

- ренции по однородным вычислительным системам и средам. Ч. 3. Киев, «Наукова думка», 1975.
4. R. Danklets, H. Thornton. Testing complex MOS: the how and why.—“Electron. Eng.”, 1970, vol. 29, № 10, p. 42.
 5. T. Reynolds. MOS course—part 3: interfacing MOS and bipolar logic.—“Electron. Eng.”, 1970, vol. 29, № 4, p. 62.

Поступила в редакцию 10 мая 1976 г.

УДК 681.31 : 535

С. И. НАЙМАРК, В. М. ТРЕТЬЯКОВ
(Новосибирск)

ФОТОПРИЕМНЫЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МАТРИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ СЧИТЫВАНИЯ ПАРАФАЗНОГО ОПТИЧЕСКОГО КОДА

Известно, что большинство ошибок при считывании информации из голограммного ЗУ появляется при страничном преобразовании «свет — код», осуществляемом фотоматрицей [1]. Источники ошибок содержатся в различного рода помехах, действующих в сигнальном канале ГЗУ, и в помехах, вносимых самой фотоприемной матрицей [2]. Помехи сигнального оптического канала можно классифицировать следующим образом: 1) помехи, вносимые разбросом интенсивностей света в оптических «1» (световых пятнах), достигающие величины $\pm 50\%$; 2) помехи, являющиеся следствием разброса средней освещенности при переходе от страницы к странице; 3) случайные сдвиги изображения в фотоприемной плоскости относительно фотоприемников матрицы, оцениваемые в 30%; 4) прочие оптические шумы (случайные блики, вспышки, рассеянный свет и т. д.). Кроме того, источник помех содержится в самой фотоприемной матрице и связан с разбросом электрофизических параметров по плоскости кристалла интегральной схемы (ИС). Этот разброс проявляется как «шум с фиксированным распределением» [2], действующий на информационные входы фотоприемной матрицы. В случае интегральной фотоматрицы, изготовленной по МОП-технологии, главный компонент этого шума — разброс пороговых напряжений активных МОП-транзисторов разрядных ячеек. Величина этого разброса зависит от качества технологического процесса и критерия разбраковки годных кристаллов. В реальных интегрально-гибридных схемах величина разброса может достигать 1 В и более.

Вследствие суперпозиции шума оптического канала ГЗУ и шума с фиксированным распределением фотоматричное преобразование «свет — код» весьма уязвимо для помехи. В качестве одного из методов повышения помехоустойчивости может служить применение парафазного кода для представления бита информации в соединении с интегральной фотоматрицей, в которой ячейкой является дифференциальный каскад (ДК) на МОП-транзисторах с фотоприемными входами. Об интегральной схеме ДК на МОП-транзисторах сообщалось в [3]. В работе [4] описывалось применение ДК в ИС детектора слабого светового излучения. Свойства ДК позволяют осуществлять проверку парафазного кода на равнозначность в каждом разряде информационной страницы непосредственно во время экспозиции изображения на фотоматрице. Наличие усиления дифференциальной составляющей позволяет детектировать правильные комбинации (01) и (10) с малым контрастом между оптическим «0» и «1».

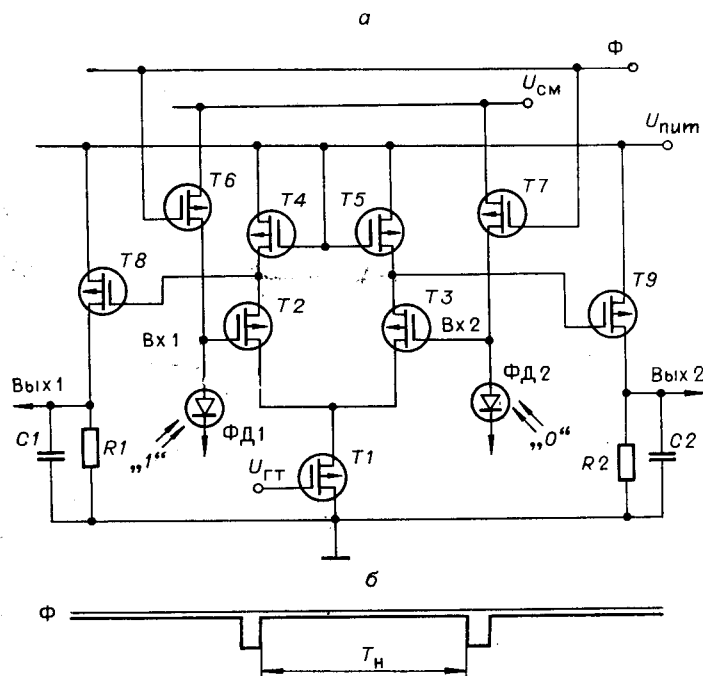


Рис. 1. Фотоприемный матричный элемент:

a — принципиальная схема фотоприемного матричного элемента: Т1 — токозадающий МОП-транзистор; Т2, Т3 — активные транзисторы; Т4, Т5 — нагрузочные МОП-резисторы; Т6, Т7 — ключи стирания; Т8, Т9 — выходные согласующие транзисторы; ФД1, ФД2 — фотодиоды; *b* — диаграмма импульсов стирания (дозаряда фотодиодов), T_n — время накопления.

Фотоматричный элемент на основе ДК в значительной мере нечувствителен к разбросу светового фона изображения страницы и к шуму с фиксированным распределением.

В данной работе рассматривается ИС матричного фотоприемного элемента, которая содержит два фотодиода, подключенных ко входам ДК на МОП-транзисторах. Приводятся некоторые результаты численного моделирования работы ИС и экспериментальные результаты.

Электрическая схема. На рис. 1, *a* изображена электрическая схема фотоматричного элемента, фотодиоды ФД1 и ФД2 работают в режиме накопления и подключены к дифференциальным входам ДК. Транзистор Т1 служит генератором постоянного тока в балансной схеме. Транзисторы Т2 и Т3 — активные транзисторы; Т4 и Т5 работают как МОП-резисторы и являются стоковыми нагрузками для усилительных транзисторов. Транзисторы Т6 и Т7 — аналоговые ключи, обеспечивающие заряд емкостей фотодиодов ФД1 и ФД2 до напряжения обратного смещения $U_{см}$; Т8 и Т9 — буферные транзисторы, которые с помощью навесных сопротивлений $R1$ и $R2$ образуют два истоковых повторителя, согласующих выходные сигналы ИС с емкостной нагрузкой.

На рис. 1, *b* изображена импульсная диаграмма Φ , осуществляющая предустановку схемы в исходное состояние. Напряжение $U_{см}$ задает рабочую точку ДК, напряжением $U_{гт}$ регулируется суммарный ток в плечах ДК. В процессе считывания оптической информации на фотодиоды проецируется оптическое изображение парафазного кода. Разность напряжений на входах ДК в конце периода накопления является дифференциальным входным сигналом для ДК. Знак дифференциального входного сигнала соответствует значению парафазного кода. Время на-

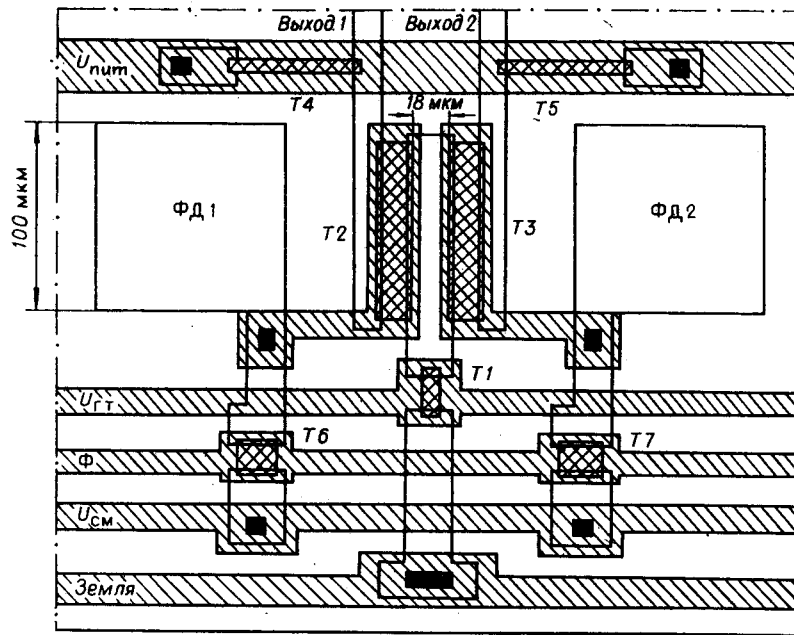


Рис. 2. Топология матричного фотоприемного элемента.

копления T_n выбирается таким, чтобы не допустить полного разряда емкостей фотодиодов выводящего ДК из рабочего режима. Критерий безошибочного считывания кодов (01) и (10) — наличие дифференциального выходного сигнала определенного уровня. Помехи, искажающие значения кода, выразятся как неправильные комбинации (00) или (11), которые не приводят к появлению выходного сигнала.

Конструкция. ИС фотоматричного элемента изготавливалась на кристалле кремния с n -типом проводимости по МОП-технологии. В качестве фотодиодов сформированы области диффузионных $p-n$ -переходов. Чувствительность фотодиодов на длине волны $\lambda=0,63$ мкм составляет $\eta \approx 0,25$ А/Вт [5]. На рис. 2 изображена топология матричного элемента. С целью уменьшения технологического разброса параметров активных МОП-транзисторов Т2, Т3 последние располагались на расстоянии 18 мкм друг от друга. Такая конструкция дифференциальной пары МОП-транзисторов обеспечивала минимальное технологическое рассогласование параметров транзисторов. На рис. 3 приведена гистограмма разбросов пороговых напряжений для тестовых дифференциальных пар аналогичной конструкции. Из рисунка видно, что разброс пороговых напряжений может быть оценен в 10 мВ.

Помехоустойчивость и фоточувствительность. Помехоустойчивость и фоточувствительность предлагаемой схемы матричного фотоприемного элемента тесно связаны с основными параметрами ДК: коэффициентом подавления синфазной составляющей K_n , коэффициентом усиления дифференциальной составляющей K_d и входным разбалансом U_p . На рис. 4, а, б приведены соответственно входные и выходные напряжения ДК, топология которого изображена на рис. 2. Разряд емкостей обратносмещенных $p-n$ -переходов фотодиодов представлен линейно спадающими напряжениями на рис. 4, б. Прямая с большим наклоном соответствует освещению фотодиода с интенсивностью «1», прямая с меньшим наклоном — «0». Разность напряжений на анодах фотодиодов в каждый момент времени является дифференциальным входным сигналом для ДК.

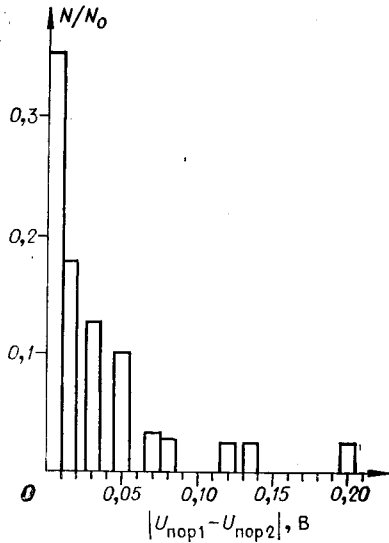


Рис. 3. Гистограмма разбросов пороговых напряжений в дифференциальной паре активных МОП-транзисторов:

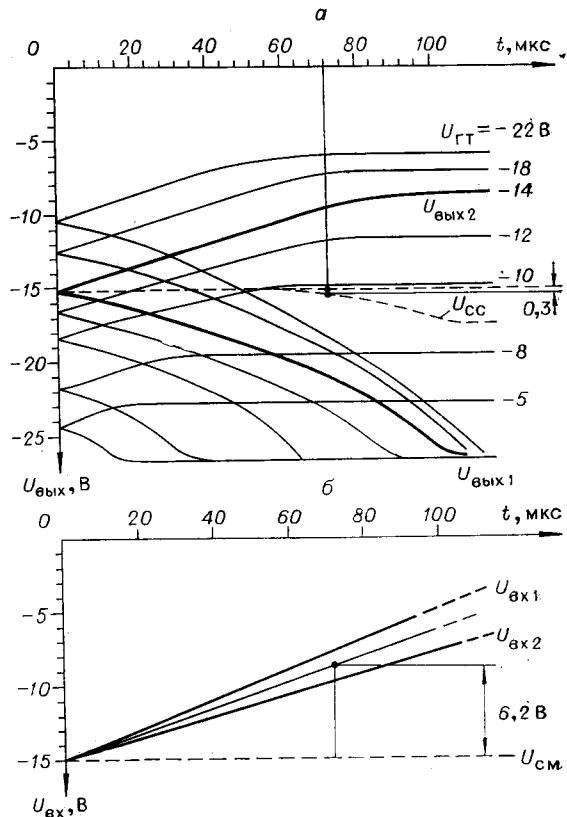
$U_{пор1}, U_{пор2}$ — пороговые напряжения транзисторов в дифференциальной паре; N/N_0 — относительное число измеренных дифференциальных пар. Объем выборки — 200 образцов.

транзистора $U_{гт}$. Напряжение питания $U_{пит} = -30$ В, $U_{см} = -15$ В. Интегральная схема ДК, передаточная характеристика которой изображена на рис. 4, а, обеспечивает коэффициент усиления дифференциальной составляющей $K_d \approx 6$ и коэффициент подавления синфазной составляющей $K_n = 27-35$ дБ.

Из рисунка очевидно, что специфика работы фотоприемной ячейки в режиме накопления такова, что в оптическом сигнале всегда присутствует синфазная составляющая одного и того же знака. Величина синфазной составляющей, эффективно подавляемая в схеме ДК, может меняться в довольно широких пределах, что обеспечивает нечувствительность ячейки к синфазной оптической помехе. Эффективное подавление синфазной составляющей обеспечивается работой токостабилизирующего транзистора в режиме насыщения и соотношениями между размерами транзисторов. В работе [6] выведены соотношения, связывающие геометрические размеры интегральных транзисторов ДК с напряжениями $U_{см}$ и $U_{гт}$. Увеличение

Рис. 4. Передаточные характеристики элемента:

а — график выходных напряжений матричного фотоприемного элемента (параметр кривых — напряжение смещения токостабилизирующего транзистора $U_{гт}$; жирной линией изображен оптимальный выходной сигнал); $U_{сф}$ — синфазная составляющая выходного сигнала; б — напряжение на дифференциальных входах ДК, моделирующее разряд емкостей фотодиодов в режиме накопления (прямая $U_{вх1}$ соответствует засветке оптической «0»; прямая $U_{вх2}$ — оптическому «1»).



K_n связано с конструктивно-технологическими возможностями. Согласно [6], величина K_n обратно пропорциональна технологическому разбросу в плечах ДК и пропорциональна отношению размеров активного транзистора к токостабилизирующему. Разброс параметров в плечах ДК сводится к минимуму топологическим размещением активных МОП-транзисторов, а дальнейшее увеличение размеров транзисторов ограничено шагом и размером фотоприемника в матрице. Расчеты показывают, что для фотоматрицы с шагом 250 мкм, размером фотоприемника 100×100 мкм² достижима величина $K_n \cong 40$ дБ.

Фоточувствительность парафазного элемента находится в прямой зависимости от коэффициента усиления КД и входного разбаланса схемы. Информационным оптическим сигналом для ячейки является разность световых энергий, накопленная в процессе экспозиции оптического парафазного кода на фотоприемниках

$$\Delta E = E^{(1)} - E^{(0)} = (P^{(1)} - P^{(0)}) T_n, \quad (1)$$

где $P^{(1)}$, $E^{(1)}$ — мощность и энергия света в оптической «1»; $P^{(0)}$, $E^{(0)}$ — мощность и энергия света в оптическом «0»; T_n — период накопления.

Следуя работе [7], можно написать соотношение, связывающее световые и электрические величины сигнала,

$$\int_{U_{см}}^{U^{(1)}} C_{ФД1}(U) dU - \int_{U_{см}}^{U^{(0)}} C_{ФД2}(U) dU = (P^{(1)} \eta_1 - P^{(0)} \eta_2) T_n. \quad (2)$$

Здесь η_1 , η_2 — спектральные чувствительности фотодиодов ФД1 и ФД2; $U^{(1)}$, $U^{(0)}$ — напряжения на фотодиодах в конце периода накопления; $C_{ФД1}$, $C_{ФД2}$ — емкости p - n -переходов фотодиодов при обратном смещении.

Полагая $U^{(1)} - U^{(0)} \ll U_{см}$, имеем:

$$U_{диф} = U^{(1)} - U^{(0)} \cong \frac{1}{\bar{C}} \left(\Delta E \bar{\eta} + \delta \eta E^{(0)} + \int_{U_{см}}^{U^{(0)}} \delta C(U) dU \right);$$

$$\bar{C} = [C_{ФД1}(\gamma) + C_{ФД2}(\gamma)] / 2;$$

$$\delta C_{ФД} = |C_{ФД1}(\gamma) - C_{ФД2}(\gamma)| / 2; \quad U^{(0)} \leq \gamma \leq U^{(1)}; \quad (3)$$

$$\bar{\eta} = (\eta_1 + \eta_2) / 2; \quad \delta \eta = |\eta_1 - \eta_2| / 2.$$

Из уравнения (3) очевидно, что при отсутствии дифференциального оптического сигнала ($\Delta E = 0$) дифференциальный электрический сигнал на входах ДК не равен нулю, а имеет вполне определенную величину, которая является напряжением разбаланса для пары фотодиодов

$$U_{р.ФД} = \frac{\delta \eta E^{(0)}}{\bar{C}_{ФД}(\gamma)} + \int_{U_{см}}^{U^{(0)}} \frac{\delta C_{ФД}(U) dU}{\bar{C}_{ФД}(\gamma)}. \quad (4)$$

Эта величина зависит от разбросов двух параметров: спектральной чувствительности фотоприемника $\delta \eta$ и емкостей p - n -переходов фотодиодов при обратном смещении $\delta C_{ФД}$. Кроме того, ДК характеризуется собственным напряжением разбаланса $U_{р.ДК}$, который подробно проанализирован в работе [6] и зависит в основном от разбаланса пороговых напряжений в дифференциальной паре активных МОП-транзисторов. Напряжение полного входного разбаланса фотоматричного элемента

$$U_p = U_{р.ФД} + U_{р.ДК}. \quad (5)$$

Порог чувствительности можно определить как оптический сигнал, развивающийся на входах ДК разность напряжений, равную начальному входному разбалансу. Предположив, например, $U_p = 50$ мВ и воспользовавшись результатами работы [7], имеем энергию соответствующего светового сигнала $\Delta E_{\text{пор}} \approx 0,6 \cdot 10^{-13}$ Дж (для $\lambda = 0,63$ мкм).

Введем величину, характеризующую усиление оптического сигнала,

$$S = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta E [\text{В/Дж}]. \quad (6)$$

Для используемой в данной работе топологии ДК расчетные значения $S \approx 3-4 \cdot 10^{+12}$ В/Дж.

Результаты экспериментов. Экспериментальные образцы парафазных матричных элементов изготавливались в виде тестовых микросхем и помещались в корпус, открытый для света. Оптические изменения проводились с помощью гелий-неонового лазера на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм.

На рис. 5, а приведена осциллограмма выходных напряжений тестовой микросхемы элемента. В процессе экспериментов измерялись коэффициент подавления синфазной составляющей, величины $\Delta E_{\text{пор}}$ и S . Измеренные величины $K_n \approx 30$ дБ, что согласуется с расчетами. Величина $S \approx 2 \cdot 10^{+12}$ В/Дж оказалась меньше расчетной. Этот эффект объясняется тем, что в реальной интегральной схеме всегда существуют паразитные емкости обратной связи, через которые осуществляется в процессе накопления накачка паразитного заряда в емкость фотодиода. Происхождение этих емкостей связано с технологическим перекрытием затвора и стока активных МОП-транзисторов, что в конечном счете снижает полезный входной сигнал и уменьшает величину S . Влияние емкостей обратной связи может быть значительно уменьшено применением самосовмещенной технологии изготовления интегральных МОП-транзисторов.

Величина пороговой дифференциальной световой энергии, измеряемая в эксперименте, не превышала $\Delta E_{\text{пор}} \approx 1,2 \cdot 10^{-13}$ Дж, что соответствует напряжению входного разбаланса $U_p \approx 100$ мВ. Нормальная работа схемы осуществлялась при следующем электрическом режиме: $U_{\text{пит}} =$

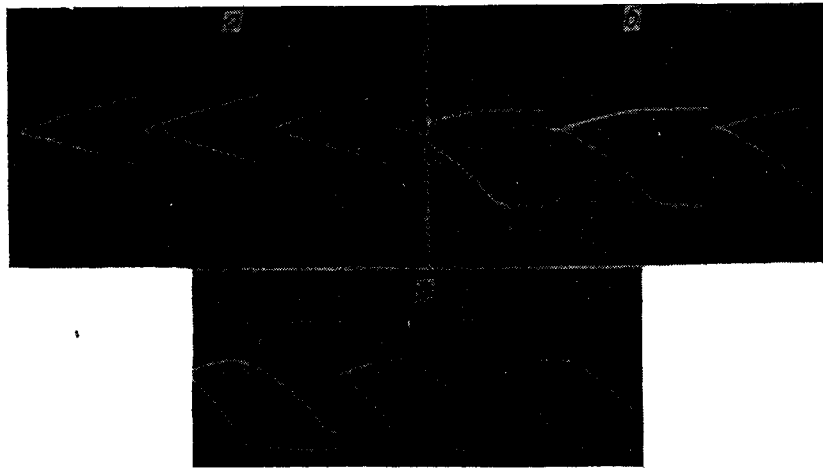


Рис. 5. Осциллограммы выходных сигналов:

а — осциллограмма выходных напряжений тестовой микросхемы при освещении фотоприемников парафазным оптическим сигналом (режим работы $\Delta E_{\text{д}} \approx 4 \cdot 10^{-13}$ Дж; $U_{\text{пит}} = -30$ В; $U_{\text{см}} = -15$ В; $U_{\text{ГТ}} = -12$ В; длительность развертки — 50 мкс/см; чувствительность входов осциллографа — 1 В/см); б — осциллограмма выходных напряжений при напряжении $U_{\text{ГТ}} = -24$ В (длительность развертки — 50 мкс/см; чувствительность — 1 В/см); в — осциллограмма выходных напряжений для времени накопления $T_{\text{н}} = 800$ мкс при $U_{\text{ГТ}} = -24$ В (длительность развертки — 200 мкс/см; чувствительность — 1 В/см).

$= -30$ В; $U_{см} = -15$ В; $U_{гт} = -8 \div 14$ В, что хорошо согласуется с расчетными данными.

На рис. 5, 6 приведены осциллограммы выходных напряжений ячейки при дальнейшем увеличении абсолютной величины напряжения, при этом токозадающий транзистор выходит из режима насыщения (пологой области стоковой характеристики) и синфазная составляющая сигнала подавляется слабо. На рис. 5, в осциллограмма соответствует слишком большому периоду накопления, при этом емкости фотодиодов разряжаются почти до нулевого напряжения, запирая активные транзисторы ДК. Поэтому время накопления определяется в зависимости от энергий света оптических «0» и «1» и должно быть таким, чтобы ДК не выходил из рабочего режима.

Фотоприемный элемент может быть легко мультиплицирован в матрицу, ожидаемые параметры которой: чувствительность к дифференциальному оптическому сигналу $\Delta E_{пор} \cong 2 \cdot 10^{-13}$ Дж/бит; коэффициент подавления оптического фона $K_n = 27-35$ дБ. Такие параметры фотоматрицы позволяют надеяться на ее эффективное применение в оптических системах памяти.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Гибин, Т. Н. Мантуш, Ю. Е. Нестерихин, Б. Н. Панков, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб. Программируемое голограммное ЗУ с записью и считыванием информации.— «Автометрия», 1975, № 3, с. 3—11.
2. P. W. Fry, P. J. W. Noble and R. J. Rycroft. Fixed — pattern noise in photomatrices.— "IEEE J. of Solid — State Circuits", 1970, vol. SC-5, № 5, p. 250—254.
3. М. А. Ожогин, М. С. Сонин, Р. Я. Яворовская. Безрезисторный дифференциальный каскад на МДП-транзисторах в интегральном исполнении.— «Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника», 1971, № 7, с. 831—834.
4. S. A. Chamberlain, V. K. Aggarwal. Photosensitivity and characterisation of a solid — state Integrating photodetector.— "IEEE J. of Solid — State Circuits", 1972, vol. SC-7, № 2, p. 202—204.
5. Р. Е. Кашлатый, Л. М. Логвинский, Е. И. Пальчиков, В. Э. Рябченко, В. Г. Цукерман. Кремниевые фотодиоды для интегральных фотоприемных матриц.— «Автометрия», 1977, № 2, с. 53—61.
6. И. П. Степаненко. Статический анализ простейшего дифференциального каскада на МДП-транзисторах.— В кн.: Микроэлектроника. Вып. 5. М., «Сов. радио», 1972, с. 190—200.
7. Gene P. Weckler. Operation of p-n junction photodetectors in a photon flux integrating mode.— "IEEE J. of Solid-State Circuits", 1967, vol. SC-2, № 3, p. 65—73.

Поступила в редакцию 30 июля 1976 г.