

УДК 621.382.52

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В.А. СЫЧИК, Н.Н. УЛАСЮК

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 1 декабря 2011

Рассмотрены структурная схема, зонная диаграмма, принцип работы и электрофизические свойства полупроводникового преобразователя изображения, выполненного на основе *p-n* Si-ZnSe матричной структуры. Показано, что *p-n* Si-ZnSe фотодиодная матрица может быть использована в качестве чувствительного устройства радиационных и оптических интроскопов.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь, матричная структура, зонная диаграмма, электрофизические свойства.

В запоминающих устройствах цифровой вычислительной техники применяются диодные матрицы, представляющие совокупность *p-n*-переходов, выполненных в одном кристалле кремния. Известны работы, в которых кремневые *p-n*-структуры используются в качестве фотоприемных матриц [1]. В свою очередь, на основе тонкопленочных гетероструктур из соединений $A^{IV}B^{VI}$ была получена фотодиодная матрица [2], а также устройство для преобразования оптического изображения в электрический сигнал. Однако в литературе отсутствуют сведения о возможности использования гетероструктур на основе кремния и соединений $A^{IV}B^{VI}$ в качестве преобразователей оптического сигнала в электрический. В настоящей работе излагаются методика получения и принцип работы датчика изображения выполненного на основе *p-n* Si-ZnSe-структур.

Изготовление фотодиодно-диодной матрицы, представляющей *p-n* Si-ZnSe-систему, включало механическую обработку низкоомной кремниевой подложки, эпитаксиальное наращивание высокоомного слоя кремния, создание базовой области, используя операции окисления слоя Si, выявления базовых окон с помощью фотолитографии и диффузионную загонку бора, нанесение на образованную мозаику резистивного слоя селенида цинка и на низкоомную поверхность кремниевой подложки слоя никеля (омический контакт) с последующим его вжиганием в атмосфере аргона при $T=550^{\circ}\text{C}$ в течение 10 мин.

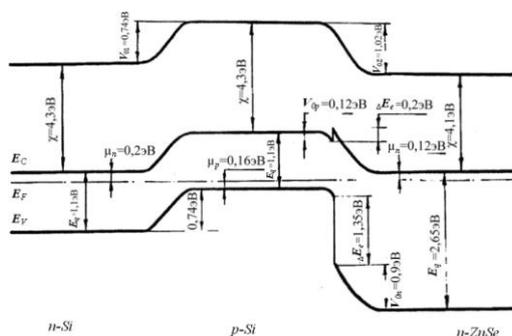


Рис 1. Зонная диаграмма фотоодно-диодной матрицы на основе *nSi-pSi-nZnSe* пленочных структур

Каждый элемент матрицы состоит из гомо- и гетероперехода, один из которых, ближайший к подложке (кремниевый *p-n*-переход) работает в режиме аналогового преобразователя.

ля, поскольку обладает широкой полосой спектральной чувствительности с высоким значением квантового выхода в полосе, а второй – гетеропереход – служит электрическим ключом, осуществляющим развязку элементов при их коммутации в момент воздействия оптического сигнала. Как явствует из зонной диаграммы (рис. 1), диоды элемента матрицы включены встречно анодами, а сами элементы соединены между собой с помощью сопротивления утечки. С целью исключения транзисторного эффекта толщина базовой p -области каждого элемента выбиралась из условия $d_{\delta} > L_d$, где d_{δ} – толщина базовой области, L_d – диффузионная длина неосновных носителей.

Для выяснения механизма переноса носителей в указанной матрице были исследованы вольтамперные и вольтемкостные характеристики каждого из его переходов. ВАХ и ВЕХ кремниевого перехода снимались на структуре матрицы после напыления алюминия в открытые базовые окна, а для определения ВАХ и ВЕХ $pSi-nZnSe$ -гетероперехода использовалась кремниевая подложка p -типа с идентичными свойствами, на ориентированную поверхность которой методом трех температурных зон наносился слой $ZnSe$. Омическим контактом к слою $ZnSe$ и кремнию служит алюминий.

Результаты исследований показали, что барьерная емкость $p-n$ Si -перехода более чем в 5 раз превышает диффузионную емкость $pSi-nZnSe$ гетероперехода, а коэффициент выпрямления по току гетероперехода $K_I = 5 \cdot 10^2$.

С учетом экспериментальных данных и зонной диаграммы $nSi-pSi-nZnSe$ -структуры, можно предположить, что вероятной моделью, характеризующей механизм переноса носителей через данную структуру, является рекомбинационно-туннельная модель, для которой основными составляющими тока, текущего через $pSi-nZnSe$ -гетеропереход, являются: поток дырок, туннелирующих из кремния в межповерхностные состояния, поток электронов из $ZnSe$, туннелирующих в межповерхностные состояния и инжектирующих в зону проводимости кремния.

Сформированная $nSi-pSi-nZnSe$ -фотодиодная матрица была опробована в качестве фотоматрицы видеоконцентра. Она закреплялась в отверстии экрана разборной электронно-оптической системы, причем к ее кольцевому омическому контакту через сопротивление нагрузки 5 кОм подводилось напряжение смещения обратной полярности к кремниевому $p-n$ -переходу матрицы. Оптический ввод изображения осуществлялся через кремниевую подложку. Для преобразования потенциального рельефа, созданного на элементах матрицы световым потоком, использовалось считывающее устройство, представляющее сфокусированный пучок электронов.

Принцип работы преобразователя изображения на основе $nSi-pSi-nZnSe$ -структур иллюстрирует рис. 2, на котором представлена эквивалентная схема двух его элементов. Работа матрицы характеризуется тремя стадиями, которые проходит каждый ее элемент за период времени между двумя последующими процессами считывания информации.

Режим накопления заряда. Ему соответствует такое состояние, когда световой поток воздействует на поверхность фотодиодов матрицы при отсутствии коммутации цепи. Емкость C_1 каждого элемента матрицы заряжается фототоком I_{ϕ} до напряжения $U_0 = I_{\phi} \cdot R_1$, причем величину фототока можно определить из выражения

$$I_{\phi} = e \cdot S \cdot \beta \cdot \eta \cdot J_V (\mu_n \cdot \tau_n + \mu_p \cdot \tau_p) \cdot U_d, \quad (1)$$

где J_V – плотность потока фотонов (фотон/см²·сек); S , β , e – соответственно, площадь, квантовый выход и заряд электрона; μ_n , μ_p , τ_n , τ_p – подвижность и время жизни фотогенерированных электронов и дырок; U_d – величина фото ЭДС $p-n$ Si -перехода.

Если разброс соответствующих номиналов R и C элементов матрицы незначительный, а освещенность ее поверхности равномерная, то можно показать, что потенциалы в точках A и B схемы одинаковы (по модулю и знаку), поэтому ток утечки равен нулю и емкости C_2 не заряжены, а диоды R_2 (гетеропереходы) полностью блокируют накопленный на емкостях C_1 заряд, пропорциональный I_{ϕ} и равный $Q_0 = I_{\phi} R_1 C_1$. В случае наличия градиента светового потока на поверхности элементов матрицы возникает разностный ток, который накладывается на фототок каждого элемента и соответствующим образом изменяет заряд Q_0 на емкости C_1

$$I_s = \frac{(I_{\delta 1} - I_{\delta 2})}{2R_2 + R_3}. \quad (2)$$

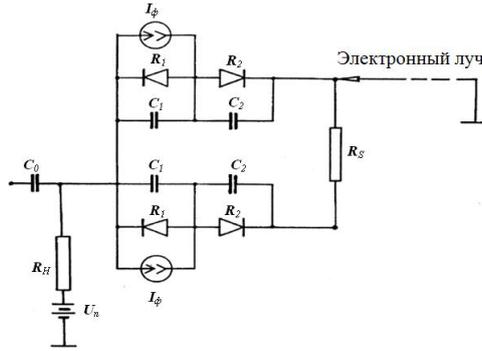


Рис 2. Схема получения видеосигнала на элементах фотодиодно-диодной матрицы.

Однако, поскольку $(R_s + 2R_2) \gg R_1$, этот ток чрезвычайно мал, т.е. $I_\phi \gg I_s$ и заряд, накапливаемый на емкости C_1 каждого элемента матрицы, пропорционален освещенности его поверхности. Следовательно, на элементах матрицы образуется потенциальный рельеф, пропорциональный световому потоку.

Режим опроса (коммутации). В данном случае электронный луч, достигая поверхности ZnSe-элемента матрицы, замыкает цепь источника питания. Для выходного напряжения введем следующие параметры считывающего устройства: длительность опрашивающего импульса T_1 (время коммутации элемента); период опрашивающего импульса T_2 (время между двумя последующими моментами коммутации), $T_2 \gg T_1$; амплитуда опрашивающего импульса $U_s = kU_n$, где k – коэффициент пропорциональности. В момент коммутации элемента в нагрузочной цепи протекает ток, обусловленный источником питания, который представляет темновой ток элемента матрицы

$$I_T = U_n / (R_H + R_1 + R_2 + R_0). \quad (3)$$

При условиях

$$R_H C_1 < T_1, R_H \ll R_1, I_T \ll I_\phi, \quad (4)$$

конденсатор C_1 разряжается до $Q_1 = I_T R_1 C_1$, а выходное напряжение на нагрузочном сопротивлении равно

$$U_H(\Phi_{0,1}) = I_T + \frac{U_1 - U_0}{R_1} \exp\left\{-\frac{t}{(R_H + R_0 + R_2)}\right\} \cdot R_H = I_n \cdot R_H \quad (5)$$

Кроме того емкость C_2 заряжается до $Q_2 = I_n R_2 C_2$, т.к. $C_2 R_2 \ll C_1 R_1$. Режим коммутации элемента A практически не вызывает существенного перераспределения напряжения на $R_1(C_1)$ элемента вследствие блокирующего действия гетеродиодного ключа и высокого сопротивления утечки ($R_s = 10^{10}$ см). Поэтому обеспечиваются хорошая развязка элементов матрицы и пропорциональность между коммутирующим током и локальной освещенностью.

Режим стирания информации. Этот режим наступает вслед за разрывом цепи источника питания и обусловлен зарядом емкости C_1 до значения Q_0 и разрядом емкости C_2 . Поскольку $R_2 C_2 < R_1 C_1 < T_2$, то происходит полное стирание информации за период между двумя моментами считывания. Для надежной работы упомянутой матрицы в качестве датчика изображения (мозаичного преобразователя радиационных интроскопов) необходимо, кроме выполнения условия (1), сведение к минимуму разброса параметров элементов матрицы, наличие которого приводит к появлению дисперсионного члена в выражении (2) и существенному снижению его чувствительности. Испытания Si-ZnSe фотодиодно-диодной матрицы показали: темновой ток элемента матрицы при $U_n = 10$ В, $R_H = 5$ кОм, $I_t = 1,5 \cdot 10^{-9}$ А; ток фотоотклика $I_\phi = (5 \dots 6) \cdot 10^{-7}$ А; фоточувствительность элементов матрицы при мощности излучения 1 мВт, $U_n = 10$ В составляет 0,12...0,2 А/Вт; время сохранения фоточувствительного состояния элементом матрицы – (0,5...3) мс.

Испытания также показали, что Si-ZnSe фотодиодная матрица может быть эффективно использована в качестве преобразователя изображения оптических и радиационных интроскопов.

Заключение

Сформированная на основе $n-p$ Si- n ZnSe матричная структура является высокоэффективным преобразователем оптических излучений видимого диапазона.

Полупроводниковая Si-ZnSe-матрица обладает высокими электрофизическими свойствами и может быть использована в качестве чувствительного устройства радиационных и оптических интроскопов.

SEMICONDUCTOR IMAGE CONVERTER

SYCHIC V.A., ULASYUK N.N.

Abstract

The structural scheme, band diagram, working principle and electrical properties of semiconductor image converter made with a $p-n$ Si-ZnSe matrix structure are reviewed. It's shown that the $p-n$ Si-ZnSe photodiode array can be used as a sensing device and optical radiation introsopes.

Список литературы

1. Сычик В.А. Измерительные преобразователи излучений на основе полупроводниковых приборных структур. Минск, 1991.
2. Махнат В.П. // Микроэлектроника. 1998. №2. С. 90–92.