

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХМЕРНЫХ ГОЛОГРАММ НА ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ ЭМУЛЬСИЯХ

*М. И. Дзюбенко, В. А. Кришталь,
А. П. Пятикоп и В. В. Шевченко*

В работе приведена методика исследования параметров трехмерных голограмм. Исследованы параметры голограмм на фотопластинках ВРЛ, ПЭ-1 и Агфа Геверт 8Е75 при записи во встречных пучках излучением He—Ne лазера. Производилось улучшение качества отфиксированных голограмм обработкой в растворах триэтанол-амина. При устранении усадки получена максимальная дифракционная эффективность 20%.

Проблема получения качественного неискаженного изображения, восстанавливаемого трехмерными голограммами, актуальна для решения различного рода практических задач с применением метода голографии. Исследование параметров таких голограмм и влияние на них различных факторов проводилось для различных фотоматериалов [1, 2], причем лучшие результаты были получены для фотопластинок лабораторного полива типа «Валента» [3]. Однако широкое применение записи голограмм в трехмерных средах ограничивается фотоматериалами промышленного производства. В связи с этим целесообразно повышение качества таких голограмм путем оптимизации условий экспонирования и процесса химико-фотографической обработки.

В данной работе приводятся результаты экспериментов по исследованию влияния различных факторов, в том числе величины экспозиции, процесса химико-фотографической обработки фотоматериалов, а также противоусадочной обработки на основные параметры голограмм, определяющие качество восстановленного изображения: дифракционную эффективность η , смещение длины волны максимума λ_{\max} и полуширину спектра $\Delta\lambda$ дифрагированного излучения.

Запись голограмм производилась во встречных пучках (угол между референтным и объектным лучами был равен 180°) по методу, предложенному Денисюком [5], на фотопластинках ВРЛ, ПЭ-1 и Агфа Геверт 8Е75 излучением He—Ne лазера ЛГ-36А, работающего в одномодовом режиме. Референтный волновой фронт формировался прямоугольной диафрагмой, образованной двумя скрещенными щелями спектрографа. Размеры отверстия были 100×100 мкм, полученная при этом расходимость была сравнительно невелика ($\Theta = \lambda/d = 6.3$ мрад), что позволяет считать волновой фронт плоским, и в то же время размер центральной зоны дифракции на расстоянии 1.5 м от диафрагмы (в плоскости фотопластинки) был достаточно большим ($\sim 10 \times 10$ мм). Применение дифракции на таком отверстии позволяет избавиться от искажений, вносимых зеркалами и линзами, а распределение мощности лазера в плоскости фотопластинки легко вычислить [6]. Неравномерное распределение освещенности в пределах центральной зоны дает возможность охватить большой диапазон экспозиций на одной голограмме, вследствие чего погрешности, обусловленные нестабильностью мощности лазера и трудноустраняемыми ошибками при химико-фотографи-

ческой обработке фотопластинок, сводятся к минимуму. Для уменьшения паразитной модуляции почернения, возникающей при когерентном освещении вследствие неоднородности полива эмульсии и дефектов подложки, фотопластинка помещалась в плоскопараллельную кювету с иммерсионной жидкостью. Алюминиевое зеркало, применяемое в качестве объекта, помещалось за кюветой на расстоянии ~ 10 мм от фотопластинки, что при длине когерентности лазера ~ 200 мм позволяет получить почти максимальный коэффициент модуляции почернения. Отличием поперечных сечений референтного и объектного лучей в плоскости фотопластинки можно пренебречь.

Как известно [3], трехмерные голограммы обычно обрабатываются либо в метол-гидрохиноновом проявителе с последующим отбеливанием, либо в пироаммиачном, причем для устранения усадки иногда предлагают исключить фиксирование из общего процесса химико-фотографической обработки фотоматериалов. Однако в этом случае усадка полностью не устраняется, к тому же возникают дополнительные шумы, обусловленные ростом вуали и рассеянием на удаленных зеркалах галогенида серебра [1, 2], а дли-

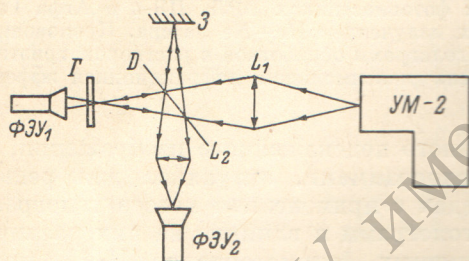


Рис. 1. Схема установки для измерения параметров голограмм.

тельность хранения таких голограмм, особенно на свету, ограничена. Исходя из этих соображений, после предварительных экспериментов нами был выбран следующий процесс обработки фотоматериалов: проявление в пироаммиачном проявителе [1], промывка, фиксирование, промывка, сушка в растворах этилового спирта возрастающей концентрации. Такая экспресс-сушка способствует постепенному и равномерному удалению воды из желатинового слоя, быстрому и однородному высыханию эмульсии по поверхности [4].

Для исследования параметров голограмм применялась установка, схематически изображенная на рис. 1. Монохроматор УМ-2 из сплошного спектра излучения циркониевой лампы выделял квазимонохроматический участок с шириной ~ 10 Å. Длиннофокусная линза L_1 формировала волновой фронт с достаточно малой расходимостью. Фотоумножитель ФЭУ₂ (ФЭУ-68) поочередно регистрировал как дифрагированное голограммой излучение (оптический путь L_1 —светоделитель D —голограмма Γ — D —линза L_2 —ФЭУ₂), так и часть выходящего из монохроматора («опорного») излучения (оптический путь L_1 — D —алюминиевое зеркало $З$ — D — L_2 —ФЭУ₂). Мостовая схема измерений позволяла легко определить величину дифракционной эффективности, которая равна отношению тока ФЭУ₂ при регистрации дифрагированного излучения к току при регистрации «опорного» излучения (ФЭУ работал на линейном участке люкс-амперной характеристики). Измерение полуширины спектра дифрагированного голограммой излучения $\Delta\lambda$ и смещение λ_{\max} относительно длины волны лазера λ_1 , характеризующее усадку эмульсии, осуществлялось путем изменения длины волны λ выделяемого монохроматором излучения. Погрешность,

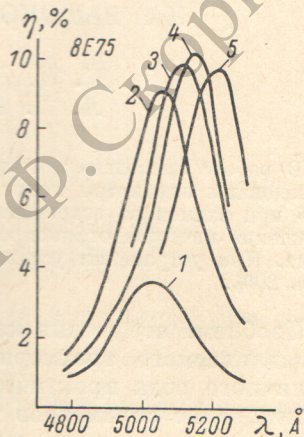


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности от λ для различных экспозиций H (дж/см²).

1 — $H = 0.9 \cdot 10^{-4}$, 2 — $H = 2.2 \cdot 10^{-4}$, 3 — $H = 4.4 \cdot 10^{-4}$, 4 — $H = 7.0 \cdot 10^{-4}$, 5 — $H = 14.6 \cdot 10^{-4}$.

вносимая расходимостью волнового фронта при измерении $\Delta\lambda$, была меньше 10 \AA (\sim ширины спектра на выходе монохроматора).

Перемещение голограммы в своей плоскости относительно зондирующего луча, осуществляемое с помощью микрометрического винта, позволяло исследовать экспозиционные зависимости параметров голограмм. При уменьшении экспозиции на порядок по отношению к максимальной (в середине центральной зоны) относительная погрешность изменялась от 0.4 до 10%. Погрешность в определении экспозиции в основном обусловлена конечностью размеров зондирующего луча, нелинейным характером распределения освещенности в пределах центрального максимума и ошибками при установке фотопластины.

Фотоумножитель ФЭУ₁ (ФЭУ-68) применялся для определения спектрального пропускания голограммы в исследуемой части. Почернение фотопластинок измерялось микрофотометром МФ-2.

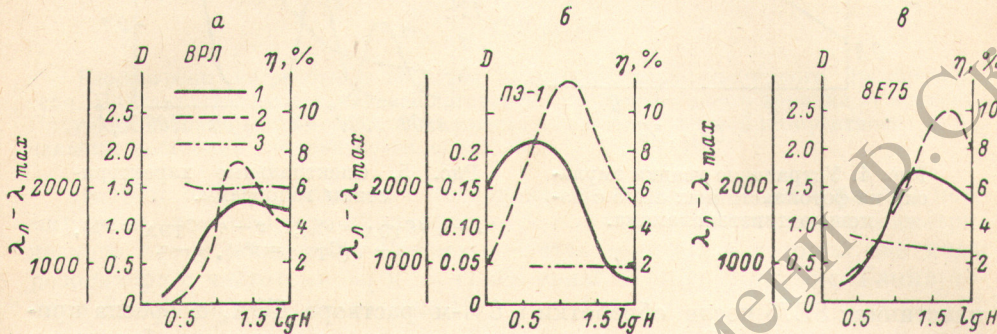


Рис. 3. Экспозиционные характеристики голограмм.

1 — характеристическая кривая, 2 — дифракционная эффективность, 3 — величина смещения λ_{\max} . Оптимальные экспозиции равны 2, 6 и 0.7 дж/см² соответственно для фотопластинок ВРЛ, ПЭ-1 и 8Е75.

На рис. 2 приведена зависимость дифракционной эффективности от длины волны восстанавливающего излучения в различных участках голограммы, соответствующих различным величинам экспозиции для фотопластинок 8Е75. Аналогичные зависимости получены для фотопластинок ВРЛ и ПЭ-1. Как и следовало ожидать, с увеличением экспозиции дифракционная эффективность сначала возрастает, достигая максимума при некоторой величине экспозиции, а затем падает. При этом λ_{\max} монотонно смещается в длинноволновую область, однако величина этого смещения незначительна по сравнению с величиной усадки. Поэтому оптимальной экспозицией считалась та, при которой η достигала максимума. Зависимость дифракционной эффективности и смещения λ_{\max} от экспозиции для фотопластинок изображены на рис. 3. Там же приведены их характеристические кривые, имеющие два участка — нормальный и аномальный (ниспадающий), определяемые действием пироаммиачного проявителя. Из рис. 3 видно, что максимальная величина дифракционной эффективности для различных фотоматериалов достигается при различных почернениях и даже в различных участках характеристической кривой, что требует для каждого типа эмульсии частного решения вопроса выбора экспозиции. Необходимо отметить, что лучшие результаты для фотопластинок ПЭ-1 были получены с проявителем [1], разбавленным в 4 раза.

Смещение λ_{\max} в коротковолновую часть спектра у исследованных фотопластинок различно и достигает 2000 \AA для ВРЛ, около 1000 \AA у ПЭ-1 и 1200 \AA для 8Е75. Это можно объяснить, по-видимому, различием концентрации серебра и размеров зерен в данных эмульсиях. Полуширина спектра дифрагированного излучения у исследованных фотопластинок также различна ($200, 100$ и 300 \AA соответственно для ВРЛ, ПЭ-1 и 8Е75), что в основном обусловлено разной толщиной эмульсионного слоя ($6, 10$ и 4 мкм соответственно).

С целью устранения усадки нами проводилось купание высушенных голограмм в водных растворах триэтаноламина (ТЭА) [2, 3]. Как видно из рис. 4, подбирая концентрацию ТЭА в растворе, можно полностью устранить усадку эмульсии. Наряду с ожидаемым смещением λ_{\max} после противоусадочной обработки голограмм наблюдается существенное увеличение дифракционной эффективности (рис. 5). Измерения проводились на одном и том же участке голограммы до и после купания в растворах ТЭА. Дифракционная эффективность голограмм, полученных на фото-

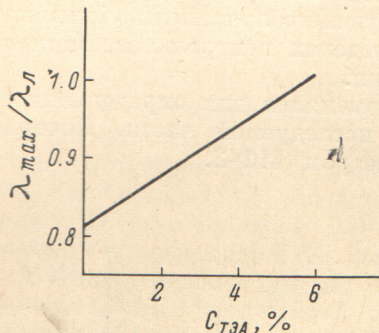


Рис. 4. Устранение усадки эмульсии на фотопластинках 8Е75 с помощью триэтаноламина.

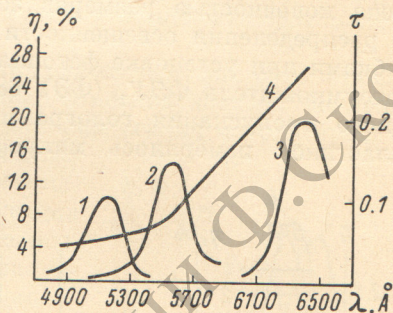


Рис. 5. Спектральные характеристики голограмм.

1 — η ($C_{\text{ТЭА}} = 0\%$), 2 — η ($C_{\text{ТЭА}} = 2\%$),
3 — η ($C_{\text{ТЭА}} = 6\%$), 4 — τ .

пластинках 8Е75 после обработки в 6%-м растворе ТЭА, возросла примерно в два раза. По-видимому, этот результат в основном обусловлен уменьшением рассеяния на зернах эмульсии [7] и увеличением амплитудного пропускания τ при смещении λ_{\max} в длинноволновую область (рис. 5).

Таким образом, проведенные исследования показывают, что применение процесса фиксирования и последующая обработка в растворах ТЭА позволяют получить голограммы с дифракционной эффективностью 20% на фотопластинках промышленного производства.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Ю. Н. Денисюку, Д. И. Стаселько, А. Г. Смирнову и О. В. Андреевой за полезные консультации и советы.

Литература

- [1] О. В. Андреева, В. И. Суханов. Опт. и спектр., 30, 786, 1971.
- [2] L. H. Lin, S. V. Lo Bianco. Appl. Opt., 6, 1255, 1967.
- [3] Ю. Н. Денисюк, И. Р. Протас. Опт. и спектр., 14, 721, 1963.
- [4] K. S. Pennington, I. S. Nagreg. Appl. Opt., 9, 1643, 1970.
- [5] Ю. Н. Денисюк. ДАН СССР, 144, 1275, 1962.
- [6] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. Изд. «Наука», М., 1970.
- [7] П. Х. Прусс. Матер. II Всесоюз. школы по голографии, 278. ФТИ, Л., 1971

Поступило в Редакцию 17 сентября 1973 г.