится. Это приведет к возрастанию aberrации выше допустимого уровня и к уменьшению радиуса фокального кольца. Последнее приведет к ухудшению углового разрешения МФМ^{4/}.

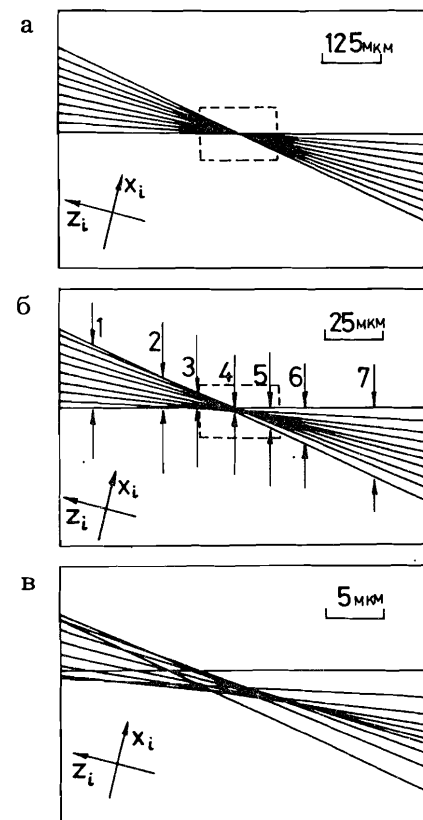
4. ВЫВОДЫ

Приведенные выше результаты расчетов геометро-оптических aberrаций в меридиальном сечении МФМ позволяют сделать следующие выводы:

1) МФМ с мезооптическим зеркалом диаметром 160 мм формирует мезооптические изображения прямых следов частиц в ядерной фотоэмульсии, расположенных внутри рабочего участка в меридиальном сечении в виде квадрата размером 0,4 x 0,4 мм, с каустическим размытием не более 1 мкм.

2) Наличие геометрических aberrаций в меридиальном сечении МФМ не позволяет уменьшить диаметр мезооптического зеркала, например, вдвое при неизменной апертуре и данной оптической конструкции, так как это приведет к увеличению указанных aberrаций в рабочем участке ядерной фотоэмульсии выше допустимого значения в 2-3 мкм.

3) При интерпретации и обработке мезооптических сигналов от прямых следов частиц в ядерной фотоэмульсии на выходе МФМ необходимо учитывать эффекты, которые связаны с геометро-оптическими aberrациями в МФМ и которые существенно зависят от конструкции оптических подложек и иммерсионного конденсора, расположенных вблизи слоя ядерной фотоэмульсии.



ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-83-119, Дубна, 1983.
2. Сороко Л.М. ОИЯИ, Д1-82-642, Дубна, 1982.
3. Астахов А.Я., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-83-120, Дубна, 1983.
4. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-84-277, Дубна, 1984.
5. Bencze Gy.L., Soroko L.M. JINR, E13-84-310, Dubna, 1984.
6. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-136, Дубна, 1985.
7. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-138, Дубна, 1985.
8. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-137, Дубна, 1985.
9. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-502, Дубна, 1985.
10. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-85-378, Дубна, 1985.
11. Бенце Д. и др. ОИЯИ, P13-86-630, Дубна, 1986.
12. Сороко Л.М. ОИЯИ, Б1-10-82-809, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 октября 1986 года

Бенце Д., Сороко Л.М.

P13-86-659

Геометро-оптические характеристики мезооптического фурье-микроскопа в меридиональном сечении

Дан анализ геометро-оптических характеристик мезооптического фурье-микроскопа (МФМ) для ядерной фотозмульсии. Анализ проведен в меридиональном сечении МФМ без оптической подложки, со сферической иммерсионной подложкой, с плоской иммерсионной подложкой, а также с иммерсионным конденсором. Найдено распределение интенсивности света в области мезооптических изображений прямых следов частиц в ядерной фотозмульсии. Показано, что наличие геометрических aberrаций в меридиональном сечении не позволяет уменьшить диаметр мезооптического зеркала МФМ при данной его оптической конструкции ниже 150-200 мм и что при обработке мезооптических сигналов, получаемых на выходе МФМ, необходимо учитывать эффекты, связанные с геометро-оптическими характеристиками МФМ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Bencze Gy.L., Soroko L.M.

P13-86-659

Geometro-Optical Performances of the Mesooptical Fourier-Transform Microscope in the Meridional Cross Section

An analysis of the geometro-optical performances of the Mesooptical Fourier-Transform Microscope (MFTM) for nuclear emulsion is given. The analysis of the meridional cross section of MFTM in the cases of no optical backing, spherical immersion backing, plane immersion backing and immersion condensor is carried out. The light intensity distribution in the region of the mesooptical images of a straight line particle track in nuclear emulsion is found. It has been shown that the geometrical aberrations in the meridional cross section of the MFTM does not permit to reduce the diameter of the mesooptical mirror below 150-200 mm in the case of the given optical construction, and that the effects induced by geometro-optical aberrations in the MFTM must be taken into consideration in processing of mesooptical signals formed at the output of the MFTM.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986