

3. A. W. Warner, D. L. White, W. A. Bomer. Acousto-optic light deflectors using optical activity in paratellurite.—“J. Appl. Phys.”, 1972, vol. 43, № 11, p. 4489—4495.
4. D. Pinnow. Physical properties of lead molybdate relevant to acousto-optic device application.—“J. Appl. Phys.”, 1971, № 6, p. 2162—2171.
5. D. Pinnow. Guide lines for the selection of acousto-optical materials.—“IEEE J. Quant. Electron.”, 1970, vol. QE-6, № 4, p. 223—238.
6. А. А. Зарецкий, И. И. Климов, Р. П. Шидловский. Система адресной коммутации на основе акустооптической ячейки для голографического запоминающего устройства.—«Вопросы радиоэлектроники. ЭВТ», 1974, вып. 7, с. 77—86.
7. О. В. Алексеев, А. И. Животовский, Г. Г. Чавка. Широкополосное согласование простых типов нагрузок.—«Вопросы радиоэлектроники. ТРС», 1968, вып. 2, с. 3—11.
8. Нурденас. Синтезаторы частот. (Обзор методов построения приборов.)—«Зарубеж. радиоэлектроника», 1970, № 5, с. 115—138.

*Поступила в редакцию 14 мая 1975 г.;
окончательный вариант — 14 ноября 1975 г.*

УДК 681.142.52

**С. Т. ВАСЬКОВ, А. Н. КАСПЕРОВИЧ,
И. М. САХАРОВ, Ю. В. ШАЛАГИНОВ**

(Новосибирск)

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ «КОД — СВЕТ» В ЗАДАЧАХ ВЫВОДА ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ ЭВМ НА ФОТОМАТЕРИАЛ

При применении ЭВМ для улучшения качества изображений в работах по распознаванию образов и передаче оптической информации по каналам связи возникает необходимость воспроизведения и записи на фотоматериал изображений по кодам плотности элементов этого изображения, хранящихся в памяти ЭВМ. К качеству выведенных из ЭВМ изображений предъявляются достаточно высокие требования. Например, для изображений, предназначенных для рассматривания человеком, относительная погрешность воспроизведения яркости элементов изображения не должна превышать 4—5% [1].

Точность воспроизведения оптической плотности элементов изображения во многом зависит от согласования характеристики «код плотности — свет» устройства, преобразующего код плотности элементов изображения в световой поток, с характеристической кривой фотоматериала. Поэтому для практики построения прецизионных устройств вывода из ЭВМ изображений важно определить количественные соотношения между параметрами характеристической кривой фотоматериала и параметрами характеристики «код — свет» устройства записи, которая определяет закон изменения экспозиции H от кода N , эквивалентного значению оптической плотности D любого элемента изображения.

Уравнение характеристической кривой фотоматериала, как известно, может быть представлено в виде

$$D = f\{\lg(H)\}, \quad (1)$$

где H — экспозиция.

Найдем простое аналитическое описание характеристической кривой. Для этого аппроксимируем выражение (1) двумя кривыми — линейной и экспоненциальной. Заметим, что использование других известных [2, 3] способов аппроксимации приводит к неоправданно сложностям при определении параметров характеристики «код — свет». Уравнение характеристической кривой для прямолинейного участка может быть записано в виде

$$D = D_0 + k_2(\lg H - \lg H_0) \text{ для } H \geq H_0, \quad (2)$$

где $k_2 = \Delta D / \Delta \lg H$ — постоянный коэффициент; D_0 и H_0 — соответственно оптическая плотность и экспозиция, начиная с которых справедливо выражение (2).

Значения D_0 и H_0 зависят от типа фотоматериала, режима обработки и т. д. Для приближенной оценки D_0 и H_0 используется точка характеристической кривой с оптической плотностью, превышающей плотность вуали примерно на 0,6 единицы оптической плотности [2].

На начальном участке характеристическая кривая может быть приближенно описана уравнением

$$D = k_1 e^{\lg H / 10} \text{ для } H \leq H_0, \quad (3)$$

что эквивалентно записи $D = k_1 H$ для $H \leq H_0$ (k_1 — постоянный коэффициент).

В качестве примера на рис. 1, 2 приведены зависимости D от $\lg H$ и зависимость D от H для аэрофотоэмульсии изопанхром тип 17, а также результаты аппроксимации зависимости D от H соотношениями (2) и (3). Кривые 1 и 2 построены соответственно для проявителя № 1 по ГОСТу и проявителя УП-2 при времени проявления 7 мин. Параметры кривых 1 и 2 определялись с помощью скалярных множителей, приведенных в справочнике [3]. Точность определения оптической плотности при этом составляет $\pm 0,02$ единицы при $0 \leq D \leq 3,0$ единиц оптической плотности [3]. На этих же рисунках проведены штрихпунктирные прямые линии, показывающие, какие участки кривых являются линейными. Штриховой линией (см. рис. 2) представлены результаты аппроксимации зависимости D от H соотношениями (2) и (3). Из рис. 2 видно, что точность аппроксимации усредненной характеристической кривой соотношениями (2) и (3) близка к точности аппроксимации с помощью скалярных множителей. Значения коэффициентов k_1 и k_2 при определении их с помощью скалярных множителей равны соответственно 30,5 и 1,2. Более точно с учетом конкретного времени экспозиции, источника света, режима обработки и т. д. значения D_0 , H_0 и коэффициентов k_1 и k_2 могут быть определены экспериментально.

Требуемый вид характеристики «код—свет», при котором связь между воспроизводимой при записи оптической плотностью и кодом плотности будет линейной, легко определить из соотношений (2) и (3). Для малых значений D эта характеристика описывается выражением

$$H = \alpha (N_D / k_1) \text{ для } D \leq D_0. \quad (4)$$

Здесь N_D — код оптической плотности; $\alpha = N_{D_{\max}} / D_{\max}$ (D_{\max} — зна-

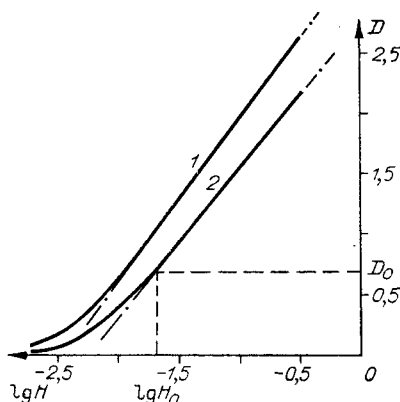


Рис. 1.

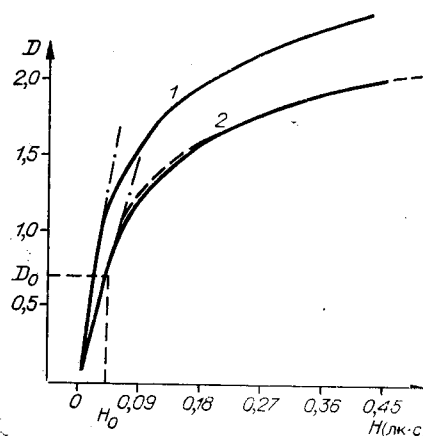


Рис. 2.

чение оптической плотности, соответствующее максимальному коду $N_{D_{\max}}$.

Для больших значений D необходимо, чтобы

$$H = H_0 10^{\frac{\alpha(N_D - N_{D_0})}{k_2}} = \frac{\alpha N_{D_0}}{k_1} e^{\frac{\alpha(N_D - N_{D_0})}{k_2} \ln 10}, \quad (5)$$

где $N_{D_0} = k_1 H_0 / \alpha$.

Легко убедиться, что при использовании экспозиций, определяемых выражениями (4) и (5), воспроизводимая при записи плотность D будет линейно зависеть от кода плотности N_D , хранящегося в памяти ЭВМ: $D = \alpha N_D$.

Необходимое значение экспозиции при записи на фотоматериал любого элемента изображения может быть получено как изменением времени экспозиции (при $E = \text{const}$), так и изменением (при $t = \text{const}$) освещенности E , например, путем изменения яркости источника света, с помощью которого осуществляется запись изображения. Однако при работе в широком диапазоне времен экспозиций, нужных для получения определенной плотности, освещенность E и время экспозиции t связаны соотношением Шварцшильда

$$Et^\rho = \text{const} \text{ для } D = \text{const},$$

где ρ — коэффициент, характеризующий свойства фотоматериалов; т. е. плотность нелинейным образом связана с временем экспозиции (при $E = \text{const}$), что практически неудобно. Кроме того, качество изображения при записи на фотопленку, перемещающуюся во время экспозиции, будет выше в случае, когда время экспозиции остается постоянным.

При меняющемся времени экспозиции участки изображения с различной оптической плотностью будут иметь существенно различную величину размытия. В этом случае при поэлементном воспроизведении изображений с большим динамическим диапазоном изменения оптической плотности недоэкспонированные участки (размытые границы записываемой апертуры) могут образовывать ложные контуры между соседними элементами и соседними строками ложные контуры большой протяженности, которые, как известно, хорошо различаются глазом человека.

При постоянном же времени экспозиции значение t можно подобрать так, чтобы контраст и размер ложных контуров были меньше разрешающей способности глаза. Этого же можно добиться (при $t = \text{const}$) путем частичного (на величину размытия) перекрытия на фотопленке последовательности изображений записываемой апертуры.

Требуемый вид закона изменения яркости источника света и тем самым экспозиции H от кода плотности N_D может быть реализован как программно с помощью ЭВМ и линейного цифроаналогового преобразователя, так и аппаратно с помощью функционального цифроаналогового преобразователя.

Первый способ реализации, по-видимому, целесообразен только в специальных случаях, например, когда режим обработки фотоматериала меняется (известным образом) или запись изображений осуществляется на фотоматериале разных (но опять же известных) типов и т. п.

В большинстве же случаев воспроизведение изображения осуществляется на фотоматериал одного типа, при использовании одного режима проявления. Поэтому более удобным является второй способ — аппаратный. Этот способ использован, например, в системе «Fotomatior» фирмы «Ortronics» (США). Следует отметить, что наличие функционального цифроаналогового преобразователя не исключает в случае необходимости возможности коррекции закона изменения экспозиции с помощью ЭВМ.

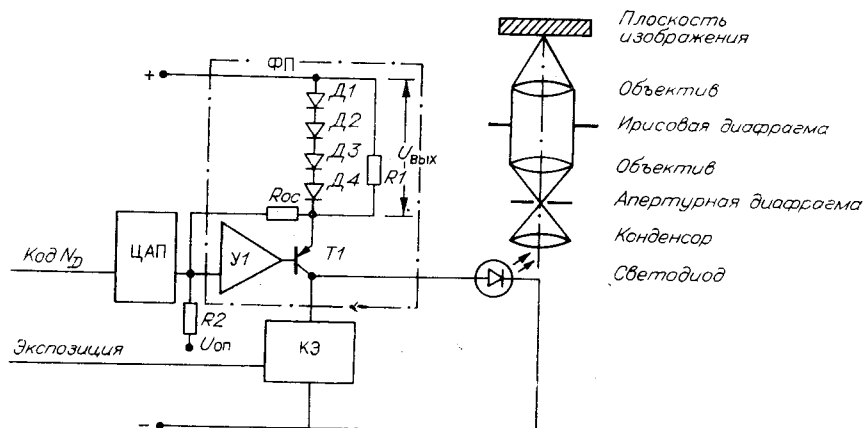


Рис. 3.

Соображения, изложенные выше, были положены в основу создания прецизионного электронно-механического устройства ввода — вывода изображений для ЭВМ, структурная схема канала записи которого показана на рис. 3.

Канал записи содержит источник света, проекционную оптику и функциональный цифроаналоговый преобразователь. Изменение экспозиции H осуществляется путем изменения мощности излучения источника света при $t = \text{const}$. Управление мощностью излучения производится с помощью функционального цифроаналогового преобразователя, формирующего импульс тока, амплитуда которого соответствует коду плотности воспроизводимого элемента изображения.

Запись изображений производится на аэрофотопленку изопанхром тип 16-800 и тип 17, характеристики которых (светочувствительность, спектральная чувствительность, разрешающая способность и т. д.) хорошо согласуются с характеристиками канала записи и источника света.

В качестве источника света, с помощью которого производится запись изображений, был выбран светодиод на основе арсенида галлия ($\lambda = 0,67 \text{ мкм}$), поскольку он наиболее полно (в отличие от газонаполненных модуляторных ламп) отвечает требованиям, предъявляемым к источнику света для записи полутоновых изображений. Светодиоды компактны, надежны, обладают высоким быстродействием и стабильностью, имеют сравнительно высокую мощность излучения и линейную модуляционную характеристику в широком динамическом диапазоне, не требуют сложных и громоздких схем управления.

Время экспозиции выбрано исходя из мощности излучения светодиода, чувствительности фотопленки и допустимого размытия изображения записывающей апертуры равным 10 мкс. При этом времени экспозиции была проверена линейность мощности излучения света от протекающего через светодиод тока. На рис. 4 приведен график этой зависимости. Из рисунка видно, что мощность излучения P (а в нашем случае и величина экспозиции H) практически линейно зависят от тока.

Амплитуда импульса тока, необходимого для получения требуемого светового потока, достигает значения $I_{\text{max}} = 2 \text{ А}$. Поэтому светодиод необходимо размещать на мощном радиаторе.

Функциональный цифроаналоговый преобразователь, схема которого показана на рис. 3, содержит линейный 8-разрядный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), усилитель тока — функциональный преобразователь (ФП) — и ключевые элементы (КЭ), подключающие светодиод к усилителю на время экспозиции. Собственно функциональ-

ный преобразователь состоит из операционного усилителя и выходного усилителя мощности — каскада $T1$, в эмиттерную цепь которого параллельно включены резистор $R1$ и нелинейные элементы — набор полупроводниковых диодов. Ток выходного каскада ФП определяется выходным напряжением операционного усилителя U , пропорциональным коду плотности N_D , и вольт-амперной характеристикой элемента, включенного в эмиттер транзистора $T1$. Источник U_{on} используется для того, чтобы обеспечить значение $U=0$ при $N_D=0$. Для обеспечения необходимого значения тока в практической схеме функционального преобразователя используются три параллельно включенных транзистора типа ГТ905А. Поскольку светодиод присоединяется к выходным транзисторам через коаксиальный кабель, то для качественной передачи импульсов тока эти транзисторы должны быть по возможности более высокочастотными. При малых напряжениях U значение тока определяется резистором $R1$ и зависимость между током и напряжением (кодом N_D) линейна. При увеличении напряжения диоды Д1—Д4 начинают открываться и зависимость между током и напряжением приближается к экспоненциальной.

Можно показать, что ток через нелинейный элемент — последовательное соединение трех кремниевых и одного германиевого диодов — будет равен

$$I_g = \frac{3+(m_r/m_k)}{\sqrt{I_{K01}I_{K02}I_{K03}I_{K04}}} \frac{m_r/m_k}{\times} \times \frac{U - I_g r}{e^{kT(m_r + 3m_k)}}$$

где I_{K0} — обратный ток диодов $kT = 26$ мВ; m — множитель, равный для кремниевых диодов $m_k = 1,6-1,8$ и для германиевых диодов $m_r = 1,4-1,6$; r — омическое сопротивление базы диода, сопротивление контактов и т. п.

Для численных расчетов удобно эту формулу преобразовать к виду

$$U = I_g r + kT (m_r + 3m_k) \ln \frac{I_g}{\frac{3+(m_r/m_k)}{\sqrt{I_{K01}I_{K02}I_{K03}I_{K04}}} \frac{m_r/m_k}{\times}}$$

Полный ток, протекающий через светодиод, равен

$$I_{св} = (U/R_1) + I_g.$$

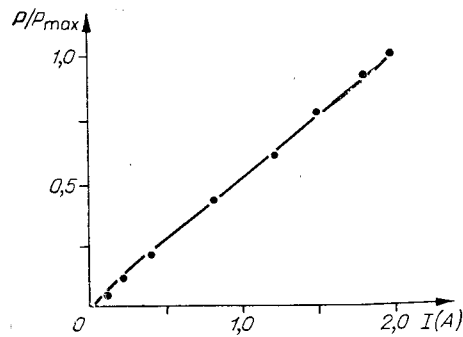


Рис. 4.

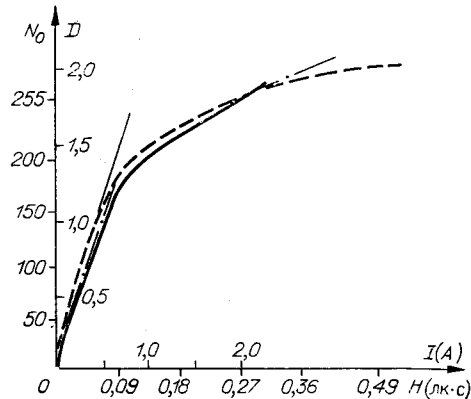


Рис. 5.

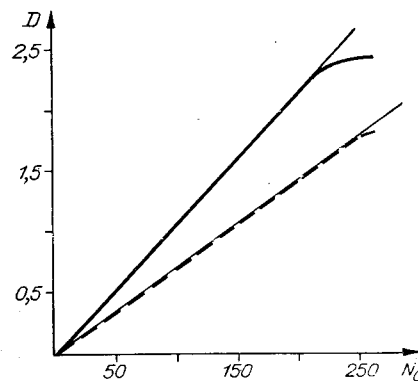


Рис. 6.

На рис. 5 штрихпунктирной линией представлена расчетная кривая зависимости тока светодиода от кода N_D (или то же — от выходного напряжения U операционного усилителя ЦАП) при $I_{к0зв} = 45$ нА, $r = 0,1$ Ом.

Полученные выражения показывают, что изменение вида характеристики нелинейного элемента можно осуществлять за счет изменения $I_{к0}$ и r диодов.

Практически регулировка нелинейного элемента производилась с помощью изменения числа параллельно включенных диодов. Заметим, что использование германиевых диодов повышает эффективность коррекции, поскольку их обратный ток входит в формулу с показателем, равным отношению m_r/m_k . Положение точки излома характеристики (значение N_{D_0}) регулируется изменением $I_{к0}$, что достигается выбором диодов с большим значением $I_{к0}$ или их параллельным включением. Наклон экспоненциального участка характеристики регулируется изменением r (для чего либо включается добавочный наружный резистор, либо выбираются диоды с меньшим r , либо включается параллельно несколько диодов).

Экспериментальный график зависимости тока светодиода от кода плотности представлен на рис. 5 сплошной линией. Штриховой линией на том же рисунке показана требуемая зависимость D от H , полученная путем аппроксимации характеристической кривой с помощью скалярных множителей (для аэрофотопленки изопанхром тип 17 при режиме обработки, указанном выше). Сравнение кривых, приведенных на рис. 5, показывает, что они совпадают с приемлемой точностью.

Функционирование канала проверялось путем воспроизведения изображения ступенчатого клина оптической плотности, которое соответствует кодам от 0 до 255, и последующего фотометрирования этого клина. Результаты фотометрирования представлены на рис. 6 (сплошная линия для аэрофотопленки тип 16—800, пунктирная — изопанхром тип 17; проявитель УП-2). Фотометрирование случайно расположенных участков изображений, полученных при равных экспозициях, показало, что разработанный канал записи изображений позволяет воспроизводить на аэрофотопленке изопанхром тип 16-800 и тип 17 не менее 64 градаций оптической плотности в диапазоне соответственно от 0 до 2,3 и от 0 до 1,8 единиц оптической плотности. Количество разрешимых уровней оптической плотности ограничено в основном неравномерностью чувствительности фотоматериала по его поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. П. Ярославский. Устройства ввода-вывода изображений для цифровых вычислительных машин. М., «Энергия», 1968. 87 с.
2. В. Н. Синцов. Влияние свойств фотоматериала на качество изображения, восстановленного из голограммы. — «Журн. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 1970, т. 15, вып. 5, с. 379—386.
3. Ю. Н. Гороховский, В. Н. Баранов. Свойства черно-белых фотографических пленок. Сенситометрический справочник. М., «Наука», 1970. 387 с.

Поступила в редакцию 12 декабря 1975 г.