

УДК 535.417 : 535.421

## ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ФОТООТКЛИКА НА ДИФРАКЦИОННУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОЛОГРАММ

© С. А. Шойдин

*Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10  
E-mail: shoydin@ssga.ru*

Рассмотрено влияние нелинейности фотоотклика голографического материала на достижимую дифракционную эффективность голограмм. Показано, что взаимодействие формфактора голограмм с нелинейностью фотоотклика приводит к увеличению дифракционной эффективности по сравнению с линейным фотооткликом. Даны численные расчёты для нелинейности фотоотклика, соответствующей фазовому голографическому материалу Реоксан.

*Ключевые слова:* голография, дифракционная эффективность, формфактор, видность, степень когерентности, гауссов пучок.

DOI: 10.15372/AUT20190105

**Введение.** При записи голограмм большое внимание уделяется методам увеличения их дифракционной эффективности. Принято считать, что эффективность определяется величиной динамического диапазона фотоотклика голографического материала, на чём и были сосредоточены работы по его созданию [1, 2]. Нелинейным характеристикам фотоматериала, как замечено в [3, 4], следует уделить особое внимание. В [5, 6] показано, что использование большого динамического диапазона голографической среды для увеличения дифракционной эффективности не всегда возможно, поскольку она ограничивается влиянием так называемого формфактора голограммы. В [7, 8] для гауссовых пучков получены ограничения на максимально достижимую дифракционную эффективность  $\eta_m(E, V)$  в зависимости от экспозиции  $E$  и видности интерференционной картины  $V$  объектного и опорного пучков. Там же получен коэффициент увеличения оптимальной экспозиции, требуемой для достижения максимума  $\eta_m(E, V)$ , названный формфактором  $\Psi$ . Было отмечено, что влияние формфактора проявляется только при одновременном существовании двух эффектов: нелинейности отклика, в данном случае  $\eta_m(E, V)$ , и неравномерности яркости создающих голограмму пучков  $E(x, y)$ . При этом средняя дифракционная эффективность  $\eta_m$ , определяемая весовой функцией яркости с учётом нелинейности формирующегося фотоотклика, никогда не достигает 100 %, как это следует из формулы Когельника [9], написанной для равномерного по яркости пучка и для «идеальной среды», а вычисляется в [7, 8] как

$$\eta_m = (1/s) \iint \sin^2 \{ \beta(E) E(x, y) V(x, y) \} dx dy. \quad (1)$$

В (1)  $(1/s)$  — это нормировочный множитель, определяемый площадью голограммы  $s$ ,  $\beta(E)$  — нелинейная зависимость фотоотклика голографического материала от экспозиции.

Причём, как показано в [7, 8], такие значения  $\eta_m(E)$  хорошо описываются выражением (2), которое при  $\Psi = \Omega = 1$  превращается в полученное ранее Когельником. Отличие выражения (1) от классического [9] состоит именно в наличии этих поправочных коэффициентов, первый из которых  $\Psi$  задаёт величину повышения экспозиции, требуемой для

достижения максимальной дифракционной эффективности в зависимости от формы запи-сывающих голограмму пучков, а связанный с ним второй коэффициент  $\Omega$  ограничивает максимально достижимую величину дифракционной эффективности:

$$\eta = \Omega \sin^2\{\Psi f(EV)\}. \quad (2)$$

Здесь функция  $f$  описывает в общем случае нелинейную зависимость фотоотклика (для фазовых материалов это фотоиндуцированное изменение показателя преломления) от экспозиции  $E$  и видности  $V$ . В данной работе  $f(E, V)$  взята в простом виде как произведе-ние нелинейного фотоотклика  $\beta(E)$  из [6–8] с постоянной по полю голограммы видностью  $V$  и экспозицией голограммы  $E$  гауссовыми пучками:

$$f(E, V) = \beta(E)EV. \quad (3)$$

Здесь (3) и далее аналогично [7, 8] экспозиция  $E$  приводится в нормированных едини-цах так, что  $E = 1$  изменяет фотоотклик голографического материала, приводя к росту аргумента под синусом (2), равному одному радиану. Таким образом, экспозиция  $E = \pi/2$  при  $\beta = V = 1$  приводит к  $\eta = 100\%$  в соответствии с формулой Когельника [9], в которую вырождается (2) при  $\Psi f(EV) = EV$ .

Случаи линейной зависимости  $\beta(E)$  подробно рассмотрены в [7, 8]. В данной работе внимание обращено на нелинейный отклик, который, как показано в [5, 6], наиболее со-ответствует различным фотополимерам [2] и экспериментально наблюдаемому авторами фотоотклику [10] в фазовом объёмном голографическом материале Реоксан [1], а также со-зданному на тех же принципах голографическому материалу Диффен [11] и многим другим фазовым объёмным голографическим материалам:

$$\beta(E) = \alpha(1 + 1/\alpha_1 E). \quad (4)$$

При таком нелинейном фотоотклике для  $\alpha = 1$  и  $\alpha_1 = 0,2$  показатель преломления  $\Delta n \sim \beta EV$  голографической дифракционной решётки (рис. 1) растёт с экспозицией очень близко к аналогичной зависимости, наблюдаемой экспериментально [5, 7, 10].

**Численный эксперимент.** На графиках рис. 2,  $a$ – $d$  показаны зависимости средней дифракционной эффективности  $\eta_m(E)$  голограмм гауссовых пучков (сплошные кривые), рассчитанные по (1). На них наложены пунктирные графики дифракционной эффектив-ности  $\eta(E)$ , рассчитанные по (2) для случая  $\Psi f(EV) = EV$ ,  $\Psi = 1$ , т. е. классической, рассчитанной по формуле Когельника [9]. Пунктирные графики уменьшены по амплитуде (ось ординат) так, чтобы их максимумы были равны максимумам сплошных кривых

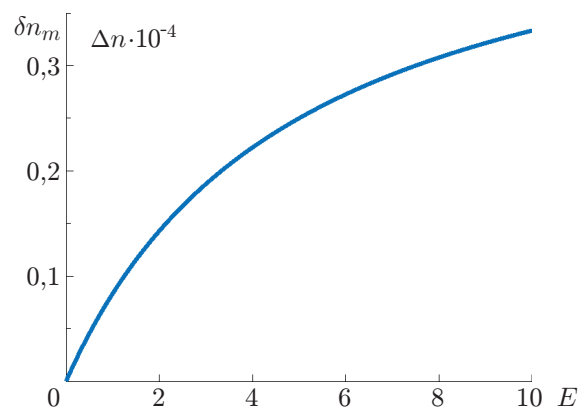


Рис. 1. Зависимость фотоиндуцированного показателя преломления  $\Delta n$  от нормированной экспозиции  $E$  для видности  $V = 0,95$

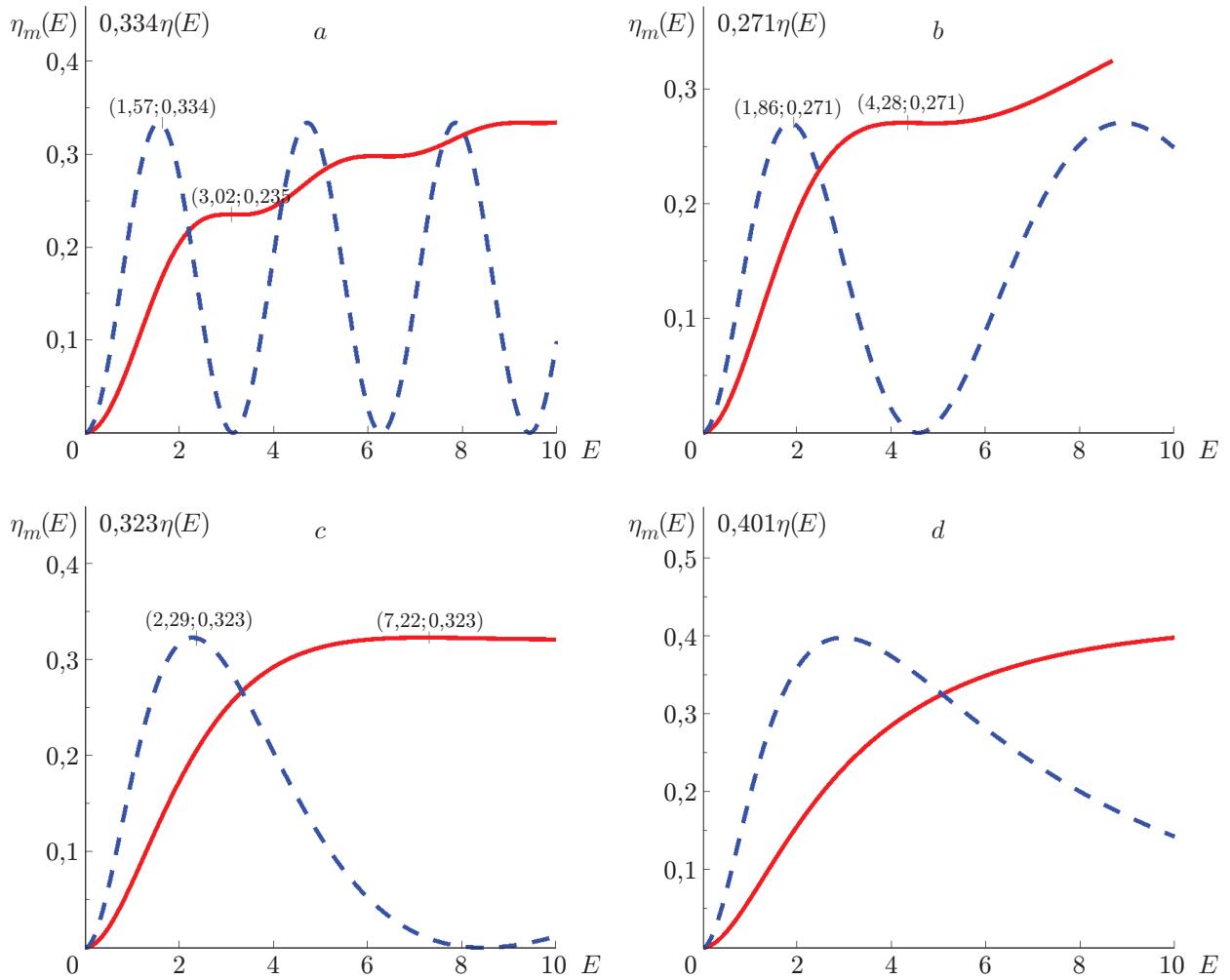


Рис. 2. Зависимости  $\eta_m(E)$  (сплошная кривая) и нормированная на её максимум  $\eta(E)$  (пунктирная кривая) в случае гауссовых пучков: для линейного отклика  $\alpha_1 = 0$  (a); для нелинейного отклика  $\alpha_1 = 0,1$  (b); для нелинейного отклика  $\alpha_1 = 0,2$  (c); для нелинейного отклика  $\alpha_1 = 0,3$  (d)

$\Omega$  для удобства сравнения на участке экспозиций от  $E = 0$  до  $E = 10$ . Видно, что максимумы  $\eta_m(E)$  смещены вправо от максимумов  $\eta(E)$ . Отношение величин экспозиции, при которой  $\eta(E)$  достигает максимума, и экспозиции, при которой  $\eta_m(E)$  максимальна, называется фактором голограммы. Форма голограммы (в данном случае гауссова) приводит к неодновременному достижению в различных участках голографической среды условий  $\beta(E)EV = \pi/2$ . Это означает, что центральные участки Гаусса с ростом  $E$  уже «перевалили»  $\pi/2$ , соседние ещё только «подтягиваются» и в среднем по голограмме достигается дифракционная эффективность  $\Omega < 1$ .

Из сравнения графиков на рис. 2, a—d видно, что при нелинейном отклике голографического материала максимум дифракционной эффективности достигается гораздо позже, что означает большее расходование динамического диапазона фотоматериала, необходимого для его достижения. Это известный минус, но есть и плюс, который проявляется за счёт наличия неоднородности яркости записывающих голограмму пучков, т. е. из-за фактора. Именно после достижения максимума дифракционной эффективности наиболее яркими частями записывающих пучков согласно (2) их локальная дифракционная эффективность падает [5–8]. Однако падает не так быстро, как росла, ввиду замедления

реакции фотоматериала на экспозицию в силу нелинейности фотоотклика. Таким образом, средняя дифракционная эффективность (1) становится выше, чем в случае линейного фотоотклика. На рис. 2, *a—c* максимумы находятся в пределах изменения приведённых экспозиций и поэтому были вычислены программно. Как указано выше, рис. 2, *c* соответствует нелинейности фотоотклика, близкой к нелинейности реального голографического материала Реоксан, и величина максимума дифракционной эффективности на 40 % выше, чем для случая линейного фотоотклика. Следует отметить, что для достижения этой дифракционной эффективности требуется в 2,56 раза большая экспозиция и значит, используется существенно больший динамический диапазон фотоотклика голографического материала.

**Заключение.** Нелинейность отклика фотоматериала, используемого для записи голограммы в случае неравномерной по полю яркости записывающих пучков, приводит не к снижению дифракционной эффективности, а к её увеличению. Причиной этого является взаимодействие трёх нелинейностей: первая — неравномерное, нелинейное распределение по полю интенсивности записывающих голограмму пучков, вторая — синусоидальная зависимость дифракционной эффективности фазовой голограммы от экспозиции, третья — нелинейный отклик голографического материала на экспозицию. Наличие первой и второй нелинейностей создаёт эффект формфактора [5–8], а третья приводит к тому, что локальный по полю вклад голографической дифракционной решётки в среднюю дифракционную эффективность, перейдя максимум, спадает медленнее, чем растут соседние участки, ещё только стремящиеся к максимуму. Численные расчёты убедительно показывают, что указанный эффект увеличения максимально достижимой дифракционной эффективности за счёт взаимодействия формфактора и нелинейности фотоотклика может быть значительным. В приведённых выше расчётах он достигает 40 % при нелинейности, характерной для голографического материала Реоксан, а при больших нелинейностях (см. рис. 2, *d*) он ещё выше. Нелинейность фотоотклика голографической среды фазовых голограмм работает в том же направлении, что и появляющаяся за счёт нелинейности дополнительная компонента линейного отклика амплитудных голограмм [9], хотя физический механизм увеличения дифракционной эффективности в этих голограммах разный.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суханов В. И., Вениаминов А. В., Рыскин А. И., Никоноров Н. В. Разработки ГОИ в области объёмных регистрирующих сред для голографии // Сб. тр. Всерос. сем. «Юрий Николаевич Денисюк — основоположник отечественной голографии». С.-Пб.: СПбГУ ИТМО, 2007. С. 262–276.
2. Шелковников В. В., Русских В. В., Васильев Е. В. и др. Получение и свойства голографического фотополимерного материала в гибридной золь-гель матрице // Оптический журнал. 2006. **73**, № 7. С. 65–69.
3. Гибин И. С., Твердохлеб П. Е. Влияние нелинейной характеристики фотоматериала при голографической регистрации фурье-изображения щели // Радиотехника и электроника. 1971. **XVI**, № 1. С. 71–76.
4. Гибин И. С., Пен Е. Ф., Трубецкой А. В. Методика выбора условий записи голограмм // Автометрия. 1975. № 3. С. 26–31.
5. Шойдин С. А. Дифракционная эффективность голограмм, записанных гауссовыми пучками // Сб. матер. XI Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо Гео-Сибирь-2015». Новосибирск: СГУГиТ, 2015. Т. 1. С. 71–76.
6. Shoydin S. A. Requirements to lasers and form factor of holograms // Opt. Mem. & Neural Networks (Inform. Opt.). 2014. **23**, N 4. P. 287–294.

7. **Шойдин С. А.** Требования к лазерному излучению и формфактор голограмм // Оптический журнал. 2016. **83**, № 5. С. 65–75.
8. **Шойдин С. А.** Метод достижения максимальной дифракционной эффективности голограмм на основе оптимизации формфактора // Компьютерная оптика. 2016. **40**, № 4. С. 501–507.
9. **Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.** Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 688 с.
10. **Шойдин С. А., Сандер Е. А.** Запись голограмм в динамических безрелаксационных средах // Оптика и спектроскопия. 1985. **58**, вып. 1. С. 200–202.
11. **Андреева О. В., Манухин Б. Г., Андреева Н. В.** Обратимые и необратимые изменения оптических параметров образцов полимерного материала “Диффен”, обусловленные воздействием излучения // Тез. докл. XIV Междунар. конф. «Голография. Наука и практика (НОЛОЕХРО 2017)». М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. С. 195–197.

*Поступила в редакцию 02.10.2018*

*После доработки 04.10.2018*

*Принята к публикации 04.10.2018*

---