

СЗУУ.1е +4 848
С-655

644/83
Сороко Л.М.
Б1-10-82-808.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-10-82-808

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1982

Объединенный институт ядерных исследований
Лаборатория ядерных проблем

Л. М. Сороко

Б1-10-82-808

ФУРЬЕ-МИКРОСКОП ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

III. Система целевого сканирования

30. 11. 82 г.

г. Дубна, 1982 г.

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

Аннотация

Описаны устройство и принцип действия многоканальной системы щелевого сканирования в фурье-микроскопе для ядерной фотоэмульсии, а также конструкция модели собирающего зеркала-конденсора. Способность фурье-микроскопа подчеркивать и сохранять в компактной форме информацию о прямолинейных контурах апертуры демонстрируется на простом примере.

1. Введение. В работах [1, 2] описаны принцип действия фурье-микроскопа, а также результаты экспериментов по проверке принцип действия фурье-микроскопа и моделирующих экспериментов на ЭВМ. Было отмечено, что из-за малых размеров проявленных зерен серебра ядерной фотоэмульсии, диаметр которых соизмерим с длиной волны света, процесс формирования картины дифракции далекого поля в фурье-микроскопе имеет особенности, которые иллюстрирует рис. 1. Пучок света с длиной волны λ просвечивает сплошной след в виде полоски шириной d и длиной, равной диаметру поперечного сечения пучка света D . Так как $d \approx \lambda$, то характерный угол дифракции θ , задающий угол первого минимума картины дифракции далекого поля, достигает значения ~ 1 радиан и более. В соответствии с принципом Кирхгофа картина дифракции далекого поля формируется на квазицилиндрической поверхности, ось которой совпадает со следом частицы. Квазицилиндрическая поверхность касается плоскости пространственных частот на линии, которая пересекает оптическую ось фурье-микроскопа.

То, что фурье-образ следа шириной $d \sim \lambda$ простирается вплоть до углов дифракции $\sim \pi/2$, затрудняет фокусировку света в пятно малых размеров. Решить эту задачу при помощи системы щелевого опроса, разработанной в [3, 4] невозможно. Причина в том, что эта система приспособлена для обработки следов, ширина которых намного больше длины волны света, а характерный угол дифракции света $\theta \ll 1$ радиан. Именно это обстоятельство позволяет использовать плоский многоканальный голографический фильтр [3]. Чтобы перейти в область углов дифракции $\theta \sim \pi/2$, фильтр пространственных частот необходимо изготовить на квазисферической поверхности, а это с неизбежностью приведет к очень большим размерам линзы обратного преобразования Фурье и создаст другие трудности принципиального и конструктивного характера.

В [1] описан один из вариантов многоканальной системы щелевого опроса на основе голографического фильтра на сферической поверхности, который выполняет одновременно функцию линзы обратного преобразования Фурье. Однако реализация такого варианта сопряжена с большими технологическими трудностями, а габариты и стоимость весьма велики.


Чтобы сохранить на высоком уровне эффективность сбора света, дифрагированного на проявленных зернах серебра ($d \approx \lambda$), конструкцию щелевого опроса Фурье-микроскопа необходимо изменить принципиально.

2. Зеркальный конденсор системы щелевого опроса Фурье-микроскопа. Описываемый ниже зеркальный конденсор системы щелевого опроса Фурье-микроскопа представляет собой оптический элемент, который выполняет одновременно функции многоканального голографического согласованного фильтра [3], а также линзы обратного преобразования Фурье. Зеркальный конденсор [5] представляет собой фигуру вращения, ось симметрии которой совпадает с оптической осью Фурье-микроскопа, а сечение фигуры вращения плоскостью, проходящей через оптическую ось Фурье-микроскопа, имеет вид эллипса, один из фокусов которого расположен в точке пересечения медианной плоскости ядерной фотоэмульсии с оптической осью Фурье-микроскопа, а второй фокус лежит в медианной плоскости на расстоянии R от оптической оси Фурье-микроскопа. При этом диаметр фотоприемников "а", расположенных во втором фокусе эллипса, и их полное число N связаны с расстоянием R соотношением

$$R \leq \frac{Na}{2\pi}$$

а зеркальная поверхность обращена в сторону фотозэмульсии.

Чтобы исключить вредное действие прямого пучка света, а также света, дифрагированного на маркировочной сетке в ядерной фотозэмульсии, на царапинах и на других включениях, зеркальный конденсор имеет вырез в виде круга с центром, расположенным на оптической оси фурье-микроскопа. Угол, стягиваемый этим вырезом, равен $\pm 1/10$ радиан.

На рис. 2 показана схема фурье-микроскопа для ядерной фотозэмульсии, содержащая зеркальный конденсор описанной выше формы. Лазерный источник света 1 создает коллимированный пучок света, диаметр поперечного сечения которого может меняться от 0,3 мм до 2,0 мм и выбирается в зависимости от цели и условий измерений. Линза прямого преобразования Фурье 2 формирует сходящийся пучок света, точка фокуса которого расположена в области, где зеркальный конденсор 6 пересекает оптическую ось фурье-микроскопа. Слой ядерной фотозэмульсии 3 располагается за линзой 2 перпендикулярно оптической оси фурье-микроскопа. В качестве примера на рис. 2 показан след, расположенный перпендикулярно плоскости чертежа. Его фурье-образ представляет собой полосу на квазицилиндрической поверхности вблизи плоскости чертежа. Система механического перемещения ядерной фотозэмульсии 4 в плоскости, перпендикулярной оптической оси фурье-микроскопа, и датчики положения ядерной фотозэмульсии 5 служат для определения двух координат положения трека, попавшего в пучок света. Фотоприемники 7, расположенные без просветов на окружности радиуса R от оптической оси фурье-микроскопа. Один из фотоприемников регистрирует поток света, дифрагированного на следе и отраженного от зеркального конденсора 6. В блок памяти заносятся значения координат x и y положения ядерной фотозэмульсии в момент измерения угла ориентации фурье-образа следа , а также значение

импульса фототока, который индуцируется в соответствующем фотоприемнике. Фотоэмульсия перемещается безостановочно через пучок света.

Фурье-микроскоп для ядерной фотоэмульсии работает следующим образом. Если след, оставленный частицей в ядерной фотоэмульсии, попадает в пучок света, то вблизи поверхности зеркального конденсора формируется фурье-образ следа, наиболее яркая часть которого имеет вид узкой дуги. Интенсивность этой дуги плавно уменьшается с углом θ [1]. Свет прямого пучка, а также свет, дифрагированный на крупных неоднородностях ядерной фотоэмульсии, проходит через отверстие в зеркальном конденсоре и поглощается. Лучи свет, образующие фурье-образ следа, отражаются от зеркального конденсора и фокусируются в области второго фокуса эллипса. Дуга эллипса является образующей фигуры зеркального конденсора. Сфокусированный свет попадает на один из фотоприемников, диаметр которого выбран равным диаметру пучка света в плоскости ядерной фотоэмульсии. Изображение, получающееся в плоскости фокуса, представляет собой двумерную автосвертку следа [1] и в силу принципа Бабинне, выглядит светлым изображением на темном фоне.

Благодаря использованию зеркального конденсора описанной выше конструкции эффективность сбор света, дифрагированного на проявленных зернах серебра, оказывается существенно выше, чем в традиционной системе щелевого опроса [3, 4]. Одновременно возникает возможность сделать конструкцию всего фурье-микроскопа достаточно компактной.

В процессе поступательного движения следа частицы через пучок света его изображение /обращенное/ перемещается синхронно в пределах одного или двух соседних фотоприемников, и в течение всего этого времени создает сигнал фототока. Если выходы двух фотоприемников, лежащих на одной линии под углами θ и $180^\circ + \theta$, объ-

единить вместе, то амплитуда сигнала фототока увеличится вдвое, что приведет к улучшению отношения сигнала к шуму. Если в пучок света попадает одновременно несколько следов, то сигналы фототока возникают на выходе нескольких фотоприемников, число которых равно или меньше удвоенного числа следов, освещаемых пучком света.

На рис. 3 дана полная схема Фурье-микроскопа, в котором использован описанный выше зеркальный конденсор: 1 - лазерный источник света, 2 - линза преобразования Фурье, 3 - слой ядерной фотоэмульсии, 4 - зеркальный конденсор, 5 - система фотоприемников, 6 - система механического перемещения ядерной фотоэмульсии, 7 - датчик положения ядерной фотоэмульсии, 8 блок памяти, 9 - процессор, 10 - дисплей. На рис. 4 показана схема разбиения слоя ядерной фотоэмульсии на полоски шириной 0,5 мм в процессе сканирования. В указанном примере в блок памяти 8 записываются данные о номере полоски, а также данные о пяти следах, попавших в пучок света в процессе сканирования: $(x_1, \theta_1), (x_2, \theta_2), (x_3, \theta_3), (x_4, \theta_4)$ и (x_5, θ_5) , где x_i - координата, которой соответствует середина i -го импульса фототока в процессе перемещения фотоэмульсии, а θ_i - угол ориентации i -го следа. На дисплее следы частиц изображаются отрезками прямых линий, как это показано на рис. 3. Двухзначности вида $\theta \leftrightarrow \theta + 180^\circ$, которые возникают при сканировании одной полоски, устраняются после получения данных при сканировании соседних полосок. На дисплее отображаются данные, позволяющие найти положение центра ядерного события с точностью $\pm 0,1$ мм. Эту операцию выполняет процессор.

3. Модель зеркального конденсора. Чтобы проверить экспериментально принцип действия зеркального конденсора, описанного выше, была изготовлена модель зеркального конденсора /рис. 5/. Зеркальная пленка из терилена типа Мейлар толщиной 5 мкм зажималась между коль-

цом и корпусом модели через резиновое уплотнение. В корпусе сделана кольцевая выточка, а в центре на оптической оси оставлен цилиндрический выступ. В корпусе имеется отверстие с оливкой, через которую производилась откачка объема водоструйным насосом через ресивер. Степень деформации зеркальной пленки изменялась при изменении напора воды в водоструйном насосе. Схема эксперимента приведена на том же рис. 5. В качестве объекта использовалась вольфрамовая проволока диаметром 10 мкм и паутинка диаметром 3 – 5 мкм. Деформация зеркальной пленки должна быть такой, чтобы радиус кривизны образующей и следовательно фокусное расстояние зеркала равнялось расстоянию от объекта до зеркальной пленки. По достижении этого условия были хорошо видны два ярких пятна, которые располагались на пересечении окружности с прямой линией, идущей через оптическую ось /рис. 5 внизу слева/. При повороте объекта в плоскости, перпендикулярной оптической оси, яркие пятна синхронно перемещались по окружности. Эксперименты показали, что модель зеркального конденсора обладает требуемыми оптическими свойствами.

Изображение ярких пятен было перенесено на фотоприемную матрицу прибора с переносом заряда [6] без помощи объектива. При использовании пучка света от гелий-неонового лазера мощностью около 0,06 мВт дифрагированный свет от объекта в виде проволоки 10 мкм давал пересвет. Диаметр пятна равнялся 2 мм.

4. Способность фурье-микроскопа видеть прямые линии и контуры.
Способность фурье-микроскопа видеть прямые линии и прямолинейные контуры можно продемонстрировать в простейшем эксперименте, схема которого дана на рис. 6. Сходящийся пучок света от лазера пересекает ирисовую диафрагму объектива Индустар 23 с фокусным расстоянием 300 мм. Число пар лепестков ирисовой диафрагмы в этом объективе равно 9, хотя на рис. 6 для упрощения чертежа число пар лепестков

равно 6. При очень большом времени экспонирования в плоскости пространственных частот видна картина, показанная в нижней правой части рис. 6.

Проследим за динамикой формирования фурье-образа ирисовой диафрагмы объектива. На рис. 7а дано изображение диска Эйри - картины дифракции далекого поля на круглом отверстии. На рис. 7б та же картина получена при увеличенном времени экспонирования. Прямой пучок света перекрыт стержнем. Можно заметить примерно 15-ю волну дифракционной картины. На рис. 7в время экспонирования увеличено еще больше. Видна неизотропная структура дифракционной картины. В направлениях, которые перпендикулярны кромкам лепестков ирисовой диафрагмы, можно проследить лучи вплоть до 37-ой волны дифракционной картины. В промежутках между этими лучами можно проследить не более 25 волн. Наконец, на рис. 7г показана фотография дифракции далекого поля, полученная при самом большом времени экспонирования в данной серии фотографий. Четко проявляются лучи, которые можно проследить примерно до 70 волны дифракционной картины, между тем как в промежутках между лучами видна всего 27-ая волна дифракционной картины.

Если в плоскости пространственных частот установить поглощающий диск, отсекающий волны дифракционной картины вплоть до 30-ой волны, а в области высоких радиальных пространственных частот установить систему щелевого сканирования [4], то можно будет косвенно определить число лепестков ирисовой диафрагмы. Указанный фильтр пространственных частот представляет собой упрощенный вариант пространственного дифференциального радиального фильтра, впервые реализованного в работе [7].

Литература

1. Л.М. Сороко. Публикация ОИЯИ. БИ-13-81-229, Дубна, 1981.
2. В.В. Луков, Л.М. Сороко. Публикация ОИЯИ, БИ-13-81-312, Дубна, 1981.
3. Л.М. Сороко. Авторское свидетельство СССР, № 211682 от 01.10.65. Булл. ОИПОТЗ, 1967, № 8, с. 66.
4. Л.М. Сороко. Авторское свидетельство СССР № 200023 от 11.04.66. Булл. ОИПОТЗ, 1967, № 16, с. 58.
5. Л.М. Сороко. Авторское свидетельство СССР, № 743424, от 12.12.78, Булл. ОИПОТЗ, 1981, 1981, №21, с. 262.
6. Л.М. Сороко. ЭЧАЯ, 1979, т. 10, вып. 5, с. 1038-1074.
7. S.Lowenthal, Y. Belvaux, Opt. acta, 1967, v. 14, p. 245-258.

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

$$a = \lambda \frac{F}{D}$$

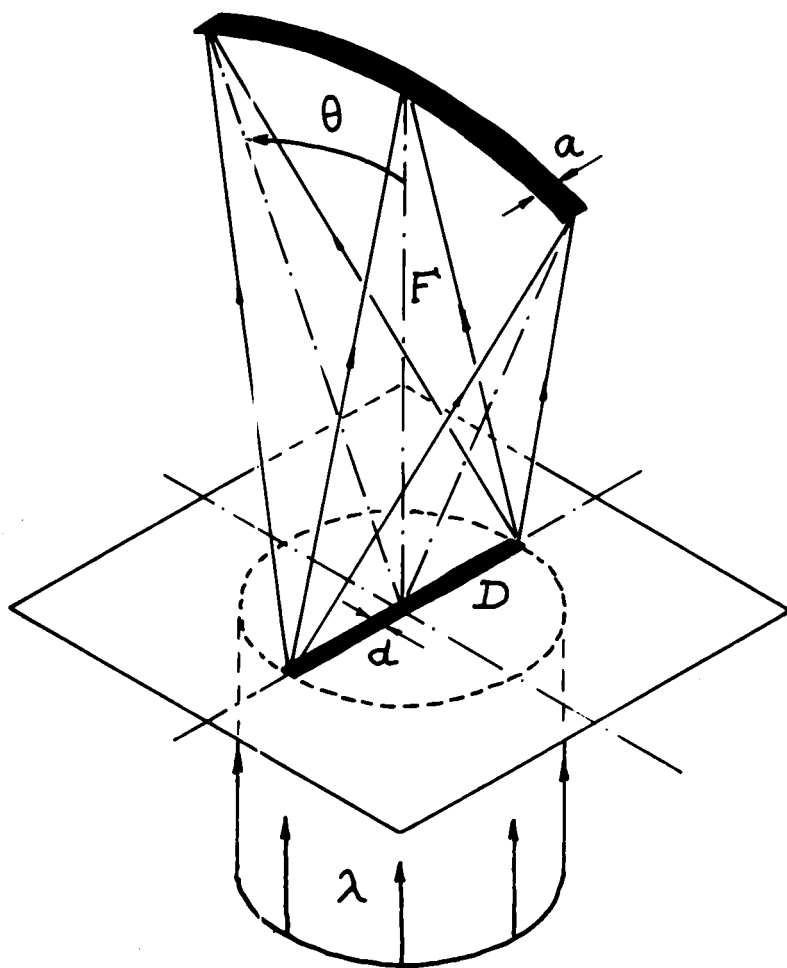


Рис. 1. Процесс формирования картины дифракции далекого поля от тонкого следа частицы ядерной фотоэмульсии. Если толщина следа приближается к величине λ , $d - \lambda = 0,6$ мкм, угол θ стремится к $\theta \approx 1$ радиану, а картина дифракции далекого поля такого следа формируется на квазицилиндрической поверхности, ось которой совпадает со следом. Поэтому, когда $d \approx \lambda$, первый минимум картины дифракции далекого поля располагается в области $\theta \sim 1$ радиан. Обычная сферическая или цилиндрическая оптика не может собирать или фокусировать весь свет фурье-образа в малое пятно подобно тому, как это удастся сделать для малых углов θ .

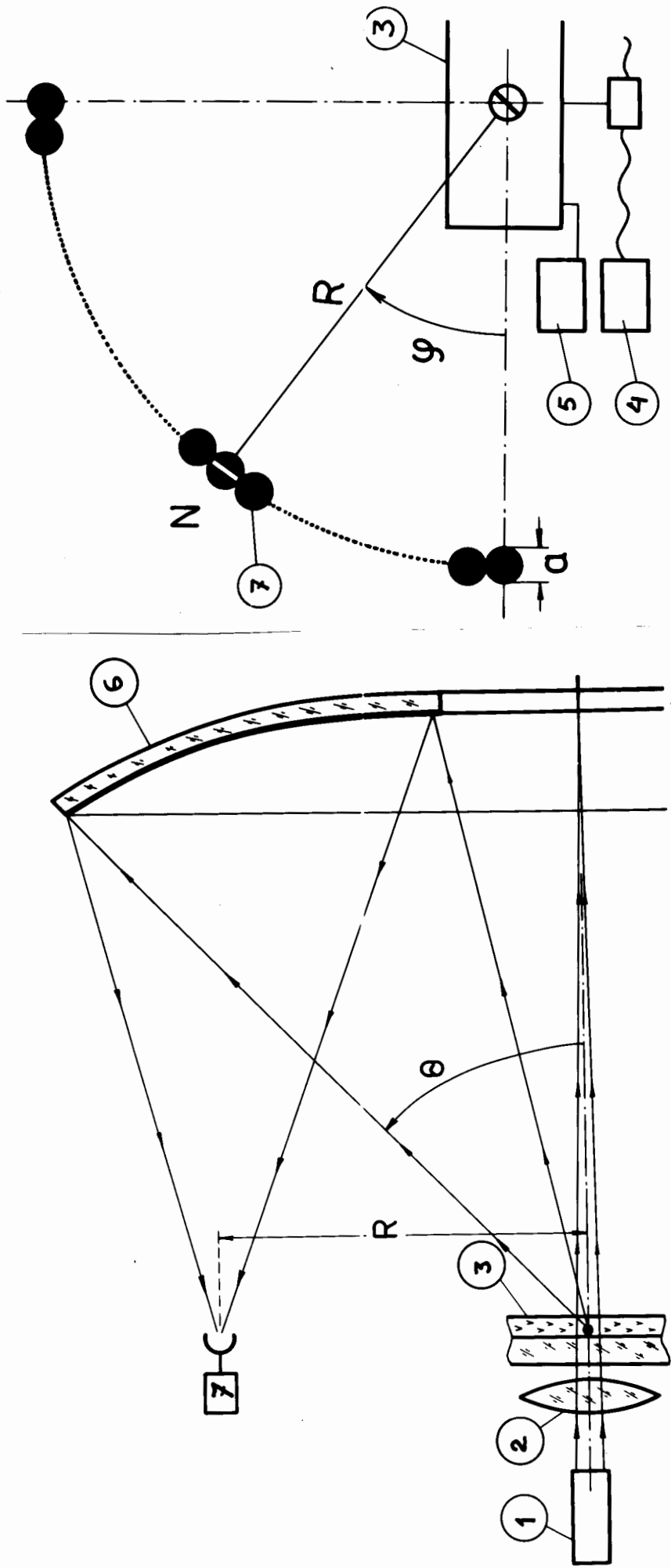


Рис. 2. Схема фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии, который содержит зеркальный конденсор, описанный выше: 1 - лазерный источник света, 2 - линза преобразования Фурье, 3 - слой ядерной фотоэмульсии, 4 - система перемещения ядерной фотоэмульсии, 5 - датчики положения ядерной фотоэмульсии, 6 - зеркальный конденсор, 7 - фотоприемник.

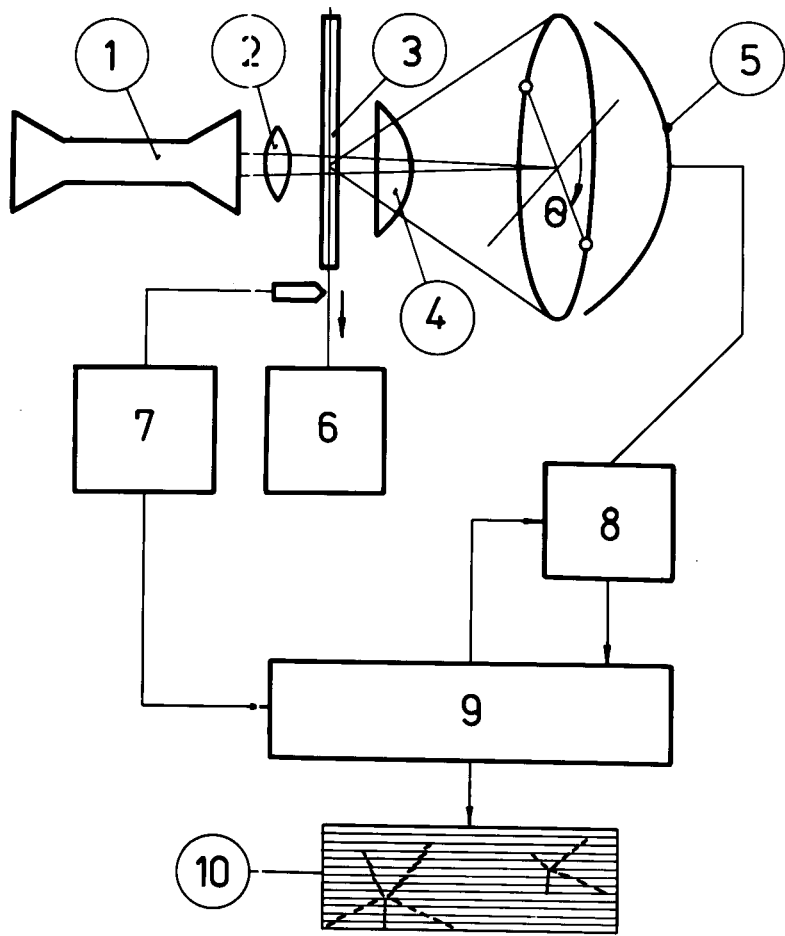


Рис. 3. полная схема фурье-микроскопа: 1 - лазерный источник света, 2 - линза преобразования Фурье, 3 - слой ядерной фотоэмульсии, 4 - зеркальный конденсор, 5 - система фотоприемников, 6 - система перемещения ядерной фотоэмульсии, 7 - датчики положения ядерной фотоэмульсии, 8 - блок памяти, 9 - процессор, 10 - дисплей.

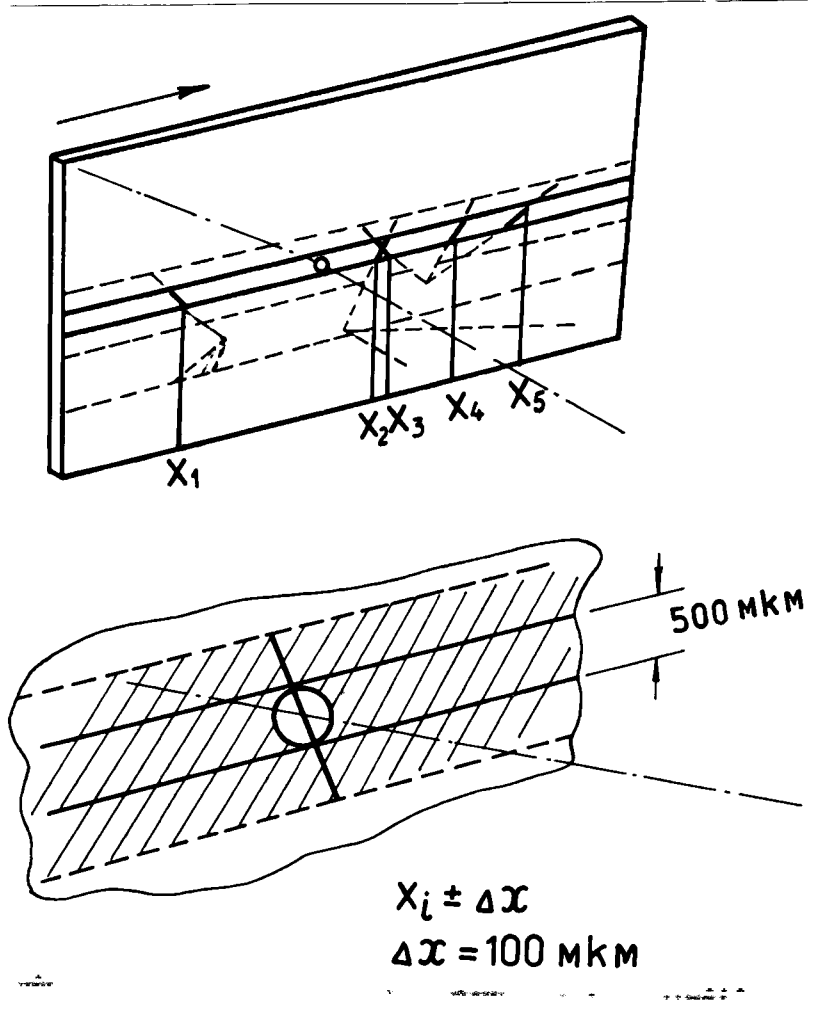


Рис. 4. Схема расположения полосок сканирования на слое ядерной фотоэмульсии. Ширина полосок равна 0,5 мм.

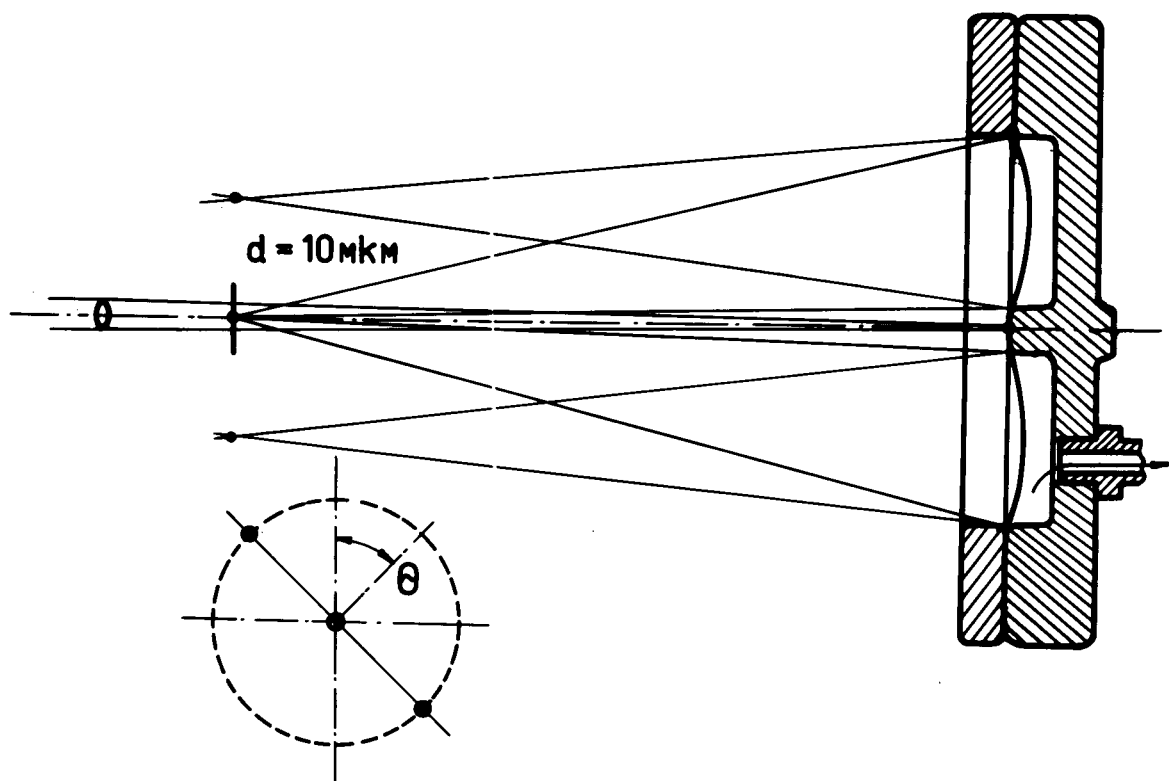


Рис. 5. Разрез модели зеркального конденсора и схема расположения ярких пятен, формируемых зеркалом при помещении в сходящийся лазерный пучок проволоки диаметром 10 мкм.

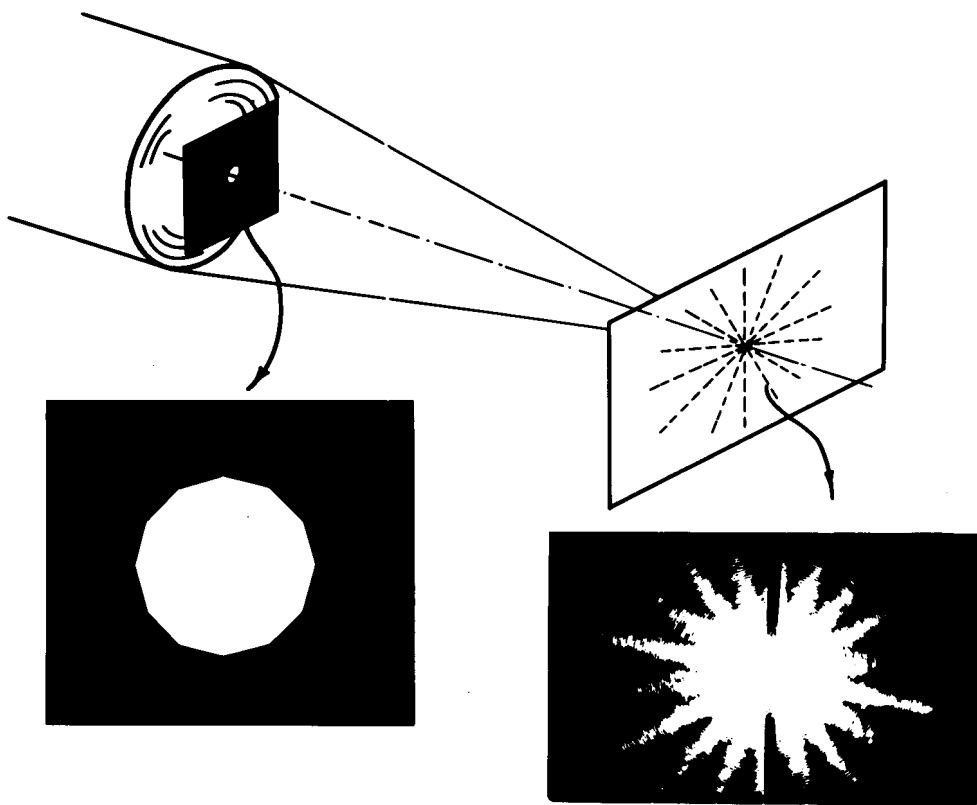


Рис. 6. Схема эксперимента, иллюстрирующая способность фурье-микроскопа выделять и отображать прямолинейные участки апертуры объектива.

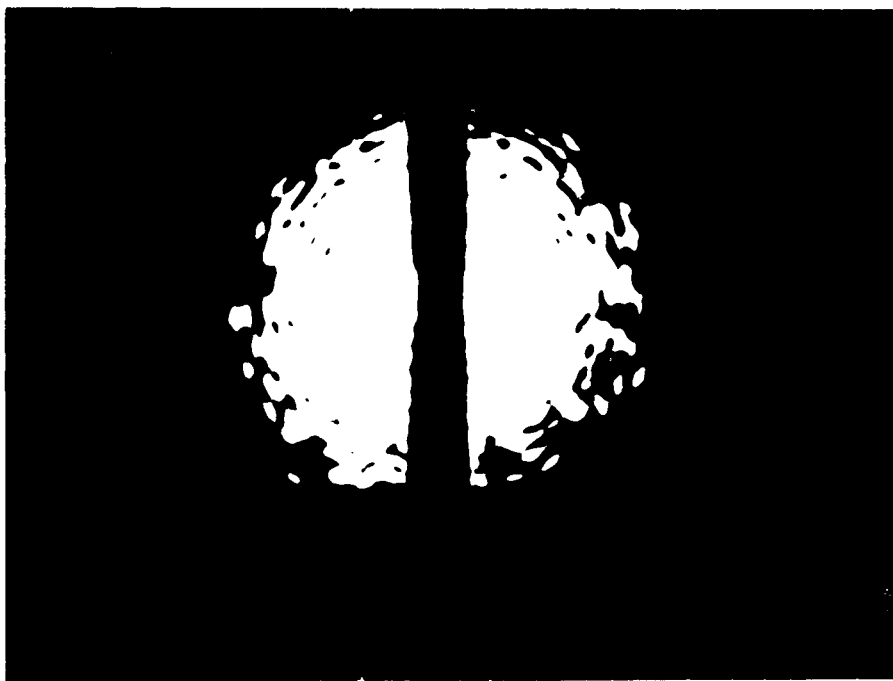
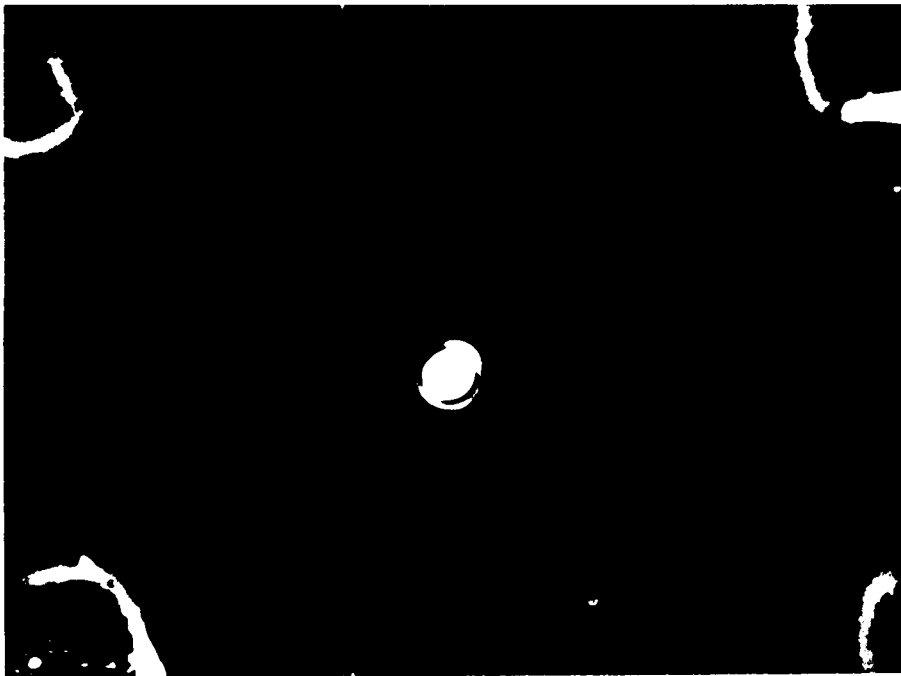


Рис. 7. последовательность фотографий картины дифракции
далекого поля при различных временах экспозиции.

