

УДК 681.327.68:778.38 (575.2) (04)

РОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА В АРХИТЕКТУРЕ СИСТЕМЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

И.А. Аккозиев – докт. техн. наук, проф.,

А.А. Сагымбаев – докт. техн. наук, проф.,

К.А. Сагымбаева – аспирант

The role and place spatially-time modulators of light (ПВМС) in holographic memory device (ГЗУ) with page data storage.

Система голографической памяти представляет собой вариант оптической памяти, отличающейся от побитовой памяти (называемой так вследствие сосредоточения каждого бита информации в определенной точке записывающего материала) тем, что каждая единица записанной информации в ней пространственно распределена. Эта особенность хранения информации является определяющей и должна учитываться при оценке голографической памяти и в сравнении ее с другими видами памяти.

Особенностью системы голографической памяти является двухступенчатая запись большого объема информации (вначале набор массива данных в виде страницы, затем последовательная запись набранных страниц) и такое же двухступенчатое считывание (вначале страница, потом нужное данное в ней). При страничной записи общая информационная емкость ГЗУ Q определяется емкостью субголограммы Q_1 и количеством массивов информации (субголограмм) n . Соответственно имеем:

$$Q = Q_1 n. \quad (1)$$

Величина Q_1 определяется количеством данных в странице. На первый взгляд, может показаться, что лучшим вариантом, с точки зрения получения максимальной емкости ГЗУ, будет независимое и неограниченное увеличение Q_1 и n . На самом деле, это не так и не только из-за трудностей технической реализа-

цией высокочастотного ПВМС, но и потому, что существуют физические ограничения для сверхвысокой емкости среды, хранящей данные в виде голограмм. Значительное увеличение Q_1 ведет к замедлению скоростей ввода и вывода информации. Для создания эффективного ГЗУ необходимо оценить, какие ограничения на величину Q_1 накладывают дифракционные пределы и динамический диапазон среды и какими возможностями обладают источники света и матрицы фотоприемников для компенсации квадратично уменьшающейся с увеличением Q_1 величины дифракционной эффективности, приходящейся на передачу одной точки.

Наиболее интересные объемные голографические устройства с высокими показателями были созданы в 90-х годах XX века. Стремление группы разработчиков Bell Laboratories создать голографическое устройство памяти, достаточно дешевые и весьма быстродействующие с высокой плотностью хранения, судя по сообщениям близки к завершению [1]. Другая группа исследователей из Альмаденского исследовательского центра фирмы IBM создала три технические усовершенствованные устройства для обеспечения условий, в которых могли быть изучены и развиты среда и технологии, относящиеся к хранению цифровой информации на голографической основе [2–4]. Эти устройства сконструированы так,

чтобы иметь экспериментальный доступ к широкому диапазону параметров голографического хранения данных с минимальным инструментальным вкладом к чувствительности частоты ошибок.

Первое устройство [2] было сконструировано так, чтобы голографические материалы хранения данных могли изучаться без влияния набора данных оптики и механики. Для того, чтобы более точно определить технические особенности реальных устройств хранения, а также исследовать и развивать обработку сигналов и алгоритмы коррекции ошибок, были построены устройства Demon I и Demon II.

В одной из последних работ с использованием углового мультиплексирования была достигнута максимальная поверхностная информационная плотность [4]. Использовалась установка Demon II, которая была разработана для голографического хранения информации с высокой плотностью.

Свет от двухчастотного лазера Nd:YAG ($\lambda=532$ нм) был расширен и разделен на опорный и объектный пучки. Объектный пучок был аподизирован парой асферических оптических элементов, выдавая однородность освещения в пределах 5% с 80%-ной входной оптической мощностью. После аподизации объектный пучок был расширен и направлен через поляризационный расщепитель пучка на поверхность жидкокристаллического отражательного ПВМС с 1024x1024 пикселями.

Величина шага пиксела $\delta = 12,8$ мкм, коэффициент заполнения площади 88%. Специальная оптика (фокусное расстояние $f = 30$ мм) отобразила страницу ПВМС на среду хранения размером 15 мм x 15 мм x 8 мм. Среда хранения представляла собой кристалл $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$. Изображение страницы восстанавливалось на матрице фотодетекторов. Шаг элемента 12 мкм, коэффициент заполнения матрицы $> 90\%$.

Место ПВМС в ГЗУ с построчной записью голограмм. Для того, чтобы оценить роль ПВМС, рассмотрим одно из первых объемных ГЗУ [3]. Запись голограмм в описываемом макете в произвольную адресуемую позицию осуществляется следующим образом. Лазерный пучок отклоняется на необходимый угол дефлектором, а затем с помощью полупрозрачно-

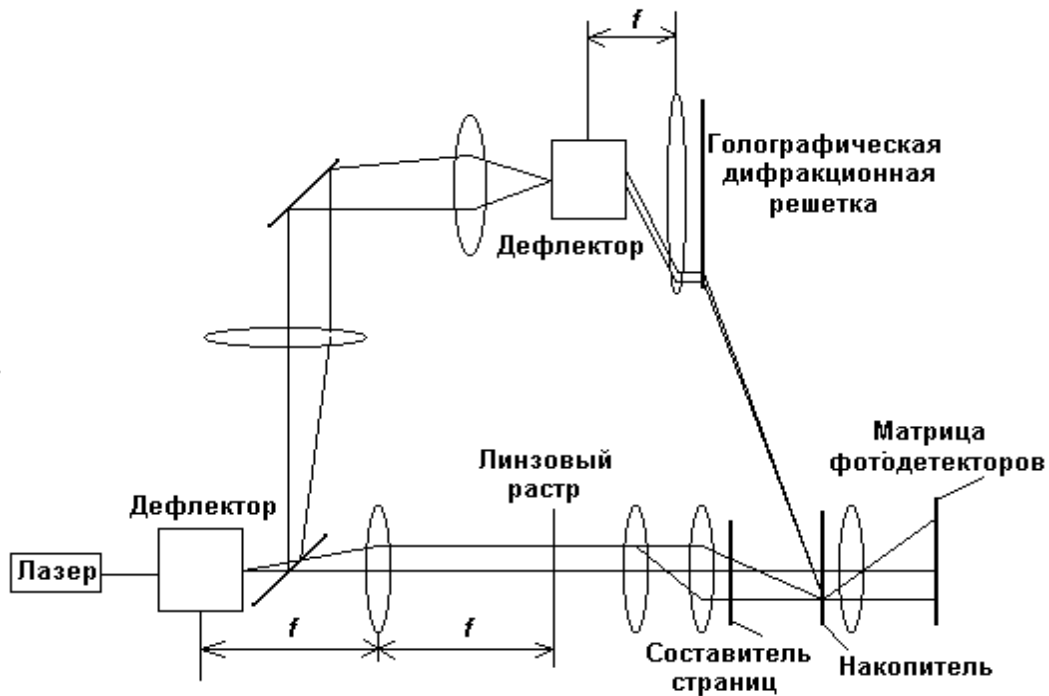
го зеркала расщепляется на две части. Опорная часть световой волны (на рисунке показана сверху) попадает на голографическую дифракционную решетку, с помощью которой направляется в необходимую позицию на накопителе. Эта решетка служит пассивным отклоняющим устройством. Ее качество определяет возможность точного совмещения опорного и объектного пучков в регистрирующей среде.

Объектная часть пучка с помощью объектива вводится в одну из ячеек линзового растра. Он представляет собой матрицу линз с параллельными оптическими осями, расположенными на равных расстояниях друг от друга. Выходная плоскость акустооптического дефлектора совмещена с передней фокальной плоскостью объектива в объектном плече устройства, и объектив формирует коллимированный пучок, параллельный оптической оси, независимо от угла отклонения пучка дефлектором. Здесь происходит преобразование угла отклонения в координату пучка в плоскости, перпендикулярной оптической оси.

Линзовый растр предназначен для увеличения угловой расходимости объектной волны, в результате чего освещается вся апертура объектива, формирующего объектную волну. Ввод информации в объектный пучок осуществляется путем его модуляции на ПВМС-носителе страниц. В плоскости накопителя формируются голограммы, которые и записываются в регистрирующей среде. Такая схема обеспечивает высокое совпадение опорной и объектной волн по всей площади накопительной среды, предназначенной для записи данной голограммы.

Угловое мультиплексирование в данной схеме осуществляется путем изменения угла падения опорного пучка на величину $\Delta\gamma_R$. Эта операция производится путем параллельного смещения опорной волны на расстояние $\Delta x = f\Delta\gamma_R/\cos\gamma_R$ с помощью дефлектора. Здесь f – фокусное расстояние линзы, направляющей в опорном плече схемы пучок света на голографическую дифракционную решетку.

Поскольку угловая селективность трехмерных голограмм весьма высока, то угол падения опорного пучка на накопительную среду должен быть выдержан очень точно. Это явля-



Оптическая схема ГЗУ с трехкоординатной адресацией субголограмм.

ется одной из причин того, что в качестве дефлектора в опорном плече рассматриваемой схемы используется цифровой электрооптический дефлектор. Другая причина применения именно электрооптического, а не акустооптического дефлектора связана с наличием доплеровского сдвига частоты дифрагированного света в акустооптических устройствах, и, как следствие, с необходимостью компенсировать этот сдвиг для восстановления взаимной когерентности опорного и объектного пучков. В случае же электрооптического дефлектора такая проблема не возникает. Отметим, однако, что использование электрооптического дефлектора обычно связано с дополнительными расходами, увеличенными габаритами устройства и использованием высоких напряжений.

Таким образом, в одном и том же объеме среды записываются последовательно голограммы, каждая из которых имеет свое информационное содержание, обусловленное теми данными, которые в момент записи данной голограммы выводились на ПВМС-составитель страниц. При этом каждая голо-

грамма характеризуется тремя координатами: x_k , y_s и γ_{kl} . Эти индексы в совокупности образуют адрес голограммы.

При считывании данных с голограммы опорная волна адресуется в позицию с линейными координатами x_k , y_s и с угловой координатой γ_{kl} . При этом блокируется прохождение света в объектном плече схемы. Опорная волна восстанавливает голограмму именно с данными линейными и угловыми координатами, что обусловлено высокой угловой селективностью трехмерных голограмм.

Часть интенсивности опорного восстанавливающего пучка участвует в дифракции на других голограммах, что вызывает перекрестные помехи, накладывающиеся на полезное восстановленное изображение. Очевидно, уровень этой помехи зависит от углового разделения мультиплексированных голограмм $\Delta\gamma_R$.

Крайняя правая часть схемы (см. рисунок), предназначена исключительно для процедуры выборки данных путем их восстановления с нужной голограммы. Линза формирует

полезное изображение, которое проецируется на матрицу фотодетекторов. Эта матрица реализует преобразование восстановленного изображения в электрический сигнал, который в дальнейшем поступает на устройство постобработки, которым может быть АЦП контроллера перед подачей сигнала на вход ЭВМ.

Применение реверсивных регистрирующих сред для записи объемных голограмм, таких, как электрооптические фоторефрактивные кристаллы, позволяет стирать и перезаписывать голограммы практически без ущерба для объема записываемой и хранимой информации. Для стирания может быть использован метод голографического вычитания, заключающийся в подаче прежних опорного и объектного пучков с фазой, измененной на 180° . Применение этого метода, однако, возможно лишь в случае, когда есть возможность подать прежний объектный пучок, т.е., при наличии предыдущего записываемого блока данных.

Набор данных осуществляется в ПВМС последовательно страница за страницей. Также последовательно ведется запись страниц в виде субголограмм. Выборка же осуществляется с одной субголограммы по заданному адресу. В других вариантах ГЗУ принцип действия ПВМС как составителя страниц и объекта для формирования субголограмм тот же.

ПВМС в ГЗУ с двухмерными субголограммами. Полная информационная емкость ГЗУ ограничивается размерами среды, в которую вводится информация и плотностью ее хранения в среде. Среда, вне зависимости от того записывается в нее двухмерная или объемная голограмма, представляется в виде пластины или диска ограниченных размеров, причем в случае объемной записи существенную роль играет их толщина. Как правило, поверхность дисков и пластин составляет $(5 \div 10) \times 10^3 \text{ мм}^2$. Для двухмерных голограмм плотность ρ обычно не превышает $10^{-2} \div 10^{-1} \text{ бит/мкм}^2$, полная емкость Q в этом случае плоских пластин и дисков составляет порядка 10^8 бит . В соответствии с (1) эта величина по-разному может быть распределена между Q_1 и n . От распределения числа страниц и емкости страниц в определенной степени зависит архитектура ГЗУ и место в ней составителя страниц – ПВМС.

Могут быть использованы три варианта этого распределения. В первом число страниц и емкость каждой страницы приближенно равны. Например, для случая ГЗУ на двухмерных голограммах $Q_1 \approx n \approx 10^4$. В этом случае нагрузка на адресацию примерно одинакова для обеих ступеней: оптической (когда для выборки нужной субголограммы опорный пучок нужно отклонить под заданным углом) и электронной (когда из набора данных, восстановленных с выбранной субголограммы, необходимо, уже в электронном виде, выбрать необходимое данное). Реализация быстрой оптической адресации, особенно при большом числе оптических ячеек, более сложна, чем электронной. С этой точки зрения, кажется, предпочтителен второй вариант, при котором число субголограмм уменьшается, а емкость страницы увеличивается ($Q_1 \gg n$). Связанное с этим увеличение числа электронных адресов больших затруднений не представит. Однако существенно возрастает нагрузка на устройства ввода и вывода информации, поскольку объем параллельно вводимой и поступающей на матрицу фотодиодов информации становится значительно большим.

Как известно, спектральная чувствительность S_λ , порог чувствительности $P_{h\nu\text{min}}$, эквивалентная шумовая полоса, эквивалентная мощность шума, обнаружительная способность представляют собой систему параметров фотоприемника в режиме порогового детектирования. В когерентной оптоэлектронике эти параметры существенны для оптической обработки информации и для характеристики матричных фотоприемников с большой степенью интеграции (10^4 – 10^5 элементов), когда на каждый из фотоприемников приходится лишь небольшая доля оптического излучения. Пороговая чувствительность фотоприемника определяется выражением:

$$P_{h\nu} = P \eta_{\text{ПВМС}} \eta_{\text{ОС}} N^2, \quad (2)$$

где P – мощность источника излучения; $\eta_{\text{ПВМС}}$, $\eta_{\text{ОС}}$ – коэффициенты передачи ПВМС и оптических сред; N – число элементов.

При $P = 10^{-2} \text{ Вт}$; $\eta_{\text{ПВМС}}$, $\eta_{\text{ОС}} = 10^{-3}$; $N = 10^4 \dots 10^5$ мощность потока излучения, приходящая на отдельный фотоприемник, равняется $P_{h\nu} = 10^{-10} \dots 10^{-11} \text{ Вт}$.

На такое увеличение можно идти до известного предела, после которого не только значительно возрастают технические трудности, но и производительность и даже общая емкость ГЗУ могут уменьшаться.

Третий вариант, $n \gg Q_1$ может в случае двухмерных субголограмм оказаться затрудненным для реализации при необходимости быстрой выборки из-за отсутствия дефлекторов с необходимым для этого случая числом переключений.

Рассмотрим причины, по которым следует с осторожностью относиться, к стремлению неограниченно повышать емкость страниц. Имеется две группы таких причин. Одна связана с пределами, устанавливаемыми дифракцией опорного пучка на голограмме и динамическим диапазоном среды хранения, другая – с техническими трудностями реализации ГЗУ с высоким Q_1 .

Минимальный разрешаемый угол, согласно критерию Релея, определяется выражением:

$$\Delta\alpha = 1,22\lambda/D, \quad (3)$$

где λ – длина волны света, D – диаметр голограммы. При достижении максимальной плотности записи информации в двухмерной голограмме дальнейшее увеличение числа точек в ПВМС может быть достигнуто только за счет увеличения размера голограммы. При ограниченной площади пластины, на которой записываются двухмерные голограммы, увеличение площади субголограмм ведет к уменьшению их количества. Таким образом, начиная с момента, когда плотность записи информации достигает величины, определяемой дифракционным пределом, увеличение числа точек в ПВМС и соответственно емкости страниц не приводит к увеличению информационной емкости ГЗУ.

Другое ограничение, имеющее принципиальный характер, связано с ограниченным динамическим диапазоном записывающей среды [3]. Голограмму сложного объекта можно рассматривать как суперпозицию элементарных интерференционных, как сумму голограмм от номера отдельных точечных источников, составляющих сложный объект. Каждая элементарная голограмма занимает определенный интервал в динамическом диа-

пазоне и если число этих интервалов слишком велико, суммарный диапазон от элементарных голограмм может превысить динамический диапазон среды, что приведет к недопустимым искажениям. В зависимости от свойств записывающей среды предел, накладываемый динамическим диапазоном, может наступить раньше или позже предела, накладываемого дифракцией. И если предел, накладываемый дифракцией, определяется длиной волны света, то предел, накладываемый динамическим диапазоном, определяется максимальным отношением сигнал/шум, достижимым в среде. Последнее определяется количеством светочувствительных микро- и наночетов, попадание квантов света, в которые изменяет оптические свойства среды. Так как это число, хоть и большое, но конечное, то и отношение сигнал/шум, конечно, а динамический диапазон ограничен. Размеры светочувствительных центров могут быть больше λ , но могут быть и существенно меньшими. В слое фотополимера с толщиной 200 мкм была осуществлена запись мультиплексированных страниц информации (1024×1024) пикселей. Плотность записи составляла 100 бит/мкм², скорость считывания – 750 Мб/с, [6]. Компания Aprilis, которая с 1999 г. финансирует разработку, анонсировала привод, работающий на основе голографических дисков, записанных на фотополимеризующемся материале.

В будущем предполагается создать голографические диски с емкостью ~1 Тб и обеспечить скорость считывания ~1 Гб/с. Последние достижения свидетельствуют о том, что резервы в создании полимерных материалов далеко не исчерпаны. К техническим трудностям, возникающим при увеличении Q_1 относится сложность создания ПВМС со сверхвысоким разрешением, с необходимостью создания матрицы фотоприемников такого же разрешения, необходимость использования высококачественной оптики и высокие энергетические затраты [3, 4, 8]. В последние годы эти трудности частично преодолены за счет создания новых и весьма эффективных устройств и частично за счет ухудшения других показателей ГЗУ. Однако возможности ГЗУ с двумерной записью субголограмм ограничены

и в этом варианте достаточно использовать страницы с емкостью 10^4 бит и несколько больше, что вместе с числом субголограмм также 10^4 , которые можно было произвольно выбирать с большой скоростью, давало достаточную на первых порах общую емкость 10^8 бит. Однако развитие побитовой оптической памяти, емкость которой превысила 10^9 , хотя и без произвольной выборки и с большим временем, затрачиваемом на нее, заставило искать пути совершенствования ГЗУ. Эти пути были известны, хотя они были успешными только в 90-х годах [3–11]. Речь идет об использовании объемной голографической памяти с применением мультиплексирования.

ПВМС в системе объемного ГЗУ с мультиплексированием. Запись голограмм в объемной среде имеет ряд преимуществ перед записью двумерных голограмм. Среди этих преимуществ – высокая селективность и высокая дифракционная эффективность η . Высокая селективность позволяет записывать через один и тот же участок поверхности, практически в одном и том же объеме, большое количество наложенных голограмм. Результатом этого является возможность введения существенно увеличенного числа страниц (субголограмм) без увеличения площади пластины или диска и без уменьшения линейного размера голограммы. Высокое значение η позволяет в одной субголограмме записывать большее количество данных. Все это позволяет осуществить прорыв в сторону большого увеличения поверхностной плотности ρ хранимой информации и соответствующего объема ее. Можно отметить, что если для двумерных ГЗУ $\rho \approx 10^{-1} \div 10^{-2}$ бит/мкм², для оптической побитовой памяти ρ достигает 1 бит/мкм², то для объемной ГЗУ величина ρ уже превышает 4×10^2 бит/мкм² [6,7,9,10]. При этом сохраняется за счет использования большего количества быстродействующих дефлекторов высокая скорость произвольной выборки. Полную емкость объемного ГЗУ с мультиплексированием можно записать:

$$Q = Q_1 n_s = Q_1 n_p n_m, \quad (4)$$

где $n_s = n_p n_m$ – общее число субголограмм, n_p – число участков поверхности через которые вводятся мультиплексированные субголо-

граммы, n_m – число мультиплексированных на данном участке субголограмм. При $n_m = 1$ выражение (4) сводится к (1). Условия формирования n_p и n_m различны, и ограничения их величин зависят от различных факторов. Поскольку n_p зависит от линейного размера голограмм, его величина ограничивается дифракционным пределом при заданном числе точек в странице. Величина n_m ограничивается динамическим диапазоном объемной среды, и ее максимальная величина будет тем меньше, чем больше точек будет в странице, так как динамический диапазон определяет число элементарных голограмм (от отдельных точек), которые можно записать в данной среде на определенном участке. Поскольку динамический диапазон увеличивается пропорционально корню квадратному из толщины среды, то и максимальное n_m увеличивается также. Величина n_m зависит также от степени селективности, и она должна быть выбрана такой, чтобы перекрестными искажениями можно было бы пренебречь. Вместе с тем может оказаться, что для общего увеличения информационной емкости объемного ГЗУ полезней уменьшить число точек в странице и увеличить n_p , так как дифракционная эффективность, отнесенная к точке обратно пропорциональна квадрату числа этих точек [11], и большой эффект будет от увеличения n_m .

Из проведенных рассуждений следует, что существенное развитие оптоэлектронной индустрии позволило создать: высокочастотные жидкокристаллические ПВМС и устройства, позволяющие формировать страницы данных в 10^5 – 10^6 и больше пикселей; высокоэффективные матрицы фотоприемников, а также усовершенствовать полупроводниковые лазерные источники света.

Осуществлен прорыв в создании новых фотополимерных сред для хранения информации и существенно улучшены характеристики уже известных сред. И можно в ближайшее время ожидать, что вполне коммерчески доступной, на достаточно дешевых устройствах и материалах, будет создана терабитная голографическая объемная память со временем выборки, меньше, чем 1 мс и с одновременным восстановлением 1 Мб информации.

Литература

1. *Скляр О.К.* Современные волоконно-оптические системы передачи: аппаратура и элементы. – М.: Солон – Р, 2001. – 237 с.
2. *Вербицкий А.А.* Основы проектирования цифровых оптоэлектронных систем связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 159 с.
3. *Акаев А.А., Гуревич С.Б., Жумалиев К.М., Муравский Л.И., Смирнова Т.Н.* Голография и оптическая обработка информации. – Бишкек – С.Петербург, 2003. – 571 с.
4. *Акаев А.А., Gurevich S.B., Zhumaliev K.M.* Holographic memory / Allerton Press. – N.Y., 1998. – P. 242.
5. *L.d'Auria, Huignard J.P., Slezak C., Spitz E.* Experimental holographic read-write memory using 3-D storage // *Applied Optics*. – 1974. – Vol. 13. – P. 808–818.
6. *Psaltis D., Fai Mok.* Holographic memories // *Scientific American*. – 1995. – Vol. 273. – P. 52–58.
7. *Ingwall R.T., Waldman D.* CROP photopolymers for holographic recording. // *SPIE's ITG Newsletter Holography*. – 2000. – V. 11. – No. 2. – P. 1–7.
8. *Акаев А.А., Жумалиев К.М., Гуревич С.Б., Гуревич Б.С.* Оптическое изображение: передача, обработка, хранение. – Бишкек, 1999.
9. *Pu A., Psaltis D.* High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks // *Applied Optics*. – 1996. – Vol. 35. – No. 14. – P. 2389–2398.
10. *Burr G.W., Jefferson C.M., Coufal H., Jurich M., Hoffnagle J.A., Macfarlane R.M. and Shelby R.* Volume holographic data storage at an areal density of 250 gigapixels/in² // *Optical letters*. – 2001. – Vol. 26. – No7. – April. 1.
11. *Акаев А.А., Гуревич С.Б., Жумалиев К.М.* Голографические системы хранения и выборки информации. – Бишкек – С.Петербург: Илим, 2000.