

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

03;07;12

Журнал технической физики, т. 65, в. 9, 1995

© 1995 г.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МАССОПЕРЕНОСА В ЖИДКИХ
ФОТОПОЛИМЕРИЗУЮЩИХСЯ КОМПОЗИЦИЯХ***А.В.Волков, С.Г.Волотовский, В.М.Гранчак, Н.Л.Казанский,
О.Ю.Моисеев, В.А.Сойфер, В.С.Соловьев, Д.М.Якуненкова*

Институт систем обработки изображений РАН,
443001, Самара, Россия
(Поступило в Редакцию 6 октября 1994 г.)

В работах [1-3] сообщалось о новом эффекте массопереноса в частично отвержденных жидких фотополимеризующихся композициях (ЖФПК). Суть эффекта заключалась в следующем. При экспонировании ультрафиолетовым (УФ) излучением слоя ЖФПК через полутонной фотошаблон (рис. 1) образуется форполимерная структура, негативно отображающая фотошаблон. В процессе выдержки при отсутствии иницирующих излучений (темновой рост) происходит перераспределение (массоперенос) непрореагировавшего олигомера из слабо засвеченных областей в сильно засвеченные. При этом наблюдается возникновение рельефа на поверхности ЖФПК.

В данной работе проводились исследования эффекта массопереноса с целью создания квазидифракционных оптических элементов видимого диапазона с высотой рельефа от 70 до 100 мкм. Под квазидифракционными оптическими элементами подразумеваются элементы, высота зон которых h пропорциональна $m\lambda$, где целое число $m > 1$, а λ — рабочая длина волны оптического элемента (в отличие от дифракционных оптических элементов, у которых $m = 1$).

Цель исследований и экспериментальные результаты

В работах [1,2] отмечалась нестабильность светочувствительности ЖФПК. В настоящей работе предлагается использование композиций со стабилизирующей добавкой на основе соединений калия, позволяющих сохранить стабильность ЖФПК по светочувствительности в течение недели. Целью проведенных исследований было выявление особенностей массопереноса в композициях со стабилизирующей добавкой при формировании квазидифракционных оптических элементов с большой высотой профиля зон $h = 100$ мкм. Основу ЖФПК составляли акриловые олигомеры, в качестве фотоинициатора использовался изобутиловый эфир бензоина.

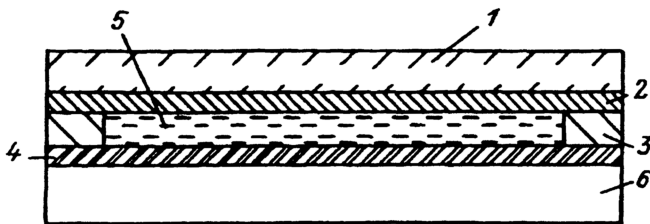


Рис. 1. Образец для экспонирования ЖФПК.

1 — стекло, 2 — антиадгезионный слой, 3 — нормирующие прокладки, 4 — фотослой фотошаблона, 5 — слой ЖФПК, 6 — основа фотошаблона.

Представляется актуальным выявление закономерностей влияния основных факторов (толщины слоя ЖФПК, степени конверсии, контраста фотошаблона и его закона изменения, периода структуры) на высоту рельефа и его профиль.

Исследования закономерностей роста рельефа проводились на основе фотошаблона линейной клиновидной структуры, который впоследствии давал возможность ввести предсказания в закон изменения плотности фотошаблона для получения линейных участков рельефа. Для определения стабильности высот рельефов и степени их соответствия закону изменения плотности фотошаблона были зафиксированы состав ЖФПК и степень конверсии, т.е. время экспозиции ЖФПК. В качестве тестовых фотошаблонов использовались амплитудные решетки (рис. 2) с распределением плотности, близким к линейному (рис. 3). Оптическая плотность измерялась на денситометре СР-25М1 (N — номер точек градации “серого” внутри одного периода амплитудной решетки).

Для проверки закона изменения плотности фотошаблона в УФ (по сравнению с видимым диапазоном) производилось сканирование его в поле экспонирующего излучения фоторезистором. Спектральное соответствие необходимой нам полосы в области 320–380 нм и спектральной чувствительности фотосопротивления обеспечивалось УФ светофильтрами, помещенными перед фотоприемником. График зависимости плотности (рис. 3) фотошаблона от координаты с учетом люкс-амперной характеристики фотоприемника представлен на рис. 4.

Сравнение рис. 3 и 4 позволяет выявить отсутствие резких отклонений закона изменения плотности фотошаблона для видимого и УФ излучений в пределах оптимального контраста для роста ЖФПК.

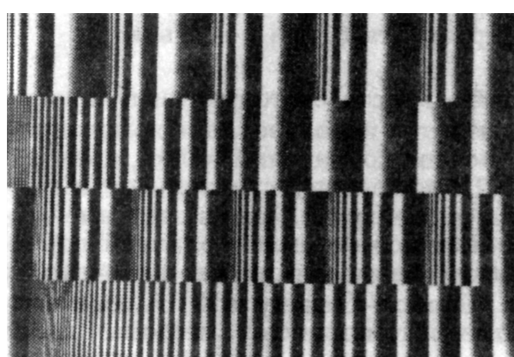


Рис. 2. Тест-структура для исследования массопереноса.

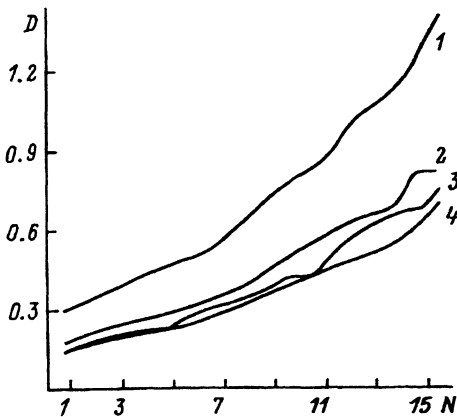


Рис. 3. Изменение оптической плотности D в о лном периоде для четырех фотошаблонов (1-4) тест-структуры с различной контрастностью.

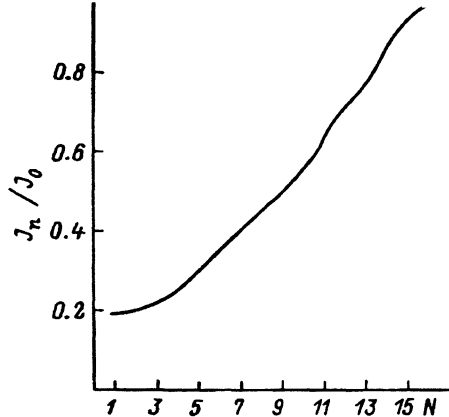


Рис. 4. Распределение оптической плотности фотошаблона в УФ свете.

После экспонирования образцы выдерживались в вакуумной печи при температуре $40-45^{\circ}\text{C}$ для темнового роста. Рост проходил в течение 1-3 суток. Затем производили фиксацию слоя форполимера УФ излучением в вакууме. Полученный рельеф измерялся на профилетре-профилографе 170311.

Один из примеров профиля, полученного на слое ЖФПК, представлен на рис. 5. Толщина слоя ЖФПК составляла 220-240 мкм. При такой толщине высота рельефа достигала 80-100 мкм, что согласуется с предыдущими работами. Однако форма и высота клина существенно зависела от периода тест-структуры. С возрастанием периода, вероятно, из-за затруднения процесса диффузии остаточного олигомера верхняя часть клина становится более плоской (рис. 5, участки a, b, c).

Отношение изменения высоты рельефа H к максимальной высоте рельефа H_{max} в зависимости от периода решетки T для нескольких разных экспозиций E представлена на рис. 6. Из приведенных зависимостей следует, что при всех режимах экспонирования, т.е. при различной степени конверсии композиции, относительное уменьшение высоты рельефа практически сохраняет свою величину. Что касается формы рельефа, то зависимость значительно сложнее. Из анализа полученных профилограмм (в частности, показанных на рис. 5) видно, что при отношении периода структуры T к толщине слоя ЖФПК d порядка $T/d = 15$ искажения клина носят значительный характер. Достаточно линейный рост наблюдается на начальном участке, равном

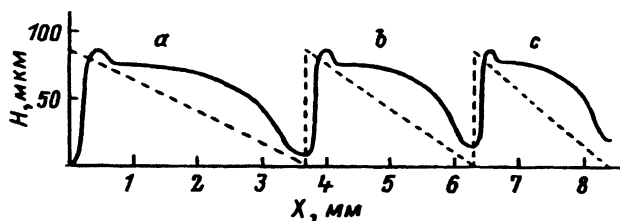


Рис. 5. Профилограмма выращенного рельефа на ЖФПК для различных периодов (пунктиром показан идеальный рельеф).

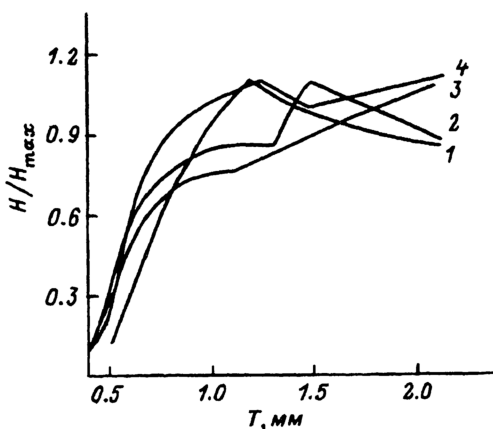


Рис. 6. Зависимость относительной высоты рельефа H/H_{\max} от периода T тест-структуры при различных экспозициях E ($E_1 > E_2 > E_3 > E_4$) (1-4).

$1/3-1/6$ периода, что соответствует изменению плотности фотошаблона D около 0.3, причем высота рельефа в конце этого участка достигает 70–80% от максимальной высоты. С уменьшением отношения периода к толщине наблюдается увеличение “удельного веса” линейного участка.

Для дальнейшего изучения закономерностей роста микрорельефа была разработана усложненная тест-структура, характер распределения оптической плотности которой представлен на рис. 7, а фотография фотошаблона — на рис. 8. На этой периодичной структуре с различными законами изменения запрограммированы переходы от “светлого” к “темному” во всем диапазоне значений световой мощности засветки фотопостроителя FEAG-300.

С целью выяснения влияния на рост рельефа соседних участков в точках a, b, c были записаны периодичные решетки (длиной 0.5 мм) с

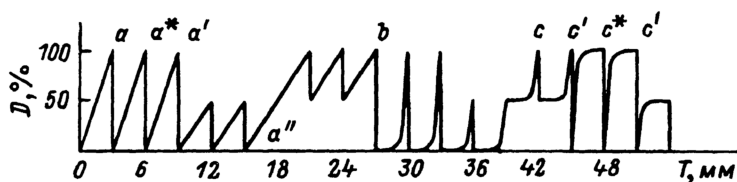


Рис. 7. Вид распределения оптической плотности усложненной тест-структуры.

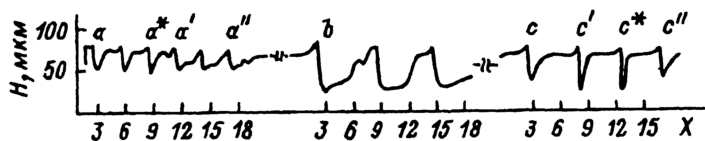


Рис. 8. Усложненная тест-структура для исследования массопереноса (a, b, c — области по 0.5 мм бинарных решеток).

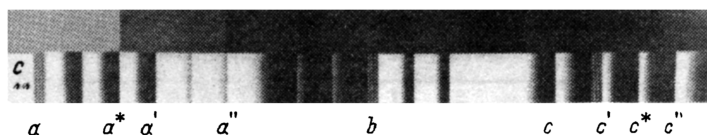


Рис. 9. Фрагменты профилограммы выращенного рельефа на ЖФПК (a, b, c — области по 0.5 мм бинарных решеток).

малым шагом, причем некоторые периоды фотошаблона засвечивались от минимального до среднего (a' , a'') и от среднего до максимального значения (a'' , b). После приготовления образцов по описанной выше методике и их темнового роста снимались профилограммы, одна из которых представлена на рис. 9.

Рассмотрим некоторые характерные области (рис. 8, 9), при этом учтем, что фотография (рис. 8) — это негатив исходного фотошаблона. В области a записана бинарная решетка с частотой 10 л/мм, причем с обеих сторон решетки находятся темные области (светлые участки рис. 8). На рис. 9 в области a видно, что края рельефной решетки подняты относительно средней части. Этот эффект объясняется подтягиванием избыточного олигомера из темных областей. В областях b и c слева от решетки находится светлая область, а справа — темная. В соответствии с этим мы видим (рис. 9) слева провал решетки (так как слева находится светлое поле), а справа — ее подъем.

Аналогично “выбросы” в областях a и c объясняются наличием слева темного участка с избыточным количеством остаточного олигомера. Причем выброс в точке a больше выброса в точке c , так как перепад оптической плотности в точке a выше, чем в точке c .

Выводы

При проецировании в слой ЖФПК специально разработанного теста и последующем анализе профилограмм полученного рельефа были выявлены следующие особенности новой рельефообразующей среды.

1. Максимальный рост рельефа наблюдался при контрасте фотошаблонов 0.6–0.7 и составлял примерно 50% от первоначальной толщины слоя ЖФПК.

2. При увеличении отношения периода рельефа к первоначальной толщине ЖФПК более чем в 10–12 раз линейная функция рельефной структуры в светлой области начинает искажаться и при дальнейшем его увеличении приобретает плоскую вершину. Объясняется это затруднением диффузионного переноса остаточного олигомера.

3. На границе черное–белое периодической структуры в области белого появляются всплески, вызванные усиленной диффузией остаточного олигомера из темной области.

4. Линейный участок клина наблюдается при контрастности фотошаблона от 0.3 до 0.4.

В результате проведенных исследований была выявлена возможность изготовления квазидифракционных элементов на основе эффекта массопереноса в слоях ЖФПК. Возможность получения непрерывных дифракционных рельефов большой высоты позволяет существенно уменьшить хроматические искажения, характерные для бинарных и ступенчатых структур.

Список литературы

- [1] Соловьев В.С., Войко Ю.В. // Компьютерная оптика. Вып. 8. М., 1990. С. 74–76.
- [2] Соловьев В.С. // Компьютерная оптика. Вып. 10–11. М., 1992. С. 145–149.
- [3] Boiko Yu.B., Granchak V.M., Dilung I. et al. // Proc. SPIE. 1990. Vol. 1238. P. 252–257.