

**ВЛИЯНИЕ БРЭГГОВСКОЙ РАССТРОЙКИ
НА ИСКАЖЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ
СТРАНИЦЫ ДАННЫХ В ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ ***

Е. Ф. Пен, М. Ю. Родионов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: pen@iae.nsk.su

Проведено экспериментальное исследование и моделирование искажений восстановленных изображений страниц данных в голографической памяти в случае брэгговской расстройки. Установлено, что наблюдается не только снижение дифракционной эффективности восстановленного изображения в целом, но и неравномерное распределение интенсивности информационных элементов по полю изображения. Для неоднородных объемных голограмм картина искажений восстановленного изображения страницы данных более сложная. Из-за расплывания контура характеристики угловой селективности уровень взаимных помех соседних голограмм возрастает, но степень неравномерности интенсивности информационных элементов по полю изображения страницы данных уменьшается.

Введение. В современных проектах систем голографической памяти информация хранится в виде множества мультиплексированных (наложенных друг на друга в объеме регистрирующей среды) голограмм и в каждой из них содержится изображение размером до $10^3 \times 10^3$ бит бинарной страницы данных, причем индивидуальной голограмме соответствует свой угол падения восстанавливающего пучка (угол Брэгга).

Известно, что погрешность углового позиционирования восстанавливающего пучка (брэгговская расстройка) приводит к снижению дифракционной эффективности адресуемой голограммы, а также к появлению помех в виде изображений, восстановленных из соседних голограмм, что вызывает ошибки считывания данных. Влияние брэгговской расстройки на характеристики элементарных объемных пропускающих голограмм, образованных лишь парой из предметного и опорного пучков, хорошо изучено [1]. Интервал углов падения восстанавливающего пучка, при котором дифракционная эффективность голограммы падает в 2 раза от своего максимального значения, принято называть величиной угловой селективности, являющейся удоб-

* Работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 17 и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-07-89144).

ной мерой параметров объемных голограмм. Анализ характеристики угловой селективности позволяет судить о пространственной структуре объемной голограммы и ее толщине. Например, можно идентифицировать наличие неоднородного изменения модуляции показателя преломления по глубине голограммы, усадку толщины регистрирующего слоя, искривление интерференционных плоскостей [2, 3].

Для голограмм с изображениями страниц данных, содержащих множество предметных пучков, влияние брэгговской расстройки носит более сложный характер. Замечено, что имеет место неравномерность интенсивности информационных элементов по полю изображения страницы данных.

Цель предлагаемой работы – экспериментальное исследование и моделирование искажений восстановленного изображения страницы данных в голографической памяти в случае расстройки угла Брэгга.

Угловая селективность элементарной объемной голограммы. Теоретическая характеристика угловой селективности объемной пропускающей чисто фазовой голограммы, записанной с помощью двух плоских волн, падающих на регистрирующую среду симметрично под углом к нормали θ_0 (в среде), изображена на рис. 1 и описывается с помощью формулы [1]

$$\eta = |S(T)|^2 / |R(0)|^2, \quad (1)$$

где

$$S(T) = -i \frac{\exp(-i\xi) \sin(\xi^2 + v^2)^{1/2}}{(1 + \xi^2/v^2)^{1/2}}; \quad \xi = \delta\beta T \sin\theta_0;$$

$$\delta = \theta - \theta_0; \quad \beta = \left(\frac{2\pi\bar{n}}{\lambda_a} \right); \quad v = \frac{\pi\Delta n T}{\lambda_a \cos\theta_0};$$

η – дифракционная эффективность голограммы; $S(T)$ – амплитуда восстановленной волны на выходе голограммы; $R(0)$ – амплитуда падающей волны

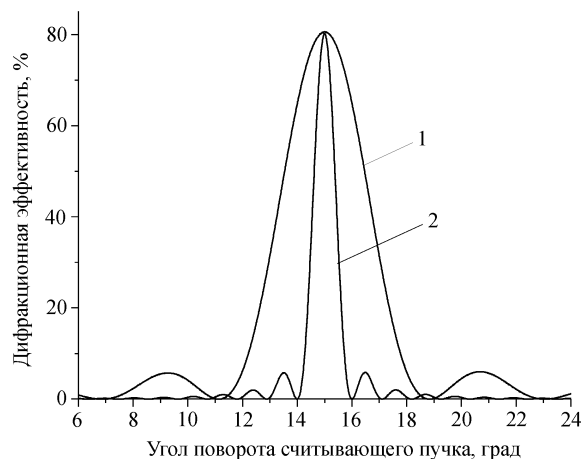
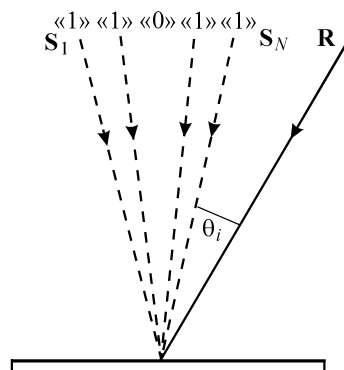


Рис. 1. Графики теоретических характеристик угловой селективности пропускающей голограммы. Длина волны света при записи и считывании составляет 632,8 нм; $\bar{n} = 1,5$; θ_0 в воздухе 15° ; $T = 26$ мкм, $\Delta n = 0,0085$ (кривая 1); $T = 100$ мкм, $\Delta n = 0,0022$ (кривая 2)

Рис. 2. Представление строки страницы данных в виде набора плоских волн



на входе голограммы ($R(0) = 1$); δ – расстройка угла Брэгга (углы отсчитываются от нормали); θ – угол падения восстанавливающего пучка в среде; θ_0 – угол Брэгга в среде; λ_a – длина волны света восстанавливающего пучка в воздухе*; \bar{n} и Δn – среднее значение и модуляция показателя преломления светочувствительной среды; T – толщина голограммы.

При точном выполнении условий Брэгга $\xi = 0$, $\eta = \sin^2(\nu)$. Для $\nu = \pi/2$ дифракционная эффективность $\eta = 100\%$. Если угол падения восстанавливающего пучка отличается от угла Брэгга, то получить такую эффективность невозможно. На рис. 1 видна периодичность характеристики угловой селективности с четко выраженными главным и боковыми максимумами и глубокими минимумами. Из расчетов следует, что ширина главного максимума (на полувысоте), являющаяся мерой угловой селективности, зависит от толщины голограммы (кривые 1 и 2).

Представление страницы данных. В голографической памяти запись изображения страницы данных производится опорной волной \mathbf{R} и набором N плоских субволн \mathbf{S}_i , соответствующих информационным элементам «1» в этой странице (на рис. 2 показан одномерный случай) и падающих на регистрирующую среду под углами θ_i ($i = 1, 2, \dots, N$). Будем рассматривать взаимодействие каждой из таких волн с опорной волной. При отклонении угла падения восстанавливающей волны от расчетной величины расстройка условий Брэгга происходит индивидуально для каждой из N субволн. Используя формулы (1), проведем для каждой из них расчет характеристики угловой селективности.

Результат такого расчета для девяти субволн с угловым интервалом 2° и угла падения опорной волны 28° приведен на рис. 3. Вертикальная линия на рисунке соответствует углу падения восстанавливающей волны 30° , т. е. отклонение от расчетного значения составляет $+2^\circ$. Видно, что интенсивность каждой из субволн изменяется на различную величину. Это означает, что интенсивность информационных элементов «1» по полю изображения страницы данных также будет различной.

Экспериментальные исследования. Исследовалась фурье-голограмма изображения страницы данных, записанная на фотополимерном материале толщиной примерно 30 мкм [4]. Дифракционная эффективность голограммы составляла 10%. Количество информационных элементов «1» и «0» в странице равно 32×32 , расстояние между ними 0,25 мм. Для исследований особенностей искажений восстановленных изображений страниц данных в случае брэгговской расстройки использовался стенд, схема которого представлена на рис. 4.

* Длина волны света записывающего пучка в данном случае равна длине волны света восстанавливающего пучка.

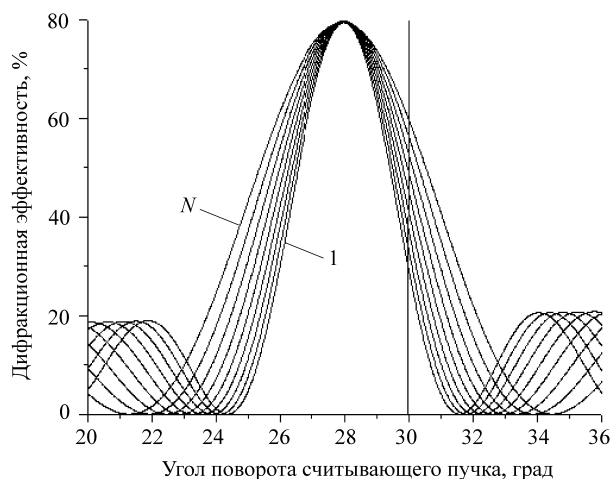


Рис. 3. Графики характеристик угловой селективности для N субволн

Пучок лазера направлялся на голограмму при различных значениях угла падения (точно совпадающего с углом Брэгга и с разной степенью расстройки), затем восстановленное изображение регистрировалось с помощью фотоаппарата. Далее фотографическое изображение переводилось на сканере Noritsu QSS-2901 в цифровой формат (TIFF-файл с разрешением 3088×2048 пикселей, 24 разряда градаций цветного изображения). Примеры восстановленных изображений при различных значениях угла падения считывающего пучка показаны на рис. 5.

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных распределения интенсивности восстановленного изображения представлены на рис. 6. Сравнение проводилось по одной строке из 16-ти информационных элементов «1» (вся строка 32 элемента), расположенных с шагом 0,5 мм. Интенсивность каждого информационного элемента усреднялась по площадке 24×24 пикселя восстановленного изображения. Из рисунка видно, что в данном эксперименте интенсивность изображений элементов «1» изменяется в 2 раза и в целом соответствует расчетам.

Влияние брэгговской расстройки в случае неоднородных голограмм. Известно, что для неоднородных объемных голограмм с нарушением

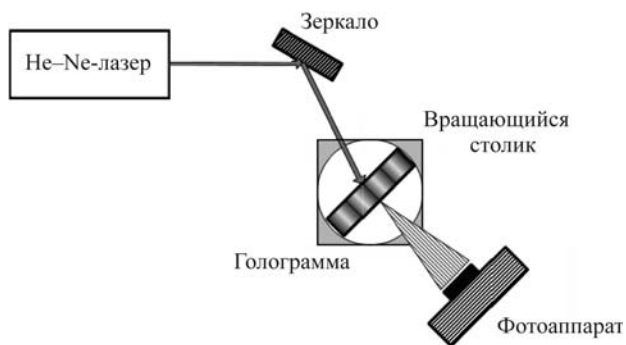


Рис. 4. Схема стенда для исследования искажений восстановленного изображения

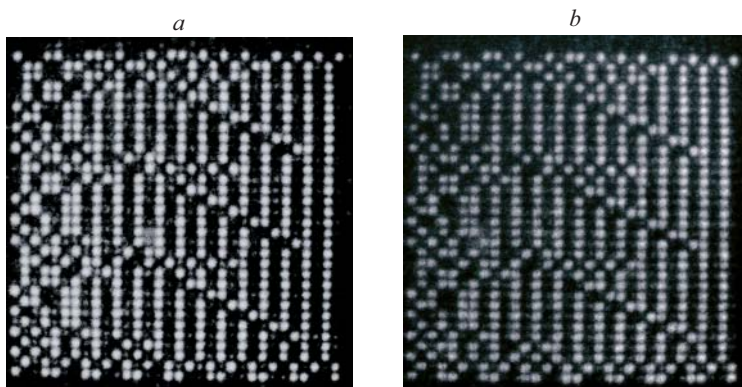


Рис. 5. Восстановленные изображения страницы данных: при точной настройке угла Брэгга (а) и расстройке в 2° (б)

периодичности пространственной структуры, а также изменением среднего значения и модуляции показателя преломления по глубине голограммы [5], характеристика угловой селективности значительно отличается от вида, показанного на рис. 1. В частности, контур характеристики уширяется, минимумы становятся менее выраженными, т. е. селективные свойства голограммы ухудшаются. Однако практический интерес вызывает тот факт, что изменение интенсивности информационных элементов восстановленного изображения страницы данных оказывается меньше, чем для однородных голограмм.

Для проверки этого эффекта с помощью ранее разработанных моделей неоднородных голограмм [5] (рис. 7) проведен расчет интенсивности информационных элементов «1» страницы данных в зависимости от номера объектного пучка для некоторых видов неоднородностей. В расчетах учтены зависимости среднего значения и модуляции показателя преломления $\Delta n(x, b_1, c_1)$ от толщины голограммы, а также искривление интерференци-

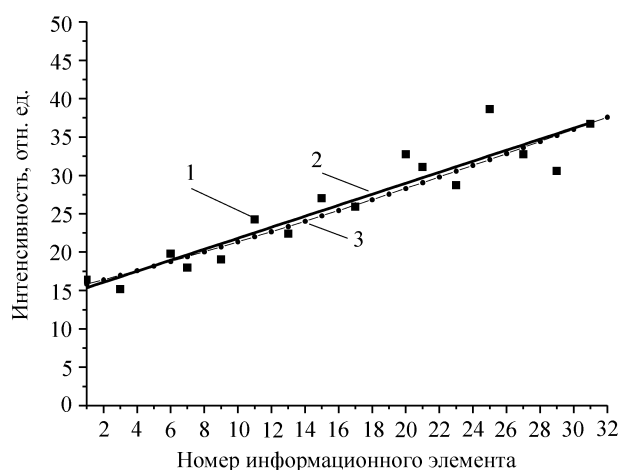


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчетных данных неравномерности интенсивности восстановленного изображения при $\delta = 2,6^\circ$: 1 – экспериментальные данные, 2 – усредненная линия экспериментальных данных, 3 – расчетная линия

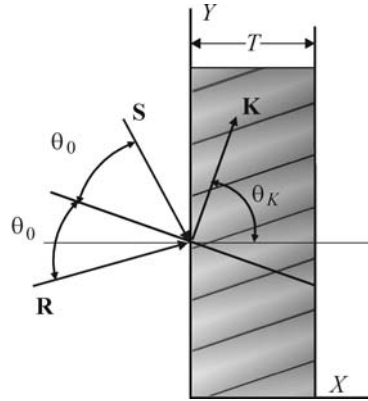


Рис. 7. Схема неоднородной пропускающей голограммы: **S** и **R** – векторы предметной и опорной волн соответственно, θ_K – угол наклона вектора решетки

онных плоскостей голографической решетки $K_x(x, p, q)$ вследствие продольной и поперечной усадки:

$$\Delta n(x, b_1, c_1) = \frac{\sqrt{b_1 \exp(-c_1 x/T)}}{2\bar{n}}, \quad (2)$$

$$K_x(x, p, q) = K_y \left(-\frac{K_0}{K_y} + p \left(\frac{T/2 - x}{T} \right) + q \left(\frac{T/2 - x}{T} \right)^2 \right), \quad (3)$$

где b_1, c_1, p, q – коэффициенты; K_0 – начальное значение вектора решетки; K_y – постоянное значение y -компоненты вектора решетки; X – ось, перпендикулярная поверхности материала; K_x – проекция вектора решетки на ось X ; T – толщина материала. На рисунке видны периодическая зависимость показателя преломления по координате вдоль оси Y и затухающая зависимость $\Delta n(x, b_1, c_1)$ вдоль оси X , вызванная неравномерным изменением интенсивности света по глубине голограммы.

Результаты расчета распределения интенсивности изображения страницы данных при $\delta = 2,6^\circ$ для голограммы с деформацией ее дифракционной структуры, вызванной продольной и поперечной усадкой толщины регистрирующего слоя фотополимерного материала, представлены на рис. 8.

Видно, что для неоднородной голограммы изменение интенсивности информационных элементов восстановленного изображения страницы данных

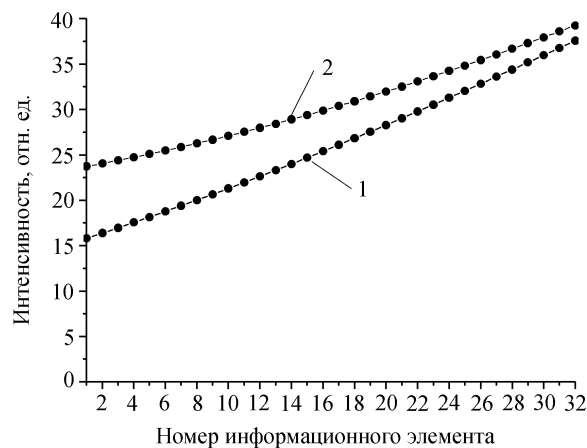


Рис. 8. Вид расчетной зависимости интенсивности восстановленного изображения страницы данных от брэгговской расстройки для однородной (кривая 1) и неоднородной (2) голограмм при $\delta = 2,6^\circ$

значительно меньше, чем для однородной голограммы. Заметим, однако, что в случае неоднородной голограммы селективность голограмм ухудшается, поскольку интенсивность восстановленного изображения не падает до нуля даже при большой расстройке.

Заключение. Таким образом, исследование, проведенное в данной работе, показало, что расстройка угла Брэгга приводит не только к снижению дифракционной эффективности восстановленного изображения страницы данных в целом, но и к неравномерному распределению интенсивности информационных элементов по полю изображения. Для неоднородных объемных голограмм картина искажений восстановленного изображения страницы данных более сложная. В частности, из-за расплывания контура характеристики угловой селективности уровень взаимных помех соседних голограмм возрастает, но степень неравномерности интенсивности информационных элементов по полю изображения страницы данных уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kogelnik H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings // The Bell System Techn. Journ. 1969. **48**, N. 9. P. 2909.
2. **Solymar L., Cooke D. J.** Volume Holography and Volume Gratings. London: Academic Press, 1981.
3. **Пен Е. Ф., Родионов М. Ю.** Неоднородные и нестационарные брэгговские голограммы: модели и методы исследований // Автометрия. 2005. **41**, № 2. С. 98.
4. **Шелковников В. В., Герасимова Т. Н., Пен Е. Ф. и др.** Голографические фотополимерные материалы // Наука – производству. 2004. № 5. С. 2.
5. **Пен Е. Ф., Родионов М. Ю., Шелковников В. В.** Влияние неоднородности объемных голограмм в фотополимерных материалах на их селективные свойства // Оптический журнал. 2006. **73**, № 7. С. 60.

Поступила в редакцию 5 марта 2008 г.