

В. И. БУДАРНЫХ, И. Г. ДОМАХИН, В. Ф. КРАСНОВ,
И. И. ЛИ, И. И. СИТНИКОВА, Л. А. ТУРОВСКИЙ,
В. Г. ЦУКЕРМАН

(Новосибирск)

ЭЛЕКТРОННО-УСИЛИВАЮЩАЯ МАТРИЦА ДЛЯ ГИБРИДНОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Введение. Задачи экспрессной обработки оптической информации предполагают создание быстродействующих фоточувствительных приборов с пространственным разрешением, пригодных для согласования с ЭВМ. К настоящему времени опубликовано достаточно много работ с описанием полупроводниковых фотоприемных матричных устройств [1—4]. Однако скорость обработки оптической информации можно существенно повысить, заменив фотоприемное матричное устройство электронно-оптическим преобразователем с матрицей усиливающих элементов на выходе прибора.

В настоящей работе описан один из возможных вариантов усиливающего матричного устройства и приведены результаты испытания матрицы. Детальному анализу характеристик отдельной ячейки, а также общему рассмотрению процессов в матрице посвящены отдельные работы.

Принцип действия матрицы. На рис. 1, а, б приведены электрическая схема фрагмента диод-диодной матрицы и увеличенная фотография матрицы размером 8×8 элементов. Горизонтальные шины соответствуют числовым, а вертикальные — разрядным линиям. Между каждой вертикальной и горизонтальной шинами включено по одной диод-диодной ячейке, представляющей собой включенные навстречу друг другу электронно-усиливающий диод (ЭУД) и диод, выполняющий роль «ключа» (КД). Каждая вертикальная шина (столбец) нагружена на сопротивление R_n и соединена с системой приема информации. К каждой горизонтальной шине (строке) подключен генератор опросных импульсов (с внутренним сопротивлением R_i).

Полный цикл обработки изображения разбивается на два интервала времени $T_n \approx T$. Во время T_n (время накопления) на матрицу падает электронное изображение, сформированное электронной оптикой преобразователя. В различных точках плоскости матрицы плотность тока

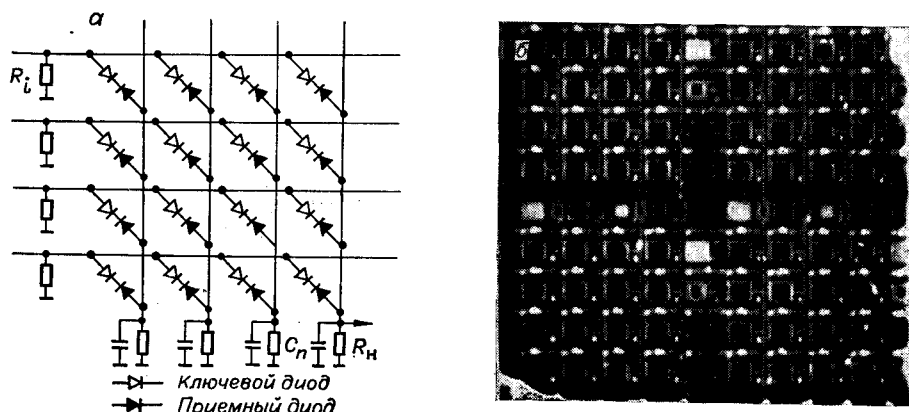


Рис. 1. Электронно-усиливающая диод-диодная матрица:
а — электрическая схема матрицы; б — фотография матрицы размером 8×8 элементов.

пучка принимает при этом два значения 0 и I_0 . Энергия электронов, падающих на электронно-усиливающий диод, равна 10—15 кэВ. Если к началу периода накопления барьерные емкости p - n -переходов всех электронно-усиливающих диодов были заряжены до некоторого обратного напряжения U_0 , то по истечении времени T_n барьерные емкости облученных электронно-усиливающих диодов разряжаются до напряжения $U_{ост} \ll U_0$ возросшим обратным током.

Следующий промежуток времени T — электронное изображение в плоскости матрицы отсутствует. В это время на горизонтальные шины матрицы с опросного генератора последовательно подаются импульсы напряжения положительной полярности длительностью $T/N = \tau$, где N — число строк матрицы. Опросные импульсы, открывая ключевые диоды, дозаряжают барьерные емкости p - n -переходов электронно-усиливающих диодов ($C_{эвд}$) до напряжения $\sim U_0$. Таким образом, матрица приводится в исходное состояние, а токи дозаряда емкостей создают падение напряжений на нагрузочных сопротивлениях R_n . Так как ток дозаряда зависит от состояния емкости данного электронно-усиливающего диода, то амплитуда сигнала на нагрузочном сопротивлении несет информацию о состоянии ячейки после окончания периода T_n .

Технологическая конструкция матрицы. Исследовались матрицы двух типов: 1) гибридная матрица, собранная на проводящей подложке из отдельных электронно-усиливающих ячеек, изготовленных по планарно-эпитаксиальной технологии; 2) матрица, изготовленная по планарно-диффузионной технологии, с использованием в качестве подложки поликристаллического кремния, на котором выращены монокристаллические остовы в местах изготовления электронно-усиливающих ячеек. Шаг матриц составлял 0,6 мм.

При проектировании электронно-усиливающих диодов была выбрана оптимальная глубина залегания p - n -перехода для более полного использования эффекта катодного усиления и получения минимально возможных токов утечки. Оптимальная глубина залегания p - n -переходов находилась в пределах 0,7—1,5 мкм, при этом коэффициент размножения электронного пучка при энергии 10 экВ составил $\sim 10^3$, а темновой ток был менее 10^{-8} А. Кроме того, ключевой диод был защищен слоем Al (толщиной $1,2 \pm 1$ мкм), что позволило избежать воздействия электронного пучка на его характеристики. При получении p - n -переходов в качестве диффузанта использовался бор.

Методика и блок-схема измерений. Исследование матрицы и измерение параметров были проведены на разборной вакуумной установке, блок-схема которой приведена на рис. 2.

Ввиду значительной сложности формирования электронно-битового изображения, основная часть измерений проводилась на упрощенной

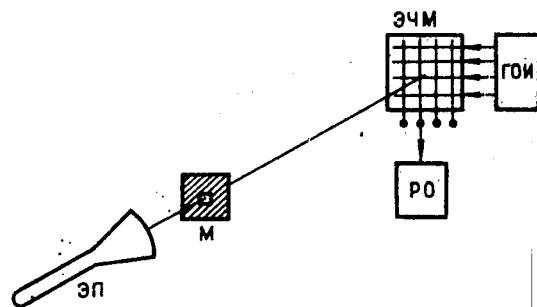


Рис. 2. Схема установки для испытания матрицы: ЭЧМ — электронно-чувствительная матрица, ГОИ — генератор опросных импульсов, М — маска, ЭП — электронная пушка, РО — регистрирующий осциллограф.

установке, в которой электронное изображение было заменено эквивалентным ему световым. (Предварительно была проверена эквивалентность обоих методов по быстродействию и равенству тока размножения с фототоком I_{ϕ} .) Так как нас более интересует период опроса, определяющий основные параметры матрицы (быстродействие, помехозащищенность и т. д.), то подобная замена вполне правомерна, ибо во время

опроса безразлично, каким путем были разряжены барьерные емкости p - n -переходов. Источником света в установке служил лазер ЛГ-75, между лазером и матрицей помещались сменные маски для формирования битового изображения в плоскости матрицы. На горизонтальные шины матрицы подавались считывающие импульсы положительной полярности, сформированные специально изготовленным четырехканальным генератором. Этот генератор представляет собой сдвиговый регистр, построенный на микросхемах серии К138. Применение микросхем этой серии позволило получить опросные импульсы с передними и задними фронтами $\tau_{фр} < 7$ нс. Так как уровень логического нуля и логической единицы у микросхем серии К138 различается всего на 0,5 В, то на выходе каждого канала генератора включены дополнительные усилители, изготовленные на транзисторах КТ315. Импульсы опроса имели следующие параметры: $U_r = 5-8$ В, $\tau_{фр} \approx 7$ нс, $R_i = 200$ Ом. Длительность опросного импульса задавалась тактовой частотой, которая формировалась мультивибратором, выполненным на микросхемах серии К138. Запуск генератора опроса осуществлялся двойными импульсами генератора Г5-19. Время между импульсами выбиралось в пределах 1,5—2 мкс, а частота следования пар импульсов составляла 10 кГц. Полезный сигнал с нагрузочного сопротивления R_n подавался на вход осциллографа С1-31, синхронизованного с опросным генератором.

Анализ работы матрицы в режиме опроса. Амплитуда светового сигнала не зависит от величины сопротивления R_n при выполнении неравенств $R_i \ll R_n$ и $R_{кд} \ll R_n$, где $R_{кд}$ — прямое сопротивление ключа. Так как за время опросного импульса одновременно должны заряжаться емкости электроночувствительных диодов всей строки, то ограничение на внутреннее сопротивление генератора является еще более жестким: $R_i \ll R_n/N$. На рис. 3 показано относительное изменение амплитуды светового сигнала при изменении нагрузочного сопротивления R_n . Видно, что амплитуда светового сигнала практически не меняется при сопротивлениях нагрузки $\geq 1,5$ кОм.

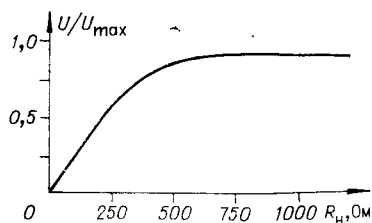


Рис. 3. Зависимость амплитуды светового сигнала от величины нагрузочного сопротивления.

После окончания одного опросного импульса паразитная емкость в нагрузочной цепи должна быть полностью разряжена, т. е. необходимо выполнение условия $R_n C_n < \tau$. Эквивалентная паразитная емкость C_n зависит от количества элементов в матрице и приблизительно равна $C_{кд}N$, где $C_{кд}$ — барьерная емкость ключевого диода. Учитывая последнее соотношение и заменяя в неравенстве τ на T_n/N , получим ограничение на число элементов в матрице:

$$N^2 < T_n / (C_{кд} R_n). \quad (1)$$

Величина R_n , как отмечалось выше, не должна быть меньше прямого сопротивления ключевого диода $R_{кд}$, поэтому выражение (1) может быть записано в виде

$$N^2 < T_n / (C_{кд} R_{кд}). \quad (2)$$

Для ключевых диодов исследуемых матриц величина $C_{кд} R_{кд}$ равна $\approx 10^{-9}$ и при времени накопления $T_n = 1$ мкс $N^2 < 10^3$.

Максимальное значение амплитуды светового сигнала определяется выражением

$$U_{max} = (C_{эуд} U_r) / (C_{эуд} + C_n) \quad (3)$$

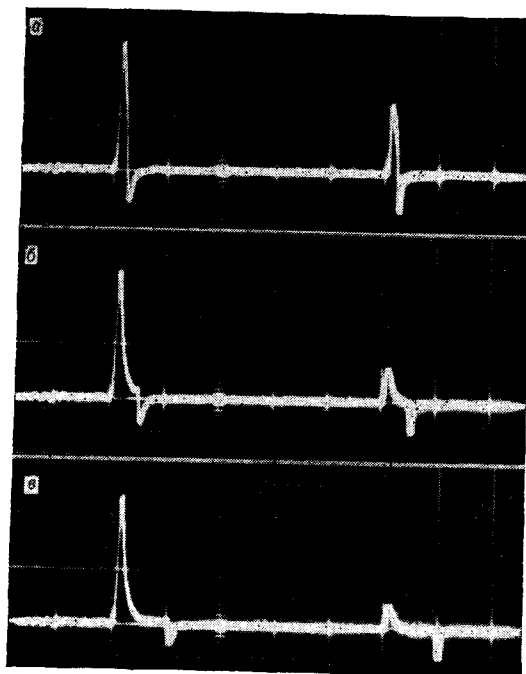


Рис. 4. Осциллограммы световых и темных импульсов при различных длительностях опросного импульса:
 $a - \tau_{\text{опр}} = 40 \text{ нс}$, $б - 80 \text{ нс}$, $в - 160 \text{ нс}$.

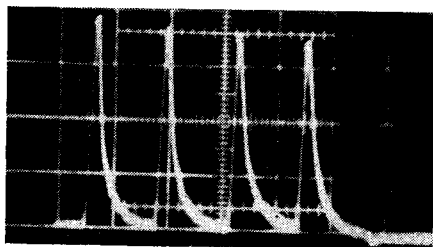


Рис. 5. Осциллограммы импульсов при полностью освещенной матрице.

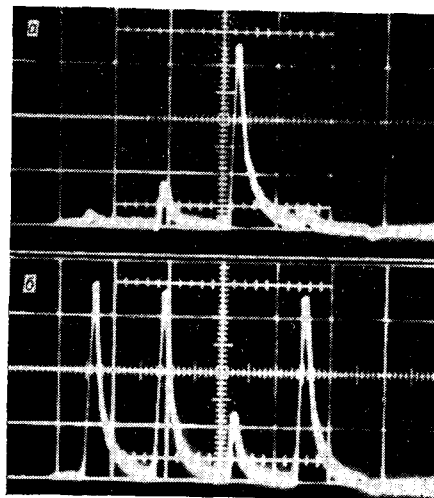


Рис. 6. Осциллограммы импульсов при освещении матрицы через различные маски:
 a — освещен только третий элемент второго столбца; $б$ — освещена вся матрица, кроме третьего элемента второго столбца.

с учетом зависимости емкости $C_{\text{эуд}}$ от напряжения на $p-n$ -переходе. Так как при увеличении напряжения емкость $C_{\text{эуд}}$ быстро убывает, то величина сигнала U_{max} непропорциональна амплитуде опросного импульса U_r и даже при больших сопротивлениях нагрузки нам не удалось получить сигнал, больший 2,5 В.

Для увеличения амплитуды светового сигнала необходимо либо уменьшить емкость $C_{\text{п}}$ (паразитная емкость $C_{\text{п}}$ складывается из емкости разрядной шины на землю, входной емкости канала считывания и эквивалентной паразитной емкости $C_{\text{кд}}N$), либо увеличить емкость $C_{\text{эуд}}$.

При малых длительностях опросного импульса носители, инжектированные в базу ключевого диода, не успевают рекомбинировать полностью. Это приводит к протеканию обратного тока и, следовательно, к разряду емкости электронно-усиливающего диода. При отсутствии освещения ток дозаряда барьерной емкости проявится как паразитный сигнал в нагрузочной цепи. Эффективность рекомбинации определяет время восстановления обратного сопротивления ключевого диода.

Время восстановления изготовленных ключевых диодов (по предварительным измерениям) составляло ≈ 50 нс, и заметного уменьшения паразитного сигнала не наблюдалось при длительностях опросного импульса больше 100 нс. Зависимость амплитуд паразитных сигналов от длительностей опросных импульсов иллюстрируется осциллограммами рис. 4. Для наглядности приведены осциллограммы, полученные с отдельной ячейки.

За счет существования паразитных связей амплитуда светового сигнала при опросе данной ячейки зависит от количества предварительно опрошенных строк. Эта зависимость иллюстрируется осциллограммой рис. 5, которая соответствует световым импульсам на сопротивлении нагрузки одного столбца при опросе полностью освещенной матрицы ($\tau = 130$ нс, $U_r = 5$ В). Для устранения этого эффекта необходимо уменьшить емкость «база ЭУД — подложка» и улучшить изоляцию между различными ячейками.

Осциллограммы рис. 6 соответствуют освещению матрицы через различные маски. Хорошо видно различие в амплитудах световых и темновых сигналов. Заметно, что наличие большого количества предварительно освещенных ячеек увеличивает амплитуду темнового импульса.

Полученные характеристики фрагмента электронно-усиливающей матрицы размером 4×4 элемента указывают на возможность создания матриц больших размерностей. Однако простое увеличение количества ячеек в матрице не приводит к повышению скорости обработки информации (V). Это видно из соотношения (2), которое может быть переписано в виде

$$V[\text{бит/с}] = N^2/T < 1/C_{\text{кд}}R_{\text{кд}} \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что для электронно-усиливающей диод-диодной матрицы скорость обработки информации зависит от характеристик ключевого диода.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. H. R. Vilkomerson, R. S. Mezrich, J. M. Assour. A word-organized photodetector array.— "IEEE J.", 1969, SC-4, № 6, p. 317—325.
2. M. A. Vann. Self-scanned photo-diode arrays-characteristics and applications.— "Opt. and Laser Technol.", 1974, vol. 6, № 5, p. 209—218.
3. O. Jäntschi, U. V. Hudelshausen. Detektormatrix für einen holographischen Datenspeicher.— "Mikroelektronik 5", München-Wien, 1973, p. 604—622.
4. Speer D. Raymond. Light-sensitive flip-flops read holograms.— "Electronic Design", 1968, vol. 16, № 25, p. 28—30.

Поступила в редакцию 29 марта 1976 г.