

образование Фурье размытой фотографии) дополнительно ухудшается передаточной функцией $S(u, v) = FT[s(x, y)]$. Например, в первом случае $G(u, v)S(u, v)$ представляет собой изображение, которое должно быть улучшено ЦВМ. Это различие практически может быть ощутимым. Известны и другие ухудшения, возникающие из-за определенного отношения диаметра сканирующего «пятна» к размеру зерна пленки, апертурных углов линз, используемых при формировании $s(x, y)$ и т. д. Все эти эффекты, включая частичную когерентность излучения, могут влиять на качество изображений, восстановленных при помощи ЦВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. M. Brown and L. J. Porcello. An Introduction to Synthetic.— Aperture Radar.— IEEE Spectrum, 1969, v. 6, № 12.
2. G. W. Stroke. An Introduction to Coherent Optics and Holography, 2nd ed. New York: Academic, 1969.
3. G. W. Stroke. Image Deblurring and Aperture Synthesis Using a Posteriori Processing by Fourier — Transform Holography.— Optica Acta, 1969, v. 16, № 4.
4. G. W. Stroke. Diffraction Gratings.— Handbuch der Physik, v. 29, S. Flügge, ed. Berlin and Heidelberg: Springer Verlag, 1967, pp. 426—754.
5. G. W. Stroke and M. Halioua. A New Holographic Image Deblurring Method.— Phys. Letters, 1970, v. 33A, № 1.
6. G. W. Stroke and M. Halioua. A New Method for Rapid Realization of the High — Resolution Extended — Range Holographic Image — Deblurring Filter.— Phys. Letters, 1972, v. 39A, № 4.
7. G. W. Stroke and M. Halioua. Image Improvement in High — Resolution Electron Microscopy With Coherent Illumination (Low Contrast Objects) Using Holographic Image — Deblurring Deconvolution, III.— Optik, 1972, v. 35, 36.
8. A. W. Lohmann and D. P. Paris. Binary Fraunhofer Holograms Generated by Computer.— Appl. Opt., 1967, v. 6, № 10.
9. B. R. Brown and A. W. Lohmann. Computer — Generated Binary Holograms.— IBMJ. Res. Develop., 1969, v. 13, № 2.
10. R. W. Gerchberg and W. O. Saxton. Phase Determination From Image and Diffraction Plane Pictures in the Electron Microscope.— Optik, 1971, v. 34, July, pp. 275—284.
11. F. C. Billingsley. Image Processing for Electron Microscopy: II. A Digital System.— In Advances in Optical and Electron Microscopy, v. 4. R. Barer and V. E. Cosslett, eds. New York: Academic, 1971, pp. 127—160; see also Nathan R. "Image processing for electron microscopy: I. Enhancement procedures", p. 85—126.
12. L. B. Lessem and P. M. Hirsch. Computer Synthesis of Holograms for 3 — D Display.— Commun. ACM, 1968, v. 11, Oct., pp. 661—674.

Поступила в редакцию 16 апреля 1973 г.

УДК 772.99: 681.327.5

**И. С. ГИБИН, М. А. ГОФМАН, Е. Ф. ПЕН,
П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ**
(Новосибирск)

АССОЦИАТИВНАЯ ВЫБОРКА ИНФОРМАЦИИ В ГОЛОГРАММНЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

По принципу организации выборки информации известные запоминающие устройства (ЗУ) делятся на адресные и ассоциативные. Считывание информации в адресных ЗУ осуществляется путем обра-

щения к ячейке памяти по указанному адресу; в ассоциативных ЗУ распределение информационных слов по ячейкам памяти заранее неизвестно, и поэтому этапу считывания этих слов предшествует этап поиска их адреса. Поиск производится параллельно или последовательно по ключевым словам — признакам, которые содержатся как в запросе, так и в ячейках памяти. В первом случае сравнение и принятие решения о близости (совпадении) ключевых слов запроса и содержимого памяти производится одновременно по всем ячейкам ЗУ, во втором — поочередно.

Указанные принципы выборки информации реализуются в настоящее время и в голограммных ЗУ. Так, например, адресные голограммные ЗУ описаны в работах [1—3], ассоциативные с параллельным и последовательным поиском адреса — соответственно в [4—6]. Различие между ними состоит лишь в том, что в ассоциативных голограммных ЗУ предусмотрена аппаратурная избыточность для выполнения операции поиска адреса.

Адресные голограммные ЗУ достигли в настоящее время высокого уровня совершенства [3, 7]. Вместе с тем ассоциативные голограммные ЗУ не лишены заметных недостатков. Применяемый в [4] корреляционный механизм поиска представляет интерес лишь в том случае, когда ключевые слова являются сложными изображениями, а их автокорреляционные функции близки к δ -функциям. При последовательном сравнении ключевых слов [6] время поиска адреса значительно зависит от объема памяти. Представление ключевых и информационных слов в виде линеек световых точек и регистрация их в виде линейчатых голограмм ограничивают разрядность этих слов и объем памяти голограммного ЗУ [5].

Таким образом, необходимо искать иные варианты структур ассоциативных голограммных ЗУ, которые, с одной стороны, учитывали бы совершенство адресных голограммных ЗУ и, с другой, — были бы лишены указанных недостатков.

Ниже описаны два варианта устройств с параллельным поиском адреса, удовлетворяющих приведенным выше требованиям. В первом случае элементы устройств поиска и адресного голограммного ЗУ составляют единое целое, во втором — устройство поиска может быть автономным. Решение о близости (совпадении) слов запроса и ключевых слов принимается на основе функции близости, выражаемой количеством несовпавших двоичных нулей и единиц сопоставляемых слов.

Принцип сравнения. Задача сравнения слова запроса и ключевых слов, заданных в двоичном коде, состоит в вычислении N компонент вектора Z , имеющего смысл функции близости, согласно матричному логическому уравнению

$$\begin{pmatrix} \bar{z}_1 \\ \bar{z}_2 \\ \vdots \\ \bar{z}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{x}_{11}\bar{x}_{11} & \bar{x}_{12}\bar{x}_{12} & \dots & \bar{x}_{1n}\bar{x}_{1n} \\ \bar{x}_{21}\bar{x}_{21} & \bar{x}_{22}\bar{x}_{22} & \dots & \bar{x}_{2n}\bar{x}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{x}_{N1}\bar{x}_{N1} & \bar{x}_{N2}\bar{x}_{N2} & \dots & \bar{x}_{Nn}\bar{x}_{Nn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \\ \bar{y}_2 \\ \vdots \\ \bar{y}_n \\ \bar{y}_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $(\bar{x}_{j1}\bar{x}_{j1}, \bar{x}_{j2}\bar{x}_{j2}, \dots, \bar{x}_{jn}\bar{x}_{jn})$, $j=1, 2, \dots, N$, — n -разрядные ключевые слова, каждый разряд которых представлен в прямом и в обратном кодах, т. е. 1 записывается как 10, а 0 как 01; $(\bar{y}_1\bar{y}_1, \bar{y}_2\bar{y}_2, \dots, \bar{y}_n\bar{y}_n)$ — слово запроса, двоичные разряды которого представлены соответственно в обратном и прямом кодах так, что 1 записывается как 01,

а 0 как 10 [8]. Из уравнения (1) следует, что компонента z_j вектора Z равна

$$z_j = \sum_{i=1}^n (x_{ji}\bar{y}_i + \bar{x}_{ji}y_i). \quad (2)$$

В случае совпадения ключевого слова с индексом j со словом запроса получаем, что $z_j=0$; в случае несовпадения — $z_j=1$, если физический параметр, моделирующий эту переменную, принимает значение, превышающее порог z_0 . Если же при вычислении z_j сравнения с порогом не производить, то случай $z_j > 0$ соответствует количеству несовпавших нулей и единиц в сопоставляемых словах.

Нетрудно проверить, что компоненты вектора Z , определяемые выражением (2), можно вычислить из матричного логического уравнения

$$\|z_1 z_2 \dots z_N\| = \|\bar{y}_1 \bar{y}_2 \dots \bar{y}_n\| \times \begin{vmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{N1} \\ \bar{x}_{11} & \bar{x}_{21} & \dots & \bar{x}_{N1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{N2} \\ \bar{x}_{12} & \bar{x}_{22} & \dots & \bar{x}_{N2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{Nn} \\ \bar{x}_{1n} & \bar{x}_{2n} & \dots & \bar{x}_{Nn} \end{vmatrix}, \quad (3)$$

эквивалентного уравнению (1). Отличие их состоит лишь в том, что матрица ключевых слов и вектор слова запроса транспонированы и переставлены местами.

Рассмотрим теперь варианты оптических устройств, обеспечивающих вычисление компонент вектора Z , согласно уравнениям (1) и (3).

Реализация процесса сравнения. Обратимся к схеме на рис. 1,

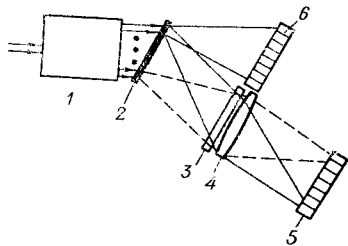


Рис. 1.

где 1 — дефлектор света; 2 — матрица голограмм; 3 — пространственный модулятор света; 4 — объектив переноса изображения из плоскости матрицы голограмм в плоскость многоэлементного фотоприемника 5, предназначенного для считывания адреса; 6 — многоэлементный фотоприемник для считывания информационных слов.

В этом устройстве ключевые слова $(x_{j1}\bar{x}_{j1}, x_{j2}\bar{x}_{j2}, \dots, x_{jn}\bar{x}_{jn})$, $j=1, 2, \dots, N$, содержатся в каждой из голограмм матрицы 2 вместе с информационными словами.

Число голограмм равно N . Поиск адреса запрашиваемого информационного слова производится путем одновременного пропускания изображений всех ключевых слов через пространственный модулятор света 3 и последующего преобразования полученного светового распределения объективом 4 в плоскость многоэлементного фотоприемника 5. Модулятор 3 является устройством формирования слова запроса $(\bar{y}_1 \bar{y}_1, \bar{y}_2 \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_n \bar{y}_n)$. В результате этого в выходной плоскости получим световое распределение, соответствующее вектору Z , в виде комбинации световых точек. Адрес голограммы, содержащей запрашиваемое информационное слово, определяется по отсутствию светового сигнала на входе соответствующих элементов фотоприемника 5.

После определения адреса устройство работает как обычное адресное голограммное ЗУ. Восстановленное из голограммы информационное слово, изображение которого имеет вид матрицы, считывается многоэлементным фотоприемником 6.

При реализации устройств, работающих по такому принципу, в качестве элемента отклонения света I удобно использовать электрооптический дефлектор. На этапе поиска адреса световой пучок лазера расщепляется дефлектором на множество пучков так, чтобы каждый пучок проектировался на «свою» голограмму матрицы. Это достигается подачей на ячейки электрооптического дефлектора четвертьволновых управляющих напряжений. После нахождения адреса запрашиваемой информации дефлектор переводится в режим отклонения пучка и восстанавливается информация по найденному адресу.

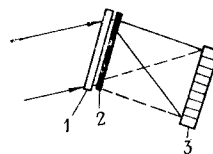


Рис. 2.

На рис. 2 приведена схема устройства параллельного поиска, осуществляющего вычисление компонент функции близости, согласно уравнению (3). Здесь 1 — пространственный модулятор света; 2 — матрица из $2n$ голограмм; 3 — многоэлементный фотоприемник. Устройство выполнено так, что в каждой голограмме записана одна строка матрицы $\|x_{ji}\bar{x}_{ji}\|^r$. Строки $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{Ni})$ и $(\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}, \dots, \bar{x}_{Ni})$ указанных матриц составлены из i -х разрядов всех ключевых слов и при восстановлении имеют вид прямоугольной матрицы. Координаты световых точек в изображениях строк $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{Ni})$ определяют адреса ячеек адресного ЗУ, содержащих информацию, не удовлетворяющую i -му разряду — признаку ключевого слова. И наоборот, в изображении строки $(\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}, \dots, \bar{x}_{Ni})$ координаты световых точек определяют адреса ячеек ЗУ, содержащих информацию, удовлетворяющую i -му разряду — признаку ключевого слова.

Процедура поиска адреса производится следующим образом. Матрица голограмм 2 освещается когерентным световым пучком так, чтобы изображения из всех голограмм восстанавливались в одном и том же месте выходной плоскости. Слово запроса вводится с помощью пространственного модулятора света 1 . При этом ячейки модулятора, соответствующие единичным разрядам слова запроса в прямом коде, пропускают свет на голограммы, содержащие информацию о строках $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{Ni})$, а ячейки, соответствующие единичным разрядам слова запроса в обратном коде, — на голограммы, содержащие информацию о строках $(\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}, \dots, \bar{x}_{Ni})$. Результат суперпозиции восстановленных изображений формируется на входе многоэлементного фотоприемника 3 и соответствует значениям компонент функции близости. Как и в предыдущем случае, адрес искомой информации определяется координатами элементов фотоприемной матрицы, на входе которых световые сигналы отсутствуют. На втором этапе по найденному адресу информация может быть считана с помощью обычных адресных ЗУ.

Отметим, что в рассмотренных вариантах устройств параллельного поиска может быть осуществлена операция маскирования, когда двоичный разряд слова запроса представлен состоянием 00. Это необходимо при реализации процедур сложного поиска, а также упорядоченной выборки информации в случае многозначного ответа [8].

Результаты экспериментов. Работоспособность описанных вариантов устройств поиска адреса для ассоциативных голограммных ЗУ проверена экспериментально. Для этого было составлено 16 16-разрядных ключевых слов.

В первом случае ключевые слова, каждый разряд которых задавался в прямом и обратном кодах, регистрировались на соответствующих позициях матрицы, содержащей 4×4 голограмм. Их запись проводилась с помощью устройства для записи матриц голограмм [9]. После обработки пластинка с матрицей голограмм помещалась в оптическую систему и освещалась плоским когерентным световым пучком.

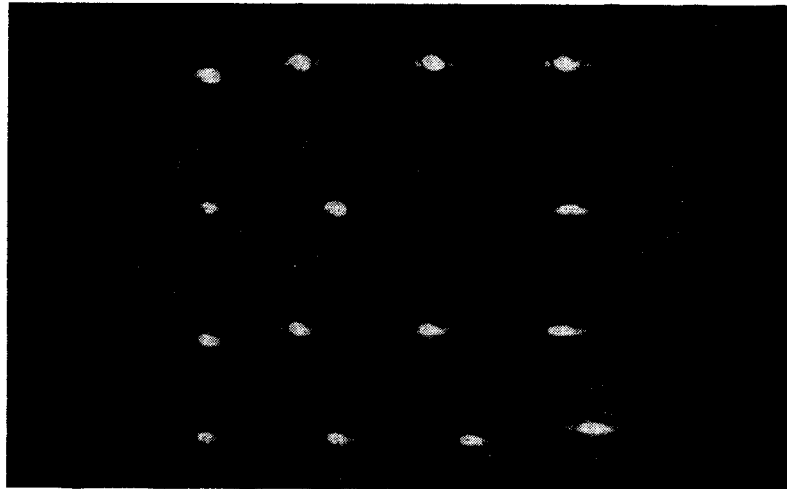


Рис. 3.

Каждое из ключевых слов восстанавливалось в плоскости пространственного модулятора света в виде матрицы, состоящей из 8×4 светлых и темных точек. В качестве модулятора использовалась обычная перфоркарта, на которой перфорациями фиксировалось слово запроса $(y_1y_1, y_2y_2, \dots, y_ny_n)$, вид которого соответствовал виду восстановленных ключевых слов. В выходной плоскости устройства можно было наблюдать световую картину с интенсивностью, пропорциональной значениям компонент z_j . Вид одной из таких картин показан на рис. 3. Координаты темного участка на рисунке соответствуют адресу голограммы, содержащей ключевое слово, совпадающее со словом запроса.

Во втором случае производилась запись матрицы из 8×4 голограмм таким образом, что $(2i-1)$ -я голограмма содержала разряды ключевых слов в прямом коде, а $2i$ -я — разряды ключевых слов в обратном коде. В результате в каждой голограмме хранилась матрица из 4×4 световых точек. Модулятор света располагался непосредственно перед матрицей голограмм так, что элементы, соответствующие y_i разрядам слова запроса, находились против голограмм, содержащих информацию об x_i разрядах ключевых слов, а элементы, соответствующие y_i разрядам, — против голограмм, содержащих информацию об x_i разрядах. Результат поиска адреса формируется в выходной плоскости устройства. На рис. 4 показано световое распределение, полученное в результате ввода слова запроса, при котором ранее была получена картина рис. 3. Здесь координаты темного участка указывают на искомый адрес ячейки.

Отметим, что подобные процедуры ассоциативного поиска можно проводить не только с цифровыми кодами, но и со зрительными изображениями. На рис. 5 показан результат поиска номеров объектов, удовлетворяющих заданной системе признаков. В этом случае на одной из голограмм матрицы было записано изображение, содержащее 16 номеров объектов, а на остальных — матрицы из изображений крестов. Кресты, восстановленные из k -й голограммы, «перечеркивали» номера объектов, не удовлетворяющих k -му признаку.

При проведении последнего из экспериментов матрицы голограмм записывались на слоях стеклообразного полупроводника типа As_2S_3 . Этот материал позволяет получать высокую дифракционную эффективность (в нашем случае порядка 30%), не требует химической обработки и допускает визуальный контроль записи. Запись голограмм производилась излучением мощного аргонового лазера с $\lambda = 0,5145$ мкм [10].

При поиске голограммы восстанавливались светом с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм. В качестве модулятора применялся жидкокристаллический модулятор света 5×5 элементов. Толщина слоя жидкого кристалла $h = 15$ мкм. Для повышения контраста и быстрого действия использована комбинированная схема питания переменным высокочастотным и низкочастотным полями, а также схема коммутации, снижающая возможность паразитного возбуждения элементов. Параметры модулятора: время включения $\tau = 5$ мс; контраст $K = 300$.

Заключение. Рассмотренные варианты ассоциативных голограммных ЗУ позволяют решать задачи с большими массивами информации. Поскольку емкость памяти адресных голограммных ЗУ достигает 10^8 и более бит при емкости одной голограммы 10^4 бит [1], то возможно обеспечить параллельный поиск по 10^4 ключевым словам, каждое из которых может содержать до 10^4 бит.

Такие задачи, к примеру, возникают в спектроскопии, где производится информационный поиск по спектрам веществ, их структурным формулам и фрагментам, молекулярному весу и т. п. [11]. Устройства подобного типа могут также оказаться полезными и в других приложениях, где необходимо быстродействующее умножение матрицы на вектор-столбец. При этом число компонент вектора может достигать величины 10^4 , а размер матрицы — до $10^4 \times 10^4$ бит.

Авторы выражают благодарность В. И. Наливайко за изготовление образцов пластинок со слоями стеклообразного полупроводника, а С. Т. Де и А. В. Логинову за предоставление возможности работы с аргоновым лазером.

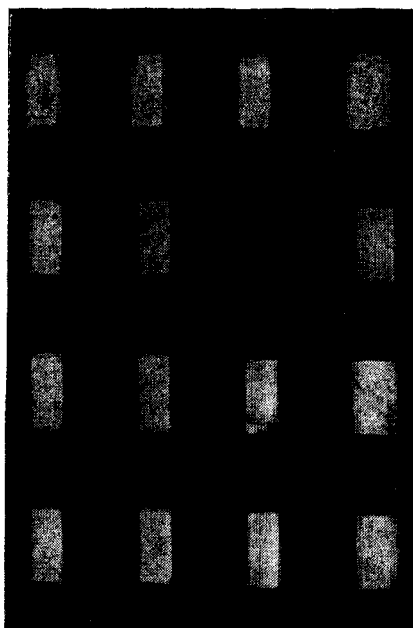


Рис. 4.

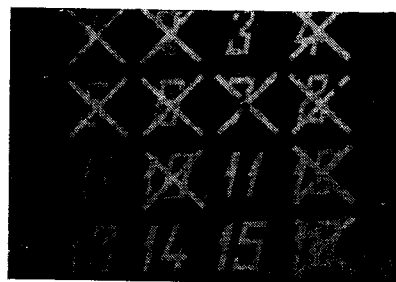


Рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. M. Smits, L. E. Gallaher. Design Considerations for a Semipermanent Optical Memory.—The Bell System Technical Journal, 1967, July — August.
2. А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев, А. А. Аксельрод, С. М. Наумов, М. М. Коблова, Э. А. Засовин, К. И. Куштанин, В. В. Харитонов. Голографические запоминающие устройства с записью информации массивами.— Квантовая электроника, 1971, № 1.
3. Ломан, Мезрих, Стюарт. Большие голографические ЗУ с высокими скоростями выборки.— Электроника, 1971, № 2.
4. D. Gabor. Associative Holographic Memories.—I. V. M. Journal Research and Development, 1969, March. Русский перевод: Зарубежная радиоэлектроника, 1970, № 4.
5. M. Sakaguchi, N. Nishida, T. Nemoto. A New Associative Memory System Utilizing Holography.—IEEE Transactions on Computers, 1969, v. C-19, № 12. Русский перевод: Зарубежная радиоэлектроника, 1971, № 11.

- v.11, № 1. Русский перевод: Зарубежная радиоэлектроника, 1971, № 11.
8. Л. П. Крайзмер, Д. А. Бородаев, Л. И. Гутенмахер, Б. П. Кузьмин, И. Л. Смелянский. Ассоциативные запоминающие устройства. М., «Энергия», 1967.
 9. И. С. Гибин, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб. Устройство для записи матриц голограмм.— Автометрия, 1973, № 5.
 10. А. М. Васильев, С. Т. Де, А. В. Логинов. Лабораторный аргоновый лазер с разрядным каналом из окиси бериллия.— Автометрия, 1972, № 5.
 11. В. С. Бочкарев, Ю. П. Дробышев, В. А. Коптюг, И. К. Коробейничева, В. И. Лобанов, Р. С. Нигматуллин. Машинная информационно-поисковая система для электронной спектроскопии.— Автометрия, 1972, № 4.

Поступила в редакцию 18 декабря 1972 г.

© RCA REVIEW, 1972.

УДК 621.378; 681.327

В. ХЕННАН

(Принстон, Нью-Джерси)

РЕЛЬЕФНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ФИЛЬМЫ

Введение. Голотайп (голографическая лента) предназначен для предварительной записи видеоизображений в виде тисненых, рельефных голограмм. Изготовление такой ленты связано с записью голографических картин и звуковой информации на виниловой пленке. Основная причина применения этого метода — исключительно низкая стоимость пленок.

В работе отражены главные технические решения, которые привели к разработке голотайпных систем. Делается попытка ответить на следующие вопросы: Почему голограммы? Почему голограммы Фраунгофера? Каким образом можно получить высокое отношение сигнал/шум от изображений, восстановленных из очень маленьких голограмм? Каковы источники шума и как их можно подавить? Каким образом записываются цветные фильмы? Каким образом копируются ленты?

1. Голографическая система Фраунгофера. Новая голографическая система записи и преобразования изображений имеет следующие преимущества:

1) низкую стоимость копирования — рельефные фазовые голограммы можно впечатывать на дешевую виниловую пленку;

2) стойкость к царапинам и грязи — высокоизбыточные голограммы можно загрязнять или искажать каким-либо другим способом без серьезного ухудшения качества изображения;

3) инвариантность к сдвигу — голограммы Фраунгофера дают неподвижные изображения даже если лента постоянно движется. Свободное от мерцаний изображение получается при любой скорости движения ленты без синхронизации между скоростью ленты и скоростью развертки телевизионного изображения. В отличие от всех других систем видеозаписи голотайп полностью совместим с любым иностранным телевизионным стандартом и может запускаться с любой скоростью или давать неподвижные изображения;

4) надежность — голотайпный преобразователь не критичен к настройке оптических элементов и имеет небольшую скорость движения пленки.

Достижение этих качеств предусматривает использование избыточных голограмм Фраунгофера, лазера для записи и воспроизведения сигнала и изображающей оптики.