

## **Механизм работы электронно-чувствительной ПЗС-матрицы – элемента электронно-оптического преобразователя**

***Константинов П. Б., Костюков Е. В., Скрылёв А. С., Чернокожин В. В.***

*Рассмотрены механизмы работы элемента электронно-чувствительной ПЗС-матрицы (ЭЧПЗС) с межстрочным переносом, предназначенной для работы в электронно-оптическом преобразователе (ЭОП) 5-го поколения, в котором ЭЧПЗС-матрица облучается с лицевой стороны. Впервые получены и исследованы образцы ЭЧПЗС с фронтальной бомбардировкой электронами.*

### ***Введение***

Известно[1], что электронно-оптические преобразователи (ЭОП), являющиеся основными элементами приборов ночного видения (ПНВ), обычно содержат фотоэмиттирующий катод для эмиссии потока электронов, соответствующего потоку излучения, которое проецируется на фотоэмиттирующий катод, ускоряющие и фокусирующие электроды и люминесцентный экран, видеоинформация с которого считывается внешней ПЗС-матрицей. Кроме того, современные ЭОП зачастую содержат микроканальную пластину (МКП), расположенную между фотоэмиттирующим катодом и люминесцентным экраном.

Улучшение характеристик ЭОП, в частности, было связано с более совершенным, чем в люминесцентном экране, преобразованием электронного изображения в видимое. Этот поиск привёл к идее построения так называемых ЭОП 5-го поколения, в которых ПЗС-матрица помещается внутрь вакуумированного корпуса ЭОП вместо экрана. При этом рабочей поверхностью у матрицы является её тыльная сторона, бомбардируемая электронами, и, таким образом, сенсор выполняется по схеме электронно-бомбардируемого ПЗС (electron-bombarded CCD-EBCCD). Высокоэнергетичные фотоэлектроны поглощаются в теле матрицы; энергия электронов, как и в конструкции суперкремникона, тратится на рождение пар электрон-дырка, диффундирующих к накопительным элементам матрицы. Для получения в этом случае необходимого разрешения требуется существенное уменьшение толщины матрицы до величины порядка 10-15 мкм.

В описываемых ЭОП принимаемое изображение преобразуется электронно-чувствительной ПЗС-матрицей (ЭЧПЗС) в видеосигнал и может наблюдаться на дистанционно удалённом дисплее. ЭОП такой конструкции выпускаются, в частности, фирмой HAMAMATSU и превосходят остальные типы ЭОП по информационной ёмкости и пороговой освещённости. Тем не менее, приборы такого типа подвергаются серьёзной справедливой критике [2], так как им присущ ряд существенных недостатков, связанных с малой толщиной матрицы и высокой энергией фотоэлектронов. Кроме того, ясно, что в описываемом приборе возможно использование только матриц с кадровым переносом, имеющих принципиальный недостаток – наличие «смаза» изображения при считывании сигнала.

### ***Механизм работы ЭЧПЗС-матрицы, облучаемой электронами с лицевой стороны***

Во ФГУП «НПП «Пульсар» был развит другой подход к созданию ЭОП 5-го поколения, в конструкции которого ЭЧПЗС-матрица обращена к падающему электронному потоку лицевой стороной [3,4] (рис. 1). В этом случае представляется возможность замены матрицы с кадровым переносом на матрицу с межстрочным

переносом и, кроме того, использования режимов работы с пониженным (по сравнению с обычным) напряжением, подаваемым на вакуумный промежуток между МКП и поверхностью матрицы. В результате отпадает необходимость уменьшения толщины матрицы, что существенно упрощает процесс её изготовления и монтажа в корпусе ЭОП, устраняется «смаз» изображения и ликвидируются негативные последствия от применения высоких электрических полей в пространстве МКП-ЭЧПЗС-матрица.

Конструкторско-технологическая реализация этого варианта описана в [5].

В нашем случае элементы ЭЧПЗС-матрицы облучаются потоком электронов, плотность которого в каждой точке зависит от яркости соответствующей точки принимаемого светового изображения. В качестве чувствительного к потоку электронов элемента как и в фоточувствительных ПЗС-матрицах (ФЧПЗС) используется р-п переход. В ФЧПЗС фотодиод элемента матрицы в каждом такте накопления (кадре) смещается в обратном направлении, получая часть напряжения, подаваемого на разрешающий затвор вертикального сдвигового регистра. За время накопления ёмкость фотодиода разряжается темновым (в отсутствие освещения) током или суммарным темновым и световым током. Кванты света, поглощаясь в толще полупроводника, рождают пары электрон-дырка, которые разделяются полем обратносмещённого р-п перехода фотодиода, – это и есть световой ток. Чем ярче точка сюжета, тем больше рождённых пар и больше степень разрядки р-п перехода. Р-п переход работает в так называемом режиме накопления. По окончании стадии накопления включается электрод вертикального регистра, который принимает заряд, прямо пропорциональный степени разрядки диода. В упрощённом виде описанную ситуацию можно представить в виде эквивалентной схемы (рис. 2). Полярность напряжения на схеме соответствует случаю n-p перехода (подложка р-типа проводимости, n-канальная ПЗС-матрица).

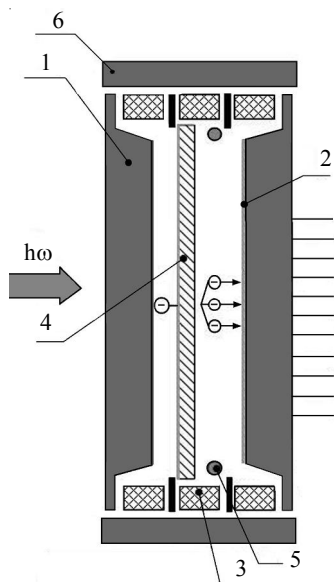


Рис. 1

Схема электронно-оптического преобразователя 5-го поколения:  
1 – фотокатод; 2 – ЭЧПЗС-матрица;  
3 – корпус; 4 – МКП; 5 – газопоглотитель;  
6 – высоковольтный источник питания

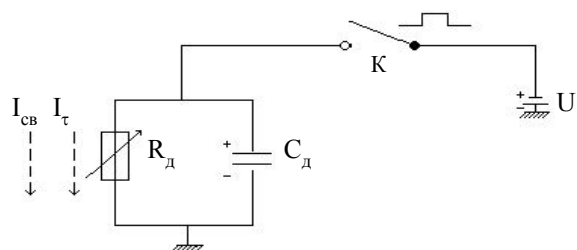


Рис. 2

Эквивалентная схема процесса накопления в фотодиоде ФЧПЗС-матрицы:  $C_d$ ,  $R_d$  – ёмкость и сопротивление обратносмещённого фотодиода;  $K$  – ключ, подающий на разрешающий затвор импульс положительного напряжения  $U_1$ ;  $I_\tau$ ,  $I_{cb}$  – темновой и световой токи разрядки ёмкости фотодиода

Процесс считывания накопленного фотодиодом заряда рассмотрен подробно в [6]), нас интересует только изменение состояния фотодиода при его освещении.

Световой поток при облучении ФЧПЗС-матрицы разряжает фотодиод, значит, электронный поток в случае электронно-чувствительной матрицы должен делать то же самое (разряжать фотодиод). При облучении матрицы высокоэнергетичными электронами с

обратной стороны матрицы все так и происходит (см. введение).

Рассмотрим ситуацию при облучении электронами лицевой поверхности матрицы с межстрочным переносом. В этом случае положительный потенциал цепи электронного потока подключается к подложке. Соответствующая эквивалентная схема представлена на рис. 3, где  $C_d$ ,  $R_d$  – ёмкость и сопротивление обратносмещённого фотодиода;  $K$  – ключ, подающий на разрешающий затвор импульс положительного напряжения  $U_1$ ;  $U_2$  – напряжение в цепи электронного луча (между катодом и ПЗС-матрицей либо при наличии МКП – между МКП и ПЗС-матрицей;  $R_{вп}$  – сопротивление вакуумного промежутка между лицевой поверхностью матрицы и катодом либо между матрицей и МКП (при наличии МКП).

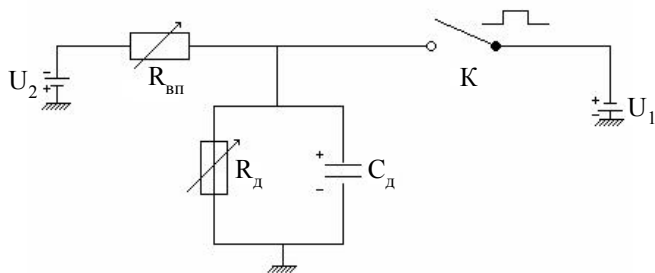


Рис. 3  
Эквивалентная схема  
процесса образования потенциала в элементе ЭЧПЗС

Предполагаем, что поверхность фотодиода покрыта металлической плёнкой и непосредственного взаимодействия электронов с поверхностью кремния нет. Полярность цепи электронного пучка, содержащей источник тока ( $U_2$ ,  $R_{вп}$ ), такова, что он стремится сместить p-n переход диода в прямом направлении. Значит, после подачи на p-n переход импульса напряжения от источника  $U_1$ , смещающего p-n

переход в обратном направлении, ёмкость диода начинает разряжаться суммарным током – темновым током p-n перехода и током цепи электронного луча. При этом ток электронного луча пропорционален освещённости фотокатода. Диод работает аналогично случаю с фотодиодом в ФЧПЗС-матрице. Однако, если в случаях разрядки накопительного диода в ФЧПЗС-матрице и в ЭЧПЗС-матрице при облучении её с обратной стороны световой ток разрядки связан с диффузией неосновных носителей к p-n переходу и их разделением полем p-n перехода, приводящим к уменьшению заряда ионизированных доноров и акцепторов в области объёмного заряда, то в данном случае «световой» ток – это дрейф основных носителей, вызванный полем источника  $U_2$ , которые также уменьшают заряд ионизированных доноров и акцепторов в области p-n перехода.

Рассмотренный механизм осуществим только в случае ПЗС-матриц с n-каналом. В случае p-канальной матрицы (подложка n-типа проводимости) полярность источника  $U_1$ , смещающего p-n переход в обратном направлении, изменится на противоположную и ток от источника  $U_2$  будет стремиться сместить p-n переход в обратном направлении. После получения от источника  $U_1$  импульса заряжающего напряжения ёмкость p-n перехода будет разряжаться темновым током и заряжаться световым(!), при этом потенциал на p-n переходе будет меньше темнового – никакого изображения мы не получим.

Это первый из двух возможных вариантов работы матрицы. Рассмотрим второй вариант.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда лицевая поверхность накопительного диода в ЭЧПЗС-матрице не покрыта металлической плёнкой. В этом случае при достаточной величине напряжения  $U_2$  (несколько кВ) электроны, бомбардирующие кремниевую поверхность p-n перехода, будут, как и в случае с матрицей, облучаемой электронным

потоком с тыльной стороны, генерировать пары электрон-дырка, которые будут диффундировать к n-p переходу, разряжая его. Такой режим работы позволит отказаться от МКП в конструкции ЭОП. При этом сам по себе ток цепи  $U_2$  при малых освещённостях будет недостаточен для эффективной разрядки ёмкости p-n перехода, но за счёт коэффициента умножения в толще кремния при рождении пар электрон-дырка будет получена необходимая степень разрядки. Достоинство такого режима работы – отсутствие в конструкции ЭОП микроканальной пластины и соответствующее уменьшение шумов преобразования, недостаток – высокие значения напряжения цепи электрического луча и соответствующие нежелательные сопутствующие эффекты. Кстати, в этом случае должны быть работоспособны и n- и p-канальные матрицы.

### Эксперимент

В соответствии с представлениями, описанными в предыдущем разделе, был разработан ЭЧ матричный ПЗС-модуль, состоящий из ЭЧПЗС-матрицы с межстрочным переносом, размещённой на вакуумно-плотном металлокерамическом основании. Этот модуль является частью металлокерамического корпуса ЭОП. Разработанная конструкция показана на рис. 4. ПЗС-матрица формата 2/3 дюйма с количеством элементов 532(г)х596(в) изготавливалась с использованием технологии изготовления ПЗС с объёмным каналом [7]. Структура элемента матрицы показана на рис. 5 (1 – n-p переход принимающего электроны диода; 2 – вертикальный сдвиговый регистр; 3 – подложка p-типа проводимости; 4 – электрод разрешающего затвора; 5 – слой нитрида кремния; 6 – слой двуокиси кремния; 7 – область разрешающего затвора; 8 – стоп-каналы).

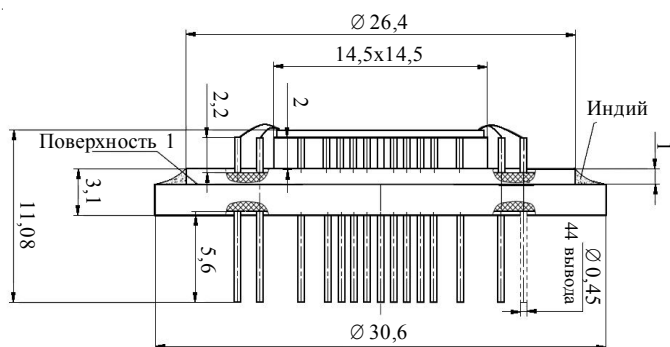


Рис. 4  
Конструкция ЭЧПЗС-модуля

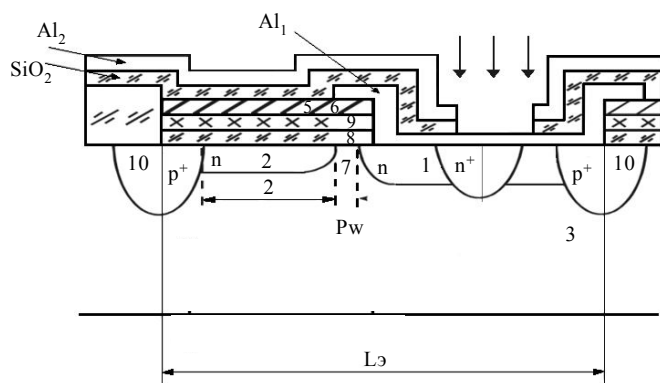


Рис. 5  
Структура элемента ЭЧПЗС-матрицы

Видно, что n-область n-p перехода, воспринимающего поток электронов, покрыта алюминиевой площадкой, то есть данная конструкция матрицы предназначена для работы в первом варианте проанализированных режимов.

Сначала работоспособность образцов проверялась в фотоэлектрическом режиме. Оказалось, что несмотря на наличие в разработанной конструкции матриц двухслойного алюминиевого экрана, при засветке ЭЧПЗС-матриц со стороны электронной структуры светом достаточно большой интенсивности излучение проникает через зазоры экранов вследствие переотражения в область накопительного диода, предназначенного для регистрации электронного потока. Будучи облучённым видимым излучением, этот n-p переход работает как фотодиод в обычной

---

фоточувствительной ПЗС-матрице, и мы наблюдаем изображение телевизионной тест-таблицы на экране монитора. Отобранные по данной методике образцы ЭЧ модулей монтировались в составе ЭОП с МКП на предприятии ОАО «НПО «Геофизика-НВ», где была продемонстрирована их работоспособность в режиме облучения матриц потоком электронов с лицевой стороны: получено чёткое изображение тест-таблицы с разрешением не хуже 350 телевизионных линий (см. также [5]). Величина напряжения между МКП и ЭЧПЗС составляла несколько сотен вольт. Наличие алюминиевой плёнки на поверхности принимающего электроны n-p перехода и малые значения напряжения между МКП и ЭЧПЗС убедительно доказывают, что данная конструкция ЭЧПЗС работала в режиме №1, обеспечивая работоспособность ЭОП при пониженных до нескольких сотен вольт напряжениях МКП-ЭЧПЗС.

### **Выводы**

Проведённый анализ возможных механизмов работы элемента электронно-чувствительной матрицы с зарядовой связью позволил сконструировать, изготовить и испытать образцы ЭЧПЗС-матриц с межстрочным переносом, предназначенных для работы в ЭОП 5-го поколения, в которых ЭЧПЗС-матрица облучается электронным потоком с лицевой стороны. Впервые получены и исследованы образцы ЭЧПЗС с фронтальной бомбардировкой электронами, работающие по одному из двух рассмотренных возможных вариантов. Представляет интерес создание и исследование образцов ЭЧПЗС с фронтальной бомбардировкой электронами, работающих по второму из рассмотренных механизмов работы.

### **Литература**

1. С. В. Куклев, Д. С. Сколов, И. Н. Зайдель // Электронно-оптические преобразования. – М. – 2004.
2. В. П. Бегучёв, А. Л. Чапкевич, А. М. Филачёв // Прикладная физика. – № 2. – 1999.
3. Международный патент WO03/032358 A1 от 17.04.2003г. Benz R. G., Thomas N. L., Smith A. W.
4. Патент на изобретение №2324256 от 17.11.2006. Константинов П. Б., Концевой Ю. А., Костюков Е. В., Скрылёв А. С., Чернокожин В. В., Дегтярёв Е. В., Терехов А. С., Шайблер Г. Э., Косолюбов С. Н.
5. Константинов П. Б., Костюков Е. В., Чернокожин В. В., Скрылёв А. С., Борисов И. С., Маклаков А. М. Электронный формирователь сигнала изображения для электронно-оптических преобразователей 5-ого поколения // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – Вып. 2(223). – С. 62-68.
6. Борисов И. С., Костюков Е. В., Пугачёв А. А. Автоматизированное проектирование элемента электронно-чувствительной ПЗС-матрицы // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2010. – Вып. 2(225). – С. 61-68.
7. Костюков Е. В., Маклаков А. М., Скрылёв А. С. Семейство крупноформатных линейных фоточувствительных приборов с зарядовой связью с разрешением 38,5 пар лин/мм // Оптический журнал. – 2009. – Том 76. – №12. – С. 20-26.