

Академик АН УзССР Э. И. АДІРОВИЧ, Ю. М. ЮАБОВ, Г. Р. ЯГУДАЕВ

ПЛЕНОЧНЫЕ ФОТОДИОДНО-ДИОДНЫЕ МАТРИЦЫ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ $n\text{CdS} - p\text{CdTe} - n\text{CdS}$

1. Исследования электрических и фотоэлектрических явлений на гетеропереходе $n\text{CdS} - p\text{CdTe}$ позволили построить 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 $\text{CdS} - \text{CdTe}$ не уступают по своим характеристикам гетероструктурам $\text{CdS} - \text{CdTe}$ на монокристаллах ⁽²⁾.

Результаты проведенных нами исследований показали, что гетеропереходы на поликристаллических пленках, изготовляемых 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 вы-

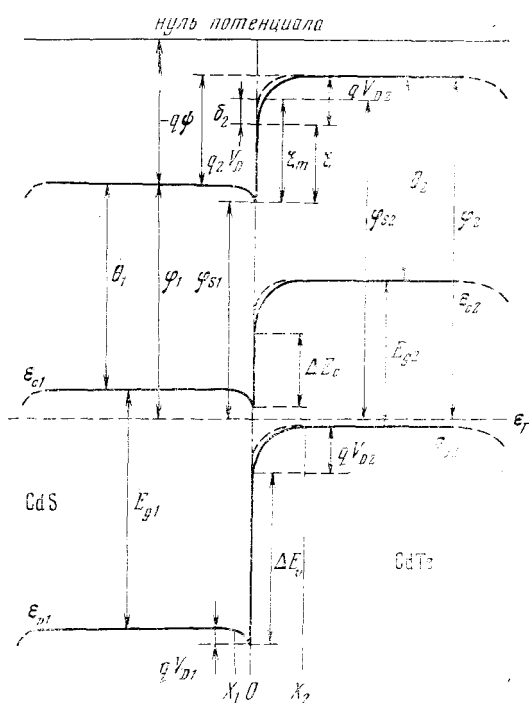


Рис. 1. Зонная схема гетероперехода $n\text{CdS} - p\text{CdTe}$. ψ — электрический потенциал; ϕ — электронное сродство; Φ — работа выхода; E_g — ширина запрещенной зоны; ΔE_c и ΔE_v — разрывы зоны проводимости и валентной зоны; V_D — диффузионный потенциал, ξ — изменение энергии, обусловленное электрическим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

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

ходных сигналов, как это делается в сканисторах (⁵, ⁹) или в фоторезистивно-диодной матрице (⁶). В кругу идей, развитых в наших работах (¹), естественно искать решение путем создания многослойной структуры с двумя гетеропереходами.

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

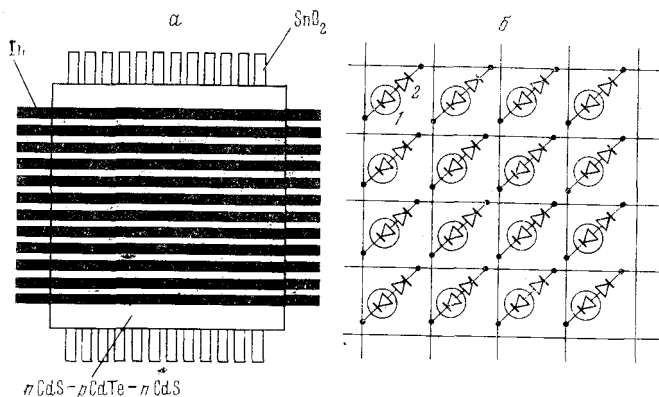


Рис. 2. Принципиальное устройство (а) и эквивалентная схема (б) фотодиодно-диодной матрицы

товления описываемого 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 $n\text{CdS} - p\text{CdTe}$,

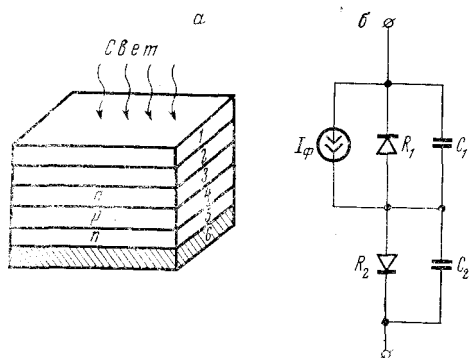


Рис. 3. Структура (а) и эквивалентная схема (б) элемента фотодиодно-диодной матрицы: 1 — подложка; 2 — SnO_2 ; 3 — $n\text{CdS}$; 4 — $p\text{CdTe}$; 5 — $n\text{CdS}$; 6 — In

с площадью 1 мм^2 были сняты вольт-амперные характеристики (в.а.х.) в темноте и при освещении. Темновые характеристики представляют собой в.а.х. гетероперехода $n\text{CdS} - p\text{CdTe}$, смещенного в обратном направлении, ток в котором обусловлен зинеровским туннелированием электронов из

одного из которых, ближайший к подложке, работает в режиме аналогового фотопреобразователя, а второй служит электрическим ключом, осуществляющим развязку элементов при их коммутации (рис. 3). Поскольку длина диффузии электронов в пленке теллурида кадмия $L_D \sim 10^{-5} \text{ см}$ (⁷), а толщина пленки $d \geq 10^{-4} \text{ см}$, фототранзисторные 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 $n\text{CdS} - p\text{CdTe} - n\text{CdS}$

валентной зоны CdTe в зону проводимости CdS. Фототок I_{ϕ} линейно зависит от освещенности B .

При нормировке к плотностям тока в.а.х., снятые на элементах матрицы и дискретных элементах с площадью 1 мм^2 , совпадают.

Спектры фоточувствительности элемента фотодиодно-диодной матрицы и гетероперехода $n\text{CdS} - p\text{CdTe}$ одинаковы ($0,5 - 0,8 \text{ мкм}$), 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.

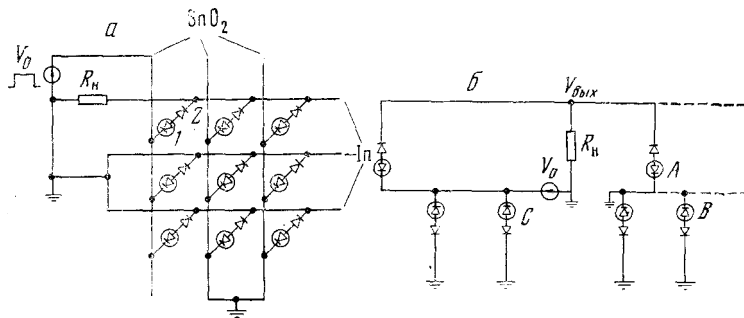


Рис. 4. Схема считывания видеосигнала с фотодиодно-диодной матрицы (а) и ее эквивалент, иллюстрирующий электрический режим всех ее элементов (б)

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.

3. Исследование фотодиодно-диодных матриц производилось с помощью схемы, изображенной на рис. 4а и моделирующей условия коммутации матрицы при ее поэлементном опросе. Все неопраниваемые в данный момент шины закорочены на землю, благодаря чему протекающий через нагрузку R_H паразитный ток минимален.

Расположение генератора прямоугольных импульсов V_0 и нагрузки R_H , показанное на рис. 4, соответствует считыванию информации по строкам. Кроме режима коммутации, когда емкость фотодиода C_1 заряжается через сопротивление нагрузки R_H до значения $C_1 V_0$, каждый элемент матрицы проходит за время опроса кадра еще через три другие состояния, обозначенные на рис. 4б буквами А, В, С. В состояниях А и В (режим накопления заряда ⁽⁸⁾) внешнее напряжение на элементе равно нулю и емкость фотодиода разряжается фототоком I_{ϕ} и темновым током I_T . В состоянии С (режим стирания информации) емкость фотодиода снова, но уже неконтролируемым образом заряжается до значения $C_1 V_0$. В положении А находятся элементы, расположенные в той же строке, что и опрашиваемый элемент; в положении С — элементы того же столбца; в положении В — все остальные элементы.

Расчет показывает, что при выполнении неравенств

$$T_2 \ll R_1 C_1, \quad T_2 \ll \frac{C_1 V_0}{I_\Phi}, \quad T_1 \gg (R_H + R_2^+) C_1; \quad (1)$$

$$(R_H + R_2^+) \ll R_1, \quad \frac{V_0}{R_H + R_2^+} \gg I_\Phi; \quad C_2 \ll C_1,$$

где R_2^+ — сопротивление ключа в прямом направлении, T_1 — время опроса элемента, а T_2 — время нахождения его в режиме накопления перед опросом, среднее значение тока через нагрузку R_H (тока коммутации) равно

$$I_K = \left(I_\Phi + \frac{V_0}{R_1} \right) \frac{T_2}{T_1}. \quad (2)$$

Поскольку $I_\Phi = \beta B$, а отношение $T_2 / T_1 \gg 1$, условия коммутации, описываемые неравенствами (1), обеспечивают режим накопления заряда, при котором чувствительность матрицы как датчика изображения существенно повышается как вследствие увеличения в T_2 / T_1 раз информационных сигналов, так и вследствие того, что коммутируемый ток пропорционален не мгновенному значению освещенности B в момент опроса данного элемента, а среднему значению B за время накопления T_2 . Заметим еще, что в режиме накопления заряда напряжение на фотодиоде все время остается почти равным V_0 и поэтому исключаются зависимости R_1 и C_1 от V , вносящие в общем случае существенные и трудно анализируемые нелинейности в соотношение между освещенностью элемента B и его током коммутации I_K .

Отличие неравенств (1) от известных условий режима накопления заряда (⁶, ⁸) связано с тем, что в фотодиоде в отличие от фоторезистора фототок не зависит от приложенного напряжения.

4. Нами были изготовлены и исследованы лабораторные макеты фотодиодно-диодных матриц $\text{SnO}_2 - n\text{CdS} - p\text{CdS} - \text{In}$ со 144 элементами на 1 см^2 , работающие в режиме накопления заряда при $T_1 = 10^{-8}$ сек. и $T_2 = 10^{-4}$ сек., т. е. при времени накопления, равным времени опроса кадра. Если же за время накопления выбрать период опроса одной строки, чему и соответствует схема коммутации, изображенная на рис. 4, то из полученных результатов следует, что разработанные гетероструктуры позволяют создать датчик изображения с числом элементов порядка 10^4 .

Измеренный на лабораторных образцах гетероструктурных датчиков изображения порог чувствительности по свету составляет по порядку величины 100 лк. Он определяется разбросом токов по элементам матрицы.

Физико-технический институт
им. С. В. Стародубцева
Академии наук УзССР
Ташкент

Поступило
9 VI 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Э. И. Адирович, Ю. М. Юабов, Г. Р. Ягудаев, Физ. и техн. полупроводников, 3, № 1, 81 (1969); ДАН, 192, № 4, 764 (1970); Proc. of the Intern. Conf. on the Physics and Chemistry of Semiconductor Heterojunctions and Layer Structures, 2, Budapest, 1971, p. 151; Phys. Stat. Sol. A, 6, 311 (1971).
- ² А. А. Павленко, Е. А. Музалевский, И. Д. Конозенко, Неорганические материалы, 3, 1139 (1967).
- ³ В. Лист, Зарубежная радиоэлектроника, 5, 72 (1969).
- ⁴ Ф. Н. Масловский, Полупроводниковая техника и микроэлектроника, Киев, 1966, стр. 92.
- ⁵ И. В. Хортоп, Р. В. Мацца, Х. Дим, Тр. Инст. инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, 52, 1461 (1964).
- ⁶ Р. К. Weimer et al., Proc. IEEE, 55, 1591 (1967).
- ⁷ Е. А. Шимулите, Электрические и фотоэлектрические свойства пленочных систем CdTe — металл и $\text{CdTe}(n) - \text{CdTe}(p)$, Автореф. кандидатской диссертации, Вильнюс, 1964.
- ⁸ Г. П. Веклер, Электроника, 40, 19 (1967).
- ⁹ К. Ф. Берковская, Ф. М. Берковский, Радиотехника и электроника, 11, 1530 (1966).