

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 621.383

В. Ф. КРАСНОВ, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН, В. Г. ЦУКЕРМАН

(Новосибирск)

МАТРИЧНЫЕ ВАКУУМНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОРЕГИСТРАТОРЫ

Широкий круг задач физического эксперимента связан с необходимостью обработки больших массивов оптической информации. Эти задачи успешно решаются на основе применения ЭВМ при условии создания матричных пространственно-чувствительных фоторегистраторов, необходимых для сопряжения со входными устройствами вычислительных машин.

Еще десять лет назад класс приборов, осуществляющих преобразование изображений во временную последовательность электрических сигналов, исчерпывался различными типами телевизионных трубок. Однако телевизионные трубки вместе с сопутствующими громоздкими фокусирующими и отклоняющими системами имеют лишь один канал вывода данных, что не позволяет реализовать высокую скорость обработки оптической информации.

Работы Веклера [1] и Ваймера [2] послужили толчком к созданию полупроводниковых матричных датчиков изображения — интегральных фотоматриц. Фоторегистраторы на их основе компактны и экономичны; электрическое считывание позволяет выводить информацию параллельно по многим каналам, но применение фотоматриц ограничено сравнительно небольшой чувствительностью. Этот недостаток фотоматриц удается преодолеть в приборах нового типа — вакуумно-полупроводниковых фоторегистраторах с электрическим считыванием, работающих по общей схеме фотокатод — усилитель электронного изображения — полупроводниковая электронно-чувствительная интегральная схема. Функционально такие приборы подобны фотоматрицам, однако чувствительность вакуумно-полупроводниковых приборов выше за счет звеньев промежуточного усиления, в качестве которых могут выступать микроканальные пластины либо электронно-усиливающие полупроводниковые структуры. Дополнительными достоинствами вакуумно-полупроводниковых фоторегистраторов являются возможность спектрального согласования прибора с источником света за счет выбора соответствующего фотокатода и в некоторых типах приборов возможность управления электронным потоком.

По способу преобразования информации вакуумно-полупроводниковые фоторегистраторы удобно разделить на приборы с непосредственным считыванием (приборы мозаичного типа) и на приборы с накоплением информации (приборы матричного типа). В первом случае электронно-приемная структура является совокупностью независимых ячеек, причем каждой ячейке, которая часто содержит единственный элемент — детектор электронного потока, соответствует свой канал вывода информации. Приборы такого типа могут работать либо в режиме счета фотонов, либо в аналоговом режиме. Основные достоинства

фоторегистраторов с непосредственным считыванием — широкий динамический диапазон и высокое быстродействие, основной недостаток — небольшое (обычно не превышающее несколько десятков) количество электронно-приемных элементов.

В приборах с электрическим сканированием информация об изображении хранится и накапливается на емкостях электронно-приемных элементов до прихода очередного импульса стирания. Количество ячеек в структуре обычно существенно превышает число параллельных каналов вывода информации, что может быть достоинством или недостатком в зависимости от назначения прибора. Сама ячейка содержит, по крайней мере, два элемента — детектор потока электронов и ключевой элемент. Приборы с электрическим сканированием могут работать либо в режиме счета фотонов (при регистрации слабых изображений, когда вероятность прихода двух и более фотонов в период записи информации мала), либо в режиме накопления заряда на емкостях электронно-приемных элементов. Матричные фоторегистраторы, работающие в режиме импульсного затвора, позволяют исключить влияние мощных наводок управления, поскольку импульсы, поступающие на затвор, и считывающие импульсы разнесены во времени.

В нашей работе обобщен опыт создания вакуумно-полупроводниковых (гибридных) фоторегистраторов с быстрым считыванием информации, изготовленных на базе интегральных диод-диодных электронно-приемных матриц. Разработка такого типа приборов была вызвана необходимостью быстрого покадрового считывания в оптических запоминающих устройствах и при регистрации быстротекущих процессов.

1. Конструкция прибора. Опытные образцы гибридных фоторегистраторов создавались на основе электронно-оптических преобразователей с прямым переносом изображения [3]. Выходной узел прибора (аналог люминесцентного экрана в ЭОП) представлял собой вакуумно-плотный многотырьковый цоколь с укрепленными на нем полупроводниковой структурой и защитной маской. Схематически конструкция прибора показана на рис. 1. В качестве механизма внутреннего усиления использован эффект катодоусиления фотоэлектронного потока в приемных диодах матрицы. Роль ключевых элементов выполняли планарно-диффузионные импульсные диоды. Из известных матричных структур диод-диодные матрицы (наряду с ПЗС-структурами [4]) обеспечивают, благодаря высокой проводимости «открытого» ключевого диода, наибольшую скорость считывания информации. Простота конструкции подобных матриц гарантирует высокую надежность работы прибора. Сравнительно небольшая чувствительность диод-диодной схемы легко компенсируется большим внутренним усилением гибридного фоторегистратора, и именно в таких приборах применение диод-диодных матриц оправдано и целесообразно.

Диод-диодные матрицы изготавливались по планарно-диффузионной технологии с использованием поликристаллического кремния в качестве подложки [5]. В местах расположения диодов (рис. 2) размещались монокристаллические остовы кремния *n*-типа ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$),

которые изолировались от подложки слоем двуокиси кремния толщиной $d = 1 \text{ мкм}$. Слой монокремния, прилегающий к окисной пленке, подвергался дополнительному легированию и имел высокую проводимость. Размеры монокристаллической области одной ячейки («кармана»)

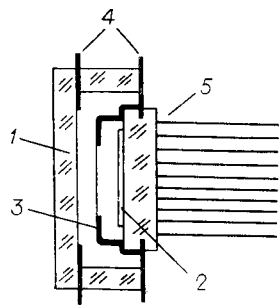


Рис. 1. Конструкция матричного фоторегистратора с прямым переносом изображения:

1 — фотокатод, 2 — электронно-приемная полупроводниковая структура, 3 — экранирующая маска, 4 — контактные уплотняющие шайбы, 5 — вакуумно-плотный многотырьковый цоколь.

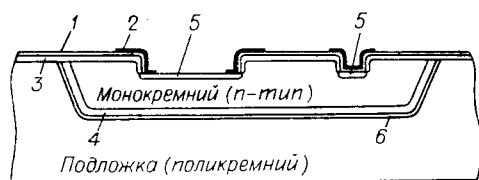


Рис. 2. Ячейка интегральной электронно-приемной диод-диодной матрицы:

1 — пиролитический SiO_2 , 2 — алюминиевые контакты к p -областям диодов, 3 — термический SiO_2 (пассивирующее покрытие), 4 — слой монокремния с n^+ -проводимостью, 5 — p -области диодов, 6 — термический SiO_2 (изоляция кармана).

$400 \times 400 \times 10 \text{ мкм}^3$, период структуры 600 мкм . Формирование p — n -переходов ключевых и приемных диодов осуществлялось одновременно, диффузантом служил бор. Размеры ключевых диодов $33 \times 26 \text{ мкм}^2$, приемных диодов $250 \times 350 \text{ мкм}^2$. Глубина диффузии бора $\approx 1 \text{ мкм}$. Ключевой диод был покрыт слоем алюминия толщиной $0,6 \text{ мкм}$, поверхность приемного диода не металлизировалась. «Нерабочая» поверхность матрицы пассивировалась слоем SiO_2 , нанесенным термическим способом (толщина 1 мкм), и SiO_2 , нанесенным пиролитически (толщина $0,5 \text{ мкм}$). Продольные шипы матрицы шириной 30 мкм изготавливались из алюминия, поперечные (ширина $\approx 70 \text{ мкм}$) — из легированного монокремния. Кроме матричных структур, с указанными параметрами на предварительном этапе работ изготавливались отдельные электронно-чувствительные диоды с различной глубиной залегания p — n -перехода ($0,7$ — $1,5 \text{ мкм}$) и ячейки с диодами различной площади (20×30 и $20 \times 100 \text{ мкм}^2$ у ключевых диодов и 190×190 и $250 \times 700 \text{ мкм}^2$ — у приемных). Для удобства экспериментирования отдельные диоды и ячейки распаивались на стандартные транзисторные корпуса, а матрицы — на многотырьковые корпуса интегральных схем. В каждом кармане матричной структуры имелась контактная площадка к n -области ячейки (общей для ключевого и приемного диодов), что позволяло независимо исследовать параметры каждого диода ячейки.

2. Особенности работы диод-диодной ячейки. Период накопления.

Три параметра характеризуют работу ячейки в период накопления: емкость обратно-смещенного приемного диода C_ϕ , коэффициент усиления электронного потока в p — n -переходе приемного диода α и сумма обратных токов ключевого и приемного диодов $I_{0к} + I_{0\phi}$, ответственных за разряд накопленной емкости C_ϕ . Измерения величины C_ϕ , проведенные на отдельных тестовых ячейках, дали значение $6 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ при обратном смещении на переходе -6 В . Результаты измерения коэффициента катодоусиления при различных энергиях электронов в пучке приведены на рис. 3 (заштрихованная область соответствует разбросу значений α , измеренных на 50 различных образцах). Видно, что при ускоряющем напряжении $U_a = 1,1 \cdot 10^4 \text{ В}$ усиление фототока в p — n -переходе достигает величины 10^3 . Если принять для квантовой эффективности фотокатода значение 10^{-1} , а порог отпирания ключевого диода считать равным 1 В , то для энергетической чувствительности прибора получим величину порядка 10^{-13} — 10^{-14} Дж/эл . Среднее значение суммы обратных токов диодов $\approx 10^{-7} \text{ А}$, что при требовании к паразитному разряду $\Delta U_n < 0,1 \text{ В}$ накладывает ограничение на длительность периода накопления $T_n: T_n < 6 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Период считывания. Если пренебречь сопротивлением ключевого диода в открытом состоянии, то эквивалентная схема ячейки представляет собой последовательно соединенные емкость приемного диода C_ϕ и нагрузочную цепь, состоящую из сопротивления в цепи шины столбца R_n и шунтирующей паразитной емкости C . В предположении, что импульс считывания имеет амплитуду U_0 и линейный участок нарастания длительностью t_f , для максимальной амплитуды светового сигнала справедливо выражение

$$U_{\max} = \frac{R_n C_\phi}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{t_f}{R_n (C_\phi + C_n)}} \right) \Delta U, \quad (1)$$

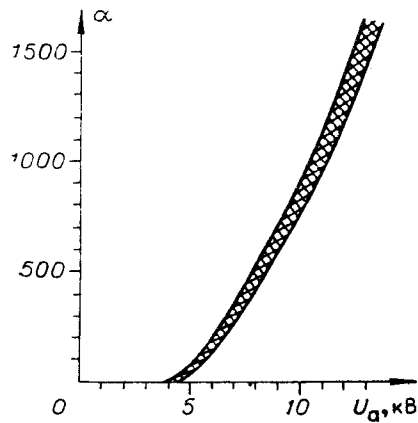
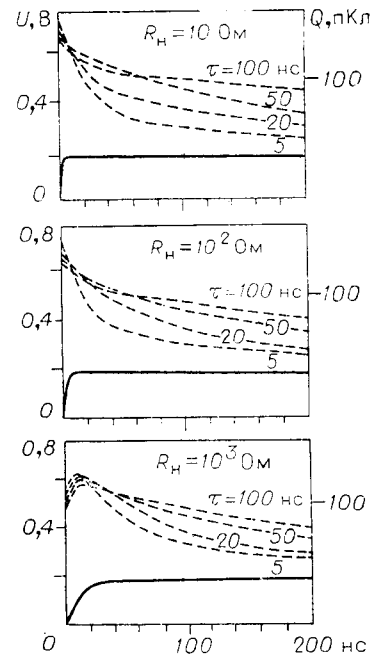


Рис. 3. Зависимость коэффициента катодоусиления от ускоряющего напряжения.

Рис. 4. Результаты расчета процессов в ячейке при считывании: пунктирные кривые — напряжение на ключевом диоде, сплошные — заряд на накопительной емкости C_{Φ} ($C_{\Phi} = 10^{-11}$ Ф).



где ΔU — амплитуда фоторазряда емкости C_{Φ} . Если t_f больше либо сравнимо с $R_n(C_{\Phi} + C_n)$ (как обычно бывает при быстром считывании), то амплитуды выходных сигналов зависят от скорости нарастания импульсов считывания, что необходимо учитывать при конструировании многоканальных генераторов опроса. Значение U_{\max} реализуется в момент $t = t_f$, после чего напряжение на нагрузочном сопротивлении спадает приблизительно экспоненциально с постоянной времени $R_n C_n$. Поскольку сигналы с ячеек данного разряда не должны перекрываться во времени, справедливо следующее ограничение на время опроса строки матрицы:

$$T_{\text{стр}} \geq t_f + 3R_n C_n. \quad (2)$$

Величина R_n не должна быть меньше внутреннего сопротивления канала считывания R_i , сопротивления шин и базовых областей ячеек и реально не может быть меньше десятков ом. Вопрос о величине паразитной емкости C_n , определяемой в основном паразитными связями в матрице, рассматривается в п. 3.

В действительности на ключевом диоде при протекании зарядного тока может падать значительная часть входного напряжения. На рис. 4 приведены результаты расчета напряжения на ключевом диоде в различные моменты времени, при различных значениях R_n и параметра диода τ (τ — время рекомбинации неосновных носителей в базе диода). Расчет проводился с использованием нестационарной ВАХ диода [6]:

$$I_0 (e^{-U(t)/\phi_T} - 1) = \int_0^t I(t') e^{-t'/\tau} \sqrt{\pi \frac{t-t'}{\tau}} d \frac{t'}{\tau}, \quad (3)$$

где I_0 — истинный обратный ток диода, ϕ_T — температурный потенциал, для кремниевых диодов приблизительно равный $2kT/q_e$. Графики на рис. 4 получены при $U_0 = 10$ В, однако можно показать, что функции $U(t)$ слабо зависят от U_0 и остаются практически неизменными при изменении U_0 в несколько раз. Из анализа кривых рис. 4 следует, что величина ΔU в (1) должна быть заменена величиной $\Delta U - \Delta U_1 + \Delta U_2$.

Значение разности ($\Delta U_1 - \Delta U_2$) равно приблизительно 0,45 и 0,22 В для ключей с τ , равным 5 и 100 мс соответственно. Рассмотренные эффекты (как и темновой разряд накопительной емкости) сказываются на амплитуде световых сигналов, но не дают вклада в темновой сигнал, так как их амплитуды обычно недостаточны для отпираания ключевого диода. Наиболее важным эффектом, определяющим амплитуду темнового сигнала при малых длительностях считывающего импульса T_n ($T_n < \tau$), является эффект заряда переключения ключевого диода, в результате которого после окончания считывающего импульса в ячейке некоторое время течет обратный ток, разряжающий емкость C_ϕ . Для относительной величины заряда переключения S в [7] получено выражение

$$S = \operatorname{erfc} \sqrt{T_n / \tau}. \quad (4)$$

Таким образом, если в предшествующий период накопления световой разряд составил величину ΔU , то при следующем считывании в нагрузочной цепи может появиться паразитный сигнал, соответствующий разряду емкости C_ϕ на величину

$$\Delta U_n \approx \Delta U \operatorname{erfc} \sqrt{T_n / \tau}. \quad (5)$$

Величина S может быть эффективно уменьшена увеличением длительности импульса опроса значения $T_n \approx (3 \div 4)\tau$. Экспериментальные исследования амплитуд темновых сигналов в зависимости от длительности импульсов опроса, проведенные по методике сдвоенных импульсов (см. [5]), позволяют оценить параметр τ ($\tau \approx 50 \div 100$ нс) и определить необходимую величину T_n ($T_n \geq 200 - 300$ нс). Если выполнено последнее неравенство, амплитуда темнового паразитного сигнала определяется исключительно коммутационной помехой и может быть рассчитана по формуле, аналогичной (1):

$$U_{\text{ком}} \approx \frac{R_n C_n}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{t_f}{R_n (C_n + C_\phi)}} \right) U_0, \quad (6)$$

где C_n — емкость ключевого диода. Как видно из (1) и (6), отношение светового сигнала к темновому определяется в основном параметром C_ϕ / C_n .

3. Паразитные связи в матрице. Допустимые размеры и быстродействие матричных структур во многом определяются качеством взаимной изоляции ячеек. В диод-диодных матрицах ячейки оказываются связанными через проходные емкости ключевых диодов, емкости перекрестий шин, базовые области диодов (изоляция базовых областей может осуществляться либо слоем окисла, отделяющим карман от подложки, либо самой подложкой, если она изготовлена из изолирующего материала). Схема матрицы с элементами, ответственными за паразитные связи, показана на рис. 5, а. Очевидно, паразитные связи зависят от вида изображения, проецируемого на вход фоторегистратора. Рассмотрим два наиболее неблагоприятных режима засветки матрицы: режим I — освещены все ячейки, кроме (i, j) -й (очевидно, в этом случае паразитный темновой сигнал с ячейки (i, j) максимален); режим II — освещена только (i, j) -я ячейка (при этом максимальной окажется паразитная емкость, шунтирующая R_n при опросе (i, j) -й ячейки). В рассматриваемых режимах все числовые шины (кроме i -й) и все разрядные шины (кроме j -й) эквивалентны. Соответствующие точки на схеме рис. 5, а (q_k ($k \neq i$) и A_l ($l \neq j$)) остаются эквипотенциальными на всем протяжении периода считывания информации. В качестве источ-

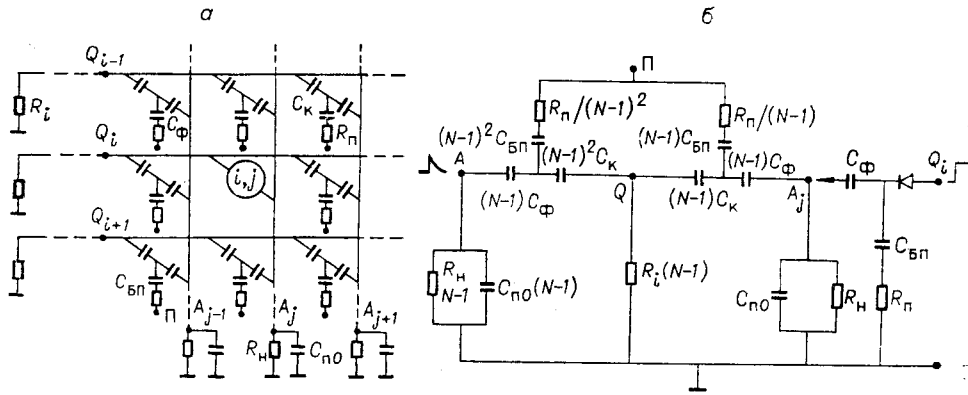


Рис. 5. Схема для расчета паразитных эффектов в матрице:
 а — элементы, ответственные за паразитные связи, б — эквивалентная схема матрицы.

ника паразитного сигнала выступает общий световой сигнал в цепи общей разрядной шины. Схема для расчета амплитуды паразитного темнового сигнала и эквивалентной паразитной емкости в цепи j -го столбца, полученная из схемы рис. 5, а объединением эквипотенциальных точек, показана на рис. 5, б. Произведем расчет паразитных эффектов для матрицы на проводящей подложке, т. е. будем считать, что выполнено неравенство $R_n C_{\text{БП}} \ll T_n^*$. В этом случае в период накопления происходит эффективное перераспределение зарядов между емкостями C_ϕ и $C_{\text{БП}}$, так что величина накопительной емкости увеличивается до значения $C_\phi + C_{\text{БП}}$ и чувствительность матрицы снижается. Кроме того, уменьшается мощность выходных сигналов, так как только часть зарядного тока проходит через сопротивление нагрузки. Тем не менее такие матрицы вполне работоспособны даже при больших емкостях $C_{\text{БП}}$. Удельные емкости структур с пленкой SiO_2 и $p-n$ -структур имеют один порядок величины [8], и, учитывая, что площадь кармана заведомо превышает площадь приемного диода, можно ожидать выполнения неравенства $C_{\text{БП}} > C_\phi$. Паразитная емкость, как видно из рис. 6, приближенно определяется соотношением

$$C_n \approx (N-1) C_\phi. \quad (7)$$

Амплитуды паразитных сигналов резко различны для случаев незаземленной и заземленной подложек. Отсутствие заземления приводит к недопустимо большим темновым сигналам. Заземленные подложки позволяют существенно уменьшать паразитные эффекты (проводящая подложка выполняет при этом функцию охранного кольца). Оценка амплитуды паразитных сигналов U_n по схеме рис. 6 приводит к величине

$$U_n \approx (C_n R_i / C_{\text{БП}} R_n) U_{\text{макс}} \quad (8)$$

которая значительно меньше «собственного» темнового сигнала ячейки.

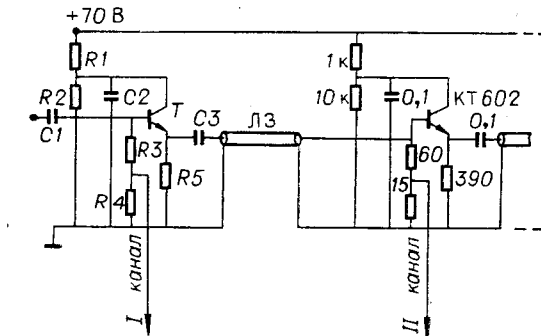


Рис. 6. Схема считывающего устройства (разветвителя).
 (Показаны только два первых каскада).

* $C_{\text{БП}}$ — емкость «карман — подложка» (см. рис. 2, 5, а).

4. Особенности режима считывания информации перекрывающимися импульсами. Как следует из (4), для подавления эффекта заряда переключения длительности считывающих импульсов T_n должны быть не меньше сотен наносекунд (при $\tau \sim 100$ нс). Для того чтобы не удлинять существенно весь период считывания, целесообразно опрашивать матрицу перекрывающимися импульсами, причем временной сдвиг между импульсами в смежных каналах, соответствующий времени опроса строки, должен определяться выражением (2).

Процессы в ячейке при считывании можно условно разделить на две фазы. Первая фаза длительностью несколько наносекунд — фаза заряда накопительной емкости C_Φ до разности потенциалов, близкой к U_0 . В этот период в цепи ячейки течет большой зарядный ток, регистрируемый в нагрузочной цепи. Все последующее время считывания (вторая фаза) ток в цепи мал, заряд неосновных носителей, накопленный в базе ключевого диода, частично исчезает за счет рекомбинации, частично возвращается в эмиттер, создавая обратный разрядный ток $I^{(-)}$. Однако этот обратный ток полностью компенсируется прямым током «питания» ячейки. Установившееся динамическое равновесие нарушается либо в момент окончания опросного импульса, когда полностью исчезает прямой ток, либо при появлении «постороннего» положительного сигнала $U_n(t)$ на нагрузочном сопротивлении. При этом суммарный обратный ток $I_{обр}$, протекающий в ячейке,

$$I_{обр} = I^{(-)}(1 - e^{-(U_n(t)/\Phi_T)}). \quad (9)$$

Выражение (9) напоминает обратную ветвь ВАХ диода, однако необходимо помнить, что $I^{(-)}$ не есть стационарный обратный ток диода и обычно на много порядков величины превосходит последний. Поскольку в режиме перекрывающихся импульсов длительность считывающего импульса существенно превосходит время опроса строки, за время T_n на сопротивлении R_n может появиться $T_n/T_{стр}$ световых сигналов (связанных с опросом следующих строк матрицы), играющих роль «постороннего» напряжения $U_n(t)$. Чтобы уменьшить уровень паразитного разряда емкости C_Φ , необходимо, как следует из (9), максимально уменьшить амплитуды и длительности выходных сигналов, чего можно достигнуть, уменьшив нагрузочное сопротивление R_n . Амплитуды световых сигналов при этом упадут в соответствии с выражением (1), а темновых — в соответствии с (6), так что отношение амплитуд световых сигналов к темновым остается на прежнем уровне. В работе [9] экспериментально показано, что время опроса строки в рассматриваемом режиме может составлять десятки наносекунд при значениях R_n порядка десятков ом и амплитудах световых сигналов на уровне сотен милливольт.

Для испытания фоторегистраторов в режиме перекрывающихся импульсов был изготовлен 8-канальный разветвитель импульсов промышленного генератора Г5-19, построенный по принципу задержки импульсов в отрезках коаксиального кабеля. Схема двух первых каскадов разветвителя, построенного на линиях задержки (ЛЗ), показана на рис. 6. Основные параметры разветвителя: число каналов 8, задержка импульсов в смежных каналах 30 нс, длительность импульсов 300 нс, время нарастания 10 нс (по уровням 0,1; 0,9), амплитуда 4 В, выходное сопротивление канала 15 Ом.

Оциллограммы, приведенные на рис. 7, иллюстрируют достоинство режима перекрывающихся импульсов (рис. 7, а) [9] по сравнению с режимом «коротких» импульсов (рис. 7, б). Как видно из второй ос-

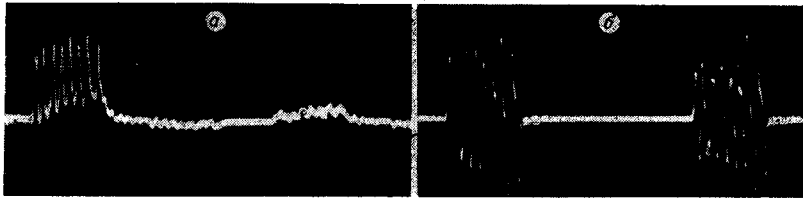


Рис. 7. Осциллограммы световых и темновых сигналов в цепи одной из разрядных шин матрицы размером 8×8 элементов:
a — режим перекрывающихся импульсов, *б* — стандартный режим. (Время опроса строки в обоих режимах 35 нс).

циллограммы, темновые импульсы (вторая серия) практически неотличимы от световых (первая серия).

5. Соотношение между площадью и предельным быстродействием диод-диодной структуры. Оценим предельное быстродействие матриц на проводящей подложке. В режиме перекрывающихся импульсов полное время считывания

$$T_{\text{сч}} = (N-1)T_{\text{стр}} + T_{\text{н}}. \quad (10)$$

Пренебрегая величиной t_f в (2), считая $N \gg 1$ и принимая $T_{\text{н}}$, равным 3τ , получим

$$T_{\text{сч}} = 3R_{\text{н}}C_{\text{п}}N + 3\tau. \quad (11)$$

Параметр ключевого диода τ может быть уменьшен до десятков наносекунд (и менее) различными технологическими приемами (например, легированием базовых областей ключевых диодов Au [10]) так, что при хорошей технологии в (11) доминирует первый член. Подставив в (11) значение $C_{\text{п}}$ из (7), находим

$$T_{\text{сч}} \approx 3N^2C_{\text{ф}}R_{\text{н}} = 3\gamma sC_{\text{оф}}R_{\text{н}}, \quad (12)$$

где $C_{\text{оф}}$ — удельная емкость приемных диодов, γ — отношение электронно-чувствительной структуры к полной площади s . Таким образом, быстродействие матрицы не зависит от количества элементов в структуре и определяется лишь полной площадью матрицы. Подставляя в (11) реальные значения параметров ($C_{\text{оф}} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$, $s = 1 \text{ см}^2$, $R_{\text{н}} = 10 \text{ Ом}$, $\gamma = 30\%$), получим для времени считывания значение $2,5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$.

Для матриц на изолирующих подложках паразитные емкости существенно меньше и быстродействие реально ограничивается лишь временем нарастания импульсов опроса (t) и индуктивными эффектами при считывании.

Укажем, что сокращение наряду со временем считывания и периода накопления информации увеличивает верхнюю границу динамического диапазона приборов, так как критическое значение фоторазряда накопительной емкости, связанное с напряжением пробоя $p-n$ -перехода или с пределом линейности предварительных усилителей и соответствующее определенной оптической энергии, достигается за меньшее время, т. е. при большей мощности оптического сигнала. Если к тому же порог чувствительности фоторегистратора определяется темновым током приемных элементов, то сокращение времени накопления $T_{\text{н}}$ не меняет нижней границы динамического диапазона, поскольку одновременно с уменьшением оптической энергии, поглощенной за время накопления, уменьшается и темновой разряд емкостей $C_{\text{ф}}$. Таким образом, диапазон регистрации прибора расширяется.

Основное ограничение на величину темнового тока имеет вид

$$I_T < (C_\Phi U_0) / T_\kappa \quad (13)$$

(условие (13) означает просто, что за время накопления не должно происходить полного разряда накопительной емкости темновым током), откуда следует, что увеличение кадровой частоты позволяет снизить требования к обратным токам диодов и при данном уровне технологических параметров считать годными полупроводниковые структуры большей площади.

6. О возможности увеличения чувствительности диод-диодных матриц. Порог регистрации диод-диодной схемы ограничен уровнем разряда накопительной емкости, при котором происходит отпирание ключевого диода ($U_{\text{пор}} \approx 0,6-0,8$ В), откуда следует, что чувствительность рассматриваемых матриц в десятки раз хуже чувствительности матриц с управляемыми ключами (см., например, [11]). Полагая, что максимальный уровень разряда ($U_{\text{пр}}$) определяется пробивным напряжением диодов ($U_{\text{пр}} \approx 10 \div 20$ В), получим для динамического диапазона D ($D = U_{\text{пр}} / U_{\text{пор}}$) интервал значений 12—30. Если чувствительность гибридного фоторегистратора все же достаточно высока за счет большого коэффициента катодоусиления, то динамический диапазон не зависит от внутреннего усиления прибора и может быть расширен лишь уменьшением величины $U_{\text{пор}}$. Известны методы увеличения чувствительности диодных фотоматриц, основанные на смещении «рабочей» точки ключевого диода (см. [12]), однако они предполагают введение дополнительных элементов в ячейку матрицы.

В работе [7] указано на возможность снижения порога регистрации диод-диодных схем за счет использования импульсов считывания специальной формы

$$U_{\text{вх}}(t) = U_0 + \Phi_T \ln \left(\frac{C_\Phi \Delta U_1}{I_0 \tau} \frac{e^{-t/\tau}}{\sqrt{\pi t/\tau}} + 1 \right) \quad (14)$$

(ΔU_1 — некоторая разность потенциалов, сравнимая с параметром Φ_T). При этом если уровень фоторазряда емкости $C_\Phi \Delta U$, то в цепи ячейки при считывании течет δ -образный зарядный ток $I(t) = C_\Phi \Delta U_3 \delta(t)$, где ΔU_3 — напряжение дозаряда емкости, связанное с ΔU и ΔU_1 соотношением

$$\Delta U_3 = \Delta U - \Phi_T \ln(\Delta U_3 / \Delta U_1). \quad (15)$$

Если выбрать $\Delta U_1 = \Phi_T$, то напряжение дозаряда близко к напряжению фоторазряда в широком диапазоне изменения ΔU : $0,7\Phi_T < \Delta U < \infty$. Относительная погрешность считывания $\delta = (\Delta U - \Delta U_3) / \Delta U$ максимальна в точке $\Delta U \approx 3,72\Phi_T$ и равна приблизительно 27%. Характеристика считывания $\Delta U_3(\Delta U)$ приведена на рис. 8 (кривая 2). Кривая 1 на рисунке — идеальная характеристика считывания:

$\Delta U_3 = \Delta U$. Таким образом, в режиме считывания информации импульсами вида (14) порог регистрации соответствует фоторазряду $U_{\text{пор}} = 0,7\Phi_T$, что для кремниевых диодов составляет величину ~ 35 мВ. При практической реализации предложенного режима возникают сложности, связанные с неидентичностью

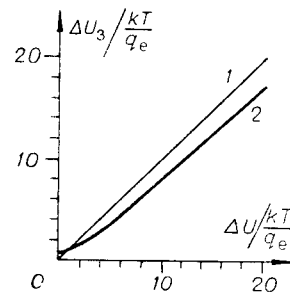


Рис. 8. Характеристики считывания:

1 — идеальная характеристика, 2 — расчетная кривая при считывании информации импульсами вида (14).

параметров ключевых диодов в ячейках, опрашиваемых одновременно (т. е. в ячейках одной строки). Поскольку форма считывающего импульса включает параметр диодов I_0 , то для достижения порога регистрации на уровне 10—50 мВ необходимо, чтобы «истинные» обратные токи ключей в строке отличались не более чем в несколько раз.

Заключение. Изготовленные вакуумно-полупроводниковые фоторегистраторы содержали матрицы 16×16 элементов, обладали чувствительностью порядка 10^{-14} Дж/эл., длительность периода считывания информации составляла 700 нс (в режиме перекрывающихся импульсов). Наиболее естественные области применения фоторегистраторов — работа в ГЗУ, а также в системах регистрации быстропротекающих процессов в ситуациях, когда не требуется высокого пространственного разрешения. Приборы с линейной геометрией электронно-приемной структуры с успехом могут использоваться в импульсной спектроскопии.

Временные характеристики фоторегистраторов могут быть несколько улучшены изменением технологии изготовления ключевых диодов для достижения меньших значений τ . Дальнейшее сокращение времени считывания предполагает создание многоканальных опросных генераторов импульсов с наносекундными фронтами. Принципиальное ограничение на быстроедействие связано с индуктивностями контуров считывания, которые для матриц размером 1 см^2 имеют порядок нескольких наногенри: при скорости нарастания токовых импульсов в шинах порядка $0,1 \text{ А/нс}$ ЭДС самоиндукции в контурах составляют десятые доли вольта, т. е. сравнимы с уровнем выходных сигналов. Электронно-приемные матрицы размерностью более 16×16 ячеек могут быть изготовлены (как и большие фотоматрицы [13]) по интегрально-гибридной технологии, причем желательно, чтобы число разрядных шин матрицы соответствовало числу входных каналов ЭВМ. Минимальные размеры приемных элементов и расстояния между ними определяются пространственным разрешением электронно-оптической системы регистратора и для приборов с прямым переносом изображения находятся на уровне 100 мкм. Увеличения чувствительности и расширения динамического диапазона можно достигнуть (как показано в п. 3), формируя считывающие импульсы специального вида. Кардинальное увеличение чувствительности и достижение уровня одноэлектронной регистрации возможно при введении в приборы микроканальных пластин (МКП) либо вторично-эмиссионных пластин с отрицательным электронным средством [14].

На сегодняшний день отдельными исследовательскими группами изготовлено несколько экспериментальных образцов вакуумно-полупроводниковых фоторегистраторов (в основном это приборы для спектральных исследований, см. обзорную работу [15]), причем из-за отсутствия специализированных предприятий по производству гибридных приборов конструкции и параметры созданных образцов отражают, скорее, конкретные технические возможности каждой группы изготовителей, чем принципиальные возможности фоторегистраторов нового типа. Создание высококачественных приборов возможно только при условии координации усилий научных подразделений и предприятий промышленности.

Для успешной эксплуатации фоторегистраторов необходимо создание модулей обрамления. Часть из них (например, генераторы считывающих импульсов) является специфичной для каждого конкретного типа приборов, другая и большая часть модулей (таких как многоканальные АЦП, устройства буферной памяти, системы предварительной обработки данных и т. п.) — универсальной и может быть сформирована из набора средств САМАС [16].

Высокая чувствительность в сочетании с быстроедействием позволяет в перспективе рассматривать матричные вакуумно-полупроводниковые фоторегистраторы как звено направления автоматизации научных исследований на основе применения ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Weckler G. P. Operation of p-n junction photodetectors in a photon flux integrating mode.— "IEEE J. Solid State Circuits", 1967, vol. SC-2, N 3, p. 65—73.
2. Weimer P. K., Sadasiv G., Meger J. E., Jr., Meray-Horvath L., Pike W. S. A self-scanned solid-state image sensor.— "Proc. IEEE", 1967, vol. 55, N 9, p. 1591—1602.
3. Берковский А. Г., Зайдель И. Н., Краснов В. Ф., Нестерихин Ю. Е., Туровский Л. А., Филимонов Г. А., Цукерман В. Г., Шувалов Л. Ф. Быстродействующие гибридные фоторегистрирующие приборы.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977.
4. Альтман Л. Приборы с зарядовой связью в ЗУ и аналоговых процессорах.— «Электроника», 1974, т. 47, № 16, с. 25—38.
5. Бударных В. И., Домахин И. Г., Краснов В. Ф., Ли И. И., Ситникова И. И., Туровский Л. А., Цукерман В. Г. Электронно-усиливающая матрица для гибридного фотоэлектрического преобразователя.— «Автометрия», 1976, № 5, с. 21—25.
6. Бударных В. И., Краснов В. Ф., Туровский Л. А. Анализ характеристик коммутирующего диода ячейки фотоприемной матрицы.— «Автометрия», 1976, № 4, с. 109.
7. Краснов В. Ф., Петренко И. П. Оптимальный режим работы полупроводникового диода в матричных диод-диодных преобразователях оптической информации.— «Автометрия», 1979, № 3, с. 13—17.
8. Технология тонких пленок (справочник). Т. I. Под ред. Л. Майссела, Р. Гленга. Пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. М., «Сов. радио», 1977.
9. Виноградов В. М., Зайдель И. Н., Краснов В. Ф., Куклев С. В., Цукерман В. Г., Шувалов Л. Ф. Матричный вакуумно-полупроводниковый фоторегистратор для ввода оптической информации в ЭВМ.— «Автометрия», 1978, № 3, с. 41—46.
10. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. под ред. А. Ф. Трутко. М., «Энергия», 1973.
11. Кашлатый Р. Е., Кожевников А. М., Кругликов С. В., Телицин М. А., Фигуровский Е. А., Хлебникова Г. И., Юдина Л. П. Интегрально-гибридная фотоматрица для оптических ЗУ.— «Автометрия», 1977, № 2, с. 50.
12. Бутт В. Е., Панков Б. Н. Быстродействующая фотоприемная матрица.— «Автометрия», 1976, № 6, с. 88—92.
13. Матиенко Б. Г. Основные характеристики и структуры больших интегральных фотоматриц голограммных запоминающих устройств.— «Автометрия», 1977, № 2, с. 39.
14. Martinelli R. U., Schultz M. L., Gossenberger H. F. Reflection and transmission secondary emission from GaAs.— "Appl. Phys.", 1972, vol. 43, N 11, p. 4803—4804.
15. Choisser J. P. Detecting photoelectron images with semiconductor arrays for multi-channel photon counting.— "Opt. Eng.", 1977, vol. 16, N 3, p. 262—266.
16. Золотухин Ю. Н. Разработка аппаратуры САМАС в Институте автоматизации и электрометрии СО АН СССР.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977.

Поступила в редакцию 21 ноября 1978 г.

УДК 621.382

В. Ф. КРАСНОВ, И. П. ПЕТРЕНКО

(Новосибирск)

ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КЛЮЧЕВОГО ДИОДА В МАТРИЧНЫХ ДИОД-ДИОДНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В последние годы были созданы различные варианты вакуумно-полупроводниковых фоторегистраторов, содержащих на выходе интегральные электронно-приемные матрицы, работающие в режиме накопления заряда [1, 2]. Чувствительность приборов такого типа, благодаря эффекту катодоусиления, в сотни раз превышает чувствительность аналогичных фотоматриц, что позволяет существенно сократить период накопления информации. Чтобы обеспечить высокое быстродействие при-