

натные дефлекторы, используемые в ГЗУ, обладают одинаковой разрешающей способностью в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Поэтому разрешающая способность таких дефлекторов

$$N = \left( \frac{d}{\varepsilon \lambda} \Delta\theta \right)^2. \quad (3.3)$$

Быстродействие дефлектора определяется временем  $\tau_{\text{п}}$ , необходимым для переключения светового пучка из некоторой позиции в любую другую. Время  $\tau_{\text{п}}$  — время произвольного доступа к голограммам или к соответствующим страницам. Часто под быстродействием дефлектора понимают скорость переключения светового пучка  $v_{\text{п}}$ , которая измеряется числом отклонений в единицу времени. Очевидно, что  $v_{\text{п}} = 1/\tau_{\text{п}}$ .

Дефлекторы оценивают также по ряду других характеристик: эффективности, потребляемой мощности, стабильности отклонения и др. Наибольшее распространение, вследствие высоких требований, предъявляемых к быстродействию, разрешающей способности, стабильности отклонения и потребляемой мощности, нашли акустооптические и электрооптические устройства [7].

**Акустооптические дефлекторы (АОД).** Акустооптические отклоняющие устройства используют явление дифракции света на акустических волнах, распространяющихся в среде взаимодействия. Отклоняющая ячейка АОД (рис. 3.1) состоит из следующих основных элементов: светозвукопровода 1, в котором происходит акустооптическое взаимодействие, и электроакустического преобразователя 2 для возбуждения в среде акустических волн. В качестве материала для светозвукопровода используют кристаллы молибдата свинца  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\alpha$ -иодноватой кислоты  $\alpha - \text{HfO}_3$ , парателлурита  $\text{TeO}_2$ , галогенидов галлия КРС-5 и КРС-6 и др. Наиболее подходящими материалами для получения преобразователей оказались кристаллы ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ , иодата лития  $\text{LiIO}_3$  и  $\text{V}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ .

Предположим, что преобразователь возбуждает в среде плоскую акустическую волну, распространяющуюся в направлении оси  $Ox$  (рис. 3.1). Акустическая волна, распространяясь в среде, вызывает синусоидальное изменение показателя преломления среды. Это изменение приводит к образованию фазовой объемной дифракционной решетки, период которой равен длине акустической волны. Относительно падающего светового пучка эта решетка является практически неподвижной, так как скорость распространения акустической волны мала по сравнению со скоростью света. Для того чтобы падающий свет дифрагировал на этой решетке с максимальной эффективностью, его нужно направить под углом, определяемым из условия Брэгга:

$$2A \sin \theta_0 = \lambda, \quad (3.4)$$

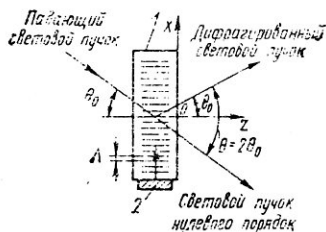


Рис. 3.1. Схема акустооптической отклоняющей ячейки

где  $\Lambda$ ,  $\lambda$  — длины акустической и световой волн в воздухе. Поскольку  $\lambda \ll \Lambda$ , это условие можно записать в виде

$$\theta_0 \approx \lambda / (2\Lambda). \quad (3.5)$$

Угол отклонения дифрагированного светового пучка

$$\theta_0 = 2\theta_0 \approx \lambda / \Lambda = \frac{\lambda}{v_a} \nu_a, \quad (3.6)$$

где  $\nu_a$  — акустическая частота;  $v_a$  — скорость распространения акустической волны. Если акустическую частоту менять в полосе частот шириной  $\Delta\nu_a$ , то угол отклонения дифрагированного пучка

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{v_a} \Delta\nu_a. \quad (3.7)$$

При этом угол падения входного светового пучка  $\theta_0$  определяется центральной частотой акустических колебаний  $\nu_{a0}$ , т. е.

$$\theta_0 \approx \frac{\lambda}{2v_a} \nu_{a0}. \quad (3.8)$$

Допустим, что  $\Delta\nu_a = 50$  МГц;  $n = 2$ ;  $v_a = 2 \cdot 10^5$  см/с и  $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-4}$  см. Подставив эти данные в формулу (3.7), получаем  $\Delta\theta \approx 6$  мрад. Для того чтобы такие малые угловые отклонения светового пучка преобразовать в необходимые линейные смещения, нужна линза с очень большим фокусным расстоянием ( $f \approx 10$  м). Поэтому конструируют специальные оптические системы (телескопы), позволяющие добиться требуемых линейных смещений при малых габаритах.

Определим разрешающую способность и быстродействие акустической отклоняющей ячейки. Согласно (3.2) с учетом (3.7)

$$N_x = \frac{d}{\epsilon v_a} \Delta\nu_a. \quad (3.9)$$

Принимая во внимание, что  $\tau = d/v_a$  — время, в течение которого акустическая волна распространяется на расстояние, равное диаметру входного светового пучка, соотношение (3.9) можно записать в виде

$$\frac{1}{\tau} N_x = C_a \Delta\nu_a; \quad C_a = d/(\epsilon D), \quad (3.10)$$

где  $D$  — диаметр отверстия диафрагмы, выделяющей центральную часть лазерного излучения. Это соотношение устанавливает связь между разрешающей способностью и быстродействием акустической отклоняющей ячейки. Из него следует, что при фиксированной  $\Delta\nu_a$  увеличения разрешающей способности можно добиться только за счет уменьшения быстродействия, и наоборот. Одновременное увеличение разрешающей способности и быстродействия возможно лишь при увеличении ширины полосы частот  $\Delta\nu_a$ .

Таким образом, параметр  $\Delta\nu_a$  является важной характеристикой акустооптической отклоняющей ячейки. Значение  $\Delta\nu_a$  ограничивается шириной полосы частот преобразователя, так как условие Брэгга удается выполнить путем применения специальных методов управления акустическим пучком [7]. Обычно  $\Delta\nu_a \approx 0,5 \nu_{a0}$ . Современная

технология позволяет получать преобразователи, способные обеспечить эффективное возбуждение акустических волн с центральной частотой 400—600 МГц. Следовательно, может быть достигнута ширина полосы частот до 300 МГц.

Оценим характеристики двухкоординатного АОД. Поскольку такой АОД состоит из двух идентичных отклоняющих ячеек, достаточно рассчитать разрешающую способность только одной из них. Пусть  $D = \sqrt{2}d$ . Тогда  $\epsilon = 2.1$ . Подставив эти данные в соотношение (3.10), найдем

$$\frac{1}{T} \lambda_x \approx 10^8 \text{ с}^{-1}. \quad (3.11)$$

Следовательно, с помощью АОД может быть достигнута адресация светового пучка в  $N = 100 \cdot 100$  позиций со временем переключения  $\tau_{\text{п}} \sim 1$  мкс. Для того чтобы получить дискретные значения смещения светового пучка, соответствующие адресам голограмм в плоскости накопителя, акустическая частота должна изменяться дискретными ступенями. Это осуществляется посредством синтезатора частоты, управляемого ЭВМ.

Для промышленной реализации таких АОД еще предстоит решить ряд проблем, связанных с эффективным возбуждением в среде акустических волн с частотой до 1 ГГц; поиском новых акустооптических материалов с высокой добротностью и малым коэффициентом акустического ослабления; совершенствованием методов управления акустическим пучком.

**Электрооптические дефлекторы (ЭОД).** Электрооптические отклоняющие устройства в отличие от акустооптических могут быть как аналогового, так и дискретного типа. Они имеют некоторые преимущества перед акустооптическими: малую инерционность, а следовательно, и более высокую скорость переключения светового пучка.

Типичным примером ЭОД аналогового типа является призмный дефлектор, в котором в качестве отклоняющего элемента использована призма из электрооптического материала, помещенная в электрическое поле (рис. 3.2). При изменении показателя преломления призмы путем изменения управляющего электрического поля происходит отклонение преломленного светового пучка. Большинство из известных электрооптических материалов обладает незначительным электрооптическим эффектом, поэтому требуются очень высокие управляющие напряжения (примерно 1 кВ) для отклонения светового пучка на 1 мрад. Таким образом, для получения достаточного углового диапазона отклонений  $\Delta\theta$  необходимы напряжения в несколько киловольт. Диапазон изменения углов отклонения преломленного пучка ограничивается также максимально возможным изменением показателя преломления призмы ( $\Delta n \approx 10^{-3}$ ). Разрешающую способность ЭОД аналогового типа определяют по формулам (3.2), как и для АОД. Диапазон угловых отклонений, получаемых с помощью призмных ЭОД, такой же, как и у АОД, поэтому их разрешающие способности примерно одинаковы. Быстродействие ЭОД зависит от тока, необходимо-

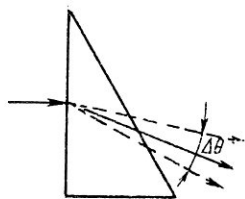


Рис. 3.2. Схема электрооптического призмного отклоняющего элемента

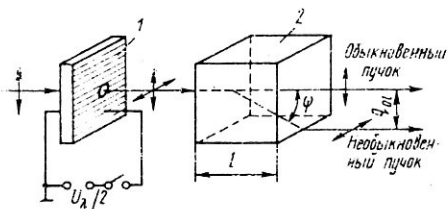


Рис. 3.3. Схема отклоняющей ячейки цифрового ЭОД

го для перезарядки паразитных емкостей  $C$  дефлектора при переключениях, т. е. мощности  $W$ , подводимой к устройствам управления:

$$\tau_{\text{п}} = 4CV, W. \quad (3.12)$$

Быстродействие ЭОД ограничивается мощностью, рассеиваемой в отклоняющем элементе. Для имеющихся электрооптических материалов оно составляет  $0,1-1$  мкс, т. е.  $10^6-10^7$  перекл/с.

Для работы в составе ГЗУ более подходящими являются ЭОД дискретного типа, которые называют *цифровыми дефлекторами*. Для них характерно отсутствие жесткой связи между быстродействием и разрешающей способностью, подобной (3.10), благодаря чему они могут сочетать высокое быстродействие с большой разрешающей способностью. Кроме того, в цифровых дефлекторах адресация светового пучка осуществляется традиционными методами, используемыми в цифровой вычислительной технике.

Рассмотрим принцип действия цифрового ЭОД. Основная отклоняющая ячейка цифрового ЭОД (рис. 3.3) состоит из электрооптического переключателя поляризации 1 и двоякопреломляющего элемента 2. В качестве электрооптического переключателя используют ячейки Поккельса и Керра. Двоякопреломляющим элементом служит кристалл кальцита или призма Волластона. Принцип действия отклоняющей ячейки заключается в следующем. На вход переключателя поступает линейно поляризованный лазерный пучок. Переключатель позволяет управлять направлением поляризации входного светового пучка и вводить его в двоякопреломляющий элемент в одной из двух взаимно ортогональных поляризаций. Переключение направления поляризации осуществляется путем подачи на переключатель полуволнового напряжения  $U_{\lambda/2}$ . Элемент ориентирован таким образом, что нормально падающий лазерный пучок для него является обыкновенным. Следовательно, в зависимости от того, какой из двух ортогональных видов поляризации задан переключателем, световой пучок на выходе двоякопреломляющего элемента будет занимать одно из двух возможных положений, соответствующих обыкновенному и необыкновенному

венному пучкам. Оба пучка выходят из элемента по направлению падающей волны, но один смещен относительно другого на расстояние

$$q_{nl} = l \operatorname{tg} \psi; \operatorname{tg} \psi = \frac{n_0^2 - n_l^2}{2n_0 n_l}, \quad (3.13)$$

где  $l$  — толщина элемента;  $n_0$ ,  $n_l$  — показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного пучков.

Рассмотренная отклоняющая ячейка представляет собой один каскад цифрового дефлектора. Если объединить в один блок  $M$  последовательно расположенных и одинаковым образом ориентированных каскадов, каждый из которых дает вдвое большее линейное смещение по сравнению с предыдущим, то получится одномерное отклоняющее устройство, способное адресовать световой пучок в одну из  $N = 2^M$  позиций на линии. При этом толщина двоякопреломляющего элемента  $m$ -го каскада

$$l_m = 2^{m-1} l_1; \quad m = \overline{1, M}. \quad (3.14)$$

Схема блока отклонения представлена на рис. 3.4. Двухкоординатный дефлектор состоит из двух последовательно расположенных одномерных блоков отклонения, каждый из которых производит отклонение в направлении, перпендикулярном другому. Высокая разрешающая способность достигается при использовании сфокусированного светового пучка. Линза  $L$ , фокусирующая световой пучок в выходной плоскости дефлектора, располагается между блоками  $X$ - и  $Y$ -отклонения (рис. 3.5).

Несмотря на простоту работы, цифровые ЭОД сложны в разработке. Причиной этого является сложность оптической схемы, которая накладывает жесткие требования к точности конструкции и свойствам

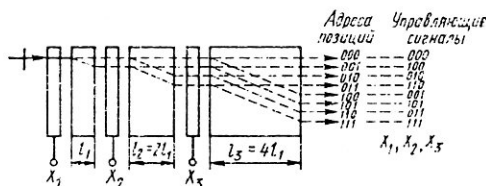


Рис. 3.4. Схема блока отклонения, состоящего из трех каскадов

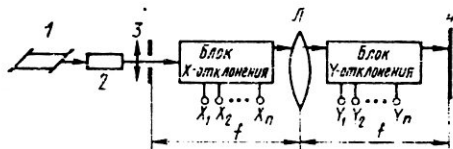


Рис. 3.5. Оптическая схема двухкоординатного цифрового ЭОД:

1 — лазер; 2 — поляризатор; 3 — апертурная диафрагма; 4 — выходная плоскость

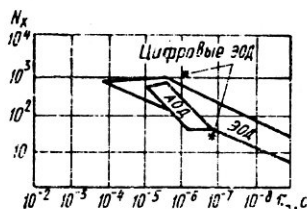


Рис. 3.6. Зависимости разрешающей способности  $N_x$  от времени переключения  $\tau_c$  для различных типов дефлекторов

используемых материалов, а также трудность осуществления рабочего режима с малой потребляемой мощностью. Кроме того, сложно получить электрооптические материалы, обладающие высокими оптическими качествами при достаточно больших площадях. Для создания электрооптических переключателей используют кристаллы KDP, DKDP,  $\text{LiNbO}_3$ . Для работы таких переключателей необходимы управляющие напряжения от нескольких сотен вольт ( $\text{LiNbO}_3$ ) до 7—8 кВ (KDP). В настоящее время исследуются новые материалы типа барий-стронциевого ниобата, способные работать при небольших управляющих напряжениях порядка нескольких десятков вольт.

Таким образом, наиболее перспективными с точки зрения применения в ГЗУ являются цифровые ЭОД. Тем не менее в настоящее время более широко используют АОД, что объясняется относительной простотой их практической реализации. На рис. 3.6 представлены зависимости разрешающей способности  $M_x$  от времени переключения  $\tau_{\text{п}}$  для существующих и проектируемых акустооптических электрических дефлекторов.

### § 3.3. Управляемые транспаранты

Управляемый транспарант (УТ) служит для пространственной модуляции светового пучка по амплитуде, фазе или поляризации. УТ в оптических системах находят широкое применение: ввод — вывод данных, кодирование и распознавание оптических сигналов, реализация логических операций, усиление яркости изображений, перестраиваемые фильтры. По способу управления модуляцией светового пучка различают электрически (ЭУТ) и оптически (ОУТ) управляемые транспаранты. Оба типа транспарантов могут осуществлять дискретную или аналоговую модуляцию светового пучка. В первом случае УТ должны обладать нелинейной характеристикой. УТ, предназначенные для преобразования информации в аналоговом виде, наоборот, должны иметь линейную зависимость изменения оптических свойств элемента.

УТ, используемый в ГЗУ, представляет собой цифровой пространственный модулятор матричного типа, управляемый электрическими сигналами; его называют устройством набора страниц (УНС).

УНС может быть выполнено в двух вариантах: 1) при построчной загрузке (по одному или по нескольким словам); 2) при поэлементной (побитной) загрузке. Электрическая схема управления состояниями элементов УНС первого типа может быть собрана по обычной схеме матричной выборки, основанной на принципе совпадений. Поэтому загрузку УНС этого типа производят последовательно. Рабочий материал для построения УНС должен удовлетворять трем основным требованиям: 1) иметь пороговую оптическую характеристику в зависимости от управляющего сигнала; 2) хранить заданное оптическое состояние на время набора всей страницы и последующей экспозиции

региструющей среды; 3) обладать свойством стабильности оптических состояний при многократном воздействии импульсов полувыборки.

Для управления УНС второго типа необходимо подвести индивидуальный привод к каждому его элементу от соответствующего элемента буферной памяти, который конструктивно может быть объединен с УНС. В этом случае каждый элемент УНС управляется независимо от других и действует как световой модулятор. Поэтому рабочий материал, используемый для построения УНС данного типа, может не обладать памятью. Также не требуется обеспечения устойчивости оптических состояний материала по отношению к полуселектирующим импульсам. Данные могут вводиться как последовательно, так и параллельно. В последнем случае достигается значительное повышение быстродействия. Для оптической страницы, сформированной УНС, характерна более высокая контрастность. Однако практическая реализация таких УНС при большой емкости и высокой плотности расположения элементов затруднена ввиду сложности организации электронных схем управления. Поэтому при практической разработке УНС в большинстве случаев предпочтение отдается первому типу УНС, несмотря на его сравнительно малое быстродействие.

Анализ ГОЗУ показывает, что УНС, предназначенные для работы в его составе, должны обладать следующими характеристиками:

1) высокой скоростью набора данных в страницу. Время полной загрузки УНС емкостью  $\sim 10^4$  бит (например, УНС, содержащее  $128 \times 128$  элементов)  $\tau_{\text{нц}} \leq 0,1$  мс. В перспективе это время желательно сократить до 1 мкс и более;

2) шаг расположения элементов  $q_1 \sim 0,2-0,3$  мм при диаметре рабочей апертуры отдельного элемента  $\sim 0,1$  мм;

3) емкость  $10^4$  бит (например,  $128 \times 128$ ), что согласуется с оптимальным объемом страницы, обеспечивающим эффективную плотность хранения информации, близкую к предельной;

4) контраст входной страницы, сформированной УНС,  $\chi \geq 100:1$ ;

5) неоднородность оптических свойств элементов УНС не должна превышать 10 %;

6) оптическая эффективность элементов  $\eta_c \geq 50$  %;

7) срок службы должен составлять 2-3 года; при этом УНС должно допускать ( $\sim 10^6$ ) переключений без нарушения и изменения характеристик.

Существуют различные подходы к конструированию УНС, зависящие от используемых материалов и физических эффектов. Хотя было исследовано множество материалов, однако модели УНС с удовлетворительными характеристиками удалось построить лишь на PLZT-керамике и жидких кристаллах [7].

**УНС на PLZT-керамике.** PLZT-керамика - новый класс прозрачной сегнетоэлектрической керамики с сильно выраженными электрооптическими свойствами, зависящими от электрической поляризации материала. Изменение поляризации сопровождается изменением двулучепреломления материала. PLZT-керамика обладает и упругооп-

тическими свойствами, подобными электрооптическим. Создание механического напряжения вдоль определенного направления вызывает появление двулучепреломления.

Для пространственной модуляции света используют следующие основные эффекты, наблюдающиеся в PLZT-керамике, помещенной в электрическое поле: наведенное двулучепреломление (электрооптический эффект); динамическое рассеяние, краевой эффект и изменение толщины керамической пластинки (обратный пьезоэффект). Используя тот или иной эффект, на основе PLZT-керамики можно построить УНС, способные осуществлять пространственную модуляцию объектного пучка как по амплитуде, так и по фазе или поляризации.

Основным достоинством PLZT-керамики является возможность ее использования в режиме работы с запоминанием, основанным на гистерезисном характере зависимости поляризации  $P$  от напряжения управляющего электрического поля  $V_z$  (рис. 3.7, а). Обычно состояние с остаточной поляризацией принимается за двоичную единицу («1»), а деполяризованное ( $P = 0$ ) — за двоичный ноль («0»). Для переключения из одного состояния в другое требуются импульсы напряжения порядка 50—300 В длительностью 1—10 мкс. Переключение в заданное состояние целесообразно производить импульсами напряжения, показанными на рис. 3.7, б. В этом случае обеспечивается большая устойчивость нулевого состояния к импульсам полувыборки.

Рассмотрим принцип действия УНС на PLZT-керамике в режиме работы с деформационным смещением. Для работы в таком режиме УНС строят с использованием PLZT-пластинки в механически напряженном состоянии. Это позволяет создавать управляющее электрическое поле параллельно направлению распространения объектного пучка, что легко осуществляется с помощью прозрачных электродов, нанесенных на пластинку. Модулятор света такого УНС изображен на рис. 3.8. Принцип его действия

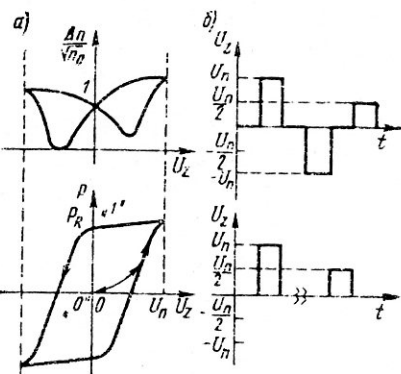


Рис. 3.7. Зависимость оптических свойств PLZT-керамики от управляющего напряжения

закljučается в следующем. Вектор механического напряжения, приложенного к пластинке, лежит в ее плоскости и коллинеарен оси  $x$ , вследствие чего оптическая ось в материале пластинки также направлена вдоль этой оси. Так как электрическое поле  $E = E_z k$ , приложенное между прозрачными электродами, нанесенными на ненапряженную PLZT-пластинку, поляризует ее и устанавливает направление оптической оси в материале вдоль оси  $z$ , то для механически напряженной пластинки направление оптической оси составит некоторые углы с осями  $x$  и  $z$  (рис. 3.8).



Если приложить электрическое поле  $E = -E_2 k$ , деполаризующее PLZT-пластинку, то ее оптическая ось вьюсь совместится с осью  $x$ . Изменение в двулучепреломлении пластинки  $\Delta n = \bar{n}_2 - \bar{n}_1 = (n_y - n_x)_2 - (n_y - n_x)_1$ , которое имеет место, представляет собой управляемый параметр, используемый для модуляции проходящего светового пучка.

Если описанный элемент поместить между скрещенными поляризаторами, то изменение в его двулучепреломлении преобразуется в изменение интенсивности света, прошедшего систему поляризаторов и модулятор света. Таким образом, каждый элемент УНС работает как электрооптический модулятор амплитуды проходящего светового пучка. Матрица таких элементов наносится на PLZT-пластинку с обеих сторон в виде системы параллельных полосок, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях. Адресация любого элемента УНС производится двумя полуселектирующими импульсами по принципу совпадений.

**УНС на жидких кристаллах.** Жидкие кристаллы (ЖК) обладают электрооптическими свойствами и являются почти совершенными модуляторами света, легко управляемыми электрическим полем. Особенностью тонких жидкокристаллических слоев является их способность изменять оптические свойства под действием низких рабочих напряжений (1—50 В) при малом потреблении мощности (1 мкВт/см<sup>2</sup>). Благодаря этому ЖК находят широкое применение в оптических системах. Известны три типа ЖК (нематические, холестерические и смектические), из которых для построения УНС наибольший интерес представляют нематические. Для пространственной модуляции света используют два электрически управляемых эффекта, наблюдающихся в ЖК: наведенное двулучепреломление и динамическое рассеяние. Процесс изменения оптических свойств слоя ЖК носит пороговый характер, что также является достоинством ЖК.

УНС на основе ЖК, использующее эффект динамического рассеяния, применяют для амплитудной модуляции как проходящего, так и отраженного светового пучка. Эффект динамического рассеивания заключается в следующем. В невозбужденном состоянии слой ЖК совершенно прозрачен. При создании электрического поля в ЖК про-

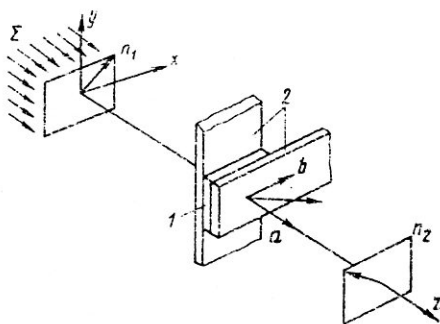


Рис. 3.8. Схема модулятора света на основе механически напряженной PLZT-пластинки: 1 — PLZT-пластинка, 2 — электроды; П<sub>1</sub>, П<sub>2</sub> — поляризаторы; Σ — объективный световой пучок; а — вектор, указывающий направление оптической оси в результате воздействия электрического поля; b — вектор, указывающий направление оптической оси, обусловленное механическим напряжением

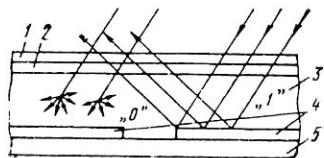


Рис. 3.9. Схема УНС на основе ЖК, модулирующего отраженный свет по амплитуде с использованием эффекта динамического рассеяния

исходят два процесса: 1) под действием электрического поля молекулы ориентируются параллельно либо перпендикулярно полю в зависимости от того, имеет ли ЖК положительную или отрицательную «диэлектрическую анизотропию»; 2) поток зарядов через слой ЖК нарушает ориентацию молекул, в результате чего возникает турбулентность, что, в свою очередь, вызывает рассеяние света вследствие пространственного изменения коэффициента преломления. При этом

происходит сильное ослабление интенсивности светового пучка в направлении его распространения, а также потеря его когерентности. По окончании действия электрического поля слой ЖК вновь приобретает исходную структуру и становится прозрачным. Длительность этого процесса измеряется миллисекундами. Если требуемое время экспонирования регистрирующей среды составляет доли миллисекунд, то достаточно естественной памяти ЖК-слоя. В противном случае каждый элемент жидкокристаллического УНС должен быть снабжен интегральной управляющей схемой с памятью.

Одно из возможных конструктивных решений УНС, модулирующего отраженный свет, представлено на рис. 3.9. Слой мелкоструктурного ЖК 3 помещен между заземленным прозрачным проводящим слоем 2, нанесенным на стекло 1, и кремниевой пластиной 5 с интегральной управляющей схемой. Интегральная схема содержит триггер и связанную с ним адресную матрицу. Управляющее напряжение подается на алюминиевый электрод 4, связанный с одним плечом триггера. Если потенциал между проводящим слоем и управляющим электродом равен нулю, то свет отражается с незначительными потерями, в противном случае он рассеивается. Если в этой конструкции алюминиевый электрод заменить анодом фотодиода, имеющим отражательную поверхность, то устройство может служить и в качестве фотоматрицы, т. е. оно будет совмещать функции УНС и фотоматрицы. Анод управляет состоянием ЖК-слоя при подаче на него напряжения от триггера, а свет, падающий на фотодиод во время считывания, вызывает фототок, который используется для изменения состояния триггера. Такое устройство называется *матрицей* [7].

Характеристики экспериментальных моделей УНС на PLZT и ЖК, предназначенных для работы в составе ГЗУ, представлены в табл. 3.2.

**Оптически управляемые транспаранты.** Характерной особенностью ОУТ является возможность параллельного преобразования страницы данных. В связи с этим требования к времени хранения оптического состояния значительно снижаются. Характеристики различных типов ОУТ (табл. 3.3) связаны с используемыми в них физическими принципами. ОУТ могут работать как на просвет, так и на отражение.

ОУТ пропускающего типа отличаются большей помехозащищенностью и проще согласуются с другими устройствами оптических систем.

Рассмотрим ОУТ на DKDP с фотопроводящим слоем (фототитус). Данный транспарант имеет многослойную структуру (рис. 3.10), состоящую из электрооптического кристалла — сегнетоэлектрика DKDP, пленки фотополупроводника — селена и прозрачных электродов. Запись информации на фототитус производится путем экспозиции модулированного светового пучка (ультрафиолетового или синего) с одновременной подачей постоянного напряжения порядка 80 В. Модулированный световой пучок (ультрафиолетовый или синий) создает заряженные носители, дрейфующие к поверхности сегнетоэлектрика — фотопроводник, за счет чего на DKDP появляется поле, пространственно изменяющееся в соответствии с модулирующим пучком.

Считывание записанной информации производится в проходящем или отраженном свете. При работе в отраженном свете между DKDP-фотопроводником помещается диэлектрическое зеркало, позволяющее значительно уменьшить влияние считывающего пучка на возбуждение фо-

Таблица 3.2

Материалы	Физические эффекты, используемые для модуляции	Емкость $C_f$ , бит	Оптическая эффективность $\eta_{\text{оп}}$ , %	Контраст $\chi$	Уравняющее напряжение (В)	Геометрические параметры		Скорость переключения $T_{\text{п. макс}}$	Время набора $T_{\text{н. макс}}$	Скорость смены страны $T_{\text{с}}$
						$d_f$ , мм	$d_f$ , мм			
PLZT-керамика	Изменение двулучепреломления Динамическое рассеяние Красовой эффект	$128 \times 128$	50 (до 90)	50:1	150	0,25	0,125	10	2	250
		$32 \times 32$	50	5:1	300	1	0,5	10	0,4	1000
		$32 \times 32$	50	10:1	150	1	0,5	10	0,4	1000
Жидкие кристаллы	Изменение двулучепреломления Динамическое рассеяние	$32 \times 32$	85	20:1	30	0,5	0,3	20	0,7	100
		$1250 \times 32 \times 32$	40	100:1	130	0,3	0,15	$10^3$	1--10	250
Идеальный материал		$128 \times 128$	50	100:1	10--100	0,2--0,3	0,1--0,15	$10^4$	10	50--100

Таблица 3.3

Материал	Модуляция за счет	Активная площадь, см <sup>2</sup>	Предельное разрешение пар линий, мм	Максимальный коэффициент контрастности	Чувствительность, мкДж·см <sup>2</sup>	Рабочее напряжение, В	Примечание
В <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub> (PROM)	Эффекта Поккельса	2,5×2,5	150—500	5000 : 1	0,5—500	2000	Низкая интенсивность света при считывании
DKDP (фототегус) (KD <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	То же	2,8×3,8	75	100 : 1	2—10	80	Работает при —50°С
ЖК	Гибридного по-левого эффекта	2,5×2,5	50	100 : 1	5	6	Время памяти 15 мс
PLZT	Переключения доменов	3,2×3,2	50	От 10 : 1 до 100 : 1	10 <sup>4</sup>	250—450	Большая неоднородность
Термопластик	Деформация поверхности	От 2,5×2,5 до 10×10	2000 (полоса пропускания +250)	100 : 1*	5—100	300	Время цикла порядка нескольких секунд, малая долговечность

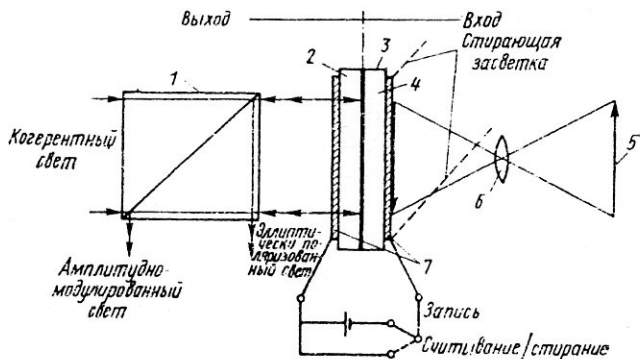


Рис. 3.10. Схема ОУТ на основе DKDP с фотослоем:  
 1 — поляризирующий расщепитель луча; 2 — кристалл DKDP; 3 — диэлектрическое зеркало; 4 — аморфный фотопроводник Se; 5 — не когерентный объект; 6 — линза; 7 — прозрачные электроды

топроводника и благодаря этому увеличить яркость оптических сигналов. Для стирания записанного изображения полярность приложенного напряжения изменяют, в результате чего и фотопроводник освещается ультрафиолетовым или синим светом.

Перспективны также ОУТ на основе МДП-структуры (PROM). В устройствах типа PROM дополнительный фотопроводящий слой не используется, так как кристалл обладает электрооптическими свойствами и фотопроводимостью. В качестве кристаллов применяют полупроводниковые электрооптические кристаллы германата ( $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ) и силиката висмута ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ). Для равномерного распределения подаваемого напряжения на полированные стороны пластинки кристалла наносят тонкие (около 3 мкм) пленки парилена, а сверху размещают электроды (рис. 3.11). Образованная таким образом структура металл — диэлектрик — металл чувствительна к действию излучения, происходящего в области поглощения кристалла, и способна хранить записанную информацию.

Для записи информации транспарант освещается модулированным световым пучком с одновременной подачей постоянного напряжения. Генерируемые в полупроводнике носители заряда дрейфуют к границе кристалла с диэлектриком, где захватываются ловушками. Создаваемый носителями пространствен-

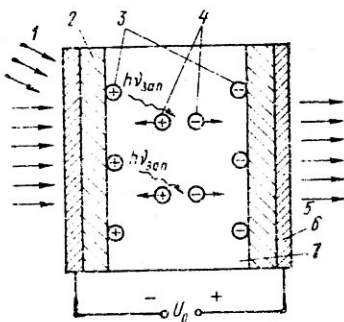


Рис. 3.11. Схема ОУТ на основе PROM-структуры:

- 1 — записывающий свет; 2 — диэлектрик; 3 — носители заряда на поверхностных ловушках; 4 — рождаемые светом носители заряда; 5 — выходящий модулированный пучок; 6 — прозрачные электроды; 7 — фоточувствительный электрооптический материал

ный заряд компенсирует заряд на электродах. Следовательно, электрическое поле внутри проводника, наведенное полем двулучепреломления кристалла, благодаря эффекту Погкельса приводит к фазовой или амплитудной (при наличии поляризаторов) модуляции считывающего светового пучка, в качестве которого может быть использовано излучение полупроводникового лазера.

Считывание можно выполнять и с помощью видимого света, к которому кристалл в  $10^3$  —  $10^4$  более чувствителен, чем к излучению полупроводниковых лазеров.

Если изменить поляриность приложенного при считывании постоянного напряжения, то можно получить негативное изображение. При закороченных электродах наблюдается позитивное изображение, так как изменение двулучепреломления происходит в результате образования пространственных зарядов. Для стирания записанного изображения необходимо снизить до нуля напряжение и осветить кристалл ультрафиолетовым или синим светом.

### § 3.4. Регистрирующие материалы

Регистрирующий материал (носитель информации) является основным компонентом ГЗУ и служит для регистрации и хранения данных, представленных в голографической форме. Существующие регистрирующие материалы и устройства чувствительны только к интенсивности света и изменяют свои оптические свойства в соответствии с ее пространственным распределением. В различных материалах это происходит по-разному: в одних изменяется амплитудное пропускание, в других — показатель преломления или рельеф поверхности. В первом случае образуется амплитудная голограмма, а во втором — фазовая. В некоторых материалах (например, халькогенидные стеклообразные полупроводники) наблюдается одновременное изменение как амплитудного пропускания, так и показателя преломления, что приводит к образованию амплитудно-фазовых голограмм. Магнитные голограммы, получаемые термомагнитным способом на тонких магнитооптических пленках, представляют собой третий тип голограмм — поляризационный.

Важнейшей особенностью регистрирующего материала является свойство обратимости, благодаря которому можно обновлять информацию на носителе, т. е. стирать записанную голограмму и записывать новую. Необратимые регистрирующие материалы пригодны для использования только в ГПЗУ. К необратимым материалам относится обычный фотоматериал. Для построения ГОЗУ необходимы обратимые регистрирующие материалы. К числу обратимых регистрирующих материалов относятся магнитооптические пленки, термопластические и фотохромные материалы, электрооптические кристаллы, халькогенидные стеклообразные полупроводники и др. Особый интерес представляют материалы с объемными изменениями оптических свойств показателя преломления, которые позволяют осуществить трехмерное

хранение информации в виде матрицы наложенных объемных голограмм с высокой дифракционной эффективностью. К таким материалам относятся электрооптические кристаллы и, в частности, хорошо известный ниобат лития.

Характеристики, которыми должен обладать регистрирующий материал, пригодный для использования в ГЗУ оперативного типа следующие:

Разрешающая способность $\nu_M$ , лин/мм . . . . .	$\geq 1000$
Дифракционная эффективность $\eta_H$ , % . . . . .	$\geq 0,1$
Энергия записи $E_S$ , мкДж/мм <sup>2</sup> . . . . .	$\leq 5$
Время записи $\tau_w$ , мс . . . . .	$\leq 0,1$
Время стирания $\tau_E$ , мс . . . . .	$\leq 0,1$
Допустимое число циклов перезаписи $M$ . . . . .	$10^8$

Было исследовано большое число регистрирующих материалов. Однако материал, удовлетворяющий одновременно всем перечисленным требованиям, пока еще не найден. Но ряд материалов полностью удовлетворяет большей части требований и хорошо согласуется с остальными. Характеристики регистрирующих материалов, пригодных для использования в оптических устройствах хранения и обработки информации, представлены в табл. 3.4 [7, 9].

Галогенидосеребряные фотоматериалы нашли широкое применение в голографии благодаря высокой светочувствительности и разрешающей способности, а также доступности. Так как такие фотоматериалы не допускают перезаписи, они не могут быть использованы в ГЗУ оперативного типа; их применяют в качестве носителей информации для ГПЗУ.

Термопластические материалы относятся к числу регистрирующих сред, в которых сочетаются постоянство хранения, возможность стирания и повторной записи. Термопластик сам по себе нечувствителен к свету, поэтому его соединяют с фотопроводниковым материалом в одну пленочную структуру. Готовый носитель представляет собой многослойную структуру и состоит из стеклянной подложки с токопроводящим покрытием (обычно из оксида индия InO) с нанесенными на нее слоями фотопроводника и термопластика. Токопроводящий слой служит для нанесения электрического заряда на поверхность термопластика с помощью установки коронного разряда, а также используется в качестве тепловыделяющего элемента при тепловом проявлении зарегистрированной фазовой голограммы.

Для существующих способов записи голограмм на фототермопластике характерны два основных момента: 1) создание электрического поля в слое термопластика, соответствующего распределению интенсивности света при экспонировании; 2) тепловое проявление, при котором под действием кратковременного теплового импульса температура термопластика повышается до температуры размягчения, в результате чего электростатические силы деформируют поверхность термопластика в соответствии с распределением электрического поля на ней, образуя двумерную фазовую голограмму. Фиксация получен-

Вид регистрирующей среды	Спектральная чувствительность $\Delta\lambda$ , мкм	Энергия записи $E_s$ , мДж/мм <sup>2</sup>	Разрешающая способность $VM \cdot 10^3$ , лин/мм	Тип голограммы
Галогенидосеребряные эмульсии	0,4 - 0,7	$10^{-5} - 10^{-4}$	1 - 10	Амплитудная и фазовая (отбеленные)
Термопластические материалы	0,488 - 0,633	$10^{-3} - 10^{-2}$	0,6 - 2	Фазовая двумерная
Фотохромные материалы	Активная 0,3 - 0,45 Отбеленная 0,550 - 0,7	0,1 - 1,0	1,5 - 10	Амплитудная трехмерная
Электрооптические кристаллы (LiNbO <sub>3</sub> : Fe)	0,488 - 0,633	0,02 - 0,1	1,5	Фазовая трехмерная
Магнитооптические пленки (MnBi)	Неселективные	0,1 - 1,0	1,5 - 2,0	Поляризационная
Халькогенидные стеклообразные полупроводники	0,3 - 0,75	$10^{-1} - 100$	3 - 10	Амплитудно-фазовая

ной голограммы осуществляется путем быстрого охлаждения («замораживания») до комнатной температуры. Для стирания записанной голограммы достаточно вновь нагреть термопластик до температуры размягчения. В отличие от других обратимых материалов для получения голограмм на фототермопластике требуется небольшая экспозиция порядка  $10 \text{ мкДж/мм}^2$ , что обусловлено высокой чувствительностью фотопроводящего слоя. Дифракционная эффективность фазовых голограмм, записанных на фототермопластике, составляет 10—30 %. Несмотря на сложность механизма записи, фототермопластик на сегодняшний день является лучшим обратимым материалом.

Основными недостатками фототермопластика как носителя информации для ГОЗУ являются малая скорость записи — стирание и небольшая цикличность. Было достигнуто время цикла записи — стирание порядка 100 мс и до 1000 циклов записи — стирания без изменения дифракционной эффективности. Скорость записи — стирания ограничивается скоростью отвода теплоты от подложки после воздействия каждого проявляющего и стирающего теплового импульса. Поэтому для увеличения быстрейшего действия необходимо создать устройства для эффективного быстрого отвода тепла от подложки и уменьшить длительность тепловых проявляющих и стирающих импульсов. Увеличение цикличности возможно при уменьшении вредного воздействия коронного разряда на термопластический носитель. Недостатком термопластических материалов является также то, что они реагируют только на определенную полосу пространственных частот. В связи с этим



Дифракционная эффективность $\eta_{\max}$ , %	Время записи $t_{\text{з}}$	Время стирания $t_{\text{с}}$	Допустимое число циклов		Продолжительность хранения
			записи стирания	считывания	
20—50	Минуты	--	—	Не ограничено	Не ограничено
10—30	10 мс	100 мс	$< 10^3$	То же	То же
0,4—3	10 мс	Такое же, как при записи	$< 10^5$	Имеет место обесцвечивание	От минут до месяца
60—80	30 мс — минуты	То же	Не ограничено	Считывание при другой длине волны	От недель до месяцев
0,01	10—100 нс	0,1 мс	То же	Не ограничено	Не ограничено
20—80	1—10 мин	Несколько минут	Неизвестно	То же	То же

существует соотношение между дифракционной эффективностью и разрешающей способностью, которое зависит от угла между опорным и объектным пучками. Максимальный отклик приблизительно соответствует пространственной частоте  $(2h)^{-1}$ , где  $h$  — толщина термопластического слоя. В обе стороны от центральной пространственной частоты отклик, быстро снижаясь, падает до нуля. Эффективная ширина полосы пространственных частот — 50% от центральной частоты. Если, например, толщина термопластического слоя равна 0,5 мкм, то центральная пространственная частота составляет 1000 лин/мм, что соответствует углу  $30^\circ$  между опорным и объектным световыми пучками при использовании аргонового лазера в качестве источника света. При этом ширина полосы пространственных частот 500 лин/мм, поэтому эффективно могут быть зарегистрированы детали интерференционной картины с пространственной частотой 750—1250 лин/мм.

Электрооптические кристаллы типа ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), ниобата стронция и бария  $[(\text{Sr}, \text{Ba}) \text{Nb}_2\text{O}_6, \text{SbN}$  или  $\text{Ba}_{0,75} \text{Sr}_{0,25} \text{Nb}_2\text{O}_6]$  позволяют получить высокоэффективные трехмерные фазовые голограммы. Процесс записи основан на оптическом возбуждении и последующем дрейфе или диффузии фотоэлектронов, которые захватываются новыми узлами кристаллической решетки. Вследствие такого перераспределения зарядов в кристалле возникает электрическое поле, которое изменяет показатель преломления вследствие электрооптического эффекта. Таким образом создается трехмерная фазовая голограмма, дифракционная эффективность которой может достигать теорети-

ческого предела — 100%. Голограмма фиксируется воздействием электрического поля или теплоты. Стирание может быть осуществлено оптическим путем либо нагреванием кристалла с одновременным облучением.

Наиболее исследованным электрооптическим кристаллом является ниобат лития. Он, как и другие электрооптические кристаллы, обладает высокой дифракционной эффективностью, требуемой для носителя ГЗУ разрешающей способностью, неограниченной цикличностью и незначительным светорассеянием. С помощью этого кристалла были получены голограммы с дифракционной эффективностью 60—80%. Ниобат лития в чистом виде имеет очень низкую светочувствительность. Однако введение примеси позволяет ее значительно повысить. Например, введение добавок железа дает возможность повысить светочувствительность ниобата лития в сотни раз.

Ниобат лития допускает высокую скорость записи голограмм. Важным его достоинством является возможность записи большого числа голограмм с необходимой дифракционной эффективностью на одном и том же участке кристалла путем наложения их друг на друга. Число наложенных голограмм ограничивается диапазоном изменения показателя преломления. Наибольшая наблюдавшаяся модуляция показателя преломления ниобата лития составляет  $4 \cdot 10^{-4}$ . Но даже при таком небольшом динамическом диапазоне показателя преломления можно записать сотни голограмм путем наложения их друг на друга. Благодаря высокой угловой селективности трехмерных голограмм легко осуществляется селективное восстановление наложенных голограмм. Возможно также их селективное стирание.

К недостаткам кристаллов ниобата лития относятся малая светочувствительность, нестабильность и низкая термостойкость записанных голограмм. Нестабильность особенно проявляется при наложении их друг на друга. Так как при этом не производится фиксирования записанных голограмм, при наложении следующих происходит частичное разрушение (стирание) предыдущих. Несмотря на указанные недостатки, ниобат лития по своим физическим свойствам наиболее близок к идеальному регистрирующему материалу для ГОЗУ с трехкоординатной выборкой.

### § 3.5. Фотоприемные матрицы

Матрица фотоприемников (фотоматрица) служит для преобразования оптического изображения в электрические сигналы. При использовании фотоматрицы в ГЗУ число ее элементов (фотоприемников) соответствует объему страницы, причем каждый элемент функционирует как пороговый детектор, указывающий наличие или отсутствие светового сигнала в соответствующей позиции.

Основными характеристиками, по которым выбирают фотоматрицы, являются: пороговая мощность детектирования, быстродействие. Различают два режима работы фотоприемников: 1) режим непосред-

ственного отсчета; 2) режим работы с накоплением заряда. В первом случае выходной электрический сигнал фотоприемника в каждый момент времени пропорционален интенсивности падающего на него оптического сигнала, а во втором — полному световому потоку, падающему за время накопления. Так как мощность оптического сигнала, поступающего на вход отдельного элемента фотоматрицы, очень мала, то работа фотоприемников в режиме накопления заряда предпочтительнее. В последнее время при разработке фотоматриц наблюдается тенденция объединения фотоприемников с элементами транзисторной памяти. При этом к выходным сигналам фотоприемников предъявляется единственное требование — устанавливать триггер, являющийся элементом памяти, в нужное состояние. Поскольку при этом может произойти локальное усиление, фотоматрица с памятью обладает более высокой чувствительностью по сравнению с обычной фотоматрицей.

В качестве фотоматрицы с непосредственным отсчетом рассмотрим фотодиодную матрицу, электрическая схема которой представлена на рис. 3.12. Каждый элемент данной фотоматрицы состоит из  $p-i-n$ -фотодиода и двух МОП-транзисторов  $p$ -типа, которые служат для коммутации фотодиодов. Благодаря чрезвычайно малым размерам, высокому входному сопротивлению, двусторонней проводимости и простой технологии изготовления, МОП-транзисторы являются почти идеальным прибором для коммутации  $p-i-n$ -фотодиодов. Катоды фотодиодов соединены вместе и смещены в положительном направлении, а аноды связаны с истоками МОП-транзисторов. Затворы МОП-транзисторов подключены к парафазным адресным шинам  $A - \bar{A}$ , а стоки — к парафазным разрядным шинам  $P - \bar{P}$ . В рабочем режиме при подаче положительного смещения на  $n$ -область фотодиоды смещаются в обратном направлении. Если фотоматрица не освещена, то через фотодиоды течет только небольшой темновой ток (порядка нескольких наноампер). При освещении фотоматрицы через те фотодиоды, на которые падает свет, потечет фототок, который во много раз больше темнового тока. Выборка нужного слова производится с помощью парафазных шин  $A - \bar{A}$ . В исходном состоянии шины  $\bar{A}$  имеют низкий, а шины  $A$  — высокий потенциал. Следовательно, при отсутствии сигнала считывания весь фототок замыкается на землю через МОП-транзистор, открытый низким потенциалом шины  $\bar{A}$ , так как МОП-транзистор, подключенный к разрядной шине, закрыт высоким потенциалом шины  $\bar{A}$ . Для выборки требуемого слова на соответствующую адресную шину  $\bar{A}$  подается высокий потенциал, а на шину  $A$  — низкий. При этом фототок каждого разряда выбранного слова поступает в соответствующую разрядную шину и возбуждает сигнал на входе усилителя считывания. Коммутация фотоприемников может быть осуществлена и однополярным сигналом, для чего достаточно заземлить одну из двух адресных шин. Фотоматрицы описанного типа обладают высоким быстродействием ( $\sim 0,3$  мкс), низкой пороговой мощностью де-

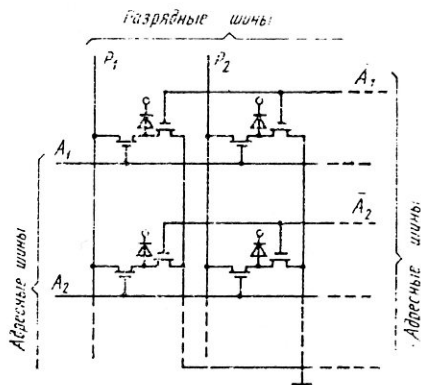


Рис. 3.12. Электрическая схема фотоматрицы с непосредственным отсчетом

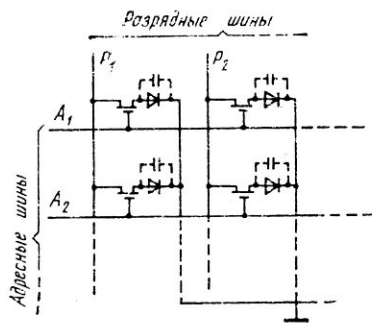


Рис. 3.13. Электрическая схема фотоматрицы, работающей с накоплением заряда

тектирования ( $\sim 0,5$  мВт/бит) и хорошей устойчивостью к помехам от невыбранных элементов. Основным достоинством таких фотоматриц является сравнительная простота изготовления.

Электрическая схема фотоматрицы, работающей с накоплением заряда, изображена на рис. 3.13. Как видно из рисунка, каждый фотодиод матрицы включен последовательно с ключевым МОП-транзистором. Детектирование оптического изображения страницы с помощью фотоматрицы осуществляется следующим образом. В начале цикла на затворы МОП-транзисторов подаются коммутирующие импульсы и через открытые транзисторы производится заряд емкостей  $p$ - $n$ -переходов фотодиодов до максимального напряжения источника питания. Затем фотоматрица освещается оптическим изображением страницы. При этом под действием падающего светового потока происходит разряд емкостей  $p$ - $n$ -переходов фотоприемников и напряжение на них падает на значение, пропорциональное мощности светового потока и длительности освещения. Для считывания требуемого слова на соответствующую адресную шину подается коммутирующий импульс, который открывает ключевые транзисторы, соединенные с выбранной шиной. Тогда через фотодиоды, открытые транзисторы и входные цепи усилителей считывания потекут токи дозаряда. Ток, протекающий через отдельный фотодиод, зависит от потери заряда за период накопления и пропорционален числу фотонов света, попавших на фотодиод за время накопления. Выделение полезного сигнала из помех производится усилителями считывания. Таким образом требуемое слово оказывается считанным.

Основным достоинством фотоматриц, работающих в режиме накопления заряда, является повышенная чувствительность ( $\sim 10^{-14}$  Дж/бит). Кроме того, они обладают свойствами памяти с ограничен-

ным временем хранения и однократным считыванием. Недостатками таких фотоматриц по сравнению с фотодиодными матрицами непосредственного отсчета являются более жесткие допуски на рабочие характеристики элементов. Например, для надежной работы фотоматрицы темновой ток фотодиода не должен превышать наноампера.

До сих пор рассматривались фотоматрицы, использующие в качестве светочувствительных элементов фотодиоды. Применяя фототранзисторы, можно достигнуть более высокой чувствительности. Основное достоинство фототранзисторных матриц состоит в возможности получения более высоких уровней выходных сигналов. Были исследованы фототранзисторные матрицы, собранные из небольших подматриц (чипов объемом  $8 \times 8$  элементов) со следующими характеристиками; выходной сигнал 130 мВ с отклонением в 2,5 раза и отношение сигнал/шум более 10 при энергии падающего светового потока, равной  $5 \cdot 10^{-12}$  Дж/бит. Время накопления не превышало 0,3 мкс. Недостатком таких матриц является трудность получения однородных характеристик при соблюдении жестких допусков.

Наиболее совершенной является фотоматрица со встроенной памятью. В такой матрице каждый фотоприемник включается в схему триггера, который является элементом транзисторной памяти. Число триггеров равно числу битов на одной странице. Фотоматрица со встроенной памятью функционирует следующим образом. Перед считыванием информации с голограммы триггеры устанавливаются в состояние «0». Во время считывания фотоприемники, принявшие оптический сигнал, переводят соответствующие триггеры в состояние «1». Это состояние триггеров сохраняется сколь угодно долго. Считывание информации из транзисторной памяти производится обычными методами с временем произвольной выборки 0,05–0,1 мкс при емкости  $\sim 10^3$ – $10^5$  бит. Транзисторная память фотоматрицы является дополнительной буферной памятью, а в отдельных случаях она может быть использована в качестве СОЗУ. Были изготовлены и исследованы фотоматрицы с встроенной памятью, которые собирались из чипов ( $8 \times 8$  элементов). Фотоматрица имела следующие геометрические параметры:  $d_{pD} = 0,1$  мм;  $q_{pD} = 0,2$  мм. Была достигнута низкая пороговая мощность детектирования  $\sim 0,1$  мкВт/бит. При такой мощности сигнала время накопления заряда не превышало 50 мкс, энергия переключения элемента равнялась  $5 \cdot 10^{-12}$  Дж.



*Проректор по научной работе ЛИТМО С. А. Майоров демонстрирует заместителю министра высшего и среднего специального образования СССР И. М. Макарову оптоэлектронный преобразователь угла для космических систем, разработанный на кафедре вычислительной техники под руководством И. В. Меськина (ныне профессора). 1977 год*

## ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

### § 4.1. Голографический способ записи, хранения и считывания цифровой информации

**Запись и хранение.** Цифровая информация, предназначенная для голографической записи, разбивается на страницы и каждая страница записывается в виде отдельной голограммы. Массив данных записывается и хранится в виде матрицы голограмм на специальном регистрирующем материале, называемом *носителем информации*.

Страница данных, представленная в двоичном коде, подготавливается в виде транспаранта, прозрачные отверстия которого соответствуют двоичным единицам. Такой транспарант называют *входной страницей*. Отверстия круглой или прямоугольной формы пробиваются в узлах регулярной двумерной сетки, наложенной на непрозрачный материал транспаранта. Непрозрачные узлы соответствуют двоичным нулям. Узлы сетки называют *информационными точками*. Каждая информационная точка несет бит информации. Описанный способ физического представления страницы наиболее удобен как для ее формирования при записи, так и для считывания информации с ее изображения, восстановленного голограммой. В реальных запоминающих устройствах входная страница формируется устройством набора страниц (УНС), которое представляет собой пространственный матричный модулятор световой волны с электронной схемой управления. УНС осуществляет пространственную модуляцию проходящей или отраженной световой волны по амплитуде, фазе, поляризации или по совокупности этих параметров (см. § 3.3). В дальнейшем под входной страницей

подразумевается амплитудный транспарант, работающий на пропускание.

Голограмма входной страницы, как правило, записывается по схеме фурье-голографии (рис. 4.1). Такая запись обладает рядом важных достоинств, которые обусловлены двумя основными свойствами преобразования Фурье (см. приложение I): 1) фурье-образ точечного источника света представляет собой равномерное распределение амплитуд света по всей частотной плоскости; 2) смещение точечного источника в координатной

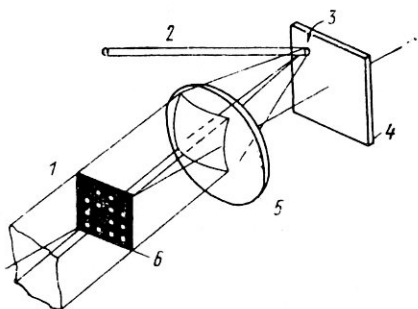


Рис. 4.1. Схема голографической записи страницы цифровой информации:

1 — объектный пучок; 2 — опорный пучок;  
3 — голограмма; 4 — регистрирующая среда;  
5 — фурье-линза; 6 — транспарант

области вызывает только линейный фазовый сдвиг в частотной области. Согласно первому свойству фурье-голограмма обладает большой избыточностью регистрации и хранения, так как информация о каждой точке входной страницы распределяется по всей площади записи. Избыточная регистрация является одним из важнейших достоинств такой голограммы, обеспечивающим высокую надежность хранения и помехозащищенность против локальных дефектов регистрирующей среды, таких, как неоднородность, пыль, царапины

и т. п. Поскольку входная страница представляет собой совокупность пространственно разнесенных идентичных световых источников, ее фурье-образ складывается из фурье-образов отдельных информационных точек, которые, согласно второму из приведенных свойств преобразования Фурье, отличаются только фазовыми множителями. Это означает, что фурье-образы всех информационных точек входной страницы попадают на один и тот же участок носителя, расположенного в фурье-плоскости. Следовательно, для записи фурье-голограммы страницы достаточно площади, требуемой для записи только одного бита с необходимой избыточностью. Благодаря этому достигается высокая плотность записи, помехоустойчивость, которая в идеальном случае соответствует помехоустойчивости одного бита на всей площади голограммы. Фурье-голограммы обладают наибольшей информационной емкостью по сравнению с другими типами голограмм.

Схемы записи фурье-голограмм входных страниц, используемые в голографических ЗУ, приведены на рис. 4.2. Запись голограммы осуществляется следующим образом. Входная страница  $I$  освещается монохроматической плоской световой волной  $\Sigma_1$  (рис. 4.2, а), являющейся объектной. Свет, пространственно-модулированный по амплитуде входной страницей, падает на фурье-линзу  $L_1$ , которая формирует в своей задней фокальной плоскости фурье-образ страницы, умноженный на фазовый множитель сферической волны. Линза  $L_2$ , идентичная линзе  $L_1$ , устраниет этот фазовый множитель. В результате в плоскости регистрации голограммы  $(x_H, y_H)$ , расположенной непосредственно за линзой  $L_2$ , куда помещается носитель  $H$ , распределение комплексных амплитуд информационной световой волны  $\Sigma_2$ , пропорционально точному фурье-образу входной страницы. Большая часть информационной световой волны при этом концентрируется линзой на

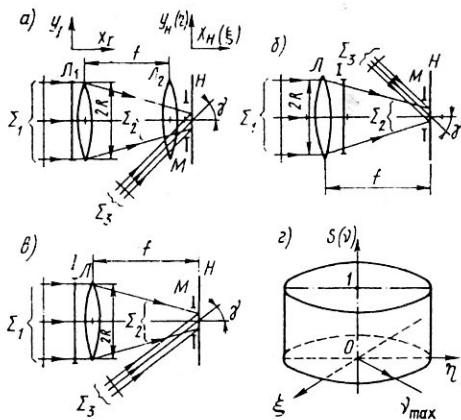


Рис. 4.2. Оптические схемы записи фурье-голограмм



небольшой площади носителя. На этот же участок носителя под определенным углом  $\gamma$  падает плоская опорная волна  $\Sigma_a$ , когерентная объектной. Интерференционная картина объектной и опорной световых волн регистрируется светочувствительной средой носителя, образуя голограмму. Размер голограммы регулируется диафрагмой  $M$ . В схемах рис. 4.2, б, в, где используется лишь одна фурье-линза, регистрируется голограмма фурье-образа входной страницы, умноженного на фазовый множитель сферической волны. Полученные голограммы называют квазифурье-голограммами. В схемах рис. 4.2, а, в входная страница помещается непосредственно перед линзой, чтобы свести к минимуму ограничение на ее размеры, обусловленное конечностью апертуры линзы. Схема рис. 4.2, б позволяет регулировать масштаб фурье-образа путем изменения положения входной страницы относительно линзы.

Системы голографической записи, основанные на этих схемах, являются пространственно-инвариантными, что приводит к следующему важному свойству фурье-голограммы: геометрическое положение восстановленного изображения инвариантно (т. е. неподвижно) относительно поперечного смещения голограммы. Рассмотренные схемы позволяют записать на ограниченной площади регистрирующей среды наиболее широкий диапазон пространственных частот объекта  $0 \leq v \leq v_{\max} = R/\lambda f$ , определяемый длиной волны записывающего светового луча и параметрами фурье-линзы. Действительно, передаточные функции таких систем идентичны и описываются функцией  $S(v) = \text{circ} \times (v/v_{\max})$ , где  $v = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ ;  $\xi, \eta$  — координаты частотной плоскости. На рис. 4.3, г дана ее графическая иллюстрация. Из рассмотрения передаточной функции следует, что линзовые системы, осуществляющие фурье-преобразование, передают регистрирующей среде без искажений все компоненты фурье-образа, соответствующие пространственным частотам до  $v_{\max}$ . Следовательно, если регистрирующая среда имеет разрешающую способность, превышающую  $v_{\max}$ , то осуществляется равномерная регистрация всех частотных компонент и изображение, восстановленное фурье-голограммой, будет иметь наиболее высокое и равномерное разрешение на всех участках. Кроме того, фурье-голограммы имеют меньшие aberrации по сравнению с другими типами голограмм, не ограничивающие качество восстановленного изображения входной страницы.

Таким образом, запись голограмм по схеме фурье-голографии позволяет оптимально использовать ограниченную площадь носителя, благодаря чему и послужила основой для построения ГЗУ.

Оценим параметры фурье-голограммы. Допустим, что запись голограммы производится по схеме, представленной на рис. 4.3, а. Амплитудная функция пропускания входной страницы с круговыми отверстиями может быть записана в виде

$$U_I(x_I, y_I) = \sum_{n=1}^{M_I} \sum_{m=1}^{Q_I} g(n, m) \text{circ}(2\bar{r}_I), \quad (4.1)$$

где

$$\bar{r}_I = \frac{r_I}{d_I} = \frac{1}{d_I} \left\{ \left[ x_I - \left( n - \frac{M_I + 1}{2} \right) q_I \right]^2 + \left[ y_I - \left( m - \frac{Q_I + 1}{2} \right) q_I \right]^2 \right\}^{1/2};$$

$x_I, y_I$  — координаты плоскости входных данных;  $\text{сгс}(r)$  — круговая функция;  $g(n, m)$  ( $g(n, m) = 0$  или  $1$ ) — функция, характеризующая распределение информации на входной странице;  $M_I, Q_I$  — число столбцов и строк входной страницы;  $d_I$  — диаметр отверстия;  $q_I$  — расстояние между соседними отверстиями. Амплитуда световой волны, прошедшей входную страницу, равна  $AU_I(x_I, y_I)$ , где  $A$  — амплитуда объектной световой волны. Распределение комплексных амплитуд такой волны в плоскости регистрации голограммы ( $x_H, y_H$ ) пропорционально фурье-образу входной страницы:

$$U_{IH}(x_H, y_H) = \frac{A}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} U_I(x_I, y_I) \times \exp \left[ -\frac{2\pi i}{\lambda f} (x_H x_I + y_H y_I) \right] dx_I dy_I. \quad (4.2)$$

Подставив в (4.2) выражение (4.1) и выполнив фурье-преобразование, получаем

$$U_{IH}(\bar{x}_H, \bar{y}_H) = \frac{\pi}{4} \frac{A d_I^2}{i\lambda f} \Lambda_1(\pi \sqrt{\bar{x}_H^2 + \bar{y}_H^2}) \sum_{n=1}^{M_I} \sum_{m=1}^{Q_I} g(n, m) \times \exp \left\{ -2\pi i \beta_I \left[ \bar{x}_H \left( n - \frac{M_I + 1}{2} \right) + \bar{y}_H \left( m - \frac{Q_I + 1}{2} \right) \right] \right\}, \quad (4.3)$$

где  $\bar{x}_H = \frac{d_I}{\lambda f} x_H$ ;  $\bar{y}_H = \frac{d_I}{\lambda f} y_H$  — безразмерные координаты, связанные с пространственно-частотными координатами линейными соотношениями  $\xi = \bar{x}_H/d_I$ ,  $\eta = \bar{y}_H/d_I$ ;  $\beta_I = q_I/d_I$  — относительное расстояние между отверстиями входной страницы;  $\Lambda_1(\pi \sqrt{\bar{x}_H^2 + \bar{y}_H^2}) = \frac{4J_1(\pi \sqrt{\bar{x}_H^2 + \bar{y}_H^2})}{\pi \sqrt{\bar{x}_H^2 + \bar{y}_H^2}}$ , где  $J_1(z)$  — функция Бесселя первого рода первого порядка.

Из анализа выражения (4.3) следует, что локальное распределение амплитуд объектной волны описывается множителем, представленным в виде двойной суммы, а общее распределение амплитуд характеризуется огибающей функцией  $\Lambda_1(\pi \bar{r}_H)$ , где  $\bar{r}_H = \sqrt{\bar{x}_H^2 + \bar{y}_H^2}$ . Освещенность, соответствующая распределению амплитуд света, описываемому функцией  $\Lambda_1(\pi \bar{r}_H)$ , известна под названием *картины Эйри*.

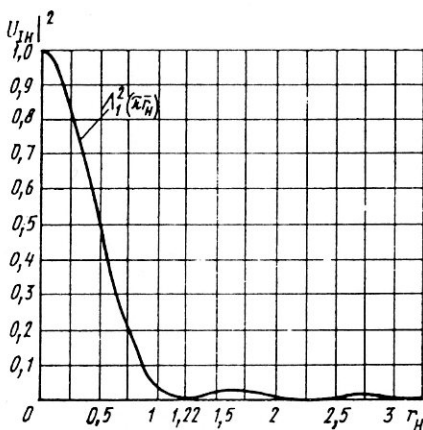


Рис. 4.3. Распределение интенсивности объектной волны в фурье-плоскости

ценную центральным лепестком огибающей функции, называют *диск Эйри*. Требуемый для регистрации участок светового потока может быть выделен с помощью диафрагмы.

Допустим, что для получения фурье-голограммы используется часть объектного светового потока, попадающая внутрь круга диаметром  $d_{\Delta} = \beta_{\Delta} d_{\Delta}$ , где  $d_{\Delta}$  — диаметр диска Эйри;  $d_H$  — диаметр голограммы. Так как первый корень функции  $\lambda_1$  ( $\pi r_H$ ) равен 1,22 (рис. 4.4), то

$$d_{\Delta} = 2,44 \frac{\lambda f}{d_I}; \quad d_H = 2,44 \beta_{\Delta} \frac{\lambda f}{d_I}. \quad (4.4)$$

Входная страница содержит  $M_I \times Q_I$  бит информации. Следовательно, плотность регистрации цифровой информации в фурье-голограмме можно оценить следующим образом:

$$n = \frac{M_I Q_I}{S_H} = \frac{4 M_I Q_I}{\pi d_H^2} \approx \frac{0,214 \alpha_I d_I^2 M_I^2}{\beta_{\Delta}^2 (\lambda f)^2}, \quad (4.5)$$

где  $S_H$  — площадь голограммы;  $\alpha_I = Q_I/M_I$ .

Пусть фурье-линза, формирующая объектную волну, имеет эффективный диаметр  $D_{FL}$ . Тогда наибольший размер входной страницы определится из условия  $q_I = \sqrt{M_I^2 + Q_I^2} = q_I M_I \sqrt{1 + \alpha_I^2} \leq D_{FL}$ . Выразив отсюда максимальные значения  $M_I$  и  $q_I$  и подставляя их в (4.4) и (4.5), придем к следующим соотношениям:

$$d_H = \frac{2,44 \beta_I \beta_{\Delta} (\lambda F) M_I \sqrt{1 + \alpha_I^2}}{0,214 d_I}; \quad (4.6)$$

$$n = \frac{0,214 d_I^2 M_I^2}{(1 + \alpha_I^2) \beta_I^2 \beta_{\Delta}^2 (\lambda F)^2}$$

Следовательно, освещенность, создаваемая объектной волной в плоскости регистрации голограммы, соответствует картине Эйри (рис. 4.3). Рассмотрение приведенной картины показывает, что амплитуда объектной волны убывает при удалении от центра картины. Так как размер голограммы должен быть ограничен с целью получения высокой плотности хранения информации, для записи голограммы используется лишь часть светового потока, которая концентрируется в пределах центрального лепестка огибающей функции. Круговую область, ограниченную центральным лепестком огибающей функции, называют *диск Эйри*.