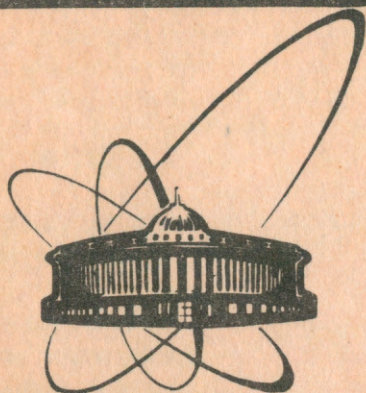


91-299



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P13-91-299

А. Я. Астахов, А. Кишваради, В. И. Краснослободцев,
Й. Молнар, Л. Молнар, Л. М. Сороко,
В. В. Терещенко, И. Торма

**МЕЗО-ОПТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-МИКРОСКОП
С ОДНОКАНАЛЬНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ**

1991

Астахов А.Я. и др.

P13-91-299

Мезо-оптический фурье-микроскоп
с одноканальными фотоприемниками

Описан мезо-оптический фурье-микроскоп (МФМ) с одноканальными фотоприемниками, приведена система освещения ядерной фотоэмульсии, а также рассмотрены четыре основных варианта реализации системы освещения ядерной фотоэмульсии. Приведены результаты экспериментов по наблюдению прямых следов частиц высокой ионизации в МФМ с одноканальными фотоприемниками. В заключение дано сравнение характеристик МФМ с ПЗС-матрицей и МФМ с одноканальными фотоприемниками.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

Перевод авторов

Astakhov A.Ya. et al.

P13-91-299

Meso-Optical Fourier Transform Microscope
with One-Channel Photodetectors

The meso-optical Fourier transform microscope (MFTM) with one-channel photodetectors is described. The illuminating system of the nuclear emulsion is given. Four basis versions of the illuminating system of the nuclear emulsion are presented. There are presented the results of the experimental testing of the device with straight line particle tracks of high ionization level. The comparison of the MFTM with CCD-matrix and of the MFTM with one-channel photodetectors is made in conclusion.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1991

1. ВВЕДЕНИЕ

Принцип действия мезо-оптического фурье-микроскопа (МФМ) с ПЗС-матрицей описан в [1,4]. В работах [5,6], посвященных сравнению МФМ с традиционным оптическим микроскопом, приведены погрешности измерений пространственно-угловых координат прямого следа частицы по положениям в кадре ПЗС-матрицы двух мезо-оптических изображений прямого следа частицы: $\sigma(x) = 6$ мкм для поперечной координаты, $\sigma(z) = 4$ мкм для вертикальной координаты, $\sigma(\theta_{xy}) = 1'$ для угла ориентации и $\sigma(\theta_z) = 7'$ для угла погружения прямого следа частицы.

Процесс поиска следов частиц заданной ориентации ведется при помощи МФМ без сканирования слоя ядерной фотоэмульсии по глубине, а селективность по углу ориентации прямого следа частицы в МФМ реализуется в реальном времени практически мгновенно. Благодаря этому быстродействие МФМ по крайней мере на два порядка выше, чем в системах с традиционным оптическим микроскопом.

Между тем быстродействие МФМ можно дополнительно повысить, если уменьшить время считывания мезо-оптических изображений прямых следов частиц заданной ориентации. Для этого ПЗС-матрицу следует заменить на два одноканальных фотоприемника. Такой переход можно сделать потому, что информация о положении прямого следа частицы в пространстве в МФМ сосредоточена в двух точечно-подобных пятнах мезо-оптических изображений. Каждое из них можно направить на вход одноканального фотоприемника и получить на его выходе соответствующий одномерный видеосигнал.

Напомним, что время считывания одного кадра ПЗС-матрицы с числом ячеек 232×144 составляет 20 мс при тактовой частоте 4,6 МГц. Для одноканального фотоприемника с постоянной времени 0,1 мс время считывания данных в одном фиксированном положении ядерной фотоэмульсии можно уменьшить до 0,2 мс или в 100 раз меньше, чем для ПЗС-матрицы. Если шаг между соседними дискретными положениями ядерной фотоэмульсии выбрать равным 2 мкм, то слой ядерной фотоэмульсии в МФМ с одноканальными фотоприемниками можно перемещать с линейной скоростью 10 мм/с. При длине освещенной области в 1 мм это дает быстродействие в $0,1 \text{ см}^2/\text{с}$.

МФМ с одноканальными фотоприемниками был кратко описан в работе /7/, посвященной исследованию новых методов подавления шумов в ядерной фотоэмульсии. Впервые в истории систем цифровой обработки изображений данные о прямом следе частицы формировались, а затем подвергались цифровой обработке в виде одного элемента одномерного видеосигнала, а не в виде двумерного массива элементов изображения, как это имело место во всех известных системах цифровой обработки изображений, в том числе в МФМ с ПЗС-матрицей.

В /7/ было показано, что благодаря предельно высокой концентрации информации о положении прямого следа частицы в пространстве, которая реализуется в МФМ с одноканальными фотоприемниками, отношение сигнала к шуму, S/N , в такой системе можно дополнительно повысить, если про дифференцировать одномерный сигнал на выходе фотоприемника, а затем перемножить между собой про дифференцированные сигналы правого и левого плеч МФМ с одноканальными фотоприемниками. Было показано, что таким методом удается обнаружить прямой след частицы, используя МФМ с одноканальными фотоприемниками, при исходном отношении сигнала к шуму $(S/N)_{\text{вх}} = 1:15$, которая после проведения указанных операций становится равным на выходе $(S/N)_{\text{вх}} = 10:1$, т.е. улучшается в 150 раз.

В данной работе подробно описан МФМ с одноканальными фотоприемниками. После изложения метода подавления шумов в первом прототипе МФМ даны принципиальная схема МФМ с одноканальными фотоприемниками, система освещения ядерной фотоэмульсии и четыре варианта съема информации, а также типичная операция юстировки элементов устройства. Приведены результаты экспериментов по наблюдению прямых следов частиц высокой ионизации, в которых были оценены пространственное и угловое разрешение МФМ с одноканальными фотоприемниками. В заключение дано сравнение МФМ с ПЗС-матрицей и МФМ с одноканальными фотоприемниками.

2. ПЕРВЫЙ ПРОТОТИП МФМ

Первый прототип МФМ, описанный в /8/, был фактически одноканальной системой. В нем каждое мезо-оптическое изображение прямого следа частицы полностью захватывалось одним из световодов и на выходе фотоприемника имело вид одномерного видеосигнала. Иначе говоря, в первом прототипе МФМ было реализовано преобразование термической информации о положении прямого следа частицы в пространстве в одномерные видеосигналы.

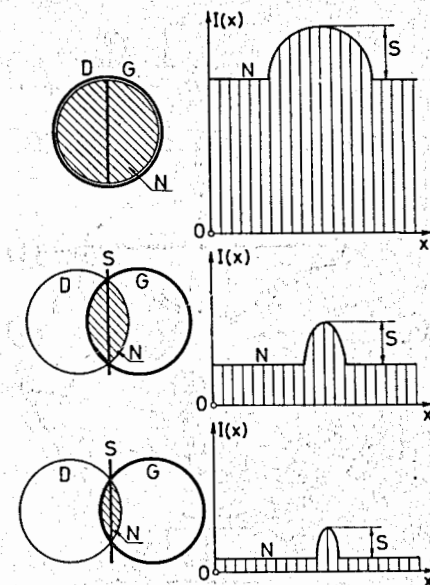
Однако при оценке метрических характеристик первого прототипа МФМ авторы работы /9/ столкнулись с проблемой фона от случайно

Рис.1. Слева — взаимное расположение поля зрения МФМ и входного торца световода при различных эксцентриситетах, а также прямой след частицы, мезо-оптическое изображение которой попадает в данный световод. Справа — видеосигналы в зависимости от поперечной координаты x на фоне шумов от случайно разбросанных зерен серебра в первом прототипе МФМ.

разбросанных зерен серебра и от непрямолинейных объектов в ядерной фотоэмульсии. Кроме мезо-оптического изображения прямого следа частицы в световод круглого сечения попадал фон указанной выше природы со всего поля зрения МФМ (рис.1). Чтобы повысить отношение сигнала к шуму, входной торец световода располагали с некоторым эксцентриситетом относительно центра поля зрения МФМ. В одном из таких положений интенсивность видеосигнала от мезооптического изображения уменьшалась примерно в два раза, а интенсивность шумов, прямо пропорциональная площади зоны перекрытия поля зрения МФМ с входным торцом световода, уменьшилась в 20 раз. В результате введения указанного эксцентриситета отношение сигнала к шуму возросло в 10 раз. Это позволило измерить видеосигналы от "серых" следов частиц в ядерной фотоэмульсии. Пространственное разрешение системы улучшилось с 1 мм до 0,2 мм.

3. МФМ С ОДНОКАНАЛЬНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Опыт работы /8/ был использован при конструировании МФМ с одноканальными фотоприемниками, принципиальная оптическая схема которого дана на рис.2. Сходящийся пучок света из источника 1 просвечивает слой ядерной фотоэмульсии 2. Дифрагированные на прямом следе частицы лучи света падают на мезо-оптический элемент с кольцевым откликом 3, который формирует два мезо-оптических изображения следа частицы, находящегося в освещенной области ядерной фотоэмульсии. Прежде чем попасть на входные торцы двух гребенок световодов 7, лучи света отражаются от плоского зеркала 4 и сдвоенного зеркала 5, а за



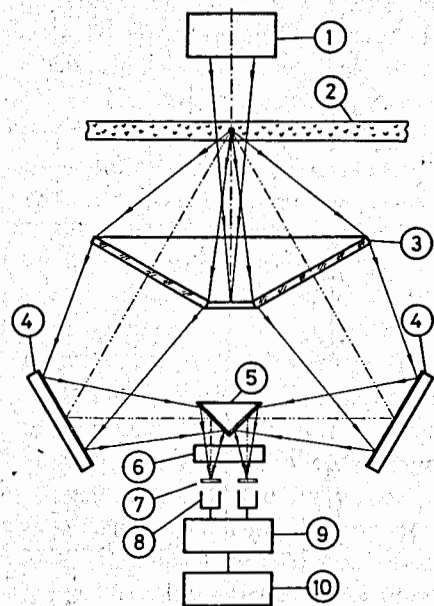


Рис.2. Принципиальная оптическая схема МФМ с одноканальными фотоприемниками: 1 — источник сходящегося пучка света, 2 — слой ядерной фотоэмульсии, 3 — мезо-оптический элемент с кольцевым откликом, 4 — плоские зеркала, 5 — двоящее зеркало, 6 — отрицательная цилиндрическая линза, 7 — гребенки световодов, 8 — фотоспротивления, 9 — электронные блоки, 10 — компьютер.

тем проходят через отрицательную цилиндрическую линзу 6. Выходные торцы световодов обращены к двум фотоспротивлениям 9. Сигналы фототока поступают в электронные блоки 9 и далее в управляющий компьютер 10.

Длина мезо-оптического изображения прямого следа частицы равна длине освещенной части этого следа частицы. В одном из опытов она равнялась 0,7 мм, а в другом 2,7 мм. Тем самым МФМ с одноканальными фотоприемниками может быть использован только для следов частиц в ядерной фотоэмульсии длиной не менее 1 мм.

Ширина мезо-оптического изображения в области расположения отрицательной цилиндрической линзы 6 определяется дифракцией света на мезо-оптическом элементе с кольцевым откликом 3 и составляет 2 мкм. После линейного увеличения в поперечном направлении, создаваемого линзой 6, ширина мезо-оптического изображения возрастает до 15 мкм, т.е. в 7,5 раз. При этом разрешение по предмету остается прежним и составляет

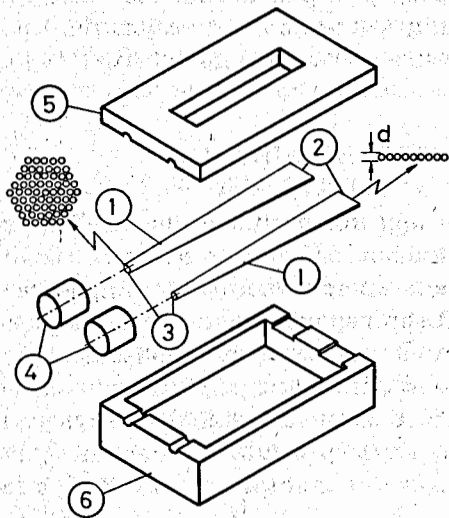
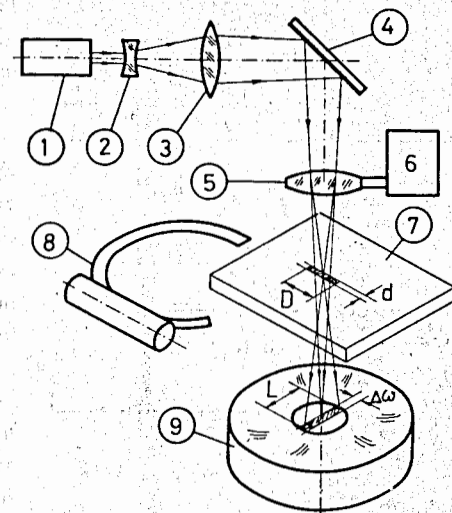


Рис.3. Гребенка световодов МФМ с одноканальными фотоприемниками: 1 — гребенка световодов, 2 — входные торцы, 3 — выходные торцы, 4 — фотоспротивления, 5 — верхняя крышка, 6 — корпус.

Рис.4. Система освещения ядерной фотоэмульсии в МФМ с одноканальными фотоприемниками: 1 — гелий — неоновый лазер, 2 — отрицательная линза, 3 — фурье-объектив, 4 — плоское зеркало, 5 — положительная цилиндрическая линза, 6 — микровинт, 7 — ядерная фотоэмульсия, 8 — поворотная вилка, 9 — мезо-оптическое зеркало с кольцевым откликом.



2 мкм. Диаметр отдельного световода в гребенке световодов, показанной отдельно на рис.3, равен 15 мкм.

Существенной частью конструкции МФМ с одноканальными фотоприемниками является система освещения ядерной фотоэмульсии. Как видно из рис.4, она содержит гелий — неоновый лазер 1, отрицательную линзу 2, фурье-объектив 3, плоское зеркало 4, положительную цилиндрическую линзу 5 и микровинт 6. Сходящийся пучок света имеет два одномерных кроссовера, один из которых находится в месте расположения ядерной фотоэмульсии 7, а другой — в месте расположения мезо-оптического зеркала с кольцевым откликом 9. Два продольных сечения такого сходящегося пучка света показаны на рис.5. Положение кроссовера в области ядерной фотоэмульсии задается микровинтом 6. Вторым существенным элементом системы освещения является поворотная

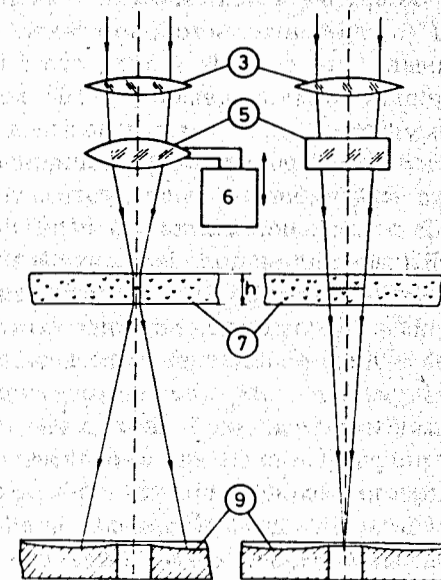


Рис.5. Продольные сечения сходящегося пучка света в МФМ с одноканальными фотоприемниками: слева — перпендикулярно искомому следу частицы, справа — вдоль этого следа. Обозначения элементов микроскопа соответствуют рис.4.

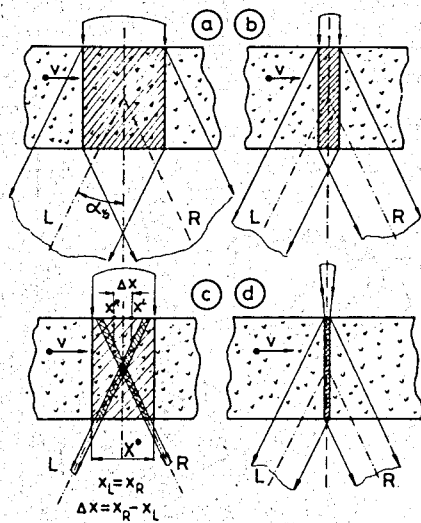


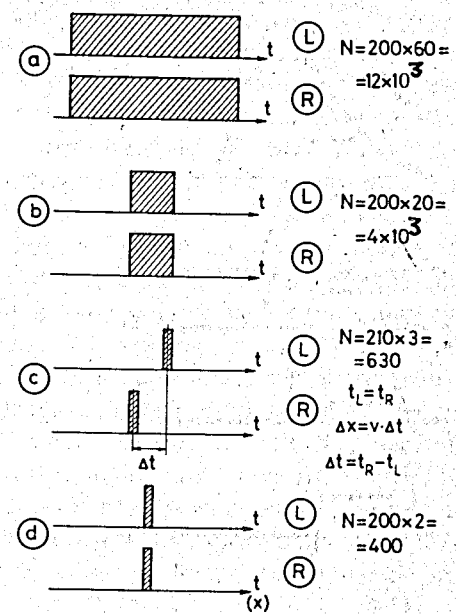
Рис.6. Четыре основных системы освещения в МФМ с одноканальными фотоприемниками: а) широкая область освещения, ~100 мкм, б) узкая область освещения, ~20 мкм, фотодетектор видит всю освещенную область, в) область освещения шириной ≥ 80 мкм, гребенки световодов видят только узкие наклонные зоны шириной 2 мкм, д) очень узкая область освещения, 2 мкм, фотодетектор видит всю освещенную область.

вилка 8, при помощи которой искомый след частицы с заданным углом ориентации устанавливаются вдоль осевой линии протяженной области освещения.

В МФМ с одноканальными фотоприемниками можно реализовать одну из четырех систем освещения ядерной фотоэмульсии (рис.6). В системе освещения (а) гребенка световодов отсутствует, так что фотодетектор видит всю широкую освещенную область. Площадь сечения освещенной области шириной 60 мкм равна $N = 1,2 \cdot 10^4$ мкм². Информация о z -координате прямого следа частицы отсутствует. В системе освещения (б) гребенка световодов также отсутствует. Отличие от системы освещения (а) состоит в том, что площадь сечения освещенной области шириной 20 мкм равна $N = 4 \cdot 10^3$ мкм². При толщине слоя ядерной фотоэмульсии $h = 200$ мм, наименьшая ширина освещенной области составляет 8 мкм, при условии, что ширина освещенной области будет постоянной на всю толщину ядерной фотоэмульсии.

В системе освещения (с) перед фотосопровожениями 8 установлены гребенки световодов 7. Благодаря этому внутри слоя ядерной фотоэмульсии формируются две пересекающиеся зоны наблюдения шириной 2 мкм и площадью поперечного сечения $N = 630$ мкм² каждая. Ширина освещенной области Δx_0 в системе освещения (с) должна удовлетворять условию: $\Delta x_0 > h \cdot \sin \alpha_{1/2}$, где $\alpha_{1/2}$ — угол, образованный центральным дифрагированным лучом света с оптической осью МФМ. В общем случае мезо-оптические сигналы от данного следа частицы появятся в двух плечах МФМ при различных положениях каретки МФМ: x_L и x_R . Разность этих двух координат является мерой z_0 -координаты прямого следа частицы, а их сумма задает его x_0 -координату^{1,3/}.

Рис.7. Видеосигналы на выходе фотоприемников в зависимости от координаты x или времени t для четырех систем освещения, показанных на рис.6. Справа приведены площади поперечной освещенной области или зоны наблюдения в (мкм)².



На рис.7 приведены видеосигналы в зависимости от координат каретки МФМ или момента времени t , если движение кареток происходит с постоянной скоростью, для всех четырех систем освещения, показанных на рис.6. Заметим, что система освещения (д) с шириной освещенной зоны 2 мкм и площадью поперечного сечения $N = 400$ мкм² дает предельно высокое отношение сигнала к шуму. Однако для реализации такой системы освещения необходимо использовать мезооптические элементы^{10,11/}. Так как в системе освещения (д) нет гребенки световодов, то информация о z_0 -координате прямого следа частицы отсутствует.

4. ЮСТИРОВКА

Чтобы установить положительную цилиндрическую линзу 5 на рис.4 в оптимальное положение, необходимо выполнить специфические для МФМ юстировочные операции. Цель их состоит в том, чтобы кроссовер сходящегося пучка имел заданную ширину в пределах слоя ядерной фотоэмульсии. Оптимальное положение положительной цилиндрической линзы 5 на рис.4 находят следующим образом. Измеряют видеосигналы на выходе фотоприемника в зависимости от поперечной координаты x при различных положениях цилиндрической линзы, которое задается микровинтом 6. Результаты таких измерений приведены на рис.8; а на рис.9 показаны значения полной ширины видеосигнала, Γ_t , и ширины плато на вершине видеосигнала, Γ_{pL} , при различных положениях положительной цилиндрической линзы 5 на рис.4. Видно, что кроссовер сходящегося пучка света расположен внутри слоя ядерной фотоэмульсии при положении указанной линзы с $z_L = 15,3$ мм, а эффективная ширина

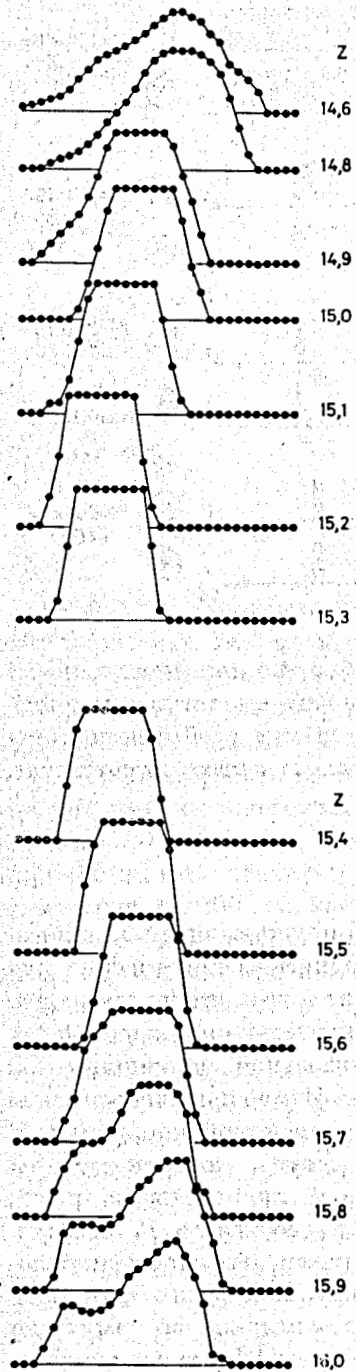


Рис.8. Видеосигналы на выходе фотоприемника в зависимости от координаты x при различных положениях положительной цилиндрической линзы в системе освещения, показанной на рис.6b).

кроссовера равна 18 мкм. Заметим, что в данной системе освещения положение положительной цилиндрической линзы 5 на рис.4 необходимо фиксировать с точностью до 0,1 мм.

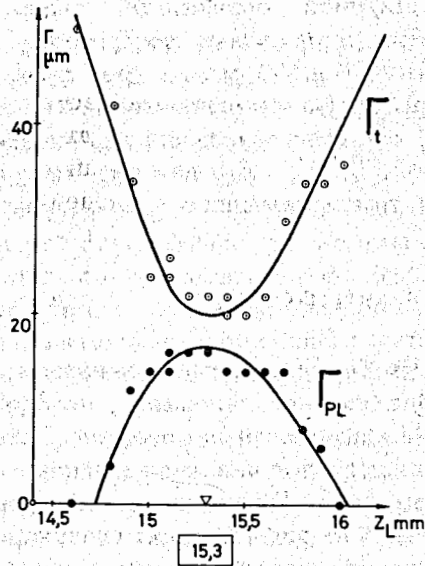


Рис.9. Полная ширина видеосигнала на выходе фотоприемника, Γ_t , и ширина плато на вершине соответствующих видеосигналов, Γ_{PL} , при различных положениях цилиндрической линзы. Данные получены из рис.8 для системы освещения b).

5. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Исследование характеристик МФМ с одноканальными фотоприемниками было проведено на параллельных следах частиц высокой ионизации — ядер неона, ускоренных до импульса 4,5 ГэВ/с на нуклон. На рис.10 показан типичный видеосигнал на выходе фотоприемника в зависимости от координаты каретки x для системы освещения, показанной на рис.6 (a). Шаг между соседними отсчетами равнялся 10 мкм, а ширина пика на полувысоте составляла 80 мкм. Видеосигнал, показанный на рис.10, относится к области ядерной фотозумьсии, где расположены два дублета из следов ядер неона, которые были исследованы ранее [1,12]. Кроме пиков от следов ядер неона четко видны пики от следов частиц с меньшей ионизацией. Это указывает на то, что отношение сигнала к шуму в этой системе выше, чем в МФМ с ПЗС-матрицей. Если след частицы идет под углом к осевой линии узкой освещенной области, то ширина пика увеличивается, а амплитуда видеосигнала уменьшается. При поиске следов частиц заданной ориентации поворотную вилку 8 на рис.4 устанавливают в положение, когда искомый след частицы параллелен осевой линии освещенной области.

Аналогично была испытана система освещения, показанная на рис.6 (c), с гребенкой световодов 7. На рис.11 приведен видеосигнал в зависимости от координаты x . Ширина пика от следа частицы равна 5 мкм вместо ожидаемой ширины в 2 мкм. Пространственное разрешение в указанной схеме освещения составляет, таким образом, 5 мкм.

Погрешность измерения угла ориентации следа частицы равна наименьшей из двух величин: 1) ширине видеосигнала вдоль угловой координаты $\Delta\theta_1$, которая определяется шириной Δx_0 и длиной D освещенной области,

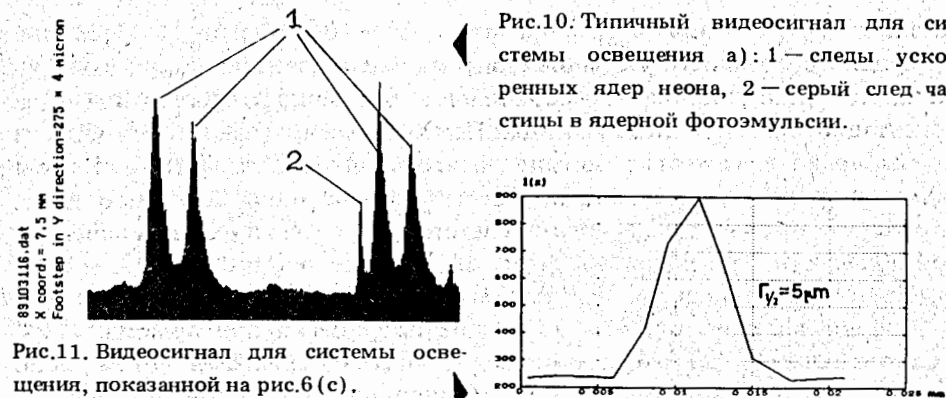


Рис.10. Типичный видеосигнал для системы освещения a): 1 — следы ускоренных ядер неона, 2 — серый след частицы в ядерной фотозумьсии.

Рис.11. Видеосигнал для системы освещения, показанной на рис.6 (c).

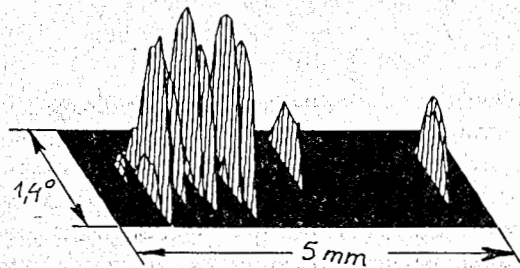


Рис.12. Результаты обмера следов ядер неона в системе координат (x, θ_{XY}) .

$$\Delta\theta_1 = \frac{\Delta x_0}{D}, \quad (1)$$

и 2) ширине $\Delta\theta_2$, которая определяется длиной D освещенной области и радиусом R

фокальной окружности, вдоль которой расположены мезо-оптические изображения прямых следов частиц,

$$\Delta\theta_2 = \frac{D}{R}. \quad (2)$$

В оптимальных условиях обе эти ширины $\Delta\theta_1$ и $\Delta\theta_2$, должны быть равны друг другу:

$$\frac{\Delta x_0}{D} = \frac{D}{R}, \quad (3)$$

откуда

$$D_{opt} = \sqrt{\Delta x_0 \cdot R}. \quad (4)$$

Так, например, для $\Delta x_0 = 2$ мкм и $R = 80$ мм имеем $D_{opt} = 0,4$ мм, а для $\Delta x_0 = 20$ мкм $D_{opt} = 1,26$ мм. Соответствующая оптимальная ширина видеосигнала, равная

$$\Delta\theta_{opt} = \sqrt{\frac{\Delta x_0}{R}}, \quad (5)$$

составит $\Delta\theta = 3^\circ$ для $D_{opt} = 0,4$ мм и $\Delta\theta = 10^\circ$ для $D_{opt} = 1,26$ мм.

В действительности указанные оптимальные значения D_{opt} , как правило, не удовлетворяют требованиям к погрешности измерения угла ориентации прямого следа частицы. Поэтому длину освещенной области D выбирают значительно больше оптимального значения D_{opt} . В этом случае ширина видеосигнала полностью определяется величиной $\Delta\theta_1$, при условии, если длина гребенки световодов не меньше длины освещенной области D . Так, например, для $\Delta x_0 = 2$ мкм и $D = 3$ мм $\Delta\theta_1 = 3,6'$.

На рис.12 приведены результаты измерения пространственной (x) и угловой координаты (θ_{XY}) следов ядер неона при помощи МФМ с одноканальными фотоприемниками в системе освещения (b) на рис.6. Видно, что протяженность видеосигналов вдоль угловой координаты

θ_{XY} равна 1° , а погрешность оценки положения центра тяжести пика видеосигнала равна $\sigma(\theta_{XY}) = 5'$. Погрешность измерения координаты x равна $\Delta x = 10$ мкм.

6. СРАВНЕНИЕ МФМ С ПЗС-МАТРИЦЕЙ И МФМ С ОДНОКАНАЛЬНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

В заключение сопоставим характеристики МФМ с ПЗС-матрицей и МФМ с одноканальными фотоприемниками. Рассмотрим двухмерный видеосигнал на выходе МФМ с ПЗС-матрицей для серых следов частиц с линейной плотностью зерен серебра ≈ 100 на 100 мкм длины следа частицы (рис.13). Видно, что мезо-оптическое изображение следа частицы состоит из совокупности элементарных видеосигналов, которые формируются каждым отдельным элементом ПЗС-матрицы. В МФМ с одноканальными фотоприемниками такого расчленения мезо-оптического изображения на отдельные элементы не происходит. Если прямой след частицы попадает в зону наблюдения, показанную на рис.6 (с), то на выходе фотоприемника возникает пик интенсивности, ширина которого в оптимальных условиях наблюдения равна шагу перемещения каретки между двумя соседними отсчетами видеосигнала. После того, как след частицы выйдет из зоны наблюдения, сигнал фототока возвращается к своему исходному значению, которое определяется шумами от зерен серебра, случайно разбросанных в ядерной эмульсии.

Тем самым МФМ с одноканальными фотоприемниками дает предельно высокую концентрацию информации о поперечной координате прямого следа частицы. Иначе обстоит дело с угловой координатой. В сагитальном сечении МФМ представляет собой одномерную камеру обскуры, из-за чего здесь нет фокусировки света вдоль угловой координаты. В описываемой конструкции МФМ длина мезо-оптического изображения вдоль угловой координаты равна длине области освещения. Чтобы уменьшить шум и увеличить интенсивность

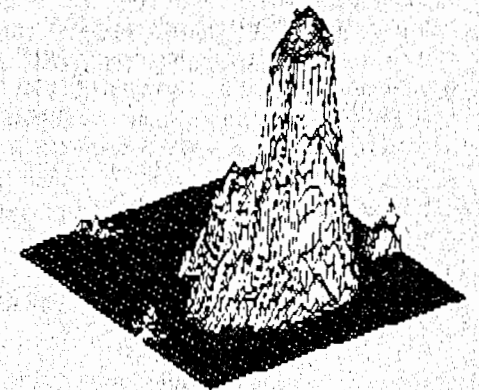


Рис.13. Двухмерный видеосигнал на выходе ПЗС-матрицы в системе координат (x, θ_{XY}) .

видеосигнала от прямого следа частицы, длину области освещения желательно взять побольше, что в свою очередь приведет к повышению избирательности по углу ориентации прямого следа частицы. Однако одновременно увеличится длина мезо-оптического изображения. В результате мы не получим прямого выигрыша в отношении сигнала к шуму. Если оставаться в рамках выше описанной конструкции МФМ с одноканальными фотоприемниками, то выбор оптимальных условий измерений, по-видимому, следует производить с учетом других факторов эксперимента.

7. ВЫВОДЫ

1. Показано, что мезо-оптический фурье-микроскоп (МФМ) с одноканальными фотоприемниками дает более высокое сжатие информации о положении прямого следа частицы в пространстве, чем МФМ с ПЗС-матрицей.
2. Погрешность измерения поперечной координаты прямого следа частицы в МФМ с одноканальными фотоприемниками не хуже 5 мкм. Погрешность измерения угла ориентации прямого следа частицы равна около $5'$ при интервале захвата угла ориентации прямого следа частицы в 1° .
3. Потенциальное быстродействие МФМ с одноканальными фотоприемниками равно $0,1 \text{ см}^2/\text{с}$ поверхности ядерной фотоэмульсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Astakhov A. Ya. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1989, A283, p.13.
2. Сороко Л.М. — Мезооптика и методика трековых детекторов. ЭЧАЯ, М.: Энергоатомиздат, 1989, т.20, вып.1, с.155.
3. Soroko L.M. — Axicons and Meso-optical Imaging Devices. In: Progress in Optics, ed. E.Wolf, Elsevier, 1989, v.27, p.109.
4. Szoplik T. — Line Detection and Directional Analysis of Images. In: Optical Processing and Computing, ed. H.N.Arsenault et al., Academic, 1989, p.391.
5. Астахов А.Я. и др. — Препринт ОИЯИ, Д13-89-449, 1989, Дубна.
6. Астахов А.Я. и др. — Препринт ОИЯИ Д13-89-450, Дубна, 1989.
7. Кишваради А. и др. — Препринт ОИЯИ, Д13-89-550, Дубна, 1989.
8. Астахов А.Я. и др. — Сообщение ОИЯИ, P13-83-119, Дубна, 1983.
9. Астахов А.Я., Сороко Л.М. — Сообщение ОИЯИ, P13-83-120, Дубна, 1983.
10. Сороко Л.М. — Микроскоп. Авторское свидетельство СССР, № 1.273.861, 1986, Бюлл. № 44, с.180.
11. Сороко Л.М. — Сообщение ОИЯИ, P13-87-576, Дубна, 1987.
12. Астахов А.Я. и др. — Сообщение ОИЯИ, P13-85-378, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 июля 1991 года.