

В. Е. БУТТ, Б. Н. ПАНКОВ
(Новосибирск)

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ ФОТОПРИЕМНАЯ МАТРИЦА

К фотоприемным матрицам (ФМ), осуществляющим в оптических ЗУ функции преобразования оптических сигналов в электрические с их последующей коммутацией и усилением, предъявляются требования высокой чувствительности и быстродействия.

Обычно в качестве фотоприемника в таких ФМ используется фотодиод (ФД). При этом для достижения высокой чувствительности и помехоустойчивости фотодиод используется в режиме с накоплением заряда [1], что имеет немаловажное значение для ФМ, преобразующих оптические сигналы с малыми уровнями энергии. Необходимыми элементами для организации в ячейке ФМ указанного режима являются бесконтактные прерыватели-ключи, в качестве которых находят широкое применение малоинерционные полупроводниковые диоды с малыми значениями величин обратных токов и емкостей переходов. При использовании таких диодов режим с накоплением заряда в ячейке ФМ организуется, например, путем импульсного питания цепи из последовательно соединенных ФД и ключевого диода [1]. В этом случае через ключевой диод протекает только ток заряда емкости ФД. Причем с уменьшением тока заряда сопротивление диода из-за нелинейности его вольт-амперной характеристики возрастает, что резко уменьшает скорость заряда емкости ФД. При заданной (для обеспечения требуемого быстродействия) длительности управляющих импульсов это приводит к ухудшению соотношения сигнал/шум и снижению пороговой чувствительности ФМ [2]. Поэтому диод-диодная схема (ключевой диод-фотодиод) малоприспособна при создании быстродействующих фотоприемных устройств с высокой чувствительностью.

Для устранения указанного недостатка необходимо стабилизировать сопротивление ключа в открытом состоянии. В диодных ключах это достигается пропусканием через диоды, помимо тока нагрузки, дополнительного управляющего тока [3, 4]. Тогда при малом сопротивлении зарядной цепи емкость ФД первым же управляющим импульсом быстро зарядится до требуемого напряжения, и для реализации режима с накоплением заряда необходимо, чтобы последующие переходы ключа из одного состояния в другое (открыт, закрыт) не приводили к изменению заряда емкости ФД при отсутствии света, падающего на ФД.

Ниже рассматривается ячейка ФМ (рис. 1), в которой для выполнения указанного требования использован ключ, состоящий из двух диодов Д1 и Д2 (см. рис. 1), управление которым осуществляется одновременной подачей двух импульсов U_1 и U_2 , формируемых со-

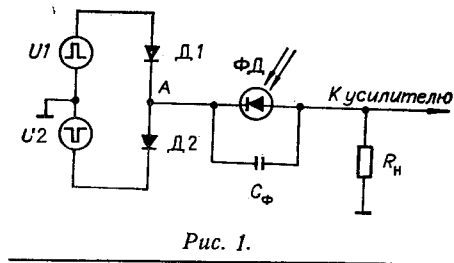


Рис. 1.

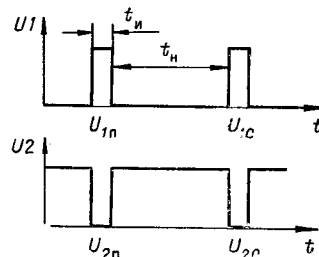


Рис. 2.

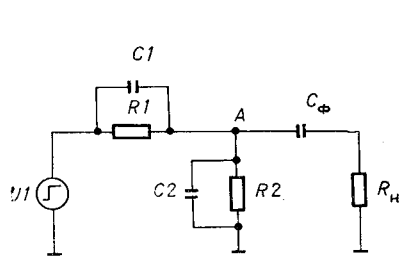


Рис. 3.

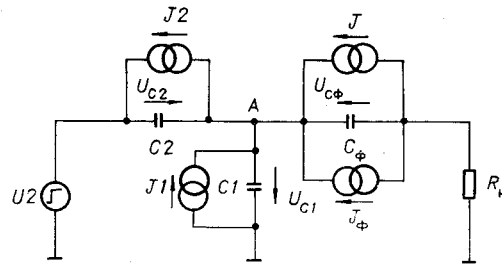


Рис. 4.

ласно временной диаграмме рис. 2. На диаграмме $U_{1п}$ и $U_{2п}$ — импульсы подготовки, а $U_{1с}$ и $U_{2с}$ — импульсы считывания. Уменьшение и стабилизация сопротивления открытого ключа обеспечивается тем, что, помимо тока заряда емкости C_{ϕ} , через цепь Д1 — Д2 протекает дополнительный ток, определяемый характеристиками диодов Д1 и Д2 и амплитудой импульсов U_1 .

Рассмотрим работу такой ячейки. Для упрощения будем считать, что при смещении в обратном направлении темновой ток фотодиода и обратные токи ключевых диодов пренебрежимо малы. Поэтому на эквивалентной схеме обратносмещенные диоды представлены только емкостями без потерь [4]. Постоянные емкости конструкции (монтажа) уменьшают эффект изменения емкостей диодов в зависимости от приложенного к переходу напряжения, и поэтому для быстродействующих диодов, обладающих малыми емкостями, можно считать постоянной [5] суммарную емкость, подключенную к ключевому диоду.

Поскольку один из уровней изменения управляющих напряжений U_1 и U_2 общий (потенциал земли), то состояние ключа (открыт, закрыт) можно рассматривать как подключение одного из напряжений U_1 и U_2 к соответствующему входу диодной цепи и соединение другого входа с общей точкой схемы (при этом не учитываются выходные сопротивления источников U_1 и U_2). Предполагаем достаточной длительности t_n импульсов, чтобы рассматривать процессы переключения как подачу ступенчатого напряжения. Выходной сигнал ячейки ФМ — ток заряда емкости C_{ϕ} , протекающий по сопротивлению R_n . Эквивалентная схема для момента действия импульса подготовки приведена на рис. 3, где C_1 , C_2 и C_{ϕ} — емкости диодов Д1, Д2 и ФД, а R_1 и R_2 — сопротивления диодов Д1 и Д2, включенных в прямом направлении. При подключении U_1 и по окончании заряда емкостей в точке А и на фотодиоде устанавливается потенциал U_A , определяемый соотношением

$$U_A = U_1 R_2 / (R_1 + R_2), \quad (1)$$

а емкости заряжаются до напряжений

$$U_{C2} = U_{C\phi} = U_1 R_2 / (R_1 + R_2), \quad U_{C1} = U_1 R_1 / (R_1 + R_2).$$

Ячейка ФМ приведена в исходное состояние, и ключ закрывается на время накопления t_n , что эквивалентно подаче напряжения U_2 на другой вход цепи ключевых диодов. Поскольку напряжения на емкостях не изменяются мгновенно, то для момента включения U_2 распределение напряжений на емкостях будет соответствовать схеме рис. 4, а постоянная времени перезаряда емкостей диодов определяется

$$\tau = R_n C_{\phi} (C_1 + C_2) / (C_1 + C_2 + C_{\phi}).$$

Генератор тока J , включенный параллельно емкости C_{ϕ} , характеризует действие света на фотодиод, а генераторы J_1 , J_2 , J_{ϕ} учитывают влияние

обратных токов диодов Д1 и Д2 и темного тока ФД. Потенциал точки А определяется из выражения

$$U_A = \frac{\sum_{k=1}^n U_k C_k}{\sum_{k=1}^n C_k} + \frac{\sum Q_n}{\sum_{k=1}^n C_k} + \frac{\sum Q_B}{\sum_{k=1}^n C_k}, \quad (2)$$

где U_k и C_k — напряжения и емкости в ветвях, подключенных к узлу А; n — число таких ветвей, сходящихся к А; Q_n — начальный заряд в узле; Q_B — вносимый в узел заряд. Последнее слагаемое в формуле (2) определяет изменение потенциала U_A током J , вызванным действием света и переключением источников импульсов. При отсутствии J и без учета обратных токов диодов напряжение на емкости C_ϕ будет определяться выражением

$$U_A = [(U_2 + U_{C2})C_2 + U_{C\phi}C_\phi - U_{C1}C_1]/(C_1 + C_2 + C_\phi),$$

которое после подстановки значений U_{C1} , U_{C2} , $U_{C\phi}$ приводится к виду

$$U_A = U_1 R_2 / (R_1 + R_2) \frac{C_2 + C_\phi + C_1 \left[\frac{U_2}{U_1} \frac{C_2 (R_1 + R_2)}{C_1 R_2} - \frac{R_1}{R_2} \right]}{C_2 + C_\phi + C_1}. \quad (3)$$

Из сравнения (1) и (3) следует, что для сохранения на C_ϕ до начала импульса считывания напряжения, до которого зарядилась C_ϕ при включении U_1 , необходимо выполнить соотношение

$$U_2 / U_1 = C_1 / C_2. \quad (4)$$

Выходной сигнал ячейки (ток заряда емкости ФД) формируется с началом переднего фронта импульса считывания. При отсутствии света на ФД и выполнении (4) этот сигнал будет также отсутствовать. При нарушении (4) на сопротивлении R_n во время подачи импульса считывания возникают паразитные выбросы той или другой полярности. Соотношение (4) указывает на необходимость и возможность подстройки параметров ячейки реальной ФМ и источников управляющих импульсов для устранения помехи на ее выходе, связанной с переключением источников U_1 и U_2 и наличием емкостей C_1 и C_2 .

При указанном согласовании действие света на фотоприемник за время накопления будет характеризоваться током в R_n , возникающим при дозаряде емкости C_ϕ от импульса считывания ΔU_{A1} , определяемого слагаемым $\sum Q_B / \sum C_k$ в выражении (2):

$$\Delta U_{A1} = \sum Q_B / \sum C_k = J t_n / (C_1 + C_2 + C_\phi) = J t_n / C_\phi \left(1 + \frac{C_1 + C_2}{C_\phi} \right).$$

Из последнего соотношения следует, что наличие емкостей у ключевых диодов приводит к уменьшению чувствительности ячейки ФМ и это уменьшение пропорционально отношению $(C_1 + C_2) / C_\phi$ суммарной емкости ключевых диодов к емкости фотодиода.

Изменение напряжения на емкости C_ϕ , вызванное действием обратных токов диодов и темного тока ФД, определяется выражением

$$\Delta U_{A2} = (J_1 + J_\phi - J_2) t_n / (C_1 + C_2 + C_\phi),$$

из которого следует, что при равенстве обратных токов ключевых диодов $J_1 = J_2$ изменение напряжения на C_ϕ определяется только темновым током ФД, а при выполнении условия

$$J_1 + J_\phi = J_2 \quad (5)$$

действие обратных токов диодов и темного тока ФД на выходной сигнал исключается. Зная величины токов J_1 , J_2 и J_ϕ , можно опреде-

лечь изменение напряжения на емкости фотодиода за время t_n и эквивалентную световую энергию, которая вызывает такое же изменение потенциала U_A . Эта энергия находится из приближенного соотношения

$$W = \Delta U_{A2} C_\phi / S = (J_1 + J_\phi - J_2) C_\phi t_n / S (C_1 + C_2 + C_\phi)$$

(S — чувствительность ФД к падающему свету) и определяет пороговую чувствительность ФМ при условии выполнения (4). При этом соотношение сигнал/шум N зависит от величины обратных токов диодов и определяется отношением

$$N = \Delta U_{A1} / \Delta U_{A2} = J / (J_1 + J_\phi - J_2).$$

Таким образом, если не выполняется условие (5), то для обеспечения высокой чувствительности ячеек ФМ необходимо использовать диоды с минимальными обратными токами.

Выше при рассмотрении процессов, происходящих в ячейке ФМ, полагали неограниченной длительность t_n управляющих импульсов подготовки и считывания, в то же время в реальной ФМ длительность этих импульсов во многом определяет быстродействие. Учитывая, что время переключения диода из открытого состояния в закрытое больше, чем при обратном переключении [5], максимальное время установления $t_{уст}$ для ячейки ФМ будет равно

$$t_{уст} \approx 3\tau = 3R_n C_\phi (C_1 + C_2) / (C_1 + C_2 + C_\phi),$$

где τ — постоянная времени цепи рис. 4. Например, при сопротивлении нагрузки $R_n = 1$ кОм и реальных параметрах диодов $C_1 = C_2 = 1$ пФ и $C_\phi = 5$ пФ время установления

$$t_{уст} = 3\tau = \frac{10^3 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 10^{-12}}{7} \approx 4 \cdot 10^{-9} \text{ с},$$

т. е., если усилитель сигналов с ячейки ФМ достаточно быстродействующий, длительность управляющих импульсов можно снизить до десятков наносекунд.

Остановимся теперь на организации многоэлементной ФМ с использованием рассмотренной выше ячейки. Наиболее удобным представляется выполнение ФМ по матричной структуре с адресными и разрядными шинами и выводом многоразрядных слов в параллельном коде [2]. Ранее уже отмечалось, что выполнением определенных соотношений можно уменьшить или свести к требуемому уровню выходные сигналы с ячеек ФМ при отсутствии засветки фотоприемников. В этом случае различие в чувствительности ячеек ФМ, относящихся к одному слову, будет вызываться лишь разбросом чувствительности отдельных фотоприемников. Если ключевые диоды всех разрядов одного слова подобраны по своим характеристикам (емкости, сопротивления), то выполнение соотношения (4) просто обеспечивается изменением амплитуды напряжений U_1 или U_2 . Поэтому наиболее удобным представляется интегральный вариант исполнения ФМ, позволяющий достичь идентичности элементов ячеек ФМ.

При выполнении ФМ на дискретных компонентах затруднителен подбор элементов с одинаковыми характеристиками. В этом случае в зависимости от степени подбора диодов с требуемыми характеристиками можно использовать несколько формирователей для одного слова, обеспечивая выполнение соотношения (4) для определенной группы ячеек ФМ выбранного слова. Кроме того, необходимо учитывать, что объединение выходов ячеек ФМ, относящихся к одному раз-

ряду на общей нагрузке R_n , эквивалентно подключению параллельно R_n емкости

$$C = \sum_{i=1}^n C_{\text{эkv}_i},$$

где n — число ячеек, объединяемых на R_n , а

$$C_{\text{эkv}_i} = C_{\Phi_i}(C_{1_i} + C_{2_i}) / (C_{1_i} + C_{2_i} + C_{\Phi_i}).$$

При реализации матрицы на дискретных компонентах, когда она выполняется в виде набора кассет, на которых расположены фотодиоды двух разрядов считываемых слов и два разрядных усилителя, целесообразно использовать для двух разрядов одного слова отдельный формирователь. Это уменьшает число шин управления на плате кассеты и облегчает выполнение требуемых согласований. Поскольку информацию о полезном сигнале получают на переднем фронте импульса считывания, то с целью улучшения помехозащищенности усилители считывания выключаются после окончания процессов, связанных с действием переднего фронта. Выходные сигналы усилителей доводятся до уровней схем ТТЛ.

С использованием фотоприемников с $S=0,2$ А/Вт разработана экспериментальная ФМ размером 26×16 элементов, имеющая следующие технические характеристики: пороговая чувствительность на длине волны $\lambda=0,63$ мкм не хуже $5 \cdot 10^{-13}$ Дж/бит, $t_n \leq 10$ мкс, длительность управляющих импульсов $t_n=100$ нс.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. P. Weckler. Charge storage light the way for solid-state image sensor.— "Electronics", 1967, vol. 40, № 9, p. 75—78.
2. В. Е. Бутт, Б. Н. Панков. Фотодиодная матрица.— «Автоматика», 1975, № 3, с. 122—126.
3. В. Мейлинг, Ф. Стари. Наносекундная импульсная техника. М., Атомиздат, 1973.
4. D. Vilkomerson, R. Mezrich, J. Assour. A word — organized photodetector array.— "IEEE J.", 1969, vol. SC-4, № 6, p. 317.
5. А. С. Сидоров. Диодные и транзисторные ключи. М., «Связь», 1975.

Поступила в редакцию 20 мая 1976 г.