

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P13-86-240

Д.Бенце, И.Г.Пальчикова\*, А.Г.Полещук\*,  
Л.М.Сороко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОБРАЖАЮЩИХ СВОЙСТВ  
КИНОФОРМА С ПОПЕРЕЧНОЙ МЕЗООПТИЧНОСТЬЮ**

---

\* Институт автоматики и электрометрии  
СО АН СССР, Новосибирск

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Киноформом называют фазовый дифракционный оптический элемент, который преобразует исходный волновой фронт в заданный выходной с минимальными потерями световой энергии <sup>/1/</sup>. Лучше всего изучены свойства киноформа с кольцевым откликом <sup>/2/</sup>. В терминах мезооптики <sup>/3/</sup> такой киноформ обладает поперечной мезооптичностью. Как показано в <sup>/4/</sup>, мезооптические элементы позволяют решить многие туниковые ситуации, возникающие в физике высоких энергий.

В <sup>/5,6/</sup> описаны методы изготовления киноформных элементов, даны методы их расчета, а также изложены технологии изготовления и возможные применения киноформов. Оптический зеркальный элемент с кольцевым откликом и высокой числовой апертурой используется в мезооптическом фурье-микроскопе для ядерной фотоэмульсии <sup>/7/</sup>. Однако трудоемкая технология изготовления мезооптического зеркала с кольцевым откликом препятствует широкому распространению таких устройств в физических лабораториях. Указанную ситуацию можно изменить, если вместо мезооптического зеркала использовать киноформ с кольцевым откликом. Даже при больших значениях числовой апертуры мезооптический киноформ имеет небольшие размеры, малый вес, а также поддается быстрому тиражированию.

Объектом наблюдения в мезооптическом фурье-микроскопе является линейная цепочка зерен серебра диаметром 0,5 мкм. Это означает, что для наблюдения такого объекта числовая апертура киноформа с кольцевым откликом должна быть не менее 1, а разрешение вдоль радиальной координаты должно быть равно 1 мкм. Прежде чем изготовить киноформ с указанными характеристиками, необходимо исследовать общие свойства киноформа с кольцевым откликом для указанного выше класса объектов.

В работе исследованы изображающие свойства киноформа с кольцевым откликом на примере круглого отверстия, прямоугольной щели, полуплоской шторки, а также линейной цепочки круглых отверстий. Показано, что при освещении киноформа с кольцевым откликом сходящимся пучком света происходит оконтуривание кольцевого изображения указанных объектов. При этом сохраняется информация об ориентациях сторон прямоугольной щели или линейной цепочки из нескольких круглых отверстий. Результаты экспериментов сопоставлены со свойствами ножа Фуко и интерпретированы в терминах одномерного преобразования Гильберта <sup>/9/</sup>.

## 2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовался киноформ с кольцевым откликом диаметром 40,8 мм и фокусным расстоянием  $f = 202$  мм. Центральная часть киноформа диаметром 0,7 мм нарезки не имела. Киноформ был рассчитан для работы в параллельном пучке света. Наименьшая ширина дифракционной структуры киноформа равнялась 10 мкм. На рис.1 дана типичная схема эксперимента. Пучок света от однододового гелий-неонового лазера 1 направлялся на фурье-объектив 2, за которым находился объект 3. Киноформ 4 располагался в плоскости пространственных частот. Фотоаппарат 5 с насадочными кольцами и объективом от микроскопа 6 располагался так, чтобы сфотографированное изображение имело требуемый масштаб. Последний фиксировался при помощи объект-шкалы с ценой деления 10 мкм, которая фотографировалась в тех же условиях.

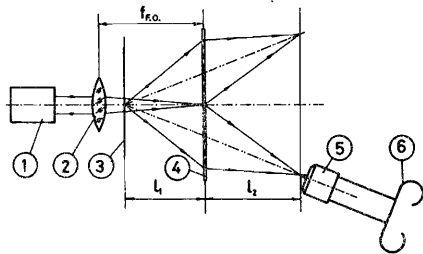


Рис.1. Общая схема эксперимента: 1 - гелий-неоновый лазер, 2 - фурье-объектив, 3 - объект, 4 - киноформ с кольцевым откликом, 5 - объектив микроскопа  $\times 80,24$  с насадочными кольцами, 6 - фотоаппарат.

В описываемых экспериментах условие параллельности падающего пучка света для киноформа было нарушено. По этой причине, а также из-за небольших несовершенств данного киноформа наблюдались эффекты перекрестной дифракции света. Чтобы их убрать, противоположная половина киноформа закрывалась листом черной бумаги. В одном опыте были закрыты три квадранта всей апертуры киноформа. Чтобы согласовать масштаб наблюдаемого изображения с размерами кадра фотоаппарата 24x36 мм, расстояния  $l_1$  и  $l_2$  менялись от одного эксперимента к другому. Время экспозиции фотопленки "Микрат 300" контролировалось положением поляризационного фильтра, установленного перпендикулярно оптической оси системы.

Объектами наблюдения были спектральная щель оптической скамьи ОСК-3, ограниченная по высоте двумя пластинками с прямыми краями, а также круглые отверстия в алюминиевой фольге или "проколы" на стекле, покрытом тонким слоем хрома.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис.2 изображен кольцевой отклик данного киноформа, полученный в параллельном пучке света. Ширина кольца равна 10 мкм,

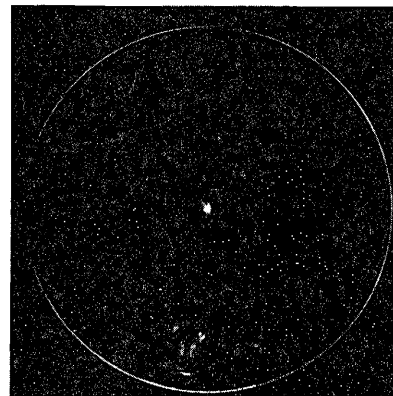
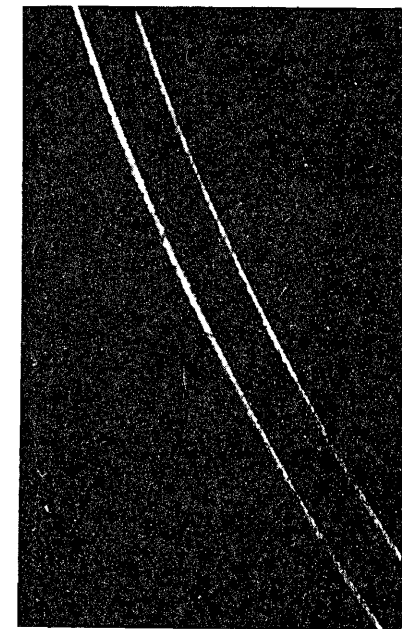


Рис.2. Фотография фокального кольца, формируемого киноформом с кольцевым откликом в параллельном пучке света.

диаметр 20,4 мм. На рис.3 приведены фрагменты изображения круглого отверстия диаметром 0,83 мм в двух различных масштабах. Изображения линейной цепочки из трех круглых отверстий приведены на рис.4. На рис.5 показаны области, где изображения двух круглых отверстий пересекаются разноименными или одноименными кольцами. В случае линейной цепочки из трех круглых отверстий число областей пересечения равно пяти /рис.6/.



а



б

Рис.3. Мезооптическое изображение круглого отверстия в фольге диаметром 0,83 мм: а/  $l_1 = 504$  мм,  $l_2 = 336$  мм, без объектива микроскопа, б/  $l_1 = 773$  мм,  $l_2 = 272$  мм.

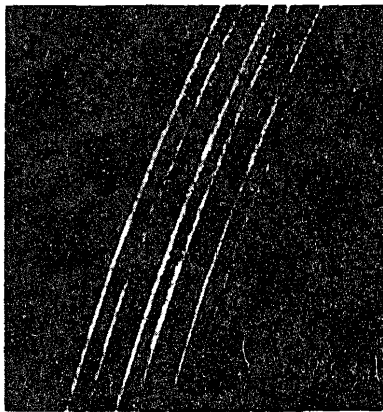


Рис.4. Фрагмент мезооптического изображения линейной цепочки из трех круглых отверстий диаметром 0,25 мм,  $l_1 = 773$  мм,  $l_2 = 272$  мм.

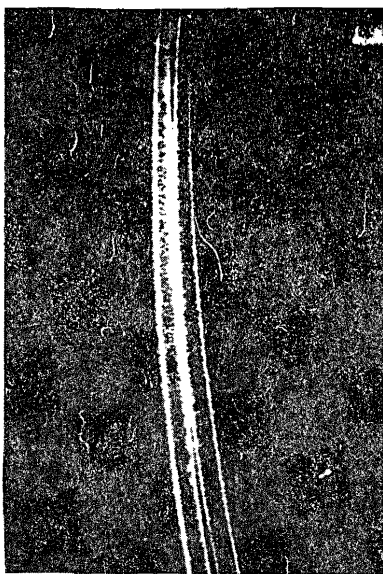


Рис.5. Фрагменты мезооптического изображения двух круглых отверстий диаметром 0,3 мм на расстоянии 1,06 мм друг от друга,  $l_1 = 773$  мм,  $l_2 = 272$  мм: а/ область пересечения разноименных контуров, б/ область пересечения одноименных контуров.

На рис.7 даны мезооптические изображения прямоугольной щели. Протяженность по углу обратно пропорциональна ширине щели в направлении, перпендикулярном к соответствующему краю прямоугольной щели. На рис.8 ширина щели равнялась 30 мкм. Видно, что киноформ с разрешающей способностью 10 мкм четко отображает оба



Рис.6. Общий вид мезооптического изображения линейной цепочки из трех круглых отверстий:  $l_1 = 773$  мм,  $l_2 = 272$  мм, без объектива микроскопа.

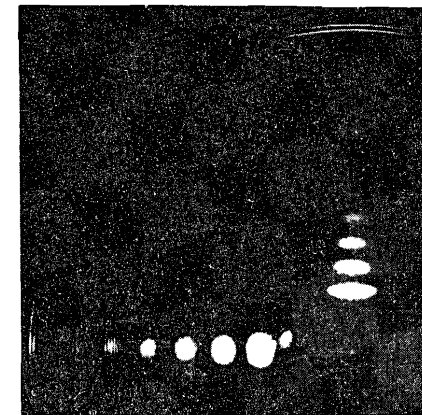


Рис.7. Общий вид мезооптического изображения прямоугольной щели размером 0,283x0,378 мм:  $l_1 = 773$  мм,  $l_2 = 272$  мм.

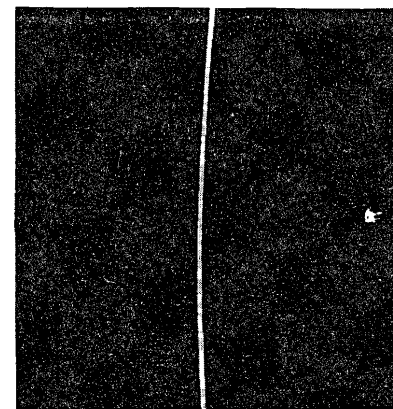


Рис.8. Фрагмент мезооптического изображения спектральной щели шириной 30 мкм:  $l_1 = 273$  мм,  $l_2 = 660$  мм.

края такой узкой щели. На рис.9 показаны мезооптические изображения полуплоской шторки, описываемой одномерной функцией Хэвисайда  $Y(x_1)$ .

Видно, что киноформ с кольцевым откликом, помещенный в фурье-систему со сходящимся освещающим пучком света, формирует мезооптические изображения объектов с резкими обрывами в виде контуров объекта. Аналогичный эффект оконтуривания наблюдают в системах гильберт-оптики<sup>19</sup>. По этой причине были выполнены контроль-

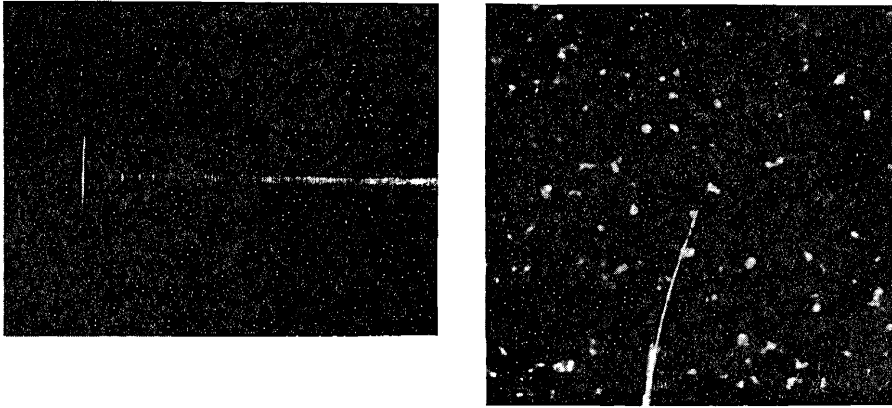


Рис.9 Мезооптическое изображение полуплоской шторки и его фрагмент, лежащий выше линии основного изображения.

ные эксперименты с прямоугольной щелью по схеме, которая дана на рис.10. Сходящийся пучок света просвечивал объект-транспарант. Нож Фуко располагался в плоскости пространственных частот. Фуко-образы щелей размером 0,4 мм и 0,1 мм показаны на рис.11.

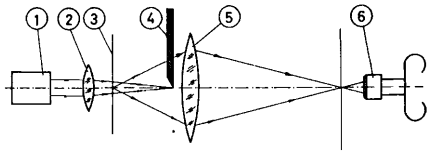


Рис.10. Схема эксперимента по формированию изображения щели при помощи ножа Фуко: 1 - гелий-неоновый лазер, 2 - фурье-объектив, 3 - объект, 4 - нож Фуко, 5 - объектив, 6 - фотоаппарат.

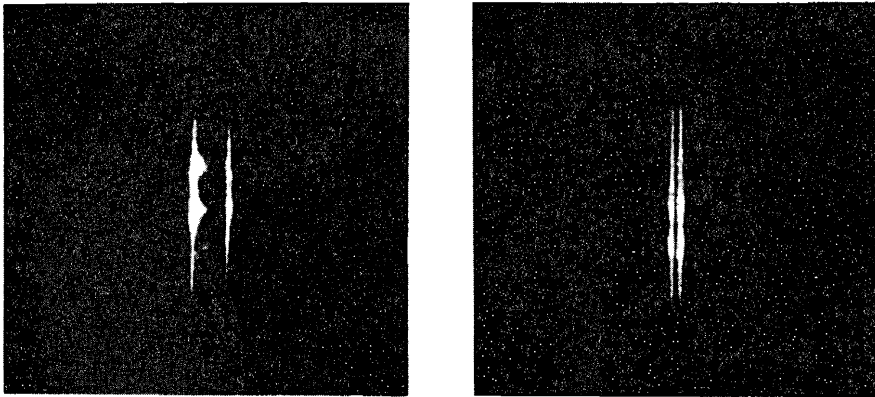


Рис.11. Фуко-образы щелей шириной 0,4 мм и 0,05 мм.

#### 4. ТЕОРИЯ

Эвристическое описание наблюдаемых явлений можно сделать в терминах одномерного преобразования Гильберта при помощи схемы, приведенной на рис.12. Сходящийся пучок света просвечивает квазиодномерный объект, амплитудное пропускание которого задается функцией  $f(x_1)$ . В плоскости пространственных частот возникает распределение света, амплитуда которого равна фурье-образу  $F(\omega_2)$  функции  $f(x_1)$ . Если перекрыть левую часть пространственных частот,  $\omega_2 < 0$ , то перед линзой обратного преобразования Фурье возникает поле с амплитудой

$$F'(\omega_2) = F(\omega_2) \cdot Y(\omega_2), \quad /1/$$

где  $Y(\omega)$  - функция Хэвисайда. Амплитуда поля в плоскости изображения равна

$$f_{\phi}^{(1)}(x_3) = \frac{1}{2} [f(x_3) - i\chi(x_3)], \quad /2/$$

где  $\chi(x)$  - гильберт-образ функции  $f(x)$  <sup>/9/</sup>. Распределение интенсивности света описывается функцией

$$I_{\phi}(x_3) = |f_{\phi}^{(1)}(x_3)|^2 = \frac{1}{4} [ |f(x_3)|^2 + |\chi(x_3)|^2 ]. \quad /3/$$

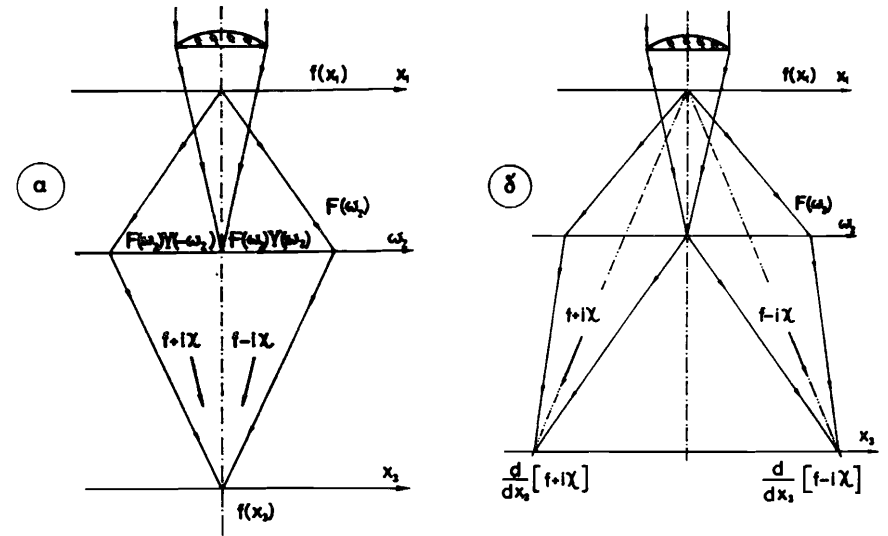


Рис.12. Эвристическое описание прохождения света, дифрагированного на одномерном транспаранте: а/ через обычную изображающую систему, б/ через систему, содержащую в плоскости пространственных частот киноформ с кольцевым откликом.

Это - типичная схема визуализации фазовых объектов при помощи ножа Фуко. Если перекрыть правую часть пространственных частот,  $\omega_2 > 0$ , то амплитуда поля в плоскости пространственных частот станет равной

$$f_{\Phi}^{(2)}(x_3) = \frac{1}{2} [f(x_3) + i\chi(x_3)]. \quad /4/$$

Если плоскость пространственных частот нигде не перекрыта, то амплитуда поля в плоскости изображения равна

$$\frac{1}{2} [f(x_3) + i\chi(x_3)] + \frac{1}{2} [f(x_3) - i\chi(x_3)] = f(x_3). \quad /5/$$

Наконец, если в левой полуплоскости пространственных частот поместить фазовую пластину со скачком фаз  $180^\circ$ , то перед линзой обратного преобразования Фурье возникает поле с амплитудой

$$F''(\omega_2) = iF(\omega_2)\text{sgn}(\omega_2), \quad /6/$$

где  $\text{sgn}(\omega)$  - знаковая функция.

Теперь поместим в плоскости пространственных частот кольцевую дифракционную решетку или отрицательную коническую линзу<sup>/2,5/</sup>. Возникнет мезооптическая система, которая почти полностью эквивалентна киноформе с кольцевым откликом<sup>/2,5/</sup>. Отличие состоит в том, что в центральной части исследованного киноформа отсутствует нарезка. Поэтому указанное выше эвристическое описание необходимо скорректировать.

Так как нами рассматривается только квазиодномерное приближение, то как прямоугольную щель, так и круглое отверстие можно описать одномерной функцией "прямоугольный импульс"

$$f(x) = \text{rect}_A(x) = \frac{1}{2A} \begin{cases} 1, & |x| < A, \\ 0, & |x| > A. \end{cases} \quad /7/$$

Гильберт-образ этой функции равен

$$\chi(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-A}^A \frac{1}{2A} \frac{d\xi}{(\xi-x)} = \frac{1}{2\pi A} \ln \left| \frac{A+x}{A-x} \right|. \quad /8/$$

Фурье-образ функции "прямоугольный импульс" равен

$$F(\omega) = \int_{-A}^A \frac{1}{2A} \exp(-i\omega x) dx = \frac{\sin \omega A}{\omega A}. \quad /9/$$

Обратное преобразование Фурье имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega A}{\omega A} \exp(+i\omega x) d\omega = \text{rect}_A(x). \quad /10/$$

Если нож Фуко закрывает левую полуплоскость пространственных частот, то амплитуда поля в плоскости изображения равна

$$f_1(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \omega A}{\omega A} \exp(i\omega x) d\omega = \frac{1}{2} [f(x) - i\chi(x)]. \quad /11/$$

Если учесть мертвую зону в центре киноформа, которая перекрывает область пространственных частот  $|\omega| \leq \Omega$ , то амплитуда поля в плоскости изображения будет равна

$$f_2(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega}^{\infty} \frac{\sin \omega A}{\omega A} \exp(i\omega x) d\omega = \frac{1}{2} [f(x) - i\chi(x)] - \frac{1}{2\pi} \int_0^{\Omega} \frac{\sin \omega A}{\omega A} \exp(i\omega x) d\omega. \quad /12/$$

Ограничимся размерами объекта и геометрией опыта, когда  $\Omega A \ll 1$ . Тогда /12/ перейдет в

$$f_2(x) \approx \frac{1}{2} [f(x) - i\chi(x)] - \frac{1}{2\pi i x} [\exp(i\Omega x) - 1] = \left[ \frac{1}{2} f(x) - \Delta_1(x) \right] - i \left[ \frac{1}{2} \chi(x) + \Delta_2(x) \right], \quad /13/$$

где

$$\Delta_1(x) = \frac{\sin \Omega x}{2\pi x}, \quad \Delta_2(x) = \frac{1 - \cos \Omega x}{2\pi x}. \quad /14/$$

Таким образом, интенсивность изображения щели в квазиодномерном приближении с учетом мертвой зоны в центре киноформа равна

$$I_2(x) = \left| \frac{1}{2} f(x) - \Delta_1(x) \right|^2 + \left| \frac{1}{2} \chi(x) + \Delta_2(x) \right|^2. \quad /15/$$

На рис.13 приведены результаты расчета  $I_2(x)$  для  $A = 1$  и  $\Omega = 0, 2$ , а также распределение интенсивности света без мертвой зоны в центре киноформа для  $A = 1$  и  $\Omega = 0$ . Видно, что мертвая зона в центре киноформа повышает контраст оконтуривания.

Однако из рис.13 видно, что оконтуривание объекта, которое дает киноформ с кольцевым откликом, имеет существенно более высокий контраст, чем результаты расчета на рис.13. Это можно объяснить некорректностью квазиодномерной модели, лежащей в основе соотношения /15/. Действительно, относительный вклад от различных участков киноформа в амплитуду поля мезооптического изображения вблизи фокального кольца изменяется линейно с расстоянием до центра киноформа. Поэтому за киноформом возникает поле с амплитудой

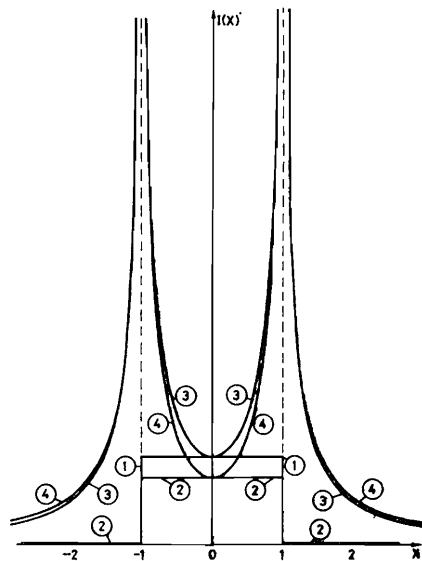


Рис.13. Эффект оконтуривания изображения щели в системе с ножом Фуко. Приведены расчетные распределения интенсивности света: 1 - для исходного объекта, 2 - интенсивность вещественной части распределения света при наличии мертвой зоны для  $A=1$  и  $\Omega=0,2$ ; 3 - полная интенсивность света без мертвой зоны, 4-полная интенсивность света при наличии мертвой зоны.

$$F(\omega_2) = \omega \cdot F(\omega_2) \cdot Y(\omega_2) \quad /16/$$

вместо амплитуды уравнения /1/. Наличие множителя  $\omega$  в /16/ приводит к дифференцированию функции  $f_{\Phi}^{(1)}(x_3)$  в /2/. Амплитуда поля вблизи фокального кольца равна /10/

$$f_{\Phi}^{(3)}(x_3) = \frac{d}{dx_3} [f(x_3) - i\chi(x_3)]. \quad /17/$$

Если  $f(x_1)$  описывается функцией "прямоугольный импульс" /7/, то для нее

$$f_{\Phi}^{(3)}(x_3) = \frac{1}{2A} [\delta(x+A) - \delta(x-A)] - \frac{i}{2\pi A} \left[ \frac{1}{x+A} + \frac{1}{x-A} \right]. \quad /18/$$

Видно, что появление пиков от дельта-функций в точках  $x = \pm A$  приводит к существенному увеличению контраста изображения. Функция  $f_{\Phi}^{(3)}(x_3)$  лучше согласуется с результатами эксперимента, приведенными на рис.3 и 7, чем квазиодномерная модель.

## 5. ВЫВОДЫ

Показано, что при освещении киноформа с кольцевым откликом сходящимся пучком света происходит оконтуривание изображений

объектов с резкими обрывами. При этом сохраняется информация об ориентации и положении сторон прямоугольной щели или линейной цепочки из нескольких круглых отверстий. Результаты экспериментов можно интерпретировать в терминах одномерного преобразования Фуко-Гильберта, если при этом учесть изменяющийся вклад различных участков киноформа с кольцевым откликом в формирование мезооптических изображений указанных объектов. В этих условиях наличие мертвой зоны на киноформе не повлияет на структуру мезооптического изображения и не будет препятствовать применению киноформа с кольцевым откликом в мезооптическом фурье-микроскопе для ядерной фотозумльсии.

Авторы выражают благодарность Ш.Ф.Хамидову за помощь при проведении экспериментов, а также В.В.Вертопрахову и Ю.В.Чугую за полезные обсуждения результатов работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lesen I.B. et al. IBM J.Res. and Develop., 1969, v.13, No.3, p.150.
2. Коронкевич В.П. и др. Препринт ИА и Э СО АН СССР, Новосибирск, 1985, № 265.
3. Сороко Л.М. ОИЯИ, Д1-82-642, Дубна, 1982.
4. Bencze Gy.L., Soroko L.M., JINR, E13-84-310; Dubna, 1984.
5. Коронкевич В.П. и др. Автометрия, 1985, № 1, с.4.
6. Koronkevich V.P.et al. Optik, 1984, v.67, No.3, p.257.
7. Сороко Л.М. ОИЯИ, Б1-18-81-229, Дубна, 1981.
8. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, Д13-85-138, Дубна, 1985.
9. Сороко Л.М. Гильберт-оптика. "Наука", М., 1981, с.57, 94.
10. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. "Наука", М., 1971, с.53.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 апреля 1986 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтринной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
Д11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике глужельных ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Бенце Д. и др.

P13-86-240

Исследование изображающих свойств киноформа с поперечной мезооптичностью

Изображающие свойства киноформа с кольцевым откликом исследованы для объектов в виде круглого отверстия, прямоугольной щели, полуплоской шторки, а также для линейной цепочки из нескольких круглых отверстий. Показано, что при освещении киноформа с кольцевым откликом сходящимся пучком света происходит оконтуривание кольцевого изображения объектов с резкими обрывами. При этом сохраняется информация об ориентации и положении сторон прямоугольной щели или линейной цепочки из нескольких круглых отверстий. Результаты экспериментов можно интерпретировать в терминах одномерного преобразования Фуко-Гильберта, если при этом учесть линейно изменяющийся вклад различных участков киноформа с кольцевым откликом в формировании мезооптических изображений указанных объектов. Наличие мертвой зоны на киноформе не мешает применению киноформа с кольцевым откликом в мезооптическом фурье-микроскопе для ядерной фотоэмульсии.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Bencze Gy. et al.

P13-86-240

Investigation of the Imaging Properties of the Kinoform with Transverse Mesoopticality

The imaging properties of the kinoform with a ring response are treated for objects in the form of the open circles, rectangular slit, semiplane shutter and also for straight line set of several open circles. It has been shown that the kinoform exposed by the convergent light beam does contour the objects with sharp edges. The information on the angular orientation and on the position of the rectangular slit edges or of the straight line set of circles is conserved. The results of the experiment can be explained in terms of the one-dimensional Foucault-Hilbert transform by taking into account the linearly dependent contributions of various parts of the kinoform with a ring response into the mesooptical images of the objects cited. The dead part of the kinoform is of a minor handicap to use the kinoform with a ring response in the mesooptical Fourier-transform microscope for nuclear research emulsion.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986