

07

©1994 г.

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ УДАЛЕННЫХ И БЛИЗКИХ ОБЪЕКТОВ И ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ЭТОЙ ЦЕЛИ

Ю.Н.Денисюк, Н.М.Ганжерли, С.А.Писаревская, Н.А.Савостьяненко

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 8 февраля 1994 г.)

Рассмотрим два вида оптических систем для получения голографических трехмерных изображений объектов. Одна из них основана на использовании так называемой селектограммы — структуры, которая может быть получена при использовании рассеянного объектом излучения в качестве референтного пучка. Расстояние до объекта в этом случае не ограничено, так как оно не влияет на способность излучения объекта интерферировать самому с собой. Рассмотрены и исследованы два метода повышения дифракционной эффективности электрограммы. Первый из них основан на фокусировании изображения объекта в область, расположенную вблизи селектограммы. Этот метод удобен также и тем, что он позволяет одновременно увеличить светосилу оптической системы при регистрации селектограммы. Второй метод повышения дифракционной эффективности селектограммы основан на увеличении реальной физической глубины записи за счет увеличения наклона лучей, которые пересекают фотографический слой. В этом случае для записи использовались фотополимерные слои фирмы "Дюпон", которые были заключены между двумя стеклянными призмами с использованием иммерсии. В результате совместного применения этих методов яркость изображения, восстановленного селектограммой, стала сравнимой с яркостью изображения, восстановленного голограммой.

Вторая из рассмотренных систем для получения трехмерных изображений предназначена для получения трехмерных голографических копий ценных объектов. На параметры этой системы сильно влияет эффект усадки светочувствительного слоя фотопластины. Этот эффект был исключен посредством регистрации голограммы на светочувствительном фотополимерном материале.

Введение

Ранее мы предложили метод для записи и реконструкции трехмерных изображений посредством так называемой селектограммы [1,2]. Главной отличительной чертой селектограммы является ее способность образовывать трехмерные изображения из сплошного диффузного фона посредством брэгговской селекции его компонент решетками

так называемой псевдоглубокой голограммы [3,4]. Такая операция выполняется только в горизонтальной плоскости, которая наиболее важна для визуального восприятия эффектов, характерных для трехмерных объектов.

В отличие от голограммы селектограмма записывается с использованием протяженного референтного источника света. В частности, такой источник может быть сформирован из света, рассеянного тем же самым объектом, который регистрируется на селектограмме. Поскольку в этом случае референтное излучение автоматически когерентно по отношению к излучению, рассеянному объектом, на селектограмме можно записать объемные изображения объектов, используя при этом свет, характеризующийся низким значением когерентности.

1. Схема записи и реконструкции селектограммы

Общая схема записи и реконструкции селектограммы представлена на рис. 1. Свет, рассеянный объектом O , происходит через входную фильтрующую щель D . Одна часть этой щели t_O свободна, вторая часть t_R закрыта матовым стеклом (рис. 2,а). Свет, который прошел через щель D свободно, является в данном случае объектным пучком, свет того же самого объекта, испытавший рассеяние на матовом стекле, играет роль референтного луча. Линза L_1 коллимирует эти лучи и картина их интерференции записывается на слое H фотографической пластинки, которая наклонена на угол β к оптической оси системы.

Подробности процесса взаимодействия объектного и референтного лучей показаны на рис. 2,б, на котором представлен вид в плоскости объекта так, как его можно наблюдать через линзу L_1 и щель D . Здесь O — объект, R — референтный источник, который превышает собою изображение того же самого объекта, размытое матовым стеклом. Благодаря фильтрующему свойству щели D интерференция между точками объекта и референтного источника возможно только вдоль линий S_1 и S_2 . Например, свет точки объекта o_1 интерферирует со светом, испущенным всеми точками референтного источника, которые лежат на линии S_1 (точки $r_1, r_2 \dots$ на рис. 2,б). В результате на фотопластинке H записывается множество решеток. Интенсивность этих решеток зависит от угла α между точками объекта и референтного источника.

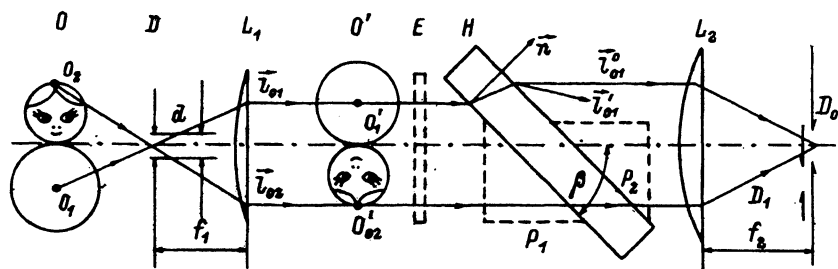


Рис. 1. Спад оптической системы для записи и реконструкции селектограммы. O — объект; D — входная фильтрующая щель; O' — изображение объекта, сфокусированное линзой L_1 ; H — светоочувствительный слой при записи, голограмма при реконструкции; P_1 и P_2 — стеклянные призмы, использованные при втором варианте записи селектограммы; D_0 — выходная щель и изображение входной щели D , сформированное линзами L_1 и L_2 .

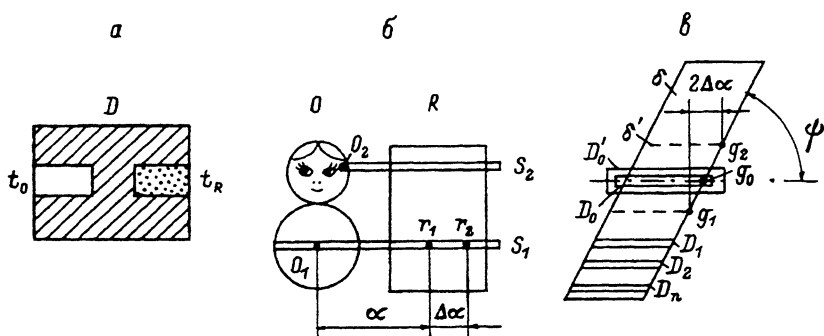


Рис. 2. Картина излучения в различных сечениях оптической системы записи и реконструкции селектограммы (рис. 1).

a — вид в плоскости, где располагается входная щель *D*: t_0 — открыта часть щели; t_R — часть щели, закрытая матовым стеклом; *b* — вид объекта через линзу L_1 и щель *D*; *O* — объект; *R* — референтный источник, образованный из света, рассеянного объектом; S_1, S_2 — линии, вдоль которых возможна интерференция точек объекта и референтного источника; *в* — вид в плоскости выходной щели D_0 ; *б* — размытое изображение входной щели, образованное интермодуляционными компонентами света, реконструированного селектограммой; D_0 и D'_0 — выходные фильтрующие щели для случаев нефокусированного и сфокусированного изображений.

Реконструкция селектограммы осуществляется с помощью света некоторого источника, который освещает щель t_R , закрытую матовым стеклом. Когда свет, испущенный точкой r_1 реконструирующего источника, взаимодействуют с решеткой, записанной светом той же самой точки r_1 референтного источника и точкой O_1 (рис. 2, б), тогда селектограмма восстанавливает лучи, испущенные точкой O_1 (луч I_{01}^o , являющийся продолжением луча I_{01}) (рис. 1). Такой трансформации подвергается свет всех точек референтного источника, который взаимодействовал со “своими собственными решетками”. После прохождения линзы L_2 эта часть света образует неискаженное изображение объекта O' и затем изображение щели D_0 , которое совпадает с изображением входной щели *D*, образованным линзами L_1 и L_2 .

Кроме такого упорядоченного взаимодействия света реконструирующего источника с селектограммой возникает такое множество интермодуляционных компонент. Например, свет, испущенный точкой r_1 реконструирующего источника, будет взаимодействовать также с решеткой, записанной точкой r_2 , которая находится на угловом расстоянии $\Delta\alpha$ от точки r_1 (рис. 2, б). В соответствии с принципом действия псевдоглубокой голограммы реконструируемый луч в этом случае отклонится вверх или вниз относительно пути лучей, испущенных объектом (луч I'_{01} на рис. 1). Аналогичное отклонение претерпят все лучи, которые были восстановлены точками реконструирующего источника, отстоящими на угол $\Delta\alpha$ от тех точек референтного источника, чьи решетки они используют. в результате эти лучи восстановят искаженное изображение объекта, которое можно будет наблюдать через “ложное” изображение D_1 входной щели *D* (рис. 1). Взаимодействие, которые соответствуют другим значениям $\Delta\alpha$, обусловывают появление других ложных изображений входной щели $D_a \dots D_n$. В конечном итоге система этих изображений образует полосу δ (рис. 2, в). Можно показать, что угол наклона этой полосы ψ к горизонтали определяется следующим

выражением:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\alpha}{\beta}, \quad (1)$$

где α — угол между точками объекта и референтного источника, β — угол наклона селектограммы к плоскости распространения объектного и референтного лучей.

2. Пути повышения дифракционной эффективности селектограммы

Основными трудностями наших экспериментов по исследованию селектограммы были очень продолжительные экспозиции на этапе ее записи и низкие значения яркости восстановленного селектограммой изображения. Эти трудности были обусловлены необходимостью использовать очень малые значения ширины входной и выходной щелей D и D_0 (рис. 1). На самом деле можно показать, что при условии $\alpha = \beta$ (рис. 1 и 2, б) угловое разрешение $\Delta\varphi$ изображения, записанного на селектограмме, равно удвоенной угловой ширине входной фильтрующей щели

$$\Delta\varphi = 2 \frac{d}{f_1}, \quad (2)$$

где d — линейный размер входной фильтрующей щели, f_1 — фокусное расстояние первой линзы L_1 (рис. 1).

Из выражения (2) следует, что ширина входной щели должна быть очень мала, если необходимо воспроизвести в изображении мелкоструктурные детали удаленного объекта.

Для того чтобы понять причину, по которой дифракционная эффективность селектограммы также уменьшается с уменьшением ширины входной щели D , обратимся к рис. 2, в. Как это видно, энергия излучения реконструированного селектограммой размазана вдоль полосы δ , которая представляет собой систему изображений входной щели D , образованных интермодуляционными компонентами восстановленной волны. Для того чтобы сохранить высокую разрешающую способность реконструированного изображения, необходимо, чтобы выходная щель D_0 была такой же узкой, как и входная щель D . Однако, как это видно из рис. 2, в, узкая выходная щель D_0 пропускает только небольшую часть энергии реконструированного излучения, которое размыто вдоль полосы δ .

Первым шагом, который мы предприняли для улучшения этого положения, была фокусировка изображения объекта на поверхность селектограммы. Достаточно очевидно, что детали близлежащих объектов могут быть разрешены при значительно меньшем угловом разрешении, чем в случае, когда объекты удалены. В частности, в наших экспериментах фокусировка изображения объекта в плоскость, расположенную в центре наклонной селектограммы, позволила нам увеличить ширины входной и выходной щелей от 0.5 до 5 мм. В результате экспозиции на этапе записи уменьшились до нескольких минут. Яркость восстановленного изображения также значительно возросла. На рис. 2, в этой операции соответствует переход от щели D_0 к щели D_0' , которая пропускает значительно больше энергии полосы δ , чем первоначальная щель D_0 .

Следующий шаг на пути увеличения дифракционной эффективности селектограммы был основан на идее ограничения значений углов $\Delta\alpha$ (рис. 2, в), при которых могут генерироваться интермодуляционные компоненты, образующие полосу δ . С этой целью псевдоглубина селектограммы, которая обеспечивается конструкцией оптической системы, была достигнута увеличением реальной физической глубины записи посредством увеличения наклона лучей, пересекающих фотографический слой.

Подробности этой операции показаны на рис. 1. Как видно из рисунка, в случае, когда наклонный светочувствительный слой H граничит с воздухом, луч l_{01} пересекает слой по направлению, близкому к нормали n к его поверхности, и путь луча внутри слоя практически равен его толщине. Для того чтобы исключить нежелательное отклонение лучей на границе слоя, слой был заключен с использованием иммерсии между двумя стеклянными призмами P_1 и P_2 (они показаны на рис. 1 штриховыми линиями). В качестве иммерсии использовался глицерин, который был введен между призмами и слоем. В этих условиях лучи проходили через слой H практически без отклонения (луч l_{02} на рис. 1).

В наших экспериментах мы использовали экспериментальную фотополимерную пленку HRF-700-20, произведенную фирмой "Дюпон". Пленка чувствительна к красному свету гелий-неонового лазера, толщина ее светочувствительного слоя составляет 20 мкм. Проявление осуществлялось посредством облучения ультрафиолетовым светом и нагрева. Поскольку угол наклона слоя β был равен 17° , то длина пути лучей в слое возросла примерно в три раза по сравнению со случаем, когда иммерсия отсутствовала.

Специальный эксперимент подтвердил, что возрастание пути лучей в наклонном слое сопровождалось соответствующим увеличением угловой селективности записи. В этом случае в наклонном фотополимерном слое записывалась решетка, возникающая в результате интерференции двух плоских волн. Геометрия записи решетки была такой же, как и в случае регистрации селектограммы. Угол между волнами (угол α на рис. 2, б) был равен 20° , угол β наклона слоя равнялся 17° .

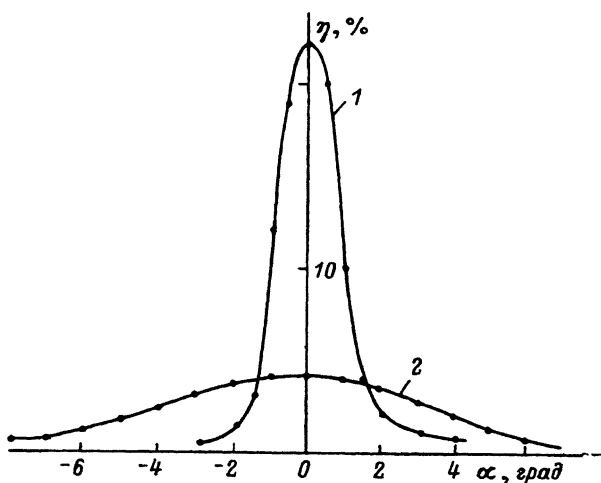


Рис. 3. График зависимости дифракционной эффективности η наклонной голограммы от угла α поворота реконструирующего луча.

Результаты измерений дифракционной эффективности φ этой решетки при различных углах падения реконструирующего излучения на ее поверхность представлена на рис. 3. Кривые 1 и 2 представляют собой графики зависимости дифракционной эффективности η наклонной решетки от угла α поворота реконструирующей волны в плоскости, которая содержит обе волны, записанные на голограмме. Кривая 1 относится к случаю, когда наклонный слой фотополимера помещен между призмами B_1 и B_2 , кривая 2 относится к случаю, когда слой граничит с воздухом. Как видно из рисунка, угловая селективность помещенной в иммерсии решетки, измеренная на полувысоте распределения, равна $2^\circ 30'$ и почти в три раза превышает угловую селективность решетки, граничащей с воздухом.

Рассмотрим влияние, которое оказывает угловая селективность голограммы H , погруженной в иммерсии, на дифракционную эффективность изображение, восстановленного селектограммой. То, что голограмма H приобретает способность взаимодействовать с излучением протяженного реконструирующего источника только в узком угле $\Delta\alpha$, означает, что способность света, испущенного точками этого источника, взаимодействовать с "чужими" решетками голограммы будет ограничена величиной этого угла. В результате этого размытие каждой точки изображения щели D будет ограничено в горизонтальном направлении углом $2\Delta\alpha$. В частности, крайняя правая точка g_0 изображения щели D будет размыта в наклонный отрезок g_1g_2 , при этом угловая величина этого отрезка в горизонтальной плоскости будет равна $2\Delta\alpha$. Аналогичной трансформации подвергнется каждая точка изображения щели D . В результате этого достаточно протяженная первоначальная полоса δ — размытое изображение щели D трансформируется в короткую полосу δ' (обозначена штриховой линией на рис. 2, в). Вся энергия излучения реконструированного голограммой H , которая первоначально была распределена вдоль полосы δ , сконцентрируется в полосе δ' . Яркость восстановленного селектограммой изображения возрастет, поскольку выходная щель D'_0 пропустит больше энергии по сравнению с предыдущим случаем.

Эксперименты по записи и реконструкции селектограмм с использованием фотополимерного слоя HRF-100-20 подтвердили приведенное рассуждение. На самом деле, в наших первых экспериментах с использованием далеких объектов и светочувствительных слоев, граничащих с воздухом ширина выходной щели D_0 была равна 0.5 мм, а длина полосы δ составляла 45 мм. После того как изображение было сфокусировано вблизи поверхности селектограммы, щель D'_0 была расширена до 5 мм, полоса δ осталась той же самой. В окончательном эксперименте, когда пленка была помещена с помощью иммерсии между двух призм и изображение было сфокусировано на селектограмму, ширина щели D'_0 была равна 5 мм, как и во втором эксперименте, однако полоса δ' сократилась до 15 мм. Дифракционная эффективность восстановленного изображения стала в этом случае сравнима с дифракционной эффективностью обычной голограммы.

Таким образом, мы показали, что селектограмма способна воспроизводить трехмерные изображения, характеризующиеся практически такой же яркостью, как изображения, восстановленные голограммой. В качестве следующего шага в развитии этой техники мы предполагаем создать голографический оптический элемент, который был бы спо-

собен расщеплять излучение, рассеянное объектом на обычную и референтную составляющие. Этот элемент E должен быть расположен вблизи фотографической пластинки H (рис. 1). Он должен обладать свойством свободно пропускать часть излучения, рассеянного объектом. Другая часть этого излучения, которая должна играть роль референтной волны, должна быть отклонена на некоторый угол и размыта в горизонтальной плоскости. Применение такого элемента позволит снизить требования к когерентности излучения, записываемого на селектограмме.

3. Голографические копии малых объектов

Техника наклонных пучков весьма удобна также при записи точных голографических копий малых объектов. В нашем случае целью исследования было разработать метод копирования ценных ювелирных изделий. Так как голограмма в отличие от обычной фотографии способна записывать и воспроизводить микроструктуру объекта, то она может быть использована, как документ для подтверждения того, что первоначально художественное изделие не было подменено его копией.

Оптическая схема устройства показана на рис. 4. Наклонный пучок света I_r освещает объект O через расположенную над ним прозрачную фотопластинку H . В светочувствительном слое фотопластинки регистрируется отражающая термехальная голограмма. При реконструкции голограмма освещается тем же пучком света I_r и реконструированное изображение наблюдается с помощью специального микроскопа (его первая линза L показана на рис. 3).

Преимуществом данной схемы является то, что оптические неоднородности фотографической пластинки не влияют сильно на разрешающую способность реконструированного изображения, поскольку лучи, испущенные каждой точкой объекта, пересекают только малую площадь фотографической пластинки (площадь σ , которая пересекается лучами I'_0 и I'_r , испущенными точкой P объекта).

В наших первых экспериментах голограмма регистрировалась в красном свете гелий-неодимового лазера на отечественных голографи-

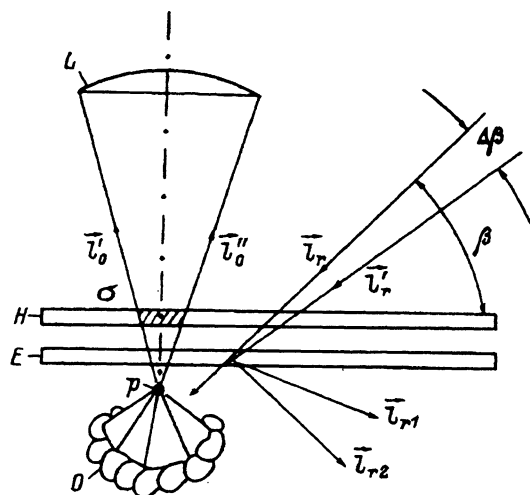


Рис. 4. Оптическая схема записи точных голографических копий малых объектов.

O — объект, H — фотографический слой, I_r — луч света, который освещает объект при записи, I'_r — луч света, который реконструирует записанную голограмму, L — первая линза наблюдательной оптической системы.

ческих фотопластинок ПФГ-03. Угол β наклона освещающего луча I_r по отношению к пластинке H был равен 25° . Были зарегистрированы изображения тест-объектов и бриллианта в оправе. Эксперименты с тест-объектами показали, что разрешение изображения было более 100 линий на мм, что было достаточно для данного вида приложений.

Эксперименты показали также некоторые недостатки данного метода. В частности, условия Брэгга при реконструкции голограммы изменялись относительно условий ее записи ввиду усадки эмульсионного слоя в процессе его химической обработки во время проявления и фиксирования. Эксперимент показал, что, для того чтобы получить максимальную яркость восстановленного изображения, необходимо изменить на величину 6° угол падения реконструирующего луча относительно его положения при записи. Этому изменению сопутствовали сдвиг восстановленного изображения и изменение его разрешения.

Эксперименты показали, что этот эффект отсутствует, если голограмма записывается на светочувствительном слое, который не нуждается в последующей химической обработке. В частности, мы использовали фотополимерную пленку HRF-700-20 фирмы "Дюпон", которая чувствительна к красному свету.

Другим недостатком схемы является одностороннее освещение объекта. В результате такого освещения появляются тени, которые затрудняют распознавание характерных признаков объекта. Мы надеемся преодолеть эту трудность с помощью голографического оптического элемента E , который предполагается разместить между объектом и фотопластинкой H . Этот элемент должен расщеплять первоначальный освещающий луч I_r на несколько компонент I_{r1} и I_{r2} , которые осветят объект с разных сторон. Такой элемент может быть записан на упомянутых слоях.

Авторы благодарят Т. Джона Траута за любезно предоставленные им фотополимерные материалы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код 93-02-3442).

Список литературы

- [1] Денисюк Ю.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 2. С. 15–21.
- [2] Denisjuk Yu.N., Ganzherli N.M. // Opt. Engin. 1993. Vol. 32. N 5. P. 958–961.
- [3] Денисюк Ю.Н. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 6. С. 59–66.
- [4] Denisjuk Yu.N., Ganzherli N.M. // Opt. Engin. 1992. Vol. 31. N 4. P. 731.