

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.327.68 : 621.373.826

П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ, Ю. А. ЩЕПЕТКИН

(Новосибирск)

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СКОРОСТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДВОИЧНЫХ ДАННЫХ

При решении задач телеметрии, цифрового телевидения, волоконно-оптической связи и высокопроизводительных вычислений возникает необходимость регистрации больших (до 10^{13} бит) потоков цифровых данных, поступающих со скоростью 10^8 — 10^9 бит/с. Известно несколько проектов скоростных оптических запоминающих устройств (ЗУ), ориентированных на решение поставленной задачи [1, 2].

Цель настоящей статьи — дать качественную и количественную сравнительные оценки достижений и перспектив развития в области скоростных оптических методов записи данных.

Основные типы оптических ЗУ. По способу представления информации на плоском (поверхностном) носителе оптические ЗУ можно разделить на три группы: ЗУ с последовательной (побитовой) записью данных; ЗУ с параллельной (пословной) организацией, когда информация регистрируется в виде линейной, одномерной голограммы, и, наконец, ЗУ с пространственной записью в виде двумерных голограмм.

При побитовой записи информация представляется в виде не перекрывающихся на поверхности светочувствительной среды изображений отдельных бит (пит). В этом случае, согласно терминологии теории передачи информации, реализуется способ пространственного разделения сигналов.

Способы частотного разделения и разделения по форме сигнала наиболее просто выполняются при голографической записи.

Примером частотного метода разделения является запись информации в виде голограмм Фурье. В этом случае двоичная информация представлена в виде набора синусоидальных сигналов различных пространственных частот, причем каждому разряду соответствует своя частота. Другими словами, для записи двоичного сообщения используются сигналы с неперекрывающимися спектрами. Одно из существенных отличий записи с частотным разделением (и разделением по форме) от побитового представления информации состоит в том, что регистрация ее производится массивами (словами или кадрами). Площадь кадра возрастает с увеличением массива, причем каждый бит записывается по всей площади кадра.

В основе современных методов разделения сигналов по форме лежит концепция сложных сигналов [3]. Примером сложного сигнала является ЧМ-сигнал, описываемый функцией Френеля, а способ кодирования двоичной информации такими функциями реализуется при записи голограмм Френеля.

При регистрации двоичной информации наибольшее распространение получили побитовый способ и способ разделения сигналов по частоте,

реализуемый в виде голограмм Фурье. Достоинство последнего по сравнению с голограммами Френеля заключается в том, что сигнал, восстановленный с голограммы Фурье, инвариантен к небольшому сдвигу голограммы относительно считывающего луча.

Методы скоростной записи. Существующие или разрабатываемые оптические устройства памяти можно разделить на ЗУ с низкой (до 10—20 Мбит/с) и высокой (≥ 30 Мбит/с) скоростями записи. Большинство из них использует в качестве носителя оптический диск.

Основной причиной, препятствующей существенному (на порядок и более) повышению быстродействия таких ЗУ, является недостаточная линейная плотность записи (около 600 бит/мм), из-за чего при высоких скоростях регистрации V_z требуемая скорость движения носителя V_n оказывается недопустимо большой. Например, при $V_z = 120$ Мбит/с необходимо, чтобы $V_n = 200$ м/с (или ≈ 300 об/с для диска диаметром 356 мм).

Увеличение линейной плотности записи приводит к повышению быстродействия ЗУ [4]. Используя специальную двухслойную магнитооптическую среду, специалисты японской корпорации НИК получили скорость записи 27 Мбит/с (линейная плотность > 1000 бит/мм, скорость вращения диска 37,5 об/с). Отмечено, что результат близок к физическому пределу процесса записи.

Радикальное увеличение быстродействия без повышения скорости движения носителя достигается путем развертки луча по радиусу диска или применением многоканальной записи, в том числе голографической. Так, в ЗУ с разверткой луча фирмой «Harris» получена скорость записи 30—50 Мбит/с при емкости вращающейся фиши 10^9 бит [5]. В качестве источников света использованы He—Cd-лазер при записи и He—Ne-лазер при считывании. Регистрирующая среда — галондосеребряная эмульсия на пленке.

Многоканальная побитовая запись отличается от хорошо известного одноканального варианта наличием решетки из N полупроводниковых лазеров с индивидуальным управлением. По каждому из каналов на диске записывается своя дорожка. Такой метод регистрации положен в основу проекта накопителя с общей информационной емкостью 10^{12} бит [6]. При параллельном воспроизведении информации с 12 рабочих поверхностей дисков достигается скорость потока данных 1,6 Гбит/с. Каждая оптическая головка имеет интегральную линейку из девяти полупроводниковых лазеров, излучение которых фокусируется общей оптической системой. Один из лазеров используется для слежения за дорожкой.

Снижение необходимой скорости перемещения носителя достигается также при параллельной (пословной) записи информации в виде одномерных (линейных) голограмм Фурье, ориентированных длинной стороной по радиусу диска [2].

Параллельная (постраничная) запись в виде двумерных голограмм, по-видимому, наиболее перспективна при скоростях свыше 10^9 бит/с, поскольку она наиболее полно реализует принцип многоканальной организации ЗУ. Принципиальную возможность голографической записи данных на фотопленку со скоростью до 10^9 бит/с фирма «Harris» (США) продемонстрировала в 1974 г. [7].

В таблице приведена сравнительная оценка параметров четырех рассмотренных вариантов реализации скоростных ЗУ на основе оптических дисков: побитовых (многоканального и с разверткой луча) и голографических (с пословной и страничной организацией данных).

Во всех ЗУ, кроме многоканального, предполагается использование акустооптического модулятора (АОМ), как наиболее быстродействующего.

Метод записи путем развертки луча по радиусу диска в простейшем варианте с однокаскадным сканером ориентирован на использование «бегущей» акустической линзы [8], которая получается в АОМ при распространении акустической волны с линейной частотной модуляцией. В [5] описан двухкаскадный вариант сканера.

Параметр	Побитовая запись		Голографическая запись	
	многоканальная	с разверткой луча	одномерная голограмма	двумерная голограмма
Скорость записи (Мбит/с)	Большая (≥ 100)	Средняя (≈ 30)	Большая (≈ 100)	Очень большая (1000)
Плотность записи (бит/мм ²)	$3,5 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^9$	$0,5 \cdot 10^9 - 5 \cdot 10^9$
Устойчивость к дефокусировке	Плохая	Плохая	Удовлетворительная	Хорошая
Требование к точности позиционирования на дорожку (мкм)	Высокое ($\leq 0,1$)	Низкое ($\approx 10-30$)	Низкое ($\approx 10-30$)	Низкое (10-30)
Устойчивость к повреждениям среды	Плохая	Плохая	Удовлетворительная	Хорошая
Устойчивость к нелинейным искажениям канала записи-чтения (в том числе среды)	Хорошая	Хорошая	Плохая	Плохая
Эффективность среды	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая
Пик-фактор мощности излучения лазера	Низкий	Низкий	Большой	Большой
Устойчивость к неравномерности освещения транспаранта	Хорошая	Удовлетворительная	Хорошая	Плохая
Сложность электронных схем управления (в том числе кодирования)	Большая	Большая	Средняя	Низкая
Возможность миниатюризации	Есть	Есть	Есть	Нет?

При пословной записи одномерная фурье-голограмма, представляющая сумму дифракционных решеток с эквидистантными пространственными частотами, синтезируется в АОМ, а затем ее изображение переносится на светочувствительную поверхность диска [9].

Для формирования двумерных фурье-голограмм в качестве страничного транспаранта используются многоканальные АОМ [7, 10], а запись ведется импульсным лазером.

При голографической записи применяются другие быстродействующие модуляторы, например магнитооптические или электрооптические [11]. По отдельным параметрам они имеют преимущества по сравнению с АОМ, однако по совокупности функциональных возможностей значительно уступают ему.

Сравнительный анализ методов (см. таблицу). Скорость записи при побитовой многоканальной регистрации определяется числом каналов N и максимальной скоростью записи V_3 по каждому из каналов. При использовании полупроводниковых лазеров приближенно можно считать $V_3 = 10$ Мбит/с. Количество каналов записи $N \leq 10$ и ограничено в основном технологией изготовления решеток полупроводниковых лазеров, которая в настоящее время находится на стадии освоения [12].

Максимальная скорость при побитовой записи путем развертки луча с помощью бегущей акустической линзы или при записи информации в виде линейных, одномерных голограмм Фурье определяется быстродействием (полосой пропускания Δf) АОМ.

Число элементов, сканируемых АОМ в единицу времени, максимально при $\tau/\tau_a = 0,5$, где τ — продолжительность ЛЧМ-сигнала, τ_a — апертурное время АОМ [8]. В этом случае время сканирования τ_s равно времени заполнения ячейки, т. е. в течение $\tau_a/2$ АОМ не записывает сигнал. Обозначим $N_p = \Delta f \tau$ — количество разрешаемых по критерию Рэлея элементов. Для уменьшения уровня межсимвольной интерференции обычно выбирают $N_1 = N_p/2$. Тогда с учетом того, что $\tau_s = 0,5\tau_a$, получим для максимальной скорости записи $\max V_3 = N_1/\tau_s = \Delta f/4$.

Таким образом, при записи со скоростью 100 Мбит/с для развертки луча необходим АОМ с высокой дифракционной эффективностью и полосой пропускания порядка 400 МГц. Такие характеристики имеют только АОМ с пьезопреобразователями в виде фазированной решетки излучателей.

При синтезе одномерных голограмм с помощью АОМ и полупроводящих элементов 100 МГц и дифракционную эффективность 10—20 %.

Большим быстродействием обладают устройства со страничной голографической записью, использующие многоканальные акустооптические модуляторы. Экспериментальные образцы модуляторов имеют 16—32 отдельных канала; скорость преобразования информации по каждому из каналов 30—50 Мбит/с, поэтому общая скорость записи может достигать 10^9 бит/с и более.

При очень больших скоростях записи ($>10^9$ бит/с) возникает противоречие между требуемым быстродействием и ограниченной скоростью движения носителя. Минимально необходимое значение ее (при отсутствии зазора между голограммами вдоль дорожки) определяется выражением

$$V_n \geq V_s W / N_r = V_s / (N_r \rho_r k)^{1/2},$$

где N_r — емкость голограммы; ρ_r — плотность записи в голограмме (локальная плотность); $k = L/W \geq [(0,6-1,0)N_r/n_k]^{1/2}$ [10]; W , L — ширина и длина голограммы соответственно; n_k — число каналов АОМ. Например, при $N_r = 1024$ бит, $n_k = 32$, $k = 5,6$, $\rho_r = 10^5$ бит/мм², $V_s = 10^9$ бит/с

$V_n = 42$ м/с, что соответствует ≈ 60 об/с для диска диаметром 356 мм.

Предельная плотность оптической записи на тонком носителе зависит от числовой апертуры выходного объектива оптической системы, длины волны используемого лазерного излучения и уровня шумов рассеяния оптической системы и среды.

При побитовой записи наиболее часто используется тепловой механизм воздействия на регистрирующую среду. В этом случае при пороговом уровне мощности прожигания отверстия, равном половине максимального уровня мощности пучка, и гауссовом распределении энергии в его поперечном сечении диаметр пята определяется выражением $d_0 = 0,56\lambda/A$, где A — числовая апертура оптической системы [14]. С учетом скважности распределения пиков достигнутая плотность записи находится вблизи своего теоретического предела и при записи излучением полупроводникового лазера составляет в ЗУ с малой скоростью регистрации величину порядка $3,5 \cdot 10^5$ бит/мм² (линейная плотность 600 бит/мм, расстояние между дорожками 1,6 мкм). Предполагается, что при использовании линейки полупроводниковых лазеров с малым числом элементов и малой скважностью их расположения aberrации микрообъектива существенно не увеличатся и плотность записи останется по-прежнему высокой.

При голографической регистрации в виде одномерных голограмм на выходе оптической схемы используется микрообъектив с большой числовой апертурой, что создает предпосылки для получения плотности, близкой к плотности побитовой записи. Применение гетеродинамного считывания, фазового кодирования информации в голограмме, селекционной зоны считывания позволило получить плотность записи $2 \cdot 10^5$ бит/мм² [9]. При этом преобладающими становятся шумы рассеяния фотосреды. Влияние таких шумов при гетеродинамном считывании можно оценить на основании модели линейного по амплитуде информационного канала с аддитивным гауссовым шумом и предельной (по Шеннону) пропускной способностью (плотностью записи)

$$\rho_{\max} = \Delta v_{xy} \log_2(1 + \eta_r / \Phi_{ш} \Delta v_{xy}),$$

где Δv_{xy} — двумерная пространственная полоса частот пропускания опти-

ческой системы; η_r — дифракционная эффективность голограммы; $\Phi_{ш}$ — дифракционная эффективность шумовых решеток в единичной полосе пространственных частот. Например, оптическая головка записи-чтения данных [13], содержащая микрообъектив с числовой апертурой 0,5 и полупроводниковый лазер с $\lambda = 0,85$ мкм, имеет полосу частот $\Delta\nu_{xy} = 0,5/\lambda^2 = 6,9 \cdot 10^5$ мм⁻². Тогда при $\Phi_{ш} = 10^{-8}$ мм², $\eta_r = 0,02$ получим, что $\rho_{max} = 1,35 \cdot 10^6$ бит/мм². Известно [15], что при соответствующем выборе способа модуляции и кодирования информационная эффективность ρ_i/ρ_{max} достигает значения 0,5 и более; отсюда максимальная практическая плотность $\rho_i = 7 \cdot 10^5$ бит/мм². Сравнение с полученной плотностью $2 \cdot 10^5$ бит/мм² показывает, что резерва для существенного (на порядок и более) увеличения плотности записи нет.

Следуя методике [15], можно определить значение $\beta = \rho\Phi_{ш}/\eta_r = \rho/2 \cdot 10^6$ как эффективность использования мощности сигнала, а $\gamma = \rho/\Delta\nu_{xy} = \rho/6,9 \cdot 10^5$ как эффективность использования полосы частот оптической системы. Первый показатель является характеристикой среды, второй — оптической схемы. Например, при четырехфазной модуляции и допустимой вероятности ошибок 10^{-5} параметры β и γ соответственно равны: 0,11 (−9,6 дБ — когерентный прием) и 2 (+3 дБ) [15]. Отсюда получаем значения предельной плотности записи $\rho_1 = 2,2 \cdot 10^5$ бит/мм², ограниченной параметрами среды, и $\rho_2 = 1,38 \cdot 10^6$ бит/мм², ограниченной полосой пропускания оптической системы. При $\rho_1 < \rho_2$ локальная плотность записи прямо пропорциональна дифракционной эффективности голограммы η_r и обратно пропорциональна энергетическому спектру шума $\Phi_{ш}$.

Исследования способа записи с бегущей акустической линзой показали, что при использовании однопериодных АОМ обеспечить требуемую плотность значительно сложнее, чем при регистрации одномерных голограмм. Дело в том, что дифракционные решетки, образующие фурье-голограмму, можно записать с точностью до несущественного медленно изменяющегося фазового сдвига между ними. При побитовой записи фазовые искажения в оптико-электронном тракте формирования ЛЧМ-сигнала увеличивают aberrации акустической линзы и оказывают сильное влияние на функцию рассеяния точки. В таблице приведена плотность, реализованная в системе с двухкаскадным сканером [5].

При голографической записи двумерных массивов данных и быстрой выборке информации из произвольной голограммы наиболее существенны ограничения предельной плотности записи, обусловленные aberrациями оптической схемы дефлектора и неполным использованием светового диаметра фурье-объектива [16]. Поэтому достигнутые плотности ниже, чем при побитовой регистрации. Однако в голографическом ЗУ с подвижным носителем (диском), у которого позиционирование на нужную голограмму производится путем перемещения носителя относительно считывающего пучка, имеется большой, пока не реализованный резерв повышения плотности записи. Локальное значение ее оценивается как $1,5 \cdot 10^6$ бит/мм², среднее — $5 \cdot 10^5$ бит/мм² [16].

Устойчивость к дефокусировке в основном определяется размером (диаметром) d изображения записанного информационного элемента. Так, если гауссов пучок имеет диаметр d_0 (по уровню 0,5 максимальной интенсивности), то при допустимом уширении его на 10 % биения носителя Δ вдоль оптической оси не должны превышать $\Delta \leq d_0^2/\lambda$, где λ — длина волны света. При побитовой записи диаметр пята $d_0 \approx 1$ мкм, поэтому при $\lambda = 0,85$ мкм $\Delta \leq 1,2$ мкм.

При записи информации в виде двумерных голограмм биения носителя (дефокусировка) приводят к уменьшению эффективной площади голограммы. Допустимые значения Δ определяются размером голограммы, углом схождения опорного и информационного пучков и уровнем допустимых дифракционных помех. Для голограммы диаметром $d_r = 200$ — 300 мкм ориентировочно $\Delta \leq 20$ — 30 мкм, причем Δ возрастает с увеличением d_r .

Линейные (одномерные) голограммы неустойчивы к дефокусировке. Если ширина голограммы соизмерима с диаметром пита (≈ 1 мкм), то допустимые биения носителя такие же, как при побитовой записи [11]. При большой ширине голограммы (> 3 мкм) точность установки фокальной плоскости микрообъектива $\Delta \leq 3-5$ мкм и определяется уровнем искажений переходной (аппаратной) функции (ПФ) оптической головки [13] и допустимым смещением максимума ПФ при движении микрообъектива вдоль оптической оси.

Требования к точности позиционирования на дорожку в ЗУ с побитовой записью очень жесткие: здесь допустимы отклонения не более 0,1 диаметра пита ($\leq 0,1$ мкм). Разработка системы слежения за несколькими дорожками, обеспечение взаимозаменяемости дисков и оптических головок — одна из наиболее серьезных задач, возникающих в ЗУ с многоканальной побитовой регистрацией.

Основное отличие ЗУ с разверткой луча поперек движения носителя заключается в том, что при большом диапазоне сканирования можно (за счет небольшого снижения скорости) отказаться от слежения за дорожкой, т. е. применять более простую, разомкнутую (без обратной связи) систему позиционирования оптической головки [5].

При голографической записи требования к точности радиальной системы позиционирования существенно уменьшаются из-за инвариантности фурье-голограмм к небольшим, порядка $0,1 d_r$, сдвигам.

Устойчивость к повреждениям оптического носителя определяется в основном двумя факторами: уровнем избыточности записи и площадью изображения информационного элемента.

При голографической записи каждый бит страницы или слова записывается на всей площади голограммы, поэтому влияние дефектов сказывается тогда, когда их размеры по порядку линейной величины становятся соизмеримыми с размерами голограммы. В работе [17] показано, что если эффективный диаметр голограммы равен 240 мкм (емкость 10^3 бит), то микродефект размером 12×12 мкм не увеличивает исходную вероятность ошибки (10^{-10}), а 30 таких микродефектов снижают достоверность до уровня 10^6 бит/сбой.

Для уменьшения влияния дефектов среды в побитовых ЗУ кроме технологических и конструкторских мер широко используются аппаратные средства: помехоустойчивое кодирование и многократное перемежение для обнаружения и устранения длинных пакетов ошибок. Сверхчистая технология и герметизация носителя снижают вероятность ошибки до $10^{-4}-10^{-5}$, а применение корректирующих кодов с избыточностью до 25 % снижает вероятность ошибки до 10^{-11} и менее.

Несмотря на сложность, избыточное кодирование является более универсальным по сравнению с голографическим методом повышения достоверности. Например, при сверхплотной записи, когда достоверность ограничена влиянием шумов рассеяния носителя, голографический метод записи не позволяет снизить вероятность ошибки ниже уровня, определяемого известными соотношениями для канала с аддитивным гауссовым шумом и поэлементным приемом информации [18]. В основе работы кодера, реализующего нежесткий алгоритм декодирования по критерию максимального правдоподобия, лежит процедура обработки сигнала в целом, что позволяет уменьшить влияние аддитивных шумов на достоверность регистрации и повысить плотность записи до уровня, недостижимого в ЗУ без кодирования. Такие методы повышения плотности в побитовых ЗУ пока не применяются. Тем не менее конструкции каскадных кодов, использующих код Рида — Соломона (РС) и короткий внутренний блоковый код или РС-код и короткий сверточный код, широко обсуждаются в технике передачи информации [19, 20]. Они могут оказаться эффективными при условии фазового представления информации в одномерной голограмме [13]. Эффект совместного применения в гауссовом канале квадратурной фазовой модуляции (выигрыш + 3дБ по сравнению с амплитудной модуляцией) и каскадного кода (выигрыш + 6—7 дБ [19])

эквивалентен увеличению дифракционной эффективности голограммы в 8—10 раз.

Степень защищенности от длинных пакетов ошибок в побитовом ЗУ выше, чем в голографическом, поскольку совместное применение корректирующих кодов и многократного перемежения позволяет в побитовых ЗУ осуществить защиту от одиночного пакета ошибок такой большой длины, перед которой голографическая запись без дополнительного кодирования оказывается бессильной. Кроме прямого решения вопроса (увеличение размера страницы), какие-либо другие предложения, позволяющие устранить указанный недостаток, нам неизвестны.

Нелинейный характер передаточной функции регистрирующей среды оказывает в системах с побитовой записью гораздо меньшее влияние на достоверность регистрации, чем в голографических ЗУ. Причина заключается в том, что на всех этапах преобразования, включая и запись на регистрирующую среду, сигнал в побитовых ЗУ является двоичным. Особенность голографических способов записи состоит в том, что они предполагают регистрацию так называемого группового сигнала, который образуется путем аналогового суммирования отдельных гармоник (бит).

Нелинейность является причиной интермодуляционных искажений, которые ухудшают отношение сигнал/шум в восстановленном изображении. Наиболее эффективный метод снижения влияния нелинейности — применение фазовых масок. Суть метода заключается в том, что путем подбора начальных фаз суммируемых гармоник можно получить такой групповой сигнал, у которого информация будет закодирована не в изменении амплитуды (огibaющей), а в вариациях фазы. Из техники связи известно, что сигналы с фазовой (частотной) модуляцией менее всего подвержены нелинейным искажениям. Качество фазовой маски определяется пик-фактором — превышением выбросов амплитуды группового сигнала относительно его действующего значения.

Эффективность регистрирующей среды определяется как отношение интенсивности оптического сигнала, усредненного по площади записи, к его максимальному значению и характеризует использование динамического диапазона материала. При записи фурье-голограмм для поддержания нелинейных искажений на приемлемом уровне снижают амплитуду сигнала, что приводит к уменьшению в несколько раз дифракционной эффективности, усредненной по площади голограммы. При побитовой записи регистрирующая среда используется в режиме максимальной эффективности (максимального отношения сигнал/шум).

Пик-фактор мощности излучения лазера определяется как отношение максимальной импульсной мощности излучения к средней. Если заданы чувствительность регистрирующей среды μ , скорость записи V_z , плотность записи ρ и КПД оптической схемы $\eta_{ос}$, то тем самым однозначно определена средняя мощность лазера: $P = \mu V_z / \rho \eta_{ос}$. Пиковая мощность, которая определяется скважностью импульсов света, существенно зависит от способа записи информации.

При побитовой записи на каждый записываемый бит информации приходится одна вспышка лазера. В этом случае скважность импульсов может быть выбрана близкой к двум.

При голографической регистрации одна вспышка лазера приходится на 1 кадр (N бит информации), поэтому частота вспышек в N раз меньше, чем при побитовой записи. В результате не менее чем в N раз возрастает пиковая мощность лазера, что приводит к изменению у полупроводникового лазера диаграммы направленности излучения, модового состава, снижению срока службы и др.

Устойчивость к неравномерности освещения транспаранта определяет КПД оптической системы, повышение которого при скоростной записи имеет принципиальное значение.

Оптические схемы ЗУ с многоканальной побитовой или голографической пословой записью могут работать со световыми пучками, имеющими гауссово распределение интенсивности по апертуре, благодаря че-

му упрощается оптическая схема и, главное, увеличивается ее КПД по свету.

Наиболее жесткими являются требования к неравномерности освещения двумерного транспаранта в ЗУ со страничной организацией памяти. Здесь неравномерное освещение приводит к увеличению дисперсии мощности оптических «1» и, как следствие, к снижению достоверности сплюсков и косинусов с различными пространственными частотами. Это приводит к существенному упрощению электронных схем таких ЗУ по сравнению с побитовой памятью.

Система коррекции ошибок является наиболее сложным электронным узлом оптического ЗУ с побитовой записью. Во всех разработках используются коды Рида — Соломона с перемежением; в некоторых устройствах применяют каскадные коды. Сложность такого скоростного кодера-декодера оценивается примерно как 300—500 микросхем среднего уровня интеграции [20].

Возможность миниатюризации обусловлена прежде всего оптической схемой устройства записи-чтения, допускающей изготовление по планарной технологии.

Заключение. Итак, по совокупности характеристик рассмотренные способы скоростной оптической записи информации являются в первом приближении равноценными. Они существенно отличаются только по уровню проведенных исследований, состоянию элементной базы и технологии изготовления.

Из всех рассмотренных методов повышения быстродействия оптической регистрации технологически наиболее подготовленной является многоканальная побитовая запись. В варианте с восемью-девятью каналами скорость записи газовым лазером возрастает до 400 Мбит/с, а в ЗУ с линейкой полупроводниковых лазеров — до 80—160 Мбит/с.

По сравнению с многоканальной системой развертка луча позволяет снизить требование к точности радиального позиционирования луча. Эквивалентное число каналов здесь может быть увеличено до 100 и более, поэтому метод развертки перспективен для ЗУ с низкой скоростью движения носителя и умеренной (80—100 Мбит/с) скоростью записи.

При записи информации в виде одномерных голограмм быстродействие ЗУ достигает 64—128 Мбит/с. Несомненными достоинствами таких устройств являются большой коэффициент использования света, низкие требования к точности позиционирования, параметрам АОМ и лазера.

При скорости записи $\geq 10^9$ бит/с и емкости памяти 10^{11} — 10^{12} бит перспективны метод страничной голографической памяти на объемных средах и метод комплексирования рабочих поверхностей и малогабаритных (интегральных) оптических головок записи-чтения данных [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг Р. Подсистема на оптических дисках для хранения триллионов бит космической информации // *Электроника* (пер. с англ.).— 1984.— 57, № 20.
2. Вовк Ю. В., Твердохлеб П. Е., Щепеткин Ю. А. Методы быстрой оптической записи двоичных данных. (Обзор) // *Автоматика*.— 1984.— № 3.
3. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами.— М.: Радио и связь, 1985.
4. Коэн Ч. Л. Двухслойное магнитное покрытие, повышающее плотность записи // *Электроника* (пер. с англ.).— 1986.— 59, № 13.
5. Watkins J. W., Boudreaux N. A., Otten T. H. Large archival mass memory system using optical diskettes // *Opt. Eng.*— 1981.— 20, N 3.
6. Майклджон У. М. Магнитооптическая запись // *ТИИЭР*.— 1986.— 74, № 11.

7. Roberts H. N., Watkins J. W., Jonson R. H. High speed holographic digital recorder // Appl. Opt.— 1974.— 13, N 4.
8. Балацкий В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики.— М.: Радио и связь, 1985.
9. Вовк Ю. В., Выдрин Л. В., Твердохлеб П. Е., Щепеткин Ю. А. Метод многокапальной записи двоичных данных на оптическом диске // Автометрия.— 1989.— № 2.
10. Вовк Ю. В., Сапожников В. К., Шелопут Д. В., Щепеткин Ю. А. Голографическая запись двоичной информации с помощью многоканальных акустооптических модуляторов света // Автометрия.— 1979.— № 1.
11. Микаэлян А. Л., Ванин А. Ф., Гуляни Э. Х., Прокопенко С. А. Голографический диск — накопитель информации // Квантовая электрон.— 1987.— 14, № 5.
12. Forrest G. T. Diode-laser arrays achieve increased power and brightness // Laser Focus (Elec.-Opt.).— 1988.— 24, N 8.
13. Вовк Ю. В., Выдрин Л. В., Вьюхина Н. Н. и др. Высокоскоростной накопитель цифровых данных на основе пакета оптических дисков // Автометрия.— 1989.— № 3.
14. Бартолини Р. А. Оптическая запись. Информационно-поисковые системы с высокой плотностью записи данных // ТИИЭР.— 1982.— 70, № 6.
15. Помехоустойчивость и эффективность системы передачи информации/Под ред. А. Г. Зюко.— М.: Радио и связь, 1985.
16. Блок А. А., Домбровский В. А., Домбровский С. А. и др. Практический предел плотности записи данных в голографических ЗУ на плоских носителях.— Новосибирск, 1988.— (Препр./СО АН СССР, ИАНЭ; 386).
17. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Исследование помехоустойчивости голограмм в ЗУ // Автометрия.— 1985.— № 4.
18. Коржик В. И., Финк Л. М., Щелкунов К. Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретной информации: Справочник.— М.: Радио и связь, 1981.
19. Кларк Дж., мл., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи.— М.: Радио и связь, 1987.
20. Берлекэми Э. Р. Техника кодирования с исправлением ошибок // ТИИЭР.— 1980.— 68, № 5.

Поступила в редакцию 10 мая 1989 г.