

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, В.С. Соловьев
Институт систем обработки изображений РАН

Предлагается реализация фазовой функции дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в виде непрерывного рельефа на плоской поверхности. Для создания такого рельефа был использован эффект массопереноса в слоях жидких фотополимеризующихся композиций (ЖФПК) [1-3]. Разработанная технология позволяет создавать "квазидифракционные" оптические элементы (с высотой рельефа пропорциональной $10-100 \lambda$, где λ - длина волны), сохраняющие преимущества дифракционной оптики (минимальные массогабаритные характеристики; уникальные прикладные возможности, достигаемые за счет компьютерного проектирования микро рельефа) с работой в широком спектральном диапазоне. Авторами целенаправленно был проведен поиск записывающих сред, которые бы позволили получать оптически гладкий, нерассеивающий свет микро рельеф с непрерывным профилем в диапазоне от единиц до десятков микрон. На базе этого эффекта была разработана технология получения фокусаторов лазерного излучения для длины волны 10,6 мкм. Приводятся профилограммы рельефа полученного на ЖФПК с использованием массопереноса.

Формирование микро рельефа на основе темнового роста ЖФПК

Опишем экспериментальную часть работы по формированию микро рельефа.

Жидкий светочувствительный слой формировался из композиции олигоэфиракрилатов в качестве полимеризующегося соединения и изобутилового эфира бензоина в качестве фотоинициатора (1-2 Мас.%). Запись периодической структуры осуществлялась проекцией фотошаблона оптического элемента в ультрафиолетовом (УФ) свете. Фотошаблон представляет собой полутонную картину кольцевых зон с шириной от десятков микрон до 2 миллиметров. Вместе с изображением оптического элемента на фотошаблоне записывалась синусоидальная дифракционная решетка с частотой 10 лин/мм для контроля полимеризации (рис.1). Фотошаблон с помощью объектива проецировался в слой ЖФПК. Контроль степени полимеризации велся с помощью измерения мощности дифрагировавшего на образующейся фазовой дифракционной решетке лазерного излучения (рис.2).

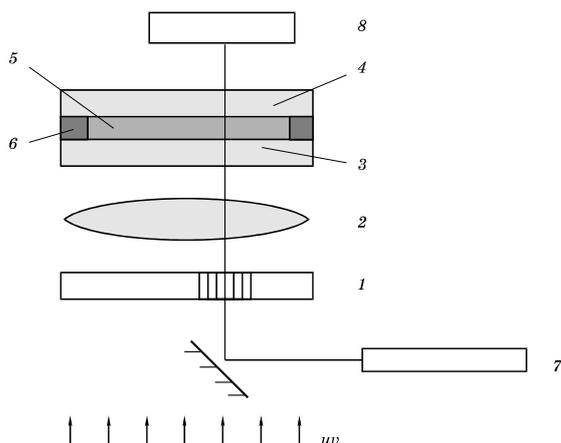


Рис.1. Оптическая схема проекции полутонных амплитудных масок в слой ЖФПК. 1 - полутонная маска оптического элемента с дифракционной решеткой; 2 - объектив; 3 - гидрофильная стеклянная пластина; 4 - гидрофобная стеклянная пластина; 5 - слой ЖФПК; 6 - прокладка; 7 - лазер; 8 - измеритель мощности.

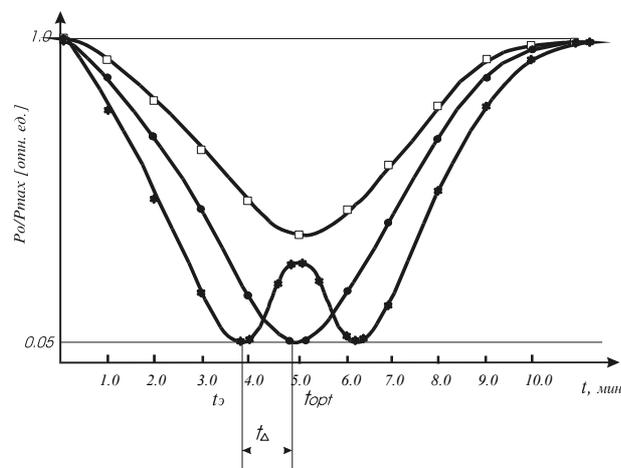


Рис.2. Зависимость относительной мощности нулевого порядка зондирующего излучения от времени экспонирования. 1 - толщина слоя (d)=20 мкм; 2 - d =30 мкм; 3 - d =50 мкм.

Очень существенным является достижение первого минимума мощности дифрагировавшего лазерного луча нулевого порядка, т.к. при превышении времени t_{opt} существенно снижается рост микро рельефа в темновом (выдержка в темноте после экспозиции в УФ свете) режиме.

Из рис.2 видно, что при толщине слоя ЖФПК $d=20$ мкм (кривая 1) не происходит полного фазового набега излучения H_e-N_e лазера на синусоидальной фазовой решетке, образующейся во время процесса полимеризации, для перераспределения энергии излучения нулевого порядка в первый порядок дифракции. При толщине слоя ЖФПК $d=30$ мкм происходит практически полное перераспределение энергий, и мощность излучения нулевого порядка падает почти до нуля. При превышении слоя ЖФПК $d=30$ мкм (например, $d=50$ мкм, рис.2 - кривая 3) первый экстремум функции P_0/P_{max} наступает быстрее, поэтому экстремальное значение времени t_0 не может служить для индикации оптимальной экспозиции. Экспозицию в этом случае необходимо увеличить на время t_{Δ} , величину которого определяют экспериментально.

Экспозиция прерывалась по достижении максимального фазового контраста индуцированной в слое ЖФПК дифракционной решетки. По окончании экспозиции "сэндвич" разбирался. При этом частично отвержденный слой ЖФПК оставался на гидрофильном стекле. Образец устанавливали на интерференционный микроскоп МИИ-4, с помощью которого контролировали следующие параметры:

а) величину исходного (постэкспозиционного) рельефа;

б) изменение общей толщины слоя при росте рельефа;

в) динамику изменения "горбов" и "впадин" рельефа относительно начального уровня слоя ЖФПК, установившегося сразу после экспозиции.

На рис.3 проиллюстрирована динамика поведения слоя ЖФПК после экспозиции. Из сравнения положения поверхностей "горбов" и "впадин" в моменты времени t_1 и t_2 видно, что наряду с общим уменьшением толщины слоя d наблюдается превышение уровня поверхности "горбов" над начальным уровнем поверхности.

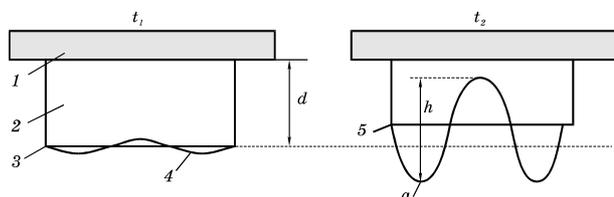


Рис.3. Иллюстрация поведения слоя ЖФПК в постэкспозиционный период рельефообразования момент времени t_1 сразу после экспозиции и спустя некоторое время (момент t_2). 1-стеклянная пластина; 2-слой ЖФПК; 3-начальный уровень поверхности слоя ЖФПК; 4-образовавшаяся после экспозиции рельефная поверхность; 5-средний уровень в момент времени t_2

Температура в зоне измерений сохранялась постоянной с точностью $0,5^{\circ}\text{C}$, что позволило исключить "температурные эффекты" в данном эксперименте. Превышение уровней "горбов" над начальным уровнем исключает гипотезу образования рельефа за счет контракции (усадки) слоя. Хотя общая усадка слоя имеет место (см. рис.3), она служит только фоном, на котором идет процесс рельефообразования. В первые часы темного роста усадка практически отсутствует, в то время как рост рельефа значителен и составляет (100-500)% от первоначального. К тому же "горбы" соответствуют пучностям светового поля, где усадка должна была бы быть максимальной. В данном случае мы имеем обратную картину. Высота рельефа h , как правило, составляет 0,3 - 0,5 от первоначальной толщины слоя d . Во время темного роста после экспозиции, которая длится от нескольких часов до 3 суток, рельеф вырастает в 10-15 раз от своего начального значения, которое фиксировалось сразу после разъединения стекол "сэндвича". При непрерывном контроле, по достижении заданной высоты производится общая засветка слоя УФ- светом в вакууме. При этом слой форполимера дополимери-

зуется, и мы имеем рельефную матрицу оптического элемента. При правильно выбранном режиме фиксирования качество рельефной поверхности не меняется, равно, как остается прежней ее высота.

Практические результаты использования ЖФПК

На основе описанного эффекта рельефообразования была разработана технология получения дифракционных оптических элементов. Рельефная поверхность оптических элементов, изготовленных по данной технологии, является оптически гладкой и обладает зеркальным блеском (см.рис.4). В то время как фокусатор ИК-излучения, изготовленный по альтернативной технологии на основе пигментной желатиновой бумаги /4/, имеет матовую поверхность (рис.5).

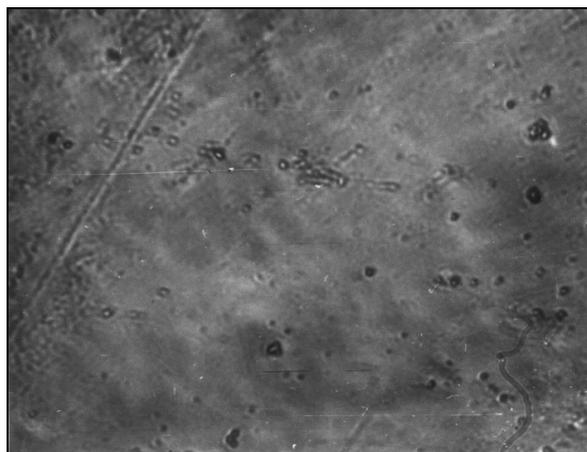


Рис.4. Микрофотография поверхности фокусатора, изготовленного на ЖФПК. Увеличение 250.

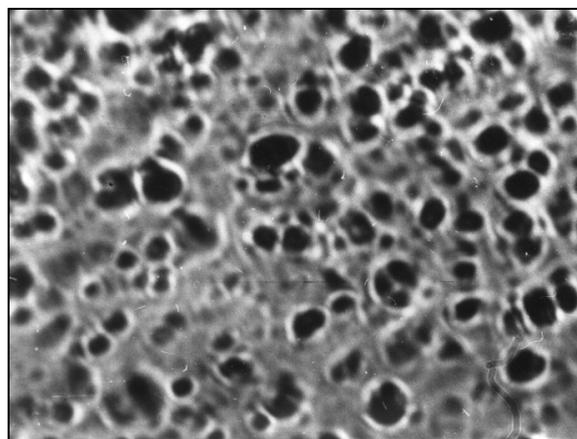


Рис.5. Микрофотография поверхности фокусатора, изготовленного на пигментной желатиновой бумаге. Увеличение 250.

Для оптических элементов, работающих в видимом диапазоне длин волн, это свойство (возможность получения нерассеивающих рельефных поверхностей) имеет принципиальное значение.

Дальнейшим усовершенствованием технологии является создание квазидифракционных или гармонических /5/ оптических элементов с высотой зон $n\lambda$, где $n=10-200$, λ - длина волны.

Достоинством технологии является возможность получения любой заданной высоты рельефа (в интервале 0-100 мкм) с возможностью непрерывного контроля. На рис.6 приведена профилограмма квазидифракционной микролинзы изготовленной по разработанной технологии. Из рис.6 видно, что имеет место ограничение разрешающей способности данной записывающей среды. Это проявляется в том, что с повышением пространственной частоты, уменьшается высота рельефа.

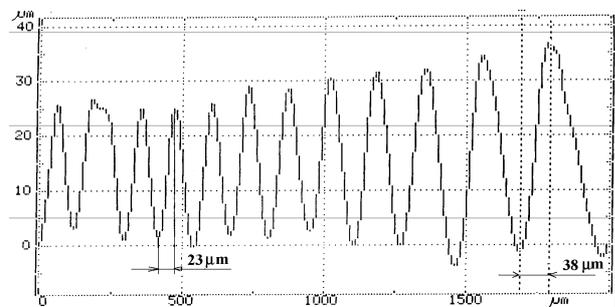


Рис.6. Профилограмма зонированной квазидифракционной микролинзы.

Видно, что максимально достижимая высота рельефа, примерно равна ширине полутонного перехода от узла светового поля к пучности. Наблюдаемое резкое снижение рельефа на частотах свыше 10 лин/мм в рамках предлагаемой модели может быть связано с взаимным влиянием процессов гелеобразования в пучностях и узлах поля, которое усиливается на больших пространственных частотах и препятствует процессу массопереноса. Но для многих практических задач, где не требуется высокой разрешающей способности, данная технология может найти широкое практическое применение. Практически могут быть получены рельефные структуры с непрерывным профилем, у которых пространственный период равен толщине слоя ЖФПК. В то же время минимальная величина пространственного периода не может быть меньше 15 мкм, что показано в работе /2/.

На рис.7 и 8 приведены фотография и профилограмма поверхности фокусатора в «отрезок», работающего на отражение и имеющего параметры:

Диаметр апертуры, D	50 мм;
фокусное расстояние, F	120 см;
рабочий угол, Q	45 град;
длина волны, λ	10,6 мкм;
длина отрезка, l	1 см.

Заключение

При исследовании ЖФПК были определены следующие свойства рельефообразования:

- максимальная высота микрорельефа достигается при оптимальной экспозиции, величина которой определяется по максимальному фазовому контрасту, вызываемому изменением коэффициента преломления при освещении пространственно-модулированным УФ светом;

- значительный (в 10-15 раз) рост микрорельефа наблюдается в постэкспозиционный период;
- рельефообразование идет за счет массопереноса олигомера из темных зон в светлые. При этом уровень рельефа в светлых местах превышает начальный уровень, а в темных – ниже начального; контракция (усадка) слоя не оказывает существенного влияния на процесс рельефообразования



Рис.7. Фокусатор в отрезок на основе ЖФПК.

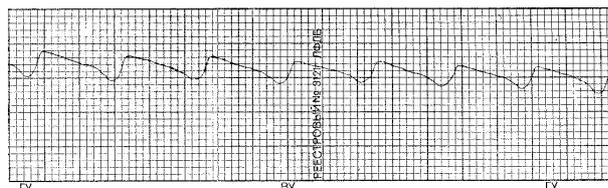


Рис.8. Профилограмма фрагмента фокусатора. ($h_{max} = 7,5$ мкм, минимальная ширина зоны - 300 мкм).

Проведенные исследования микрорельефа дифракционных оптических элементов изготовленных по предлагаемой технологии показали практическую значимость и перспективность изготовлению высокоэффективных ДОЭ с непрерывным профилем и высотой микрорельефа пропорциональной $10-100 \lambda$, где λ - длина волны.

Список литературы

1. Boiko Y.B., Granchak V.M., Dilung I., Solovjev V.S., Soifer V.A. Relief holograms recording on liquid photopolymerizable layers // Proceeding SPIE, V.1238 p. 253-257. January 1990.
2. Solovjev V.S., Boiko Y.B., Soifer V.A. Proceeding SPIE, V.2042 p. 248. 1993.
3. Boiko Y.B., Solovjev V.S., Mendoza-Santoyo F., Loughnot D.-J. Proceeding SPIE, V.2042 p. 271. 1993.
4. Попов В.В. Материалы и методы создания плоских фокусирующих элементов. // Компьютерная оптика.- М.: МЦНТИ, 1987. – Вып.8. - С.160 - 163.
5. Donald Sweeney and Gory. Sommergeren Harmonic diffractive leenes. // Applied Optics, 1995. V.34, № 14, p. 2469-2476.