

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

1

МОСКВА · 1973

УДК 539.293+621.382.81

ДАТЧИК ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ПЛЕНОЧНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ $n\text{CdS-pCdTe-nCdS}$

Э. И. АДІРОВИЧ, В. Н. СОКОЛОВ, Ю. М. ЮАБОВ,
Г. Р. ЯГУДАЕВ

В работах [1] сообщалось о создании единичных и матричных тонкопленочных фотоприемников на основе гетеропереходов $n\text{CdS-pCdTe}$. В настоящей статье описан гетероструктурный пленочный датчик изображения, состоящий из фотодиодно-диодной матрицы $\text{SnO}_2\text{-nCdS-pCdTe-nCdS-Me}$ и развертывающего устройства, выполненного на интегральных схемах.

Исследования электрических и фотоэлектрических явлений на гетеропереходе $n\text{CdS-pCdTe}$ позволили построить его зонную диаграмму (рис. 1) и доказать, что прохождение тока обусловлено подбарьерными туннельно-рекомбинационными процессами [1]. Поскольку эти процессы нечувствительны к поверхностным уровням, а надбарьерные электронный и дырочный токи подавлены из-за разрывов обеих зон*, пленочные поликристаллические гетероструктуры CdS-CdTe не уступают по своим характеристикам гетероструктурам CdS-CdTe на монокристаллах [2].

Из результатов проведенных нами исследований следовало, что гетеропереходы на поликристаллических пленках, изготавливаемых с помощью вакуумного испарения сульфида и теллурида кадмия, могут служить эффективными фотоприемниками. Такие фотоприемники в виде дискретных фотодиодов, а также в виде фотодиодной матрицы описаны в работах [1]. Матрицирование сплошной пленочной гетероструктуры достигается с помощью двух систем взаимно перпендикулярных полосковых токосъемных шин. Высокое удельное сопротивление пленок исключает эффекты растекания. Однако для передачи изображения необходима еще развязка при коммутации элементов матрицы. Поэтому фотодиодные решетки, где такая развязка отсутствует, могут служить только в качестве координатных матриц [3, 4]. Для получения датчика изображения необходимо, чтобы в каждом элементе последовательно с фоточувствительной ячейкой был расположен электрический ключ, осуществляющий развязку выходных сигналов, как это делается в сканисторах [5, 6] или в фоторезистивно-диодной матрице [7]. В круге идей, развитых в наших работах [1], естественно искать решение путем создания многослойной структуры с двумя гетеропереходами.

Для перекодировки двумерного оптического изображения в систему электрических сигналов нами изготовлена фотодиодно-диодная матрица $\text{SnO}_2\text{-nCdS-pCdTe-nCdS-Me}$, состоящая из трех сплошных полупроводниковых пленок и двух взаимно перпендикулярных систем токосъемных электродов (рис. 2). Оптический ввод изображения производится через подложку и прозрачные электроды SnO_2 . Отметим, что процесс изготовления опи-

* Хотя электронное сродство CdS и CdTe одинаково (4,5 эВ), однако, вследствие образования на гетероконтакте двойного электрического слоя ($\xi \approx 0,5 \div 0,7$ эВ) разрыв претерпевает не только валентная зона, но и зона проводимости.

сываемого датчика не требует сложных операций масочной техники (в том числе прецизионного совмещения масок), необходимых при изготовлении матриц из дискретных фоточувствительных элементов и соответствующей топологии шин.

Элементы матрицы образуются в местах перекрещивания верхних и нижних шин. Каждый из них состоит из двух гетеродиодов $n\text{CdS}-p\text{CdTe}$,

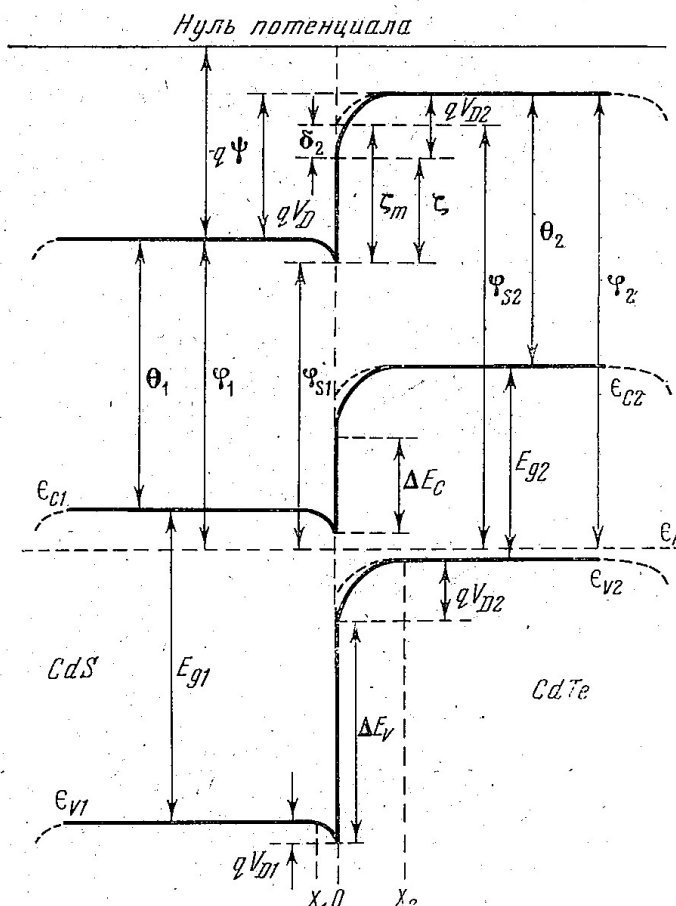


Рис. 1. Зонная схема гетероперехода $n\text{CdS}-p\text{CdTe}$. ψ — электрический потенциал; θ — электронное сродство; ϕ — работа выхода; E_g — ширина запрещенной зоны; ΔE_c и ΔE_v — разрывы зоны проводимости и валентной зоны; V_D — диффузионный потенциал; ξ — изменение энергии, обусловленное электрическим диполем, образованным поверхностными состояниями

один из которых, ближайший к подложке, работает в режиме аналогового преобразователя, а второй служит электрическим ключом, осуществляющим развязку элементов при их коммутации (рис. 3). Поскольку длина диффузии электронов в пленке теллурида кадмия $L_D \approx 10^{-5}$ см [8], а толщина пленки $d \geq 10^{-4}$ см, транзисторные эффекты в элементах матрицы исключены. В противном случае связь по фототоку будет отпирать ключ, что приведет к ухудшению развязки между элементами матрицы.

На элементах матрицы, а также на дискретных трехслойных гетероструктурах $n\text{CdS}-p\text{CdTe}-n\text{CdS}$ с площадью 1 мм^2 были сняты вольт-амперные характеристики (ВАХ) в темноте и при освещении. Темновые характеристики представляют собой ВАХ гетероперехода $n\text{CdS}-p\text{CdTe}$, смещенного в обратном направлении, ток в котором обусловлен зинеровским туннелированием электронов из валентной зоны CdTe в зону проводимости

CdS. Фототок I_f линейно зависит от освещенности B . При нормировке к плотностям тока ВАХ, снятые на элементах матрицы и на дискретных элементах с площадью 1 мм^2 , совпадают. Спектры фоточувствительности элемента фотодиодно-диодной матрицы и гетероперехода $n\text{CdS}-p\text{CdTe}$ одинаковы ($0,5 \div 0,85 \text{ мкм}$), что свидетельствует об идентичности протекающих в них процессов. При освещении элементов матрицы пучком света гелий-неонового лазера было обнаружено, что на элементах, соседних с границей светового пятна, фототок спадает более чем на порядок. Следовательно, между элементами матрицы практически не возникает паразитных связей.

Из этих экспериментальных результатов следует, что: 1) элементы матрицы действительно состоят из двух гетеродиодов, не связанных эффектом передачи тока через базовую область; 2) слой теллурида кадмия в структуре $n\text{CdS}-p\text{CdTe}-n\text{CdS}$ выполняет не только роль пассивного электрического соединения двух включенных навстречу гетеродиодов, но и служит оптическим фильтром, почти полностью защищающим блокирующий диод от действия света; 3) сопротивление растекания в пленках и блокирующее действие гетеродиодных ключей обеспечивает развязку элементов матрицы и пропорциональность между коммутируемым током и локальной освещенностью.

Проецируемое на матрицу изображение создает на ней потенциальный рельеф. Для преобразования потенциального рельефа в систему последовательных электрических сигналов необходимо считывающее устройство, осуществляющее последовательный опрос элементов.

В вакуумных телевизионных трубках видеосигнал создается путем коммутации элементов изображения на мишени электронным лучом. В твердотельном датчике роль пучка электронов, ведущего опрос, выполняет система полупроводниковых ключевых устройств [7]. Эта система подключает в определенной последовательности элементы фотоприемной матри-

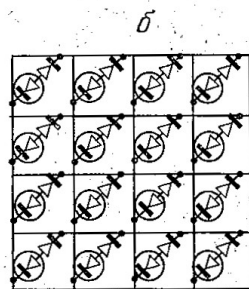
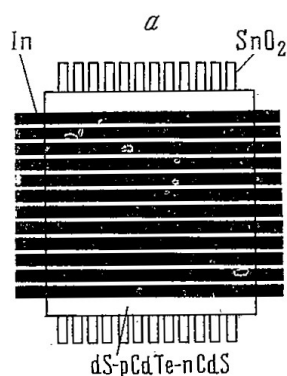


Рис. 2. Принципиальное устройство *a* и эквивалентная схема *б* фотодиодно-диодной матрицы

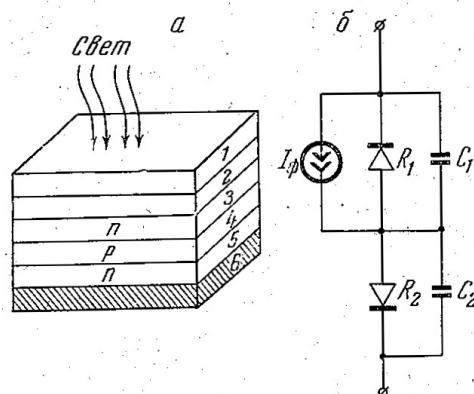


Рис. 3. Структура *a* и эквивалентная схема *б* элемента фотодиодно-диодной матрицы: 1 — подложка, 2 — SnO_2 , 3 — $n\text{CdS}$, 4 — $p\text{CdTe}$, 5 — $n\text{CdS}$, 6 — In

цы к источнику питания и сопротивлению нагрузки, создавая таким образом на последнем видеосигнал. Системой ключей управляют генераторы строчной (ГСР) и кадровой (ГКР) разверток.

Генераторы разверток могут быть выполнены в виде сдвигающих регистров с параллельным выходом либо в виде дешифраторов. Для матриц с небольшим числом шин предпочтительным оказалось применение двухступенчатого дешифратора на интегральных логических элементах. Управ-

ляет дешифратором пятиразрядный двоичный счетчик, осуществляющий пересчет тактовых импульсов (ТИ), или синхроимпульсов (СИ), поступающих на его вход. Собранный по такой схеме генератор развертки состоит из меньшего числа элементов, чем сдвигающий регистр на такое же число выходов.

Полная схема датчика изображения, состоящего из фотодиодно-диодной матрицы и развертывающего устройства, показана на рис. 4. Распространение положительного импульса V_0 вдоль строк, т. е. от одной вертикальной шины к другой, осуществляется с помощью транзисторных ключей $T_1, T_2, \dots, T_{20}$. Система ключей $T_{21}, T_{22}, \dots, T_{40}$ подсоединяет одну из горизонтальных шин к сопротивлению нагрузки R_H и заземляет все остальные. Опрашиваемый элемент матрицы находится между горизонтальной и вертикальной шинами, на ключи которых в данный момент поступают запирающие импульсы от ГСР и ГКР.

Разработанное и изготовленное нами развертывающее устройство характеризуется следующими рабочими параметрами: амплитуда опрашивающего импульса $V_0 = 5 \div 20$ В; длительность опрашивающего импульса $T_1 \geq 5 \cdot 10^{-7}$ с; период опрашивающего импульса (период накопления) $T_2 \geq 20 T_1$; сопротивление на-

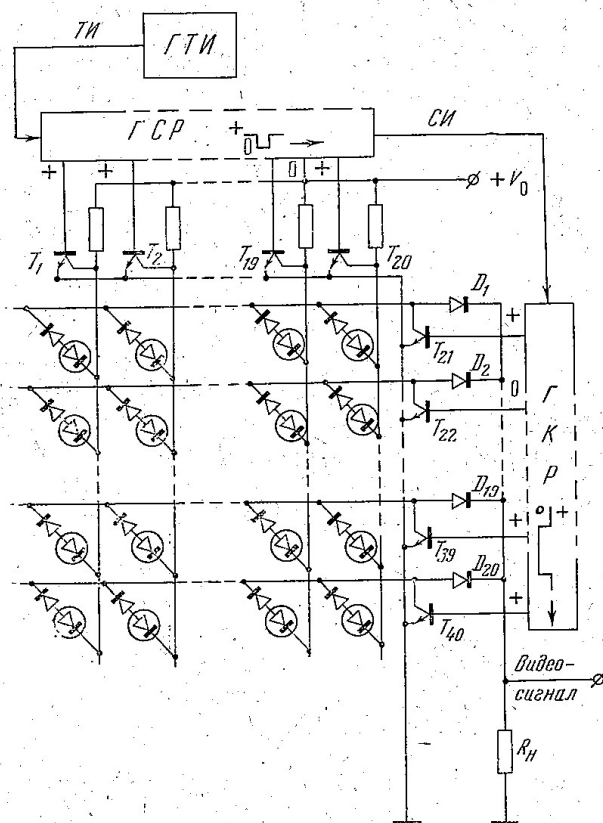


Рис. 4. Схема датчика изображения: ГТИ — генератор тактовых импульсов, ГСР, ГКР — генераторы строчной и кадровой разверток

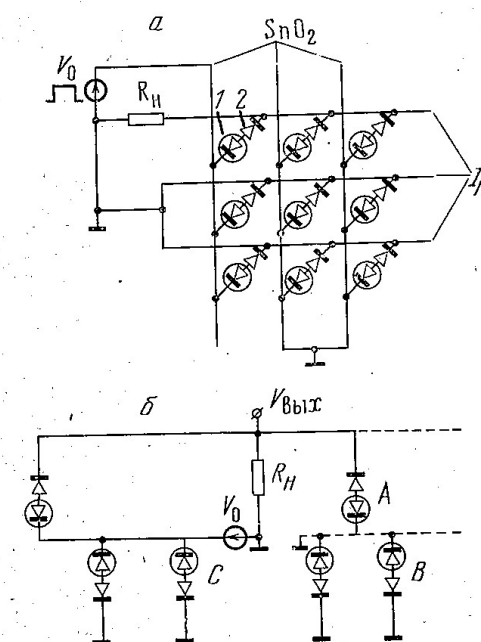


Рис. 5. Схема получения видеосигнала с фотодиодно-диодной матрицы а и ее эквивалент, иллюстрирующий электрический режим всех элементов б

грузки $R_H = 10^3 \div 5 \cdot 10^4$ Ом; амплитуда видеосигнала при $V_0 = 10$ В, $R_H = 2 \cdot 10^4$ Ом: $v \approx 10^{-2} \div 10^{-1}$ В.

Возможность изменения характеристических параметров развертывающего устройства позволяла исследовать работу фотодиодно-диодной матрицы в различных режимах.

Работу датчика изображения моделируют схемы, изображенные на рис. 5. Кроме режима коммутации, когда емкость фотодиода заряжается

через сопротивление R_H до значения $Q \approx C_1 V_0$, каждый элемент матрицы проходит за время опроса кадра еще через три других состояния, обозначенные на рис. 5 буквами A , B и C . В состояниях A и B (режим накопления заряда [7, 9]) емкость фотодиода разряжается фототоком I_Φ и темновым током I_T . В состоянии C (режим стирания информации) емкость снова, но уже неконтролируемым образом заряжается до значения $Q = C_1 V_0$. В положении A находятся элементы, расположенные в той же строке, что и опрашиваемый элемент; в положении C — элементы того же столбца; в положении B — все остальные элементы матрицы. Изображенная на рис. 5, б схема поясняет токовый режим элемента в условиях коммутации, накопления и стирания информации.

При идеальных развязывающих ключах, когда выполняются неравенства (см. рис. 3, б)

$$R_2^+ \ll R_H \ll R_2^-; C_2 \ll C_1, \quad (1)$$

и при условиях

$$R_H C_1 \ll T_1; R_H \ll R_1; R_H \ll V_0 / I_\Phi, \quad (2)$$

обеспечивающих полную зарядку емкости фотодиода за время опроса элемента ($Q \approx C_1 V_0$), выходное напряжение на нагрузке R_H равно

$$V_H(B, t) = (R_1 I_\Phi + V_0) [1 - \exp(-T_2 / R_1 C_1)] \exp(-t / R_H C_1). \quad (3)$$

Поскольку сопротивление R_1 и емкость C_1 p - n -перехода зависят от смещающего напряжения V , которое изменяется при зарядке и разрядке емкости фотодиода, последнее выражение справедливо в том и только в том случае, когда эти изменения пренебрежимо малы, т. е. когда $V(t) \approx V_0$. Соответствующие условия представлены неравенствами

$$T_2 \ll R_1 C_1; T_2 \ll C_1 V_0 / I_\Phi. \quad (4)$$

Соответственно

$$V_H(B, t) = (I_\Phi + V_0 / R_1) \frac{T_2}{C_1} \exp(-t / R_H C_1), \quad (5)$$

где

$$R_1 = R_1(V_0); C_1 = C_1(V_0).$$

Формулы (1), (2) и (4) выражают условия работы фотодиодно-диодной матрицы в режиме накопления заряда. При этом амплитудное и среднее значения выходного тока соответственно равны ($I_{r0} = V_0 / R_1$)

$$I_{h0} = (I_\Phi + I_{r0}) (T_2 / R_H C_1); \quad \bar{I}_h = (I_\Phi + I_{r0}) (T_2 / T_1). \quad (6)$$

Хотя $\bar{I}_h \ll I_{h0}$, однако амплитудные значения тока искажаются значительными паразитными эффектами, связанными с перезарядкой ключа $R_2 C_2$ при его отпирании (коммутационный шум), поэтому индикация по $\bar{I}_h$ предпочтительнее. Именно такая индикация осуществляется при воспроизведении изображения на экране видеоконтрольного устройства. Отличие неравенств (1), (2) и (4) от известных условий накопления заряда [7] связано с тем, что в фотодиоде в отличие от фоторезистора фототок не зависит от приложенного напряжения.

Рассмотренные выше условия коммутации обеспечивают режим накопления заряда, при котором чувствительность датчика изображения существенно повышается как вследствие увеличения в T_2 / T_1 раз выходного сигнала, так и вследствие того, что ток коммутации пропорционален не мгновенному значению освещенности B в момент опроса каждого элемента, а среднему значению B за время накопления T_2 . Сказанное относится к чувствительности, определяемой шумами измерительного тракта, а так-

же флуктуационными шумами темнового тока и фототока. В отличие от единичного фотоприемника в матрице существенную роль играет дисперсия параметров от элемента к элементу. Замечая, что информативным членом выражения для I_k является $I_\Phi = \beta V$, видим, что в многоэлементном фотоприемнике возникают еще дисперсионные шумы δI_{τ_0} и $\delta \beta \bar{V}$ (см. формулу (6)). Если дисперсионные шумы, вызванные разбросом параметров элементов матрицы, превышают флуктуационные шумы в каждом элементе и шумы измерительного тракта, то режим накопления заряда не повышает чувствительности датчика изображения. Следовательно, работа твердотельного датчика изображения в режиме накопления заряда предъявляет жесткие требования к идентичности элементов матрицы.

Нами был изготовлен и исследован лабораторный макет твердотельного датчика изображения, состоящий из гетероструктурной матрицы $\text{SnO}_2\text{-}n\text{CdS-}p\text{CdTe-}n\text{CdS-Me}$ с 400 элементами на 1 см^2 и развертывающего устройства. На рис. 6 приведены фотографии объекта и его изображения, полученного на экране видеоконтрольного устройства с помощью описанного выше датчика.

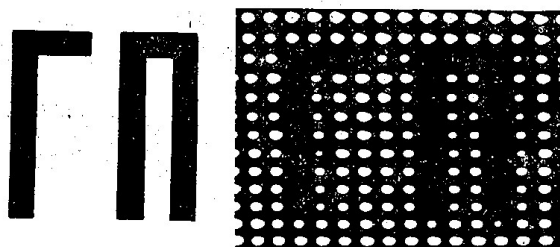


Рис. 6. Фотография объекта *a* и его изображения, полученного с помощью пленочной гетероструктурной матрицы *b*

Поступила в редакцию
20 июля 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адирович Э. И., Юабов Ю. М., Ягудаев Г. Р. Физика и техника полупроводников, 1969, т. 3, № 1, стр. 81; Докл. АН СССР, 1970, т. 192, № 4, стр. 764; Proc. Conf. Phys. and Chem. Semic. Heterojunct. and Layer Structures, Budapest, 1971, vol. 2, p. 151; Phys. Stat. Sol. (a), 1971, vol. 6, p. 311; Докл. АН СССР, 1972.
2. Павленко А. А., Музалевский Е. А., Конозенко И. Д. Изв. АН СССР, Неорганические материалы, 1967, т. 3, стр. 1139.
3. Лист В. Зарубежная радиоэлектроника, 1969, т. 5, стр. 72.
4. Масловский Ф. Н. Полупроводниковая техника и микроэлектроника, Киев, «Наукова думка», 1966, стр. 92.
5. Хортон И. В., Мацца Р. В., Дим Х. ТИИЭР, 1964, т. 52, стр. 1461.
6. Берковская К. Ф., Берковский Ф. М. Радиотехника и электроника, 1966, т. 11, стр. 1530.
7. Weimer P. K. et al. Proc. IEEE, 1967, 55, p. 1591.
8. Шимулите Е. А. Электрические и фотоэлектрические свойства пленочных систем CdTe — металл и $\text{CdTe}(n)$ — $\text{CdTe}(p)$, (автореферат), Вильнюс, 1964.
9. Веклер Г. П. Электроника, 1967, т. 40, стр. 19.