

Бинарные фазовые маски на самопроявляющихся фотополимерах: техника формирования и тестирование в оптическом корреляторе

П.В.Ежов, О.А.Ильин, Т.Н.Смирнова, Е.А.Тихонов

Исследованы бинарные фазовые маски (ФМ) размером 256×256 ячеек со случайным распределением элементов, сформированные на самопроявляющемся фотополимере ФПК-488. Маски изготавливались проекционным методом с использованием амплитудных транспарантов. Набег фаз между элементами маски, соответствующим областям амплитудного транспаранта с оптической плотностью $D=0$ и 2, для длины волны $\lambda = 0.633$ мкм составил $(0.85 \pm 0.05)\pi$. Для полученных ФМ записаны голографические согласованные фильтры (ГСФ). Дифракционная эффективность ГСФ ФМ η составила 40%. Сигналы распознавания для ФМ в корреляторе Вандер Люгта при этом характеризовались отношением сигнал/шум 20 дБ. Исследована зависимость нормированной плотности мощности сигнала распознавания от угла поворота ФМ во входной плоскости коррелятора Вандер Люгта.

Ключевые слова: фазовые маски, самопроявляющийся фотополимер, коррелятор Вандер Люгта.

1. Введение

В настоящее время при решении задач распознавания образов в том случае, когда имеется возможность самим формировать объект распознавания (оптические метки), например в системах идентификации, реализованных на базе оптических корреляторов [1–4], широко применяются фазовые маски (ФМ) со случайным распределением фазовых элементов (ячеек) [4–6]. Интерес к подобным структурам определяют такие свойства ФМ, как равномерный по интенсивности фурье-спектр, высокая избирательность голографических согласованных фильтров (ГСФ) ФМ к виду входного сигнала (ФМ с другой реализацией случайного распределения не дает сигнала распознавания [6–8]), а также устойчивость к копированию и несанкционированному воспроизведению структуры ФМ стандартным полиграфическим оборудованием (ввиду ее фазовой природы). Аргументом в пользу исследования процесса записи ФМ на самопроявляющемся полимере ФПК-488 является отсутствие у ФПК химического проявления, характерного для фотоэмульсий и фоторезистов [9, 10], что значительно упрощает формирование фазовой структуры маски.

В настоящей работе рассмотрены изготовленные нами ФМ со случайным распределением фазовых ячеек на самопроявляющемся фотополимере. Проводилось тестирование сформированных ФМ, для чего была осуществлена запись голографических согласованных фильтров Вандер Люгта [11] и получены автокорреляционные сигналы. Получена зависимость мощности сигналов распознавания ФМ от угла ее поворота во входной плоскости коррелятора.

2. Формирование фазовых бинарных ФМ на фотополимерах

Опираясь на изученные ранее свойства самопроявляющихся фотополимеров для голографической записи, полученные в работах [12–15], мы осуществили формирование бинарных ФМ со случайным распределением элементов на самопроявляющихся фотополимерах. Последовательность операций при изготовлении масок была следующей:

1. Изготовление амплитудных транспарантов-шаблонов со случайным распределением элементарных ячеек квадратной формы (оптическая плотность $D = 0$ и 2).

2. Формирование бинарных ФМ на ФПК-488 путем оптического проецирования амплитудного шаблона в плоскость фотополимерного триплекса стекло–фотополимер–стекло (технологическая сторона изготовления амплитудных шаблонов не рассматривается, поскольку она стандартна и широко применяется; шаблон изготовлен на заводе «Сатурн» (Киев)).

Амплитудные транспаранты-шаблоны были выполнены на стекле и использовались в дальнейшем для изготовления ФМ. Размер рабочей зоны (изображение и технологическое поле) составлял 7×7 мм, области на изображении, имеющие оптическую плотность $D = 2$, были покрыты слоем хрома.

Затем на слой светочувствительного фотополимера в масштабе 1 : 1 проецировалось изображение транспаранта (источник света некогерентен), сформированное с помощью фурье-объектива. В процессе фотополимеризации слоя формировалась фазовая структура ФМ. Контроль характерных признаков фурье-спектра, описанных ниже, осуществлялся с помощью пучка излучения He–Ne-лазера ($\lambda = 0.633$ мкм).

Генерация исходных данных, необходимых для создания амплитудного фотошаблона, осуществлялась компьютерной программой. Полученный файл содержал

П.В.Ежов, О.А.Ильин, Т.Н.Смирнова, Е.А.Тихонов. Институт физики НАН У, Украина, 252650 Киев, просп. Науки, 45; e-mail: Yezhov@iop.kiev.ua, etikh@iop.kiev.ua

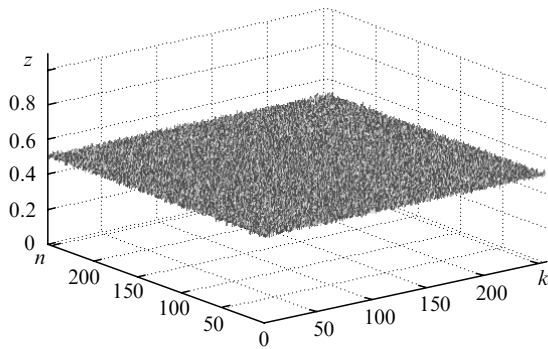


Рис.1. Закон распределения ячеек с $D = 2$ для выборки с $N_0 = 2000$ реализаций при расчете структуры амплитудного фотошаблона; n, k – координаты ячеек.

структуру амплитудного фотошаблона в представлении, необходимом для использования в фотонаборной машине, на которой изготавливался фотошаблон.

В общем виде фотошаблон имеет структуру типа сот с квадратными ячейками размером 20×20 мкм, 50 % которых имеет оптическую плотность $D = 2$, другая часть – оптическую плотность $D = 0$. Общее число ячеек 256×256 . Координаты ячеек с $D = 2$ задаются генератором случайных чисел. Программой в процессе расчета предусмотрен вывод на экран дисплея структуры фотошаблона и рассчитанного фурье-спектра данной структуры. На рис.1. представлена гистограмма, где по оси z отложено число ячеек $N(D = 2)$ амплитудной маски, нормированное на N_0 – полное число расчетных экспериментов, т.е. различных реализаций случайного распределения ($N_0 = 2000$), и координаты ячеек n и k . Закон распределения ячеек в плоскости xu является равномерным со средним $z = 0.50$ и среднеквадратичным отклонением $\delta = 0.01$, что подтверждает случайный характер распределения.

2.1. Формирование фазовых масок со случайным распределением элементов и контроль процесса их изготовления

Для получения распределения комплексной амплитуды поля световой волны в плоскости Фурье, формируемого при освещении ФМ коллимированным лазерным пучком с длиной волны λ , воспользуемся анализом, приведенным в работах [6, 7]. Фазовые маски со случайным распределением элементов представляют собой матрицу, состоящую из $M \times M$ (в нашем случае 256×256) ячеек, где под ячейками подразумеваются квадраты со сторонами $a \times a$ ($a = 20$ мкм). В общем виде комплексное пропускание одного элемента с координатами $k, n - t_{k,n}(x, y)$ можно представить следующим образом:

$$t_{k,n}(x, y) = \exp\{i\pi[\text{rect}(x_k - a, y_n - a)]\}, \quad (1)$$

где

$$\text{rect}(x_k - a, y_n - a) = \begin{cases} 1, & x, y \leq |a/2| \\ 0, & x, y > |a/2| \end{cases};$$

x_k, y_n – координаты центра ячейки, причем для 50 % ячеек $t_{k,n} = 1$, а для остальных $t_{k,n} = -1$.

Для фазовой маски со случайным распределением ячеек амплитуда поля в фурье-плоскости имеет вид

$$T(u, v) = T_1(u, v)T_2(u, v), \quad (2)$$

где

$$T_1(u, v) = 4\pi C \frac{\sin(ua/2) \sin(va/2)}{uv} \quad (3)$$

– функция, представляющая собой картину дифракции на одном квадратном отверстии;

$$T_2(u, v) = \sum_{k=-M}^M \sum_{n=-M}^M t_{kn} \exp[-i(kua + nva)] \quad (4)$$

– некоторая модулирующая функция; $u = 2\pi\xi/(\lambda f)$, $v = 2\pi\mu/(\lambda f)$ – пространственные частоты; ξ, μ – координаты в частотной плоскости; f – фокусное расстояние фурье-объектива; λ – длина волны.

Анализ распределения амплитуды поля в плоскости маски показал [6, 7], что если N_1 – число ячеек с комплексной амплитудой пропускания $t = 1$, N_2 – число ячеек с $t = -1$, а набег фаз для каждой ячейки с $t = 1$ относительно ячейки с $t = -1$ равен π (первому достижимому значению из серии $(2n + 1)\pi$), то при выполнении неравенства $N_1 + N_1 \gg N_1 - N_2$ в фурье-спектре отсутствует характерный для масок со случайным распределением элементов пик при нулевых пространственных частотах. Отсутствие пика при нулевых пространственных частотах является критерием, который может быть положен в основу интегрального способа контроля фазового набега, равного $(2n + 1)\pi$, в процессе формирования подобных ФМ. Под нулевыми частотами (с учетом конечных размеров фурье-объектива) подразумевается область частотной плоскости, ограниченная размерами диска Эйри (первым минимумом функции Эйри).

2.2. Формирование ФМ

Оптическая схема формирования ФМ на слое ФПК показана на рис.2. Освещенный лампой накаливания 7 амплитудный транспарант служит объектом, изображение которого объективом 4 в масштабе 1 : 1 проецируется на слой ФПК. Для устранения тепловых эффектов при формировании ФМ применяются светофильтры, отсекающие излучение с длиной волны $\lambda > 450$ нм. Для контроля фазового набега в процессе записи ФМ используется He – Ne-лазер. Коллимированный пучок лазера проходит через ФМ и в фокальной плоскости Фурье-объектива 5

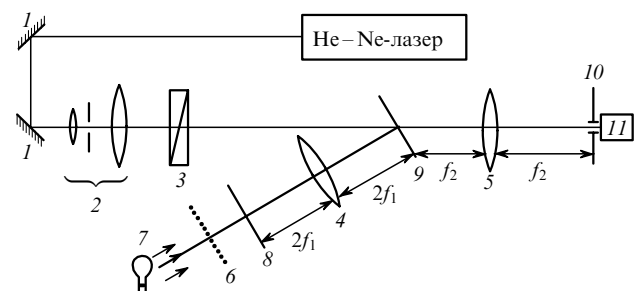


Рис.2. Оптическая схема формирования фазовой маски с амплитудного фотошаблона:

1 – зеркала; 2 – коллиматор с пространственной фильтрацией; 3 – поляризатор; 4, 5 – фурье-объективы с фокусными расстояниями f_1 и f_2 соответственно; 6 – светофильтр; 7 – источник некогерентного излучения; 8 – плоскость амплитудного транспаранта; 9 – плоскость формирования ФМ; 10 – точечная диафрагма; 11 – фотодиод.

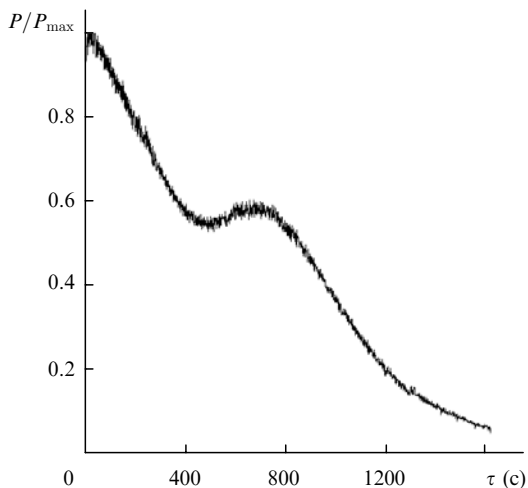


Рис.3. Затухание нормированной мощности пика нулевых частот в процессе формирования ФМ.

формирует фурье-спектр, из которого диафрагмой 10 выделяются нулевые частоты; далее фотодиод 11 регистрирует мощность излучения, проходящего через диафрагму в процессе формирования ФМ. Аналоговый сигнал с фотодиода оцифровывается и в реальном времени выводится на экран монитора. На рис.3. показана типичная зависимость нормированной регистрируемой мощности от времени.

Применяемая методика контроля дает интегральную картину, реально отражающую суммарный набег фаз $\Delta\phi$ ячеек с $t = 1$ относительно ячеек с $t = -1$ и позволяет избежать усложнения системы контроля процесса формирования ФМ, к которому привело бы применение, например, интерференционных методик. Количественно набег фаз определялся по кривой (рис.4), полученной расчетным путем. Она показывает спад нормированной интенсивности центрального пика в фурье-плоскости в зависимости от набег фаз (в единицах π) для фазовых ячеек фазовой маски с тем же распределением элементов, что и для экспериментального образца. Таким образом, представленная на рис.4 кривая является калибровочной для кривой, полученной экспериментально (рис.3), и позволяет связать мощность центрального пика с величиной набег фаз $\Delta\phi$.

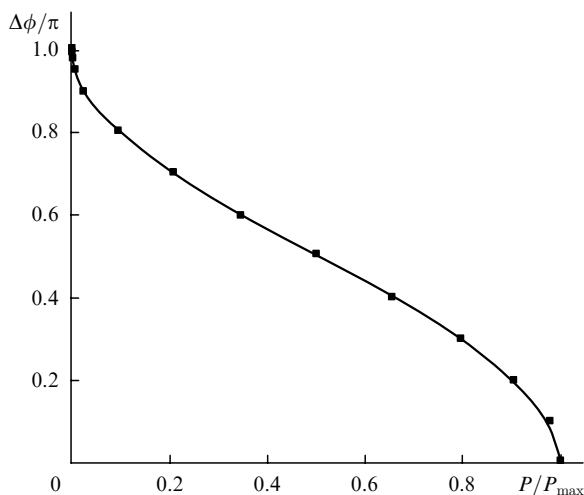


Рис.4. Расчетная зависимость величины фазового набег от нормированной мощности для ФМ.

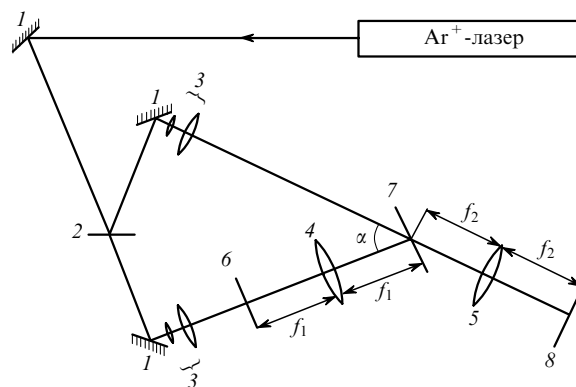


Рис.5. Схема коррелятора Вандер Люгта с системой регистрации: 1 – зеркала; 2 – делитель пучка; 3 – коллиматоры с пространственной фильтрацией; 4, 5 – фурье-объективы с фокусными расстояниями f_1 , f_2 соответственно; 6 – объектная плоскость; 7 – плоскость согласованного пространственного фильтра; 8 – корреляционная плоскость; α – угол схождения пучков.

2.3. Запись согласованных голографических фильтров ФМ

Пространственные голографические согласованные фильтры записывались излучением Ag^+ - лазера с вертикальной поляризацией в стандартной схеме Вандер Люгта (рис.5). Фазовые маски устанавливались в переднюю фокальную плоскость объектива 6, в задней фокальной плоскости 7 формировался фурье-спектр объекта. Разрешающая способность объектива была не хуже 200 мм^{-1} , фокусное расстояние f_1 составляло 220 мм .

Для записи голографических фильтров использовались регистрирующие слои толщиной 20 мкм на основе ФПК-488. Записывались преимущественно толстые [2, 9] голографические фильтры, что обеспечивало их высокую дифракционную эффективность ($\eta = 20\% - 40\%$). Отношение интенсивностей опорного и предметного пучков составляло $4:1$, угол схождения пучков α был равен 18° . Получены корреляционные пики для согласованных голографических фильтров ФМ с отношением сигнал/шум 20 дБ .

Проведена серия экспериментов по изучению зависимости интенсивности корреляционного максимума от поворота ФМ во входной плоскости коррелятора Вандер Люгта (рис.6). Сигнал регистрировался с помощью ПЗС-камеры.

3. Обсуждение результатов

Можно констатировать, что ФМ, полученные на слоях самопроявляющегося фотополимера ФПК-488, содержат 256×256 ячеек размером $(20 \pm 0.1)\text{ мкм}$. Фазовый набег достигает $(0.85 \pm 0.05)\pi$ для $\lambda = 0.633\text{ нм}$ при мощности лампы накаливания 500 Вт , времени экспозиции ФМ 25 мин и фокусном расстоянии проекционного объектива 220 мм .

Установлено, что параметры и условия записи рельефно-фазовых голографических решеток [9, 10, 12, 13, 16] с пространственными периодами, соответствующими пространственным частотам транспарантов, являются оптимальными также и при формировании ФМ.

На всех без исключения кинетических кривых записи маски функция $P(\tau)$ имеет локальный максимум при некотором характерном времени. Известно [9, 10, 12, 13, 16], что изменение фазы $\Delta\phi$ в самопроявляющемся фотопол-

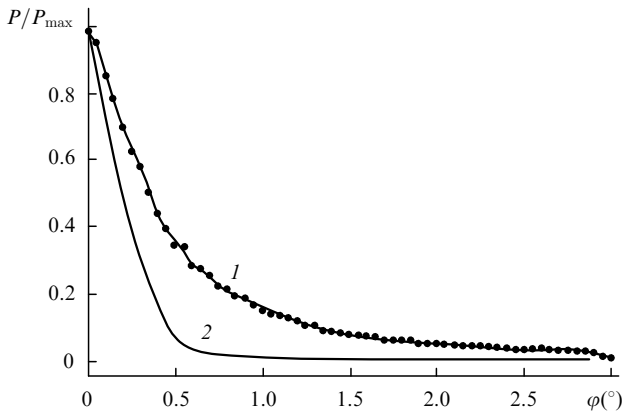


Рис.6. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости нормированной мощности корреляционного пика ФМ от угла рассогласования объекта во входной плоскости коррелятора.

лимере в процессе экспозиции складывается из двух составляющих – $\Delta\phi_1$ и $\Delta\phi_2$; возникновение $\Delta\phi_1$ обусловлено формированием рельефа, а $\Delta\phi_2$ – объемной модуляцией показателя преломления. Поэтому немонотонность кривых $P(\tau)$ является, скорее всего, результатом конкуренции двух механизмов, ответственных за изменение фазового набег в слое ФПК во время записи.

Методика контроля формирования ФМ, по-видимому, может выступать в качестве инструмента получения информации для анализа динамики формирования объемной и рельефной структур при записи низкочастотных решеток.

Особенностью ФМ, записанных на слоях ФПК, является отсутствие в фурье-спектрах порядков дифракции выше третьего (высокочастотной структуры для пространственных частот ($\nu > 150 \text{ мм}^{-1}$)), в отличие от ФМ, записанных на фоторезисте либо стеклах, фурье-спектр которых имеет по 10–15 порядков дифракции (фоторезист). Данный факт свидетельствует, по-видимому, о том, что для элементарной ячейки изофазные поверхности (теоретически – константа в пределах ячейки) ФМ на ФПК в большей степени отличаются от функции гест, чем изофазные поверхности для ФМ, записанных на других материалах. Таким образом, наблюдаемые различия в фурье-спектрах можно объяснить по крайней мере качественно.

Сравнивая значения отношения сигнал/шум в сигналах распознавания для ФМ, сформированных на ФПК-488, с полученными в [13] для ФМ на фоторезисте, можно сделать вывод, что в сходных условиях записи они не равны и составляют 20 дБ для $\eta = 40\%$.

Предельный угол поворота ФМ вокруг оптической оси, для которого при согласованной оптической фильтрации уровень сигнала падает в 50 раз, составляет 3.0° для фоторезиста и 2.9° для ФПК. Теоретически рассчитанный угол поворота на уровне $1/e$ от максимального значения соответствующих корреляционных кривых равен 0.27° [6], а экспериментально полученный для ФПК

соответствующий угол поворота $\varphi = 0.48^\circ$ при точности измерения $1.5'$. Зависимость мощности сигнала корреляции от угла рассогласования для масок данного размера является оценкой снизу и рассчитана по формуле [6]

$$\frac{P(\varphi)}{P_{\max}} = \left[\left(\frac{4}{M^2} \right) \sum_{n_L=1}^{n_{L\max}} (2n_L - 1)(1 - \varphi n_L) \right]^2, \quad (5)$$

где $P(\varphi)/P_{\max}$ – нормированная мощность корреляционного пика;

$$n_{L\max} = \begin{cases} M/2, & \beta \leq 2, \\ M/\beta, & \beta > 2; \end{cases} \quad (5)$$

$\beta = \varphi/M$; $M \times M$ – число ячеек ФМ. Экспериментальная кривая 1 коррелирует с расчетной кривой 2 (см. рис.6).

4. Выводы

Таким образом, проведенное исследование показало, что изготовление фазовых структур с заданным распределением элементарных ячеек на фотополимерах технологически несложно и позволяет использовать эту методику для изготовления и исследования ФМ с другими свойствами распределений. Тестирование ФМ в корреляторе Вандер Люгта показало, что параметры корреляционных функций сходны с таковыми для ФМ, изготовленных другими методами. Это позволяет применять данную методику записи ФМ при изготовлении оптических меток, кодирующих элементов для записи защитных голограмм, а также использовать ее для решения задач распознавания образов.

1. В сб. *Применение методов фурье-оптики*. Под ред. Г. Старка (М.: Радио и связь, 1988, с. 535).
2. Кольер Р., Беркхарт К., Линн Л. *Оптическая голография* (М.: Мир, 1973, с. 686).
3. Rodolfo J., Rajbenbah N., Huignard J.-P. *Opt. Eng.*, **34** (4), 1166 (1995).
4. Grycewicz T.J. *Opt. Eng.*, **38** (1), 114 (1999).
5. Javidi V., Guanshen Z., Jian L. *Opt. Eng.*, **35** (9), 2506 (1996).
6. Муравский Л.И. *Обработка бинарных фазовых изображений в оптических и оптико-цифровых корреляционных системах* (Тернополь, 1999, с. 187).
7. Fitio M.V., Muravsky L.I., Stefansky A.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2647**, 224 (1995).
8. Javidi V., Horner J.L. *Opt. Eng.*, **33** (6), 1752 (1994).
9. Вербовецкий А.А., Генкина Н.А., Федоров В.Б., Шитова Э.В., Крюкова Н. Н. *Оптика и спектроскопия*, **45** (5), 989 (1978).
10. Ганжерли Н.М., Коченов В.И. *ЖТФ*, **45** (8), 1780 (1975).
11. Ежов П.В., Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А. *ЖТФ*, **71** (3), 52 (2001).
12. Gulnazarov E.S., Smirnova T.N., Tikhonov E.A. *Proc SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1238**, 20 (1990).
13. Тихонов Е.А., Смирнова Т.Н., Гюльнарзоров Э.С. В сб. *Квантовая электроника* (Киев: Наукова думка, 1991, вып. 40, с. 1).
14. Смирнова Т.Н. *Укр. физ. ж.*, **44** (1–2), 93 (1999).
15. Смирнова Т.Н., Сахно О.В., Тихонов Е.А., Ежов П.В., Шибанов В.В. *ЖПС*, **67** (1), 29 (2000).
16. Shovgenyuk M.V., Hlushak P.A., Kozlovskii Yu.M., Tikhonov E.A., Smirnova T.N., Ezhov P.V. *Ukr. J. Phys. Opt.*, **2** (4), 52 (2001).