

07;12

Характеристики фазовых фурье-голограмм, записанных на фотополимерах

© П.В. Ежов, Т.Н. Смирнова, Е.А. Тихонов

Институт физики АН Украины,
252650 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 17 декабря 1998 г. В окончательной редакции 3 сентября 1999 г.)

Приведены результаты исследований записи фазовых фурье-голограмм на самопроявляющемся фотополимере, светочувствительности в диапазоне $\lambda = 400\text{--}515\text{ nm}$. Обнаружено, что вследствие нестационарной перекачки энергии между пучками имеет место запись шумовых решеток и соответственно резкое снижение отношения сигнал/шум при относительно высокой дифракционной эффективности голограммы в целом (более 50%). Найдено, что путем увеличения интенсивности в референтном пучке относительно интенсивности объектного пучка запись шумовых решеток может быть заметно подавлена. На этом пути удалось заметно улучшить отношение сигнал/шум для фурье-голограмм бинарных фазовых масок: при соотношении интенсивности референтного пучка к интенсивности объектного пучка $R = 26$ записаны фазовые фурье-голограммы с дифракционной эффективностью $\eta = 15\%$ и отношением сигнал/шум $N = 20\text{ dB}$.

Введение

Применение фурье-голограмм в задачах пространственной фильтрации, а также в качестве согласованных фильтров систем распознавания образов [1,2] делает актуальным исследование голографических сред для этих целей. Одной из первых работ, где было показано преимущество фотополимерных пространственных фильтров, следует назвать [3]. Формирование голограмм в процессе экспозиции (1–3 min) и отсутствие мокрой химической обработки позволили авторам цитируемой работы успешно применить фотополимер для голографической записи пространственных согласованных фильтров в схеме Вандер Люгта. Для записи фильтров использовался материал OmniDex фирмы DuPont.

Значительное изменение среднего показателя преломления материала, сопровождающее формирование голограмм на фотополимерах, является причиной динамического энергообмена между записывающими и рассеянными пучками [4], что может приводить к искажению интерференционной картины в среде и значительно снижать отношение сигнал/шум N . Роль динамических эффектов особенно возрастает при записи голограмм диффузных объектов. Поэтому голографическая запись фурье-голограмм на фотополимерных композициях (ФПК) требует всестороннего исследования влияния условий записи на параметры голограмм.

Целью данной работы являются исследование и оптимизация основных характеристик (дифракционная эффективность η , отношение сигнал/шум N) фурье-голограмм диффузных объектов при использовании в качестве регистрирующей среды фотополимерной композиции ФПК-488. Известно [5–7], что данный фотополимер позволяет записывать объемные фазовые решетки с пространственной частотой до 6000 mm^{-1} , η практически до 100% и низким уровнем шумов $N > 20\text{ dB}$. В отличие от материалов OmniDex фотополимерная компо-

зиция ФПК-488 обеспечивает достижение максимальной дифракционной эффективности голограмм в процессе записи и не требует постэкспозиционной обработки. Последнее делает ее более перспективной среди фотополимерных материалов с оптическим либо термическим проявлением для использования в системах распознавания образов.

В данной работе изучались фурье-голограммы специфического класса объектов, а именно бинарных фазовых масок со случайным распределением элементов [8]. Размер фазовых масок $5 \times 5\text{ mm}$, количество фазовых элементов 256×256 . Фурье-спектры данных объектов характеризуются наиболее равномерным распределением интенсивности, что позволяет корректно оценить предельную дифракционную эффективность η при заданном угле схождения между референтным и объектным пучками.

Эксперимент

Запись фурье-голограмм осуществлялась излучением He–Cd лазера ($\lambda = 441.2\text{ nm}$) по стандартной схеме (рис. 1) [1]. Объект помещался в предметную плоскость P_{obj} , где освещался на просвет коллимированным лазерным пучком. Угол между опорным и объектным пучками составлял $\alpha = 13^\circ$. При заданной толщине регистрирующего слоя $d = 25\text{ }\mu\text{m}$ для средней пространственной частоты голограммы реализовался брэгговский режим записи. Выбор в качестве объекта фазовой бинарной маски со случайным распределением элементов (ФБСМ) позволил снять проблему неоднородности распределения интенсивности в плоскости регистрации голограмм, часто возникающую при записи фурье-голограмм. Регистрирующий слой помещался в плоскость записи, где в процессе экспозиции формировалась фурье-голограмма фазовой маски.

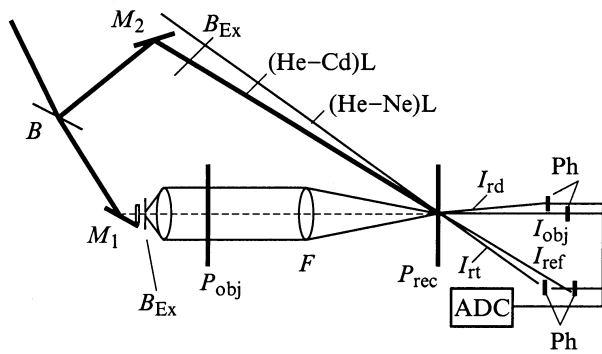


Рис. 1. Схема записи фурье-голограмм с системой регистрации: M_1, M_2 — зеркала; B — делитель пучка; B_{Ex} — коллиматор с пространственной фильтрацией; P_{obj}, P_{rec} — плоскость объекта и плоскость записи соответственно; F — фурье-объектив; I_{rd}, I_{rt} — интенсивности дифрагированного и прошедшего пучков тестирующего He-Ne лазера [(He-Ne)L]; I_{obj}, I_{ref} — интенсивности объектного и референтного пучков (He-Cd [(He-Cd)L] или Ar^+ лазеров); ADC, Ph — ФЦП палата в IBM совместимом компьютере, фотодиоды системы регистрации соответственно.

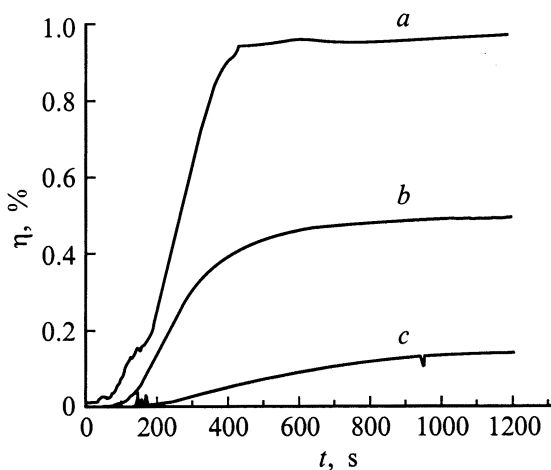


Рис. 2. Дифракционная эффективность как функция времени для различных R : a — запись решеток, $R = 1, N > 20.0$ dB; b — запись фурье-голограмм, $R = 1, N = 4.8$ dB; c — запись фурье-голограмм $R = 26, N > 20.0$ dB.

Регистрирующий слой формировался путем введения исходно жидкой ФПК между стеклянными подложками с прокладками калиброванной толщины. Для снижения шумов слой ФПК предполимеризовывался оптимальной дозой некогерентного излучения в диапазоне длин волн (250–300 nm).

Автоматизированная система детектирования интенсивности прошедшего I_r и дифрагированного I_d пучков He-Ne лазера ($\lambda = 633$ nm) позволяла регистрировать зависимость дифракционной эффективности от времени как $\eta(t) = I_d(t)/(I_d(t) + I_r(t))$. Аналогичная система регистрации позволяла измерять кинетику нестационар-

ной перекачки энергии между интерферирующими объектным и опорным пучками соответственно.

При изменении отношения интенсивностей объектного и референтного пучков R суммарная интенсивность в плоскости записи голограмм сохранялась постоянной и составляла 4 mW/cm^2 . Для оценки сигнал/шум N голограмма помещалась в объектную плоскость и восстановленное изображение анализировалось по методике [9]. Согласно этой методике, для расчета N измерялись сигналы I_0, I_1 , где I_0 — сигнал, включающий в себя полезный сигнал и шумовую составляющую; I_1 — полезный сигнал. N определялось как $N = 10 \lg(I_1/(I_0 - I_1))$.

Запись фазовых фурье-голограмм

Для определения оптимальных условий записи фурье-голограмм выбранных объектов на ФПК-488 измерялась зависимость от R таких характеристик фурье-голограмм, как $\eta(t), N$, время достижения максимальной эффективности t_m . Результаты измерений приведены в таблице и показаны на рис. 2. В качестве начальных значений таких параметров, как толщина фотополимерного слоя, отношения интенсивностей пучков, формирующих голограмму, суммарная интенсивность света в плоскости регистрации голограммы, были взяты параметры, оптимизированные для записи фазовых объемных пропускающих решеток [3–6].

Сравнивая результаты по дифракционной эффективности и отношение сигнал/шум для фазовых объемных пропускающих решеток и фурье-голограмм, видим (рис. 2), что максимальные значения эффективности для решеток и фурье-голограмм с одинаковым уровнем шумов ($N > 20$ dB) различаются более чем в 6.5 раз.

Учитывая, что для применяемого объекта (ФБСМ) однородность освещенности в фурье-плоскости максимальна (рис. 3, a), не ограничивая общности, можем сказать, что полученная для эффективности фурье-голограмм величина $\eta = 15\%$ является максимальной для данных условий записи и применяемой среды. Обращает на себя внимание резкое возрастание шумов для фурье-голограмм, записанных при $R = 1$. Последнее является результатом динамического усиления шума и подробно рассмотрено ниже. Из полученных данных можно сделать заключение, что для записи толстых фазовых голограмм диффузионных объектов при $\alpha = 13^\circ$ и $d = 25 \mu\text{m}$ на регистрирующем фотополимере ФПК-488

Параметры записи фурье-голограмм

N_0	R	$\eta, \%$	N, dB	t_m, s
1	1*	98	20	400
2	1	62	-4.77	—
3	4	52	-3.68	500
4	9	30	6.02	—
5	26	15	20	1000

* Запись объемных фазовых дифракционных решеток [3–6].

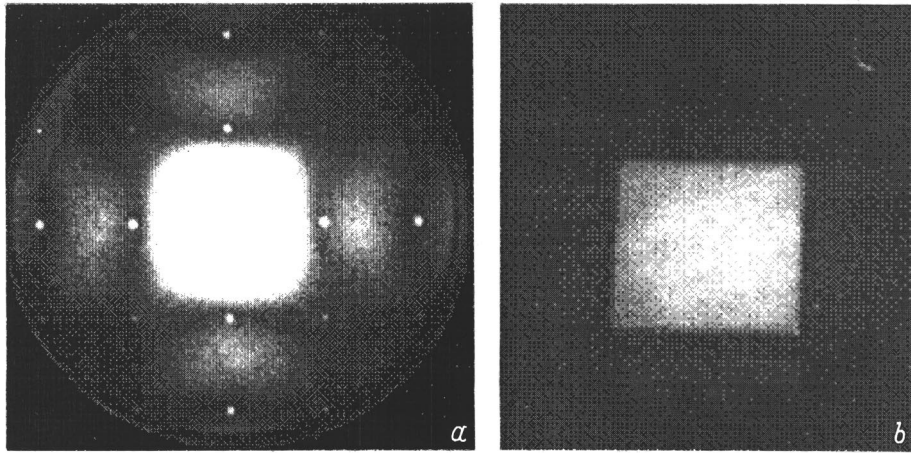


Рис. 3. Спектр фурье-ФБСМ (а) и изображение, восстановленное с фурье-голограммы (b).

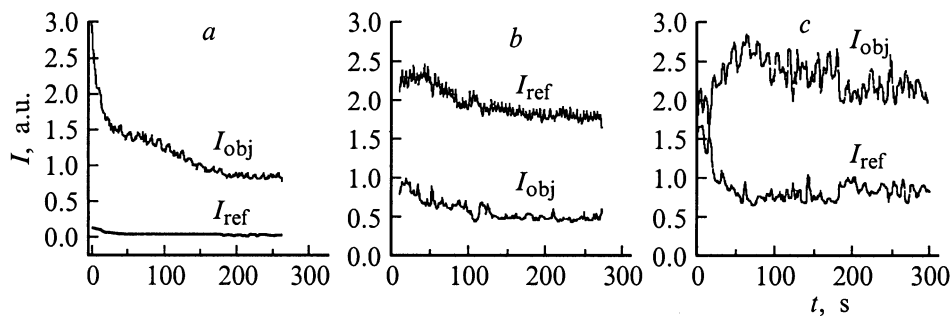


Рис. 4. Интенсивность опорного и объектного пучков как функция времени. I_{ref} , I_{obj} — прошедшие референтный и объектный пучки; $a - R < 1$, $b - R > 1$, $c - R \approx 1$.

оптимальные параметры таковы: $R = 26$, $\eta = 15\%$, $N > 20$ dB и $t_n = 5-15$ min (рис. 2). Пример восстановленного с фурье-голограммы изображения показан на рис. 3, b.

В ряде работ [4,10–13] показано, что для материалов с инерционным откликом, в которых изображение формируется в процессе записи, и для ФПК-488 в частности, вследствие изменения показателя преломления во время записи голограмм характерно наличие нестационарной перекачки энергии между интерферирующими пучками. Это приводит к следующим процессам: а) усиление слабых шумовых решеток [11,12], возникающих вследствие интерференции плоского опорного и сферических волновых фронтов (результат рассеяния плоской волны на фазовых неоднородностях) [10]; б) усиление менее интенсивной волны [4] при записи решеток плоскими волнами с неравными интенсивностями; в) аномальное [13] усиление волны с большей интенсивностью за счет волны с меньшей интенсивностью, наблюдаемое при записи диффузных объектов.

Интенсивность энергообмена и его направленность могут [13] зависеть от таких параметров, как соотношение интенсивности объектного и опорного пучков, несимметричности их падения на регистрирующий слой, суммарной интенсивности записываемого поля. В насто-

ящей работе энергообмен исследовался для различных значений R при постоянных величинах прочих параметров.

Динамические эффекты могут уменьшать отношение сигнал/шум в изображениях, восстановленных с голограмм, записанных на ФПК-488, и являются принципиально неустранимыми. Однако [11,12] имеется возможность минимизировать уровень шумов, подавляя либо компенсируя нестационарную перекачку энергии.

Исходя из потребности в минимизации подобных шумов для фурье-голограмм, в процессе записи сняты зависимости интенсивностей записываемых пучков $I_r(t)$ и $I_{obj}(t)$ для предельных случаев: $R < 1$, $R > 1$, $R = 1$. Указанные зависимости позаны на рис. 4, а–с. Плоскость регистрации расположена за плоскостью регистрации голограмм P_{rec} (рис. 1).

Видно, что в случае $R < 1$ (рис. 4, а) наблюдается сильное рассеяние света в начальный момент времени без перекачек энергии между записываемыми пучками. По-видимому, это является результатом усиления шумовых решеток, формируемых объектным пучком (наличие интермодуляционного шума в восстановленном изображении с фурье-голограмм). При $R > 1$ (рис. 4, б) имеет место слабая перекачка энергии от опорного к объектному пучку. В случае $R \approx 1$ (рис. 4, с) наблюдается сильная

перекачка энергии от объектного к предметному пучку на фоне динамического усиления шумов (об этом свидетельствует несимметричность изменений интенсивности в обоих пучках).

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что область $R > 1$ наиболее приемлема для записи фурье-голограмм диффузных объектов с $N > 20$ dB.

Заключение

В работе приведены результаты исследований записи фазовых толстых фурье-голограмм на ФПК-488. Обнаружено, что вследствие нестационарной перекачки энергии между пучками имеют место запись шумовых решеток и соответственно резкое снижение отношения сигнал/шум при относительно высокой дифракционной эффективности голограммы в целом ($\eta > 50\%$). Найдено, что путем увеличения интенсивности в референтном пучке относительно интенсивности объектного пучка запись шумовых решеток может быть заметно подавлена. На этом пути удалось заметно улучшить отношение сигнал/шум для фурье-голограмм бинарных фазовых масок — при $R = 26$ записаны фазовые фурье-голограммы с дифракционной эффективностью $\eta = 15\%$ и $N = 20$ dB.

Настоящая работа выполнена в рамках проекта № 559 при поддержке Центра по науке и технологиям Украины.

Список литературы

- [1] Robert J. Collier, Christoph B. Burckhardt, Lawrence H. Lin. Optical Holography. New York: Academic Press, 1971. P. 672.
- [2] Application of Optical Fourier Transformations / Ed. by Henry Stark. New York: Academic Press, 1982. P. 531.
- [3] Brandstetter R.W., Fonneland N.J. // Proc. SPIE. 1991. Vol. 1559. P. 308–319.
- [4] Суханов В.И., Корозинин В.Л. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 18. Вып. 18. С. 1144–1146.
- [5] Тихонов Е.А., Смирнова Т.Н., Гольназаров Е.С. Квантовая электроника. Киев: Наукова думка, 1991. № 40. С. 1–45.
- [6] Тихонов Е.А., Смирнова Т.Н., Гольназаров Е.С. Опт. и спектр. 1989. Т. 67. Вып. 1. С. 175–179.
- [7] Гольназаров Е.С., Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 5. С. 932–936.
- [8] Fitio M.V., Muravsky L.I., Stefansky A.I. // Proc. SPIE. 1995. Vol. 2647. P. 224–234.
- [9] Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда. М.: Мир, 1982. Т. 1. С. 384.
- [10] Jeppu J.A. // Appl. Opt. 1972. Vol. 11. N 6. P. 1371–1381.
- [11] Гольназаров Е.С., Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А., Шпак М.Т. // Укр. физ. журн. 1988. Т. 33. № 1. С. 8–10.
- [12] Гольназаров Е.С., Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 12. С. 2405–2407.
- [13] Мамаев А.Б., Оразов К., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. // Квант. электрон. 1987. Т. 14. № 2. С. 413–415.