

Ю. Х. КАГАН, Э. Л. КАЩЕЕВ, С. В. КРУГЛИКОВ,  
М. А. МАЙОРЧУК, Ю. А. МАНУХИН, С. И. НАЙМАРК  
(Новосибирск)

## САМОСКАНИРУЕМАЯ МДП-ИНТЕГРАЛЬНАЯ ЛИНЕЙКА ФОТОПРИЕМНИКОВ

Многоэлементные МДП-интегральные линейки фотоприемников — одно из новых достижений полупроводниковой МДП-технологии. Наиболее распространенными типами таких устройств являются фоточувствительные линейки на ПЗС [1, 2], МДП-фотодиодные линейки [3, 4], а также структуры типа «фотодиод — ПЗС — регистр» [5].

Если проводить сравнение ПЗС и фотодиодных линеек, то к достоинствам МДП-фотодиодных линеек следует отнести более высокую чувствительность, особенно в синей области спектра, и более высокую однородность чувствительности [6]; к наиболее существенным недостаткам — зависимость емкости видеовыхода от числа элементов, подключенных к выходной шине, и, как следствие, уменьшение напряжения выходного сигнала и увеличение шумов. Можно снизить влияние емкости выходной шины введением в каждую фотоячейку предусилителя на МДП-транзисторе, включенного по схеме истокового повторителя. Наличие предусилителя обеспечивает развязку малого сигнального тока фотодиода и большой емкости выходной шины.

В настоящей работе приведены результаты разработки и экспериментальных исследований МДП-фотодиодной линейки из 128 фотоячеек. Рассмотрены схемы, конструкция, технология изготовления и функционирование устройства; обсуждаются экспериментальные результаты.

**Схема и функционирование фотоячейки.** Рассмотрим принципиальную схему фотоячейки, изображенную на рис. 1, а, включающую фотодиод  $D$ , ключ дозаряда  $T_0$ , МДП-предусилитель  $T_1$  и ключ считывания  $T_2$ , стробирующий выходной ток предусилителя. Из рисунка видно, что в ячейке имеются отдельные цепи дозаряда (стирания) фотодиода на транзисторе  $T_0$  и считывания сигнального тока на транзисторе  $T_2$ . Поток излучения, падающего на фотоприемную площадку фотодиода при разомкнутом ключе  $T_0$ , вызывает на емкости фотодиода  $C_D$  изменение напряжения  $\Delta U$ , модулирующего рабочий ток МДП-предусилителя. При замыкании ключа  $T_2$  с учетом диаграммы сигналов на рис. 1, б имеем

$$I_1 = I_{01} + (S_\lambda \Phi (\theta + \tau_D) / C_D) g_m, \quad (1)$$

где  $\tau_D$  — постоянная времени фотодиода,  $I_1$  — ток стока транзистора  $T_1$ ,  $S_\lambda$  — токовая чувствительность фотодиода,  $\theta$  — интервал между замыканиями ключей  $T_0$  и  $T_2$  (см. рис. 1, а),  $g_m$  — крутизна управления по затвору транзистора  $T_1$ , определяемая выражением

$$g_m = \beta (E - V_0).$$

Здесь  $\beta$  — удельная крутизна интегрального транзистора  $T_1$ ,  $V_0$  — его по-

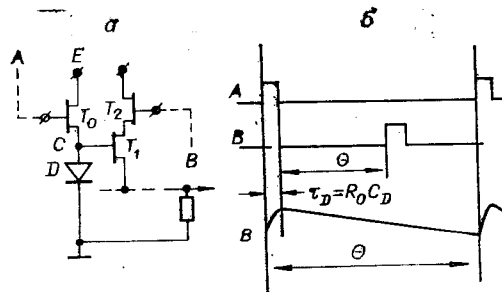


Рис. 1. Схема ячейки МДП-фотодиодной линейки (а) и временная диаграмма ее работы (б).

роговое напряжение,  $I_{01}$  — постоянная составляющая тока транзистора  $T_1$ , равная  $I_{01} = \beta(E - V_0)^2/2$ .

Из выражения (1) определяется токовая чувствительность фотоячейки при условии, что  $\theta \gg \tau_D$ :

$$\frac{\tau_D}{C_D} S_\lambda g_m < \hat{S} = \frac{\partial I_1}{\partial \Phi} \cong \frac{S_\lambda \theta}{C_D} g_m \leq \frac{S_\lambda \Theta}{C_D} g_m, \quad (2)$$

где  $\tau_D = R_0 C_D$  — постоянная времени МДП-фотодиода,  $\Theta$  — длительность кадра,  $R_0$  — сопротивление канала транзистора  $T_0$ .

Из (2) следует, что разделение цепей стирания и считывания обеспечивает возможность регулировки чувствительности  $\hat{S}$  с помощью параметра  $\theta$ .

Минимальное значение оптического сигнала на фотодиоде, определяемое по уровню шума, приведенному ко входу усилителя,

$$\Phi_{\min} = C_D U_{\text{ш}} / \theta S_\lambda \geq C_D U_{\text{ш}} / \Theta S_\lambda. \quad (3)$$

Согласно (2) и (3) отношение максимальной оптической мощности к минимальной  $D = \Phi_{\max} / \Phi_{\min}$  удовлетворяет условию

$$D \leq \hat{D} \leq D(\Theta / \tau_D), \quad (4)$$

где  $D = E / U_{\text{ш}}$  — собственно динамический диапазон фотоячейки при фиксированном времени накопления, а напряжение  $U_{\text{ш}}$  обуславливается шумовым источником.

Из выражений (3) и (4) нетрудно установить, что увеличение времени накопления приводит к снижению уровня  $\Phi_{\min}$  минимально обнаруживаемого оптического сигнала, а уменьшение — к увеличению сигнала насыщения  $\Phi_{\max}$ ; следовательно, эффективный динамический диапазон  $\hat{D}$  ячейки в предельном случае в  $\Theta / \tau_D$  раз больше  $D$ . Этот множитель может быть, в принципе, очень большим, поскольку время накопления  $\Theta$  со стороны фотоячейки ограничено только временем хранения заряда на емкости  $C_D$  (или токами утечки фотодиода), которое составляет в стандартных образцах  $0,001 \div 0,1$  с, а типичные значения постоянной времени  $\tau_D \cong 2 \div 20 \cdot 10^{-8}$  с.

**Структурная схема и конструкция линейки.** Исследованы линейки из 128 светочувствительных ячеек. В таких линейках цепи стирания и считывания каждой ячейки управляются от двух идентичных сдвиговых регистров (СР), генерирующих код «бегущая единица»; причем СР, используемый для управления цепями считывания, работает по отношению к СР управления цепями стирания с временной задержкой, определяющей время накопления заряда на фотодиодах (параметр  $\theta$ ).

Рассмотрим две схемы включения фотоприемной линейки (ФЛ). Первая из них, показанная на рис. 2, а, содержит два 128-разрядных СР, выходы которых подключены к 128 фотоячейкам. Выходные шины всех фотоячеек объединены в общий выход видеосигнала. Вторая схема приведена на рис. 3. Здесь фотоприемная линейка разбита на четыре фрагмента по 32 ячейки, управляемых от двух 32-разрядных СР, имеющих независимый выход. Структурная схема каждого из фрагментов аналогична схеме на рис. 2, а. Таким образом, фотоприемная линейка, изготовленная по второй схеме, включает восемь СР и четыре видеовыхода; она не имеет пропусков, все 128 фотодиодов расположены с шагом 0,075 мм. Эффективная скорость выборки информации в этой схеме в 4 раза выше, чем в первой.

Сдвиговые регистры в обоих типах фотоприемных линеек вырабатывают код «бегущая единица». Для управления ими необходимо формировать импульсные управляющие напряжения в соответствии с временной диаграммой, представленной на рис. 2, б. Ввод «единицы» в СР осуществляется путем подачи на его вход запускающего импульса  $\Phi_{\text{зап}}$ , а ее перемещение вдоль регистра происходит за счет подачи импульсов сдвига  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Когда «единица» достигает конца регистра, импульс сброса  $\Phi_{\text{сбр}}$  производит «обнуление» его последнего разряда.

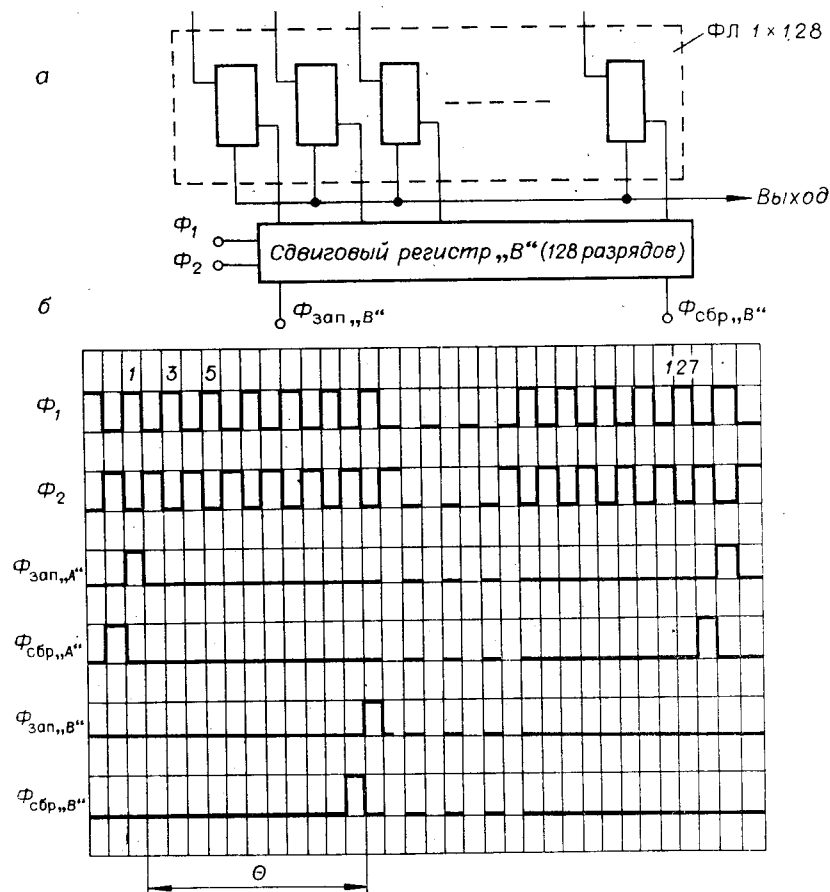


Рис. 2. Фотоприемная линейка (ФЛ) из 128 светочувствительных ячеек с двумя 128-разрядными сдвиговыми регистрами (СР):  
 а — структурная схема; б — временная диаграмма, необходимая для управления сдвиговыми регистрами.

С целью увеличения уровня напряжения, поступающего с СР на затворы ключей, управляющих работой фотодиодов, в каждом разряде регистра используется МОП-варактор (или «будстреп») [4], существенно увеличивающий быстродействие регистра и снижающий его потребляемую мощность.

Нами исследовались линейки с двумя размерами фотодиодных площадок ( $0,04 \times 0,04 \text{ мм}^2$  и  $0,85 \times 0,04 \text{ мм}^2$ ) и шагом между ними  $0,075 \text{ мкм}$ . Интегральная схема линейки изготавливалась по  $p$ -канальной МДП-технологии с поликремниевым затвором. В качестве фотодиодов служили области истоков транзисторов  $T_0$  (см. рис. 1, а), над которыми стравливался толстый окисел. На рис. 4 приведен общий вид прибора, смонтированного в корпусе с 64 выводами.

**Экспериментальные результаты.** Измерены такие параметры фотоприемных линеек, как быстродействие, фоточувствительность, разброс выходных сигналов по амплитуде и время хранения заряда.

Используемая аппаратура содержала генератор тактовых импульсов, задающий частоту сканирования фотоприемных ячеек, 128-разрядный сдвиговый регистр и формирователи сигналов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Все управляющие импульсные напряжения  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_{зап}$ ,  $\Phi_{сбр}$  усиливались до  $10 \div 18 \text{ В}$ ,

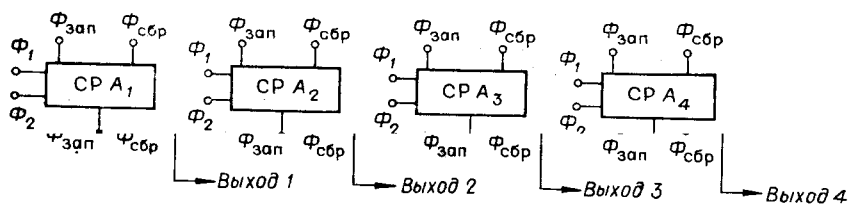


Рис. 3. Структурная схема фотоприемной линейки  $1 \times 128$ , содержащей четыре фрагмента, каждый из 32 светочувствительных ячеек.

имелась возможность регулировки амплитуды. Для подбора оптимальных временных соотношений между  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , а также  $\Phi_{зап}$  и  $\Phi_{сбр}$  в соответствующие каналы были введены генераторы, играющие роль регулируемых линий задержки.

**Быстродействие.** Скорость работы фотоприемной линейки не может превышать быстродействия управляющих СР и ограничена быстродействием светочувствительных ячеек. При исследовании линеек частота работы тактового генератора изменялась в диапазоне  $0,1 \div 10$  МГц. Из рис. 5 видно, что предельная частота работы регистра растет с увеличением амплитуды управляющих импульсов и достигает 9,6 МГц при амплитуде 17 В.

Быстродействие фотоприемной ячейки в основном зависит от постоянных времени МДП-фотодиода ( $\tau_D$ ) и выходной цепи. Минимальное время считывания информации с ячейки при нагрузочном сопротивлении  $R = 1,2$  кОм и амплитуде управляющих импульсов 17 В составляло 60 нс. При измерении минимального времени стирания фотоприемная ячейка работала в двух циклах. В первом, предварительном, цикле после предустановки ячейки (на нее подавался импульс стирания) на фотодиод поступал световой импульс с фиксированной энергией излучения. Во втором, измерительном, цикле фотодиод не освещался и разряжался только темновыми токами. Поэтому, если при стирании (независимо от уровня энергии предварительной засветки) произведен полный дозаряд емкости

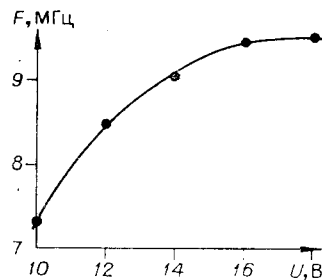
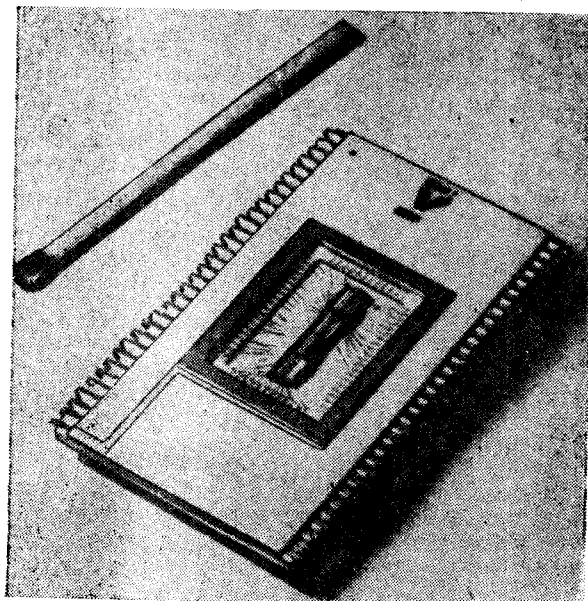


Рис. 5. График зависимости максимальной частоты работы сдвигового регистра от амплитуды управляющих импульсов  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_{зап}, \Phi_{сбр}$ .

Рис. 4. Интегральная самосканируемая линейка из 128 светочувствительных ячеек. Общий вид прибора в корпусе.

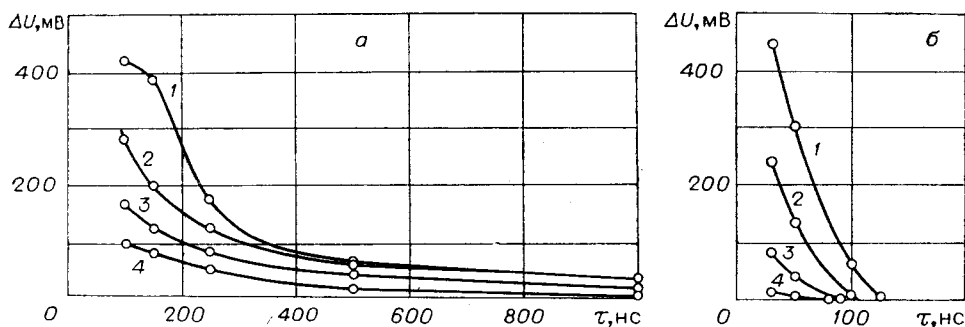


Рис. 6. Зависимость выходного сигнала фотоприемной ячейки (с учетом предистории ее освещения) от длительности стирающих импульсов:

а — при амплитуде стирающих импульсов 10 В, б — 17 В. Графики получены при различной энергии импульса предварительной засветки (1 — при энергии насыщения  $3 \cdot 10^{-11}$  Дж; 2 —  $1,2 \cdot 10^{-11}$  Дж; 3 —  $2,2 \cdot 10^{-12}$  Дж; 4 —  $5 \cdot 10^{-13}$  Дж).

фотодиода, то сигнал, снимаемый с фотоячейки при считывании, должен соответствовать темновому. Если за время стирания фотодиод не успел полностью зарядиться, наблюдается падение выходного напряжения по сравнению с темновым.

На рис. 6 показаны зависимости выходного напряжения (при неполной дозарядке фотодиода после его предварительного освещения) от длительности стирающих импульсов. Графики на рис. 6, а получены при амплитуде стирающих импульсов 10 В, на рис. 6, б — при амплитуде 17 В. Параметром приведенных графиков является энергия импульса предварительной засветки, причем для графиков 1 эта энергия равна энергии насыщения  $3 \cdot 10^{-11}$  Дж. Измерения проводились при тактовой частоте работы СР 1 МГц и длительности считывающих импульсов  $\tau_{сч} = 1$  мкс.

Как видно из приведенных данных, минимально необходимая длительность импульсов стирания существенно уменьшается с увеличением амплитуды стирающих импульсов. Это связано с тем, что постоянная времени дозарядки фотодиода  $\tau_b$  уменьшается с увеличением напряжения на затворе транзистора  $T_0$  (см. рис. 1, а). Измерения показали, что практически полное стирание информации достигается при длительности стирающих импульсов 130 нс.

**Фоточувствительность.** Зависимости изменения амплитуды выходного сигнала от энергии света, попадающего на фотоприемники в течение времени экспозиции, представлены на рис. 7. Кривая 1 соответствует фотодиодам размером  $40 \times 40$  мкм<sup>2</sup>, кривая 2 — фотодиодам размером  $40 \times 850$  мкм<sup>2</sup>. Из приведенных зависимостей следует, что вольтовая чувствительность квадратных фотоприемников равна  $2,8 \cdot 10^{11}$  В/Дж, прямоугольных —  $3 \cdot 10^{10}$  В/Дж, т. е. почти во столько же раз хуже, во сколько раз больше площадь фотодиодов. Неполное соответствие связано с тем, что на величину выходного сигнала с опрашиваемого элемента, наряду с собственной емкостью фотодиода, пропорциональной его площади, существенное влияние оказывают паразитные емкости, обусловленные другими элементами и шинами фотоприемной линейки.

Из рис. 7 видно, что для первого типа фотоприемников сигнал насыщения равен  $(2,5 \div 3) \cdot 10^{-12}$  Дж, для второго типа —  $(2,5 \div 3) \cdot 10^{-11}$  Дж.

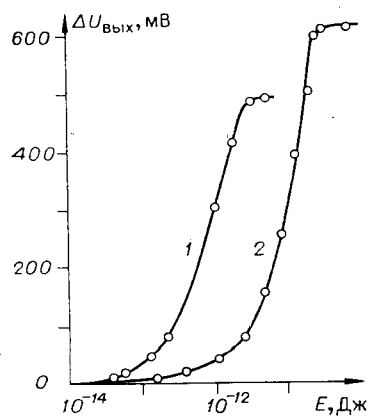


Рис. 7. Зависимости изменения амплитуды выходного сигнала с фотоприемной линейки от энергии освещения:

1 — при размерах фотодиодов  $40 \times 40$  мкм, 2 —  $40 \times 850$  мкм.

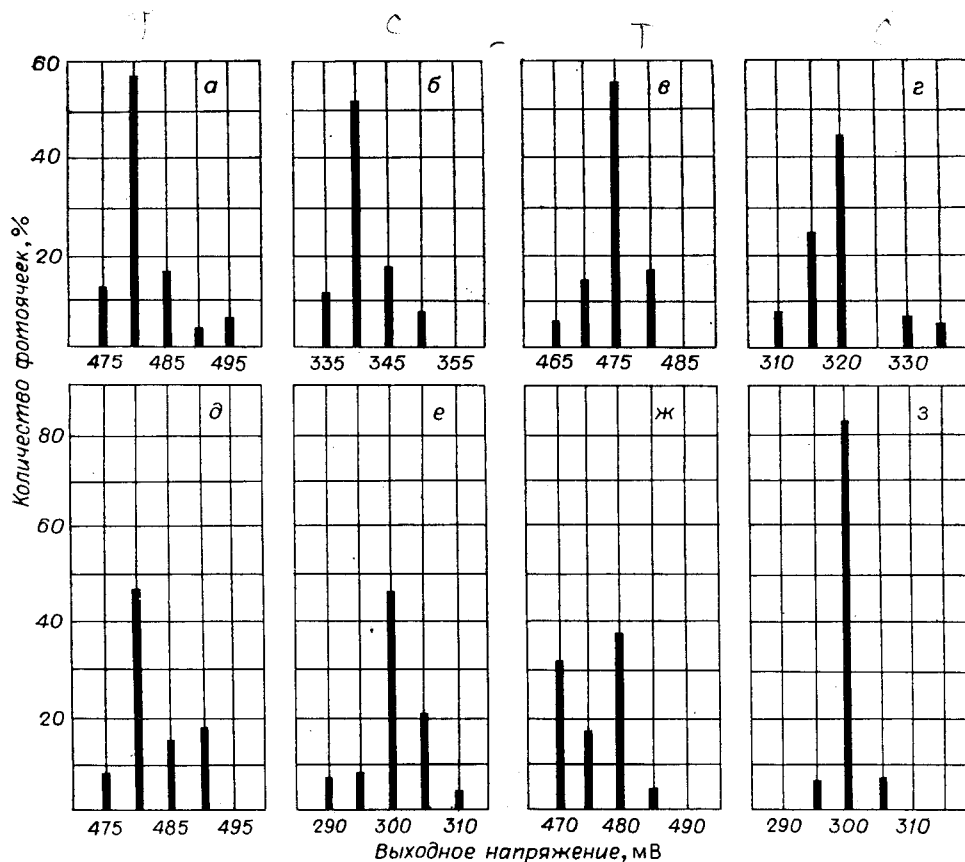


Рис. 8. Гистограммы выходных сигналов с фрагментов  $1 \times 32$  фотоприемных линеек: а, в, д, ж — в отсутствие света; б, г, е, з — при энергии световых импульсов  $10^{-11}$  Дж. Гистограммы на рисунках а, б, в, г соответствуют двум фрагментам фотоприемной линейки, расположенным на одном кристалле; гистограммы на рисунках д, е, ж, з — двум фрагментам на другом кристалле.

**Разброс амплитуды выходного напряжения.** Измерение разброса амплитудных выходных напряжений проводилось на фрагментах фотоприемных линеек из 32 светочувствительных ячеек при отсутствии света и при энергии световых импульсов, равной  $10^{-11}$  Дж.

Гистограммы выходных сигналов показаны на рис. 8; на рис. 8, а, б представлены распределения выходных сигналов двух фрагментов, расположенных на одном кристалле и обладающих одинаковой геометрией ячеек; на рис. 8, в, г — также двух фрагментов, но расположенных на другом кристалле. Отсюда следует, что максимальный разброс выходных сигналов ячеек в пределах одного кристалла не превышает  $\pm 10$  мВ.

**Время хранения.** Время хранения информации, записанной в виде заряда на емкости фотодиода, обуславливается темновыми токами утечки, разряжающими барьерную емкость  $C_b$ . Вследствие разряда емкости уменьшается амплитуда выходного сигнала, поэтому время хранения можно определить как максимальный временной интервал, при котором в отсутствие засветки выходное напряжение изменяется, например, на 10% от первоначально измеренного. При таком критерии время хранения информации в экспериментальных образцах фотоприемных линеек достигало 510 мс.

**Обсуждение результатов.** Основные параметры фотоприемных линеек приведены в таблице. Динамический диапазон  $D$  фоточувствительных ячеек определялся с учетом «шума с фиксированным распределением» [7], который может быть подавлен с помощью внешнего фильтрующего устройства. Тогда параметр  $D$  ограничивается флуктуационными шумами и достигает значений  $\sim 10^3 \div 10^4$ .

Условное обозначение параметра	Наименование параметра	Размеры фоточувствительных ячеек, мм	Экспериментальное значение	Единица измерения
		0,04 × 0,04 0,04 × 0,85	2,5-3 25-30	пДж
$S_{DW}$	Токовая чувствительность по энергии	0,04 × 0,04 0,04 × 0,85	230 25	мкА пДж
$D$	Динамический диапазон по энергии	Оба типа	22,5	Относительные единицы
$f_{max}$	Максимальная частота сканирования	Оба типа	9,6	МГц

Шумы коммутации, присутствующие в сигнале, уменьшают динамический диапазон. Однако для небольших частот (1 ÷ 3 МГц) шумы коммутации имеют спектр, существенно отличный от частот считывания, и, следовательно, также могут быть отфильтрованы. С увеличением частоты сканирования требования к фильтру повышаются.

Сдвиговые регистры фотоприемной линейки работают устойчиво на сравнительно низких частотах сканирования (до 1 ÷ 2 МГц) при управляющих напряжениях  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_{зап}$ ,  $\Phi_{сбр}$  не более 10 В. Поэтому в устройствах, не требующих высоких частот сканирования фотоприемных ячеек, необходимости в увеличении управляющих напряжений до более высоких уровней не возникает. В устройствах, где сканирование фотоячеек должно проводиться с более высокими частотами (до 9 ÷ 9,6 МГц), следует увеличить управляющие напряжения до 17 ÷ 18 В.

Характеристики созданных и исследованных нами самосканируемых фотоприемных линеек позволяют с успехом применять их в телевизионных системах, в системах распознавания образов, ввода-вывода, хранения и обработки оптической информации и т. д.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пресс Ф. П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью.— М.: Радио и связь, 1981.
2. Бартон Д. Б. и др. Приборы с зарядовой связью: Пер. с англ.— М.: Мир, 1981.
3. Кругликов С. В., Наймарк С. И. Интегральные МДП-фотодиодные устройства и их применение. Ч. 1. Интегральные МДП-фотодиодные элементы, линейки и матрицы.— М.: ЦНИИ «Электроника», 1980.
4. Уайт М. Г. Фотодиодные матрицы.— В кн.: Полупроводниковые формирователи сигналов изображения: Пер. с англ. М.: Мир, 1979.
5. Ohba S. et al. A 1024-element linear CCD photosensor with unique photodiode structure.— IEEE Trans. on Electron Devices, 1980, vol. ED-27, N 9, p. 1804—1808.
6. Ohba S. et al. MOS area sensor. Part I. Low-noise MOS area sensor with antiblooming.— IEEE Trans. on Electron Devices, 1980, vol. ED-27, N 8, p. 1682—1687.
7. Fry P. W. et al. Fixed pattern noise in photomatrix.— IEEE Trans. of Solid-State Circ., 1970, vol. SC-5, N 5.

Поступила в редакцию 23 июня 1982 г.;  
окончательный вариант — 10 июня 1983 г.