

$$\ln \frac{\tilde{k}(\lambda)}{\lambda_0 - |\lambda|} \leq 0.$$

В заключение необходимо отметить следующее. Выше была показана принципиальная возможность использования фазовых элементов для получения изображений, у которых модуль преобразования Фурье или Френеля отличается от константы. В изложенном методе существенно то, что значения фазы должны быть статистически независимы в соседних точках. Это может означать весьма жесткие требования к пространственному разрешению. При практической реализации важно как можно точнее знать эти требования. С качественной точки зрения картина представляется достаточно ясной: чем больше преобразование Фурье или Френеля отличается от константы, тем менее коррелированной должна быть фаза и, следовательно, тем большие требования предъявляются к пространственному разрешению. Однако для получения содержательных количественных оценок необходимо проведение дополнительных исследований и математического моделирования с использованием мощной вычислительной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lesen L. B., Hirsch P. M., Jordan J. A. The kinoform: a new wave form reconstruction device // IBM J. Res. Develop.—1969.—13.—P. 150; Киноформ // Зарубеж. радиозлектрон.—1969.—№ 12.
2. Kermisch D. Image reconstruction from phase information only // JOSA.—1970.—60, N1.—P. 15.
3. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А. Киноформные оптические элементы // Киноформные оптические элементы.—Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1981.
4. Корольков В. П., Коронкевич В. П., Михальцова И. А. и др. Киноформы: технологии, новые элементы и оптические системы // Автометрия.—1989.—№ 3, 4.
5. Трофимов О. Е. О задаче синтеза фазовых преобразователей волновых сигналов // Автометрия.—1979.—№ 2.
6. Трофимов О. Е. Расчет киноформ // Киноформные оптические элементы.—Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1981.
7. Трофимов О. Е. Об одном способе синтеза киноформ // Автометрия.—1978.—№ 3.
8. Крамер Г. Математические методы статистики.—М.: Мир, 1975.
9. Гончарский А. В., Попов В. В., Степанов В. В. Введение в компьютерную оптику.—М.: МГУ, 1991.

Поступила в редакцию 30 апреля 1992 г.

УДК 772.99 : 681.327.5

В. А. Домбровский

(Новосибирск)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ЗАПИСИ В СТРАНИЧНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ НА ПЛОСКОМ НОСИТЕЛЕ

Экспериментально исследована предельная плотность записи в страничной голографической памяти на плоском носителе. Показано, что плотность записи на галогидосеребряных материалах ограничивается в первую очередь дифракционными помехами. Экспериментально продемонстрирована возможность записи фурье-голограмм со средней плотностью 10^6 бит/мм² при высоком качестве восстановленной страницы (контраст >25).

Нас интересует ответ на вопрос: какова предельная плотность записи на тонких голограммах? Понятно, что всякая попытка записать информацию

плотнее некоторой величины приводит к искажению изображения страницы, а следовательно, снижению достоверности ее чтения. Поэтому, когда мы говорим о каком-то значении плотности записи, необходимо определить, при каком качестве восстановленного изображения страницы (контраст, отношение сигнал/шум) достигается эта плотность. Известно, что для любого изображения страницы цифровых данных не превышает допустимого значения.

В [8] показано, что плотность записи в голографической памяти на плоском носителе в первую очередь ограничивается дифракционными помехами, которые обусловлены дифракцией восстановленных пучков на апертуре голограммы. С уменьшением диаметра голограммы D_H при неизменном объеме записываемой страницы M^2 плотность записи $n = M^2/D_H^2$ увеличивается, однако одновременно растет уровень дифракционных помех.

В случае, когда для записи и восстановления голограммы используются гауссовские пучки, диаметр голограммы D_H определяется из выражения [8]

$$\frac{1}{D_H^2} = \frac{1}{D_c^2} + \frac{1}{D_o^2} + \frac{1}{D_b^2}, \quad (1)$$

где D_c , D_o , D_b — диаметры сигнального, опорного и восстанавливающего пучков в плоскости голограммы на уровне e^{-2} по интенсивности.

Выразим диаметр голограммы через параметры оптической системы записи/восстановления. В страничной голографической памяти плоскости голограммы и матричного фотоприемника связаны фурье-преобразованием [3]. Поэтому для диаметра восстановленного информационного пучка имеем

$$D_D = 4 \frac{\lambda f}{\pi D_H}, \quad (2)$$

где λ — длина волны света, f — фокусное расстояние объектива восстановления. Пусть d — расстояние между информационными пучками (фотоприемниками) в плоскости матричного фотоприемника. Разделив правую и левую части выражения (2) на d , получим

$$\frac{D_D}{d} = \frac{1}{\beta_D} = 4 \frac{\lambda f}{\pi D_H d},$$

или

$$D_H = \frac{4}{\pi} \beta_D \frac{\lambda f}{d}. \quad (3)$$

Из последнего соотношения видно, что при постоянных значениях параметров оптической системы λ , f и d диаметр голограммы D_H зависит только от безразмерной величины $\beta_D = \frac{d}{D_D}$ — скважности информационных пучков. Кстати, именно этот параметр определяет отношение сигнал/дифракционный фон [8]

$$\frac{C}{\Phi_D} \approx \frac{1}{4} \exp\left\{8\beta_D^2 / \sqrt{1 + (4/\pi)(\beta_D^2/\beta_F^2)}\right\}. \quad (4)$$

Здесь $\beta_F = \frac{d}{b}$ — скважность фотоприемников, b — линейный размер фотоприемника.

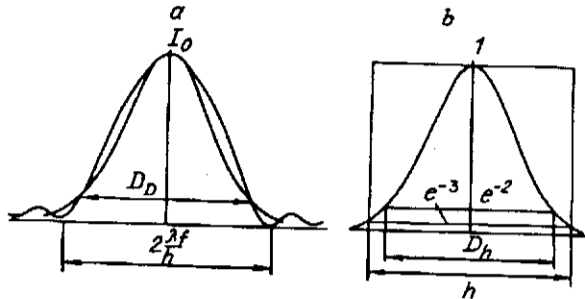


Рис. 1. Распределение интенсивности восстановленного пучка в плоскости изображения (а) и голограммы (б) для голограммы с гауссовским и прямоугольным профилями

В случае однородного освещения голограммы ее диаметр h принято характеризовать числом Рэлея N [1, 9]:

$$h = N \frac{\lambda f}{d}. \quad (5)$$

Число Рэлея показывает, сколько раз расстояние, соответствующее первому минимуму функции $\text{sinc}(\cdot)$, укладывается на расстоянии между точками в изображении. Для гауссовской голограммы такой же удобной мерой является скважность β_D (см. выражение (3)). Между числом Рэлея N и параметром β_D существует простая зависимость

$$N = \sqrt{8/\pi} \beta_D. \quad (6)$$

Выражение (6) получается из условия равенства мощностей информационных пучков, формируемых голограммами с прямоугольным и гауссовским профилями (рис. 1):

$$I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc}^2 \left[\frac{kh}{2f} x, \frac{kh}{2f} y \right] dx dy = I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-8 \frac{x^2 + y^2}{D_D^2} \right] dx dy, \quad (7)$$

где I_0 — интенсивность в центре восстановленного пучка в плоскости матричного фотоприемника. Из (7) следует, что $h = \sqrt{\pi/2} D_D$. Заметим, что на расстоянии $h/2$ от центра гауссовской голограммы ее эффективность падает в e^π раз. Выражения (3), (5) и (6) могут быть полезны, когда необходимо сравнить плотность записи для гауссовской голограммы и голограммы с однородным освещением.

Теоретические оценки показывают, что приемлемое отношение сигнал/фон в восстановленном изображении достигается при числе Рэлея, равном $N = 2$ [1, 10]. В [5] делается вывод о том, что для обеспечения низкой вероятности ошибки чтения восстановленной страницы число Рэлея должно быть $N \geq 3$.

В данной работе проведены эксперименты с гауссовскими тонкими голограммами, в которых исследовалось качество восстановленного изображения (контраст, отношения сигнал/шум оптических «1», «0») в зависимости от числа Рэлея N (размера голограммы D_H). Под контрастом K здесь понимается отношение средней мощности оптических «1» — \bar{P}^1 — к средней мощности оптических «0» — \bar{P}^0 ($K = \bar{P}^1 / \bar{P}^0$). Отношение сигнал/шум определяется следующим образом:

$$(C/Ш)^{1,0} = \bar{P}^{1,0} / \sqrt{D[P^{1,0}]},$$

где $D[P^{1,0}]$ — дисперсия мощности оптических «1» и «0». Оптическая схема экспериментальной установки показана на рис. 2, где 1 — He—Ne-лазер

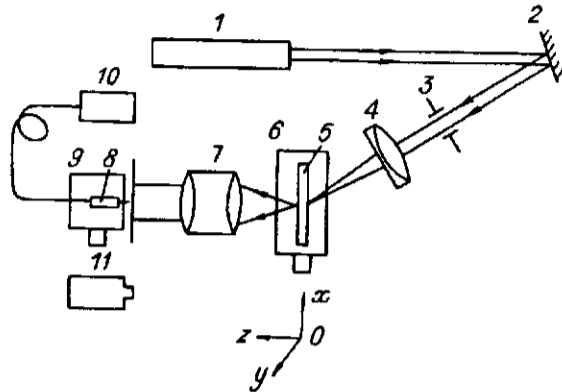


Рис. 2. Оптическая схема экспериментальной установки

ЛГ-52-1 ($\lambda = 630$ нм), 2 — зеркало, 3 — диафрагма, 4 — линза, 5 — голограмма, 6 — двухкоординатный стол с микровинтами, 7 — объектив ($f = 30,6$ мм), 8 — многомодовый (диаметр сердцевины 100 мкм) или одномодовый (4 мкм) волоконный световод, 9 — однокоординатный стол с цифровым отсчетом, 10 — фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-84), 11 — микроскоп.

Регистрация фурье-голограмм страниц цифровых данных проводилась на голографических пластинках ПЭ-2 в устройстве записи [11]. Голограмма обрабатывалась в проявителе ГП-2 по стандартной методике [12]. Страница цифровых данных емкостью 32×32 бит формировалась с помощью электрически управляемого транспаранта на жидких кристаллах [13]. При записи голограммы использовалась псевдослучайная четырехуровневая фазовая маска [11]. Качество записываемого изображения определялось управляемым транспарантом и равномерностью его освещения ($K_r \approx 200$, $(C/Ш)^1 \approx 6$, $(C/Ш)^0 \approx 3$ [13]). Диаметры сигнального и опорного пучков в плоскости голограммы на уровне e^{-2} по интенсивности соответственно были равны $D_c = 240$, $D_o = 200$ мкм. При этом «видимый» диаметр голограммы, определяемый выражением $\frac{1}{D_r^2} = \frac{1}{D_c^2} + \frac{1}{D_o^2}$, составлял $D_r = 154$ мкм.

Для определения эффективного диаметра голограммы, как следует из формулы (1), необходимо знать размер восстанавливающего пучка $D_{в}$. Диаметр восстанавливающего пучка рассчитывался из выражения [14]

$$D_{в} = 4 \frac{\lambda f_b}{\pi D_l} \frac{q_0 / f_b}{\sqrt{q_0^2 / f_b^2 + ((d_1 - f_b) / f_b)^2}}, \quad (8)$$

где λ — длина волны излучения лазера, f_b — фокусное расстояние линзы 4, D_l — диаметр лазерного пучка на плоском зеркале на уровне e^{-2} по интенсивности; $q_0 = \frac{\pi D_l^2}{4\lambda}$ — обобщенный параметр лазерного гауссовского пучка, d_1 — расстояние от плоского зеркала лазера до линзы 4. Измеренное значение диаметра лазерного пучка $D_l = 0,82$ мм, при этом $q_0 = 840$ мм. Расстояние от плоского зеркала лазера до голограммы в эксперименте было постоянным: $d_1 + f_b = 620$ мм.

В табл. 1 приведены значения фокусных расстояний линзы 4, используемых в эксперименте, и соответствующие им расчетные и экспериментальные значения диаметров восстанавливающего пучка.

Таблица 1

| f_b , мм | $D_{в}$ расч., мкм | $D_{в}$ экс., мкм |
|------------|--------------------|-------------------|
| 80 | 68 | 70 |
| 110 | 97 | 100 |
| 140 | 127 | |
| 180 | 168 | |
| 240 | 233 | 226 |

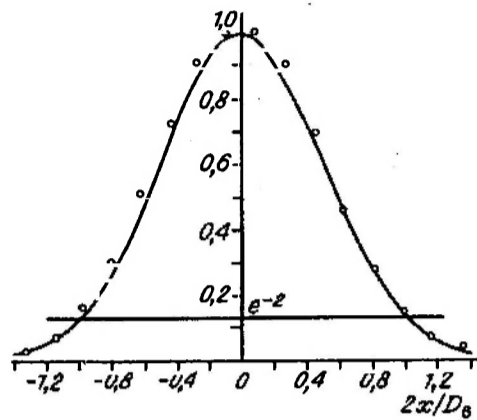


Рис. 3. Распределение интенсивности восстанавливающего пучка в плоскости голограммы

Этого пучка, с помощью выражения (1) рассчитывался эффективный диаметр голограммы D_H . Например, для линзы с фокусным расстоянием $f_b = 240$ мм $D_H = 127$ мкм. Детальные экспериментальные исследования показали, что диаметр голограммы в действительности примерно на 20 % больше расчетного. Это объясняется тем, что на практике для достижения высоких значений дифракционной эффективности (4 + 8 %) запись голограммы осуществляется на линейном участке регистрирующей среды. Поэтому в последующих экспериментах «видимый» D_r и эффективный D_H диаметры голограммы рассчитывались по результатам измерений свертки функций пропускания голограммы с восстанавливающим пучком D_{cb} и диаметра восстановленного информационного пучка D_D в плоскости матричного фотоприемника. На рис. 4 показано изменение мощности информационного пятна в восстановленном изображении при смещении восстанавливающего пучка относительно голограммы. Экспериментальные значения нанесены точками. Здесь использовалась линза 4 с фокусным расстоянием $f_b = 240$ мм. Размер D_{cb} связан с диаметром восстанавливающего пучка и голограммы выражением

$$D_{cb} = D_b / \sqrt{1 - (D_H^2 / D_b^2)}. \quad (9)$$

Таким образом, зная диаметры восстанавливающего пучка D_b и D_{cb} , из выражения (9) легко найти эффективный диаметр гауссовской голограммы:

$$D_H = D_b \sqrt{1 - (D_{cb}^2 / D_b^2)}, \quad (10)$$

при этом «видимый» диаметр голограммы

$$D_r = \frac{D_H D_b}{\sqrt{D_b^2 - D_H^2}}. \quad (11)$$

Обратим внимание на то, что из-за наклонного падения восстанавливающего пучка на голограмму ($\Theta_x = 30^\circ$) его диаметр и соответственно диаметр голограммы разные в направлении координат X и Y . В эксперименте все расчеты и измерения проводились для координаты X . Диаметр восстанавливающего пучка в направлении оси X

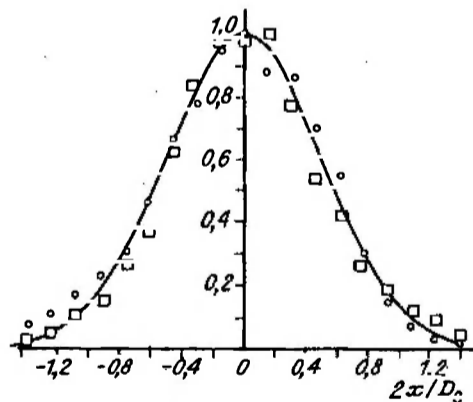


Рис. 4. Зависимость мощности восстановленного изображения от относительного смещения $2x/D_0$ восстанавливающего пучка с голограммы

Таблица 2

| f_B мм | $D_{в. экс}$ мкм | $D_{св. экс}$ мкм | $D_{H экс} = D_{в. экс} \times$ $\times \sqrt{1 - \nu_{в. экс}^2 / \nu_{св. экс}^2}$ мкм | $D_{г. экс} =$ $\frac{D_{H экс} D_{в. экс}}{\sqrt{D_{в. экс}^2 - D_{H экс}^2}}$ мкм | $D_H =$ $\frac{D_{г. экс} D_{в. экс}}{\sqrt{D_{г. экс}^2 + D_{в. экс}^2}}$ мкм | $D_{D расч} =$ $= 4 \frac{M}{\pi D_H}$ мкм | $D_{D экс}$ мкм |
|-------------|---------------------|----------------------|--|---|--|--|--------------------|
| 80 | 81 | 230 | 75 | 214 | 76 | 324 | 330 |
| 110 | 115 | 230 | 100 | 200 | 101 | 242 | 260 |
| 140 | 146 | — | — | — | 120 | 204 | — |
| 180 | 194 | — | — | — | 143 | 171 | — |
| 240 | 261 | 340 | 158 | 218 | 164 | 149 | 156 |

$$D_{в} = D_{вх} = \frac{D_{вв}}{\cos 30^\circ}$$

В табл. 2 сведены основные результаты измерений и расчетов диаметров пучков и голограммы для различных значений фокусных расстояний линзы 4. При вычислении D_H и D_D использовалось усредненное значение «видимого» диаметра голограммы $\bar{D}_{г. экс} = 211$ мкм. Согласно расчетных данных ($D_{D расч}$) и результатов прямых измерений ($D_{D экс}$) (см. табл. 2) свидетельствует о том, что пучки, формирующие голограмму, и сама голограмма хорошо описываются гауссовской функцией. Об этом же свидетельствуют графики на рис. 3—5. На последнем рисунке демонстрируется распределение интенсивности восстановленного пучка в плоскости матричного фотоприемника для линзы 4 с фокусным расстоянием $f_B = 110$ мм.

Далее в эксперименте проводились измерения мощности оптических «1» — P^1 — и «0» — P^0 — в восстановленном изображении в зависимости от размера восстанавливающего пучка. Расстояние между информационными пучками в плоскости матричного фотоприемника $d = 275$ мкм. Для измерений применялся многомодовый волоконный световод ($\varnothing 100$ мкм). По данным измерений рассчитывались средний контраст, минимальный контраст $K_{\min} = \frac{P_{\min}^1}{P_{\max}^0}$ и отношение сигнал/шум оптических «1» — $(C/\Pi)^1$ — и «0» — $(C/\Pi)^0$. Результаты эксперимента приведены в табл. 3.

Восстановленные изображения для различных значений диаметра восстанавливающего пучка показаны на рис. 6. Видно, что с уменьшением параметра β_D с 1,9 до 1,1 (число Рэля N уменьшается с 3 до 1,8) отношение сигнал/шум оптических «1» и «0» практически не меняется ($(C/\Pi)^1 \approx 4$, $(C/\Pi)^0 \approx 1$), зато средний и минимальный контрасты падают в 4 раза (K со 100 до 25 и K_{\min} с 15 до 4). При дальнейшем уменьшении β_D до 0,8 ($N \approx 1,3$) средний контраст падает еще в 2 раза ($K = 13$), и, кроме того, в 1,5 раза уменьшается $(C/\Pi)^1$. Последнее объясняется резким ростом флуктуаций мощности оптических «1» из-за их когерентного взаимодействия.

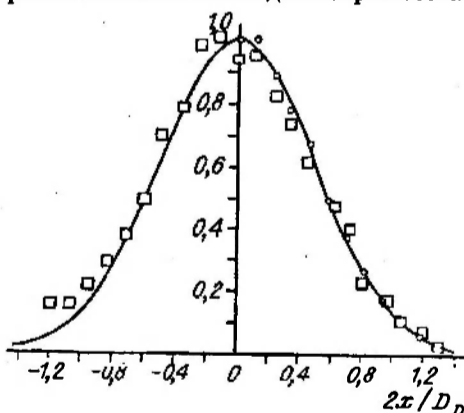


Рис. 5. Распределение интенсивности восстановленного пучка в плоскости матричного фотоприемника

Т а б л и ц а 3

| f_B , мм | $\beta_D = d/D_D$ | $N = \sqrt{8/\pi\beta_D}$ | $K = \bar{P}^1/\bar{P}^0$ | $K_{\min} = P_{\min}^1/P_{\max}^0$ | $(C/Ш)^1$ | $(C/Ш)^0$ |
|------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|
| 80 | 0,83 | 1,32 | 13 | 1,5 | 2,50 | 0,88 |
| 110 | 1,11 | 1,76 | 25 | 4,0 | 3,57 | 1,11 |
| 140 | 1,34 | 2,14 | 39 | 5,2 | 4,00 | 0,93 |
| 180 | 1,60 | 2,55 | 63 | 9,6 | 3,85 | 0,93 |
| 240 | 1,87 | 2,98 | 97 | 15,0 | 3,70 | 0,96 |

Необходимо отметить, что при высокой плотности записи, т. е. когда $\beta_D \leq 1,1$ ($N \leq 1,8$), на качестве восстановленного изображения начинают

сильно сказываться даже небольшие смещения восстанавливающего пучка с центра голограммы [4]. Это связано с изменением разности фаз в соседних информационных пучках. Разность фаз $\Delta\varphi$ описывается выражением [4]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{f} \frac{D_B^2}{D_H^2} (x + y), \quad (12)$$

из которого видно, что при смещении восстанавливающего пучка на расстояние $x_n = \frac{\lambda f}{2d} \left(\frac{D_B}{D_H}\right)^2$ разность фаз $\Delta\varphi$ меняется на π . Проведены эксперименты, в которых контролировалось изменение разности фаз в соседних информационных пучках в зависимости от сдвига восстанавливающего пучка. Контроль осуществлялся визуально с помощью микроскопа. На рис. 7, а приведено восстановленное изображение страницы, когда восстанавливающий пучок попадает в центр голограммы. При этом разность фаз между соседними пучками равна либо $\pi/2$, либо $3\pi/2$, что определяется используемой псевдослучайной фазовой маской [11]. Когерентное взаимодействие пучков здесь минимальное. При смещении восстанавливающего пучка с центра голограммы на расстояние $x_{\pi/2} = \frac{\lambda f}{4d} \left(\frac{D_B}{D_H}\right)^2$ разность фаз в соседних пучках становится равной 0 или π . В результате когерентного взаимодействия соседних информационных пучков возникают большие флуктуации мощности оптических «1» и «0». Качество восстановленной страницы резко падает. Эта ситуация иллюстрируется рис. 7, б.

Из выражения (12) видно, что скорость изменения разности фаз зависит от отношения D_B^2/D_H^2 . С целью проверки справедливости выражения (12) были проведены эксперименты, в которых измерялось расстояние x_n в зависимости от отношения D_B^2/D_H^2 . В табл. 4 приведены данные расчетов и эксперимента. Сравнение результатов свидетельствует о хорошем их согласовании.

Таким образом, из проведенных исследований следует, что качество изображения восстановленной из тонкой голограммы страницы цифровых данных

| Т а б л и ц а 4 | | | |
|-----------------|-----------|--------------------------|--------------------------|
| f_B , мм | D_B/D_H | $x_{\text{расч.}}$, мкм | $x_{\text{эксп.}}$, мкм |
| 80 | 1,07 | 40,4 | 40 |
| 110 | 1,13 | 45 | 49 |
| 140 | 1,22 | 52,5 | 51 |
| 180 | 1,36 | 65,2 | — |
| 240 | 1,63 | 93,7 | — |

остается приемлемым ($K \approx 25$, $(C/Ш)^1 \approx 4$, $(C/Ш)^0 \approx 1$), если число Рэлея $N \geq 1,8$ (скважность восстановленных пучков $\beta_D \geq 1,1$). В случае использования фурье-объектива с относительным отверстием 1 : 1 при $\beta_D = 1,1$ локальная плотность записи

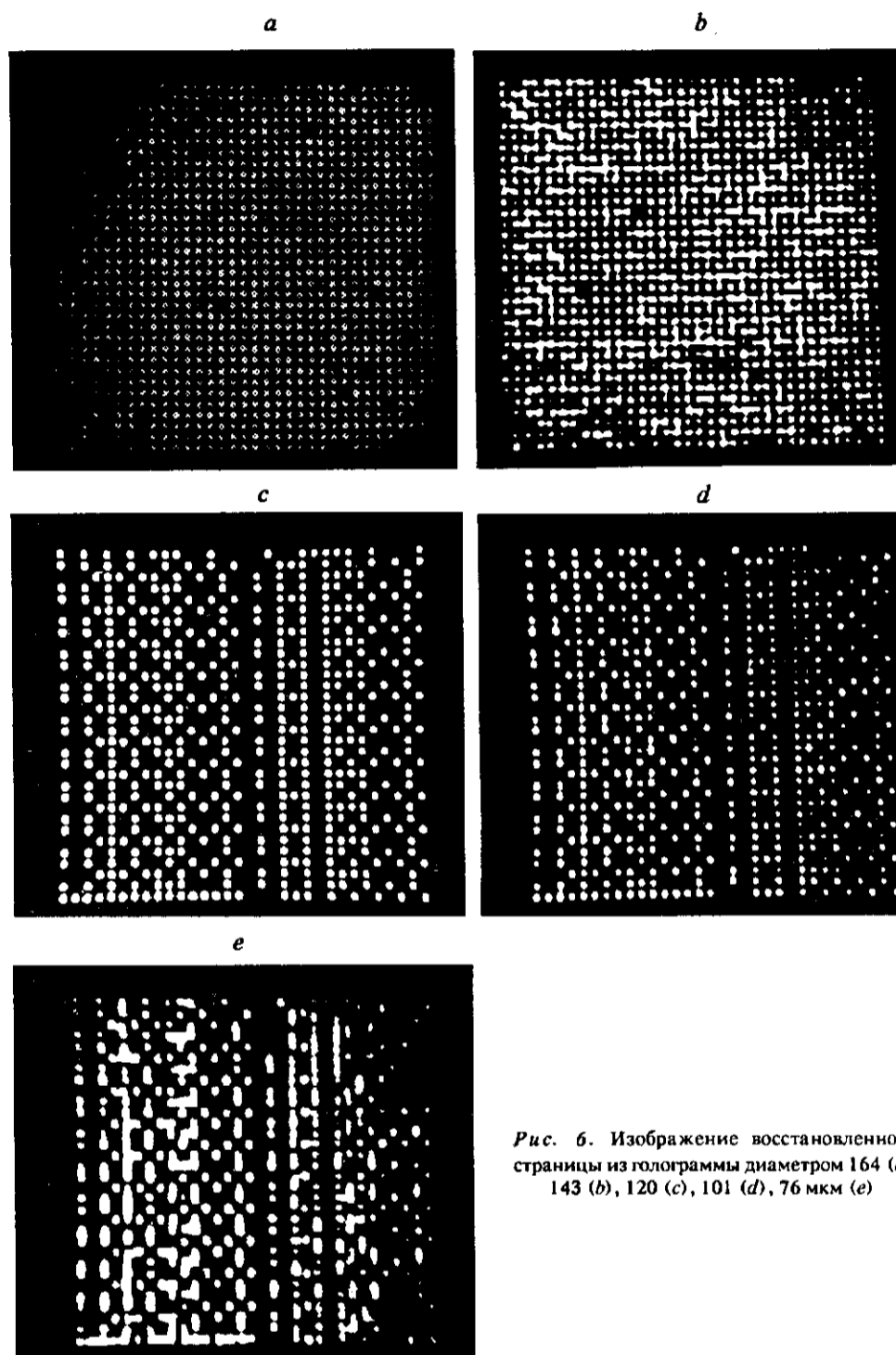


Рис. 6. Изображение восстановленной страницы из голограммы диаметром 164 (a), 143 (b), 120 (c), 101 (d), 76 мкм (e)

($n = M^2/D_H^2$) равна $n \approx 8 \cdot 10^5$ бит/мм², а средняя плотность записи — $\langle n \rangle = 3 \cdot 10^5$ бит/мм² ($\lambda = 0,63$ мкм). Плоский голографический носитель позволяет записывать в одну позицию четыре наложенные голограммы с различно ориентированными векторами решеток [8]. При этом максимальная

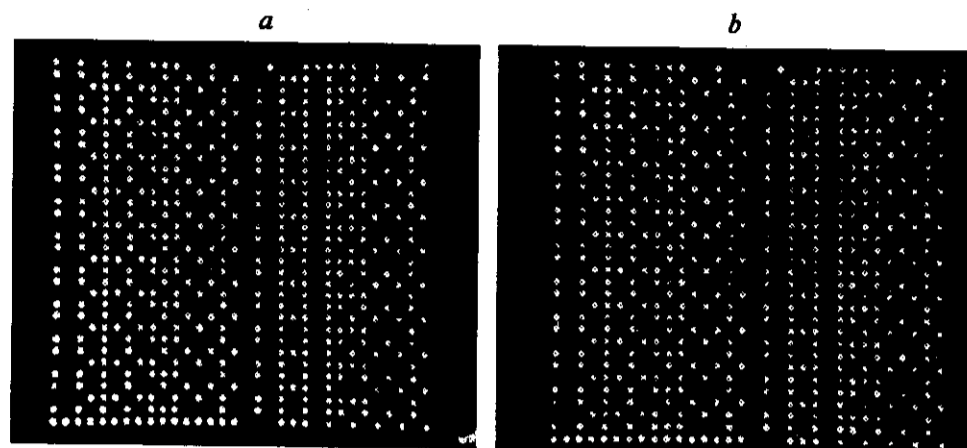


Рис. 7. Изображение восстановленной страницы:
 а — восстанавливающий пучок падает в центр голограммы, б — восстанавливающий пучок смещен относительно центра голограммы на расстояние $x_H/2$

средняя плотность записи на плоском носителе достигает величины $\langle n \rangle \approx 10^6$ бит/мм², что хорошо согласуется с теоретическими оценками [8].

Автор выражает благодарность А. А. Блоку, З. Л. Пустовой за помощь в проведении экспериментов, С. А. Домбровскому и Е. Ф. Пену за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lugt A. W. Design relationships for holographic memories // Appl. Opt.—1973.—12, N 7.— P. 1675.
2. Гибин И. С. Расчет и выбор параметров оптических голограммных запоминающих устройств // Автометрия.—1974.—№ 6.
3. Акаев А. А., Майоров С. А. Когерентные оптические вычислительные машины.—Л.: Машиностроение, 1977.
4. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Влияние дифракционного фона на качество восстановленного изображения в ГЗУ // Сб. тр. IV Всесоюз. конф. по голографии.— Ереван: ВНИИРИ, 1982.—Т. 2.
5. Киш Г. Влияние несовершенств оптической системы на вероятность сбоев голографического запоминающего устройства // Квантовая электрон.—1984.—11, № 10.
6. Takeda Y. Holographic memory with high quality and high information storage density // Japn. J. Appl. Phys.—1972.—11, N 5.—P. 656.
7. Майорчук М. А., Никитин В. В., Самойлов В. Д. О возможности записи фурье-голограмм с информационной плотностью порядка 10^7 бит/мм² // Квантовая электрон.—1974.—1, № 1.
8. Блок А. А., Домбровский В. А., Домбровский С. А. и др. Практический предел плотности записи данных в голографических ЗУ на плоских носителях // Автометрия.—1989.—№ 5.
9. Варга П., Киш Г. Расчет оптического канала архивного голографического запоминающего устройства // Квантовая электрон.—1979.—6, № 5.
10. Микаэлян А. Л., Бобринев В. И. Голографические системы памяти (обзор) // Радиотехника и электроника.—1974.—XIX, № 5.
11. Блок А. А., Ванюшев Б. В., Волков А. В. и др. Устройство автоматической записи матриц голограмм цифровых данных // Автометрия.—1984.—№ 3.
12. Усанов Ю. Е. Влияние состава проявителя на свойства голографического изображения // Регистры: лучшие среды для голографии.—Л.: Наука, 1975.
13. Блок А. А., Гибин И. С., Гудова Г. И. и др. Разработка и исследование электроуправляемого спаранта на основе жидких кристаллов // Сб. тр. IV Всесоюз. конф. по голографии.— Ереван: ВНИИРИ, 1982.—Т. 2.
14. Пахомов И. И., Цибуля А. Б. Расчет оптических систем лазерных приборов.—М.: Радио и связь, 1986.

Поступила в редакцию 6 июля 1992 г.