

Б. Н. Панков

(Новосибирск)

**СТРУКТУРА И СХЕМНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЯЧЕЙКИ  
ОПТИЧЕСКОГО ТРАНСПАРАНТА НА ОСНОВЕ  
ТОНКИХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК**

Приведены результаты выбора структуры и схемной реализации ячейки управляемого транспаранта оптико-электронного ЗУ на основе тонких сегнетоэлектрических пленок и полупроводниковой элементной базы. Показана целесообразность реализации транспаранта на основе КМОП-технологии КНС, совмещенной с технологией тонких сегнетоэлектрических пленок на общей сапфировой подложке. Рассмотрена структура и схема ячейки транспаранта с электрической записью информации, а также структура и схема ячейки с оптической и электрической записью информации. Проведена оценка быстродействия буферных каскадов при различных размерах ячейки транспаранта.

Основным элементом оптической микросхемы ассоциативной памяти является электрически или оптически управляемый транспарант размером  $N \times M$  [1]. При этом каждая элементарная ячейка такого транспаранта, помимо модуляции световых пучков, должна выполнять запись, стирание и хранение цифровой информации по командам от внешнего контроллера или компьютера. Поэтому ячейка такого транспаранта наравне с модуляторами света должна иметь в своем составе элементы памяти, управляющие составлением модуляторов света.

В [2, 3] показана возможность использования для модуляции света электрооптического эффекта Поккельса в тонких сегнетоэлектрических пленках. В этом случае управление работой сегнетоэлектрического модулятора света осуществляется напряжением постоянного электрического поля, создаваемым между электродами модулятора путем заряда электрической емкости модулятора.

Представляется целесообразным запоминание информации, ее запись и стирание, а также управление зарядом емкостей модуляторов в ячейках транспаранта осуществлять с помощью полупроводниковой элементной базы, в которой распространенным элементом памяти является статический триггер.

В настоящей работе обсуждаются вопросы организации и схемной реализации элементарной ячейки управляемого транспаранта на основе тонких сегнетоэлектрических пленок и полупроводниковой элементной базы.

1. Для реализации транспаранта полупроводниковая интегральная технология должна быть совместима с технологией электрооптических модуляторов света на тонких сегнетоэлектрических пленках. Получаемые при этом электронные элементы должны иметь параметры, необходимые для управления модуляторами света с максимальным быстродействием.

Согласно [2] цепь электронного управления модулятором представляет собой электрический конденсатор с малыми потерями (токами утечки), емкость которого в общем случае зависит от напряжения и скорости заряда (частоты перезаряда).

Основными электрическими параметрами модулятора являются управляющие напряжения, соответствующие открытому и закрытому состояниям для

проходящего света, а также величина удельной емкости (емкость на единицу площади). По данным [3] для электрооптических модуляторов на тонких сегнетоэлектрических пленках управляющее напряжение изменяется от 0 до 15—20 В (в перспективе верхний уровень этого напряжения может быть понижен), а удельная емкость модуляторов составляет  $2,6—3,5 \cdot 10^{-3}$  пФ/мкм<sup>2</sup>. Время переключения модулятора из открытого в закрытое состояние и наоборот, характеризующее максимальную частоту переключения, в настоящее время не превышает 100 нс. Не исключаем, что в перспективе и это время может быть значительно сокращено.

Ячейка транспаранта должна обеспечивать, с одной стороны, эффективную работу модуляторов света при выполнении операции сравнения с минимальным временем 1—10 нс и заданной достоверностью ( $10^{-12}$ ) в условиях ожидаемых неидентичности и нестабильности оптических характеристик сегнетоэлектрических пленок, разброса их параметров по площади транспаранта при низком и переменном значениях контраста «1» и «0» на модуляторах (отношении коэффициентов пропускания открытого и закрытого модуляторов или «1» и «0»), а с другой стороны, приведение в рабочее состояние модуляторов ячейки, т. е. их переключение в соответствии с записанной в память ячейки информацией с заданным темпом смены информации на транспаранте.

Очевидно, что выбранная структура ячейки, используемая при ее создании технология, элементная база, размеры ячейки, параметры и режимы работы входящих в нее электронных элементов должны удовлетворять условию допустимой удельной мощности рассеяния (Вт/см<sup>2</sup>).

Следует также иметь в виду, что транспарант в своем законченном виде должен представлять управляемую (активную) микросхему с оптическими входами и выходами, выполненную по микроэлектронной полупроводниковой технологии в едином технологическом цикле. При этом все активные элементы и часть пассивных, а также контактные площадки, шины питания и управления предстоит реализовать методами полупроводниковой технологии на диэлектрической подложке, а часть элементов, включающую модуляторы и поляризаторы [4] света, — по тонкопленочной технологии на той же подложке.

Для модуляторов транспаранта, работающего на просвет, необходима подложка для рабочей длины волны света. Поэтому в качестве последней может быть использован сапфир, а в качестве полупроводниковой микроэлектронной технологии, использующей сапфировую подложку, — КМОП-технология кремния на сапфире (КНС-технология) (см., например, [5, 6]).

В [7] показана возможность и перспективность совмещения МОП-технологии КНС или КНИ (кремний на изоляторе) с технологией тонких сегнетоэлектрических пленок. Эти исследования направлены в настоящее время на создание репрограммируемой полупроводниковой памяти на основе тонких сегнетоэлектрических пленок.

Кроме того, КМОП-схемотехника и технология позволят создавать в условиях ограниченной площади ячейки, а следовательно, и размеров коммутирующих полупроводниковых элементов транзисторы для перезаряда электрических емкостей модуляторов с напряжениями 15—20 В.

Величины емкости модуляторов в зависимости от размеров их рабочей площади могут составлять от нескольких десятых до нескольких десятков пикофард. Так, емкость модулятора площадью 100 мкм<sup>2</sup> (или 10 × 10 мкм) составляет ~0,3 пФ, а для модулятора площадью 400 мкм<sup>2</sup> (или 20 × 20 мкм) эта емкость равна уже ~1,2 пФ. И наконец, для модулятора площадью 10<sup>4</sup> мкм<sup>2</sup> (или 100 × 100 мкм) емкость модулятора будет ~30 пФ. Отметим также, что указанные значения емкостей и уровней рабочих напряжений значительно превышают аналогичные параметры современных элементов статической и динамической полупроводниковой памяти и вступают в

противоречие с требованиями обеспечения в ячейке сверхвысокого темпа смены информации.

Простые расчеты показывают, что переключение таких емкостей с частотами  $\sim 100\text{--}1000$  МГц (конечно, при условии, что модулятор способен обеспечить эти частоты переключения света) связано не только со значительным потреблением и с рассеиванием энергии, которая необходима для перезарядки емкости модулятора (известное соотношение  $P = (1/2) fCV^2$ ), но и с еще большими затратами энергии на работу полупроводниковых каскадов, обеспечивающих эти переключения, если такие каскады будут потреблять энергию (токи питания) при нулевой частоте.

Известно [8], что наиболее экономичными и одновременно быстродействующими являются каскады на КМОП-транзисторах на основе структур с эпитаксиально выращенным на диэлектрической подложке (сапфире) кремнием. Кроме того, в [9] показана перспективность использования КНС-технологии для создания оптоэлектронных микросхем с кремниевыми фотодиодами, обладающими удовлетворительной чувствительностью и другими характеристиками, что позволит в перспективе создавать транспаранты с оптически управляемыми модуляторами света.

Изложенное позволяет сделать вывод о целесообразности реализации управляемого транспаранта с памятью на основе КМОП-технологии КНС, совмещенной с технологией тонких сегнетоэлектрических пленок на общей сапфировой подложке.

Ниже рассматриваются методы организации и схемная реализация ячеек управляемого транспаранта с памятью для оптической микросхемы ассоциативной памяти с учетом специфики совмещенной технологии.

2. На рис. 1 приведена структура ячейки транспаранта с электрической записью информации. Ячейка содержит электронный элемент памяти — статический триггер — и четыре идентичных по конструкции, размерам и исполнению модулятора света, два из которых являются переключаемыми и имеют парафазное управление. Два других модулятора, названных опорными, расположены симметрично относительно переключаемых модуляторов, являются непереключаемыми и управляются постоянным напряжением от источника, внешнего по отношению к ячейке транспаранта. Величина этого напряжения соответствует закрытому, т. е. нулевому состоянию модулятора, и должна быть подобрана экспериментально, исходя из условия обеспечения

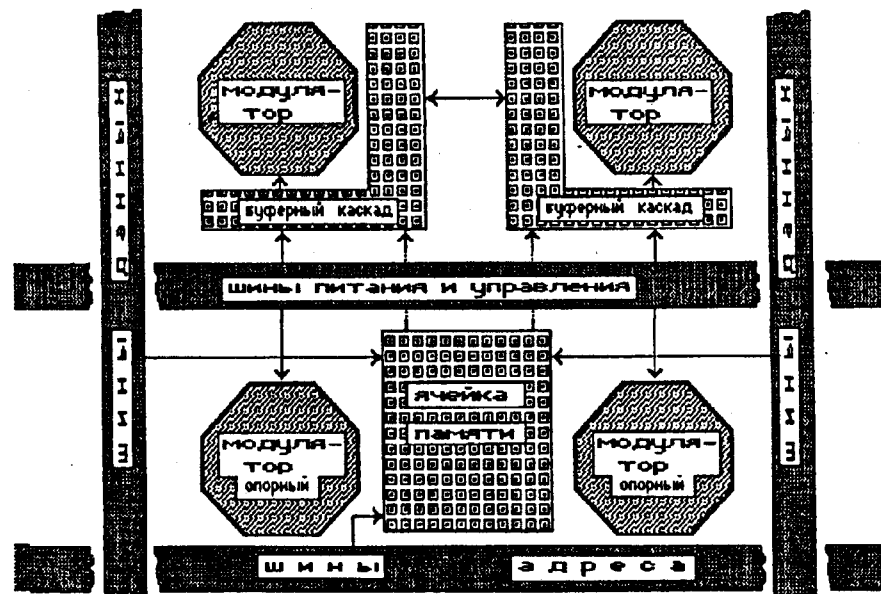


Рис. 1

максимальной достоверности операции ассоциативного поиска. Опорные модуляторы, образуя на транспаранте строки, расположенные между строками переключаемых модуляторов, при выполнении операции ассоциативного поиска облучаются световыми пучками по столбцам одновременно с рабочими модуляторами в соответствии с аргументом опроса.

Использование в ячейке двух опорных модуляторов, идентичных по исполнению переключаемым и расположенных в ячейке симметрично относительно переключаемых модуляторов, вызвано необходимостью применения на выходах оптической микросхемы дифференциальных фотоприемников с дифференциальными усилителями для получения результата ассоциативного опроса ячеек в памяти ключей. Пространственная близость в ячейке опорных и переключаемых модуляторов позволит добиться максимального подобия их оптических и электрических параметров в процессе технологического цикла. В свою очередь, дифференциальное включение оптических выходов рабочих и опорных модуляторов даст возможность при ассоциативном поиске свести к минимуму влияния низкого значения контраста «1» и «0» модуляторов и его дисперсии на массиве ячеек ключей, неидентичности и нестабильности оптических параметров модуляторов, разброса их параметров по площади транспаранта, а также частично ослабит влияние перекрестных паразитных засветок модуляторов.

Согласование электрических параметров модуляторов и статических триггеров можно выполнить с помощью буферных каскадов. Пример схемной реализации ячейки транспаранта приведен на рис. 2. Ячейка содержит статический триггер на  $n$ -канальных МОП-транзисторах  $T1$  и  $T2$  с высокоомными поликремниевыми нагрузочными резисторами  $R1$  и  $R2$ . Электрическая адресная запись (стирание) информации в триггер осуществляется от разрядных шин  $Z$  и  $\bar{Z}$   $n$ -канальными ключевыми транзисторами  $T3$  и  $T4$ . Переключаемые модуляторы с емкостями  $C1_{MOD}$  и  $C2_{MOD}$  подключены к выходам буферных каскадов на ключевых  $n$ -канальных МОП-транзисторах  $T7$  и  $T8$  и  $p$ -канальных МОП-транзисторах  $T5$  и  $T6$ .

Использование буферных каскадов на КМОП-транзисторах обеспечит возможность быстрой записи информации в триггер, а также необходимое согласование по напряжениям питания триггера и буферных каскадов при минимальном потреблении энергии буферными каскадами.

Темп записи информации в ячейку для рассматриваемой структуры определяется задержкой готовности модуляторов к опросу, отсчитываемой от момента выбора адреса на запись информации, и зависит от быстродействия триггера, буферных каскадов и модуляторов. В свою очередь, быстродействие триггера определяется размерами его элементов, нагрузочными емкостями и сопротивлениями, а также параметрами формирователей сигналов на разрядных шинах, длиной, сопротивлениями и емкостями адресных шин. Для лучших образцов полупроводниковой памяти это быстродействие составляет несколько наносекунд [10].

Быстродействие буферных каскадов определяется нагрузочными емкостями (в нашем случае емкостью модулятора), электрофизическими и технологическими параметрами КМОП-транзисторов и геометрическими размерами их каналов.

Путем математического моделирования работы буферных каскадов проводилась оценка быстродействия буферных каскадов при различных

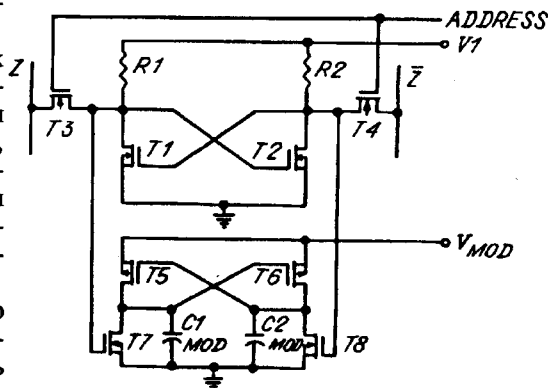


Рис. 2

размерах ячейки транспаранта. При этом электрофизические параметры транзисторов соответствовали типовым для КМОП-технологии. Рассмотрены три варианта ячеек транспаранта, отличающиеся размерами ячейки и модуляторов в них. Во всех случаях отношение размеров модулятора (для простоты квадратного) к шагу между модуляторами принималось равным  $2/5$ , отношение ширины каналов  $W$  для  $p$ - и  $n$ -канальных транзисторов  $= 1.5$  при эдм-лятор  $100 \times 100$  мкм). Напряжения питания триггеров и модуляторов ячеек приняты соответственно 5 и 15 В.

Проведенная оценка показала уменьшение быстродействия буферных каскадов с увеличением размеров ячейки при наличии запаса площади в ячейках для размещения их элементов. Для ячейки с модулятором  $100 \times 100$  мкм задержка установления заданного управляющего напряжения составляет не менее 70 нс.

3. Согласование высокого темпа смены информации на транспаранте с реальным темпом записи, который в состоянии обеспечить используемая элементная база, можно достичь за счет групповой параллельной записи информации на транспарант [11]. Структура ячейки такого транспаранта приведена на рис. 3.

Ячейка в отличие от показанной на рис. 1 содержит дифференциальный фотоэлектрический преобразователь с двумя фотоприемниками на входе. Парарафазный оптический код, поступающий на дополнительные оптические входы ячейки, преобразуется фотоприемниками и дифференциальным усилителем в электрический аналоговый сигнал. Функции элемента памяти в данной ячейке расширены. Вместо электрического статического триггера здесь используется триггер-защелка [12], которая осуществляет запись информации в ячейку с выходов фотоэлектрического преобразователя.

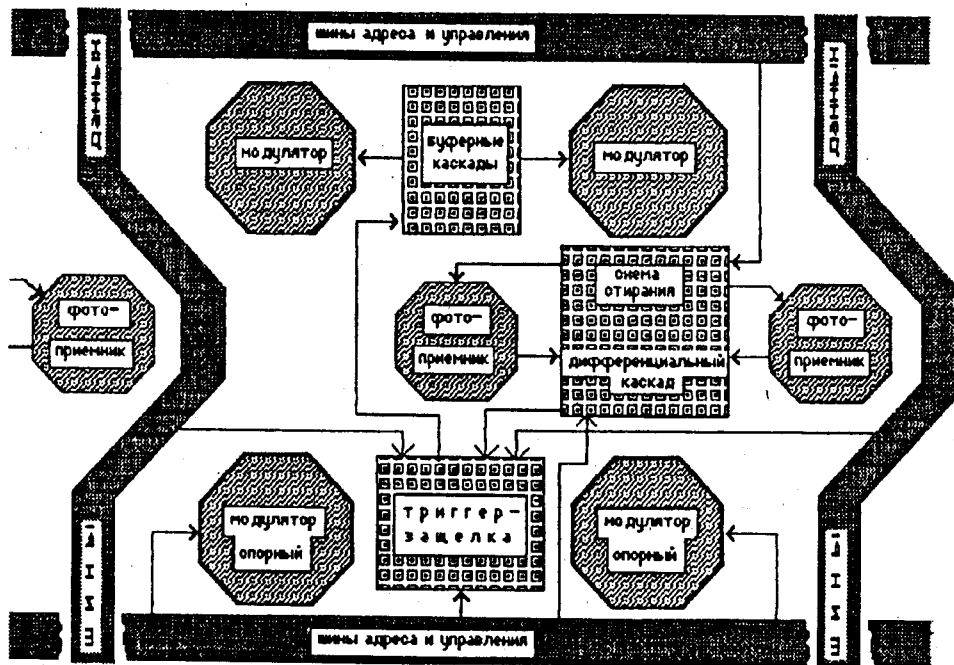


Рис. 3

Электрическая запись в ячейку данных по адресу реализуется с помощью той же триггер-защелки, имеющей для этой цели дополнительные адресуемые входы. Площадки фотоприемников предлагается размещать в ячейке с тем же шагом, что и модуляторы.

Схема ячейки транспаранта приведена на рис. 4. Используемые здесь буферные каскады (транзисторы  $T15—T18$ ) идентичны буферным каскадам ячейки, показанной на рис. 2.

Дифференциальный фотоэлектрический преобразователь, совмещенный своими нагрузками ( $T7, T8$ ) с нагрузками триггер-защелки, выполнен на  $n$ -канальных МОП-транзисторах двух типов (транзисторы  $T3, T7, T8$  работают в режиме обеднения, остальные — в режиме обогащения). Фотоприемники  $FD1$  и  $FD2$  с собственными емкостями  $C1FD$  и  $C2FD$  используются в режиме накопления заряда [13] и подключены ко входам дифференциального каскада на транзисторах  $T1—T3, T5—T8$ . Ключевые транзисторы  $T13, T14$  образуют в ячейке схему стирания информации на фотоприемниках перед ее накоплением.

Триггер-защелка на транзисторах  $T4—T10$  осуществляет запись информации с выходов фотоэлектрического преобразователя. Возможна также адресная запись информации в ячейку от разрядных шин  $Z$  и  $\bar{Z}$  с помощью транзисторов  $T11, T12$ .

Высокая чувствительность и достоверность преобразования при записи входной оптической информации обеспечиваются за счет парафазного кодирования данных и применения дифференциальных фотоэлектрических преобразователей, работающих в режиме интегрирования входных оптических сигналов. Повышенную чувствительность при оптической записи информации на транспарант возможно обеспечить с использованием методов, рассмотренных в [12]. При этом параллельная запись на транспарант ассоциативной матрицы необходимого размера может быть осуществлена за время  $\sim 1—2$  мкс.

В то же время независимо функционирующие в ячейке фотоприемная часть и элемент памяти (триггер) с модуляторами на выходе позволят организовать на транспаранте скоростной конвейер по вводу и обработке потока данных.

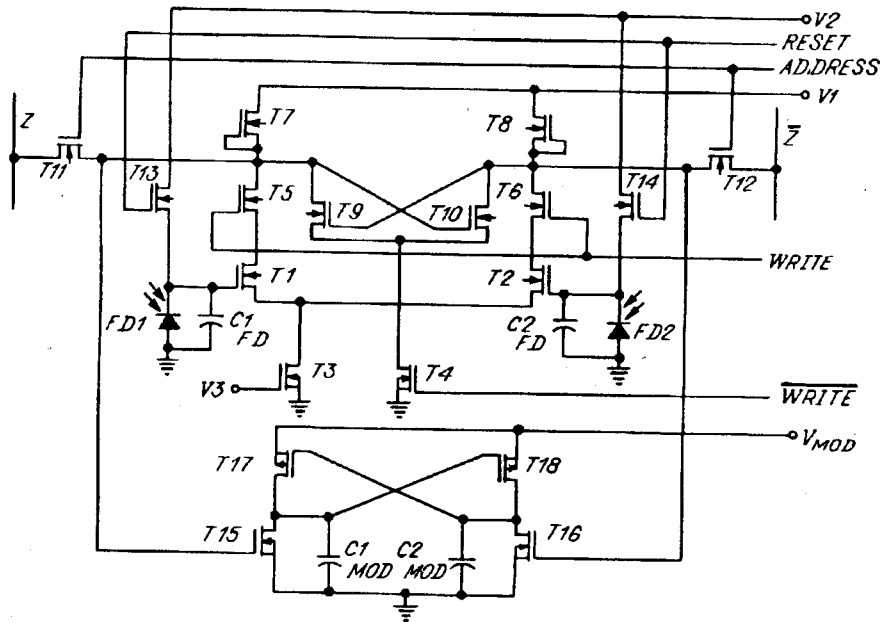


Рис. 4

## ВЫВОДЫ

Управляемый транспарант с памятью может быть создан на основе КМОП-технологии КНС, совмещенной с технологией тонких сегнетоэлектрических пленок на общей сапфировой подложке.

С целью снижения влияния низкого значения контраста «1» и «0» модуляторов и его дисперсии на массиве ячеек ключей, неидентичности и нестабильности оптических параметров модуляторов, разброса их параметров по площади транспаранта, а также перекрестных паразитных засветок модуляторов при ассоциативном поиске ячейка транспаранта должна содержать четыре идентичных по исполнению и конструкции тонкопленочных электрооптических модулятора света: два переключаемых и два опорных. Управляются переключаемые модуляторы от элемента памяти — статического триггера — с использованием буферных каскадов на КМОП-транзисторах.

При групповой параллельной оптической записи информации на транспарант, используемой для согласования высокого темпа смены информации на транспаранте с реальным темпом записи в элементарную ячейку, целесообразно применять в ячейке дифференциальный фотоэлектрический преобразователь с двумя работающими в режиме интегрирования оптических сигналов фотоприемниками на входе и триггер-защелкой на выходе.

Для транспарантов с одинаковым отношением размеров модуляторов к шагу между ними быстродействие буферных каскадов, управляющих модуляторами, уменьшается с увеличением размеров ячейки, несмотря на запас площади в ячейках для размещения электронных элементов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козик В. И., Твердохлеб П. Е. 3-D оптические интегральные схемы ассоциативной памяти // Автометрия.—1993.—№ 3.
2. Анцыгин В. Д., Косцов Э. Г., Стерелюхина Л. Н. Импульсная электрооптическая модуляция света в тонких сегнетоэлектрических пленках // Автометрия.—1983.—№ 5.
3. Косцов Э. Г. Электрооптическая запоминающая среда на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Автометрия.—1993.—№ 3.
4. Бельтюгов В. Н., Проценко С. Г. Тонкопленочный диэлектрический поляризатор света // Там же.
5. Руденко Т. Е., Руденко А. Н., Лысенко В. С. и др. Характеристики элементов КМОП ИС на основе КНИ- и КНС-структур // Электрон. пром-сть.—1991.—№ 8.
6. Armand R., Tanguay Jr. Materials requirement for optical processing and computing devices // Opt. Eng.—1985.—24, N 1.—P. 3.
7. Baginskii I. L., Erkov V. E., Kostsov E. G., Likhachev A. A. Injection amplification effect in the metal-ferroelectric-insulator-semiconductor thin film structure // Thin Solid Films.—1992.—202.—P. 191.
8. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок.— М.: Радио и связь, 1989.
9. Блынский В. И., Малышев С. А., Рахлей С. Ю., Чумак В. Д. Фотоприемник на КНС-структуре для оптического логического элемента // Автометрия.—1989.—№ 3.
10. Masuhara T., Iton K., Seki K., Sasaki K. VLSI memories: present status and future prospects // IEICE Trans. on Commun. Electron. Informat. and Syst.—1991.—74, N 1.—P. 130.
11. Tverdokhleba P. E., Pankov B. N. Parallel associative processor with optical input // Proc. SPIE: ICOESE'90.—1990.—1230.—P. 662.
12. Панков Б. Н. Параллельная фотоматричная БИС с логической обработкой страниц данных // Автометрия.—1993.—№ 3.
13. Wecler G. P. Storage mode operation of phototransistor and its adaptation to integrated arrays for image detecting // Electronics.—1967.—40, N 5.

*Поступила в редакцию 1 апреля 1993 г.*