

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗАПИСИ, ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

УДК 778.14 : 778.38

Л. Н. ВАГИН

(Москва)

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МИНИАТЮРИЗАЦИИ, КОПИРОВАНИЯ, ХРАНЕНИЯ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДОКУМЕНТАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

(Обзор)

При реализации автоматизированных систем научно-технической информации (АС НТИ) с особой остротой возникают вопросы сокращения объемов хранения, создания сверхъемких быстродействующих устройств поиска и воспроизведения информации. Представляется, что для решения этих вопросов целесообразно использовать голографические методы, обладающие важными достоинствами.

Так, голограммы Фраунгофера позволяют достичь высокой плотности записи сравнительно простыми средствами; они помехоустойчивы; линейно передают широкий диапазон яркостей объекта. Некритичность фокусировки восстановленного изображения к поперечному и продольному смещениям голограмм Фурье существенно упрощает и повышает надежность эксплуатации голографических средств информационной техники (ГСИТ) [1, 2]. Самофокусировка изображения и ускоренная выборка голограмм из массива с помощью быстродействующих дефлекторов света позволяют надеяться на сокращение времени доступа к документу в массиве 10^6 — 10^8 страниц примерно на порядок величины по сравнению с документальными информационно-поисковыми системами (ИПС) на основе микрофильмовых носителей [3]. Бесконтактное интерференционное копирование голограмм позволяет получать неограниченное количество равноценных копий. Цветокодированные голограммы сфокусированного изображения (ЦГСИ) по сравнению с цветными микрофильмами обеспечивают более высокое разрешение и лучшую колориметрию; они устойчивее к теплу, поэтому медленнее выцветают и дают более яркое изображение, гораздо дешевле, допускают высокую скорость тиражирования [4].

В настоящей статье рассмотрены типы голограмм, используемые для миниатюризации документов; оптические схемы записи и восстановления голограмм; способы копирования; информационные характеристики голографической ступени миниатюризации; организация голограмм в массивах и хранилищах; голографические информационные устройства.

Голографическая миниатюризация документов. Одноступенчатый способ. Голография как метод регистрации волнового фронта, рассеянного объектом, позволяет голографировать с уменьшением без применения объектива. Схема записи голограмм показана на рис. 1. Лист документа O освещается пучком, расширенным линзой L_1 . Диффузно рассеянный

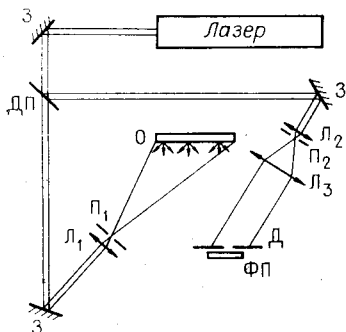


Рис. 1. Схема записи голограмм документов одноступенчатым способом:

З — зеркало; ДП — делитель пучка; Л₁, Л₂, Л₃ — линзы; П₁, П₂ — пространственные фильтры; О — объект; ФП — фотопластинка; Д — диафрагма.

бумагой свет попадает на фотопластинку ФП. Опорный пучок расширяется телескопом Л₂—Л₃. Оба пучка интерферируют в плоскости фотопластинки. Размер голограммы ограничивается диафрагмой Д. Для восстановления изображения голограмма освещается пучком, падающим на нее по направлению опорного пучка, но с противоположной стороны. При одинаковых длине волны и расходимости опорного и восстанавливающего пучков действительное изображение документа в размере оригинала восстанавливается за голограммой на расстоянии, равном расстоянию между листом документа и фотопластинкой при записи.

Условия записи качественных голограмм изучались в работе [5]. Показано, что изображение текста с высотой букв 1,5 мм (типичный случай) восстанавливается с отличной читаемостью, но с пониженным контрастом. Голограммы имели диаметр не менее 5 мм. Контраст изображения приближался к контрасту оригинала при диаметре 10 мм (рис. 2, а — в). Кратность голографического одноступенчатого уменьшения документа равнялась соответственно 70 и 35. Эти значения гораздо ниже достигаемых при двухступенчатом способе миниатюризации (см. ниже). Главная причина в том, что при голографировании оригинала на голограмму записывается структура поверхности бумаги, проявляющаяся в виде зернистого шума в восстановленном изображении. Шум снижает контраст и деформирует буквы. Другой недостаток одноступенчатого способа — чрезмерное время экспонирования голограммы (несколько минут при использовании лазера ЛГ-38). Важное достоинство — простота устройства миниатюризации, где отсутствуют записывающий объектив, механизмы фокусировки и другие точные и дорогие элементы традиционной микрофильмирующей аппаратуры. Однородная структура объектного пучка облегчает согласование динамического диапазона регистрирующей среды и интерференционной картины в плоскости голограммы, повышает помехоустойчивость записи: невосприимчивость к пыли, царапинам и дефектам на оптических элементах схемы записи.

Двухступенчатый способ. На второй — голографической — ступени миниатюризации уменьшается не бумажная страница документа, а его фотографическая микрокопия — микрофильм. В работах [6, 7] показано, что лучшие результаты достигаются при голографировании негативного микрофильма.

Возможно безлинзовое голографирование микрофильма и с применением линз. В безлинзовом варианте (голография Френеля), чтобы перехватить голограммой свет от всех участков микрофильма, необходимо значительно удалить микрофильм от регистрирующей среды. Это вызывает повышение времени экспонирования голограммы до десятков секунд. Использование линз позволяет собрать на голограмме практически весь свет, прошедший через микрофильм, и снизить время экспонирования до сотых долей секунды. Нашли применение два линзовых варианта. В первом из них интерференционным способом записывается уменьшенное изображение микрофильма (голография сфокусированного изображения); во втором — тем же способом регистрируется пространственный спектр микрофильма (голография Фраунгофера).

Цветные голограммы сфокусированного изображения предложено использовать для миниатюризации карт, альбомов,

Если с целью достижения определенной степени влажности имеющаяся влажность повышается, размеры фотопленки будут больше, чем при понижении влажности для достижения той же самой степени влажности. Например: размеры пленки, хранящейся при 50% относительной влажности, больше, если относительная влажность была повышена от 40% до 60%, чем размеры пленки, окружающей влажность которой была понижена от 60% до 50% относительной влажности.

Если с целью достижения определенной степени влажности имеющаяся влажность повышается, размеры фотопленки будут больше, чем при понижении влажности для достижения той же самой степени влажности. Например: размеры пленки, хранящейся при 50% относительной влажности, больше, если относительная влажность была повышена от 40% до 50%, чем размеры пленки, окружающей влажность которой была понижена от 60% до 50% относительной влажности.

Если с целью достижения определенной степени влажности имеющаяся влажность повышается, размеры фотопленки будут больше, чем при понижении влажности для достижения той же самой степени влажности. Например: размеры пленки, хранящейся при 50% относительной влажности, больше, если относительная влажность была повышена от 40% до 50%, чем размеры пленки, окружающей влажность которой была понижена от 60% до 50% относительной влажности.

Рис 2. Одноступенчатый метод: изображения, восстановленные из голограмм диаметром 5 (а) и 10 мм (б); оригинал — (в).

картин, книг с цветными иллюстрациями и других плоских цветных объектов [4, 8—10]. Известны частотный и угловой способы кодирования цвета. В обоих случаях ЦГСИ представляет собой композицию из трех некогерентно наложенных голограмм, отличающихся частотой ν или угловым расположением интерференционных полос [10]. Для записи ЦГСИ предварительно изготавливаются три цветоделенных транспаранта объекта. Запись каждого из них проводится со своим опорным пучком. На рис. 3, а приведена схема записи ЦГСИ с частотным кодированием. Здесь опорное плечо состоит из трех пучков (красный, синий и зеленый), падающих на плоскость регистрирующей среды под углами $\theta_{кр}$, $\theta_{син}$, $\theta_{зел}$. Значения этих углов выбираются так, чтобы при считывании белым светом каждая из трех голограмм дифрагировала свет в направлении, перпендикулярном плоскости среды, т. е.

$$\sin \theta_{\nu} = \lambda_{кр} \nu_{кр} = \lambda_{зел} \nu_{зел} = \lambda_{син} \nu_{син},$$

где θ_{ν} — угол падения восстанавливающего пучка, $\lambda_{кр} = 6,5 \cdot 10^{-4}$ мм, $\lambda_{зел} = 5,3 \cdot 10^{-4}$ мм и $\lambda_{син} = 4,6 \cdot 10^{-4}$ мм.

Запись проводится в монохроматическом свете ($\lambda_{зап}$). При этом задаются значения $\nu_{кр}$ (или любой другой ν), а углы $\theta_{кр}$, $\theta_{син}$, $\theta_{зел}$ находятся из условий:

$$\begin{aligned} \sin \theta_{кр} &= \lambda_{зап} \nu_{кр}, \\ \sin \theta_{зел} &= \lambda_{зап} \nu_{зел} = \lambda_{зап} \nu_{кр} \lambda_{кр} \lambda_{зел}^{-1}, \\ \sin \theta_{син} &= \lambda_{зап} \nu_{син} = \lambda_{зап} \nu_{кр} \lambda_{кр} \lambda_{син}^{-1}. \end{aligned}$$

Транспарант б освещается сходящимся пучком света, формируемым объективом L_2 . Вблизи его фокальной плоскости помещен проекционный объектив L_3 , который строит изображение микрофильма в плоскости регистрирующей среды.

Схема восстановления изображения (зеленой компоненты) приведена на рис. 3, б. Свет от лампы накаливания 7 коллимируется конденсорной линзой L_5 и падает на голограмму под углом θ_{ν} . Дифрагированный свет с помощью проекционного объектива L_4 строит на экране изображение 9.

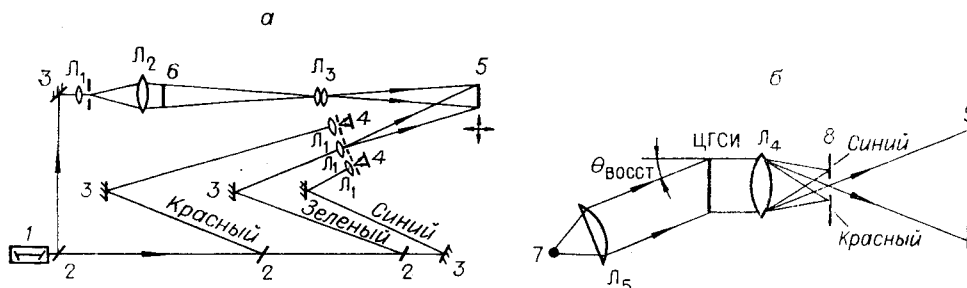


Рис. 3. Схема записи (а) и восстановления (б) частотной ЦГСИ (зеленой компоненты спектра):

1 — лазер; 2 — светоделитель; 3 — зеркало; 4 — непрозрачный экран; 5 — регистрирующая среда; 6 — зеленый транспарант; Л₁ — короткофокусный объектив; Л₂ — освещающий объектив; Л₃, Л₄ — проекционный микрообъектив; Л₅ — конденсорная линза; 7 — лампа накаливания; 8 — пространственный фильтр; 9 — зеленое изображение.

Пространственный фильтр 8 в виде узкой щели, помещаемый в фокальной плоскости объектива Л₄, воздействует на спектральный состав света в изображении и не пропускает в изображение другие дифрагировавшие спектральные компоненты источника света.

Спектральная ширина первичных цветов $\Delta\lambda_i$, выделяемая фильтром,

$$\Delta\lambda_i = \lambda_i W (f \sin \theta_n)^{-1},$$

где λ_i — длина волны цветной компоненты изображения, W — ширина пространственного фильтра, f — фокусное расстояние проекционного объектива.

В работах [4, 10] ГЦСИ записывались в виде тонких рельефных голограмм на позитивном фоторезисте. Для записи использовался He-Cd-лазер. Рельефные голограммы удобно и дешево копировать методом тиснения на термопластике. В работе [11] предложена иная методика записи с интерференционным копированием. Голограммы-оригиналы записывались на чувствительных голографических фотопластинках в свете He-Ne-лазера, а затем перекопировались на фоторезист с помощью He-Cd-лазера.

ЦГСИ обладают важными достоинствами перед цветными фотографическими слайдами. Запись на бессеребряных средах (фоторезистах) позволяет отказаться от дефицитного серебра. Поверхностный рельеф, несущий информацию, легко переносится на металл для последующего массового копирования. Дешевый копирующий материал (термопластики типа поливинилхлорида, ацетатная целлюлоза и др.) и большая скорость тиснения (более 1 м/с) позволяют в несколько раз снизить стоимость копий ЦГСИ по сравнению со слайдами. Прозрачные фазовые копии ЦГСИ на термопластике допускают большие световые нагрузки, не выцветают. Однако промышленное освоение ЦГСИ для миниатюризации изобразительной, научно-технической и других видов информации сдерживается хорошо развитой технологией и аппаратурой фотографического уменьшения с кратностями 10^{\times} — 30^{\times} .

Голограммы сфокусированного изображения чувствительны к дефектам оптики, царапинам, пыли, требуют тщательной фокусировки при записи и восстановлении, а также обладают другими недостатками, присущими микрофильмам. Поэтому они, по-видимому, неперспективны для ультраминиатюризации документов. Эти задачи решаются голографией Фраунгофера.

Голограммы Фраунгофера представляют собой результаты интерференции пространственного спектра микрофильма с опорным пучком. Характерной особенностью таких спектров является большой перепад интенсивности между низкочастотными и высокочастотными компо-

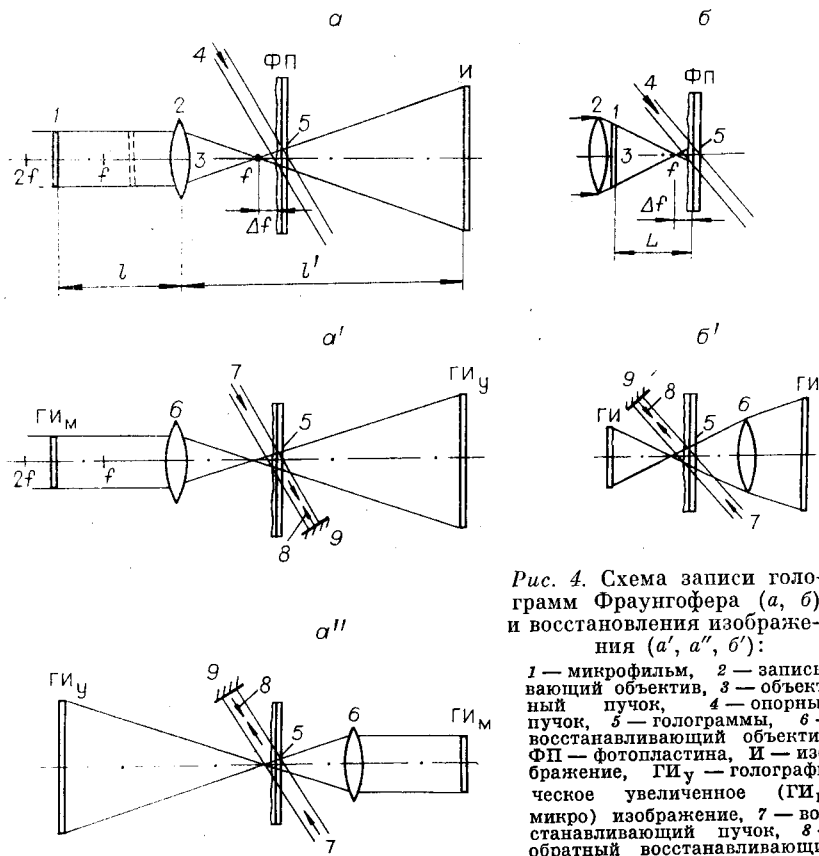


Рис. 4. Схема записи голограмм Фраунгофера (а, б) и восстановления изображения (а', а'', б')

1 — микрофильм, 2 — записывающий объектив, 3 — объектный пучок, 4 — опорный пучок, 5 — голограмма, 6 — восстанавливающий объектив, ФП — фотопластина, И — изображение, ГИ_у — голографическое увеличенное (ГИ_м — микро) изображение, 7 — восстанавливающий пучок, 8 — обратный восстанавливающий пучок, 9 — зеркало.

нентами. Для согласования диапазона интенсивности с возможностями регистрирующей среды линейную запись голограммы проводят, отступая от плоскости фокусировки спектра [6, 7, 12] или используя фазовые маски [13]. Размер голограммы Фраунгофера документа

$$d_r = \kappa 2\lambda_{\text{зап}} f_{\text{зап}} / b = 2\lambda_{\text{зап}} f_{\text{зап}} \nu_{0 \text{ max}}, \quad (1)$$

где κ — коэффициент читаемости, характеризующий оцениваемое человеком качество восстановленного изображения.

Видно, что d_r не зависит от количества букв в тексте, а определяется только шириной штриха букв b или максимальной пространственной частотой объекта $\nu_{0 \text{ max}}$, регистрируемой голограммой. Кроме того, из выражения (1) следует, что запись документа в голограмму Фраунгофера сопровождается потерей высших пространственных частот. Однако при правильном выборе условий голографирования потери невелики и качество восстановленного изображения достаточно высокое.

Микрофильм при записи может быть помещен перед записывающим объективом (рис. 4, а) или после него (рис. 4, б) в зависимости от идеологии построения воспроизводящих устройств. Преимущество размещения микрофильма перед объективом на расстоянии $f_{\text{зап}} < l < 2f_{\text{зап}}$ состоит в том, что увеличенное голографическое изображение (ГИ_у) восстанавливается без участия объектива (см. рис. 4, а'). Это упрощает конструкцию читального аппарата [14, 15]. Масштаб увеличения изображения

$$B = f_{\text{зап}} / (l - f_{\text{зап}}). \quad (2)$$

Голограмма восстанавливает увеличенное изображение микрофильма без объектива и в случае, когда при записи $l < f_{\text{зап}}$. Для этого восстанов-

ливающий пучок подается на голограмму под углом $\theta_v = \theta_{\text{зап}} + 180^\circ$, где $\theta_{\text{зап}}$ — угол падения опорного пучка. Абсолютное значение увеличения определяется из выражения (2).

Если воспроизводящее устройство предназначено для изготовления фотографических микрокопий документа, тогда целесообразнее применить схемы записи с размещением микрофильма за объективом (см. рис. 4, б). Изображение в размере микрофильма восстанавливается без нулевой порядок дифракции прямого пучка (θ'_v), отраженный на голограмму зеркалом* (см. рис. 4, а', а'', б'). Такая возможность реализована в читально-копировальном аппарате «Фотон-2» [15].

Информационные характеристики голографической ступени миниатюризации. Кратность голографической миниатюризации K_r , емкость голограммы M_r , плотность записи ρ_r характеризуют возможности голографического метода уплотнения информации.

В работе [16] показано, что для голограмм Фраунгофера K_r , M_r и ρ_r описываются выражениями:

$$M_{ГЗ} = \frac{a}{1+a^2} \frac{1}{4\gamma\kappa^2} \left(\frac{d_r}{\lambda_{\text{зап}} F_{\text{зап}}} \right)^2, \text{ букв} \quad (3)$$

$$M_{ГП} = M_{ГЗ} \left(1 - \frac{d_r}{D_{\text{зап}}} \frac{1+B}{B} \right)^2, \text{ букв} \quad (4)$$

$$\rho_{ГЗ} = \frac{4M_r}{\pi d_r^2} = \frac{a}{1+a^2} \frac{1}{\gamma\kappa^2 \pi} \left(\frac{1}{\lambda_{\text{зап}} F_{\text{зап}}} \right)^2, \text{ букв/мм}^2 \quad (5)$$

$$\rho_{ГП} = \rho_{ГЗ} \left(1 - \frac{2\lambda_{\text{зап}} F_{\text{зап}}}{b} \kappa \frac{1+B}{B} \right)^2, \text{ букв/мм}^2 \quad (6)$$

$$K_{ГЗ} = \frac{D_m}{d_r} = \frac{b}{2\lambda_{\text{зап}} F_{\text{зап}} \kappa} = \frac{D_{\text{зап}}}{2\lambda_{\text{зап}} F_{\text{зап}} \kappa} \left(\frac{1}{1+a^2} \frac{1}{\gamma M_{ГЗ}} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

$$K_{ГП} = K_{ГЗ} - (1+B)B^{-1}, \quad (8)$$

где a — отношение высоты к ширине микрофильма, γ — коэффициент заполнения страницы ($\gamma = P_x P_y b^{-2}$; P_x и P_y — периоды букв и строк соответственно), $F_{\text{зап}}$ — апертурное число объектива ($F_{\text{зап}} = f_{\text{зап}}/D_{\text{зап}}$), а D_m — диагональ микрофильма. Буквами «п» и «з» обозначены схемы записи: «п» — микрофильм перед объективом, «з» — за объективом.

Из выражений (3), (4) следует, что для записи большего количества информации размер голограммы должен быть увеличен. Вместе с тем в схеме с микрофильмом перед объективом зависимость $M_{ГП} = f(d_r)$ может иметь спадающий участок. Максимум кривой наступает при

$$d_r = 0,5 D_{\text{зап}} B (1+B)^{-1}.$$

Если $B \geq 10$, то для достижения максимальной емкости диаметр голограммы должен быть увеличен до половины диаметра записываемого объектива. Кроме того, из выражений (3), (4) видно, что $M_{ГЗ} > M_{ГП}$.

* Использование нулевого пучка для восстановления микроизображения предложено В. А. Ваниным.

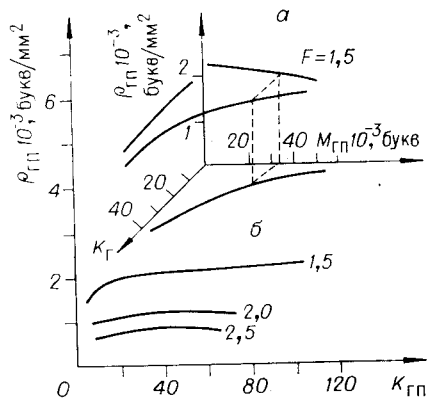


Рис. 5. Параметрические кривые: а — $\rho_{гп} - K_{гп} - M_{гп}$; б — $\rho_{гп} = f(K_{гп})$.

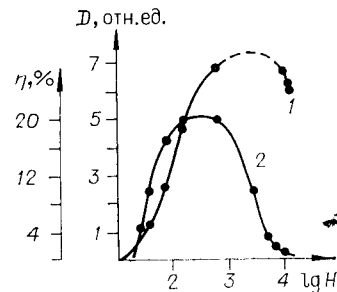


Рис. 6. Зависимость оптической плотности (1) и дифракционной эффективности (2) от логарифма экспозиции.

Плотность записи документа пропорциональна $(\lambda_{зап} F_{зап})^{-2}$. Предельное значение ρ_r ($F_{зап} = 1$ при $\lambda_{зап} = 632,8$ нм и без учета шумовых ограничений) равно $7 \cdot 10^3$ букв/мм².

Для схемы с микрофильмом за объективом ρ_r не зависит от толщины штриха, т. е. одно и то же значение ρ_r достигается при голографировании «емкого» текста из мелких букв и текста с небольшим числом крупных букв.

Информационные характеристики K_r , M_r и ρ_r являются функциями одних и тех же параметров: b , $\lambda_{зап}$, $F_{зап}$, κ , a . Это позволяет получить пространственную параметрическую зависимость $\rho_r - M_r - K_r$ или плоские зависимости $\rho_r = f(M_r)$, $K_r = f(M_r)$, $\rho_r = f(K_r)$.

С их помощью можно:

а) определить предельные характеристики голографической ступени уменьшения существующих микрофильмов (кратность, плотность записи информации) по емкости и формату документа, параметрам шрифта и требуемой читаемости восстановленного изображения;

б) выбрать толщину штриха, заполнение и формат страницы для максимального уплотнения текста в голограмме при помощи имеющихся в распоряжении объектива и лазера и с учетом читаемости восстановленного изображения.

Рис. 5 иллюстрирует результаты расчета семейства кривых с помощью выражения (7) для $\gamma = 70$ (текст книги), $a = 1,5$, $\lambda_{зап} = 623,8$ нм, $\beta = 10$. Параметр кривых — апертурное число объектива $F_{зап}$. Пространственная кривая на рис. 5 получена для $F_{зап} = 1,5$.

Предельно достижимая плотность записи информации в голограмме в общем случае ограничивается не только дифракционными явлениями, но и шумами голограммы, не учитывавшимися при выводе выражений для K_r , M_r , ρ_r . В работе [16] показано, что отношение сигнал/фон достаточно высоко и изображение легко читается при плотности записи 10^4 букв/мм². Вместе с тем при миниатюризации реальных документов с помощью доступных объективов и наиболее коротковолновых лазеров, т. е. при $a = 1,5$, $\gamma_{min} = 50$, $\kappa = 1$, $F_{зап} = 1,5$ и $\lambda_{зап} = 448$ нм, плотность записи в голограмме не превышает $7 \cdot 10^3$ букв/мм².

Копирование голограмм. АС НТИ содержат в себе, кроме активно используемого рабочего фонда документов, еще страховую и архивный. Наличие нескольких фондов одинаковых документов требует тиражирования голограмм, которое выполняется двумя способами — многократной перезаписью или копированием. Запись голографических фондов — про-

цесс трудоемкий, более рационально их копирование. Наибольшее распространение получили интерференционный метод (ИМК) [17, 18] и копирование тиснением (ТМК) на термопластике [19].

Интерференционный метод копирования заключается в замене волнового фронта, сформированного реальным объектом, волновым фронтом, восстановленным голограммой объекта. В качестве опорной волны применяется нулевой пучок голограммы-оригинала [17] или внешний пучок [20]. Таким образом, в процессе ИМК, по существу, записывается новая голограмма. Однако перед повторным голографированием имеются следующие преимущества: простота схемы (при ИМК используется только один пучок); возможность копирования на неамортизированных столах; низкие требования к когерентности копирующего излучения; одновременное копирование большого числа голограмм, записанных на одной фотопластинке; копирование излучением любой длины волны, определяемой свойствами копирующего материала.

На качество интерференционной копии оказывает влияние тип голограммы-оригинала. Если голограмма тонкая, то качество копии зависит от зазора оригинал — копия [21, 22], который должен быть минимальным. Увеличение зазора вызывает расфокусировку изображения, восстанавливаемого копией, и уменьшение отношения сигнал/фон в нем. Оба эффекта устраняются при ИМК толстых голограмм, т. е. во многих практических случаях записи в фотографических эмульсиях.

Из-за низкого пропускания амплитудных голограмм интенсивность опорного пучка при копировании более чем в 15 раз превышает интенсивность объектного. В результате дифракционная эффективность копии меньше, чем оригинала. Пропускание фазовых голограмм более равномерно, и при копировании можно получать требуемые соотношения в пучках. Более высокий уровень шума в изображении (интермодуляционный и рассеянный свет) подавляется при записи в достаточно толстой регистрирующей среде. Поэтому толстые фазовые голограммы наиболее подходящи для ИМК.

Условия интерференционного копирования массива голограмм с документальной информацией изучались в работах [24, 25]. Качество копии зависит от экспозиции голограммы-оригинала. На рис. 6 изображены зависимости свойств оригинала (оптической плотности D_0 до отбеливания, дифракционной эффективности η после отбеливания) от экспозиции H . Анализ голограмм, записанных на различных участках кривой $D = f(\lg H)$, показал, что при соотношении интенсивностей опорного и объектного пучков 5:1 компромисс между дифракционной эффективностью и шумом в изображении достигается на спадающем участке кривой $D = f(\lg H)$, где $3,5 > D > 2,8$, а $\eta = 10-14\%$. Таким образом, экспозиция фазового оригинала, оптимальная для последующего копирования, в 50—100 раз превышает экспозицию для амплитудного пропускания, равного 0,5.

В работе [25] копировались массивы из 500 фазовых голограмм диаметром 2,0 мм. Анализ результатов копирования показал, что качество их копий высокое. Средняя дифракционная эффективность амплитудных копий составляла 0,7%, а фазовых — 8%. Копия массива, имевшего трещину, позволила восстановить изображения с тех голограмм, по которым прошел скол.

Копирование тиснением — второй метод, получивший распространение (в том числе для голограмм документов [26]), заключается в перенесении поверхностного рельефа голограммы-оригинала путем заливки его отвердевающей жидкостью [27] или тиснением на термопластике [28].

Достоинства тиснения на термопластике — высокая скорость копирования и дешевизна, так как не требуется экспонирования и химиче-

ской обработки копий. Благодаря беззернистым бессеребряным средам копии имеют высокое отношение сигнал/фон.

Технология тиснения поверхностного рельефа разработана фирмой RCA (США) в связи с намечавшимся выпуском бытовой системы «Голо-тайп» [19]. Процесс предусматривает изготовление промежуточной металлической копии рельефа оригинала, с которой ведется тиражирование копий на термопластик. Такой метод производителен, но необходимость изготовления металлической матрицы усложняет процесс.

Если не требуется большого тиража копий, то копирование можно проводить непосредственно с рельефной голограммы, обладающей достаточной для тиснения механической прочностью. Такой способ копирования разработан в работе [26]. Эксперименты показали, что фазовые фурье-голограммы, обработанные по методике [29], позволяют проводить 100-кратное копирование их поверхностного рельефа без заметного ухудшения качества оригинала и копии. Дифракционная эффективность тонкой фазовой копии на термопластике «Астралон» равнялась 0,3—1,0% (у толстого фазового оригинала $\eta = 15—20\%$). Тот же способ пригоден и для копирования френелевских голограмм.

Хранение и поиск голограмм. Современные крупные информационные центры насчитывают $10^7—10^8$ страниц документов и продолжают пополняться за счет новых поступлений. Если не принимать во внимание многократного наложения голограмм (не нашего пока широкого применения), то количество голограмм в хранилище равно количеству страниц оригиналов. При среднем размере голограммы 2 мм их общая площадь равна $1,6(10^2—10^3)$ м². Поиск на такой площади трудно реализуем, поэтому необходимо дробление фонда на массивы голограмм.

Требования к оптимальной организации голограмм в массиве — максимальное уплотнение информации в хранилище, считывание информации из любой голограммы массива в одно и то же место, выборка голограмм по адресу, минимальное время выборки, максимальная емкость массива, одновременное копирование всех голограмм массива, простота и надежность поиска. Удовлетворение этих требований достигается специальными схемами записи и копирования голограмм и быстродействующими устройствами поиска.

Запись массивов голограмм. Схемы записи приведены на рис. 7, а—в. Их отличительная черта в том, что при записи массива микрофильм не меняет своих координат по отношению к регистрирующей среде. Для записи голограмм на разные участки среды изменяют направление распространения пучка, освещающего микрофильм. В результате изображение из любой голограммы массива может быть восстановлено в одном и том же месте.

В схеме на рис. 7, а микрофильм М и фотопластинка ФП жестко скреплены с помощью держателя Р [30]. В процессе записи массива голограмм держатель перемещается по двум взаимно перпендикулярным направлениям. При этом пространственный спектр микрофильма фокусируется в узлах решетки с шагом P_r . Размер голограммы ограничивается диафрагмой Д. Сторона квадратной решетки [31]

$$D_r = 0,7 \left(\sqrt{D_{\text{зап}}^2 - H_M^2} - H_M \right),$$

где H_M — сторона квадратного микрофильма.

Число голограмм в массиве емкостью N равно $N = (D_r/\rho_r)^2$.

Того же эффекта добиваются синхронным перемещением объектива Л₁ и диафрагмы Д по отношению к неподвижному микрофильму и фотопластинке [32].

Для восстановления изображения опорный пучок Z направляют на голограмму под углом $\theta_v = \theta_{\text{зап}} + 180^\circ$.

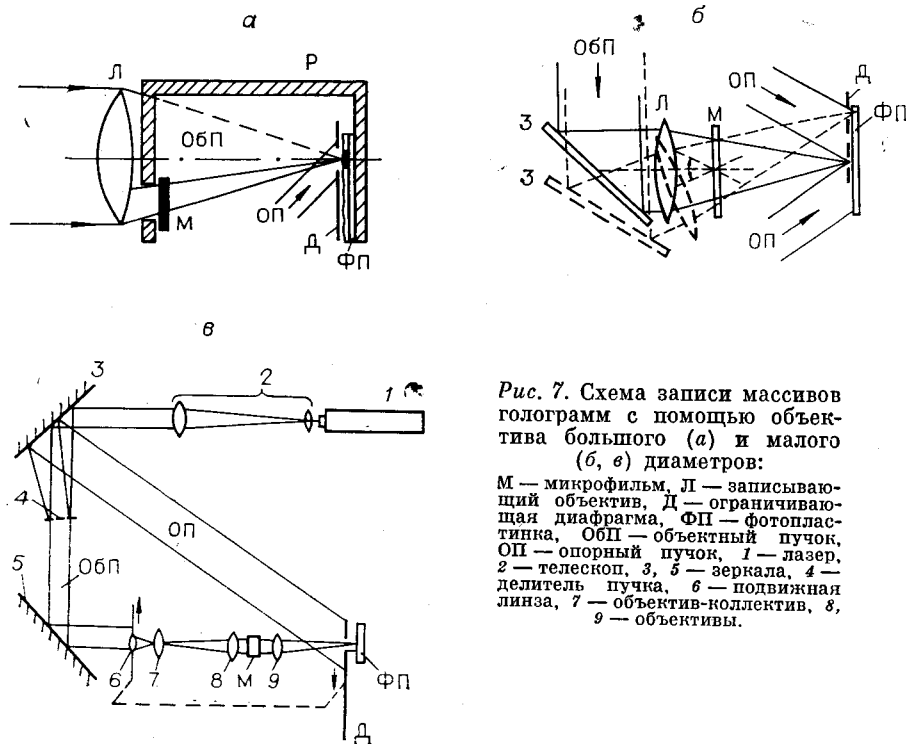


Рис. 7. Схема записи массивов голограмм с помощью объектива большого (а) и малого (б, в) диаметров:

М — микрофильм, Л — записывающий объектив, Д — ограничивающая диафрагма, ФП — фотопластинка, ОбП — объектный пучок, ОП — опорный пучок, 1 — лазер, 2 — телескоп, 3, 5 — зеркала, 4 — делитель пучка, 6 — подвижная линза, 7 — объектив-коллектив, 8, 9 — объективы.

Достоинство обеих схем в том, что записывающий объектив корректируется на устранение aberrаций только в точке фокусировки. Это облегчает расчет объектива. Вместе с тем требования к его светосиле получаются завышенными, так как диаметр должен быть в несколько раз больше диагонали микрофильма.

В оптимальных условиях $D_{\text{зап}} = 4,13 \sqrt{\lambda_{\text{зап}} f_{\text{зап}} \sqrt{NM_r}}$. Схемы для формирования массива голограмм с помощью объективов с уменьшенным диаметром показаны на рис. 7, б, в. В первой из них (см. рис. 7, б) сканирование фотопластинки объектным пучком осуществляется вращением объектива Л вокруг центра микрофильма и перемещением зеркала 3, направляющего освещающий пучок ОбП на объектив [33]. Недостаток схемы — уход плоскости спектра пространственных частот транспаранта из плоскости фотопластинки, что в конечном итоге снижает плотность записи информации в голограмме. Другой недостаток в том, что при наклонном падении освещающего пучка на микрофильм уменьшается интенсивность объектного пучка на голограмме. Это меняет контраст интерференционной картины и яркость восстановленного изображения.

В схеме, изображенной на рис. 7, в, основные элементы (фотопластинка, транспарант, записывающий объектив) не перемещаются [34]. Подвижными являются простые и легкие элементы. Объектный пучок падает на подвижную линзу 6. На входном зрачке объектива 7 последовательно формируются точечные источники. Задняя фокальная плоскость объектива совмещена с плоскостью микрофильма М. Поэтому расходящиеся пучки света, проходя через объектив 8, создают плоские волны с различным наклоном фазового фронта, освещающие один и тот же участок микрофильма. Объективы 8, 9 переносят точечные источники света из плоскости линзы 7 в плоскость фотопластинки. Диафрагма Д, ограничивающая размер голограмм, перемещается синхронно с подвижной линзой 6, но в противоположном направлении.

В схеме записи голограммы Фурье (см. рис. 4, а) микрофильм помещается в передней фокальной плоскости записывающего объектива: $l = f_{\text{зап}}$. Распределение амплитуд света в его задней фокальной плоскости в отличие от предыдущих схем точно совпадает с преобразованием Фурье амплитуд света на выходе микрофильма.

Голограмма Фурье-спектра микрофильма обладает свойством пространственной инвариантности: восстановленное изображение не смещается при продольном и поперечном перемещениях голограммы. Это позволяет снизить требования к точности работы механических узлов выходных устройств, повысить скорость выборки по сравнению с ИПС на фотографических микроносителях.

Устройство записи Фурье-голограмм наиболее простое, так как в нем перемещается только регистрирующая среда.

Пространственная частота голограммы и яркость пучка, освещающего транспарант, одинаковы как в центре, так и на периферии массива. Поэтому качество периферийных и центральных голограмм одинаково.

На стадии реконструкции необходим объектив, совершающий обратное преобразование Фурье информации, записанной на голограмме (Л на рис. 8). Масштаб изображения равен $f_{\text{в}}/f_{\text{зап}}$, где $f_{\text{в}}$ — фокусное расстояние восстанавливающего объектива. Емкость массива N_{Φ} — число голограмм, которое может быть восстановлено объективом без виньетирования изображения, — максимальна, если форма массива круглая. Диаметр массива

$$D = D_{\text{в}} - D_{\text{м}} l_{\text{в}} f_{\text{зап}}^{-1}, \quad (9)$$

где $l_{\text{в}}$ — расстояние от массива до обратного Фурье-объектива.

Для того чтобы восстанавливающий пучок попал в объектив, должно выполняться условие

$$l_{\text{в}} \geq D_{\text{в}} / (\text{tg } \theta_{\text{в}} + \text{tg } \alpha), \quad (10)$$

где $\text{tg } \alpha = D_{\text{м}} / 2 f_{\text{зап}}$. Тогда

$$N_{\Phi} = \frac{\pi D^2}{4 P_{\text{г}}^2} = \pi \left[\frac{D_{\text{в}} \text{tg } \theta_{\text{в}} - \text{tg } \alpha}{2 P_{\text{г}} \text{tg } \theta_{\text{в}} + \text{tg } \alpha} \right]^2. \quad (11)$$

Хотя выражения (9)—(11) пригодны строго для восстановления с тонкой линзой, экспериментальная проверка ряда объективов показала достаточное соответствие между расчетом и экспериментом.

Как недостаток схемы Фурье можно отметить поперечное смещение изображения Δ при продольном сдвиге микрофильма d от передней фокальной плоскости [34]:

$$\Delta = (d \rho_{\text{г}} n f_{\text{в}}) / [f_{\text{зап}} (f_{\text{зап}} + 2d) - f_{\text{в}} d],$$

где n — число голограмм в строке (или в столбце).

Практически не трудно выдержать расстояние микрофильм — объектив с точностью 0,1—0,05 мм. Тогда в типичных условиях ($f_{\text{зап}} = 50$ мм; $f_{\text{в}} = 150$ мм; $n = 30$; $P_{\text{г}} = 3,0$ мм) $\Delta = 0,5—0,27$ мм.

При считывании изображения глазом или регистратором для типа фотопленки и мишени передающей трубки такие сдвиги изображения не имеют значения.

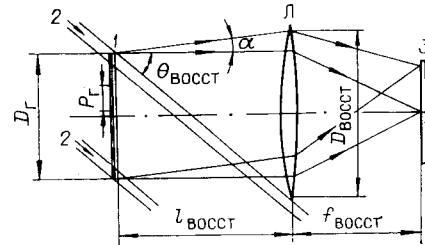


Рис. 8. Восстановление изображения с Фурье-голограмм:

1 — массив голограмм, 2 — восстанавливающий пучок, 3 — изображение, Л — линза, $l_{\text{в}} \approx f_{\text{в}}$.

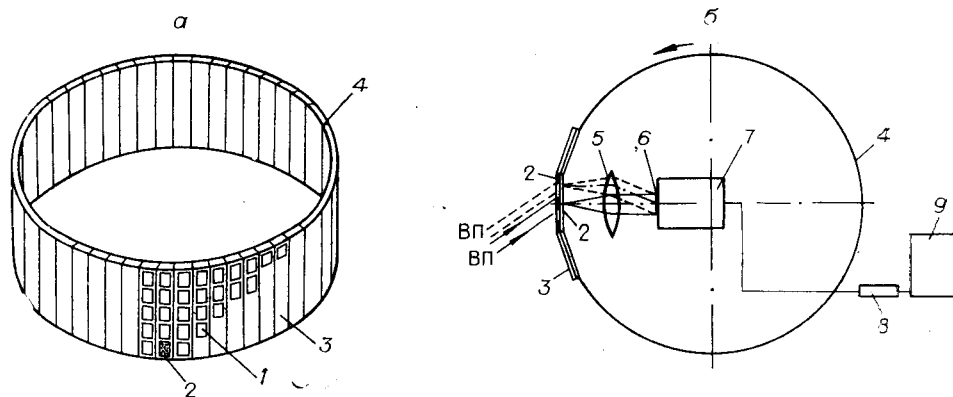


Рис. 9. Архив малой емкости

(а — схематическое изображение, б — считывание информации): ВП — восстанавливающий пучок, 1 — массив голограмм, 2 — голограмма, 3 — пластина, 4 — цилиндр, 5 — объектив, 6 — изображение, 7 — передающая камера, 8 — канал связи, 9 — приемное устройство.

Однако в ГЗУ с двоичной информацией, для считывания которой используются дискретные фотоприемники, применение схемы Фурье сопряжено с трудностями достижения и сохранения малых значений Δ в процессе записи массива.

Архивы голограмм. Емкость массива документальных фурье-голограмм, записываемых и считываемых доступными объективами, не превышает нескольких десятков или сотен голограмм. Проблема существенного увеличения емкости массива не решается и при наличии уникальных объективов с большой апертурой D_n . В этом случае предельное значение N ограничивается допустимым размером восстановленного изображения, который пропорционален отношению $f_v/f_{зап}$. Для объективов с малым f/D , наиболее подходящих для восстановления фурье-голограмм, увеличение их апертуры неизбежно сопровождается ростом фокусного расстояния.

Аналогичные результаты имеют место и для других схем записи массивов, приведенных на рис. 7.

Таким образом, фонд из 10^3 — 10^8 голограмм должен быть размещен на 10^1 — 10^6 массивах, организованных в архив.

На рис. 9, а изображена конструкция архива малой емкости ($n \cdot 10^4$ голограмм). Архив представляет собой цилиндр, на боковой поверхности которого укреплены пластины с массивами голограмм. Поиск пластин осуществляется за счет вращения, а поиск массива — за счет вертикального перемещения архива. Для выборки голограмм в массиве используется двухкоординатный дефлектор.

Архив емкостью $3 \cdot 10^4$ голограмм ($d_r = 2,0$ мм, $r_r = 2,5$ мм) имеет диаметр 550 мм и высоту 115 мм. На каждой из 70 пластин размещено по пять массивов размером 25×25 мм. Емкость пластины 430 голограмм. Голограммы записывались с помощью объектива «Юпитер-3»; обратное преобразование Фурье на стадии восстановления осуществляется объективом «Гелиос-40». Этот объектив и видикон ЛИ-418 для считывания изображения размещаются внутри архива. Лазер и дефлектор находятся с внешней стороны (см. рис. 9, б).

В архиве средней емкости необходимо более рациональное использование объема хранения, короткое поступательное перемещение и модульный принцип наращивания емкости. Эти вопросы решаются в архиве карусельного типа (рис. 10).

Здесь массивы голограмм расположены вплотную друг к другу. Их поиск осуществляется путем вращения архива. Далее требуемый массив

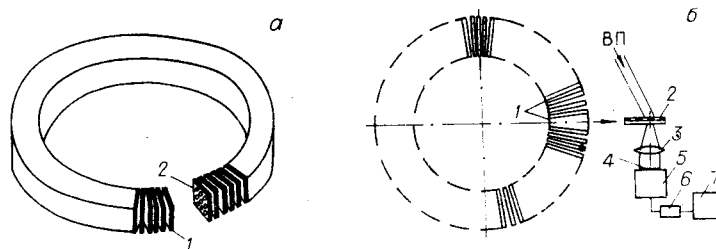


Рис. 10. Архив средней емкости
(а — схематическое изображение, б — считывание информации): ВП —
восстанавливающий пучок, 1 — массив голограмм, 2 — голограмма, 3 —
объектив, 4 — изображение, 5 — передающая камера, 6 — канал связи,
7 — приемное устройство.

выталкивается в зону считывания, сканируемую лазерным пучком с помощью двухкоординатного дефлектора.

Архив из $2 \cdot 10^5$ голограмм диаметром 3 мм (например, патентов) размещается на 700 фотопластинках размером 60×60 мм. Запись голограмм He-Ne-лазером проводится объективом «Гелиос-40». Для восстановления используется тонкая афокальная линза с фокусным расстоянием 120 мм и апертурным числом 1,5. При толщине фотопластинок 2,0 мм и зазоре между ними 0,5 мм внутренний диаметр карусели равен 700 мм.

Как известно, увеличение емкости хранилища влечет за собой повышение времени поиска информации. Поэтому наращивание емкости архива целесообразно проводить по модульному принципу, сохраняя при каждом архиве-модуле свою систему поиска и считывания. Это позволяет увеличивать емкость хранилища и сохранять неизменным время выдачи информации.

Голографические информационные устройства. Известны многие применения голографических методов в информатике [1, 2, 12, 14, 15, 28, 35—37].

По-видимому, первым было устройство PHEDRE [38], созданное для банков, библиотек и органов административного управления. Особенность устройства — в сочетании дискретного накопления голограмм на фотопластинке с записью в объеме эмульсии. Можно предположить, что количество информации, записывавшейся в каждую из наложенных голограмм, было сравнительно невелико, что позволило получать приемлемое качество изображения.

На квадратной фотопластинке с размером стороны 7 мм записывалось 50—60 голограмм. Архив организовывался путем закрепления пластинок на квадратной плате или диске. На диске диаметром 400 мм помещается 10^3 пластинок, т. е. $6 \cdot 10^4$ страниц.

Выборка голограммы в архиве начинается с поиска соответствующей пластины. По команде с пульта управления электронная система выдает сигналы на механизмы поворота и поступательного перемещения диска. В результате нужная пластинка вводится в область, сканируемую лазерным пучком. Угол падения пучка на голограмму задается вращающейся призмой, управляемой электронным ЗУ. Восстановленное изображение с помощью объектива проецируется на мишень передающей телевизионной трубки и визуализируется на экране кинескопа. Время выборки документа в архиве из $5 \cdot 10^4$ голограмм составляет 1 с. Время поиска в архиве из нескольких миллионов голограмм достигает 10 с в связи с необходимостью смены дисков.

В СССР систематические работы по голографическим информационным устройствам ведутся с 1970 г. Принципы работы, конструкции и характеристики разработанных устройств описаны в [2, 14, 15, 39—41].

В устройстве голографирования микрофильмов «Мигол-1» используется схема с размещением микрофильма перед записывающим объективом между фокусным и двойным фокусным расстояниями. Используется плоский опорный пучок с целью применения на стадии восстановления нерасширенного пучка лазера. Это исключает aberrации изображения. Технические характеристики: размер голограммы от 1 до 4 мм; кратность экспонирования на платформе. Технические характеристики: количество голограмм в массиве до 3000 шт., диаметр голограмм 1—4 мм, размеры подмассива 90 × 120 мм, жидкокристаллического экрана — 170 × 220 мм, микроизображения — 24 × 36 мм*.

Из качественных массивов организуется страховой фонд голограмм документов. Изготовление массивов голограмм для активного и архивного (редко используемые документы) фондов проводится интерференционным копированием страхового фонда на устройстве «Голокопир-1» [42].

Запросы абонентов АС НТИ обрабатываются ЭВМ, в которой хранятся формализованные описания и адреса документов в активном и архивном фондах голограмм. Выход ЭВМ сопряжен с обоими фондами.

Процесс обслуживания предусматривает выдачу абоненту АС НТИ интересующих его документов дистанционно по телевизионным каналам связи, а также в виде микроголограмм или фотомикрокопий, что позволяет создавать на местах компактные фонды голографических микроносителей и пополнять фонды фотографических микрокопий документов. Поскольку фонд документов в АС НТИ хранится в виде микроголограмм, при запросе микрофотографической копии необходим перевод документа из голографической в фотографическую микроформу. Перезапись осуществляется восстановлением изображения и регистрацией его на фотопленке.

С этой целью используются два устройства: упоминавшийся аппарат «Фотон-2», на котором удобно изготавливать единичные фотомикрокопии документов, и устройство «Квант-1» [41] для бесконтактной перезаписи больших количеств микроголограмм. Оптическая схема восстановления микроизображения в «Кванте-1» аналогична схеме голографирования микрофильма с той разницей, что восстанавливающий пучок освещает голограмму под углом $\theta_{\text{зап}} + 180^\circ$. Дифрагированный на голограмме свет собирается объективом, строящим микроизображение. Для контроля работы устройства предусмотрено восстановление увеличенного изображения, визуализируемого на диффузном экране. При работе с автоматизированным архивом поиск массивов будет вести ЭВМ, сопряженная с архивом и «Квантом-1». Требуемый массив подается в устройство перезаписи без участия человека. Технические характеристики: скорость перемещения массива голограмм 4 мм/с, время экспонирования микроизображения 1/50—1/500 с, скорость перемотки пленки 70 мм/с, число голограмм в массиве до 3000 шт., размер голограммы 1—4 мм, массива — 90 × 120 мм, микроизображения — 20 × 30 и 10 × 15 мм.

Устройства «Мигол-1», «Квант-1», «Фотон-2», «Голокопир-1» позволяют реализовать голографический второй контур информационно-поисковой системы.

* Размер микроизображения зависит от размера микрофильма, использованного при записи голограммы.

Интересная для записи, хранения и выдачи текстовой, полутоновой и картографической информации система описана в работе [43]. Ее особенностями являются представление информации в виде, читаемом человеком и машиной, на одном и том же носителе; использование синтетической, а не интерференционной голограммы; миниатюризация документов с помощью лазерного сканирующего устройства. Система работает в трех режимах. В первом из них 60 страниц текста записываются с $20\times$ уменьшением на стандартной микрофиге (104×149 мм). На свободном поле, предназначенном для заголовка, та же информация, но в дискретной форме записывается в виде линейных синтетических голограмм. Комбинированная запись позволяет работать с документами оператору и машине.

Для хранения карт и полутоновых изображений (второй вид работы), обладающих повышенной информативностью, голограммы записываются на рабочем поле микрофиги. Число голограмм уменьшено до 36 шт.

В третьем режиме документ сначала переводится в дискретную форму, а затем записывается на микрофиге только в виде синтетических голограмм. На одной микрофиге могут храниться $(2-3) 10^7$ бит. Голографическая запись на микрофиге цветных карт в дискретной форме дает возможность хранить эту информацию с высокой плотностью записи и получать высококачественные изображения.

Информационные средства с голограммами сфокусированного изображения представлены читальным аппаратом [4] и самолетным индикатором навигационной обстановки [10]. Читальный аппарат для ЦГСИ дает 15-кратное увеличение. Сравнительно низкая кратность объясняется стремлением упростить конденсор и снизить требования к допускам механизма фокусировки. Голографическая микрофига содержит 40 голограмм размером 10×14 мм. Источником света служит кварцевая галогенная лампа мощностью 150 Вт. Минимальная ширина щели пространственного фильтра 1,5 мм. Увеличение щели ухудшает выделение цветов из спектра источника. Если щель открыта полностью, то на экране образуется черно-белое изображение.

ВЫВОДЫ

1. Возможна голографическая миниатюризация оригинала документа на бумаге (безлинзовый способ) и его фотографической микрокопии на пленке (с использованием объектива). Кратность уменьшения, достигаемая первым способом, равна $35-70\times$. Результирующая кратность по второму способу достигает $200-300\times$.

2. Плотность записи информации, емкость голограммы и кратность уменьшения зависят от одинаковых параметров. Параметрические кривые $\rho_r-M_r-K_r$ позволяют оценить предельные характеристики голографической ступени миниатюризации существующих микрофильмов или выбрать толщину штриха, заполнение и формат страницы для наивысшего уплотнения информации в голограмме.

3. Для формирования различного рода фондов голограмм целесообразнее применять их копирование, а не многократную перезапись. Копирование любых типов голограмм возможно интерференционным методом, а голограмм с поверхностным рельефом — методом тиснения.

4. Функционирование реализованных голографических средств и информационно-поисковых систем на их основе выявило ряд существенных преимуществ перед аналогами на фотографических микроносителях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагин Л. Н. Голографические информационные устройства.— Электрон. пром-сть, 1973, № 5.
2. Вагин Л. Н., Герус В. Л., Филатов А. М. Голографические средства информационной техники.— НТИ, сер. 1, 1978, № 6.
3. Бродолин Л. И., Вагин Л. Н., Кальмансон В. А., Кан А. З. Проблемы создания средств хранения, поиска и воспроизведения больших массивов документальной информации с использованием методов голографии и растровой фотографии.— НТИ, сер. 1, 1975, № 9.
4. Gale M. T., Knop K., Russell J. P. Color-Encoded Focused-Image Holograms for Micropublishing.— J. of Micrographics, 1975, vol. 8, N 5.
5. Вагин Л. Н., Михайлов И. А. Одноступенчатая голографическая миниатюризация документов с высокими кратностями уменьшения.— ЖНПФФК, 1976, № 2.
6. Mc. Mahon D. H. Holographic Ultrafiche.— Appl. Opt., 1972, vol. 11, N 4.
7. Вагин Л. Н., Арсеньева Т. М., Назарова Л. Г., Ванин В. А. Голографическая миниатюризация научно-технических документов.— Опт. и спектр., 1975, т. 38, № 5.
8. Gale M. T., Knop K. Color-Encoded Focused Image Holograms.— Appl. Opt., 1976, vol. 15, N 9.
9. Gale M. T., Knop K., Russell J. P. A Color Micro-Storage and Display System Using Focused Image Holograms.— Optics and Laser Technol., 1975, vol. 7, N 5.
10. Clay V. R., Gore D. A. Holographic Moving Map. Display.— Opt. Eng., 1974, vol. 13, N 5.
11. Вагин Л. Н., Михайлов И. А., Ершов А. Ю. Цветные голограммы сфокусированного изображения.— ЖНПФФК, 1979, № 6.
12. Bestenreiner F., Greiss U., Weiershauser W. Alphanumeric Storage Capacity of Defocused Fourier Hologram and Fourier Hologram Matrix.— Photogr. Sci. and Eng., 1972, vol. 16, N 1.
13. Takeda Y., Oshida Y., Miyamura Y. Random Phase Shifters for Fourier Transformed Holograms.— Appl. Opt., 1972, vol. 11, N 4.
14. Вагин Л. Н., Михайлов И. А., Филатов А. М. Голографический читальный аппарат.— ОМП, 1973, № 12.
15. Вагин Л. Н., Филатов А. М., Ершов А. Ю., Румянцев В. А. Голографический читально-копировальный аппарат «Фотон-2».— ОМП, 1978, № 11.
16. Вагин Л. Н. Информационные характеристики голографической ступени миниатюризации документов.— Автометрия, 1979, № 1.
17. Brumm D. V. Double Images in Copy Holograms.— Appl. Opt., 1967, vol. 6, N 3.
18. Landry M. J. The Effect of Two Hologram-Copying Parameters on the Quality of Copies.— Appl. Opt., 1967, vol. 6, N 11.
19. Bartolini R., Hannon W., Karlsons D., Lurie M. Embossed Hologram Motion Pictures for Television Playback.— Appl. Opt., 1970, vol. 9, p. 2283.
20. Kurz C. N. Copying Reflection Holograms.— J. Opt. Soc. Am., 1968, vol. 58, N 6.
21. Sherman G. C. Hologram Copying by Gabor Holography of Transparencies.— Appl. Opt., 1967, vol. 6, p. 1749.
22. Nassenstein H. Kopieren von Bildebenen-Hologrammen Mit Weisssem Licht.— Phys. Lett., 1968, vol. 26 A, N 6.
23. Upatnieks J., Leonard C. Efficiency and Image Contrast of Dielectric Holograms.— J. Opt. Soc. Am., 1970, vol. 60, N 3.
24. Ванин В. А., Вагин Л. Н. Копирование голограмм.— В кн.: Материалы VII Всесоюз. школы. Л., 1975.
25. Ванин В. А., Вагин Л. Н. Интерференционное копирование микроголограмм.— Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 1975, т. 6, с. 416—422.
26. Вагин Л. Н., Штанько А. Е. Копирование голограмм методом тиснения на термопластике.— Опт. и спектр., 1974, т. 36, с. 1016—1018.
27. Бейнарович Л. Н., Ларионов Н. П., Лукин А. В., Мустафин К. С. Получение высококачественных копий голограмм.— Опт. и спектр., 1971, т. 30, № 2.
28. Hannon W. J., Flory R. E., Lurie M., Ryan R. J. Holo-Tape: a Low-Cost Prerecorded Television System Using Holographic Storage.— J. of SMPTE, 1973, vol. 82, N 11.
29. Pennington K. S., Harper J. S. Techniques for Producing Low-Noise Improved Efficiency Holograms.— Appl. Opt., 1970, vol. 9, p. 1643.
30. Reid D. C. J., Waterworth P. Extrait d'Applications de l'Holographie.— In: Compt. Rend. du Symposium Internat. Besancon, Juillet, 1970.
31. Микаэлян А. Л., Бобринев В. И. Голографические системы памяти (обзор).— Радиотехника и электроника, 1974, № 5.
32. La Macchia J. T. Optical Memories: a Progress Report.— Laser Focus, 1970, p. 35—39.
33. Eschler H. et al. Labormuster eines Holographischen Festwertspeichers.— Optik, 1973. Bd 37, H. 5.
34. Гибин И. С., Пен Е. Ф., Твердохлеб Н. Е. Устройство для записи матриц голограмм.— Автометрия, 1973, № 5.
35. Kouyama J., Sumi M. Whole Aspects of Optical Information Retrieval System: PANDORA.— Rev. Electric. Comm. Lab., 1975, vol. 23, N 3—4.

36. Гибин И. С., Гофман М. А., Кибирев С. Ф., Твердохлеб П. Е. Исследование одного варианта голограммной признаковой памяти.— Автометрия, 1976, № 6.
37. Neil N., Krewson U. A. Processor Utilising a Holographic Array and a Content Addressable Storage Unit for High Speed Searching.— Pat. USA N 3810108
38. Bolusset S., Treheux M. PHEDRE — Une Application de l'Holographie.— La Rev. Polytechn. 1973 pp 4195 4197 4199 4205
формы документов «Квант-1».— ОМП, 1978, № 9.
42. Ванин В. А. Устройство для копирования голограмм «Голокопир-1».— Проспект ВДНХ. М.: ЦНИИЭлектроника, 1974.
43. Nelson R. H., Lugt Vander, Zech R. J. Holographic Data Storage and Retrieval (HRMR).— Opt. Eng., 1974, vol. 13, N 5.

Поступила в редакцию 17 января 1980 г.

УДК 681.39 : 681.3.07 : 621.378.9

П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ
(Новосибирск)

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МАССИВОВ ДАННЫХ

В работе [1] предложена простейшая система обработки данных (СОД) со структурой ГЗУ—ПСП, где ГЗУ — голографическое ЗУ со страничной организацией памяти, а ПСП — параллельный страничный процессор на основе фоточувствительной БИС [2, 3]. Система реализует поиск в массиве данных, хранящихся в ГЗУ. При каждом обращении к ГЗУ на оптический вход ПСП поступает страница данных, где она обрабатывается в соответствии с поисковым предписанием. На первой стадии обработки ПСП выполняет однотактную групповую операцию умножения матрицы (страница данных) на вектор-столбец (слово опроса), а на второй — поразрядную логическую обработку (операции И, ИЛИ, НЕ) вектора-столбца, являющегося результатом групповой операции.

Недостаток СОД ГЗУ — ПСП — выполнение в ПСП групповой операции умножения матрицы на вектор — приводит к тому, что размерность массива, подлежащего дальнейшей обработке, существенно понижается. Тем самым нарушается высокая степень параллелизма, свойственная СОД на стадиях хранения, выдачи и групповой обработки данных. Очевидно, что такого не произойдет, если в ПСП будет одновременно обрабатываться совокупность из N слов опроса, а групповая операция, реализуемая при этом, будет соответствовать умножению двух, трех или более матриц.

Однако на пути создания фоточувствительных БИС с более «мощной» групповой операцией лежат серьезные трудности, обусловленные планарностью технологии микроэлектронных структур и, как следствие, ограниченным количеством вводных-выводных и внутрисхемных соединений. В то же время указанных ограничений лишены оптические структуры. Так, в настоящее время известны, по меньшей мере, два матричных оптических преобразователя (МОП): с когерентным освещением,