

## ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АМОРФНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В ИМПУЛЬСНОЙ ГОЛОГРАФИИ

Аркадий КИРИЦА

НИЛ фототермопластической записи

În prezenta lucrare sunt studiate posibilitățile de aplicare a purtătorului fototermoplastic ce conține un start fotosensibil din semiconductor halogenic sticlos în bază de As-Se-S și termoplastic din poliepoxipropilcarbazon la înregistrarea prin impulsuri a hologramelor mobile ale obiectelor de dimensiuni microscopice. Sunt studiate procesele de înregistrare a hologramelor reliefo-fazice ale microobiectelor care difuzează lumina și mărirea ulterioară a imaginilor holografice restabilite.

In this paper, the possibilities of use of the photothermoplastic media with light sensitive chalcogen semiconductor glass based on As-Se-S system and thermoplastic based on polyepoxypropylcarbazole polymer for recording of impulse holograms of moving objects have been studied. The recording processes of the relief-phase hologram of light scattering microobjects are investigated. Furthermore, the size increase of holographic images has been carried out.

### Введение

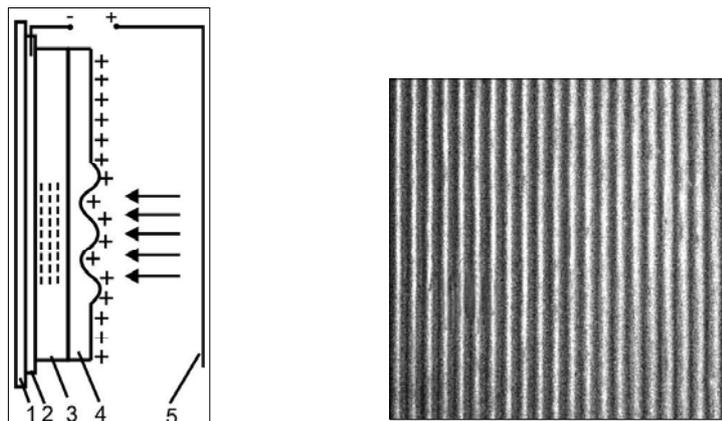
Фототермопластические носители (ФТПН) на основе аморфных стеклообразных полупроводников получили достаточно широкое применение в интерферометрии и голографии. Высокие значения фоточувствительности ( $\sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{J}$ ), разрешающей способности (не менее  $2000 \text{ mm}^{-1}$ ) и скорости регистрации ( $\sim 3\text{s}$ ) позволяют успешно регистрировать высококачественные голограммы в реальном масштабе времени [1]. В последнее время наиболее актуальна задача регистрации импульсных голограмм стационарных и мобильных микрообъектов. Возможности обычной микроскопии зачастую бывают ограничены при исследовании динамических процессов, связанных с изменением не только формы, но и пространственного положения микрообъектов, когда наряду с обычной фотографией возникает необходимость исследования объемных характеристик объекта. В данном случае голографическая микроскопия обладает рядом преимуществ [2] ввиду того, что кроме оптического увеличения существует возможность сохранения объемных характеристик зарегистрированного объекта [3]. Однако голографическая микроскопия мобильных микрообъектов налагает при этом дополнительные требования к носителям для регистрации оптической информации. Наряду с высокими значениями фоточувствительности и разрешающей способности, носитель должен обладать хорошей взаимозаменяемостью параметров экспозиции, что позволит варьировать в широких пределах соотношение интенсивности и времени облучения при регистрации импульсных голограмм.

Целью данной работы является исследование экспозиционных характеристик фототермопластических носителей и возможностей их применения в импульсной голографической микроскопии.

### Эксперимент

Для проведения исследований был изготовлен ФТПН (рис. 1а) с фоточувствительным слоем (3) на основе молярного раствора аморфных стеклообразных полупроводников системы  $\text{As}_2\text{S}_{1,5}\text{Se}_{1,5}$  с максимумом спектральной чувствительности вблизи  $\lambda = 540 \text{ nm}$ . В качестве подложки использовалась гибкая лавсановая лента (1) с предварительно нанесенным светопроницающим проводящим электродом (2) на основе  $\text{SnO}_2$ . На поверхность фоточувствительного полупроводника был нанесен термопластический слой на основе полиэпоксипропилкарбазола, достигающего пластического состояния при разогреве до температуры  $T = 84^\circ\text{C}$ .

Исследуемый носитель помещали в ячейку записи, обеспечивающую равномерный разогрев материала до пластического состояния термопластического слоя. Одновременно с началом засветки на коронирующую нить (5) подается высокое напряжение ( $\sim 7 \text{ kV}$ ), что приводит к ионизации окружающего воздуха. Под действием электрического поля между коронирующей нитью и проводящим электродом ионизированные молекулы воздуха покрывают термопластический слой, создавая на поверхности термопластика положительный заряд. В то же время под действием освещения в фоточувствительном полупроводнике генерируется отрицательный заряд, плотность которого пропорциональна интенсивности падающего света [1]. Кулоновское взаимодействие между положительными и отрицательными зарядами приводит к деформации термопластического слоя, создавая на поверхности рельефное изображение регистрируемой оптической информации.



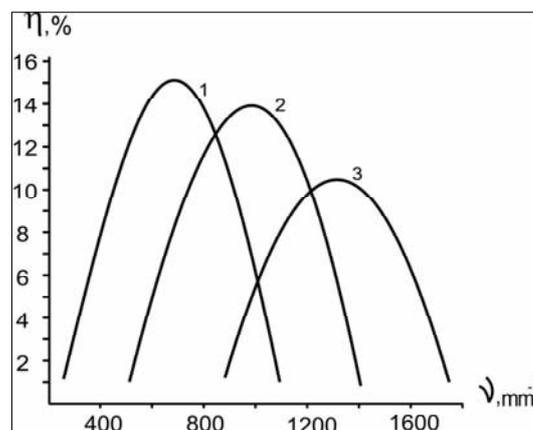
a)

b)

**Рис.1.** ФТПН с фоточувствительным слоем:

- a) 1-лавсановая подложка, 2- проводящий электрод SnO<sub>2</sub>, 3- светочувствительный полупроводник, 4- термопластический слой, 5-коронирующий электрод;  
 b) поверхность термопластического слоя с зарегистрированной дифракционной решеткой ( $\nu = 1000 \text{ mm}^{-1}$ ).

Термопластические носители обладают резонансным характером записи, когда максимальное значение дифракционной эффективности достигается при определенной пространственной частоте записи. Резонансная частота зависит от толщины термопластического слоя и определяется из соотношения:  $1/3T < \nu_{\text{rez}} < 1/2T$ , где  $T$  – толщина термопластического слоя [1]. Были получены ФТП носители с различной толщиной термопластического слоя и исследованы их частотно-контрастные характеристики при регистрации интерференционных картин в излучении Nd:Yag лазера с длиной волны  $\lambda = 532 \text{ nm}$ . На рис.2 представлена зависимость дифракционной эффективности от пространственной частоты записи для ФТП носителей с толщиной термопластического слоя  $T = 0,8 \mu\text{m}$ ;  $0,7 \mu\text{m}$  и  $0,6 \mu\text{m}$ .

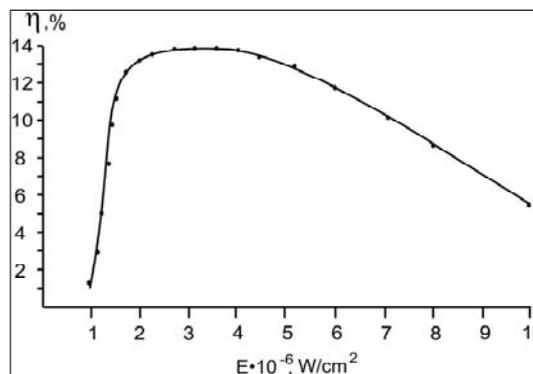


**Рис.2.** Зависимость дифракционной эффективности регистрируемых голограмм от пространственной частоты записи для ФТПН с толщиной термопластического слоя:  
 1)  $T = 0,8 \mu\text{m}$ , 2)  $T = 0,7 \mu\text{m}$ , 3)  $T = 0,6 \mu\text{m}$ .

Как видно из зависимости, с уменьшением толщины термопластического слоя разрешающая способность ФТП носителя возрастает, но при этом уменьшается дифракционная эффективность регистрируемых голограмм.

Для эксперимента был выбран ФТП носитель с толщиной термопластического слоя  $T = 0,7 \mu\text{m}$ , позволяющий достичь максимального значения дифракционной эффективности  $\eta = 12\%$  при резонансной пространственной частоте записи  $\nu = 1000 \text{ mm}^{-1}$ . На рис.1b представлена фотография поверхности термопластического слоя с зарегистрированной дифракционной решеткой с пространственной частотой записи  $\nu = 1000 \text{ mm}^{-1}$ .

Для определения параметров голографической чувствительности получена зависимость дифракционной эффективности от освещенности при фиксированном значении времени записи  $t_r = 2,5 \text{ s}$  (рис.3). Дифракционные решетки регистрировались при схождении равных по интенсивности световых пучков лазерного излучения.



**Рис.3.** Зависимость дифракционной эффективности от освещенности при времени записи  $t_r = 2,5 \text{ s}$ .

Как видно из зависимости, дифракционная эффективность  $\eta$  достигает значения в 1% при освещенности  $E \sim 10^{-6} \text{ W/cm}^2$  за время записи  $t_r = 2,5 \text{ s}$ , что соответствует экспозиции  $H = Et = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ J/cm}^2$ . Голографическая чувствительность носителя [2] пропорциональна квадратному корню из величины дифракционной эффективности  $\eta$  и обратно пропорциональна экспозиции:

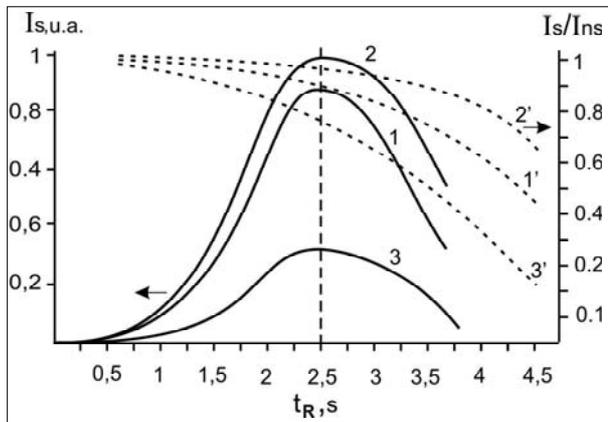
$$S = \frac{\sqrt{\eta}}{H}$$

Подставляя  $\eta = 1\%$  и  $H = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ J/cm}^2$ , получим пороговую голографическую чувствительность для данного ФТП носителя:  $S = 4 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{J}$ .

Однако необходимо отметить, что для достижения максимального значения дифракционной эффективности (рис.3) необходимо увеличить освещенность вдвое, что позволит получить наиболее качественные голографические изображения. Дальнейшее увеличение интенсивности до  $4 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$  не влияет на значение дифракционной эффективности, и только с превышением этого значения  $\eta$  начинает уменьшаться. На практике большинство диффузно рассеивающих свет объектов неравномерно отражают световой сигнал, создавая на поверхности носителя участки с различной освещенностью. Поэтому, исходя из вышесказанного, интенсивность отраженного от объекта сигнала должна находиться в интервале от  $10^{-6} \text{ W/cm}^2$  до  $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$  при времени облучения  $t_E = 2,5 \text{ s}$ , что позволяет установить интервал оптимальных значений экспозиции  $H = (2-8) \cdot 10^{-6} \text{ J/cm}^2$ .

Для регистрации импульсных голограмм необходимо определить взаимозаменяемость параметров экспозиции  $E$  и  $t$ , так как продолжительность импульсной засветки выбирается исходя из динамики исследуемого процесса. В случае галоидосеребряных материалов взаимозаменяемость параметров экспозиции близка к линейному закону, что позволяет уменьшить время засветки до миллисекунд, при условии пропорционального увеличения освещенности таким образом, чтобы экспозиция оставалась постоянной,  $H = Et = \text{const}$  [2]. Однако при ФТП процессе необходимо учитывать тот факт, что время регистрации голограмм определяется скоростью формирования рельефного изображения на поверхности термопластического слоя, а не только продолжительностью облучения.

Для оптимизации параметров ФТП процесса необходимо рассмотреть кинетику регистрации голографических изображений. Методика эксперимента заключается в одновременном измерении кинетики роста интенсивности светового сигнала в первом порядке дифракции и интенсивности шумового сигнала в зависимости от времени задержки начала экспозиции  $t_z$ . Если полезный сигнал образуется в результате дифракции считывающего пучка на формирующейся в процессе записи дифракционной решетке, то шумовой сигнал вызван хаотической деформацией термопластического слоя [2]. На рис.4 представлены зависимости кинетики роста интенсивности света в первом порядке дифракции  $I_s = f(t)$  (кривые 1,2,3) и кинетика изменения отношения сигнал-шум  $I_s/I_{ns} = f(t)$  (кривые 1',2',3') при различных временах запаздывания начала экспозиции  $t_z = 0,1 \text{ s}$ ;  $0,2$  и  $0,3 \text{ s}$  соответственно.



**Рис.4.** Кинетика роста интенсивности света в первом порядке дифракции и соотношения сигнал-шум (пунктирные линии) при задержке начала экспозиции: 1)  $t_z = 0,1 \text{ s}$ ; 2)  $t_z = 0,2 \text{ s}$ ; 3)  $t_z = 0,3 \text{ s}$  при освещенности  $E = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ .

Как видно из графика, с момента включения коронирующего потенциала ( $t_{R=0}$ ) деформация наступает не ранее чем через  $0,25 \text{ s}$ , что обусловлено временем накопления положительного заряда на поверхности термопластического слоя, исходя из чего время задержки начала экспозиции и выбиралось в интервале  $0,1-0,3 \text{ s}$ . Анализируя зависимости 1, 2 и 3, можно констатировать, что оптимальная задержка начала экспозиции соответствует  $t_z = 0,2 \text{ s}$  (кривая 2, рис.4), что позволяет получить как максимальное значение интенсивности первого порядка дифракции, так и наилучшее соотношение сигнал-шум (кривая 2'). При  $t_z = 0,1 \text{ s}$  интенсивность дифрагирующего пучка близка к максимальному значению ( $I_s = 0,9I_{s, \text{max}}$ ), однако при этом возрастает и шумовой сигнал (кривая 1'). При увеличении времени запаздывания начала экспозиции до  $t_z = 0,3 \text{ s}$  интенсивность света в первом порядке дифракции уменьшается до  $I_s = 0,3I_{s, \text{max}}$ , при этом что отношение сигнал-шум составляет  $I_s/I_{ns} = 0,7$ .

Таким образом, после включения коронирующего потенциала достаточный для начала деформации положительный заряд формируется в течение  $0,2 \text{ s}$ , что является оптимальным моментом для начала экспозиции.

Необходимо отметить, что облучение при снятии кинетики проводилось на протяжении всего процесса записи при освещенности  $E = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ , что с учетом времени достижения максимальной интенсивности света в первом порядке дифракции ( $t_R = 2,5 \text{ s}$ ) соответствует определенной ранее оптимальной экспозиции  $H = 8 \cdot 10^{-6} \text{ J/cm}^2$ . Для регистрации импульсных голограмм необходимо уменьшить продолжительность светового импульса, но при этом общая продолжительность ФТП процесса останется прежней ( $t_R = 2,5 \text{ s}$ ). Процесс формирования рельефного изображения под действием электростатических сил обусловлен многими факторами, в частности: скоростью ионизации окружающего воздуха, временем накопления положительного заряда, вязкостью, упругостью и силами поверхностного

натяжения термопластика, что не позволяет существенно сократить время записи [5], поэтому при дальнейших исследованиях время регистрации голограмм остаётся неизменным.

Для изучения взаимозаместимости параметров экспозиции при регистрации интерференционных картин получена зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  от продолжительности светового импульса  $t_E$  в интервале от 8 до 100 ms при различных значениях освещенности (рис.5).

Как видно из графика, для регистрации дифракционной решетки с  $\eta=1\%$  при продолжительности засветки  $t_E = 8$  ms необходимо обеспечить освещенность  $E = 5 \cdot 10^{-3}$  W/cm<sup>2</sup>, что будет соответствовать экспозиции  $H = 4 \cdot 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup>. Таким образом пороговая голографическая чувствительность при импульсной записи ( $t_E = 8$  ms), рассчитанная по приведенной ранее формуле, будет составлять  $S = 1/H = 2,5 \cdot 10^4$  cm<sup>2</sup>/J. Возвращаясь к зависимости, отображенной на рис.3, отметим, что при достижении того же значения  $\eta = 1\%$  при  $t_E = 2,5$  s голографическая чувствительность составляла  $S = 4 \cdot 10^5$  cm<sup>2</sup>/J, что более чем на порядок выше, чем при импульсной засветке.

Нелинейный характер взаимозаместимости параметров экспозиции объясняется продолжительностью процесса формирования поверхностного рельефа ФТП носителя. По окончании кратковременной засветки (8-100 ms) происходит частичная релаксация сгенерированных облучением зарядов в фоточувствительном полупроводнике и время релаксации меньше продолжительности ФТП процесса.

Таким образом, для регистрации импульсных голограмм на исследуемом носителе оптимальное время задержки начала экспозиции составляет 0,2 s. При времени засветки в интервале  $t_E=8-100$  ms для получения высоких значений дифракционной эффективности величину экспозиции необходимо рассчитывать с учетом зависимости, отображенной на рис.4. Последнее имеет большое практическое значение при регистрации голограмм микрообъектов, не обладающих высокой отражательной способностью, что не всегда позволяет обеспечить необходимую освещенность на поверхности ФТП носителя.

Для регистрации голограмм подвижных микрообъектов сконструирована голографическая установка, принципиальная схема которой представлена на рис.6.

Нерасширенный пучок Nd:Yag лазера с длиной волны излучения  $\lambda = 532$  nm при помощи светоделительной пластины (2) делится на предметный и опорный пучки с соотношением интенсивностей 4:1 соответственно, что позволяет большую часть исходной мощности лазерного излучения использовать для освещения регистрируемого микрообъекта. Предметный пучок при помощи линзы (12) фокусируется на исследуемом объекте (4). Опорный пучок при помощи коллиматора (3) преобразуется в плоско-параллельный и проектируется на ФТП носитель (8). Отраженный от объекта сигнал попадает на объектив (5), проектирующий увеличенное в 4,5 раза изображение объекта на поверхность ФТП носителя. Сходящиеся на поверхности носителя опорный и предметный пучки формируют интерференционную картину, при регистрации которой получается рельефно-фазовая голограмма исходного объекта. После регистрации объект убирается и поверхность голограммы освещается опорным пучком под тем же углом падения, что и при записи. Увеличенное при помощи объектива (9) восстановленное голографическое изображение исходного объекта проектируется на экран (10) для визуального наблюдения.

В качестве исходных микрообъектов выбраны вольфрамовая нить диаметром 30  $\mu$ m и два стеклянных шарика диаметрами 100  $\mu$ m, прикрепленных к поверхности нити. Верхний конец нити закреплен неподвижно, а нижний конец находится в свободном состоянии (рис.7а). При отклонении свободного

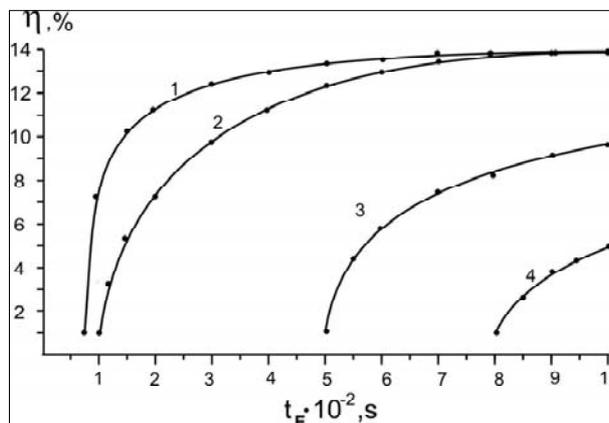


Рис.5. Зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  от продолжительности засветки  $t_E$  при освещенности 1)  $E = 5 \cdot 10^{-3}$  W/cm<sup>2</sup>; 2)  $E = 10^{-3}$  W/cm<sup>2</sup>; 3)  $E = 8 \cdot 10^{-4}$  W/cm<sup>2</sup>; 4)  $E = 6 \cdot 10^{-4}$  W/cm<sup>2</sup>.

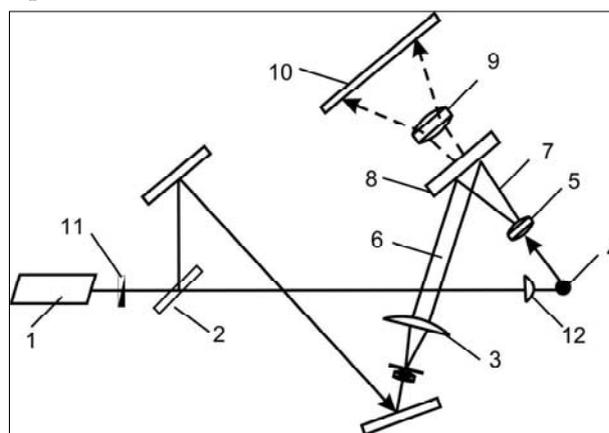
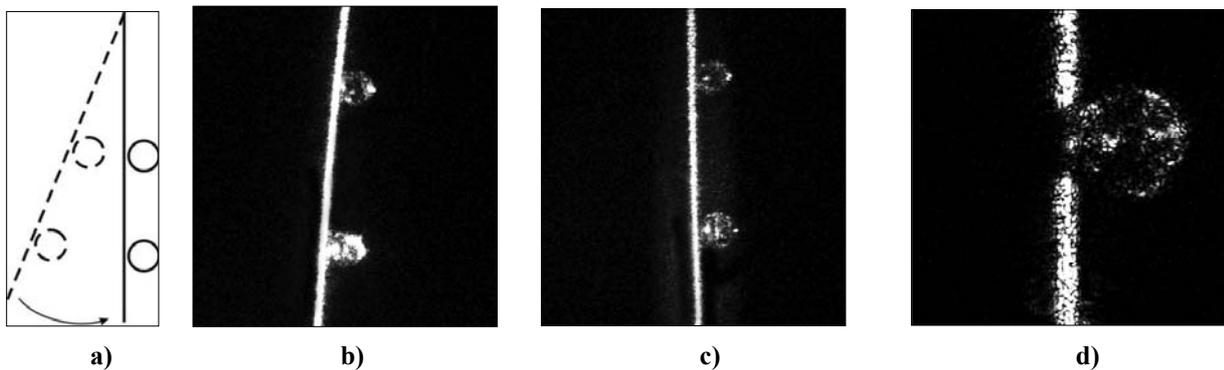


Рис.6. Схема голографической установки:

1 - Nd:Yag лазер ( $\lambda = 532$  nm), 2 - светоделитель, 3 - коллиматор, 4 - объект, 5 - объектив, 6, 7 - опорный и предметный пучки, 8 - фототермопластический носитель, 9 - объектив, 10 - экран, 11 - электрозатвор, 12 - линза.

конца нити система совершает продольные колебательные движения в передней фокальной плоскости объектива (5, рис.6). Выбранные микрообъекты обладают различными как отражающими свойствами, так и поверхностными структурами. Вольфрамовая нить характеризуется достаточно выраженным поверхностным рельефом, диффузно рассеивающим свет, в то время как стеклянные шарики помимо высокой прозрачности имеют еще и достаточно гладкую поверхность. Очевидно, что отраженные от объектов сигналы будут сильно отличаться по интенсивностям, что создаст определенные трудности при регистрации голограмм, однако это позволит более детально изучить возможности исследуемого ФТП носителя.

Регистрация голограмм проводилась по предложенной схеме на пространственной частоте записи вблизи  $1000 \text{ mm}^{-1}$ , время записи  $t_R = 2,5 \text{ s}$  и время задержки начала освещенности  $t_z = 0,2 \text{ s}$ . Амплитуда колебаний нити подбиралась таким образом, чтобы вблизи вертикального положения нити линейная скорость движения шариков была около  $10 \text{ mm/s}$ . На рис.7b,c представлены фотографии восстановленных голограмм при продолжительности светового импульса  $t_E = 100 \text{ ms}$  и  $t_E = 50 \text{ ms}$  соответственно.



**Рис.7.** Регистрация голограмм: а) схема расположения объектов при регистрации голограммы, б) восстановленное изображение при  $t_E = 100 \text{ ms}$ , в) восстановленное изображение при  $t_E = 50 \text{ ms}$ , д) увеличенное изображение объекта.

Необходимо отметить, что для получения достаточно четкого изображения объектов наряду с продолжительностью импульса большое значение имеет выбор оптимальной интенсивности опорного пучка. В отличие от вольфрамовой нити, стеклянные шарики практически полностью пропускают световой сигнал, и отражение наблюдается только на микродефектах поверхности. Так же достаточно четко прослеживается поверхностная структура вольфрамовой нити, состоящая из микроскопических выпуклостей. Необходимо отметить, что не удалось получить изображение углублений на поверхности вольфрамовой нити ввиду их слабой отражательной способности. Увеличение мощности лазерного излучения, необходимой для достаточной интенсивности отраженного от углублений сигнала, приводит к передержке по экспозиции для более освещенных участков поверхности и препятствует качественной регистрации голограммы.

Полученное изображение обладает, однако, достаточно большой информативностью об исходных объектах. На рис.7d представлено увеличенное изображение верхнего стеклянного шарика и прилегающего участка вольфрамовой нити, полученное при регистрации голограммы с продолжительностью импульса  $50 \text{ ms}$ . На восстановленной голограмме достаточно четко видны дефекты на поверхности шарика, что говорит об отступлении от сферической формы на микроскопическом уровне. Также хорошо видна и поверхностная структура вольфрамовой нити.

К вышесказанному необходимо добавить, что исследуемые объекты находились на расстоянии в  $50 \text{ mm}$  от ближайшей оптической системы (объектив 5, рис.6), в отличие от обычной микроскопии, когда большое увеличение требует приближения объекта на расстояние менее одного миллиметра к оптической системе микроскопа. Это достоинство голографической микроскопии весьма важно при регистрации голограмм высокотемпературных процессов или нахождении микрообъектов в агрессивных средах.

## Выводы

Фототермопластические носители могут достаточно успешно применяться в голографической микроскопии при регистрации мобильных микрообъектов в реальном масштабе времени. Однако необ-

ходимо отметить тот факт, что при уменьшении продолжительности светового импульса до значений порядка 10 ns пороговая голографическая чувствительность ФТП носителя уменьшается более чем на порядок по сравнению с непрерывным процессом записи, когда время экспозиции соответствует общему времени регистрации голограммы – 2,5 s.

**Литература:**

1. Несеребряные фотографические процессы / Под ред. А.Л. Картужанского. - Москва: Химия, 1984.
2. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - Москва: Мир, 1973.
3. Колфилд Г. Оптическая голография. - Москва: Мир, 1982.

*Prezentat la 27.02.2009*