

0494

На правах рукописи

C-655

Сороко Лев Маркович

**МЕЗООПТИКА
И ПРЯМОЛИНЕЙНЫЕ ОБЪЕКТЫ
В МИКРОСКОПИИ**

Специальность 01.04.05 - Оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Самара- 2003

На правах рукописи

Сороко Лев Маркович

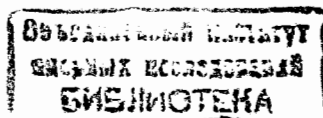


**МЕЗООПТИКА
И ПРЯМОЛИНЕЙНЫЕ ОБЪЕКТЫ
В МИКРОСКОПИИ**

Специальность 01.04.05 - Оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Самара-2003



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена
в Лаборатории ядерных проблем имени В.П. Джелепова
Объединенного Института Ядерных Исследований

Официальные оппоненты:

академик РАН Нестерихин Ю.Е.
доктор физико-математических наук, профессор Ивахник В.В.
доктор физико-математических наук, профессор Степанов С.А.

Ведущая организация:

Институт систем обработки изображений РАН

Защита состоится 4 апреля 2003г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева по адресу: 443086 Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан 14 февраля 2003г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета, профессор



В.Г. Шахов

АКТУАЛЬНОСТЬ. Проблема повышения эффективности научных исследований всегда была актуальной. Она становится особенно острой на стадии развития экспериментальной техники, когда параметры приборов приближаются к своим физико-техническим пределам, в результате чего процесс совершенствования экспериментальной техники замедляется, а себестоимость аппаратуры возрастает. В этих условиях упор приходится делать на поиск нетрадиционных подходов.

Толчком к проведению серии теоретических и экспериментальных исследований в области мезооптики (оптики конических волновых полей) в Лаборатории ядерных проблем имени В.П. Джелепова Объединенного Института Ядерных Исследований в Дубне, послужила проблема, возникшая при наблюдении прямолинейных следов заряженных частиц в блоке из слоев ядерной фотоэмульсии при проведении экспериментов на пучках нейтрино от ускорителей частиц. Объем блока равен 50-300 литров, а масса до 1 т. Число разрешения в таком блоке составляет $2 \cdot 10^{17}$. Внешние экспериментальные устройства, расположенные на участке длиной до 100 м, позволяют локализовать искомое событие из многих вторичных частиц с общей вершиной в пределах 2 ± 3 мм и тем самым сократить объем фотоэмульсии, подлежащий просмотру, до 2 см^3 или до $2 \cdot 10^{11}$ элементов разрешения.

ЦЕЛЬ ДИССЕРТАЦИИ состоит в том, чтобы теоретически и экспериментально доказать высокую эффективность нетрадиционного подхода к решению проблемы просмотра и обмера событий в ядерной фотоэмульсии, который основан на мезооптике. Необходимо было продемонстрировать, что именно мезооптика позволяет воспринимать отрезок прямолинейного следа частицы как единое целое, и что высокая степень сжатия информации о прямолинейном следе частицы до ДВУХ точечных сигналов является естественной характеристикой мезооптики.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЙ, представленных в диссертации состоит в том, что

а) автор впервые предложил и впервые изготовил мезооптическое зеркало с кольцевым откликом и с пространственным разрешением этого зеркала, которое определяется только процессом дифракции света;

б) автор впервые осуществил измерения прямолинейного объекта при помощи Мезооптического Фурье микроскопа (МФМ) без операции перефокусировки по глубине и без потери информации о z – координате и об угле погружения Θ_z этого объекта;

в) автор дал теоретическое описание интегральных преобразований амплитуды света, которые происходят в МФМ;

г) автор впервые использовал явление каустики света в конфокальном мезооптическом микроскопе для селективного наблюдения «вертикальных» следов частиц в ядерной фотоэмульсии;

д) автор впервые экспериментально исследовал явление продольной интерференции света в коаксиальных конических волновых полях;

е) автор впервые экспериментально показал, что одновременное наблюдение высоких порядков дифракции ($N \sim 30$) позволяет существенно ($\sim 50:1$) повысить точность метрологических измерений.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

1. Реализованы резервы существенного ($\sim 200:1$) повышения тех научных исследований, в ходе которых возникает необходимость наблюдать или измерять микроскопические прямолинейные объекты.
2. Невысокая себестоимость мезооптических элементов открывает дорогу для их применения в науке, на производстве, в микромеханике и в офтальмологии.
3. Предложенный автором самофокусирующийся ондулятор позволяет решить проблему отвода тепла в ограничивающей точечной диафрагме и тем самым снять ограничение на предельную интенсивность синхронного излучения на фотонных фабриках.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

а) только мезооптика позволяет воспринимать отрезок прямолинейного объекта как единое целое;

б) только мезооптика позволяет полностью убрать стадию разбиения изображения прямолинейного объекта на его составляющие элементы в процессе измерения;

в) только мезооптика реализует мгновенно операцию сжатия информации о прямолинейном объекте до ДВУХ точечных сигналов на выходе, минуя стадию вычислений;

г) только мезооптика позволяет построить простые алгоритмы нахождения положения недоступной вершины события со вторичными частицами;

д) впервые использовано явление каустики света при селективном наблюдении «вертикальных» следов частиц в конфокальном мезооптическом микроскопе; явление каустики света повышает скорость обмера и увеличивает отношение сигнала к шуму.

АПРОБАЦИЯ РАБОТ

Результаты исследований, изложенных в диссертации, обобщены в научной монографии L.M. Soroko, MESOOPTICS, Foundations and Applications, World Scientific, Singapore, 1996, в 5 научных обзорах, в 32 научных статьях, в 7 опубликованных авторских свидетельствах, а также доложены

На Рабочих совещаниях по нейтринному детектору, Дубна 1980 и 1981 г.г.

На Международной Конференции ЭРНСТ АББЕ, Йена, ГДР, 1989 г.
На Третьем Международном Симпозиуме по Современной Оптике, Будапешт, Венгрия, 13-16.09.1988 г.

На Рабочем совещании по фотоэмульсионной методике, Дубна, 24-25.04.1995 г.

На Рабочем совещании по фотоэмульсии, Дубна, 2-4.04.1996 г.

На Рабочем совещании по использованию фотоэмульсии в релятивистской ядерной физике, Дубна, 22-24.05.1998 г.

На 17-ом международном совещании по EMU-01 коллаборации и по использованию методики фотоэмульсии в экспериментах на пучках нуклотрона, Дубна, 18-20.05.1999 г.

На Рабочем совещании «Изучение структуры экзотических ядер в релятивистских пучках методом ядерной фотоэмульсии», Дубна, 16-18.05.2000 г.

На Рабочем совещании «Исследование взаимодействия релятивистских ядер на пучках нуклотрона методом фотоэмульсии», Дубна, 22-24.05.2001 г.

На 7-ом международном симпозиуме по лазерной метрологии, Новосибирск, 9-13.09.2002 г.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из Введения, 8 глав и Заключения, содержит 100 страниц машинописного текста, включая 82 иллюстрации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ. Во введении представлены актуальность исследований, цель диссертации, положения, выносимые на защиту, научная новизна исследований, практическая значимость работ, описанных в диссертации, а также апробация работ.

В главе 2 «ОБРАЗУЮЩАЯ ЛИНИЯ МЕЗООПТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА» показано, что при наблюдении прямолинейных объектов операцию сканирования по глубине в микроскопе можно полностью убрать, если использовать изображающую (мезооптическую) линзу, образующая линия которой имеет ИЗЛОМ. Курьезно отметить, что излом в образующей линии классической линзы считался ранее и считается сейчас нежелательным фактором, а соответствующая линза всегда шла в брак. Таким образом, в мезооптике используют изображающие линзы с нежелательным в классической оптике изломом в образующей линии линзы.

Первое мезооптическое устройство, которое воспринимало прямолинейный объект как единое целое и в котором не было процесса разбиения изображения исходного объекта на отдельные элементы, было изготовлено в 1986 г. в Лаборатории ядерных проблем имени В.П. Джелепова в виде мезооптического Фурье – микроскопа (МФМ), который содержал прецизионное мезооптическое зеркало с кольцевым откликом шириной 1.5 мкм. Сжатие

информации о прямолинейном объекте происходило на стадии освещения без какой-либо задержки во времени.

В главе 3 подробно описан МФМ (рис. 1).

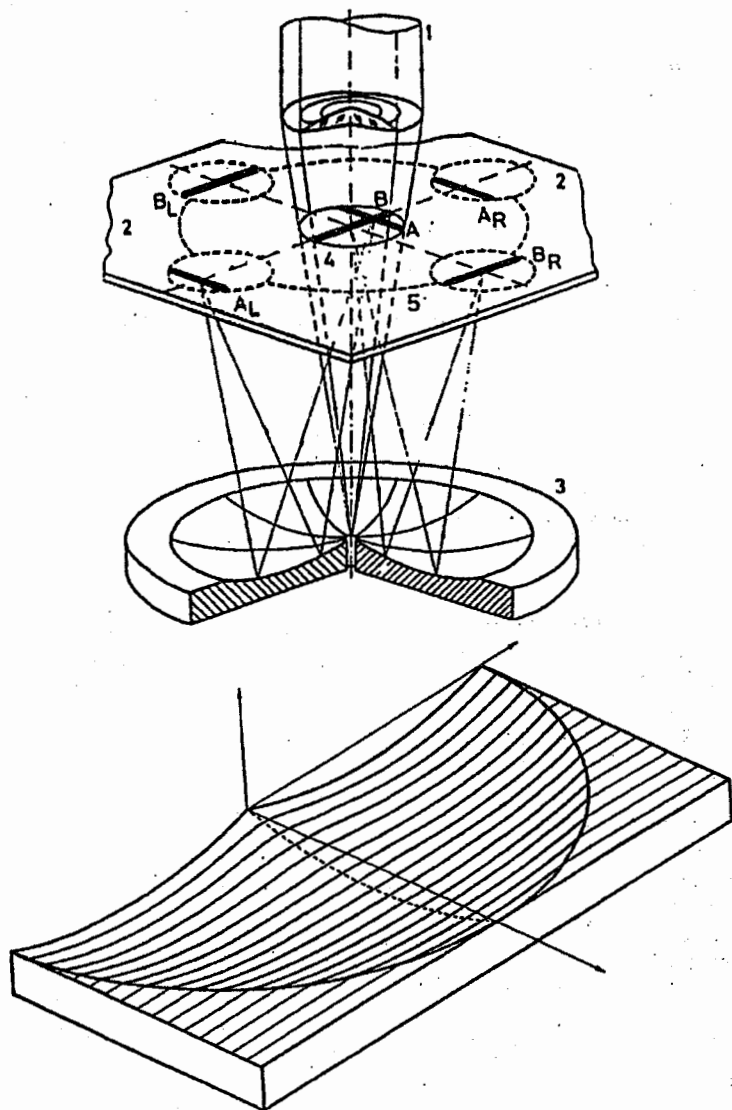


Рис. 1. Принципиальная схема Мезооптического Фурье – микроскопа.

Сходящийся пучок света, формируемый линзой 2, освещает «горизонтальные» прямолинейные объекты. Кроссовер сходящегося пучка света находится вблизи мезооптического зеркала с кольцевым откликом 3. Каждый прямолинейный объект формирует картину дифракции далекого поля в виде узкой светлой полоски на темном поле. Ширина этой полоски, проходящей через оптическую ось МФМ, равна диаметру кроссовера сходящегося пучка света (≈ 60 мкм).

Главная особенность МФМ состоит в том, что диаметр фокального кольца 5, которое образует мезооптическое зеркало с кольцевым откликом 3, определяется z – координатой центра тяжести прямолинейного объекта. На выходе МФМ формируется два мезооптических изображения: левое (L) и правое (R).

Дюралевое мезооптическое зеркало с кольцевым откликом внешним диаметром 160 мм было изготовлено на заводе «Красный пролетарий» в Москве. Ширина мезооптического кольца равнялась 1.5 мкм при дифракционном пределе 1.4 мкм.

Было показано теоретически и экспериментально, что сверточное ядро МФМ формируется в результате двух операций: пространственного преобразования Фурье и операции умножения на единичную ступенчатую функцию в плоскости пространственных частот. Поэтому объект в виде пропускающего кругового отверстия превращается МФМ в две концентрические окружности.

В МФМ с одноканальным фотоприемником, предназначенном для наблюдения взаимно параллельных прямолинейных объектов, сигналы имеют вид, показанный на рис. 2.

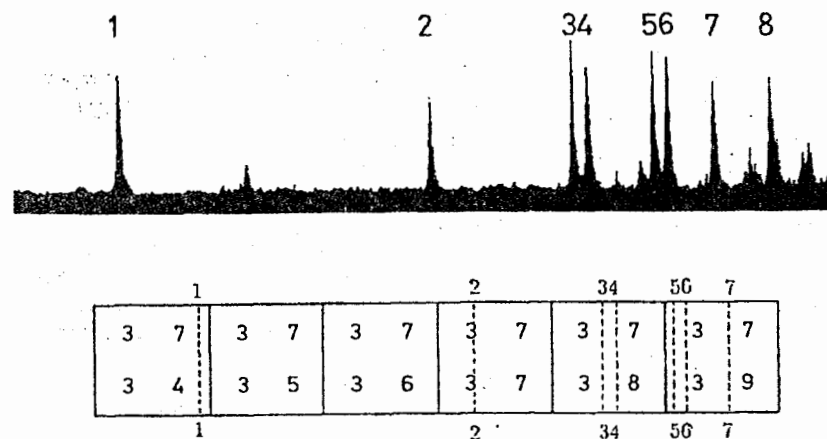


Рис. 2. Сигналы на выходе МФМ с одноканальным фотоприемником.

В МФМ с одной общей ПЗС – матрицей имеют место простые линейные соотношения между 4 параметрами прямолинейного объекта (x , y , Θ_{xy} , Θ_z) и (x , y) координатами двух мезооптических сигналов на выходном мониторе МФМ.

Было показано, что мезооптические сигналы следов частиц, имеющих общую вершину, лежат на СИНОГРАММЕ.

При помощи МФМ можно измерять радиус кривизны проекции света частицы на плоскость, перпендикулярную оси МФМ.

В МФМ наблюдается МЕЗООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ МУАРА: при поворотном перемещении конца прямолинейного следа частицы в поле зрения МФМ в направлении, перпендикулярном ориентации исходного прямолинейного следа частицы, мезооптическое изображение этого прямолинейного следа скользит вдоль мезооптического изображения, т.е. сдвигается перпендикулярно поворотному перемещению конца следа частицы в поле зрения МФМ. При этом величина скользящего перемещения мезооптического следа частицы в (R/D) раз больше истинного перемещения конца прямого следа частицы на краю поля зрения МФМ.

Мезооптический эффект муара позволяет построить эффективный алгоритм оценки малого угла рассеяния частицы в поле зрения МФМ по ее мезооптическому изображению этого события. При радиусе фокальной окружности $R=80$ мм и диаметре поля зрения МФМ $D=1$ мм, коэффициент увеличения линейного перемещения, вызванный мезооптическим эффектом муара, равен $k=R/D=80$.

Проведенные исследования этих и других свойств МФМ позволяют сделать вывод, что фундаментальное свойство МФМ мгновенно формировать ДВА мезооптических выходных сигнала должно найти со временем применение в микро – робототехнике и в микро – механике.

В главе 4 продолжено описание свойств МФМ. В частности, в сагитальном сечении МФМ работает как одномерная камера обскуры, с виртуальной пропускающей щелью, ориентированной каждый раз перпендикулярно исходному прямолинейному объекту. Это свойство МФМ позволяет выполнять на нем некоторые неprecизионные метрологические измерения.

Далее описан МФМ с двойной фокусировкой, который формирует на выходе точечные мезооптические сигналы, левый (L) и правый (R) прямолинейного следа частицы. Чтобы повысить отношение сигнала к шуму, сходящийся освещающий пучок света в МФМ выполнен АСТИГМАТИЧЕСКИМ (рис. 3): фокус в меридиональном сечении находится в медианной плоскости слоя ядерной фотоэмульсии, а фокус в сагитальном сечении находится в плоскости ПЗС – матрицы.

Далее рассматриваются кома абберации в МФМ, семейство таутохронных эллипсов, методы построения изопламатического мезооптического зеркала, а также проблема глубины фокуса в МФМ. Описаны конструкция МФМ с большой глубиной фокуса и новый стереоскопический микроскоп со стереоскопическим углом зрения $\sim 90^\circ$ (рис. 4).

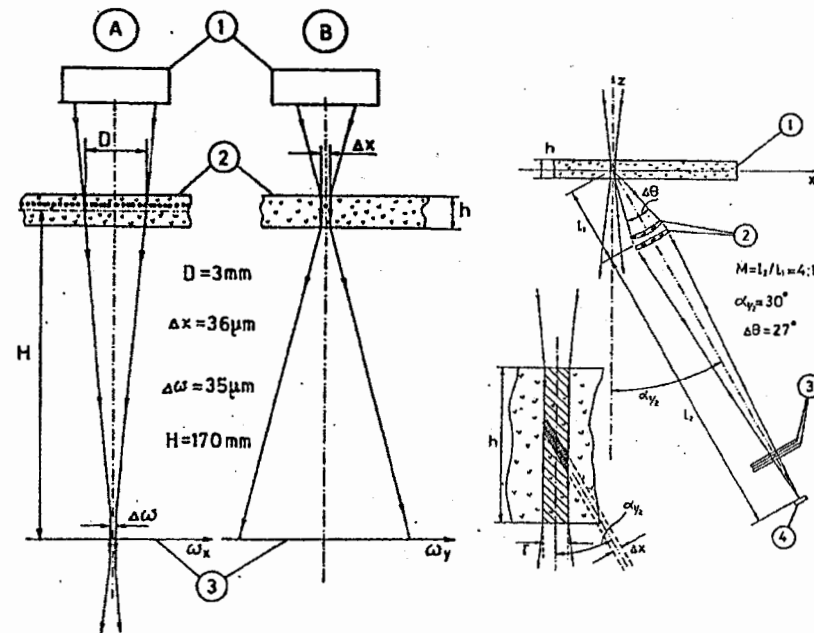


Рис. 3. Схема астигматического сходящегося освещающего света МФМ.

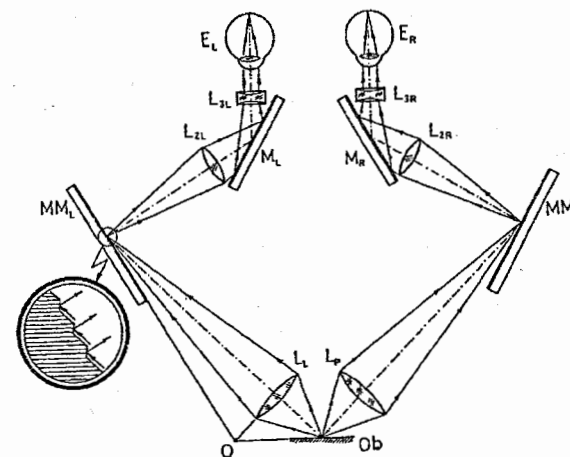


Рис. 4. Схема нового стереоскопического микроскопа со стереоскопическим углом $\sim 90^\circ$.

Глава 5 посвящена явлению КАУСТИКИ, методу наблюдения этого явления при помощи цилиндрической полулинзы (рис. 5), а также его применению в конфокальном каустическом мезооптическом микроскопе для селективного наблюдения «вертикальных» следов частиц. Показано, что скорость просмотра слоев ядерной фотоэмульсии в таком микроскопе в $3 \cdot 10^3$ раз выше, чем в традиционном микроскопе.

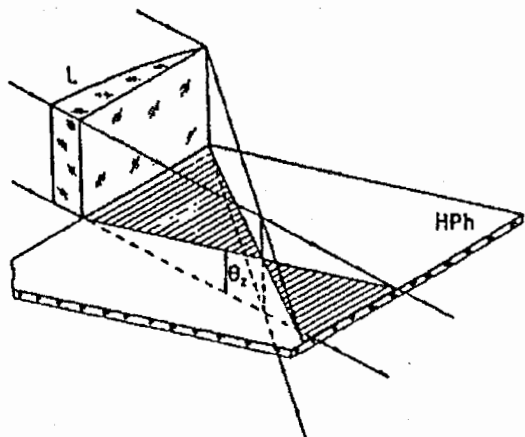


Рис. 5. Схема регистрации явления каустики.

Схема каустического конфокального мезооптического микроскопа показана на рис. 6. ОСВЕЩАЮЩАЯ цилиндрическая полулинза L_1 формирует каустическую интерференционную картину. Слой ядерной фотоэмульсии помещают вблизи фокуса этой полулинзы и ориентируют перпендикулярно внешней зоне каустики. Оптическая штorkа 5 поглощает внутренние лучи каустики. ИЗОБРАЖАЮЩАЯ цилиндрическая полулинза L_2 формирует лучи света внешней части каустической интерференционной картины. Оптимальное взаимное расположение освещающей и изображающей каустик соответствует ширине конфокального отклика, равной $\Delta/3$, где Δ — ширина каустической зоны.

Функция размытия точки каустического конфокального мезооптического микроскопа была измерена на установке (рис. 7) с двумя цилиндрическими полулинзами L_1 и L_2 , образующие линии которых были взаимно перпендикулярны в плоскости, в свою очередь перпендикулярной оптической оси установки. На рис. 8 показана функция размытия точки, полученная при двух разных временах экспозиции. Видно, что боковые лепестки функции размытия точки заполняют только один квадрант из четырех.

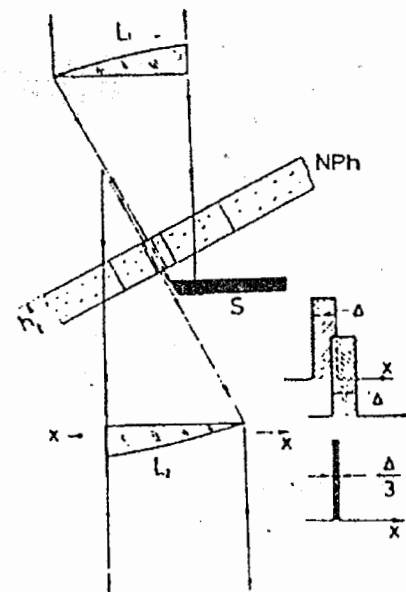


Рис. 6. Схема каустического конфокального мезооптического микроскопа для селективного наблюдения вертикальных следов частиц.

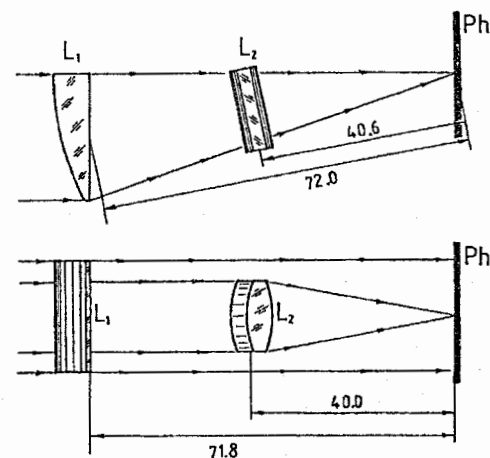


Рис. 7. Схема эксперимента для определения функции размытия точки в каустическом конфокальном микроскопе.

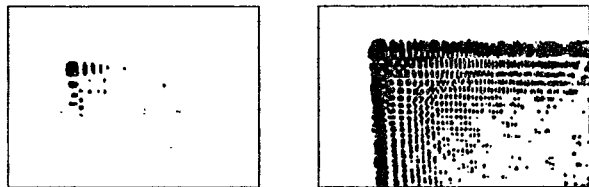


Рис. 8. Вид функции размытия точки с боковыми лепестками, которые заполняют только один квадрант из четырех.

На рис. 9 приведена схема темнопольного конфокального мезооптического микроскопа, изготовленного в ОИЯИ: 1 – лазер, 2 и 4 – плоские зеркала, 3 – положительная линза, 5 – цилиндрическая линза, 6 – слой ядерной фотоэмульсии, 7 – объектив микроскопа, 8 – х.у-столик, 9 – ПЗС-матрица, 10 – выходной монитор ПЗС-матрицы, 11 – система измерения угла Θ между вертикальным следом частицы и оптической осью микроскопа, 12 – указатель угла Θ . Ширина освещающей области слоя ядерной фотоэмульсии равна 4 мкм.

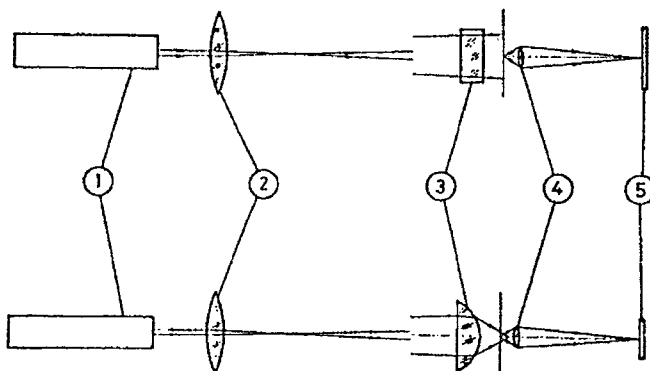


Рис. 9. Схема темнопольного полу-конфокального мезооптического микроскопа.

Глава 6 посвящена ИНВЕРСНОЙ МЕЗООПТИКЕ. На рис. 10 показан пример инверсной мезооптики – мезооптический конфокальный микроскоп, который содержит точечный источник света 1, освещающий мезооптический объектив 2 и второй мезооптический объектив 3. Во втором варианте второй мезооптический объектив 3 может быть выполнен в виде мезооптического элемента с кольцевым откликом, а кроме него введен инверсный мезооптический элемент 4. Полученная таким образом трехкаскадная система преобразует исходную точку 1 сначала в сегмент АВ, затем в кольцо R и, наконец, в точку С.

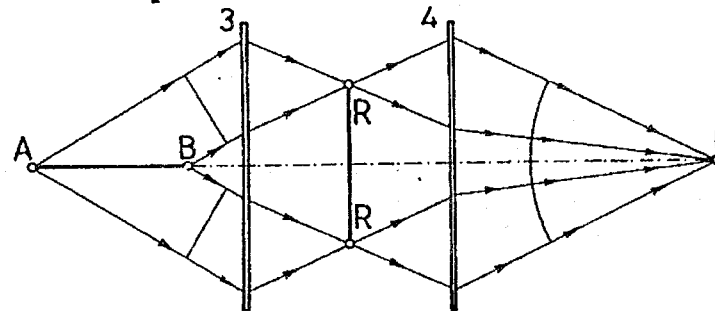
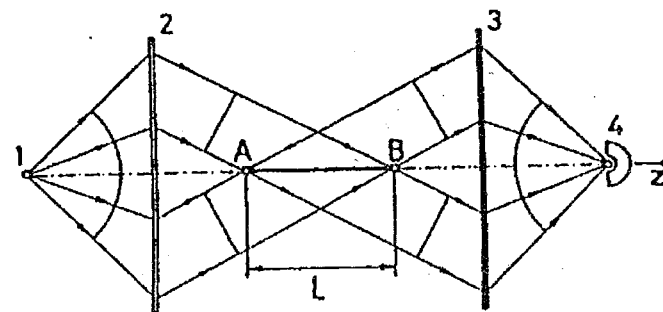


Рис. 10. Схемы инверсно-мезооптического конфокального микроскопа.

Возможности инверсной мезооптики позволяют уменьшить эффект хроматизма в мезооптическом дифференциальном газовом черенковском счетчике заряженных частиц (рис. 11), а также построить самофокусирующийся ондулятор (рис. 12), в котором период магнитного поля является медленно спадающей функцией продольной координаты z .

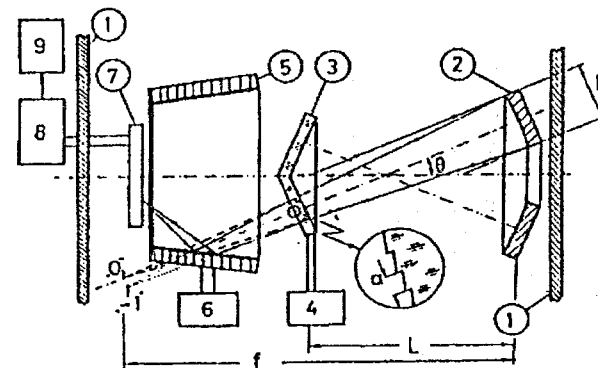


Рис. 11. Схема мезооптического дифференциального газового черенковского счетчика заряженных частиц.

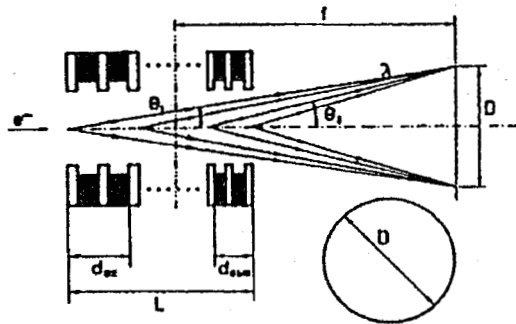


Рис. 12. Схема самофокусирующего ондулятора.

В главе 7 описаны эксперименты по исследованию продольной интерференции света в мезооптике. На рис. 13 дана схема эксперимента для наблюдения этого явления. В нем используется экран 5 со многими узкими коаксиальными пропускающими кольцами шириной 20 мкм и с шагом 200 мкм. Экран 6 пропускает свет, проходящий только через два соседних пропускающих кольца.

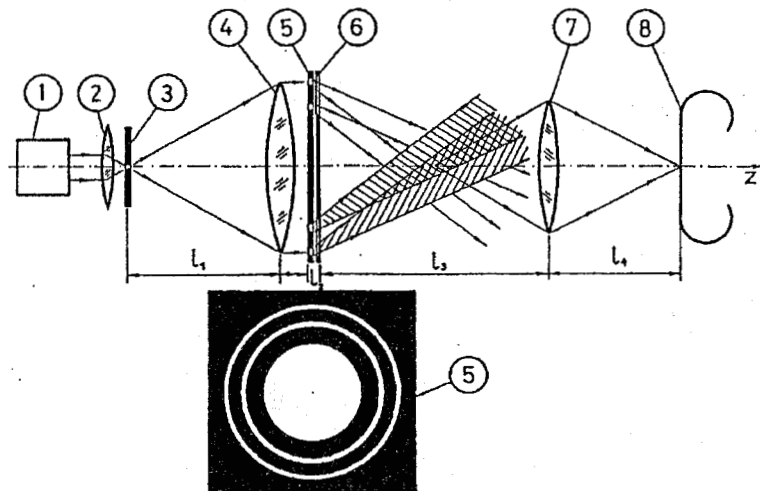


Рис. 13. Схема эксперимента по наблюдению продольной интерференции света в мезооптике.

Для изучения процесса взаимного наложения двух интерференционных структур, идущих к оптической оси с двух противоположных направлений, был выполнен эксперимент, схема которого показана на рис. 14. В данном

эксперименте число пропускающих коаксиальных колец в экране 5 равно 10. В этих условиях ширина максимума в интерференционной структуре была меньше периода модуляции света Λ . Благодаря этому можно было четко видеть динамику взаимного наложения двух интерференционных структур, идущих навстречу друг другу и дающих вклады в общую картину продольной интерференции света.

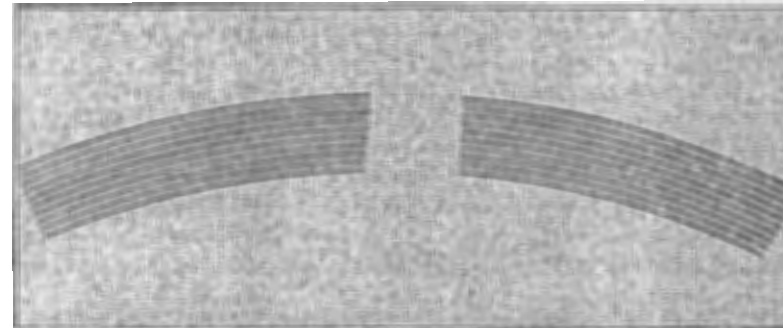


Рис. 14. Схема эксперимента с числом коаксиальных пропускающих колец, равным 10.

На рис. 15 показан процесс тенеобразования в случае плоской волны (а) и в случае сходящихся конических волн (б). На рис. 15а тень от шара диаметром d распространяется вдоль оси z на глубину $\beta \cong d^2/2\lambda$. Глубина пространства, на которую проникает тень в случае сходящихся конических волн (рис. 15б), равна той же величине β , однако сама картина тени в пространстве ориентирована веерообразно относительно оси z . В результате область пространства вдоль оси z , заполненная тенью, имеет очень малую протяженность $\cong d/\sin\theta$.

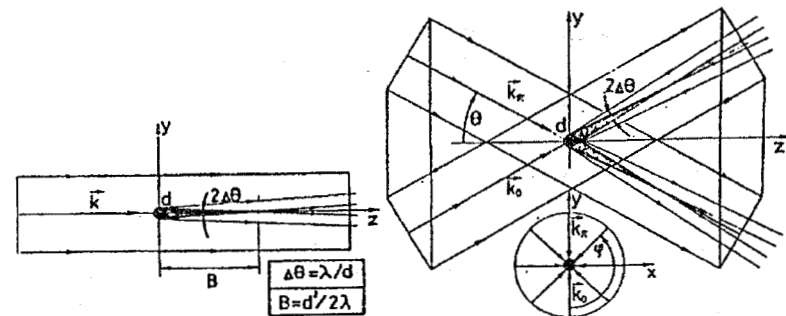


Рис. 15. Процесс образования тени в случае плоской волны (а) и в случае сходящихся конических волн (б).

В той же главе 7 рассмотрен метод подавления продольной интерференции света, а также влияние на исходное волновое поле линейного и кольцевого фильтра Гильберта со скачком фазы $\Delta\varphi=180^\circ$.

В главе 8, посвященной лазерной метрологии, описаны: А – прецизионный бесконтактный лазерный измеритель диаметра проволоки, В – мезооптический измеритель внешней конусной поверхности в автоколлимационном режиме, С – мезооптический измеритель внутренней конусной поверхности в автоколлимационном режиме, D – мезооптический интерферометр, E – мезооптический конфокальный кератометр и F – мезооптический конфокальный профилометр с центральным пучком света.

Экспериментальная установка для наблюдения многих дифракционных порядков (рис. 16) состоит из точечного источника света 1, линзы преобразования Фурье 2, апертурной диафрагмы 3, объекта 4 – вольфрамовой проволоки диаметром ≈ 26 мкм, фоточувствительного слоя 5, установленного на цилиндрическом носителе с радиусом $R=140$ мм, а также поглотителя прямого пучка света 6. На рис. 17 показан фрагмент картины дифракции с шагом между минимумами, равным 4 мм.

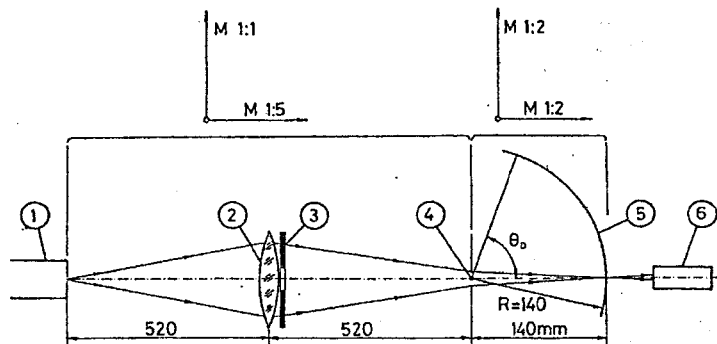


Рис. 16. Экспериментальная установка для наблюдения высших дифракционных порядков.

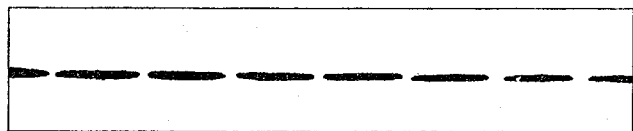


Рис. 17. Фрагмент картины дифракции с шагом между минимумами, равным 4 мм.

На рис. 18 показана зависимость экспериментально оцененной погрешности измерений от индекса N дифракционного минимума. Видно, что описанный метод позволяет оценить диаметр вольфрамовой проволоки ~ 26 мкм с относительной погрешностью $3 \cdot 10^{-4}$ для $N=24$.

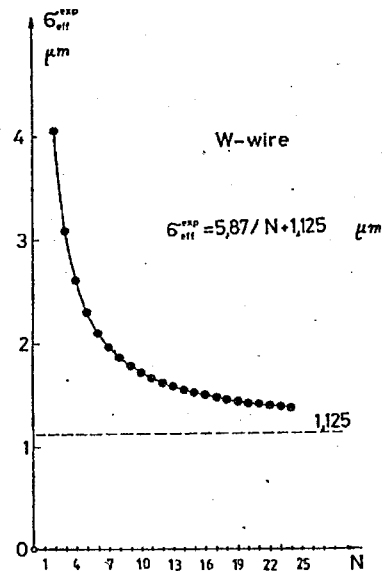


Рис. 18. Зависимость погрешности измерений от индекса N дифракционного минимума.

На рис. 19 показана схема мезооптического измерителя внешней конусной поверхности в автоколлимационном режиме. В этом приборе имеется три конических зеркала (4+5), источник коллимированного пучка света 1, два светоделителя 2 и 3, обмеряемая деталь 6, суппорт 7, микрометрический винт 8 и фотодетектор 9.

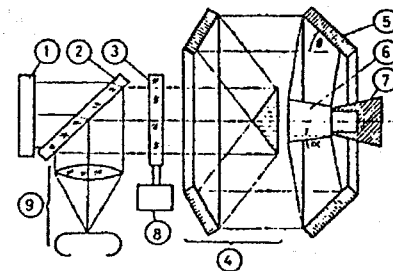


Рис. 19. Схема мезооптического измерителя внешней конусной поверхности в автоколлимационном режиме.

Внешняя коническая поверхность детали 6 освещена в автоколлимационном режиме одновременно со всех сторон. На экране наблюдения 9 видны два точно-подобных изображения, одно – от детали, а другое от передней

поверхности второго светоделителя 3 и от задней поверхности первого светоделителя 2.

На рис. 20 показана схема мезооптического измерителя внутренней конусной поверхности в автоколлимационном режиме, которая содержит точечный источник света 1, оптический коллиматор 2, центральную шторку 3, круговую дифракционную решетку 4, круговую отражательную дифракционную решетку на конической поверхности 5 с бороздками несинусоидальной формы (эшелле), обмеряемую деталь 6, суппорт 7, мезооптический элемент с кольцевым откликом 8, фильтр пространственных частот 9 и экран наблюдения 10. Дифракционная решетка на конической поверхности 5 формирует автоколлимационный режим освещения внутренней конической поверхности детали 6. Отраженные лучи света претерпевают последовательность преобразований, в результате которых эти лучи света образуют узкое кольцо в плоскости пространственных частот фильтра 9. Эффективная ширина этого кольца равна $\Delta r = 2$ мкм, а погрешность измерений равна $\Delta \varphi \approx (0.1 - 0.2'')$ (угловых секунд).

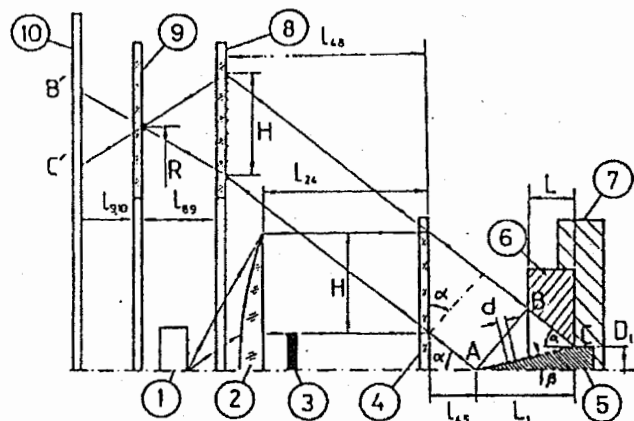


Рис. 20. Схема мезооптического измерителя внутренней конусной поверхности в автоколлимационном режиме.

На рис. 21 показан разрез мезооптического интерферометра. На него направляют сходящийся конический волновой фронт, подлежащий прецизионному контролю. На выходе этого многолучевого интерферометра хорошо видны азимутальные отклонения от эталона в падающем коническом волновом фронте.

На рис. 22 показан мезооптический конфокальный кератометр, который содержит выпуклое многоэлементное зеркало 2 и вогнутое многоэлементное зеркало 3. Образующие линии всех элементов указанных зеркал являются прямыми линиями, а угол образующей линии центрального элемента

наклонен к общей образующей линии под определенным углом Φ . Образующие в этих условиях два коаксиальных конических волновых фронта создают продольную модуляцию света на оптической оси. Выходная линза кератометра видит только точки на оптической оси системы. Интенсивность первого бокового лепестка функции размытия точки равна 0.016 от интенсивности центрального максимума.

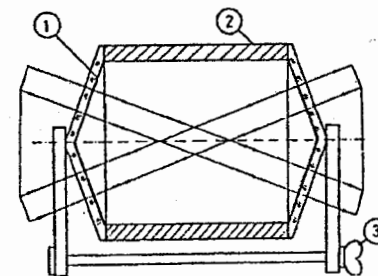


Рис. 21. Схема мезооптического интерферометра.

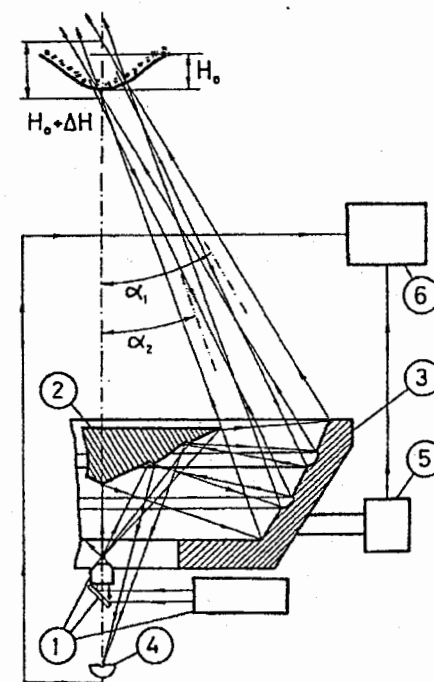


Рис. 22. Схема мезооптического конфокального кератометра.

На рис. 23 показана схема мезооптического конфокального профилометра с центральным пучком света. Система содержит точечный источник света 1, оптический коллиматор 2, плоское зеркало 3, конические зеркала 4 и 5 системы освещения, коническое зеркало 6 системы наблюдения, точечный фотодетектор 7, подвижной стол 8 и блок памяти 9. Чтобы ослабить эффект боковых лепестков, внутренний диаметр D_2 конического зеркала 6 системы наблюдения и внешний диаметр D_1 конического зеркала 5 выбраны из условия: $D_1/D_2 = d_1/d_2 \approx 1.62$; $d_1 = D_2$.

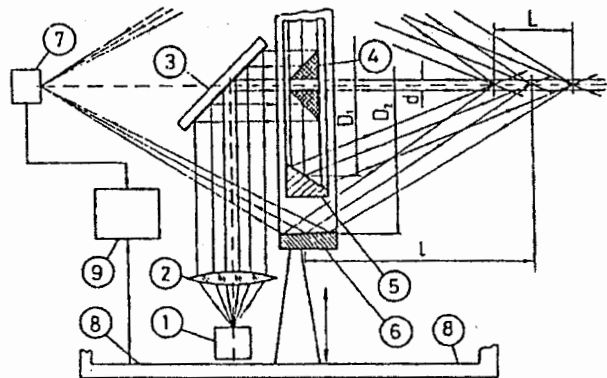


Рис. 23. Схема мезооптического конфокального профилометра с центральным пучком света.

В главе 9 сформулированы основные выводы работы:

1. Теоретически и экспериментально показано, что используя мезооптические элементы, впервые предложенные и изготовленные автором, можно полностью убрать операцию перефокусировки по глубине в процессе наблюдения микроскопических прямолинейных объектов, лежащих на различной глубине. При этом для того, чтобы убрать операцию перефокусировки по глубине, необходимо и достаточно, чтобы образующая линия изображающей линзы имела ИЗЛОМ.
2. Впервые в истории оптического микроскопа отрезок прямолинейного объекта, находящийся в поле зрения микроскопа, стал восприниматься как ЕДИНОЕ ЦЕЛОЕ.
3. Впервые в истории оптического микроскопа удалось сжать всю информацию о прямолинейном объекте до ДВУХ точечных сигналов, которые возникают на выходном мониторе мезооптического микроскопа. Никаких вычислений при этом не производят.
4. Впервые в истории оптического микроскопа полностью убрана операция разбиения изображения прямолинейного объекта на со-

ставляющие элементы, как это до сих пор делают во всех традиционных оптических микроскопах.

5. Экспериментально было показано, что на пути изготовления мезооптических элементов с кольцевым откликом не существует технологических трудностей.
6. Впервые был изготовлен Мезооптический Фурье Микроскоп (МФМ) для селективного наблюдения прямолинейных объектов с малым углом погружения. Этот прибор обладал всеми характеристиками, упомянутыми выше (1, 2, 3, 4).
7. Объяснена феноменологически и выражена математически сущность пространственных интегральных преобразований амплитуды света в МФМ.
8. Показано, что мезооптические сигналы прямолинейных следов частиц в ядерной фотозумьсии, имеющих общую вершину, лежат на синограмме в системе координат (x, Θ_{xy}) .
9. Показано, что радиус кривизны проекционного изображения искривленного следа частицы можно оценить, используя только мезооптические сигналы на выходе МФМ.
10. Обнаружен мезооптический эффект муара в МФМ, который может быть использован для оценки угла рассеяния частицы.
11. Впервые в мезооптике явление каустики света было использовано одновременно в освещающем и изображающем блоках мезооптического конфокального микроскопа.
12. Впервые была рассмотрена теоретически и исследована экспериментально продольная интерференция света в коаксиальных конических волновых полях.
13. Предложен метод подавления продольной интерференции света в коаксиальных конических волновых полях.
14. Предложен новый метод подавления хроматических aberrаций в дифференциальном газовом черенковском счетчике заряженных частиц.
15. Опираясь на принципы инверсной мезооптики, была разработана конструкция самофокусирующегося ондулятора, как генератора синхротронного излучения. Ее реализация упростит систему транспортировки синхротронного излучения и решит проблему сема тепла в ограничивающей диафрагме.
16. Впервые был выполнен эксперимент по одновременному наблюдению высоких порядков дифракции от $N=1$ до $N=25$, которая создана прямолинейным объектом. Экспериментально было показано, что использование в лазерной метрологии информации о высоких порядках дифракции позволяет существенно, примерно в 30÷50 раз, уменьшить погрешность метрологических измерений.
17. Описаны схемы и принцип действия мезооптических метрологических приборов: прецизионного бесконтактного измерителя диамет-

ра проволоки; мезооптического измерителя внешней конусной поверхности в автоколлимационном режиме; мезооптического измерителя внутренней конусной поверхности в автоколлимационном режиме; мезооптического интерферометра; мезооптического конфокального кератометра и мезооптического конфокального профилеометра с центральным пучком света.

В главе 10 приведены данные об апробации работы.

В главе 11 дана используемая литература, а в главе 12 – благодарности автора диссертации.

СПИСОК РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ, НА КОТОРЫХ ОСНОВАНА ДИССЕРТАЦИЯ

1. L. M. Soroko, MESOOPTICS, Foundations and Applications. World Scientific, Singapore, 1996. XXII + 403 pages.
2. L.M. Soroko, AXICONS AND MESOOPTICAL IMAGING DEVICES, in Progress in Optics (ed. E. Wolf), (Elsevier, Amsterdam), 27, 109-160 (1989).
3. А.Я. Астахов, Г.М. Комов, В.И. Сидорова, И.И. Скрьль, Л.М. Сороко. Конструкция Фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии, Сообщение ОИЯИ, P13-83, 119, Дубна, 1983.
4. Д. Бенце, А. Кишваради, Г. Нитрай и Л.М. Сороко. Наблюдение следов релятивистских протонов при помощи мезооптического Фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии. Сообщение ОИЯИ, P13-86-630, Дубна, 1986.
5. Д. Бенце, Л.М. Сороко. Геометро-оптические характеристики мезооптического Фурье-микроскопа в меридиональном сечении. Сообщение ОИЯИ, P13-86-659, Дубна, 1986.
6. А.Я. Astakhov, Yu.A. Batusov, Gy.L. Bencze, I. Farago, A. Kisvaradi, L. Molnar, L.M. Soroko and J. Vegh. Mesooptical Fourier transform microscope – a new device for high energy physics. Nucl. Instrum. Meth. A283 (1989), 13-23.
7. L.M. Soroko. Mesooptical Fourier transform microscope: principles and main features. Nucl. Tracks Radiat. Meas., 18 (1991), 391-402.
8. L.M. Soroko. Mesooptical Fourier transform microscope as a new measurement device. Nucl. Tracks Radiat. Meas., 19 (1991), 267-270.
9. Л.М. Сороко. Мезооптика и методика трековых детекторов, ЭЧАЯ, 1989, 20, №1, 155-197.
10. L.M. Soroko. Dirac delta-plus (or minus) function in optics and mesooptics. Preprint JINR, E13-87, 202, Dubna, 1987.
11. Д.Бенце, И.Г. Пальчикова, А.Г. Полещук и Л.М. Сороко. Исследование изображающих свойств киноформа с поперечной мезооптичностью. Сообщение ОИЯИ, P13-86-240, Дубна, 1986.
12. А.Я. Астахов, А. Кишваради, В.И. Краснослободцев, И. Молнар, Л. Молнар, Л.М. Сороко, В.В. Терещенко и И. Торма. Мезооптический Фу-

рье-микроскоп с одноканальными фотоприемниками. Сообщение ОИЯИ, P13-91-299, Дубна, 1991.

13. А.Я. Астахов, А. Кишваради, В.И. Краснослободцев, И. Молнар, Л. Молнар, Л.М. Сороко, В.В. Терещенко и И. Торма. Электронно-компьютерные блоки мезооптического Фурье-микроскопа с одноканальными фотоприемниками и с ПЗС-матрицей. Сообщение ОИЯИ, P13-91-391, Дубна, 1991.

14. Yu.A. Batusov, L.M. Soroko and V.V. Tereshchenko. Mesooptical Fourier transform microscope with double focusing. Communications JINR, E13-92-179, Dudna, 1992.

15. А.Я. Астахов, Д. Бенце, А. Кишваради, Т.П. Нидермайер, Г. Нитрай и Л.М. Сороко. Полуавтоматические измерения следов частиц при помощи мезооптического Фурье микроскопа для ядерной фотоэмульсии. Сообщение ОИЯИ, P13-85-378, Дубна, 1985.

16. Д. Бенце, Л.М. Сороко. Основные параметры мезооптического Фурье микроскопа для ядерной фотоэмульсии. Сообщение ОИЯИ, P13-85-138, Дубна, 1985.

17. Yu. A. Batusov, L.M. Soroko and V.V. Tereshchenko. Stereoscopic mesooptical Fourier transform microscope with double focusing. Communications JINR, D13-94-478, Dubna, 1994.

18. Д.Бенце, Л.М. Сороко. Алгоритм поиска событий в мезооптическом Фурье микроскопе для ядерной фотоэмульсии. Сообщение ОИЯИ, P13-85-137, Дубна, 1985.

19. Д. Бенце, Л.М. Сороко. Тангенсный алгоритм поиска событий в мезооптическом Фурье микроскопе для ядерной фотоэмульсии. Сообщение ОИЯИ, P13-85-502, Дубна, 1985.

20. Л.М. Сороко. Метод измерения координат начала и конца следа частицы на мезооптическом Фурье – микроскопе. Сообщение ОИЯИ, P13-87-169, Дубна, 1987.

21. Л.М. Сороко. Метод измерения радиуса кривизны следа частицы при помощи мезооптического Фурье микроскопа. Сообщение ОИЯИ, P13-87-358, Дубна, 1987.

22. Л.М. Сороко. Метод измерения малых углов рассеяния и распадной длины на мезооптическом Фурье микроскопе. Сообщение ОИЯИ, P13-87-170, Дубна, 1987.

23. Л.М. Сороко. Мезооптический Фурье микроскоп: структура сигнала в сагитальном сечении. Сообщение ОИЯИ, P13-87-527, Дубна, 1987.

24. Л.М. Сороко. Мезооптический микроскоп для наблюдения вертикальных следов частиц в ядерной фотоэмульсии. Сообщение ОИЯИ, P13-87-576, Дубна, 1987.

25. L.M. Soroko. Caustical mesooptical confocal microscope for vertical particle tracks. Communications JINR, E13-95-546.

26. A.Ya. Astakhov, Yu.A. Batusov, L.M. Soroko, S.V. Tereshchenko, V.V. Tereshchenko. Dark-field scanning confocal microscope for vertical particle tracks in nuclear emulsion. Communications JINR, E13-99-342, Dubna, 1999.
27. L.M. Soroko. Mesooptical microscope as a tomographic device. Exper. Techn. Der Physik, (1990), 38, №5/6, p.411-424.
28. L.M. Soroko. Mesooptical microscope of high productivity for vertical particle tracks. Communications JINR, E13-95-545, Dubna, 1995.
29. L.M. Soroko. Mesooptics for science and industry. Communications JINR, E13-96-411, Dubna, 1996.
30. L.M. Soroko. Inverse meso-optics and its potential applications. Communications JINR, E13-91-175, Dubna, 1991.
31. L.M. Soroko. Optics, holography and mesooptics in bubble chamber of vertex detector. Communications JINR, D1-82-642, Dubna, 1982.
32. Gy.L. Bencze and L.M. Soroko. Mesooptics and high energy physics. (Submitted to ICO-13 Congress, Sapporo, 1984), The 13-th Congress of the International Commission for Optics, Communications JINR, E13-84-310, Dubna, 1984.
33. L.M. Soroko. Longitudinal interference of the diffraction free wave fields. I. Theory. Communications JINR, E13-90-592, Dubna, 1990.
34. L.M. Soroko. Longitudinal interference of the diffraction free wave fields. II. Experiments. Communications JINR, E13-90-593, Dubna, 1990.
35. L.M. Soroko. Longitudinal interference of the diffraction free wave fields. III. Applications. Communications JINR, E13-90-594, Dubna, 1990.
36. L.M. Soroko. What does the term "LIGHT BEAM" mean? Communications JINR, E13-99-226, Dubna, 1999.
37. L.M. Soroko. Mesooptics and the track-detector technique. Sov. J. Part. Nucl. 22 (1989), 67-85.
38. L.M. Soroko. Informational content of the high order diffraction pattern. Communications JINR, E13-94-511, Dubna, 1994.
39. Л.М. Сороко. Мезооптический Фурье микроскоп для наблюдения релятивистских ядер неона. Сообщение ОИЯИ, P13-87-468, Дубна, 1987.
40. L.M. Soroko. Isoplanatic systems in mesooptics, Exper. Techn. of Phys., 38 (1990), 401-410.
41. L.M. Soroko. Isoplanatic mesooptical Fourier transform microscope for nuclear emulsion. Commun. JINR, E13-95-147, Dubna, 1995.
42. Dubna. In depth viewing. CERN Courier. 30, №4, 1990, h.13-14.
43. L.M. Soroko. 3D inspection by conical wavefronts. Proc. SPIE, v. 4900, p.220, 2002.

Подписано в печать 5.01.2003
Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная
Усл. печ. л. 1,5
Тираж 100 экз.