

УДК 535.317.1 : 620.1 : 535

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ В ПОПУТНЫХ ПУЧКАХ НА РЕОКСАНЕ РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЙ

Вениаминов А. В., Лашков Г. И.

Изложены результаты изучения процесса записи голографических решеток в симметричной и асимметричной схемах на объемных фазовых регистрирующих средах реоксан двух модификаций: с фотохимически стабильным и изомеризирующимся красителями. Использование последнего позволяет реализовать фазовые регистрирующие слои с физическим проявлением скрытого изображения. Для этих вариантов реализации реоксана проведено сравнение влияния асимметрии оптической схемы записи на максимальную эффективность голограммы.

В полимерах реоксан фотоиндуцированное изменение показателя преломления в видимой и ближней ИК области спектра обусловлено реакциями сенсibilизированного фотоокисления антраценовых соединений, при которых резко изменяется поглощение в УФ области спектра [1]. В типовом варианте реализации светочувствительного слоя (ТР) в качестве спектрального сенсibilизатора процесса фотоокисления к длине волны генерации записывающего лазера используется фотохимически стабильный краситель. Многократное участие молекул красителя в актах поглощения света и инициирования фотоокисления обеспечивает фотоиндуцированное изменение показателя преломления Δn порядка $(0.5 \div 1) \cdot 10^{-2}$, имеющее место непосредственно при экспонировании. Квантовая эффективность фотоокисления в ТР близка к единице.

Стремление увеличить энергетическую чувствительность среды привело к появлению новой модификации реоксана с физическим проявлением скрытого изображения (РФП) [2]. В РФП интерференционное поле регистрируется путем фотохимической генерации молекул красителя-сенсibilизатора, образующих скрытое изображение. Проявление, т. е. создание фазовой модуляции в слое, осуществляется путем его облучения некогерентным светом в полосе поглощения возникшего красителя. На этом этапе каждая молекула сенсibilизатора многократно поглощает свет и иницирует окисление антрацена, поэтому чувствительность среды повышается сравнительно с ТР, так как она определяется энергией, поглощенной при записи, а не при проявлении.

Первые эксперименты по записи голограмм на РФП в попутных пучках, осуществленные в симметричной схеме, подтвердили возможность увеличения энергетической чувствительности материала по сравнению с ТР [2].

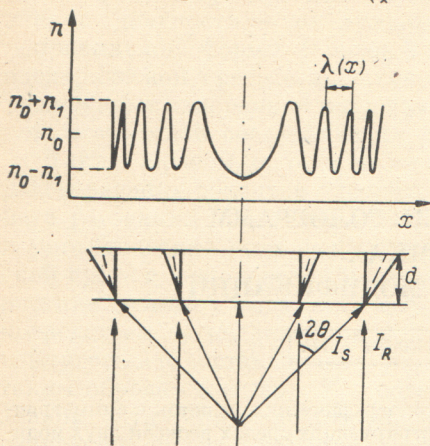
Предпочтение, отдаваемое разработчиками регистрирующих сред симметричной схеме записи при аттестации материалов, обусловлено простотой аналитического выражения, связывающего в этом случае изменение показателя преломления среды с дифракционной эффективностью голограмм [3, 4],

$$\eta = \sin^2 \frac{\pi n_1 d}{\lambda \cos \theta},$$

где n_1 — амплитуда модуляции показателя преломления, d — толщина слоя, λ — длина волны света, которым осуществляется запись, θ — половина угла между записывающими пучками.

Получаемых таким образом данных недостаточно, однако, для оценки потенциальных возможностей слоев для голографии.

Представим схему записи элементарной голограммы — голограммы точки (рис. 1), записываемой при взаимодействии сферической волны I_S и плоской I_R . На рис. 1 сверху показано распределение показателя преломления в осевом сечении голограммы точки (фазовой зонной пластинки Френеля). Пространственная частота F растет от центра к периферии с увеличением апертуры 2θ



$$F = \frac{2 \sin \theta}{\lambda}$$

С ростом апертуры возрастает также угол β между нормалью к поверхности светочувствительного слоя и биссектрисой угла, образованного записывающими пучками, т. е. увеличивается асимметрия записи.

Рис. 1. Запись голограммы точки (фазовой зонной пластинки Френеля).

Пространственное разрешение реоксана любой модификации составляет величину порядка 10^5 мм^{-1} [1] и не может быть причиной частотных искажений в записи. Тем не менее с увеличением асимметрии записи уменьшается предельно достижимая величина дифракционной эффективности η_{max} голограммы.

В работе показано, что для ТР последнее обстоятельство связано, аналогично процессу записи на фоторефрактивных кристаллах ниобата лития, с динамическим характером записи [5, 6]. Для РФП η_{max} является функцией угла между изофазными поверхностями и направлением распространения проявляющего скрытое изображение света. Анализируются причины обнаруженных эффектов.

Результаты эксперимента

Запись голограмм осуществлялась излучением 488 нм лазера (6) ЛГ 406 м в схеме, представленной на рис. 2. Светоделительная пластинка (1), призмы (2) и регистрирующий слой (3) размещены на шлифованной кварцевой пластине.

Угол между интерферирующими пучками I_R и I_S в воздухе 2θ , биссектриса этого угла отклонена на β от нормали к поверхности образца. Проявление осуществлялось при облучении образца с тыльной стороны светом, выделенным монохроматором МДР-2 (4) из излучения лампы ДКСЭЛ-1000 (5). Отклонение проявляющего света от биссектрисы угла между записывающими пучками составляет φ . Внутри материала углам β и φ соответствуют β' и φ' . Измерение дифракционной эффективности проводилось при перекрытом пучке I_S фотоприемником (7) — ФЭУ-100. Все оптические элементы установки размещены на массивной дюралевой плите с antivибрационной развязкой. Работа лазера в режиме ТЕМ достигалась снижением мощности генерации до близкой к пороговой.¹ Оптическая схема обеспечивала запись голограмм с пространственной частотой 200—3000 мм^{-1} . В работе исследовались светочувствительные слои толщиной 1 мм, наклеенные оптическим клеем на подложки из силикатного стекла толщиной 10 мм. Материал устанавливался в схему рис. 2 светочувствительным слоем к лазеру. При поперечном сечении пучков I_R и I_S 5×5 мм лучи, отраженные от тыльной стороны материала, возвращались в слой вне зоны взаимодействия I_R и I_S . Этим исключалась возможность возникновения паразитных голограмм.

Спектры поглощения ТР и РФП представлены на рис. 3. Образцы ТР имели спектр 1 (рис. 3). Спектр поглощения РФП с сенсibilизатором в неактивном для фотоокисления состоянии дан кривой 2, то же количество сенсibilизатора в активном транссостоянии имеет спектр 3.

¹ Установка разработана А. П. Поповым.

относительной дифракционной эффективности $\eta=0.96$, приведен на рис. 3 (кривая 4); для достижения этой величины потребовалась энергия 8 Дж/см² излучения $\lambda=575$ нм. Абсолютная дифракционная эффективность записанной таким образом голограммы составляет $\eta'=\eta T \approx 0.5$.

Эксперименты с асимметричной схемой записи были проведены при проявлении голограмм на РФП светом с длиной волны $\lambda=575$ нм, соответствующей максимуму поглощения фотоиндуцированной транс-формы сенсibilизатора.

Зависимость величины предельной дифракционной эффективности η_{\max} от углов β и β' между изофазными поверхностями и нормалью к поверхности слоя (рис. 2) при равенстве интенсивностей I_R и I_S представлена на рис. 5, а (кривая 1).

Запись решеток, наклоненных к поверхности слоя, сопровождается отклонением контраста интерференционной картины от единицы, что приводит в случае ТР к снижению η_{\max} . Выравнивание освещенностей слоя пучками I_R и I_S введением светофильтра в один из пучков позволяет, однако, достичь эффективности $\eta=0.96-0.98$ при любом β в исследованном диапазоне (рис. 5, а, кривая 2).

Рис. 5, а (кривая 3) иллюстрирует запись наклонных решеток на РФП при организации некогерентной засветки вдоль изофазных поверхностей ($\varphi'=0$).

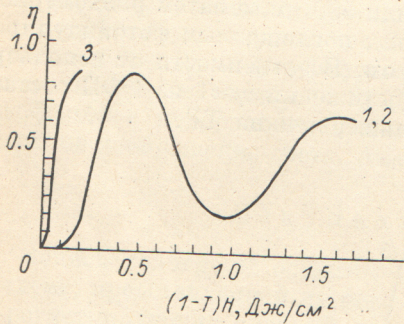


Рис. 4. Динамика записи голограммы светом 488 нм в симметричной схеме. Т — пропускание на длине волны 488 нм, H — экспозиция. 1 — ТР, 2 — РФП с красителем в трансформе, 3 — РФП с красителем в циформе.

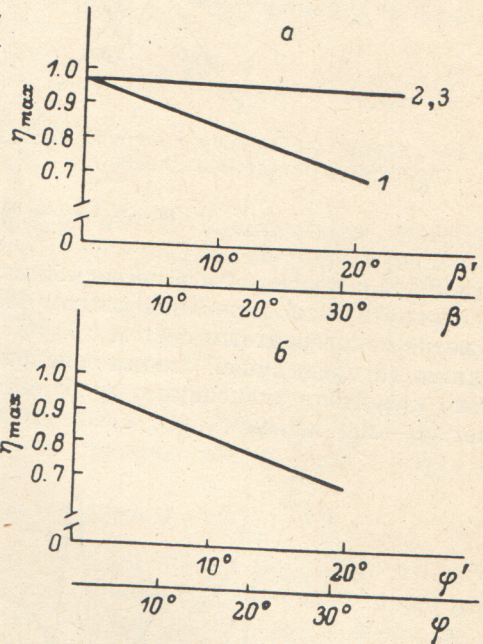


Рис. 5. Зависимость максимальной дифракционной эффективности от асимметрии схемы записи и проявления.

а — зависимость η_{\max} от положения образца относительно записывающих пучков: 1 — ТР, без выравнивания освещенности от I_R и I_S , 2 — ТР, с выравниванием освещенности от I_R и I_S , 3 — РФП, проявление вдоль изофазных поверхностей ($\varphi'=0$) без выравнивания освещенности от I_R и I_S ; б — РФП, зависимость η_{\max} от наклона направления распространения проявляющего света относительно изофазных поверхностей.

Независимо от β дифракционная эффективность $\eta_{\max} \approx 0.96$. Падение η_{\max} имеет место, если проявляющий свет образует с изофазными поверхностями угол φ и соответственно $\varphi' \neq 0$ (рис. 5, б).

Вернемся к задаче записи голограммы точки с апертурным углом 2θ . Из рис. 2 видно, что равенство углов β и θ соответствует ситуации, при которой I_R падает нормально к поверхности слоя аналогично записи зонной пластинки (рис. 1). Следовательно, рис. 5, а (кривая 1) позволяет оценить ожидаемую дифракционную эффективность записанной на ТР голограммы точки апертурой $2\beta=2\theta$. Так, для апертур 40° ожидается η_{\max} не менее 0.8.

В случае организации проявляющей подсветки нормально к поверхности слоя при записи голограммы точки на РФП $\varphi=\theta$ и рис. 5, б можно оценить η_{\max} голограмм точки апертурой $2\theta=2\varphi$.

Представленные результаты свидетельствуют, таким образом, о возможно-

сти записи на ТР и РФП высокоэффективных голографических объективов. Требуемые экспозиции в когерентной схеме для РФП в 2.5—10 раз меньше, чем для ТР.

Обсуждение результатов

Изменение показателя преломления ТР происходит в реальном масштабе времени и локализовано в месте действия света (динамическая среда без сдвига). Для динамических сред известно явление самодифракции интерферирующих пучков на возникающей под их действием голограмме, приводящее к усилению слабого пучка и развороту решетки в сторону сильного пучка [5]. Такое поведение характерно и для ТР при записи голограммы в несимметричной схеме или при неравенстве интенсивностей I_R и I_S .

При экспонировании РФП в когерентном свете отсутствует обратная связь, обусловленная взаимодействием голограммы с записываемым интерференционным полем, и скрытое изображение записывается без искажений. Его проявление связано, однако, с наложением экспоненциального распределения освещенности по глубине слоя в соответствии с законом Бугера.

Модельные эксперименты по некогерентной засветке голограмм, записанных на ТР, свидетельствуют о низкой чувствительности голограмм к наложению градиента показателя преломления вдоль изофазных поверхностей. Так, облучение некогерентным светом ($T=0.4$) вдоль изофазных поверхностей решеток, записанных на ТР до $\eta=0.48$, привело при экспозиции 10 Дж/см² (по порядку величины соответствует энергии, требуемой для проявления скрытого изображения на РФП) к уменьшению η лишь до 0.44. Средний показатель преломления изменился при этом на $3 \cdot 10^{-3}$. Аналогичная засветка под углом $\varphi'=13^\circ$ к изофазным поверхностям вызвала уменьшение η до 0.23 и разворот голограммы на $2'$. Поскольку облучение не приводило к уменьшению амплитуды модуляции показателя преломления в решетке (как следует из опыта по симметричной засветке), уменьшение η должно быть связано с несимметричным изменением показателя преломления. На РФП в случае распространения проявляющего света вдоль изофазных поверхностей записанной интерференционной картины распределение фотоиндуцированного изменения показателя преломления симметрично относительно этих поверхностей, и проявление происходит без искажения скрытого изображения. По мере роста отклонения от симметричной схемы проявления нарастает дефазировка голограммы (рис. 5, б). Возникающая в соответствии с экспоненциальным законом светопоглощения асимметрия распределения показателя преломления относительно изофазных поверхностей скрытого изображения эквивалентна изгибу и неравномерному сжатию голограммы. Максимальный эффект дефазировки должен иметь место при взаимной ортогональности направления распространения проявляющего света и изофазных поверхностей. Нагляден случай записи голограммы зеркала (изофазные поверхности расположены вдоль слоя) с проявлением по нормали к поверхности. При облучении проявляющим светом вследствие изменения среднего показателя преломления изменяется оптическая разность хода между элементарными отражателями. Поскольку при облучении n уменьшается, облучение эквивалентно экспоненциальному по глубине сжатию голограммы, которое приводит к потере периодичности структуры.

Эффекты фотохимической дефазировки объемных голограмм, их связь с линейным коэффициентом поглощения, а следовательно, и с реальной чувствительностью слоев будут рассмотрены в следующих работах.

Литература

- [1] Лашков Г. И. — В кн.: Несеребряные фотографические процессы. Л., 1984, с. 130—146.
- [2] Лашков Г. И., Попов А. П., Ратнер О. Б. — Опт. и спектр., 1982, т. 52, в. 4, с. 585.
- [3] Kogelnik H. — The Bell System Techn. J., 1969, v. 48, N 9, p. 2909.
- [4] Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М., 1973.
- [5] Винецкий В. Л., Кухтарев Н. В., Одулов С. Г., Соскин М. С. — УФН, 1979, т. 129, № 1, с. 113.
- [6] Суханов В. И., Ащеулов Ю. В., Петников А. Е. — В кн.: Оптическая голография. Л., 1979, с. 64—72.

Поступило в Редакцию 3 января 1986 г.