

2. C. Sah, R. Noyce, W. Shockley. Carrier generation and recombination in p-p junctions and p-n junction characteristics.— "Proc. IRE", 1957, vol. 45, № 9, p. 1228.
3. Л. С. Берман. Емкостные методы исследования полупроводников. Л., «Наука», 1972.
4. Л. С. Смирнов. Измерение малых времен жизни носителей заряда в кремнии.— «ЖТФ», 1957, т. XXVII, № 11, с. 918.
5. А. Амброзьяк. Конструкция и технология полупроводниковых приборов. М., «Сов. радио», 1970.

Поступила в редакцию 10 июля 1976 г.

УДК 535.2 : 621.383

Б. Г. МАТИЕНКО, С. И. НАЙМАРК

(Новосибирск)

МОП-ФОТОДИОДНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ «СВЕТ—КОД» С ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ДИАГРАММОЙ ЧТЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

К фотоприемным элементам полупроводниковых преобразователей «свет—код» голограммных и оптических запоминающих устройств предъявляется определенный комплекс технических требований. Разрабатываемые для этих применений полупроводниковые фотоматрицы должны обладать чувствительностью $10^{-7} \div 10^{-8}$ Дж/см², быстродействием при выводе информации (время выборки многоразрядного слова) $10^{-6} \div 10^{-7}$ с, быть удобными для сопряжения с разнообразными электронными схемами обрамления и технологичными, чтобы обеспечить промышленный выпуск преобразователей «свет—код», содержащих $10^4 \div 10^5$ элементов [1].

Современная технология позволяет реализовать преобразователи «свет—код» на различных физических и схемотехнических принципах. Используя, например, простейшие (по схеме и конструкции) фотоприемные элементы на МОП-транзисторах и фотодиодах, можно изготовить полупроводниковые фотоматрицы большой размерности при относительно небольших затратах в числе транзисторов и с достаточно высокой плотностью упаковки элементов на кристаллах. Вопрос состоит в том, какие характеристики по чувствительности и быстродействию могут быть в этом случае обеспечены.

Данная работа посвящена простейшему МОП-фотодиодному элементу, который может быть использован в преобразователях «свет—код» голограммных ЗУ.

1. **Схема фотоприемного элемента и принцип работы.** Фотоматричные полупроводниковые преобразователи «свет—код» отличаются от интегральных схем памяти возможностью параллельной, страничной записи информации по оптическим входам. Вывод информации и сама организация кристаллов в ряде случаев могут ничем не отличаться от принципов, принятых в полупроводниковой памяти. В связи с этим в данной работе исследуются возможности трехтранзисторной ячейки динамической памяти [2], конструкция которой была изменена в соответствии с особенностями и задачами преобразования «свет—код».

Принципиальная схема фотоприемного элемента (ФПЭ) приведена на рис. 1. Схема ФПЭ содержит три МОП-транзистора и фотодиод.

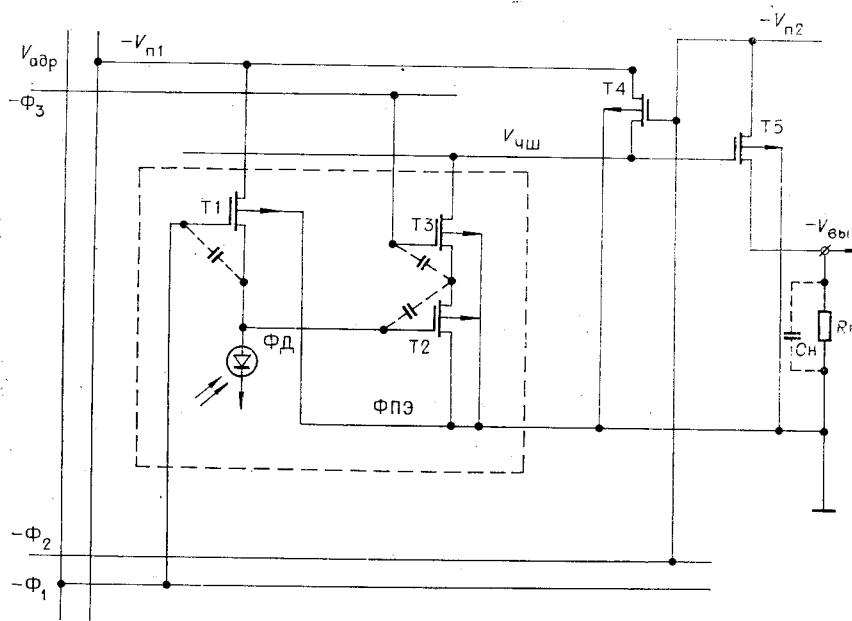


Рис. 1.

Транзистор Т1 используется в качестве ключа для заряда барьерной емкости обратносмещаемого $p-n$ -перехода фотодиода (ФД). МОП-транзисторы Т2 и Т3, включенные по схеме И, образуют цепь чтения информации ФПЭ. Транзистор Т2 — следящий транзистор — к моменту чтения (вывода) информации должен быть закрыт (или открыт) напряжением на фотодиоде. Транзистор Т3 — адресный и выполняет функцию коммутатора. Транзисторы Т4 и Т5 входят в схему чтения, обслуживающую группу ФПЭ (столбец, строку). С помощью транзисторного ключа Т4 производится подготовка (дозаряд) числовой шины (ЧШ) столбца (строки) ФПЭ перед подачей адресного сигнала. Транзистор Т5 — активный элемент буферного каскада, которым оканчивается соответствующая ЧШ столбца (строки) ФПЭ, служит для развязки внутренних цепей интегральной схемы от емкости нагрузки (C_n) и для согласования уровня выходных сигналов ФПЭ с соответствующими входными уровнями внешних схем обрамления.

В схеме используются два независимых постоянных источника питания. Первый ($-V_{n1}$) служит для задания уровня обратного смещения на фотодиоде и ЧШ. Второй источник используется для питания буферного каскада.

Принцип работы элемента поясняется временной диаграммой рис. 2, где схематично представлены изменения напряжений в трех внутренних узлах схемы: на фотодиоде ($-V_{фд}$), на ЧШ ($-V_{чш}$) и на выходе ($-V_{вых}$). Цикл работы ФПЭ и схемы чтения состоит из четырех тактов: сброса (импульсом $-\Phi_1$), записи оптической информации в режиме накопления ($E_{свет} \ll 1$), подготовки к чтению (дозаряд импульсом $-\Phi_2$) и выборки информации (адресным импульсом $-V_{адр} (\Phi_3)$). При записи в ФПЭ оптического сигнала уровня логической «1» емкость фотодиода под действием импульса света разряжается на величину ΔV_c , «следящий» транзистор Т2 закрывается и при подходе адресного импульса установившиеся на ЧШ и выходе схемы сигналы не меняют своего уровня. При засветке фоновым оптическим сигналом уровня логического «0» фотодиод не успевает разрядиться до уровня

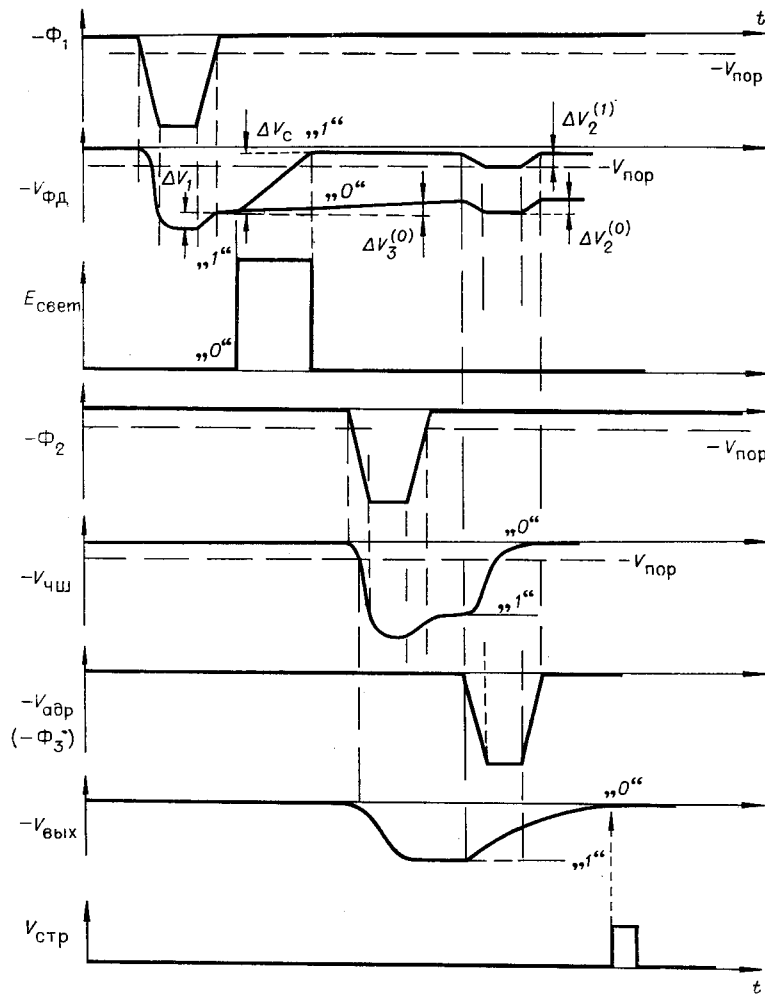


Рис. 2.

порога запирающего «следящего» транзистора и после подачи адресного импульса происходит быстрый разряд напряжения ЧШ через схему чтения ФПЭ, транзистор Т5 запирается и происходит спад выходного напряжения на нагрузке до 0 В. Перепись полученной на выходе буферного каскада информации может производиться путем стробирования каких-либо внешних схем задержанным импульсом ($V_{стр}$).

2. Структурная организация многоэлементной фотоматрицы. Конструкция фотоприемного элемента. На рис. 3 представлен вариант структурной организации полупроводниковой фотоматрицы размерностью 4×4 ФПЭ ($i, j = 1, 1; 1, 2; \dots; 4, 4$) со словарной организацией, обеспечивающей выборку 4-рядного слова по каждому адресу. В соответствии со схемой рис. 1 предусмотрено два постоянных ($-V_{п1}, V_{п2}$) и два импульсных (Φ_1, Φ_2) источника питания, не считая формирователей адресных сигналов. ФПЭ в матрице образуют четыре столбца размерностью 1×4 элемента, буферные транзисторы (БТ1÷БТ4) — строку такой же размерности. (С целью повышения надежности при сборке гибридно-интегральных конструкций все контактные площадки на кристалле задублированы.)

Выбор шага между фотоприемными элементами на кристалле определяется информационной емкостью проектируемого запоминающе-

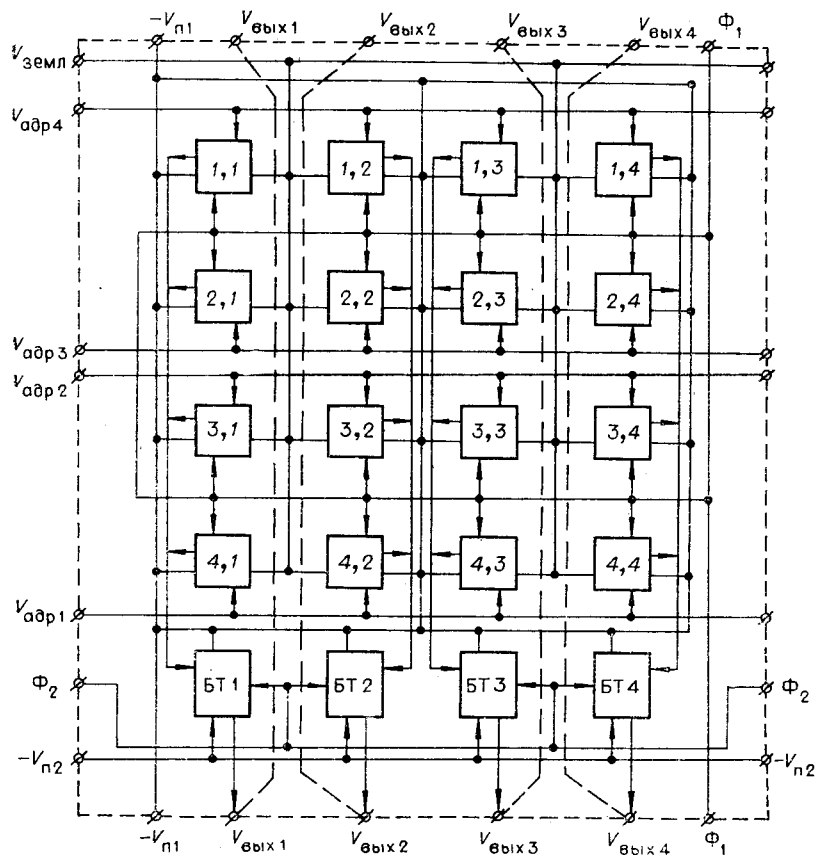


Рис. 3.

го устройства (ЗУ), требованиями и возможностями оптики [3, 4]. Для голограммного ЗУ емкостью в 10^7 бит используется шаг $0,25$ мм при размерах фотодиода $0,1 \times 0,1$ мм*.

На рис. 4 приведен вариант конструкции (топологии) ФПЭ (по рис. 1) с шагом $0,25$ мм. Небольшое количество транзисторов в схеме позволяет спроектировать ее при достаточно широких допусках на элементы конструкции в каждом слое и за счет этого сделать ее менее критичной к процессу изготовления, что особенно важно в случае проектирования фотоматриц больших размерностей, где начинают сказываться ограничения в технологии изготовления фотошаблонов.

3. Постановка задач. Ввиду больших потерь света в оптическом тракте и относительно невысокой мощности используемых в настоящее время лазеров для ГЗУ характерны уровни световой энергии порядка $10^{-11} \div 10^{-13}$ Дж/бит. Расчеты показали [3], что при указанных выше уровнях энергии (Дж/бит) реальные перепады напряжений на фотодиодах при их засветке составляют $2-3$ В. Для обеспечения работы в цифровом режиме необходимо выбирать малый уровень напряжения питания источника $-V_{п1}$. При этом напряжение на фотодиоде ($-V_{фд}$) подвержено влиянию коммутационных помех от импульсов дозаряда и чтения (см. ΔV_1 и ΔV_2 на рис. 1) и уходу за счет тока утечки (ΔV_3).

* В работе [1] для ГЗУ емкостью $2 \cdot 10^7$ бит принято отношение шага к диаметру фотодиода $2:1$ ($0,2:0,1$ мм).

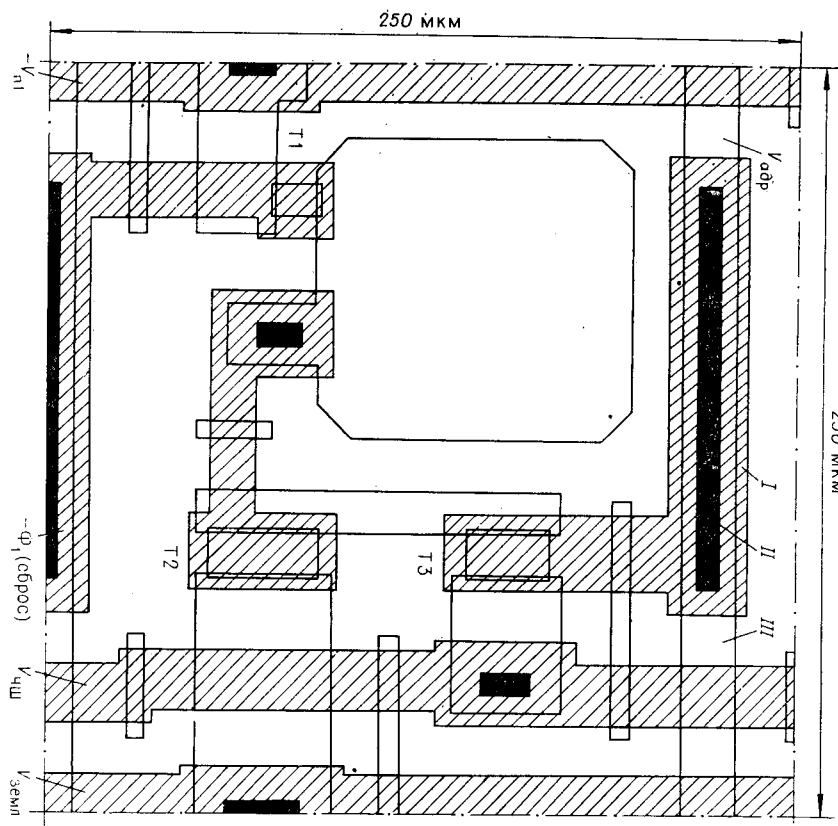


Рис. 4.

Малая величина напряжения на фотодиоде ограничивает быстродействие цепи чтения (вывода) информации.

Таким образом, необходимо оценить, какое влияние на работу рассматриваемого ФПЭ оказывают уже упомянутые факторы, а также технологический разброс МОП-транзисторов и нестабильность источников питания. Эти вопросы рассмотрены в п.п. 4 и 5. Результаты экспериментального исследования фоточувствительности элемента и быстродействия цепей чтения приводятся в п. 6, где также обсуждаются возможности сопряжения выходов ФПЭ с ТТЛ и ЕСЛ ИС.

4. Анализ ограничений на электрические режимы работы фотоприемного элемента. В МОП-интегральных схемах минимальное эффективное отпирающее напряжение ($V_{эфф} = |V_3 - V_{пор}|$) выбирается обычно примерно равным пороговому. Учитывая, что реально достижимый перепад при засветке также примерно равен пороговому напряжению, примем $V_{п1} = 6,3$ В. Отметим, что при $\Delta V_{п1}/V_{п1} = 0,05$ фактический уровень напряжения $V_{п1} = -6,3 \pm 0,3$ В. Для определения пороговой чувствительности фотодиода необходимо знать его спектральную характеристику и величину тока утечки.

Измерения, проведенные на серии тестовых фотодиодов при -10 В обратного смещения ($-V_{см}$), дали усредненное значение тока утечки $25 \div 28$ пА. На рис. 5 приведены типичные вольт-амперные характеристики $p-n$ -переходов при обратном смещении, полученные в эксперименте. На рис. 5, а даны две характеристики для фотодиодов размером $0,3 \times 0,3$ мм, на рис. 5, б — три характеристики для фотодиодов размером $0,5 \times 0,5$ мм. Исследование спектральной характери-

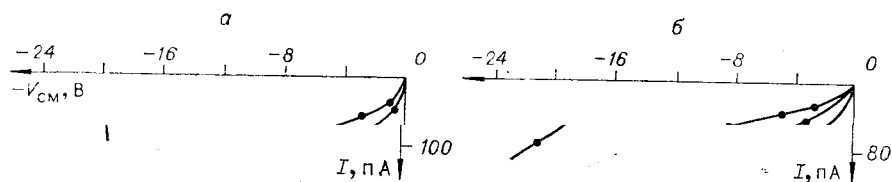


Рис. 5.

стики фотодиодов показало, что на длине волны 0,63 мкм их абсолютная чувствительность равна 0,24 А/Вт.

При оценке пороговой чувствительности принято брать отношение фототока к току утечки фотодиода равным единице. Предполагая значение тока утечки равным 25 пА, получаем значение пороговой чувствительности 10^{-7} Вт/см² или порядка 10^{-11} Дж/см² при времени накопления 10^{-4} с. Приближенная оценка величины ухода напряжения на фотодиоде за счет тока утечки (ΔV_3) порядка 10 В/с.

Вторым фактором, определяющим чувствительность и быстродействие ФПЭ в целом, является технологический разброс пороговых напряжений МОП-транзисторов. Из измерений характеристик тестовых структур было получено, что плотность поверхностных состояний Q_{nc} и другие физико-технологические параметры могут изменяться от партии к партии. Соответствующие расчетные значения пороговых напряжений оказываются равными: нижнее — (3,2÷4,2) или — (3,7±0,5) В и верхнее — (3,9÷5,1) или — (4,5±0,6) В.

Информация о наличии (отсутствии) засветки фотодиода, хранящаяся в виде напряжения на емкости обратносмещенного $p-n$ -перехода, подвержена во время работы схемы в режимах сброса и чтения различным коммутационным помехам вследствие наличия в МОП-интегральной схеме многочисленных паразитных емкостных связей*. Влияние таких связей при вариации параметров транзисторов за счет технологического процесса может быть выявлено путем численного моделирования на ЭВМ. Было получено, что при отношении W/L транзисторного ключа Т1, равном 2÷3 при фронтах импульса сброса Φ_1 0,2 мкс, $V_{п1} = -(6÷7)$ В и амплитудах импульсов сброса — (12÷24) В потери напряжения на фотодиоде (см. рис. 1) могут быть равны (0,8÷1) В. Изменения напряжения на фотодиоде при подаче импульсов чтения Φ_3 с амплитудами — 12÷24 В и фронтами 0,1÷0,3 мкс в состоянии логической «1» $V_{фд} = -(1÷3)$ В могут достигать (0,7÷0,8) В, а в состоянии логической «0» — (0,8÷1) В. В обоих случаях при выбранной схеме ФПЭ эти изменения имеют обратный по отношению к действию света знак. «Опасны» изменения в состоянии логической «1», когда фотодиод разряжен светом до уровня, близкого к порогу отпирания «следящего» транзистора. В этом случае паразитный заряд емкости фотодиода при подаче адресного импульса (Φ_3) может привести к отпиранию «следящего» транзистора и выдаче ложной информации в цепь чтения.

На рис. 6 изображена рабочая область фотоприемного элемента. Неоднозначность возникает и в статическом режиме за счет наличия зоны разброса порогов отпирания, например при $V_{фд} = -3,2$ или

* На рис. 1 некоторые из этих связей показаны штриховыми линиями.

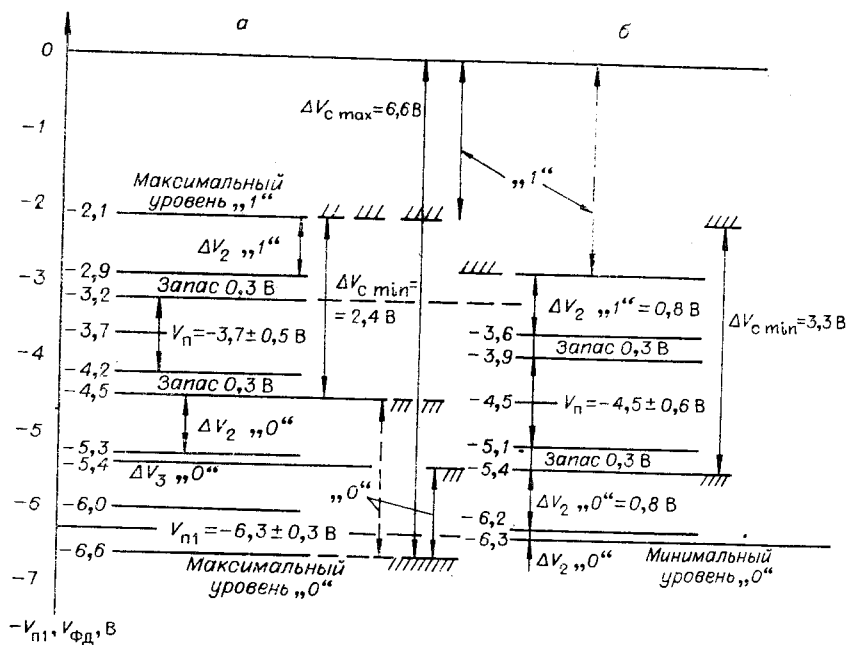


Рис. 6.

—4,2 В. Исходя из принятой величины перепада от засветки, сравнимой по абсолютной величине с имеющейся разницей в логических уровнях цифровых ДТЛ или ТТЛ ИС, можно при $V_{пор} = -3,7 \pm 0,5 \text{ В}$ принять за максимальный уровень логической «1» напряжение на 0,3 В меньше, чем нижнее расчетное значение порога, т. е. —2,9 В. Аналогично за минимальное значение уровня логического «0» можно принять в этом случае напряжение, равное —4,5 В. Минимальный перепад напряжения ($\Delta V_{c \min}$), гарантирующий работу ФПЭ в цифровом режиме, оказывается равным 3,3 В. Для сравнения на рис. 6, б показано, что при меньшем разбросе пороговых напряжений эта величина может быть снижена до 2,4 В ($\Delta V_{c \min}$). Из рисунка следует, что ФПЭ работоспособен при разбросе порогов в пределах —(3,2÷5,1) В при $V_{п1} = -(6,3-0,3) \text{ В}$.

Если рассматривать все учтенные на рис. 6, а, б величины (ΔV_1 , ΔV_2 , ΔV_3 , $V_{пор} \pm \Delta V_{пор}$, $V_{п1} \pm \Delta V_{п1}$) как «шум», приведенный ко входу следящего транзистора схемы чтения, а перепад от засветки фотодиода — как полезный сигнал, то отношение сигнал/шум при насыщающем полном разряде емкости $p-n$ -перехода светом от уровня —6,6 В не превышает 2:1. Эта величина показывает, насколько жесткие требования предъявляются к технологии изготовления ФПЭ в вопросах стабилизации значений порогов МОП-транзисторов и уменьшения разбросов на всех технологических операциях.

5. Оценка быстродействия цепей чтения. Уменьшение требований к абсолютной величине перепада на фотодиоде позволяет приблизиться к более низким значениям уровня энергии (Дж/бит). Кроме того, величина тока, протекающего через схему чтения, определяется электрическим режимом работы «следящего» транзистора и зависит от напряжения на его стоке и величины эффективного отпирающего напряжения. При $V_{пор} = -3,7 \pm 0,5$ напряжение $V_{эфф} = (1,8 \div 3,4) \text{ В}$, при $V_{пор} = -4,5 \pm 0,6 \text{ В}$ величина $V_{эфф}$ уменьшается до $0,9 \div 2,7 \text{ В}$ (см. рис. 6). Таким образом, требования к фоточувствительности и быстродействию цепей чтения рассматриваемой схемы находятся в определенном противоречии.

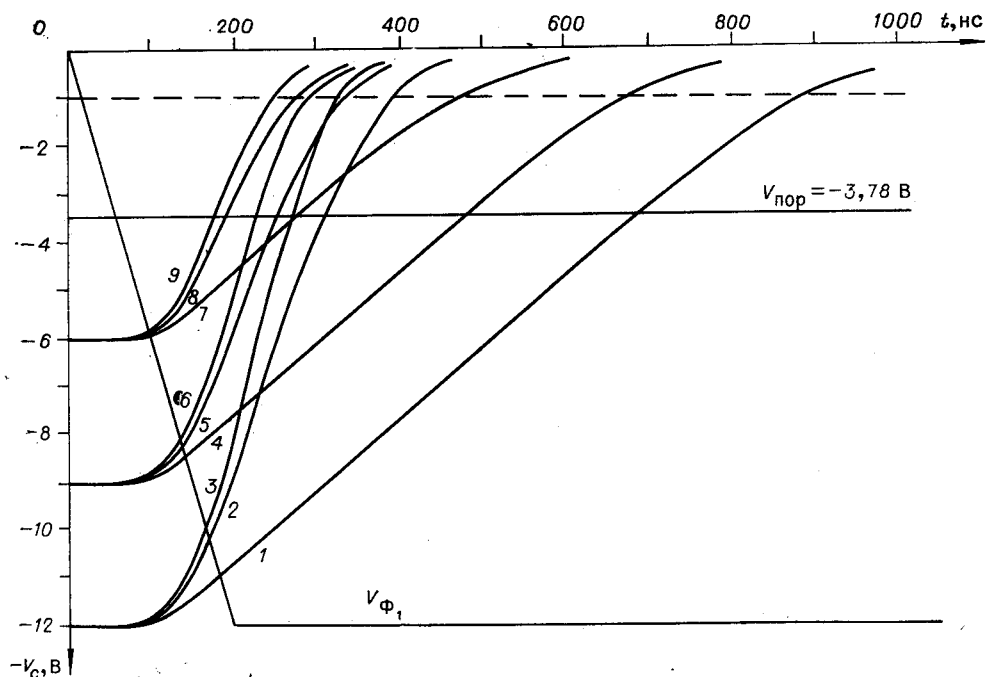


Рис. 7.

Напомним, что при использовании двухимпульсной диаграммы чтения (см. п. 1) вначале производится дозаряд числовой шины импульсом Φ_2 (см. рис. 1), а затем — подача адресного импульса ($V_{\text{адр}}$). Если в ячейку не была записана оптическая информация (логический «0»), «следящий» транзистор схемы открыт и емкость числовой шины разряжается, запирая буферный транзистор (Т6). Выходное напряжение схемы, снимаемое с нагрузки, в этом случае уменьшается до 0 В. Длительность фронта определяется крутизной буферного МОП-транзистора и RC-параметрами нагрузки.

Оценка времени чтения информации из ячейки, находящейся в состоянии логического «0» при различных величинах эффективных отпирающих напряжений, уровнях дозаряда ЧШ, порогов и геометрических размерах транзисторов Т2 и Т3 схемы чтения, приведена на рис. 7.

Уровни дозаряда варьировались ($V_{\text{н1}} = -6, -9, -12$ В), начальные уровни напряжения на фотодиоде ($-V_{\text{Фд}}$) изменялись в тех же пределах. Геометрические размеры транзисторов Т2 и Т3 считались равными ($W_1/L_1 = W_2/L_2$), а отношения W/L для них брались в пределах 1÷5. Пороги МОП-транзисторов варьировались в пределах $-(3,09 \div 3,78)$ В. На этом рисунке представлены типичные результаты расчета для случая $C_{\text{чш}} = 2$ пФ, $W/L = 3$ и пороговых напряжений, равных $-3,78$ В. На рисунке кривые 1—3 описывают переходный процесс при дозаряде ЧШ до -12 В, 4—6 — при дозаряде до -9 В, 7—9 — при дозаряде шины до -6 В. Кривые 1, 4, 7 относятся к случаю, когда напряжение на фотодиоде $V_{\text{Фд}} = -6$ В, 2, 5, 8 вычислены при $V_{\text{Фд}} = -9$ В, а 3, 6, 9 при $V_{\text{Фд}} = -12$ В. Время по оси t дано в наносекундах. Из приведенных графиков следует, что при эффективном отпирающем напряжении около 2 В и относительно небольших геометрических размерах транзисторов ($W/L \approx 3$) время разряда шины от -6 до -1 В порядка 0,5 мкс, при разряде от -12 до -1 В около 1,0 мкс. При увеличении $V_{\text{эфф}}$ до 5—8 В время разряда шины до -1 В может быть сокращено

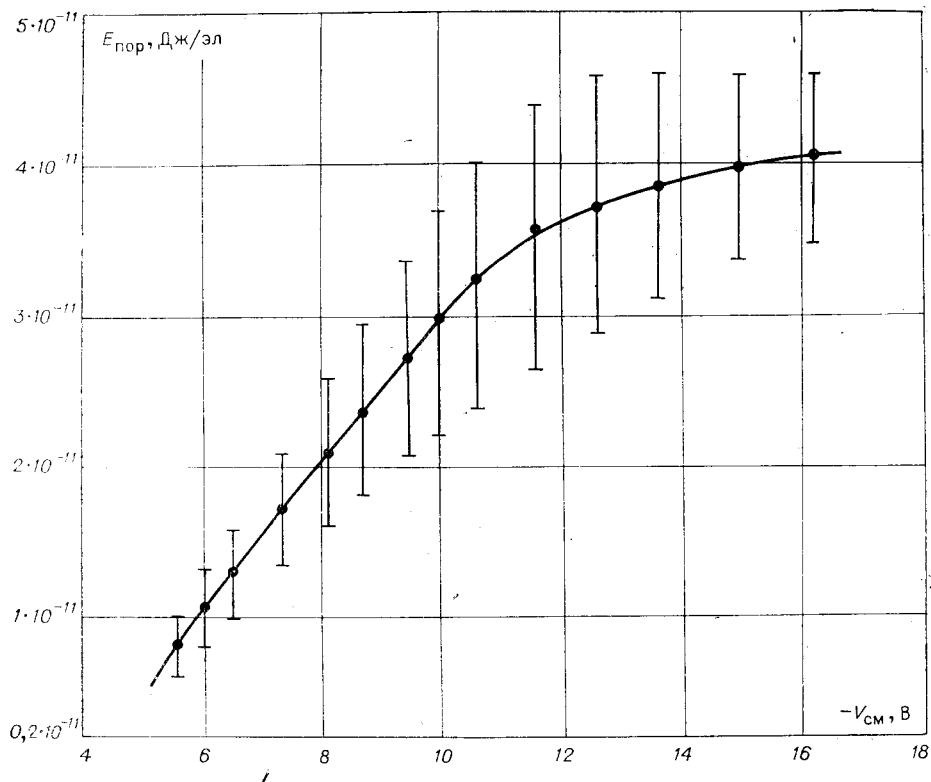


Рис. 8.

в 2—2,5 раза, однако даже при $V_{эфф} = -6 В$ (кривая 9) это время не менее 250 нс. Отметим, что снижение уровня напряжения дозаряда ЧШ приводит к увеличению размеров буферных транзисторов.

Моделирование работы схемы чтения с учетом разброса порогов транзисторов в пределах $-(3,09 \div 3,78) В$ показало, что время разряда шины от уровня $-V_{п1}$ до $-1 В$ может за счет этого меняться до двух раз. Например, при $V_{п1} = V_{чш} = -12 В$, $V_{фд} = -6 В$ и $W/L = 2$ оно колеблется в пределах $970 \div 1800 нс$, а при тех же условиях и $W/L = 5$ — в пределах $440 \div 770 нс$. При $V_{п1} = V_{чш} = V_c = -12 В$ и $W/L = 5$ ($W/L = 3$) оно колеблется в меньших пределах $230 \div 305 нс$ ($280 \div 380 нс$).

Таким образом, при малых уровнях эффективного отпирающего напряжения и малых геометрических размерах транзисторов в схеме чтения можно обеспечить вывод информации из ячейки с циклом порядка $10^{-6} с$.

6. Исследования фоточувствительности и быстродействия экспериментальной ячейки. Рассматриваемый ФПЭ (см. рис. 1) был включен в состав тестовой микросхемы и изготовлен в виде интегральной схемы. Исследование фоточувствительности элемента и быстродействия схем чтения проводилось на установке и по методике, описанной в работе [6]. При испытаниях использовалась временная диаграмма, приведенная на рис. 2.

На рис. 8 приведена экспериментальная зависимость $E_{пор}$ от напряжения обратного смещения фотодиода ($-V_{п1}$). Экспериментальная зависимость усреднена по результатам измерений 20 образцов. На графике также отмечены верхние и нижние границы разброса рассматриваемой характеристики. Из графика видно, что ячейки начинают чув-

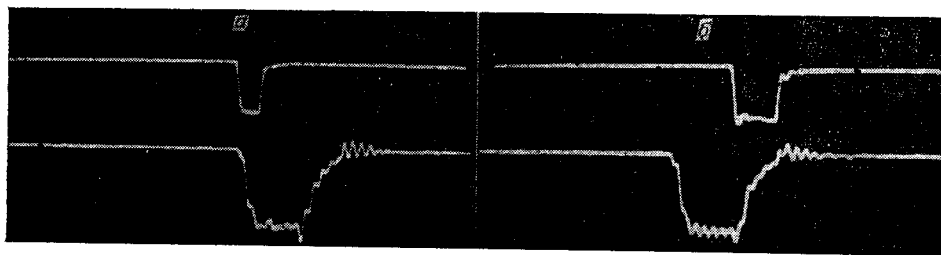


Рис. 9.

ствовать энергию света на уровне $0,6 \cdot 10^{-7}$ Дж/см² при напряжении смещения -5 В. Область уверенной работы исследуемых ФПЭ начинается от $1,2 \div 1,4 \cdot 10^{-7}$ Дж/см² при напряжении смещения -7 В*.

На рис. 9, а, б (нижняя осциллограмма) приведен сигнал на выходе буферного истокового повторителя при $R=500$ Ом. (Амплитуда импульса в установившемся состоянии $-2,0$ В, развертка по оси X 50 мкс/см.) Передний фронт выходного сигнала формируется импульсом Φ_2 , задний — импульсом Φ_3 . Фотографии этих импульсов представлены соответственно на верхних осциллограммах рис. 9, а, б (масштаб по оси Y — 20 В/см). Выходной сигнал (см. рис. 9) сравнивался с одноименным напряжением, рассчитанным с помощью ЭВМ «Минск-32». Сравнение показало, что имеется удовлетворительное совпадение численного моделирования с экспериментом.

Использование двухимпульсной диаграммы чтения и мощного буферного каскада позволяет технически просто осуществить стыковку выхода ФПЭ (фотоматрицы на рис. 3) с внешними биполярными схемами. Так, включение буферного транзистора по схеме истокового повторителя (см. рис. 1) позволяет при $V_{п1} = -12$ В согласовать выходы МОП и ЕСЛ ИС. Приведенные выше уровни выходных сигналов МОП ИС при $R_n = 500$ Ом (логическая «1» — 0 В, логический «0» — $-(1,5 \div 2,0)$ В) согласуются с соответствующими уровнями ЕСЛ ИС серии 137, где логическая «1» равна $-(0,7 \div 0,95)$ В, а логический «0» равен $-(1,45 \div 1,9)$ В. При такой стыковке экспериментальной МОП ИС и ЕСЛ ИС серии 137 было получено быстрдействие $1-2$ МГц, что, разумеется, не исчерпывает всех имеющихся возможностей. Согласование выходных сигналов фотоматриц с рядом биполярных цифровых и линейных схем возможно на частотах вплоть до 10 МГц.

Закключение. В работе исследованы характеристики фотоприемного элемента «свет — код», содержащего фотодиод и три МОП-транзистора. Проведенные расчеты и подтвердившие их экспериментальные исследования показали возможность использования рассматриваемой схемы в фотоматричных преобразователях голограммных ЗУ с информационной емкостью порядка 10^7 бит при энергии света вплоть до 10^{-11} Дж/см². При этом амплитуда сигналов на выходе схемы достигает 2 В, а частота выборки информации $1-2$ МГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. O. Jäntschi, U. V. Hundelshansen, J. Feigt, W. Hering. Detector matrix for a holographic memory.— "Siemens J. of Res. and Development", 1973, vol. 2, № 1, p. 34—38.
2. Marican F. Hoff. Static or dynamic — two ways to remember.— "Electron. Eng.", 1970, vol. 29, № 6, p. 72—74.

* Эта величина примерно в два раза отличается от оценки [4].

3. И. С. Гибин. Расчет и выбор параметров голограммных запоминающих устройств.— «Автометрия», 1974, № 6, с. 3—15.
4. Г. Л. Коган, Е. Ф. Пен. К вопросу выбора оптимальных геометрических параметров фотоматриц для голограммных ЗУ.— «Автометрия», 1975, № 3, с. 36—41.
5. Р. Кроуфорд. Схемные применения МОП-транзисторов. М., «Мир», 1970.
6. С. И. Наймарк, В. П. Радзюкевич, М. Е. Ротштейн. Некоторые методы и аппаратурные решения, используемые при испытаниях фотоприемных матричных элементов.— «Автометрия», 1977, № 2, с. 71—79.

Поступила в редакцию 10 июля 1976 г.

УДК 535.2 : 621.383

С. И. НАЙМАРК, В. П. РАДЗЮКЕВИЧ, М. Е. РОТШТЕЙН
(Новосибирск)

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ И АППАРАТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ФОТОПРИЕМНЫХ МАТРИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В последнее время наблюдается быстрый рост числа разработок оптоэлектронных МДП ИС, предназначенных для различных приложений. Широкий спектр схемотехнических и технологических вариантов, конструкций и способов управления вносит значительные трудности в общую методологию испытаний оптоэлектронных ИС. Эти трудности связаны с абсолютными измерениями малых уровней световой мощности на фотоприемных входах оптоэлектронной ИС; с созданием нестандартной электронной аппаратуры, обеспечивающей многофазную импульсную диаграмму управлениями оптоэлектронной ИС, причем окончательные параметры диаграммы устанавливаются, как правило, в конце испытаний; с методикой определения работоспособности оптоэлектронной ИС.

В данной работе описываются некоторые методы и аппаратура, используемые при испытаниях фотоприемных МДП-интегральных матричных элементов, работающих в режиме накопления заряда.

Оптические измерения. Входным сигналом фотоприемного матричного элемента является световая энергия E , полученная фотоприемником за время накопления T :

$$E = \int_0^T P(t) dt, \quad (1)$$

где $P(t)$ — мощность света на фотодиоде.

Как правило, используемые источники света нестабильны и мощность излучения — функция времени. Для используемого в данной работе лазера ЛГ-55 характерны времена изменения мощности порядка нескольких минут. Очевидно, что на интервале $T = 100 \div 1000$ мкс

$$E = \int_0^T P(t) dt \simeq PT. \quad (2)$$

Причем значение P необходимо измерять одновременно с выходным сигналом.

На рис. 1 изображена схема измерительной установки, использованной при испытаниях фотоматричных элементов, где $I, I7$ — лазеры типа ЛГ-55, работающие в качестве монохроматических источников света ($\lambda = 0,63$ мкм), обеспечивающих мощность излучения до 1—2 мВт