

С. В. КРУГЛИКОВ
(Новосибирск)

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯЧЕЙКИ ФОТОДИОДНОЙ МАТРИЦЫ С КОММУТАЦИЕЙ НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ

МДП-фотодиодные матрицы известны сравнительно давно [1]. Вначале они разрабатывались для применения в качестве твердотельных аналогов телевизионных трубок, поэтому работы по их созданию были направлены главным образом на достижение информационной емкости, соответствующей телевизионным стандартам. Эта задача более успешно решается сейчас устройствами формирования сигналов изображения на основе ПЗС [2]. Фотодиодные же матрицы в настоящее время находят применение в различных оптоэлектронных устройствах автоматики и вычислительной техники (при обработке оптических сигналов, выводе информации из оптических ЗУ, фотометрических измерениях и т. д.), причем число конкретных примеров использования фотоматриц в перечисленных типах устройств неуклонно растет. В связи с этим динамические характеристики фотодиодных матриц представляют особый интерес. Строгий расчет динамических характеристик матрицы с коммутацией на МДП-транзисторах возможен на основе физико-топологической модели ее элементарной ячейки с применением ЭВМ [3], однако в связи с недостаточной наглядностью численных методов расчета полезен вывод соотношений, связывающих основные характеристики матрицы с параметрами конструкции, технологии и режимом работы. В настоящем сообщении анализируются фоточувствительность, динамический диапазон, быстродействие элементарной ячейки фотодиодной матрицы с коммутацией на МДП-транзисторах и их зависимость от конструктивно-технологических параметров и режима работы на основе ее линейной электрической модели.

Расчет электрической модели элементарной фоточувствительной ячейки. Рассмотрим элементарную ячейку фотодиодной матрицы (рис. 1), содержащую МДП-транзистор, затвор которого соединен с горизонтальной шиной Y_j , а сток — с вертикальной шиной X_i . Исток МДП-транзистора T_{ij} представляет собой эквивалентный фотодиод, конструктивно выполненный в виде увеличенной области p^+n -перехода. Фотодиод работает в режиме накопления заряда так, что за время между двумя последовательными импульсами считывания на емкости обратносмещенного p^+n -перехода накапливается заряд

$$\Delta Q_{\text{Фд}} = \Delta Q_{\text{Ф}} + \Delta Q_{\text{Т}} = ((s_{i0}P_0 + I_{\text{Тд}})t_n) / C_{\text{Фд}}, \quad (1)$$

где $\Delta Q_{\text{Фд}}$ — заряд, накопленный фотодиодом к концу периода накопления; s_{i0} — токовая чувствительность; $C_{\text{Фд}}$ — емкость; $I_{\text{Тд}}$ — темновой ток фотодиода; t_n — время накопления; P_0 — мощность оптического сигнала, воспринимаемого отдельной фотоячейкой. При подаче отпирающего напряжения на затвор МДП-транзистора, связанного с шиной Y_j , в выходной цепи фотоячейки начинается переходный процесс дозаряда емкости фотодиода до напряжения источника питания. Изменение заряда на выходе элементарной ячейки может быть представлено в виде

$$\Delta Q(t) = (\Delta Q_{\text{Ф}} + \Delta Q_{\text{Т}})f(t) + \Delta Q_{\text{К}}f_{\text{К}}(t) \Delta Q_{\text{ост}} + \langle Q_{\text{ш}} \rangle, \quad (2)$$

где $\Delta Q_{\text{Ф}}$, $\Delta Q_{\text{Т}}$, $\Delta Q_{\text{К}}$ — соответственно амплитуды информационного, темнового, коммутационного зарядов; $f(t)$, $f_{\text{К}}(t)$ — нормированные сигналь-

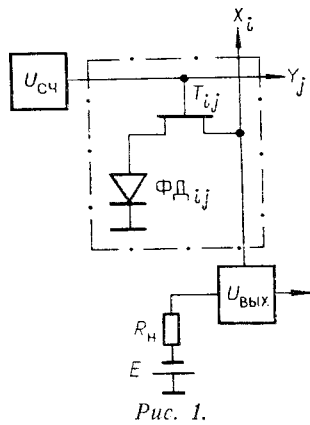


Рис. 1.

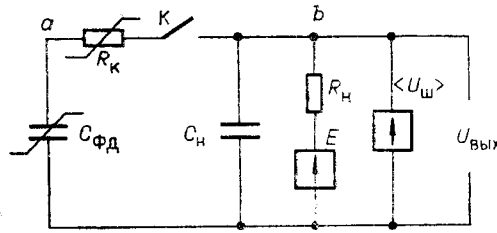


Рис. 2.

ный и коммутационный импульсы; $\Delta Q_{ост}$ — остаточный заряд, происхождение которого описано ниже; $\langle Q_{ш} \rangle$ — среднеквадратичное значение шумового заряда. Как показано в [4], ком-

мутационные помехи существенно снижают отношение сигнал/шум в фотодиодных матрицах с коммутацией на МДП-транзисторах, однако они легко могут быть отфильтрованы, например, с помощью интегратора [5] или путем вычитания коммутационных помех двух соседних ячеек [6]. При наличии в схеме обработки выходного сигнала оптимального фильтра, вычитающего из выходного сигнала коммутационный заряд, ячейка матрицы на время формирования выходного сигнала может быть представлена в виде эквивалентной схемы, показанной на рис. 2, где $C_{ФД}$ — емкость фотодиода; R_k — сопротивление канала МДП-транзистора; C_n , R_n — емкость и сопротивление нагрузки; E — генератор напряжения источника питания; $\langle U_{ш} \rangle$ — эквивалентный генератор напряжения шума, а уравнение, описывающее изменение заряда на выходе ячейки, может быть записано в виде

$$\Delta Q_b(t) = (\Delta Q_\Phi + \Delta Q_T) f(t) + \Delta Q_{ост} + \langle Q_{ш} \rangle. \quad (3)$$

Замена в эквивалентной схеме ячейки нелинейных емкости фотодиода $C_{ФД}$ и сопротивления канала МДП-транзистора R_k линейными емкостью C_λ и сопротивлением R_λ возможна при выполнении следующих условий:

- 1) переход p^+n фотодиода является резким;
- 2) оптический сигнал, обрабатываемый ячейкой, мал, так что выполняется неравенство

$$P_0 \ll C_{ФД} E / s_{i0} t_n; \quad (4)$$

- 3) амплитуда напряжения импульса считывания $U_{сч} > E + U_0$, где U_0 — пороговое напряжение МДП-транзистора.

В случае выполнения перечисленных условий

$$C_\lambda = A [\epsilon \epsilon_0 q N_n / 2 (\varphi_k + E)]^{1/2}, \quad (5)$$

$$R_\lambda = [\beta_T (U_{сч} - U_0)]^{-1}, \quad (6)$$

где q — заряд электрона; ϵ , ϵ_0 — диэлектрические проницаемости соответственно кремния и вакуума; N_n — концентрация примеси в подложке; φ_k — контактная разность потенциалов; A — площадь фотодиода; β_T — крутизна МДП-транзистора.

Расчет переходного процесса в эквивалентной схеме методом теории линейных электрических цепей с учетом принятых ограничений дает

$$f(t) = (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) / C_\lambda R_\lambda (\beta - \alpha). \quad (7)$$

Здесь

$$\alpha, \beta = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{C_d R_K} + \frac{1}{C_H R_H} + \frac{1}{C_H R_K} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{C_d R_K} + \frac{1}{C_H R_H} + \frac{1}{C_H R_K} \right)^2 - \frac{1}{C_d R_K C_H R_H}}. \quad (8)$$

При большом числе ячеек матрицы (практически при $N > 10^2$) $C_H \gg C_d$; кроме того, как будет показано ниже, необходимо выбирать $R_H \ll R_K$. С учетом приведенных неравенств (7) можно упростить и привести к виду

$$f(t) = \frac{C_H R_H}{C_d R_K - C_H R_H} \left(e^{-\frac{t}{C_d R_K}} - e^{-\frac{t}{C_H R_H}} \right). \quad (9)$$

Как видно из (9), величина, представляющая собой, по существу, коэффициент передачи заряда фотодиода в выходную цепь, пропорциональна разности двух экспонент $\Delta \mathcal{E}_{12}(t) = \mathcal{E}_1(t) - \mathcal{E}_2(t)$ с различными коэффициентами в показателях степени. Графики функций $\mathcal{E}_1(t)$, $\mathcal{E}_2(t)$ и $\Delta \mathcal{E}_{12}(t)$ показаны на рис. 3. Кривая $\Delta \mathcal{E}_{12}(t)$ имеет максимум, который достигается в момент времени

$$\tau_0 = \left(\frac{1}{C_H R_H} - \frac{1}{C_d R_K} \right)^{-1} \ln \frac{C_d R_K}{C_H R_H}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), получим

$$f_M = \frac{\gamma^{-\frac{1}{\gamma-1}} - \gamma^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{\gamma - 1}, \quad (11)$$

где $f_M = \max[f(t)] = f(\tau_0)$, а $\gamma = C_d R_K / C_H R_H$.

Чувствительность элементарной фотоячейки. Чувствительность к оптическому сигналу одноканального устройства принято характеризовать токовой S_i или вольтовой S_u фоточувствительностью, которая определяется как крутизна амплитудной характеристики, и порогом чувствительности — минимальным значением мощности или энергии, а также освещенности или светового потока, которые вызываюут на выходе устройства сигнал, находящийся в заданном отношении с величиной помехи. Амплитудную характеристику фотоячейки для значений P_0 , соответствующих неравенству (4), получим на основании (1) и (3):

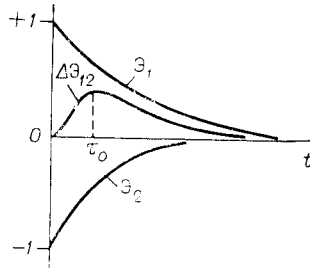


Рис. 3.

$$\Delta Q_{bM} = S_{i0} f_M t_H P_0 + (I_{ТД} f_M t_H + \Delta Q_{ост} + \langle Q_{ш} \rangle), \quad (12)$$

откуда токовая чувствительность элементарной фотоячейки матрицы

$$s_i = \frac{d}{dP_0} \left(\frac{\Delta Q_{bM}}{C_H R_H} \right) = s_{i0} \frac{f_M t_H}{C_H R_H}. \quad (13)$$

В уравнении (12) первое слагаемое представляет информационный сигнал, второе — сигнал помехи. На основании (12) отношение

сигнал/помеха η и порог чувствительности фотоячейки при $\eta=1$ равны:

$$\eta = \frac{s_{i0} f_M t_n P_0}{I_{ТД} f_M t_n + \Delta Q_{ост} + \langle Q_{ш} \rangle}; \quad (14)$$

$$P_{0пор} = \frac{1}{s_{i0}} \left(I_{ТД} + \frac{\Delta Q_{ост} + \langle Q_{ш} \rangle}{f_M t_n} \right). \quad (15)$$

Динамический диапазон. Максимальное значение мощности оптического сигнала, воспринимаемого элементарной фотоячейкой матрицы, определяется максимальным зарядом фотодиода в конце периода накопления:

$$\Delta Q_{Фд \max} = C_d E = (S_{i0} P_{0 \max} + I_{ТД}) t_n. \quad (16)$$

Минимальное значение мощности оптического сигнала, воспринимаемого фотоячейкой, ограничено порогом чувствительности и равно

$$P_{0 \min} = \frac{\eta_0}{s_{i0}} \left(I_{ТД} + \frac{\Delta Q_{ост} + \langle Q_{ш} \rangle}{f_M t_n} \right), \quad (17)$$

где η_0 — задаваемое на выходе фотоячейки отношение сигнал/помеха. На основании (16) и (17) получим динамический диапазон

$$D = \frac{P_{0 \max}}{P_{0 \min}} = \frac{f_M (C_d E - I_{ТД} t_n)}{\eta_0 (\Delta Q_{ост} + \langle Q_{ш} \rangle + I_{ТД} f_M t_n)}. \quad (18)$$

Быстродействие. На рис. 4 показана временная диаграмма управляющих напряжений, где $U_{сч1}, U_{сч2}, \dots, U_{счN}$ — импульсы напряжения, подаваемые последовательно во времени на горизонтальные шины Y_j ; $U_{вых}$ — выходное напряжение, считываемое с вертикальной шины X_i .

Как видно из рис. 4, минимальное время считывания может быть представлено в виде

$$t_{сч} = \tau_0 + \tau_1, \quad (19)$$

где τ_0 определяется из формулы (10), а τ_1 — время задержки между задним фронтом предыдущего импульса управляющего напряжения $U_{счj}$ и передним фронтом последующего $U_{счj+1}$. Необходимость формирования задержки τ_1 обусловлена следующим обстоятельством. Как показано на рис. 4, при конечном времени $t_{сч}$ не происходит полного восстановления заряда емкости нагрузки до значения $C_n E$. Это приводит к тому, что в следующем такте считывания переходный процесс заряда емкости фотодиода начинается не при нулевых начальных условиях, а при $\Delta Q_b(0) = \Delta Q_{остn} \neq 0$. Величина элементарного остаточного заряда

$$\Delta Q_{остn} = \Delta Q_{Фд} f_M e^{-\frac{\tau_1}{C_n R_n}}. \quad (20)$$

В результате многократного тактирования происходит накопление элементарных остаточных зарядов на емкости нагрузки, что к моменту окончания N -го такта считывания приводит к появлению

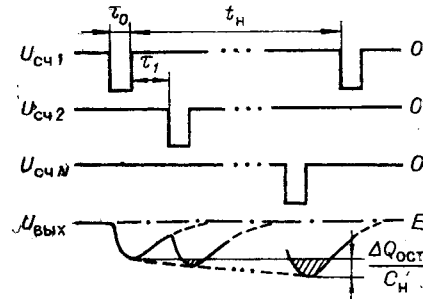


Рис. 4.

нию на выходе остаточного заряда

$$\Delta Q_{\text{ост}} = \sum_{h=1}^N \Delta Q_{\text{ост } h}. \quad (21)$$

Рассмотрим самый неблагоприятный случай, когда из всех N ячеек данного столбца матрицы считываются максимальные заряды, равные $\Delta Q_{\text{Фд max}} = C_d E$. С учетом наиболее неблагоприятного случая получим

$$\Delta Q'_{\text{ост}} = C_d E f_M N e^{-\frac{\tau_1}{C_d R_H}}. \quad (22)$$

Решая уравнение (22) относительно τ_1 , на основании (19) с учетом (10) получим минимальное время считывания

$$t_{\text{сч}} = \tau_0 \left(1 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \ln \frac{C_d E f_M N}{\gamma \Delta Q'_{\text{ост}}} \right), \quad (23)$$

где $\Delta Q'_{\text{ост}}$ — допустимая величина остаточного заряда.

Обсуждение результатов. Экспоненциальный характер зависимости амплитуды выходного сигнала от времени приводит к возникновению на выходе фотодиодной матрицы с коммутацией на МДП-транзисторах остаточного заряда, который, как видно из (15), увеличивает порог чувствительности элементарной фотоячейки и затрудняет детектирование матрицей слабых оптических сигналов, а также согласно (18) уменьшает ее динамический диапазон. Снижение влияния остаточного заряда на динамические характеристики фотоматрицы требует увеличения времени задержки импульсов управляющего напряжения, что уменьшает быстродействие. При этом, как видно из (22), величина остаточного заряда пропорциональна числу фотоячеек в столбце матрицы, поэтому влияние остаточного заряда особенно существенно в матрицах с большим числом фотоячеек. Увеличения чувствительности ячейки согласно (15) можно достичь вычитанием темнового тока фотодиода, а также увеличением времени накопления, однако, как видно из (18), последнее сопровождается уменьшением динамического диапазона.

Заключение. Полученные зависимости токовой чувствительности, порога чувствительности, динамического диапазона и быстродействия от конструктивно-технологических параметров и режима работы могут быть использованы для инженерных расчетов динамических характеристик фотодиодных матриц с коммутацией на МДП-транзисторах.

В заключение автор выражает глубокую благодарность С. И. Наймарку, Б. Н. Панкову, Р. Е. Кашлатому за полезные обсуждения вопросов, рассмотренных в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веклер Г. П. Пути создания фотополупроводниковых устройств передачи изображения на основе использования режима накопления зарядов. — «Электроника», 1967, № 9, с. 29.
2. Кондрацкий Б. А., Логунов Л. А., Шилин В. А. Устройства формирования сигналов изображения на основе приборов с зарядовой связью. — «Зарубеж. электрон. техника», 1974, № 15, 16.
3. Казимиров А. Ю., Казюлин В. И., Мочалкина О. Р. Расчет МДП-фотодиода в режиме накопления заряда. — «Изв. высш. учебн. заведений. Радиоэлектроника», 1977, т. XX, № 9, с. 126.
4. Кашлатый Р. Е. и др. Интегрально-гибридная фотоматрица для оптических ЗУ. — «Автометрия», 1977, № 2, с. 50.

5. Тришенков М. А., Петров А. С., Михеев Ю. С. Отношение сигнал/шум в фотоприемных матричных устройствах с внутренней связью, работающих в режиме накопления.— «Радиотехника и электроника», 1976, № 9, с. 1951.
6. Обзорение. МОП-формирователь сигналов изображения с подавлением паразитных помех.— «Электроника», 1976, № 16, с. 13.

*Поступила в редакцию 4 января 1978 г.;
окончательный вариант — 6 апреля 1978 г.*

УДК 621.383.181.48+681.327.68.778.38

Б. Г. МАТИЕНКО
(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ФОТОПРИЕМНОЙ МАТРИЦЫ

Данная работа посвящена рассмотрению статических и фотоэлектрических характеристик экспериментальных образцов полупроводниковых МОП-фотодиодных матриц, предназначенных для использования в многоэлементных гибридно-интегральных фотоэлектрических преобразователях оптических запоминающих и вычислительных устройств. Внешний вид исследуемых фотоматриц в корпусе с 48 выводами приведен на рис. 1. Фотоматрица выполнена на кристалле размером 5×5 мм², шаг между фотодиодами (ФД) 0,25 мм, размеры ФД $0,1 \times 0,1$ мм². Организация фотоматрицы словарная: 16 шестнадцатирядных слов (16×16). Из таких фотоматриц были созданы экспериментальные гибридно-интегральные фотоэлектрические преобразователи емкостью 1024 (32×32) и 16384 (128×128) бит [1].

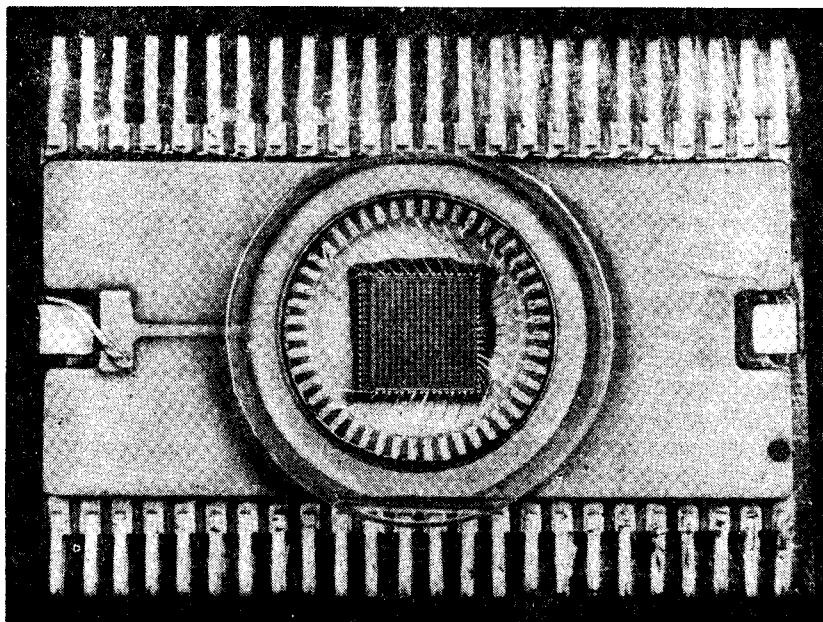


Рис. 1.