

О ЯРКОСТИ И КОНТРАСТЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЧАСТИЦ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ

И. М. Клиот-Дашинская, Д. И. Стаселько и А. Л. Чураев

Экспериментально исследована зависимость яркости и контраста восстановленных изображений малых частиц от условий записи голограмм и восстановления изображений.

Известно, что качество голографических изображений микрообъектов существенно зависит от схемы и условий записи голограмм. В работе [1] для однолучевой схемы была определена зависимость минимального размера регистрируемых частиц от расстояния между объектом и голограммой, а в [2] проведено сравнение однолучевой и двухлучевой схем записи голограмм частиц и показано, что двухлучевая схема записи позволяет получать значительно более контрастные и яркие изображения по сравнению с однолучевой и, как следствие этого, достичь существенного увеличения глубины поля зрения изображения.

Вместе с тем в литературе практически отсутствуют данные о значениях дифракционной эффективности голограмм частиц и контраста восстановленных изображений, определяющие возможности количественной обработки изображений при визуальном наблюдении, а также с помощью автоматизированных систем [3].

С целью получения таких данных в настоящей работе был выполнен ряд экспериментов с модельным плоским ансамблем частиц, представляющим собой стеклянную пластину, на которую были нанесены частицы ликоподия размером 30 мкм со средним расстоянием между частицами 0.2 мм, а также крест из металлической фольги, служивший для контроля положения плоскости наблюдения. Экспериментальная установка для регистрации голограмм включала в себя импульсный источник излучения на рубине, работающий в режиме свободной генерации с энергией в импульсе ~1 Дж, однолучевую и двухлучевую схемы записи голограмм, а также схему контроля плотности энергии в плоскости фотопластинки. Голограммы регистрировались на фотопластинках ЛОИ-2-690, гиперсенсibilизированных в течение 3 мин в 0.2% растворе триэтанолamina. Обработка голограмм производилась в проявителе ГП-2 [7] в течение 15 мин. Изображения восстанавливались излучением непрерывного He—Ne лазера на установке, изолированной от внешних вибраций. Изображения частиц, увеличенные горизонтальным микроскопом МГ, фотометрировались путем сканирования фотоэлектронного умножителя в плоскости изображения и наблюдались визуально.

Контраст в изображении определялся по формуле

$$k = \frac{I_{\text{ч}}}{I_{\text{ф}}},$$

где $I_{\text{ч}}$ и $I_{\text{ф}}$ — измеренные значения интенсивности частиц и интенсивности фона соответственно. Дифракционная эффективность (ДЭ) определялась как отношение полного потока излучения, образующего изображение, к потоку восстанавливающего излучения и измерялась с помощью селенового фотоэлемента.

Однолучевая схема регистрации голограмм изображена на рис. 1. Пучок рубинового лазера 1, расширенный десятикратной телескопической

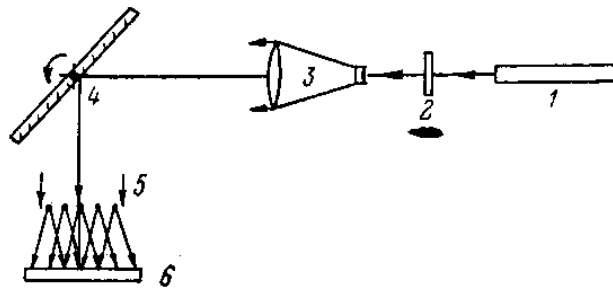


Рис. 1. Однолучевая схема регистрации голограмм.

1 — рубиновый лазер, 2 — нейтральный светофильтр, 3 — телескопическая система, 4 — вращающееся зеркало, 5 — объект, 6 — фотопластинка.

системой 3, отражаясь от зеркала 4, освещал объект 5 и попадал на фотопластинку 6. Расстояние между объектом и фотопластинкой составляло 1—2 см. Введение в пучок нейтральных светофильтров 2 с различным пропусканием позволяло изменять плотность энергии в плоскости фотопластинки от 10^{-2} до 10^{-6} Дж/см². Схема восстановления изображения дана на рис. 2. Согласно этой схеме, луч He—Ne лазера 1, отраженный от зеркал 2 и 3 и расширенный десятикратной телескопической

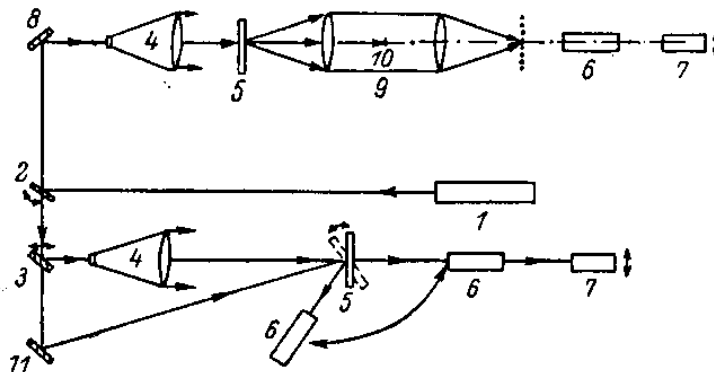


Рис. 2. Схема восстановления изображений.

1 — газовый лазер, 2, 3, 8, 11 — зеркала, 4 — телескопическая система, 5 — голограмма, 6 — микроскоп МГ, 7 — ФЭУ, 9 — объектив, 10 — пространственный фильтр.

мой 4, освещал голограмму 5; восстановленное мнимое изображение рассматривалось через микроскоп 6 визуально или фотометрировалось с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-51 [7].

Изображения частиц, достаточно контрастные для визуального наблюдения, восстанавливались однолучевыми голограммами в интервале экспозиций от 2 до $7 \cdot 10^{-5}$ Дж/см², соответствующем возрастающей части характеристической кривой пластинок ЛОИ-2-69.

Оптимальной с точки зрения контраста оказалась экспозиция $4 \div 5 \times 10^{-5}$ Дж/см². Частицы наблюдались на неравномерном фоне, обусловленном излучением, прошедшим через голограмму без рассеяния, контраст их заметно менялся по полю зрения, причем его максимальное значение не превосходило 4. Для ослабления влияния фона была использована схема восстановления с пространственной фильтрацией изображения. С этой целью восстановленное изображение строилось объективом 9, в фокальной плоскости которого устанавливался экран 10, отсекавший

излучение, прошедшее через голограмму без рассеяния. В этом случае контраст изображений частиц заметно возрастал, причем частицы наблюдались на более равномерном фоне, состоящем из мелких пятен с размерами порядка размеров частиц.

Для выяснения влияния проявления на характеристики восстановленного изображения был зарегистрирован ряд голограмм с различной плотностью энергии, проявленных в течение 3—24 мин. Оптимальная экспозиция в таком интервале времен проявления оставалась практически неизменной ($\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Дж/см²). В схеме восстановления изображений с пространственной фильтрацией были измерены значения ДЭ голограмм, а также интенсивности частиц и фона. Результаты измерений приведены на рис. 3. Максимальная интенсивность частиц имела место при временах проявления 3—6 мин, при этом значение ДЭ достигало 0.3%. Наибольший контраст изображения частиц достигался при временах проявления 12—15 мин и составлял ~ 11 . Таким образом, применение фильтрации при вос-

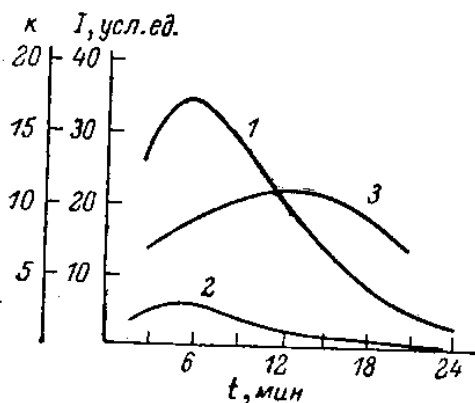


Рис. 3. Зависимости максимальной интенсивности изображений частиц (1), максимальной интенсивности пятен шума (2) и контраста восстановленного изображения k (3) от времени проявления голограмм.

становлении позволило повысить контраст восстановленных изображений для однолучевых голограмм примерно в 3 раза. Наряду с изучением изображений неподвижных частиц существенный практический интерес представляет исследование изображений ансамблей движущихся частиц. Согласно [2, 4], движение частицы во время экспозиции приводит к трансформации ее изображения в трек, что снижает контраст восстановленных изображений.

Наиболее жесткие ограничения на допустимые скорости движения частиц налагаются в случае записи частиц по однолучевой схеме ввиду невысокого исходного контраста их изображений. С целью определения величин допустимых перемещений был проведен эксперимент, в котором движение частиц имитировалось поворотом за время экспозиции волнового фронта, освещающего частицы, поскольку, согласно [4], распределение фаз на голограмме от движущихся параллельно ей частиц совпадает с распределением фаз, возникающим при повороте освещающего частицы волнового фронта. Необходимый поворот волнового фронта достигался вращением зеркала 4 (рис. 1). Анализ голограмм, зарегистрированных при различных скоростях вращения зеркала и восстановления изображений без использования пространственной фильтрации, показал, что достаточно контрастные изображения треков частиц могли быть получены лишь в том случае, если длина трека не превосходила трех диаметров частицы.

Эксперименты по двухлучевой записи голограмм проводились по схеме, изображенной на рис. 4. Наряду с записью голограмм в попутных пучках проводилась также регистрация голограмм во встречных пучках. Интерес к последней связан с возможностью восстановления изображений в белом свете, а также с уменьшением влияния шума эмульсии. Согласно рис. 4, луч рубинового лазера 1, пройдя через нейтральный светофильтр 2 и диафрагму диаметром 2.5 мм 3, попадал на светоделительное зеркало 4, где делился на объектный и референтный пучки. Объектный пучок, пройдя через линию задержки, образованную зеркалами 5, 6 и 7, служившую для выравнивания разности хода в схеме, освещал объект 8. Изображение объекта строилось объективом 9 на расстоянии 3—7 мм от фотопластинки 10; экран 11 диаметром 5 мм служил для устранения нерассеян-

ной частицами части излучения. Референтный пучок расширялся десятикратным телескопом 12 и в случае записи голограмм в попутных пучках направлялся зеркалом 13 на фотопластинку под углом 26° к объектному

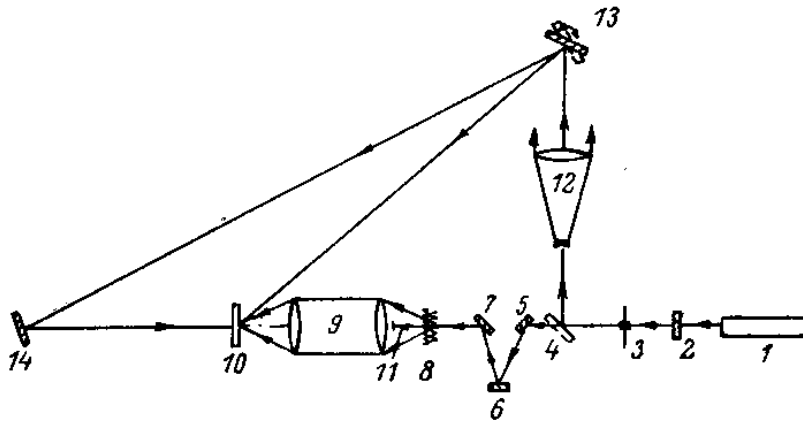


Рис. 4. Двухлучевая схема регистрации голограмм.

1 — рубиновый лазер, 2 — нейтральный светофильтр, 3 — диафрагма, 4 — светоделительное зеркало, 5, 6, 7, 13, 14 — зеркала, 8 — объект, 9 — объектив, 10 — фотопластинка, 11 — экран, 12 — телескопическая система.

пучку, падающему по нормали к голограмме. При записи во встречных пучках угол их схождения составлял 180° . Фотопластинка в этом случае разворачивалась на угол $\sim 15^\circ$ относительно оптической оси системы для

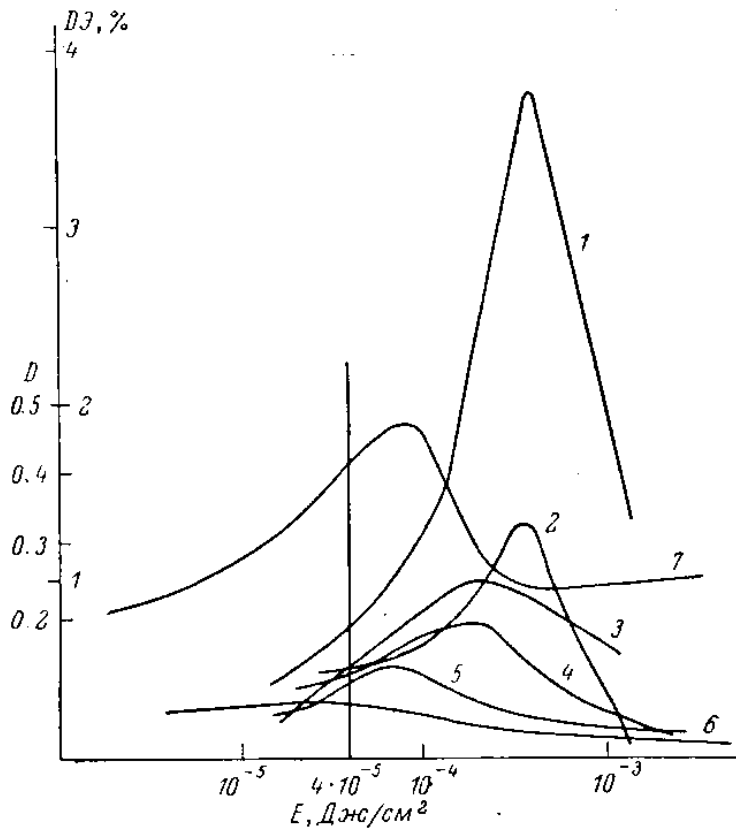


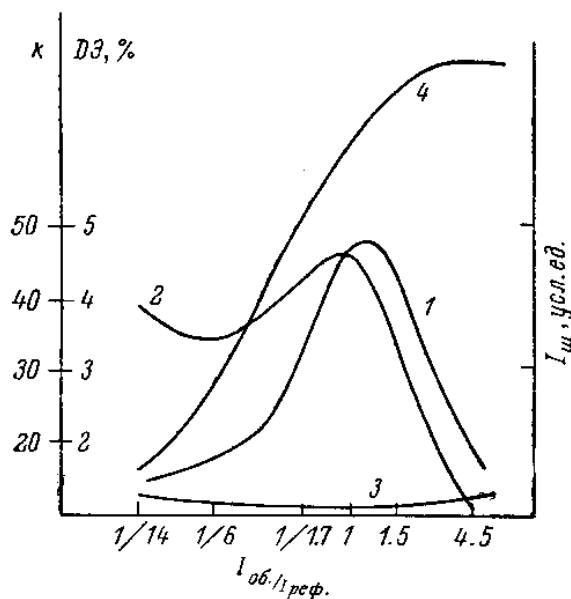
Рис. 5. Зависимости усредненных по изображению ДЭ (1—5) и шума фотозмульсии (6) от экспозиции.

1 — $I_{об.}/I_{реф.} = 1.5$, 2 — $I_{об.}/I_{реф.} = 1/1.7$, 3 — $I_{об.}/I_{реф.} = 4.5$, 4 — $I_{об.}/I_{реф.} = 1/6$, 5 — $I_{об.}/I_{реф.} = 1/14$, 7 — характеристическая кривая ЛОИ-2-690.

того, чтобы при восстановлении блик, отраженный от фотопластинки, не накладывался на изображение. Для изменения общей плотности энергии использовались нейтральные светофильтры с различными плотностями, а для изменения соотношения интенсивностей пучков — светоделительные зеркала с различным пропусканием. При этом соотношение интенсивности между объектным и референтным пучками ($I_{об.}/I_{реф.}$) меня-

лось от $1/14$ до 4.5 . Для пропускающих голограмм излучение He—Ne лазера (рис. 2) направлялось на голограмму с помощью зеркала 2 и 11 под углом 24° к нормали. В случае отражательных голограмм угол между восстанавливающим пучком и нормалью к голограмме подбирался экспериментально по максимальной яркости восстановленного изображения и составлял в зависимости от усадки фотослоя от 35 до 48° .

На рис. 5 показана зависимость ДЭ голограмм при различных соотношениях пучков и шума эмульсии от общей экспозиции, а также приведена характеристическая кривая фотоматериала ЛОИ-2-690. Для сравнения на этом же рисунке вертикальной линией обозначена оптимальная экспозиция для записи голограмм частиц по однолучевой схеме. Видно, что наибольшее значение ДЭ составляет приблизительно 4% при соотношении пучков, близком к единице, и достигается на спадающем участке характеристической кривой при экспозиции $5 \cdot 10^{-4}$ Дж/см², что приблизительно на порядок превышает оптимальную экспозицию для записи голограмм по однолучевой схеме. Такое различие в величине оптимальных экспозиций, по-видимому, объясняется различием в соотношении пучков при записи



ростом экспозиции. Видно, что наибольшее значение ДЭ составляет приблизительно 4% при соотношении пучков, близком к единице, и достигается на спадающем участке характеристической кривой при экспозиции $5 \cdot 10^{-4}$ Дж/см², что приблизительно на порядок превышает оптимальную экспозицию для записи голограмм по однолучевой схеме. Такое различие в величине оптимальных экспозиций, по-видимому, объясняется различием в соотношении пучков при записи

Рис. 6. Зависимость изменения ДЭ (1), контраста k изображений частиц (2), шума, рассеянного на фотоэмульсии (3), и нелинейного шума (4) от соотношения интенсивностей объектного и референтного пучков.

голограмм по этим схемам (в случае однолучевой схемы соотношение пучков в наших экспериментах составляло примерно $1/50$). Действительно, согласно рис. 5 при уменьшении соотношения пучков, наряду с уменьшением ДЭ происходит существенный сдвиг максимумов ДЭ в сторону меньших экспозиций; в частности, при соотношении пучков $1/14$ оптимальная экспозиция составляет 10^{-4} Дж/см².

На рис. 6 представлены экспериментальные зависимости максимальных значений ДЭ и контраста от соотношения пучков. Видно, что зависимость контраста от соотношения пучков заметно отличается от хода ДЭ и характеризуется значительно более медленным спадом и немонотонным изменением при уменьшении соотношения пучков (рис. 6), причем величина контраста не превосходит 40 . В то же время из оценки контраста, основанной на измерениях интенсивности изображений частиц и уровня фона из-за рассеяния излучения на зернах эмульсии, следует, что наибольшие значения контраста должны достигать $\sim 10^3$. Такое расхождение, по всей видимости, связано с влиянием нелинейных шумов, возникающих при достаточно высоких отношениях интенсивностей объектного и референтного пучков [8]. Исходя из экспериментально измеренных зависимостей ДЭ и контраста от соотношения пучков, нетрудно найти зависимость нелинейных шумов голограммы от соотношения пучков (кривая 4 на рис. 6). Согласно полученным данным, величина нелинейного шума достигает уровня шума эмульсии при $I_{об.}/I_{реф.} \approx 1/14$ и резко возрастает при дальнейшем увеличении соотношения пучков, достигая при $I_{об.}/I_{реф.} \sim 1$ значений, превосходящих этот уровень более чем в $20-30$ раз. Таким образом, при получении ярких изображений частиц контраст их изображений существенно ограничивался нелинейными шумами записи. По этой причине, несмотря на увеличение ДЭ изображений, записанных по двухлуче-

вой схеме по сравнению с однолучевой более чем на порядок (от 0.3 до 4%), и снижение влияния шума эмульсии, контраст изображения возрастал примерно в 4 раза.

Голограммы, записанные по двухлучевой схеме во встречных пучках, позволяют получать яркие, но сильно искаженные несимметричными aberrациями изображения частиц. Возрастание aberrаций изображений частиц, записанных во встречных пучках, объясняется большой критичностью отражательных голограмм к изменению длины волны восстанавливающего источника и усадке фотослоя. Действительно, согласно экспериментальным данным, изменение восстановления угла для отражательных голограмм достигало 48° , тогда как в случае пропускающих голограмм оно составляло 2° . Оценки aberrаций изображений, обусловленных такими изменениями угла восстановления, проведенные согласно [5], показывают, что запись во встречных пучках ведет в условиях эксперимента к увеличению aberrаций более чем в 100 раз.

Одним из путей преодоления этого недостатка является использование в качестве восстанавливающего источника коллимированного пучка белого света. Однако в этом случае возникают ограничения разрешающей способности изображения и его глубины. В частности, при спектральной селективности голограммы, равной 50 \AA [6], разрешение 8 мкм может быть достигнуто лишь при глубине изображения до 1 мм. Другая возможность состоит в подборе величины усадки фотослоя и длины волны при восстановлении таким образом, чтобы не происходило изменения угла восстановления. В этом случае глубина поля зрения изображений, создаваемых отражательными голограммами, может достигать значений, характерных для голограмм, записанных в попутных пучках [1, 2], однако для обеспечения достаточно малой (порядка 1°) величины изменения угла восстановления необходимо регулировать упомянутые параметры с точностью 0.1%.

Литература

- [1] V. J. Thompson, G. V. Raggett, V. J. Justh, I. N. Ward. *J. Appl. Meteorol.*, 5, 343, 1966.
- [2] Д. И. Стаселько, В. А. Косниковский. *Опт. и спектр.*, 34, 363, 1973.
- [3] И. М. Клот-Дашинская, Д. И. Стаселько, А. Л. Чураев. Тез. докл. Всес. совещ. по проблемам автоматизации анализа изображений микроструктур. Пущино, 1977.
- [4] Ю. Н. Денисюк, Д. И. Стаселько, В. П. Минина. *Оптико-механич. промышл.*, 11, 73, 1968.
- [5] E. V. Shafrane. *J. Opt. Soc. Am.*, 57, 51, 1967.
- [6] О. В. Андреева, В. И. Суханов. *Опт. и спектр.*, 30, 786, 1971.
- [7] Регистрирующие среды для голографии. «Наука», Л., 1975.
- [8] Д. И. Стаселько, В. И. Образцов. *Ж. науч. прикл. фото и кинемат.*, 17, 115, 1972.

Поступило в Редакцию 23 декабря 1978 г.
В окончательной редакции 23 мая 1979 г.