

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЭВМ пятого поколения: концепции, проблемы, перспективы/Под ред. Т. Мото-Ока: Пер. с англ.— М.: Финансы и статистика, 1984.
2. Данилов Г. А., Шмид А. В. Машины баз данных // Итоги науки и техники. Сер. техн. кибернетика.— 1987.— Т. 22.
3. Блок А. А., Ванюшев Б. В., Волков А. В. и др. Устройство автоматической записи матриц голограмм цифровых данных // Автометрия.— 1984.— № 3.
4. Ванюшев Б. В., Волков А. В., Гибин И. С. и др. Устройство хранения и считывания цифровых данных в голографической системе архивной памяти // Там же.
5. Вьюхина Н. Н., Литвинцева А. П., Мантуш Т. Н. и др. Программные средства для исследований, отладки и тестирования ГЗУ // Там же.
6. Блок А. А., Ванюшев Б. В., Волков А. В. Архивное голографическое ЗУ с емкостью памяти 1 Гбайт // Тез. докл. II Всесоюз. конф. «Проблемы развития радиоэлектроники».— Тбилиси, 1985.— Ч. 1.
7. Блок А. А., Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Экспериментальные исследования достоверности считывания данных в голографических ЗУ // Автометрия.— 1984.— № 3.
8. 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, ИАиЭ; 386).
9. Коняев С. И., Кащеев Э. Л., Панков Б. Н. Фотоматричное ассоциативное ЗУ — многофункциональный оптоэлектронный элемент, характеристики и вопросы применения // Тез. V Всесоюз. конф. по голографии.— Рига, 1985.
10. Butt V. E., Vyukhina N. N., Kozik V. I. e. a. The search for compounds by the fragments of structural formulae in holographic storage // The Third USSR — JAPAN Symposium ON Computer Chemistry (20—24 July 1987).— Novosibirsk, USSR, 1987.

Поступила в редакцию 14 декабря 1988 г.

УДК 681.327.68 : 621.373.826

**Ю. В. ВОВК, Л. В. ВЫДРИЦ, Н. Н. ВЬЮХИНА, В. Н. ЗАТОЛОКИН,
П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ, И. Ш. ШТЕЙНБЕРГ, Ю. А. ЩЕПЕТКИН**
(Новосибирск)

ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАКОПИТЕЛЬ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПАКЕТА ОПТИЧЕСКИХ ДИСКОВ

При решении задачи накопления сверхбольших (10—1000 Гбайт) потоков цифровых данных, поступающих со скоростью более 100 Мбит/с (волоконно-оптические линии связи, цифровое телевидение, высокопроизводительные вычислительные комплексы и др.), возникают трудно разрешимые противоречия: во-первых, объем информации в 10 Гбайт превышает предельную емкость одного магнитного или оптического диска; во-вторых, одноканальное устройство оптической записи обеспечивает скорость регистрации не более 30 Мбит/с.

Простым хорошо известным из техники магнитной записи способом решения задачи является использование для этой цели пакета дисков. В этом случае требуемую емкость памяти можно обеспечить путем увеличения количества дисков, а скоростную запись реализовать за счет использования нескольких параллельно работающих головок.

При создании подобного накопителя на пакете оптических дисков принципиально важной задачей является разработка такой оптической головки, которая имела бы малые габариты, вес и при плотности упаковки данных $\geq 2 \cdot 10^5$ бит/мм² обеспечивала бы скорость записи не менее 30 Мбит/с.

Для решения поставленной задачи нами был предложен метод записи цифровых данных в виде линейных, одномерных голограмм Фурье [1]; рассмотрены способы частотного синтеза таких голограмм с помощью акустооптического модулятора (АОМ) и записи излучением полупроводникового лазера [2], параллельного гетеродинамического считыва-

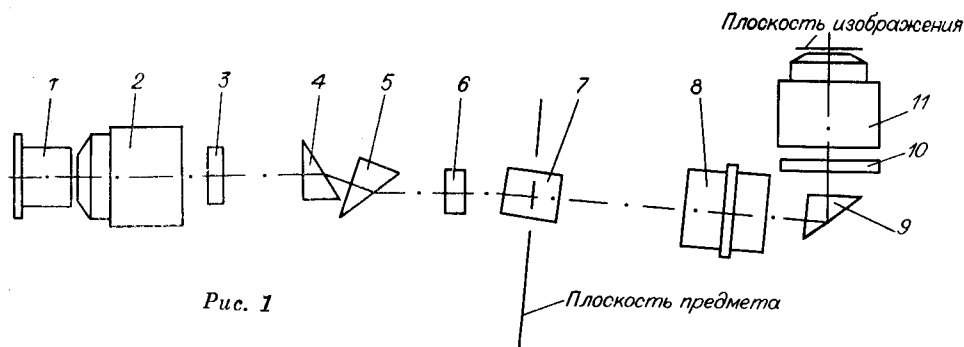


Рис. 1

ния данных [3], многоуровневого относительного фазового кодирования информации в голограмме.

Целью данной работы являются:

развитие предложенных методов повышения скорости и плотности записи, совершенствование технических характеристик принципиально важного элемента ЗУ — скоростной оптической головки записи-чтения двоичной информации;

разработка принципов организации и технического решения экспериментального накопителя на пакете оптических дисков со следующими характеристиками: емкость 10 Гбайт, скорость записи ≥ 128 Мбит/с;

экспериментальное исследование накопителя и оптической головки в режимах записи и чтения.

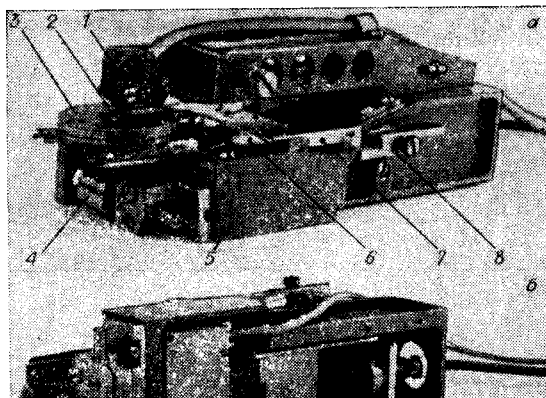
Оптическая головка записи-чтения двоичной информации. Схема головки приведена на рис. 1. Она содержит полупроводниковый лазер ИЛПН-108 1, коллиматор-микрообъектив $\times 40$ 2, пластинку для поворота плоскости поляризации света на 90° 3, призмный коллиматор 4, 5, цилиндрическую линзу 6, акустооптический модулятор 7 [4], объектив «Индустар-М» 8, поворотную призму 9, блок из двух плоскопараллельных пластин 10, микрообъектив $\times 60$ 11.

Оптическая часть канала считывания (на рис. 1 не показана) состоит из световолоконного жгута (световода), расположенного по другую сторону диска, фотодиода ФПЗ-4, установленного на плате усилителя считывания и оптически связанного с головкой этим световодом.

В основу работы головки положен метод частотного синтеза одномерных голограмм Фурье с помощью акустооптического модулятора [2] и параллельного гетеродинного считывания информации [3].

Луч света полупроводникового лазера 1 коллимируется микрообъективом 2 в параллельный (в направлении, перпендикулярном плоскости $p-n$ -перехода лазера) световой пучок. Этот пучок проходит последовательно пластинку 3, которая поворачивает плоскость его поляризации на 90° , призмную систему 4, 5, уменьшающую размер светового пучка в направлении нормали к плоскости $p-n$ -перехода лазера. Далее коллимированный пучок фокусируется цилиндрической линзой 6 в зону ультразвуковой волны модулятора 7 (плоскость предмета). Оптическая проецирующая система, состоящая из софокусно расположенных объективов 8 и 11 и призмы 9, переносит пучки света, выходящие из акустооптического модулятора 7, в плоскость оптического диска (плоскость изображения) и таким образом формирует в этой плоскости голограмму в виде уменьшенного изображения визуализированной акустической волны.

Анизотропная дифракция в АОМ приводит к тому, что плоскость поляризации дифрагированной световой волны оказывается повернутой на 90° по отношению к падающей волне. Для получения высокого контраста изображения решеток необходимо провести компенсацию этого рассогласования. Выравнивание направлений плоскостей поляризации обеспечивается двумя фазовращающими пластинками 10. Пластинки установлены так, что через одну из них, не меняя направления вектора



поляризации, проходят все дифрагированные световые пучки, через вторую, с поворотом плоскости поляризации на 90° , — нулевой пучок. В результате поляризации опорной и сигнальных световых волн в области регистрирующей среды совпадают. Конструкция оптической головки в двух положениях представлена на рис. 2, а, б. Головка состоит из следующих функционально независимых узлов: осветитель-модулятор,

объектив «Индустар-М» 9, оборачивающая призма с блоком плоскопараллельных пластинок 4.

Осветитель 11 содержит полупроводниковый лазер, коллимирующий микрообъектив, пластинку, поворачивающую плоскость поляризации света, призменную систему и цилиндрическую линзу. Компоненты осветителя установлены в отдельном корпусе, к которому после полной их юстировки крепится акустооптический модулятор 10. Узел аэростатической подвески состоит из плиты воздушной опоры 3, в которой установлены микрообъектив проецирующей оптики 2; пружины 6 и устройства отвода и блокировки подвески 7, 8 при выводе головки из рабочей зоны пакета оптических дисков.

Макет накопителя на пакете оптических дисков. На рис. 3 приведена блок-схема устройства, предназначенного для регистрации двоичной информации в виде одномерных голограмм Фурье.

Из напряжения опорного генератора 1 в блоке параллельного синхронного синтезатора частот 2 формируются N эквидистантных по частоте гармоник, синхронизированных с точностью до значения медленно изменяющейся фазы φ_i , т. е. $U_i = U_m \cos [(\omega_0 + i\Delta\omega)t + \varphi_i]$.

Для повышения помехоустойчивости, скорости и плотности записи применено четырехуровневое относительное фазовое кодирование информации в голограмме. Информационным параметром при таком представлении данных является разность фаз одной и той же пространственной гармоники двух соседних голограмм [1, 5]. Наличие четырех градаций фазы позволяет на каждой пространственной частоте записать двухрядное двоичное слово.

С помощью модуляторов 3 фаза каждой из гармоник изменяется так, что ее приращение соответствует записываемой группе разрядов [5]. Напряжения всех N гармоник складываются в линейном сумматоре 4 и далее поступают на электрический вход АОМ 5. Параметры АОМ 5, лазера 6, коллиматора 7 и цилиндрической линзы 8 выбраны так, чтобы через время $\Delta t = n2\pi/\Delta\omega$ ($n = 2$) в световой апертуре модулятора произошла полная смена сигнала. Затем на лазер от блока питания 9 подается короткий импульс тока и с помощью телескопической системы 10, 11 изображение голограммы (набор синусоидальных решеток) переносится на светочувствительное покрытие диска 12.

При считывании информации с голограммы полупроводниковый лазер переключается в режим непрерывного излучения. На АОМ подается напряжение, соответствующее сумме всех гармоник, и на голо-

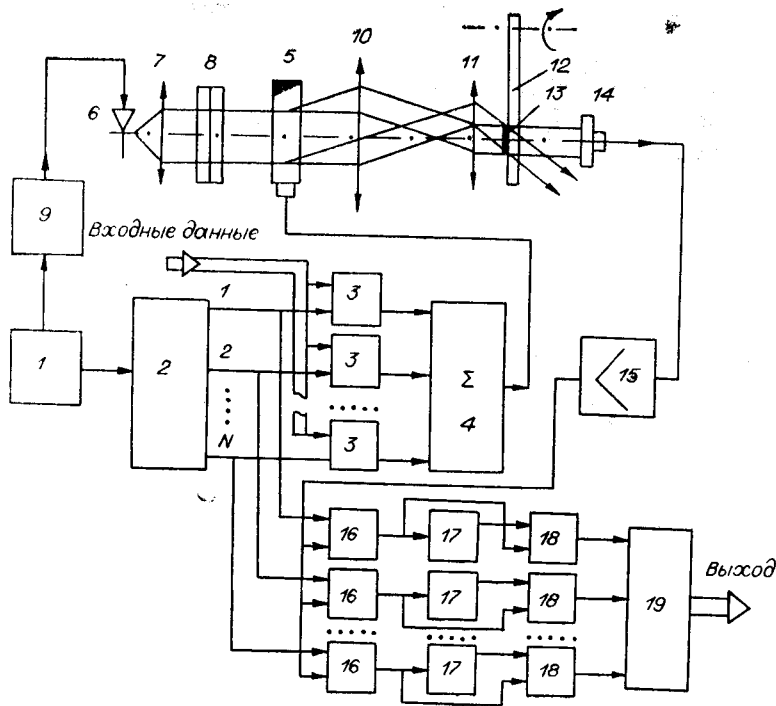


Рис. 3

грамму 13 проецируется изображение N бегущих синусоидальных решеток. При взаимодействии их с пространственными гармониками голограммы на выходах фотоприемника 14 и усилителя 15 появляется многочастотный сигнал. Для каждой из гармоник этого сигнала сдвиг фазы между напряжением, поступающим на АОМ, и напряжением на выходе фотоприемника зависит от фазового сдвига соответствующей решетки голограммы по отношению к считывающей бегущей решетке.

Очевидно, что это значение фазы подвержено случайным флуктуациям из-за биений механической части ЗУ, температурных изменений и дрейфа параметров оптико-электронного канала. Однако эксперименты показали, что характерная длина флуктуаций вдоль дорожки составляет несколько миллиметров, а характерное время изменения — сотые доли секунды. Другими словами, энергия паразитных флуктуаций фазы сосредоточена в области пространственных частот 0—1 лин/мм и временных — 0—100 Гц.

Метод относительной фазовой модуляции позволяет уменьшить влияние медленных флуктуаций параметров ЗУ, поэтому не требуется их высокой абсолютной стабильности: необходимо лишь, чтобы они оставались практически неизменными на интервале записи-считывания двух соседних голограмм. Этот интервал во времени составляет 1—10 мкс, а в пространстве — 3—10 мкм, что значительно меньше характерных длины и времени изменения параметров ЗУ.

Для дешифровки считанного сигнала результат измерения фазы i -й гармоники голограммы с выхода цифрового фазового детектора 16 подается на вход буферной памяти 17 и на один из входов арифметического устройства 18. На другой вход арифметического устройства из буферной памяти поступает значение фазы той же i -й гармоники предыдущей голограммы. В арифметическом устройстве вычисляется приращение фазы и по алфавиту кодирования в блоке дешифровки 19 определяется значение соответствующего разряда (или группы разрядов) считанного двоичного слова.

Основные характеристики оптической головки: размеры голограммы 105×3 мкм²; емкость голограммы 64 бита; скорость записи 10^6

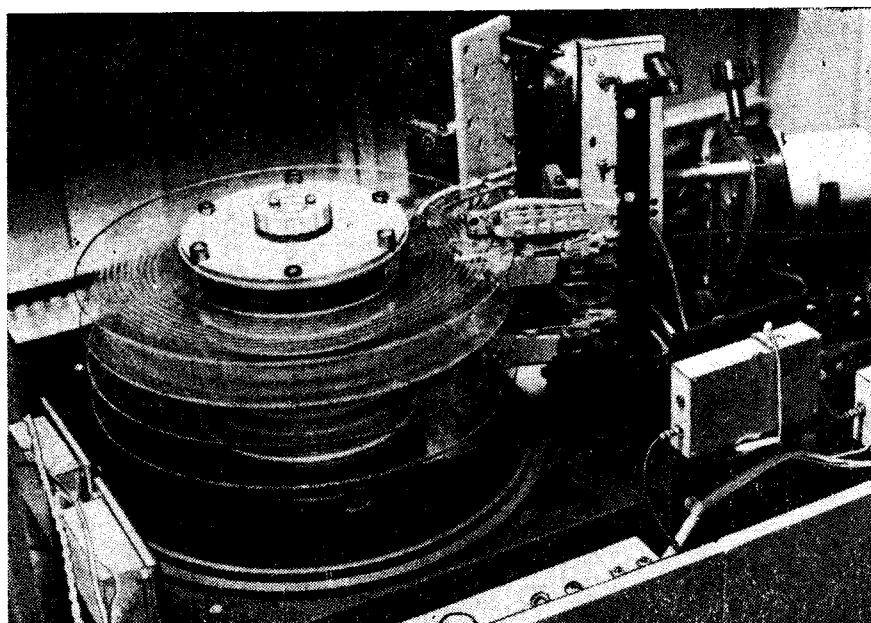


Рис. 4

голограмм/с; метод кодирования информации — относительная 4-фазная манипуляция; скорость считывания $1,25 \cdot 10^5$ голограмм/с; высота головки (минимальное расстояние между дисками в пакете) 25 мм; минимальная и максимальная пространственные частоты формируемой фурье-голограммы 680 и 1360 лин/мм; КПД по свету 10%; степень ослабления биений диска узлом аэростатической подвески микрообъектива не менее 500; сила давления на поверхность диска 3,5—5 Н; зазор между плитой аэростатической подвески и поверхностью диска 30 мкм.

Параметры электрического сигнала, подаваемого на АОМ: диапазон частот 64—128 МГц; шаг сетки частот 2 МГц; мощность сигнала $\approx 0,5$ Вт. Режим работы полупроводникового лазера непрерывный и импульсный; мощность излучения в непрерывном режиме не менее 20 мВт; энергия в импульсе при его длительности 4 нс (по уровню 0,5 максимальной интенсивности) и максимальной частоте повторения 1 МГц — $4 \cdot 10^{-9}$ Дж.

На рис. 4 показан внешний вид экспериментального макета накопителя. Количество дисков в пакете может изменяться от 1 до 8. Емкость одной рабочей поверхности диска 1 Гбайт.

Одномерные голограммы регистрируются на концентрических дорожках. Для непрерывной записи предусмотрены два привода двух блоков оптических головок, которые работают поочередно: в то время как одна группа головок осуществляет запись информации, другая группа головок перемещается на очередную дорожку. Каждая оптическая головка записывает и считывает информацию с одной поверхности диска. Количество головок в блоке может изменяться от одной до четырех.

Электронные блоки управления оптическими головками и электро-механическими устройствами ЗУ расположены в двух крайних КМАК, один из которых с помощью интерфейса «Общая шина» связан с ЭВМ. ЭВМ управляет позиционированием головки записи-считывания, задает скорость вращения пакета дисков, определяет режимы записи и считывания, осуществляет диагностику и контроль достоверности регистрации информации.

Методика и результаты экспериментального исследования накопителя. При записи информации с предельно высокой плотностью необходимо учитывать те частотные ограничения, которые возникают в опти-

ко-электронном тракте накопителя и приводят к появлению помех от соседних разрядов записываемого слова. В линейном приближении эти искажения можно характеризовать переходной функцией (ПФ).

ПФ оптико-электронной системы записи-считывания является одним из основных параметров накопителя; она определяется как отклик системы на δ -импульс — сигнал, считанный со специально изготовленной дифракционной решетки, размеры которой намного превышают реальные размеры голограммы. Такая дифракционная решетка, имеющая пространственную частоту ν_p , устанавливается в зоне считывания оптической головки (на месте голограммы). На электрический вход АОМ от спектроанализатора подается напряжение линейно изменяющейся частоты (ЛЧМ). Напряжение с выхода усилителя считанного сигнала отображается на экране спектроанализатора.

При сканировании на образцовую дифракционную решетку падают два пересекающихся пучка: опорный (нулевой), имеющий комплексную амплитуду $A_0(x)$, и сканирующий пучок с комплексной амплитудой $A_c(x) \exp(j\omega t)$, где $\omega = 2\pi f$ — частота напряжения, подаваемого на пьезопреобразователь АОМ. Оптическая головка и образцовая решетка ориентированы так, что векторы образцовой решетки и решетки, образованной пересекающимися пучками $A_0(x)$ и $A_c(x)$, направлены вдоль оси x , т. е. вдоль длинной стороны голограммы. Скорость изменения частоты df/dt выбирается такой, чтобы в пределах апертуры АОМ можно было пренебречь изменением частоты ультразвуковой решетки: $(df/dt)t_A^2 \ll 1$, где t_A — апертурное время АОМ.

Представим комплексные амплитуды опорного и сканирующего пучков в плоскости образцовой решетки в виде множества плоских волн, амплитуды и фазы которых определяются преобразованием Фурье (F):

$$S_0(\nu) = F[A_0(x)], \quad S_c(\nu) = F[A_c(x)],$$

где ν — пространственная частота ($\nu = 2\pi/\Lambda$, Λ — период решетки).

Поскольку сканирующий пучок образуется в результате дифракции на ультразвуковой бегущей в АОМ фазовой решетке, то при отсутствии амплитудных и фазовых искажений для сканирующего пучка непосредственно за плоскостью образцовой решетки можно записать: $S_c(\nu) = kS_0(\nu + n_1\omega/V - \nu_p) \exp(j\omega t)$. Здесь $S_0(\nu) = S_0(\nu) \exp[j\varphi(\nu)]$; k — коэффициент, зависящий от дифракционных эффективностей АОМ и решетки; V — скорость звука в АОМ; $n_1 > 1$ — коэффициент уменьшения телескопической системы оптической головки.

Обозначим через $\exp[jQ(\nu, z)]$ фазовую характеристику среды, расположенной между образцовой решеткой и фотоприемником (на расстоянии z). Фотоприемник установлен в опорном (нулевом) пучке и имеет такие размеры, при которых он полностью перекрывает этот пучок. На фотоприемнике происходит сложение амплитуд опорного и дифрагированного на решетке сканирующего пучков. Поэтому для переменной составляющей фототока можно записать

$$\begin{aligned} I_\Phi(\omega, t) &= K_\Phi \int_{-\infty}^{+\infty} [S_c(\nu) + S_0(\nu)] \exp[jQ(\nu, z)] [S_c(\nu) + S_0(\nu)]^* \exp[-jQ(\nu, z)] d\nu = \\ &= K_\Phi K_1 \int_{-\infty}^{+\infty} S_0(\nu) S_0(\nu - \nu_p + n_1\omega/V) \cos[\omega t + \varphi(\nu - \nu_p + n_1\omega/V) - \varphi(\nu)] d\nu. \end{aligned}$$

Далее, учитывая, что $\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_0(\nu) S_0^*(\nu - \nu_p + n_1\omega/V) d\nu = \int_{-\infty}^{+\infty} |A_0(x)|^2 \times \exp[-j(n_1\omega/V - \nu_p)x] dx$, получим выражение для амплитуды фототока

$$I_{\Phi A}(\omega) = K_2 \left| \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) \exp[-j(n_1\omega/V - \nu_p)x] dx \right|,$$

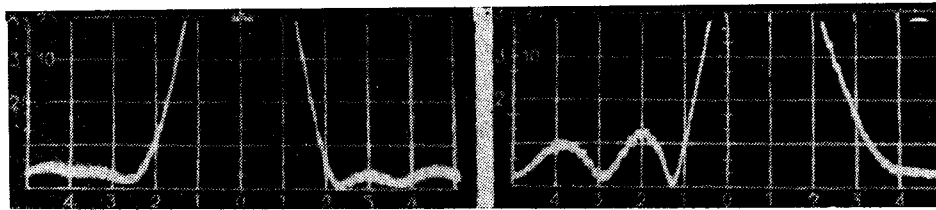


Рис. 5

где $P(x) = A_0^2(x)$ — распределение интенсивности пучка на входе АОМ; K_0, K_1, K_2 — коэффициенты. Таким образом, $I_{\Phi A}(\omega)$ — это, по существу, «изображение пита» в плоскости пространственных частот ν . Поэтому $I_{\Phi A}(\omega)$ для фурье-голограммы имеет такое же значение, как функция рассеяния точки для устройств побитовой регистрации.

По форме ПФ можно качественно оценить точность установки фокальной плоскости микрообъектива. Если при включенной системе воздушной подвески плоскость дифракционной решетки не совпадает с фокальной плоскостью микрообъектива, то ПФ становится несимметричной относительно оси ординат и справа или слева от нее возникают боковые лепестки.

Приведенная на рис. 5, а ПФ соответствует случаю, когда фокальная плоскость микрообъектива совпадает с плоскостью решетки. Максимум ПФ находится на частоте 107 МГц. Масштаб осциллограмм по оси абсцисс 1 дел. = 0,5 МГц или 5,3 лин/мм для области пространственных частот (диапазон частот голограммы 680—1360 лин/мм). ПФ при неправильно установленной плоскости микрообъектива показана на рис. 5, б, причем решетка расположена примерно на расстоянии 25 мкм за фокальной плоскостью. При противоположной расстройке боковые лепестки появляются справа от ПФ.

Из-за неточности установки фокальной плоскости возникает также зависимость положения максимума ПФ от перемещения микрообъектива вдоль оптической оси, обусловленного биением диска. Смещение ПФ вызывает падение уровня считанного сигнала и увеличение межсимвольных помех. Для имитации биений диска дифракционная решетка перемещалась вдоль оптической оси на $\pm 0,15$ мм. При этом не наблюдалось существенного ($> 20\%$) уширения ПФ и смещения центральной частоты более чем на ± 200 кГц.

Ширина ПФ сильно зависит от качества юстировки оптической головки и ширины диаграммы направленности излучения лазера в плоскости, перпендикулярной плоскости $p-n$ -перехода. По известным параметрам головки: апертурному времени АОМ и уровню усечения гауссова пучка — можно рассчитать ширину ПФ и, сравнив ее с экспериментальной, качественно оценить уровень aberrаций оптики. Например, показанная на рис. 5, а ПФ получена при следующих параметрах головки: размер пучка на входе АОМ в направлении распространения звука 0,806 мм, уровень усечения пучка 0,5. Учитывая, что скорость звука в материале светозвукопровода модулятора равна $0,72 \cdot 10^3$ м/с, получим расчетное значение апертурного времени $t_A = 1,12$ мкс. При уровне усечения 0,5 расчетная ширина ПФ по уровню 0,5 составляет 1,16 МГц. Сравнение с экспериментальным значением ширины ПФ (1,25 МГц) характеризует разрешающую способность головки, близкую к дифракционному пределу.

ления управления ЛОМ. Разряды записанного слова воспроизводятся при этом на экране спектроанализатора последовательно. Девятый разряд (82 МГц) записан при амплитудном кодировании и равен 0. Масштаб по оси абсцисс — 1 дел. соответствует 5 МГц. Анализ изображения позволяет оценить важнейшие характеристики сигнала: уровень напряжений логической единицы («лог. 1»), логического нуля («лог. 0») и, главное, смещение экстремальных точек изображения относительно дискретной сетки частот синтезатора (64, 68, ..., 100, ..., 128 МГц). Основной причиной смещения является усадка эмульсии в процессе ее фотохимической обработки. Сдвиг максимума относительно частоты синтезатора на $\pm 0,3$ МГц ($\pm 0,23$ % на граничной частоте 128 МГц) уменьшает уровень отклика примерно на 10 % [1].

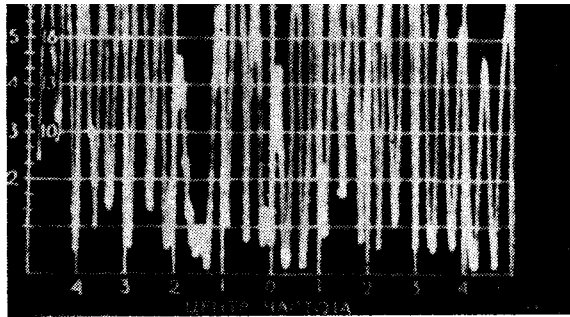


Рис. 6

Из трех исследованных методов обработки фотоэмульсии: отбеливания, технологии СГЖ (серебряногалоидной желатины) [6] и осветления — для записи фазовых голограмм на дисках использовался метод осветления как единственно приемлемый, обеспечивающий сдвиг частот отдельных решеток голограммы на величину не более $\pm 0,28$ МГц.

Другим важным параметром оптической головки является эффективная ширина голограммы — поперечный размер интерференционной решетки, образованной при пересечении в «плоскости изображения» (см. рис. 1) нулевого (опорного) и диффрактированного пучков. Из-за aberrаций оптической схемы возникает неточное совмещение этих пучков в поперечном направлении, уменьшение эффективной ширины, падение контраста записанной голограммы и снижение отношения сигнал/шум.

Эффективная ширина голограммы определялась по автокорреляционной функции спекл-сигнала, считанного со специально изготовленного диска с экспонированной и отбеленной фотоэмульсией. Ширина автокорреляционной функции зависит от линейной скорости движения диска и времени смены реализации случайной поверхности фотосреды в пределах ширины голограммы.

Типичный вид экспериментально определенной автокорреляционной функции $\gamma(y)$ считанных шумов рассеяния фотосреды показан на рис. 7. Видно, что при смещении голограммы вдоль дорожки на величину $y \approx 5$ мкм считанные спекл-шумы оказываются практически некоррелированными.

Если гауссов пучок имеет ширину перетяжки $W = 3$ мкм (по уровню 0,5 максимальной интенсивности), то при допустимом уширении W на 10 % изменение расстояния Δ до плоскости фокусировки должно быть не более $\Delta \approx W^2/\lambda \approx 10$ мкм, где $\lambda = 0,85$ мкм — длина волны света.

Если гауссов пучок имеет ширину перетяжки $W = 3$ мкм (по уровню 0,5 максимальной интенсивности), то при допустимом уширении W на 10 % изменение расстояния Δ до плоскости фокусировки должно быть не более $\Delta \approx W^2/\lambda \approx 10$ мкм, где $\lambda = 0,85$ мкм — длина волны света.

На рис. 8 показаны зависимости величины зазора между плитой аэростатической подвески и диском от усилия, прижимающего плиту к поверхности диска. Характеристики получены при различном избыточном давлении в воздушной магистрали, питающей аэростатическую

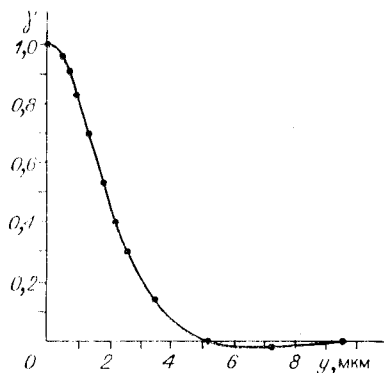


Рис. 7

подвеску. «Замыкающая» пружина имеет начальное усилие 3,5 Н и жесткость $C_{\text{п}} = 0,5 \text{ Н/мм}$. Точки пересечения характеристик механической и аэростатической пружин определяют высоту «парения» и жесткость «пружины» $C_{\text{в}}$ воздушной подвески микрообъектива. При избыточном давлении в магистрали $2,45 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (2,5 атм.) они составляют соответственно 28 мкм и 0,5 Н/мкм.

Можно показать, что степень ослабления биений, т. е. отношение величины биения диска вдоль оси пакета ξ к изменению расстояния Δ между поверхностями диска и плиты подвески, определяется выражением

$$\varepsilon(\omega_{\text{д}}) = \frac{\xi}{\Delta} = \left[\frac{(\omega_{0\text{п}}^2 + \omega_{0\text{в}}^2 - \omega_{\text{д}}^2)^2 + \omega_{\text{д}}^2 (H_{\text{п}} + H_{\text{в}})^2 / m^2}{(\omega_{0\text{п}}^2 - \omega_{\text{д}}^2)^2 + \omega_{\text{д}}^2 H_{\text{п}}^2 / m^2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

где m — масса подвижного узла аэростатической подвески; $\omega_{\text{д}}$ — круговая частота биений диска; $\omega_{0\text{п}} = \sqrt{C_{\text{п}}/m}$, $\omega_{0\text{в}} = \sqrt{C_{\text{в}}/m}$; $H_{\text{п}}$, $H_{\text{в}}$ — резонансные круговые частоты и коэффициенты вязкого трения пружинной и воздушной подвесок соответственно.

Масса подвижного узла подвески у оптической головки (см. рис. 2) $m = 50 \text{ г}$. Отсюда $\omega_{0\text{п}} = (2\pi \cdot 16) \text{ 1/с}$; $\omega_{0\text{в}} = (2\pi \cdot 500) \text{ 1/с}$. Максимальная скорость вращения диска 4 об/с, поэтому в рабочем диапазоне частот ε минимально при $\omega_{\text{д}} = 0$ и составляет $\varepsilon(0) \approx 1000$.

На рис. 9 показана экспериментально определенная зависимость $\Delta(t)$ при изменении ξ скачком на 100 мкм. Полоса частот измерительного устройства 0—100 Гц. На рис. 10 приведена рассчитанная по $\Delta(t)$ частотная характеристика $\varepsilon(\omega_{\text{д}})$.

Анализ достоверности. Все аддитивные шумы, действующие в системе записи-чтения, можно условно разделить на две большие группы: к первой группе относятся те шумы, отдельные реализации которых представляют функции времени; другие шумы обусловлены структурой голограммы и описываются функциями пространственной координаты.

Первая группа включает тепловые и дробовые шумы электронных устройств, а также избыточный шум излучения полупроводникового лазера. Для уменьшения таких шумов необходимо сужать полосу пропускания устройства считывания, т. е. в конечном итоге снижать скорость чтения информации.

Из второй группы наиболее существенными являются оптические шумы рассеяния головки и регистрирующего материала. Уровень этих шумов зависит от полосы пространственных частот пропускания оптиче-

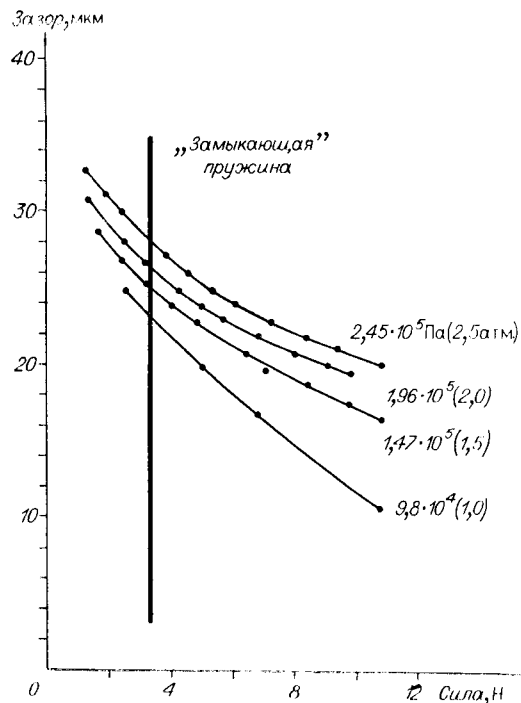


Рис. 8

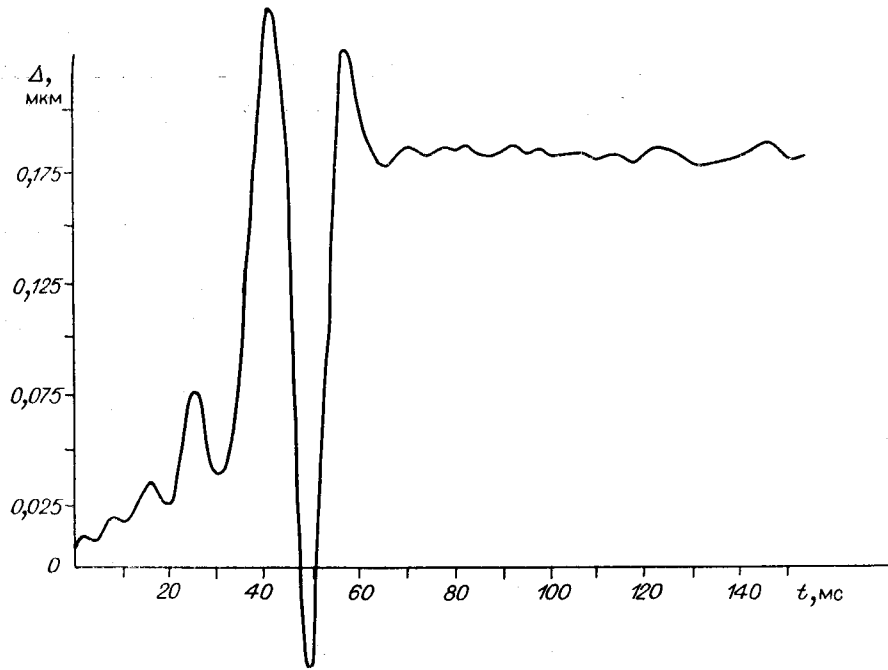


Рис. 9

ской схемы, поэтому такой путь, как сужение полосы пропускания, приводит к уменьшению плотности записи — важнейшего параметра оптического ЗУ.

Рассмотрим, как влияют основные источники временных шумов на отношение сигнал/шум (С/Ш). При условии ограниченной мощности считывающего пучка [7]

$$(C/Ш) = \frac{I_{\Phi_0} \kappa_r [2\eta_m \eta_r (1 - \eta_m) t_n]^{1/2}}{\kappa_m N [2eI_{\Phi_0} (1 - \eta_m) + \beta I_{\Phi_0}^2 (1 - \eta_m)^2 + 2eI_{ш}]^{1/2}} \quad (2)$$

где $\eta_m, \kappa_m, \eta_r \ll 1$, κ_r — дифракционная эффективность и пропускание света по амплитуде АОМ и голограммы соответственно; N — число битов в голограмме; $I_{ш}$ — фототок, дробовые шумы которого равны шуму усилителя; t_n — время накопления; e — заряд электрона; $I_{\Phi_0} = P_c K_c$ — постоянная составляющая тока фотодиода при $\eta_m = 0, \kappa_r = 1$; P_c — интенсивность считывающего пучка на выходе микрообъектива; K_c — коэффициент преобразования считывающей головки. Из (2) следует, что с увеличением I_{Φ_0} отношение сигнал/шум стремится к пределу

$$\max(C/Ш) = \frac{\kappa_r [2\eta_m \eta_r t_n]^{1/2}}{\kappa_m N [\beta (1 - \eta_m)]^{1/2}} \quad (3)$$

Оценка (3) справедлива, когда можно пренебречь

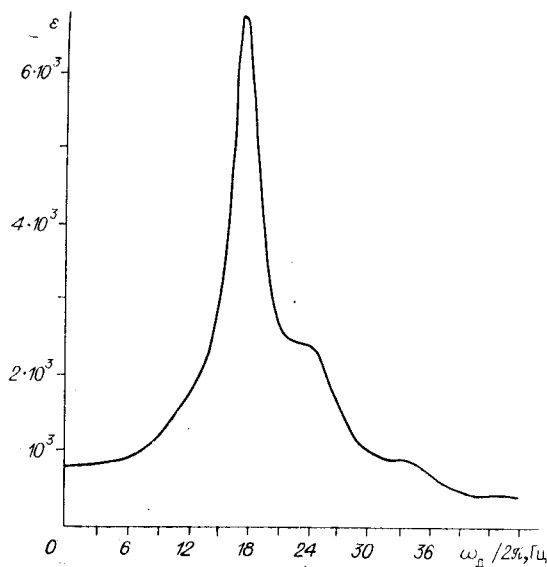


Рис. 10

дробовым шумом фототока $\sim 2eI_{\Phi_0}(1 - \eta_m)$ и шумом усилителя $\sim 2eI_{\Phi_0}$ по сравнению с избыточным шумом полупроводникового лазера $\sim I_{\Phi_0}^2 \beta (1 - \eta_m)^2$. Первое условие представим в виде $I_{\Phi_{01}} \gg 2e/\beta(1 - \eta_m)$, второе —

$$I_{\Phi_{02}} > [2eI_{\Phi_0}/\beta]^{1/2}/(1 - \eta_m). \quad (4)$$

Усилитель фототока в рабочем диапазоне частот 66—128 МГц имеет приведенный ко входу шум, эквивалентный дробовому шуму порядка 200 мкА ($I_{\Phi_0} = 200$ мкА). У лучших из исследованных образцов лазеров $\beta = 2 \cdot 10^{-14}$ с, поэтому при $\eta_m = 0,2$ отношение С/Ш достаточно близко к максимальному (3) при $I_{\Phi_{01}} \gg 20$ мкА, $I_{\Phi_{02}} > 71$ мкА.

Мощность считывающего пучка на выходе головки $P_c = 2,5$ мВт, коэффициент $K_c = 0,08$ мА/мВт; $I_{\Phi_0} = K_c P_c = 200$ мкА, поэтому в первом приближении условия (4) выполняются. В этом случае, если $\kappa_r = 0,9$, $\eta_r = 0,01$, $\kappa_m = 0,9$, $N = 32$, $t_n = 1$ мкс (скорость считывания 64 Мбит/с), то $C/\Phi \approx 15$. При отсутствии избыточных шумов лазера $C/\Phi = 33$.

Приведенный пример показывает, что даже у лучших лазеров избыточный шум настолько велик, что оказывает решающее влияние на отношение сигнал/шум. У многих образцов лазеров величина β достигает 10^{-13} с. В этом случае приходится увеличивать время накопления t_n , что приводит к уменьшению скорости считывания. В макете ЗУ t_n выбрано равным 5,4 мкс. С учетом времени измерения и сброса накопителей цикл считывания одной голограммы составляет 8 мкс, скорость чтения — 8 Мбит/с.

Шумы рассеяния оптических элементов головки не влияют на результат считывания информации, поскольку гетеродинное чтение происходит лишь в той зоне, где имеются движущиеся дифракционные решетки, образованные при пересечении опорного (нулевого) и дифрагированных в АОМ пучков. Оптическая схема головки построена так, что эти пучки перекрываются только на поверхности диска в зоне, где находится голограмма. По-видимому, немаловажное значение имеет и то, что на выходе АОМ дифрагированные и нулевой пучки ортогонально поляризованы и, следовательно, не могут образовать интерференционную решетку. Эксперименты показали, что при последовательном считывании (сканирующим пучком) головка уверенно обнаруживает шумы рассеяния материала диска — термически полированного стекла.

Наибольшее влияние на достоверность регистрации оказывают шумы рассеяния фотоэмульсии [1]. Спектральная плотность их после обработки эмульсии по методу осветления находится на уровне $\Phi_{\text{ш}} = 10^{-8}$ мм². Эффективная полоса частот считывающего пучка, имеющего длину 105 мкм и ширину 3 мкм (по уровню 0,5 максимальной интенсивности), составляет $B = 2200$ 1/мм². Отсюда дифракционная эффективность шумовых решеток $\eta_{\text{ш}} = \Phi_{\text{ш}} B = 2,2 \cdot 10^{-5}$, а отношение $C/\Phi = 14$ (при $\eta_r = 0,01$, $N = 32$). С учетом избыточных шумов излучения лазера и изменения дифракционной эффективности голограмм в зависимости от номера дорожки получены значения C/Φ от 7,3 до 11,3. Каждое значение является результатом усреднения в массиве из 1000 голограмм.

Плотность вероятности для фазы $p(\varphi)$ суммы узкополосного гауссова стационарного процесса и детерминированного гармонического сигнала [8] при больших отношениях $C/\Phi = a > 5$ можно представить в виде

$$p(\varphi) \approx \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \cos \varphi \exp\left(-\frac{a^2}{2} \sin^2 \varphi\right). \quad (5)$$

Результирующий угол ($\Delta\varphi$) определяется сдвигом фаз равных пространственных частот двух соседних голограмм, искаженных некоррелированной шумовой составляющей. Плотность вероятности результирующей

шего угла определялась численность детектирования, вместо когерентного [5] составляют примерно 3 дБ. Тем не менее в ЗУ применено корреляционное детектирование, поскольку для многоканальных систем параллельного считывания устройство детектирования существенно упрощается.

На рис. 11 приведена гистограмма распределения разности фаз, построенная по результатам 4096 измерений. Отношение амплитуды сигнала

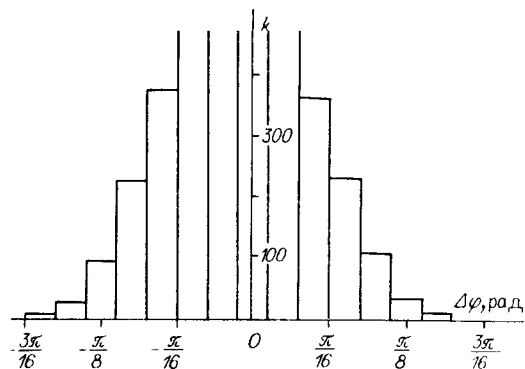


Рис. 11

к ее среднеквадратичному отклонению для данного графика равно 10,2.

В таблице для десяти массивов (4096 измерений каждый) приведено количество выбросов n_4 , n_8 за пороговые уровни, величины которых составляют $\pm\pi/4$ (4-фазная модуляция) и $\pm\pi/8$ (8-фазная модуляция) соответственно. Выбросов за уровень $\pm\pi/2$ не обнаружено. В графе n_4 для тех же 10 массивов указано количество ошибок при амплитудном кодировании информации в голограмме. Поскольку для этих массивов нет данных по распределению уровней «лог. 0», то приведены лишь ошибки типа «переход 1 → 0». Порог a_n/a_c для каждого массива устанавливался вблизи оптимального значения [4].

Теоретическая (расчетная) оценка количества выбросов для массива 2 составляет $n_4 = 1$, $n_8 = 262$, а для массива 7 — $n_8 = 32$.

Из сравнения n_4 и n_8 следует, что 4-фазное кодирование, совместно с корреляционным детектированием, обеспечивает помехозащищенность не хуже, чем в случае амплитудного кодирования. Следует иметь в виду, что величина a_n/a_c , указанная в таблице, для каждого конкретного

№ массива	С/Ш	σ , рад	$n_4(\pm\pi/4)$	$n_8(\pm\pi/8)$	a_n/a_c	$n_A(1 \rightarrow 0)$
1	7,3	0,22	4	300	0,56	2
2	7,3	0,22	2	285	0,56	15
3	7,8	0,18	—	144	0,54	2
4	7,8	0,18	1	142	0,54	4
5	7,9	0,17	—	115	0,54	2
6	8,5	0,17	—	135	0,53	—
7	10,2	0,176	—	111	0,53	2
8	10,2	0,15	—	41	0,53	—
9	10,5	0,16	—	54	0,53	—
10	11,5	0,16	—	66	0,53	—

массива выбиралась оптимальной, но практическая реализация такого способа для 32-канального устройства связана с большими техническими трудностями. Детекторы же фазового демодулятора срабатывают при нулевом пороге, одинаковом для всех каналов. Кроме того, 4-фазное кодирование повышает вдвое скорость и плотность записи.

Величина фазового сдвига относительно просто преобразуется в цифровой код: появляется возможность повысить достоверность записи путем совместного использования многоуровневой (8-фазной) модуляции и сверточного кода со скоростью $2/3$ и жестким алгоритмом принятия решений.

Заключение. Создан макет накопителя на пакете оптических дисков, взаимодействующий с ЭВМ и предназначенный для исследования в широком диапазоне различных режимов записи-чтения цифровых данных.

Разработаны и экспериментально исследованы малогабаритная оптическая головка записи-считывания и электрошные блоки управления, реализующие 4-уровневое фазовое кодирование информации в голограмме. Головка обеспечивает: скорость записи 64 Мбит/с, плотность $2 \cdot 10^5$ бит/мм², скорость считывания 8 Мбит/с.

Показано, что метод относительно (разностной) фазовой модуляции уменьшает влияние медленных флуктуаций параметров ЗУ на достоверность регистрации информации, снижает требования к идентичности параллельных каналов и, таким образом, создает предпосылки для организации многоуровневого кодирования информации в голограмме.

Предложенные методы дают возможность оценить основные характеристики ЗУ: переходную функцию оптико-электронного тракта записи-чтения данных, разрешающую способность оптической головки, уровень межсимвольной интерференции и другие параметры считанного с голограммы сигнала.

Основными источниками аддитивных помех являются избыточные шумы полупроводникового лазера, шумы рассеяния регистрирующего материала. Большой избыточный шум лазера не позволяет получить скорость чтения, равную скорости записи данных. Для повышения достоверности необходимо не только совершенствовать параметры среды и режимы ее обработки, но и применять современные методы кодирования, обнаружения и коррекции ошибок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вовк Ю. В. и др. Метод многоканальной записи двоичных данных на оптическом диске // Автометрия.— 1989.— № 2.
2. Вовк Ю. В., Щепеткин Ю. А. Использование частотного разделения сигналов при записи одномерных голограмм излучением полупроводниковых лазеров // Автометрия.— 1981.— № 1.
3. Вовк Ю. В., Щепеткин Ю. А. Параллельное гетеродинное считывание двоичных данных из одномерных голограмм Фурье // Автометрия.— 1984.— № 3.
4. Трубецкой А. В., Шипов П. В. Многочастотные анизотропные модуляторы на кристаллах TeO_2 // Автометрия.— 1989.— № 3.
5. Засдний А. М., Окунев Ю. Б., Рахович Л. М. Фазоразностная модуляция и ее применение для передачи дискретной информации.— М.: Связь, 1967.
6. Михайлов И. А., Ванин В. А. Голограммы на серебряно-галоидной желатине // Шестая всесоюз. школа-семинар по оптической обработке информации: Тез. докл.— Фрунзе: ФПИ, 1986.— Ч. 2.
7. Затолокин В. П., Штейнберг И. Ш., Щепеткин Ю. А. Влияние шумов полупроводникового лазера при гетеродинном считывании информации с голограмм // III Всесоюз. конф. по вычислительной оптикоэлектронике «Проблемы оптической памяти»: Тез. докл.— Ереван: Изд-во АрмССР, 1987.— Ч. 2.
8. Горяинов В. Т., Журавлев А. Г., Тихонов В. И. Статистическая радиотехника: Примеры и задачи.— М.: Сов. радио, 1980.

Поступила в редакцию 27 декабря 1988 г.