

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПАМЯТИ

УДК 681.327.68 : 621.373.826

Ю. В. ВОВК, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ, Ю. А. ЩЕПЕТКИН

(Новосибирск)

МЕТОДЫ БЫСТРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ ДВОИЧНЫХ ДАННЫХ

(Обзор)

В последнее десятилетие большое внимание уделяется работам по созданию нового поколения оптических запоминающих устройств (ЗУ), предназначенных для накопления чрезвычайно больших объемов цифровых данных и обладающих высокими скоростями их записи. Так, за рубежом исследования в этой области ведут свыше 20 фирм, в их числе практически все крупные предприятия электронной промышленности. Около 10 организаций разрабатывают регистрирующие среды и элементы таких ЗУ [1]. Согласно имеющимся прогнозам, оптические ЗУ получат широкое распространение не раньше 1990 г. [2]. Поэтому в настоящее время предпринимаются попытки создать оптические ЗУ, которые явились бы основой информационных библиотек для долговременного ($10 \div 20$ лет) хранения больших объемов ($10^{13} \div 10^{15}$ бит) текстовой и видеоинформации, имеющих время произвольного доступа в подсистеме из 10^{13} бит не более $5 \div 10$ с.

Работы ориентированы на создание устройств, конкурентоспособных с перспективными системами магнитной записи. Для этого, по мнению зарубежных специалистов [3], необходимо, чтобы оптические ЗУ обеспечивали плотность записи $3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$ бит/см², длительность хранения $10 \div 20$ лет, стоимость носителя в пересчете на единицу объема памяти $10^{-7} \div 10^{-8}$ цент/бит, скорость записи по одному каналу $10 \div 1000$ Мбит/с. Наиболее существенным в данном случае является экономический фактор [4].

Цель настоящего обзора — отметить основные направления исследований в области оптических ЗУ и дать анализ преимуществ и недостатков апробируемых технических решений.

Существует достаточно много проектов оптических ЗУ. В подавляющем большинстве — это ЗУ с последовательной (побитовой) записью данных на вращающиеся носители. По скорости записи их можно условно разделить на две группы [4]: коммерческие ЗУ, имеющие скорость регистрации до 10 Мбит/с, и ЗУ для специальных целей со скоростью записи свыше $30 \div 40$ Мбит/с. Для побитовой записи быстрой регистрацией можно считать скоростной и преодоление которой требует, как правило, существенного усложнения устройства. Граница эта весьма условна и определяется из простых соотношений: если принять размер информативного элемента (изображения «бита») порядка 1 мкм, расстояние между ними (период следования) ~ 2 мкм, то при скорости записи 10 Мбит/с линейная скорость носителя должна быть 20 м/с, что для стандартного диска диаметром 356 мм соответствует частоте вращения

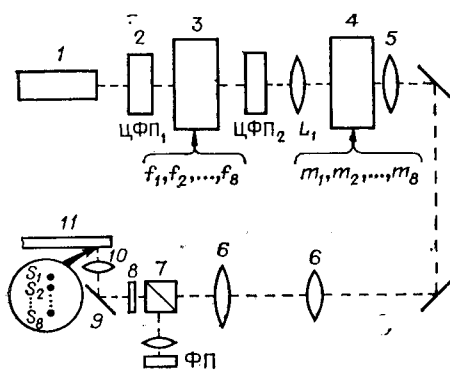


Рис. 1.

схема одного из них — 8-канального оптического ЗУ (фирма RCA, США) — приведена на рис. 1 [5]. Луч лазера 1 с помощью расщепителя, содержащего цилиндрический формирователь пучка (ЦФП) 2 и акустооптический модулятор (АОМ) 3, работающий в режиме многочастотного управления, разделяется на 8 лучей равной интенсивности. Каждый из этих лучей через согласующее оптическое устройство (ЦФП₂ и L₁) попадает на один из оптических входов 8-канального акустооптического модулятора 4 (МАОМ), где прерывается (модулируется) в соответствии с записываемой двоичной информацией. Часть оптической схемы, расположенной между МАОМ и диском 11, содержит объектив 5, телескопическую систему 6, поляризационный светоделитель 7, четвертьволновую пластинку 8, зеркало гальванометра 9 и выходной микрообъектив 10. На поверхности диска одновременно формируется растр из восьми точек ($S_1 \div S_8$), расположенный по радиусу диска. Благодаря этому скорость записи может быть увеличена в 8 раз по сравнению с одноканальной системой. Основываясь на опыте разработки одноканального ЗУ, специалисты фирмы RCA надеются получить скорость записи около 400 Мбит/с и емкость памяти оптического диска при двусторонней регистрации около 10^{11} бит.

С целью уменьшения влияния пыли, царапин и других дефектов носителя в дисковых ЗУ с побитовой записью применяют эффективный метод защиты, сущность которого заключается в том, что фоточувствительное покрытие носителя герметизируют, а запись и считывание информации ведут через относительно толстое стекло подложки. Такой носитель, известный под названием «воздушный сэндвич» [6], конструктивно представляет два соосных стеклянных или пластмассовых диска толщиной 1 мм, разделенных зазором $\sim 0,5$ мм. Диски вместе с герметизирующими кольцами ограничивают защищенный от внешних влияний объем. На внутренние поверхности дисков наносят регистрирующую среду. Ожидается, что такая конструкция диска позволит довести срок хранения информации, записанной на тонких металлических пленках, до 10 лет [7].

В другом ЗУ, получившем название системы MASTAR (фирма «Harris», США) [8] и имеющем скорость записи ~ 32 Мбит/с, применен двухкаскадный акустооптический сканер. Оптическая схема устройства показана на рис. 2. Луч газового лазера 1 модулируется по интенсивности акустооптическим затвором 2 в соответствии с записываемой двоичной информацией и далее разворачивается по радиусу вращающегося носителя 5. Для повышения быстродействия и разрешающей способности используется двухкаскадный сканер. Первый каскад — акустооптический дефлектор 3, на электрический вход которого подается частотно-модулированное по линейному закону управляющее напряжение; второй каскад — бегущая акустическая рефракционная линза 4 [9, 10], которая перемещается синхронно со световым пучком и обеспечивает его допол-

около 30 об./с. Ясно, что любое увеличение линейной плотности записи или скорости вращения приведет к сдвигу этой границы в сторону увеличения скорости регистрации.

Радикальное увеличение быстродействия (без повышения скорости вращения носителя) при побитовой записи достигается путем введения развертки луча поперек движения носителя или путем применения многоканальной записи. Известны примеры устройств, основанных на использовании таких способов записи.

I. Оптические ЗУ с побитовой записью данных.

Принципиальная

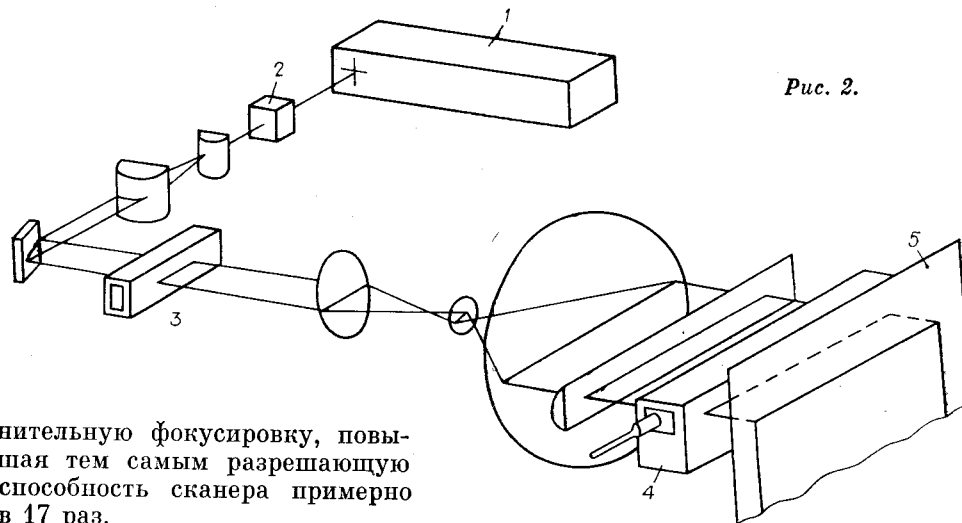


Рис. 2.

нительную фокусировку, повышая тем самым разрешающую способность сканера примерно в 17 раз.

Запись ведется на фишу, изготовленную из фотопленки толщиной 175 мкм. Стабилизация пленки в зоне записи осуществляется с помощью воздушной подушки между двумя направляющими, разделенными зазором 200 мкм. При давлении $1,2 \div 1,7$ атм отклонение пленки от фокальной плоскости не превышает ± 2 мкм.

Фиша — диск только в информационной области (радиус 66 мм), в действительности это квадрат с длиной стороны 160 мм. Зона записи содержит 39 кольцевых дорожек. Каждая дорожка отделена от соседней защитным промежутком в 50 мкм. В зоне дорожки вдоль радиуса с помощью сканера записываются 792 точки, из которых 512 являются информационными, остальные — служебными (предназначены для маркировки начала записи, коррекции ошибок, обозначения номера зоны и т. д.). Избыточное кодирование позволяет исправить групповые ошибки вплоть до 73 бит, уменьшить вероятность их появления до величины 10^{-11} и обнаружить некорректируемые ошибки с вероятностью пропуска 10^{-14} . Для коррекции используются коды Рида — Соломона.

Запись ведется He—Cd-лазером, считывание со скоростью около 5 Мбит/с — He—Ne-лазером. Информационная емкость одной фиши 10^9 бит. Предполагается, что ЗУ будет содержать 10 каруселей по 1000 фиш в каждой. Общий объем памяти 10^{13} бит, предполагаемое время выборки ~ 8 с.

Отметим существенные отличия системы MASTAR от других оптических ЗУ с побитовой записью. Прежде всего, это использование многопозиционного немеханического сканера и гибкого носителя. Непрерывная развертка луча поперек движения пленки позволяет отказаться от сложных прецизионных (погрешность $\sim 0,1$ мкм) систем позиционирования луча и значительно уменьшить время поиска нужной дорожки.

Выбор фотопленки в системе MASTAR обеспечивает стоимость хранения информации порядка $10^{-8} \div 10^{-9}$ цент/бит [3]. Кроме того, галогидосеребряная эмульсия в настоящее время является единственной средой, на которой продемонстрирована долговременная (более 10 лет) стабильность записи [7]. Фотопленка даже с очень высоким разрешением (порядка 1000 лин./мм и более) имеет примерно на 2 порядка большую чувствительность, чем любая другая среда с тепловым механизмом записи. Кроме того, специалисты фирмы «Harris» исследуют возможность использования в подобных ЗУ электрофотографических материалов, обладающих такой же, как у фотопленки, высокой чувствительностью — $(1 \div 5) \cdot 10^{-5}$ Дж/см².

Следует отметить, что вопрос о повышении чувствительности перспективных сред для целей скоростной записи является более актуаль-

ным, чем для обычных коммерческих ЗУ с малой скоростью регистрации. Обусловлено это двумя факторами: существенным усложнением оптической схемы ЗУ, а следовательно, неизбежным уменьшением КПД по свету и снижением времени экспонирования для исключения смазывания записываемого пятна при высоких скоростях движения носителя (или светового луча).

Найдем, например, среднюю мощность лазера, исходя из требуемой скорости записи по одному каналу 40 Мбит/с, чувствительности регистрирующей среды 10^{-2} Дж/см² (Drexon, теллурические покрытия и др.) и КПД по свету одного канала 1% (соответственно суммарный КПД для 8-канального регистратора 8%). Если площадь информативного элемента $\sim 10^{-8}$ см², то средняя мощность излучения на поверхности регистрирующей среды должна быть не более 10^{-2} Дж/см² · 10^{-8} см² · $40 \cdot 10^6$ 1/с = 4 мВт, а средняя мощность лазера при скважности импульсов 2 — не менее 800 мВт.

Основные недостатки, присущие оптическим ЗУ, — использование дорогих, имеющих большие габариты и вес аргоновых (при записи) и гелий-неоновых (при считывании) лазеров [11]. В связи с этим разработчики оптических ЗУ рассматривают, как правило, альтернативные варианты на основе полупроводниковых лазеров. Так, в многоканальных ЗУ предложено применять линейку полупроводниковых лазеров [12]. Это позволит исключить из оптической схемы (см. рис. 1) расщепитель и многоканальный акустооптический модулятор, существенно упростить ее, повысить КПД по свету и снизить таким образом среднюю мощность лазера. Однако разработка линейки полупроводниковых лазеров со средней мощностью излучения $50 \div 100$ мВт, скважностью расположения излучающих элементов около 2, минимальным астigmatизмом и одно-модовым характером излучения — сложная техническая задача [13, 14].

Несмотря на ряд очевидных недостатков ленточного носителя, этот тип носителя занимает при заданной емкости памяти минимальный объем и поэтому позволяет осуществить непрерывную регистрацию очень больших массивов информации. Одна из серьезных задач, возникающих в ЗУ с побитовой записью на ленту, — необходимость стабилизации носителя по всей его ширине. Требование к точности позиционирования носителя в плоскости фокусировки сильно возрастает с увеличением плотности записи. Если диаметр изображения информативного элемента составляет, например, ~ 1 мкм, то при допустимой расфокусировке 20% и длине волны света 0,5 мкм биения носителя вдоль оптической оси не должны превышать 1 мкм. Не менее сложной является задача синхронизации при считывании. Все эти технические трудности не позволяют в настоящее время создать оптическое ЗУ на основе ленточного носителя, близкое по плотности записи к дисковым накопителям.

Таким образом, анализ разрабатываемых вариантов скоростных регистраторов с последовательной (поэлементной) записью данных позволяет сделать вывод о том, что увеличение скорости записи свыше $10 \div 30$ Мбит/с приводит к существенному усложнению оптических систем таких устройств.

II. Оптические ЗУ с параллельной (постраничной) записью данных.

В отличие от побитовых систем в страничных голографических регистраторах высокое быстродействие обеспечивается при гораздо более низких скоростях движения носителя, поскольку сам принцип записи является многоканальным. Кроме того, при страничной организации практически исчезает требование высокой точности стабилизации регистрирующей среды и позиционирования. Все это позволило фирме «Nagis» (США) продемонстрировать запись данных на фотопленку со скоростью до 10^9 бит/с [15].

Регистратор этой фирмы содержит импульсный аргоновый лазер, модулятор света, устройство отклонения луча поперек пленки, фотоприемное устройство чтения, электронные блоки управления и достаточно сложную оптическую схему формирования голограмм Фурье.

В качестве транспаранта, преобразующего электрический сигнал в оптический, используется многоканальный акустооптический модулятор (два блока по 17 каналов). Светозвукопровод выполнен из плотного флинтowego стекла, пьезоэлектрический преобразователь — из ниобата лития. Несущая частота электрического сигнала 116,7 МГц, скорость преобразования электрического сигнала в оптический $29,4 \text{ Мбит/с} \times 34 \approx 10^9$ бит/с. Количество бит в голограмме $128 \times 34 = 4352$ бит. Мощность управляющего сигнала на 1 канал 0,56 Вт. Дифракционная эффективность 40%.

Импульсный аргоновый лазер («Spectra Physics», модель 165) с синхронизацией мод и акустооптическим устройством вывода излучения имеет следующие параметры: длительность импульса $2 \cdot 10^{-9}$ с; частота повторения импульсов 250 кГц; энергия света в импульсе $6,9 \cdot 10^{-7}$ Дж (импульсная мощность ~ 350 Вт).

Голограммы размером $1,16 \times 0,125 \text{ мм}^2$ записывались на фотопленке AGFA 10E56 (ширина 35 мм), движущейся со скоростью 4 м/с.

Системы со скоростной голографической записью пока не получили дальнейшего развития. Одна из основных причин — использование сложных, уникальных элементов (многоканальные акустооптические модуляторы, импульсные лазеры, фотоматрицы). В таких системах имеется большое количество оптических узлов, требующих юстировки не только в процессе сборки, но и при их эксплуатации [16]. Не найден технически простой способ безаберрационного отклонения поперек ленты и совмещения с требуемой точностью предметного и опорного пучков. Для этой цели используются сложные прецизионные электромеханические устройства или акустооптические дефлекторы с многоэлементным (~ 100) линзовым или гололинзовым растром. При большой скорости преобразования информации ширина информативного элемента в многоканальном акустооптическом модуляторе много больше его размера вдоль направления распространения звука [17]. Это существенно усложняет согласование восстановленного с голограммы изображения с фотоматрицей.

Тем не менее, несмотря на отмеченные недостатки, метод страничной голографической записи, по-видимому, наиболее перспективен для достижения скоростей записи свыше 10^9 бит/с, поскольку он наиболее полно реализует принцип многоканальной организации ЗУ. Предпосылками для создания таких регистраторов являются наличие надежно функционирующих страничных голографических ЗУ [18], использование новых акустооптических и магнитооптических материалов для модуляторов [16], совершенствование параметров ПЗС-матриц и освоение новых микросхем эмиттерно-связанной логики, существенно упрощающих изготовление электронных узлов быстродействующих ЗУ. Наиболее узкое место в разработке страничных голографических ЗУ с многоканальными акустооптическими модуляторами — отсутствие отечественного импульсного лазера с требуемыми параметрами.

III. Оптические ЗУ с параллельной (пословной) записью данных.

В этом классе оптических ЗУ большой интерес представляет высокоскоростной голографический регистратор (WHR) с пословной организацией записи (фирма «Harris», США) [19]. Схема такого устройства показана на рис. 3. Пучок света аргонового лазера 1 через электромеханический затвор 2 и согласующий объектив 3 попадает на акустооптический расщепитель 4, где делится на два пучка: сигнальный (С) мощностью 160 мВт и опорный (О) мощностью 20 мВт. Сигнальный пучок формируется объективами 8, 10 и цилиндрической линзой 9 и имеет перетяжку по одной координате, совпадающую с зоной акустооптического взаимодействия многоканального модулятора 11. На электрические входы модулятора подается высокочастотное напряжение; наличие его на i -м входе означает, что значение i -го разряда записываемого слова равно 1. Дифрагировавшая часть сигнального пучка попадает на объектив 13, формирующий в плоскости диафрагмы 15 одномерный фурье-образ транспаранта 11. Цилиндрическая линза 14 совместно с объективом 13

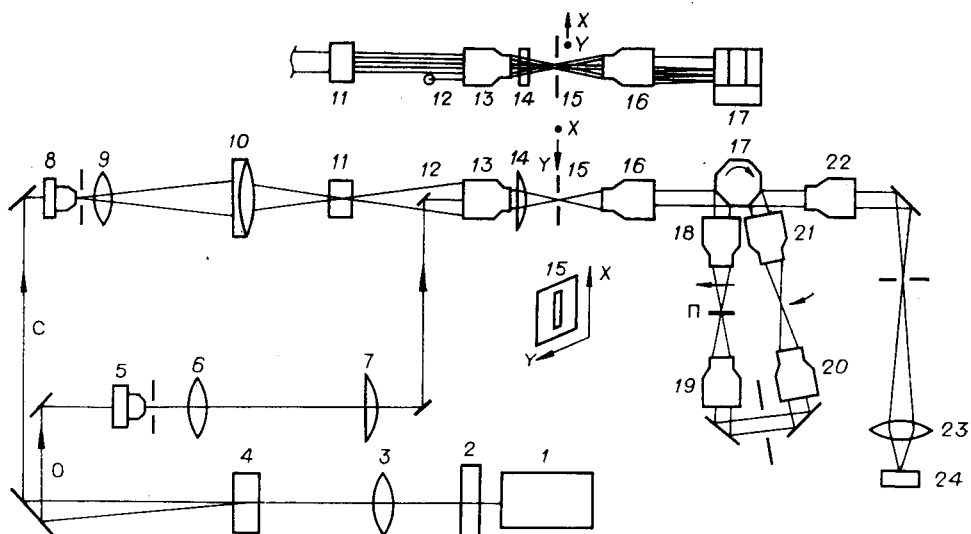


Рис. 3.

проецируют изображение перетяжки сигнального луча в направлении Y . С помощью объективов 5, 6, цилиндрической линзы 7 и зеркала 12 на входе объектива 13 создается опорный пучок, идентичный сигнальному. В плоскости маски 15 получается одномерная голограмма Фурье, размеры которой ограничиваются щелью. КПД по свету опорного канала составляет $\sim 10\%$, сигнального — $0,25\%$. Минимальное отношение интенсивности опорного луча (2 мВт) к интенсивности предметного (0,4 мВт) составляет 5:1 и может быть увеличено путем уменьшения дифракционной эффективности сигнального модулятора 11.

Смещение голограмм поперек движения ленты осуществляется многограным барабанным сканером 17 и системой из двух объективов 16 и 18, которые служат для переноса изображения голограмм в плоскость фотошленки П. Направление движения пленки перпендикулярно плоскости чертежа.

Голограммы имеют размер 22×750 мкм² и ориентированы длинной стороной вдоль направления движения фотошленки. В поперечном направлении с помощью сканирующего устройства записывается 1600 голограмм (ширина пленки 35 мм). Продемонстрирована возможность записи с линейной плотностью $2 \cdot 10^5$ бит/мм.

Каждый канал многоканального акустооптического модулятора имеет полосу пропускания 10 МГц. В первом варианте регистратора использовался 20-канальный модулятор. Записанные голограммы имели дифракционную эффективность $\sim 0,5\%$. Отношение сигнал/шум в восстановленном изображении составляло 100:1. Считывание осуществлялось линейкой фотоприемников 24. Оптико-механическая часть канала считывания, содержащая объективы 19–22, цилиндрическую линзу 23 и скапер 17, обеспечивала обратное преобразование Фурье голограммы и совмещение восстановленного изображения с неподвижной линейкой фотоприемников. В усовершенствованном варианте регистратора использовался 128-канальный модулятор [8]. Голограммы размером 13×800 мкм² сканировались поперек 35-миллиметровой фотошленки 40-гранным зеркальным барабаном. Оптико-механическая схема регистратора совпадает с приведенной на рис. 3. Показана возможность записи 750 Мбит/с с относительной частотой ошибок $< 10^{-7}$.

Приведем основные отличия рассмотренного регистратора от голографического ЗУ с постраничной записью.

Применение одномерного многоканального акустооптического модулятора позволяет сократить длину звукопровода в направлении рас-

пространения звука, уменьшить ширину отдельных каналов и снизить, благодаря этому, мощность управления. В 20-канальном варианте модулятора ширина отдельного канала $\sim 0,15$ мм [19], поэтому при дифракционной эффективности 37% мощность управления на 1 канал составила 100 мВт, что примерно в 5 раз меньше, чем у двумерного модулятора с такой же дифракционной эффективностью и таким же материалом световодопровода [15].

Одномерный транспарант выполняет одновременно функции модулятора-прерывателя лазерного излучения. Кроме того, поскольку опорный пучок проходит через акустооптический расщепитель, работающий на той же частоте, что и модулятор в сигнальном канале, в плоскости регистрации голограммы образуется стационарная интерференционная картина. Оба фактора позволяют использовать лазеры непрерывного излучения и увеличить длительность экспозиции, т. е. отказаться от применения сложных и дорогих импульсных лазеров.

Наиболее серьезным недостатком регистраторов с пословной организацией записи является то, что одномерные голограммы по одной из координат неустойчивы к дефокусировке, т. е. теряется одно из существенных преимуществ голографической записи. При большой плотности записи, когда ширина голограммы становится соизмеримой с размером изображения одного информативного элемента, допустимая дефокусировка уменьшается до такой же величины, что и при побитовой записи.

Наиболее сложный узел в рассмотренном регистраторе — скапер, используемый для развертки пучка света в направлении, перпендикулярном движению ленты, и устройство для его синхронизации [16]. Подобный недостаток присущ, по-видимому, всем ЗУ, использующим ленточный носитель. Однако применение ленты оправдано только там, где необходима запись очень больших объемов информации. Если же емкость памяти не превосходит $10^9 \div 10^{10}$ бит, то целесообразно использовать дисковый носитель.

Примерами могут служить устройства, описанные в работах [20, 21]. Они предназначены для цифровой записи и воспроизведения звука, поэтому имеют относительно невысокое быстродействие. Запись ведется в виде линейных (одномерных) голограмм Фурье, ориентированных длинной стороной по радиусу диска. Голограммы емкостью 100 бит формируются с помощью 100-канального электрооптического модулятора [21]. Запись и считывание производятся He—Ne-лазером.

Запись радиально-ориентированных линейных голограмм позволяет устранить противоречие между быстродействием и ограниченной скоростью движения носителя, поэтому такие регистраторы принципиально могут обеспечить очень высокую скорость записи-считывания. Если при этом интерференционные полосы в голограммах располагаются вдоль направления движения носителя, то запись может производиться непрерывно с помощью маломощных газовых лазеров [21].

Инвариантность фурье-голограмм к небольшим сдвигам позволяет снизить требование к точности радиальной системы позиционирования. Например, если голограмма имеет длину 500 мкм, то необходимая точность слежения за дорожкой при считывании составляет ± 15 мкм [21]. Для регистраторов с побитовой записью допустимые биения не должны превосходить $\sim 10\%$ от диаметра изображения бита, т. е. $\sim 0,1$ мкм.

Размеры линейной голограммы Фурье можно относительно легко согласовать с размерами сигналограммы накопителей на магнитных дисках (НМД). Реализация же дискового ЗУ на базе хорошо отработанных узлов серийных НМД позволит не только существенно упростить разработку, но, главное, в N раз (N — количество битов в одномерной голограмме) увеличить скорость и плотность записи без существенного изменения электромеханического привода НМД. Создание однодисковых (и тем более многодисковых [22]) оптических ЗУ немислимо без разработки принципиально важного элемента — малогабаритной оптической головки записи-считывания данных.

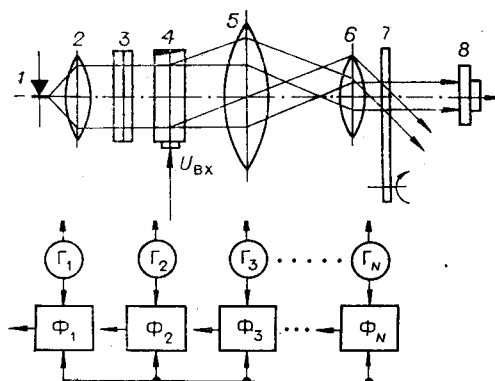


Рис. 4.

В этой связи рассмотрим особенности применения полупроводниковых лазеров для скоростной записи одномерных (линейных) голограмм. Такой лазер, как известно, имеет ряд существенных недостатков, затрудняющих его величина продольной когерентности около 100 мкм [23], что требует выравнивания оптических путей опорного и сигнального пучков с точностью не хуже 10 мкм.

Классические оптические схемы голографических регистраторов имеют малый коэффициент использования света, обычно не превышающий 1 ÷ 2%. Поэтому при скорости записи 50 Мбит/с, плотности 10⁷ бит/см² и чувствительности регистрирующего материала (эмульсии И-880Г, ВРЛИ) 2 · 10⁻⁴ Дж/см² средняя мощность излучения лазера должна быть не менее 50 ÷ 100 мВт.

Использование метода частотного разделения сигналов при формировании одномерных голограмм Фурье, позволяет устранить указанные выше недостатки [24]. Схема устройства регистрации, основанного на таком методе, показана на рис. 4. Пучок света полупроводникового лазера 1 коллимируется объективом 2, фокусируется цилиндрической линзой 3 на акустооптический модулятор 4. Лазер ориентирован так, что плоскость его *p-n*-перехода параллельна (или же составляет небольшой угол) фронту акустической волны в модуляторе.

Каждый разряд записываемого *N*-разрядного слова представлен во входном электрическом сигнале модулятора

$$U_{\text{вх}} = \sum_{i=1}^N U_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$

синусоидальным напряжением соответствующей частоты, причем $U_i = U$ или $U_i = 0$ в зависимости от значения одноименного разряда, равного 1 или 0.

Электронный блок управления в этом случае содержит *N* генераторов ($\Gamma_1 \div \Gamma_N$), частоты которых образуют эквидистантную сетку, *N*-разрядный коммутатор ($\Phi_1 \div \Phi_N$) и линейный сумматор (Σ) напряжений с выходов коммутатора.

Когда световая апертура модулятора полностью заполнится записываемым сигналом, на полупроводниковый лазер подается короткий импульс тока и с помощью телескопической системы 5, 6 изображение голограммы (набор синусоидальных решеток) переносится на светочувствительное покрытие диска 7.

При считывании информации с голограммы полупроводниковый лазер переключается в режим непрерывного излучения. На модулятор поступает напряжение, соответствующее сумме всех гармоник, и на голограмму проецируется изображение *N* бегущих синусоидальных решеток. Если в голограмме имеется пространственная гармоника, соответствующая данному разряду, то интенсивность прошедшего через голограмму светового пучка оказывается промодулированной с временной

частотой, равной частоте напряжения, представляющего этот разряд во входном сигнале модулятора. Многочастотный сигнал с фотоприемника \mathcal{B} подается на вход параллельного N -канального анализатора спектра, составленного из набора синхронных детекторов ($\Phi_1 \div \Phi_N$). Наличие напряжения на выходе i -го фильтра соответствует значению 1 i -го двоичного разряда, отсутствие напряжения — 0 [25].

Рассмотренный метод записи не критичен к величине продольной когерентности излучения лазера, что позволяет получить высокую плотность записи даже при использовании обычных импульсных полупроводниковых лазеров с малой длиной когерентности. В оптической схеме отсутствует отдельный канал опорного пучка. Это существенно упрощает процесс юстировки системы и позволяет уменьшить ее габариты.

При использовании метода частотного кодирования данных, когда каждый бит записываемого слова занимает всю световую апертуру модулятора, возможно снизить требования к качеству светозвукопровода. Освещение модулятора (транспаранта) может иметь гауссово распределение интенсивности по апертуре. Благодаря этому упрощается оптическая схема и, главное, повышается ее КПД по свету (до $15 \div 30\%$).

Из недостатков метода отметим два наиболее существенных.

Для уменьшения смазывания движущегося изображения голограммы необходимо очень малое время экспозиции при записи (порядка нескольких наносекунд). Уменьшение длительности импульса света приводит, как показывает расчет, к увеличению пиковой мощности излучения до такой величины, которая лежит вблизи порога катастрофической деградации лазера.

Видимая простота оптической системы головки записи-чтения данных достигается за счет существенного усложнения электронного устройства управления. Однако такой выбор, на наш взгляд, вполне целесообразен.

Заключение. Таким образом, разрабатываемое в настоящее время поколение оптических ЗУ ориентировано на накопление и долговременное хранение больших ($10^{10} - 10^{15}$ бит) массивов цифровых данных, поступающих со скоростями $10^7 - 10^9$ бит/с. Доминирующее требование к таким ЗУ — обеспечение низкой стоимости хранения данных ($10^{-7} - 10^{-8}$ цент/бит). Совершенствование характеристик ЗУ идет по пути использования полупроводниковых лазеров (в том числе решетчатых лазеров) и акустооптических модуляторов (дефлекторов) света.

В большинстве оптических ЗУ используется последовательный (поэлементный) метод записи со скоростью до 10^7 бит/с на дисковый носитель с емкостью памяти не менее 10^{10} бит. Скорости записи свыше $10^7 - 10^8$ бит/с достигаются путем применения многоканальной последовательной записи данных или путем развертки луча поперек движения носителя.

Наивысшую скорость записи ($\sim 10^9$ бит/с) и наибольший объем регистрируемой информации (до 10^{12} бит) обеспечивают оптические ЗУ с параллельной (постраничной) голографической записью на ленточный носитель. Однако техническая реализация таких ЗУ существенно затруднена из-за сложности оптической системы и отсутствия освоенных промышленностью элементов (например, многоканальных акустооптических модуляторов света, специальных импульсных лазеров).

Более простыми являются оптические ЗУ с пословной записью данных в виде одномерных голограмм. Здесь при объемах регистрируемой информации до 10^{10} бит используется запись одномерных голограмм на дисковый носитель. Существенное уменьшение габаритов и упрощение конструкции оптических головок записи-считывания достигается путем частотного кодирования и гетеродинного считывания данных, а также путем применения полупроводниковых лазеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маршалл М. Блестящие перспективы рынка оптических дисковых накопителей.— Электроника, 1981, т. 54, № 9.
2. Дисковые накопители. (Обзор).— Информационный бюллетень. Сер. Радиоэлектроника за рубежом, 1982, вып. 13 (959).
3. Современное состояние разработок оптических ЗУ с поэлементной организацией процессов записи и считывания. (Обзор).— Информационный бюллетень. Сер. Радиоэлектроника за рубежом, 1981, вып. 16 (936).
4. Бартолини Р. А. Оптическая запись: Информационно-поисковые системы с высокой плотностью записи данных.— ТИИЭР, 1982, т. 70, № 6.
5. Ammon G. J. Archival optical disk data storage.— Opt. Eng., 1981, vol. 20, N 3.
6. McFarlane R. et al. Digital optical recorders at 5 Mbit/s data rate.— Opt. Eng., 1982, vol. 21, N 5.
7. Состояние разработок материалов для оптического накопления данных.— Информационный бюллетень. Сер. Радиоэлектроника за рубежом, 1982, вып. 9 (955).
8. Reddersen B. R., Ralston L. M. Digital optical data storage and retrieval.— Opt. Eng., 1980, vol. 19, N 2.
9. Foster L. C., Grumly C. B., Cohoon R. L. A high resolution linear optical scanner using a traveling wave acoustic lens.— Appl. Opt., 1970, vol. 9, p. 2154.
10. Yao S. K., Weid D., Montgomery R. M. Guided acoustic traveling wave lens for high-speed optical scanners.— Appl. Opt., 1979, vol. 18, N 4, p. 446.
11. McLeod J. Перспективы замены магнитных лент на оптические диски.— Экспресс-информация. Сер. ВТ, 1982, № 25.
12. Bartolini R. A. Media for high density optical recording.— J. Vac. Sci. Technol., 1981, vol. 18, N 1, p. 70—74.
13. Van der Zieb J. P., Logan R. A., Mikulyak R. M. A closely spaced (50 μm) array of 16 individually addressable buried heterostructure GaAs lasers.— Appl. Phys. Lett., 1982, vol. 41, N 1, p. 9.
14. Botass D. et al. High-power individually addressable monolithic array of constricted double heterojunction large-optical-cavity lasers.— Appl. Phys. Lett., 1982, vol. 41, N 11, p. 1040.
15. Roberts H. N., Watkins J. W., Johnson R. H. High-speed holographic digital recorder.— Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 4, p. 841.
16. Айрапетов А. А., Евстафьева О. А. Голографические накопители на ленточных носителях.— Обзоры по электронной технике. Сер. 10. Микроэлектрон. устройства, 1980, вып. 3 (736—80).
17. Вовк Ю. В. и др. Голографическая запись двоичной информации с помощью многоканальных акустооптических модуляторов света.— Автометрия, 1979, № 1.
18. Блок А. А. и др. Экспериментальные исследования достоверности считывания данных в голографических ЗУ.— Автометрия, 1984, № 3.
19. Bardos A. Wideband holographic recorder.— Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 4, p. 832.
20. Kubota K. et al. Holographic disk with data transfer rate: its application to an audio response memory.— Appl. Opt., 1980, vol. 19, N 6, p. 944.
21. Бобринев В. И. и др. Экспериментальные исследования по голографической записи электрических сигналов на дисковый носитель.— В кн.: Первая Всесоюз. конф. по радиооптике: Тезисы докладов. Фрунзе: ФПИ, 1981.
22. Kenney G. C. et al. An optical disk replaces 25 mag tapes.— IEEE Spectrum, 1979, vol. 16, N 2, p. 33.
23. Калашников С. П. и др. Запись фурье-голограмм излучением импульсных полупроводниковых лазеров.— Квант. электроника, 1977, № 8.
24. Вовк Ю. В., Щепеткин Ю. А. Использование частотного разделения сигналов при записи одномерных голограмм излучением полупроводниковых лазеров.— Автометрия, 1981, № 1.
25. Вовк Ю. В., Щепеткин Ю. А. Параллельное гетеродинное считывание двоичных данных из одномерных голограмм Фурье.— Автометрия, 1984, № 3.

Поступила в редакцию 2 января 1984 г.